

Jahresbericht 2003, 8. Dezember 2003

Projekt

Luftkühleroptimierung durch Reduktion von Eis- und Frostbildung

Autor und Koautoren	L. Berlinger, K. Hilfiker, M. Imholz, R. Sahinagic
beauftragte Institution	IPE (Institut für Produktentwicklung) HTA Luzern
Adresse	Technikumsstrasse 21, 6048 Horw
Telefon, E-mail, Internetadresse	041349 35 58 www.hta.fhz.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100059/150060
Dauer des Projekts (von – bis)	15.03.2003-30.08.2004

ZUSAMMENFASSUNG

Im ersten Teil des Projekts LOREF wurde eine Versuchsanlage aufgebaut: Ein *Versuchsluftkühler 1*, eine einseitig gekühlte Platte, und die dazu notwendige Luftaufbereitungsanlage wurden konzipiert, hergestellt und montiert. Die anfänglich relativ grossen Wärmeeinbrüche in den Versuchsluftkühler wurden durch eine Kühlbox weitgehend eliminiert.

Die Frostbildungs- und Abtauversuche wurden an einem 12 mm breiten Spaltkanal gemacht. Die Versuche über die Frostbildung haben ergeben, dass der Wärmestrom trotz wachsender Frostschrift quasi konstant bleibt, dies über Frostdicken bis zu 5 mm und über 8 Stunden Betriebszeit. Dieses Verhalten wird durch die Verdichtung und die somit erhöhte Wärmeleitfähigkeit des Frosts erklärt. Bei den Abtauversuchen konnte bei bestimmten Betriebsbedingungen ein partielles Abgleiten von Matsch beobachtet werden. Unterschiede zeigen sich am Schluss der Abtauung: Je nach Betriebsbedingungen haften am Ende unterschiedlich viele Tropfen auf der Frostbildungsplatte.

In Versuchen mit einer *hydrophob beschichteten* Platte konnten zwei positive Trends festgestellt werden: Es entsteht ein etwas dichter Frost, was eine erhöhte Wärmeleitfähigkeit und somit auch einen höheren übertragenen Wärmestrom zur Folge hat. Bei Versuchen über die Abtauung blieben am Ende nur wenige Tropfen auf der Frostbildungsplatte zurück.

Inhalt

1	Projektziele.....	2
2	Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse.....	3
2.1	Literatur-Recherche	3
2.1.1	Frost- und Eisbildung.....	3
2.1.2	Messung der Frostoberflächentemperatur	3
2.1.3	Auswirkung von Oberflächenbeschichtung auf die Frost- und Eisbildung	3
2.1.4	Abtauprozess	3
2.2	Konzept und Aufbau der Versuchsanlage und des VersuchsLuftklers 1.....	4
2.2.1	Aufbau der Versuchsanlage	4
2.2.2	VersuchsLuftkühler 1	5
2.2.3	Messdatenerfassung	6
2.2.4	Konstruktion, Fabrikation, Montage und Inbetriebsetzung der Versuchsanlage.....	6
2.3	Oberflächen-Beschichtung von Lamellen-Luftkühlern	6
2.3.1	Eigenschaften geeigneter Oberflächen-Beschichtungen	6
2.3.2	Erste Untersuchungen mit beschichteter Platte	6
2.4	Versuche am einseitig gekühlten ebenen Spaltkanal	7
2.4.1	Versuchsparameter	7
2.4.2	Durchgeführte Versuche.....	7
2.4.3	Versuchsauswertung	7
2.4.4	Ergebnisse der bisherigen Auswertungen.....	7
2.4.4.1	Eis- und Frostbildung an unbeschichteter Platte	8
2.4.4.2	Abtauung an unbeschichteter Platte	9
2.4.4.3	Verfrostungs- und Abtauversuche an hydrophob beschichteter Kühlplatte	11
2.5	Konzepte für VersuchsLuftkühler in weiteren Etappen	11
2.6	Optimale Geometrie eines LamellenLuftkühlers	12
3	Nationale Zusammenarbeit	12
4	Internationale Zusammenarbeit	12
5	Bewertung 2003 und Ausblick 2004.....	13
6	Referenzen.....	14

1 Projektziele

Im Forschungsprojekt LOREF soll die *energetische Effizienz von Luft/Wasser-Wärmepumpen* verbessert werden. Die Jahresarbeitszahl von Luft/Wasser-Wärmepumpen soll gesteigert werden: Als quantifizierbare Messgrösse gilt die Jahresarbeitszahl gängiger Wärmepumpen, die mit Erdwärmesonden als Anergiequelle arbeiten und zwar unter Berücksichtigung einwandfreier Nutzung der Aussenlufttemperatur bis -20°C .

Das Ziel des Projekts ist eine optimale Geometrie des Luftkühlers (Verdampfer) unter der Berücksichtigung der Vereisung und Verfroston bei den entsprechenden Umgebungsbedingungen. Dadurch sollen die Eigenschaften des Frosts so beeinflusst werden, dass sich möglichst wenig Frost aber mit hoher Dichte (und somit hoher Wärmeleitfähigkeit) bildet. Auch die Abtauung soll untersucht werden. Dabei wird untersucht, ob es genügt anstatt den ganzen Frost nur einen kleinen Teil des Frosts zu schmelzen: Der Frost soll auf einem Wasserfilm abgleiten können. Bei diesem als Anschmelzen bezeichneten Prozess wird untersucht, ob eine Oberflächen-Beschichtung –hydrophob oder hydrophil – einen Nutzen bringt.

Die Jahresziele des Projekts sind in der Offerte [2] formuliert. Für das Jahr 2003 gelten folgende Ziele:

- 1 ***Simulationen und Versuche zwischen zwei isotherm gekühlten ebenen Platten***
01.03.2003-31.10.2003
 - 1.1 ***Stand der Technik und Theoretische Untersuchung***
 - *Stand der Technik ermitteln (Literaturrecherche)*
 - *Mathematisch-physikalisches Modell für kombinierten Stoff- und Wärmeübergang für den "Vergletscherungsprozess" bei Lufttemperaturen von 4 bis -1°C anpassen und ergänzen*
 - *Einflussgrößen auf Frostbildung und somit den Wärmedurchgang des Luftkühlers ermitteln: Frostdicke, Frostwärmeleitfähigkeit= $f(\text{Frostdichte})$ etc.*
 - *Optimieren des Wärmeleitwiderstandes $\delta/(\lambda \cdot A)$ durch optimale Frostbildung*
 - 1.2 ***Versuche und Auswertungen***
 - *Versuchsanlage konzipieren und aufbauen*
 - *Versuchserie 1 an ebenen Platten durchführen: Eis- und Frostbildung; Einfluss von Nanobeschichtungen auf die Eis- und Frostbildung, Abtauen mit Anschmelzen und Ventilatornachlauf: mit und ohne Nanobeschichtungen; Temperaturbereich der Luft: vorwiegend bei 4°C bis -4°C aber auch bei Temperaturen von -12°C*
 - *Ergebnisse auswerten*
 - *Evtl. Simulationsprogramm ergänzen: empirische Korrelationen anpassen (Aufgrund der Ergebnisse)*
 - *Vergleiche mit anderen Forschungsergebnissen*
 - *ZWISCHENBERICHT 1*
- 2 ***Simulationen und Versuche an einem Luftkühlerelement***
01.11.2003-31.12.2003
 - *Aufgrund der Versuchserie 1 und der Simulation 1 wird die Kühlergeometrie einer zweiten Versuchsreihe festgelegt. Diese enthält voraussichtlich quer angeströmte(s) Rohr(e) und einige Lamellen*
 - *Simulationsprogramm erstellen für 2-dimensionale quasi-stationäre Wärmeleitung von Frost über Lamellen ans Verdampferrohr*

2 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

2.1 LITERATUR-RECHERCHE

2.1.1 Frost- und Eisbildung

Wissenschaftliche Untersuchungen über Frostbildung an Luftkühlern gibt es seit über 60 Jahren – sie gelten der Auslegung und Optimierung. Wichtige Arbeiten entstanden etwa um 1970; immer noch basieren neuere Untersuchungen auf jenen von Hayashi [7], Lotz [6] und Schneider [8]. Spätere Arbeiten zeichnen sich aus durch neuere Messmethoden und Simulationen mit teils aufwendigen Computerprogrammen. Jedoch enthalten diese stets empirische Korrelationen, so auch die Abhängigkeit zwischen Wärmeleitfähigkeit und Dichte von Frost. Viele davon gelten für Luftkühlung auf tiefere Temperaturen als jene, die in Luft/Wasser-Wärmepumpen den *neuralgischen Bereich* (von 0 °C bis 4°C) darstellen.

2.1.2 Messung der Frostoberflächentemperatur

Lüer [1] gibt einen Überblick über den Stand der Forschungsarbeiten, bei denen versucht wurde, die Frostoberflächentemperatur zu messen. Es kommen zwei Messprinzipien vor: Das Infrarotthermometer und die Messung mit Thermoelementen.

Das Infrarotthermometer hat eine Messungenauigkeit von ± 0.5 °C. Zusätzlich wird ein systematischer Fehler vermutet: Durch die Porosität und durch die Transparenz der Reifschicht wird die Temperatur wahrscheinlich unter der Reifoberfläche gemessen.

Mit aussen an die Frostschrift herangeführten Thermoelementen ist die Frostoberflächentemperaturmessung mit guter Genauigkeit kaum möglich, da durch Wärmeleitung durch das Thermoelement die Frostoberfläche geschmolzen wird.

Lüer [1] hält fest, dass bisher noch keine genügend genaue Messung der Frostoberflächentemperatur erreicht wurde.

2.1.3 Auswirkung von Oberflächenbeschichtungen auf die Frost- und Eisbildung

Es gibt mehrere Studien über Anti-Haftbeschichtungen gegen Eis und Frost für Tragflügel von Flugzeugen. Eine teilweise Reduktion der Haftung ist nachgewiesen. Die Frage nach *hydrophober* oder *hydrophiler* Beschichtung ist noch nicht eindeutig geklärt. Polymer-Beschichtungen zeigen nur kurzzeitige Wirkung, nämlich während sie Wasser absorbieren können – etwa fünf Minuten lang.

2.1.4 Abtauprozess

Eine Systematik der Abtauprozesse gibt Sanders [9]. Die Zeitdauer und thermische Effizienz werden für verschiedene Szenarien berechnet. Er verweist auf das Phänomen des Luftspaltes, der zwischen Frost und Lamellen eine Isolationswirkung hat. Machielsen [10] bewertet mit Kennzahlen den optimalen Zeitpunkt des Abtauens von Kälteanlagen. In den Arbeiten von Ehrbar [11] werden besonders die beiden wichtigen Abtauverfahren *Zyklusumkehr* und *Heissgas-Abtauung* untersucht.

2.2 KONZEPT UND AUFBAU DER VERSUCHSANLAGE UND DES VERSUCHSLUFTKÜHLERS 1

2.2.1 Aufbau der Versuchsanlage

In Abb. 1 ist das Verfahrensfliessbild der Versuchsanlage mit den Messinstrumenten dargestellt. Der gesamte Luft-Kreislauf ist geschlossen. Er besteht aus der *Luftaufbereitung* und dem *Versuchsluftkühler*. Der Luftversuchskühler ist als Nebenstrom geschaltet.

Auf der Saugseite des Ventilators wird die Luft mit Dampf aus einem Dampfkochtopf befeuchtet. Die Zufuhr wird manuell über das Regulierventil H4 und die Heizleistung des Rechauds geregelt.

Nach dem Ventilator wird die Luft im *Luftaufbereitungskühler* auf den vorgegeben Taupunkt gekühlt. Der Kühler wird mit Kältesole (Ethylenglykol-Wassergemisch) aus dem *Thermostatenbad 1* betrieben. Über die Lufttemperatur nach dem Kühler wird die Kälteleistung des Thermostatenbades geregelt. Anschliessend wird die Luft im *elektrischen Heizregister 1* auf die vorgegebene Temperatur erwärmt. Die Heizleistung des Heizregisters wird über die Temperatur nach dem *statischen Mischer 1* geregelt. Der *statische Mischer* sorgt dafür, dass eine homogene Temperatur-, Feuchte- und Geschwindigkeitsverteilung am Eintritt in den *Versuchsluftkühler* vorhanden ist. Am Austritt des Versuchsluftkühlers wird die Temperatur und die Feuchte der Luft nach dem *statischen Mischer 2* gemessen. Der Volumenstrom der Luft durch den Versuchsluftkühler wird mit der *Irisblende H1* grob eingestellt. Die Feinregelung wird mit einem *Regelventil* nach dem Versuchsluftkühler über die Volumenstrommessung mit einem *Turbinenradialgaszähler* adjustiert. Mit dem *Heizregister 2* muss nur geheizt werden, wenn die Temperatur der Luft für den *Turbinenradialgaszähler* zu tief ist. Bei der Volumenstrommessung befindet sich auch eine *Druck- und Temperaturmessstelle*.

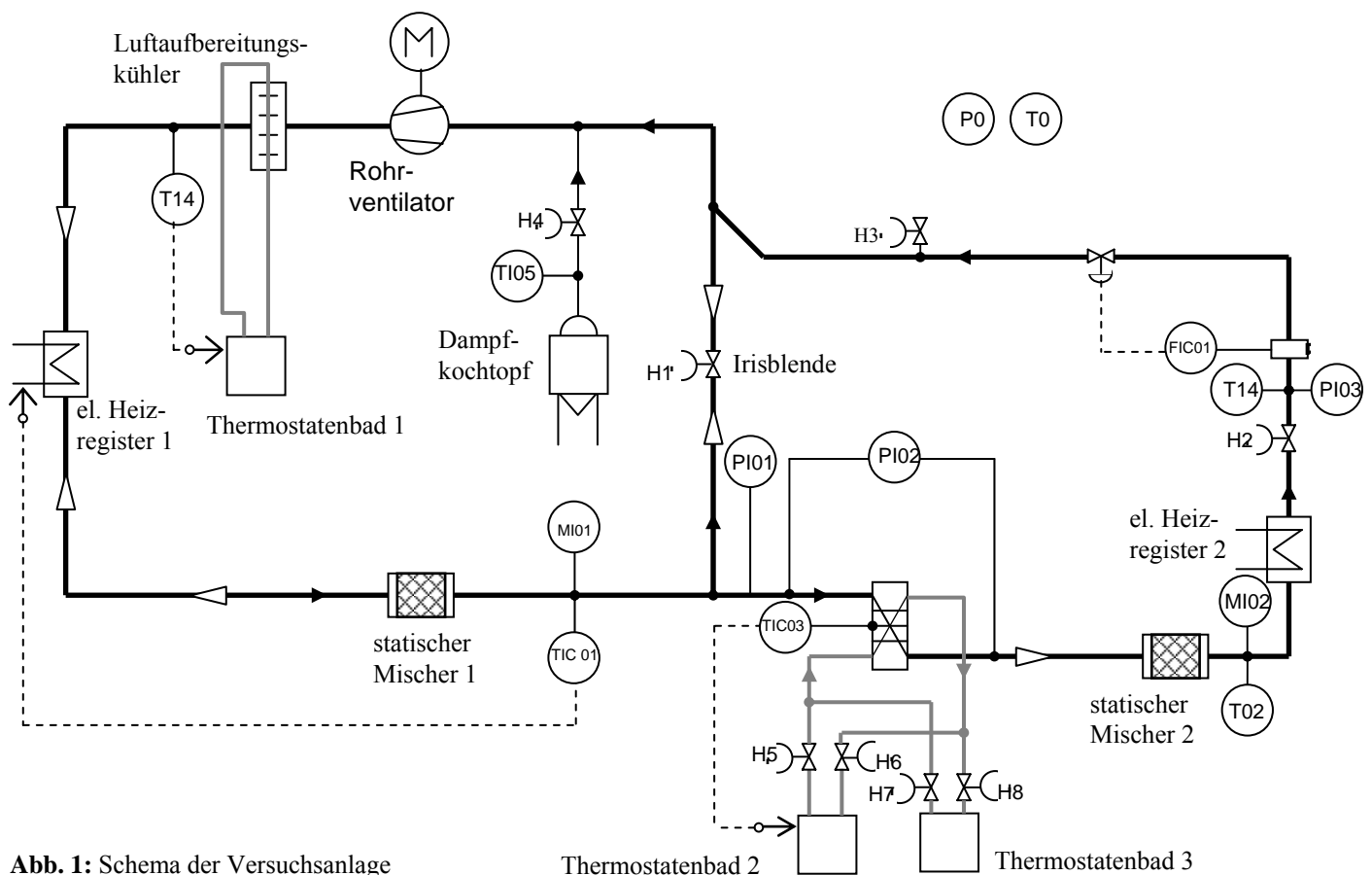


Abb. 1: Schema der Versuchsanlage

Thermostatenbad 2 Thermostatenbad 3

2.2.2 Versuchsluftkühler 1

Für die Versuche der Etappe 1 besteht der Versuchsluftkühler aus einem *Spaltkanal*, welcher auf einer Seite durch eine gekühlte *ebene Platte* und auf der anderen Seite durch ein Sichtfenster aus Plexiglas begrenzt ist. Um ein *ausgebildetes Geschwindigkeitsprofil* der Strömung zu erreichen, sind eine Einlauf- und eine Auslaufstrecke am Versuchsluftkühler angebaut.

Im Kühlbetrieb wird im *Kühlelement 1* mit der Kältesole aus dem *Thermostatenbad* gekühlt. Die Luft wird von der Luftaufbereitungsanlage auf eine vorgegebene Temperatur und eine vorgegebene Feuchte konditioniert. Auf der *Vereisungsplatte 5* bildet sich Eis und/oder Frost.

Um das Abtauen zu simulieren, kann am Kühlelement geheizt werden. Durch Umschalten von Ventilen wird nun warme Sole aus dem *Thermostatenbad* durch die *Kühlkanäle 2* gepumpt.

An fünf Stellen auf der Vereisungsplatte finden die folgenden Messungen statt:

- Temperatur der Vereisungsplatte
- Temperatur an der Frostoberfläche
- Temperatur des Kühlelements
- Dicke der Frostschrift
- Druckverlust im Kanal im Bereich der Vereisungsplatte

Um den Wärmestrom vom Luftstrom an die Kältesole zu bestimmen, ist eine *Zwischenschicht 6* eingebaut, die einen im Vergleich zur Vereisungsplatte und zum Kühlelement tiefen Wärmeleitwert hat. Über die Temperaturdifferenz über diese Zwischenschicht kann der Wärmestrom berechnet werden. Diese Methode zur Wärmestromberechnung wurde vorgesehen, um Redundanz zu schaffen zur Bestimmung des Wärmestroms über die Enthalpiedifferenz der Luft.

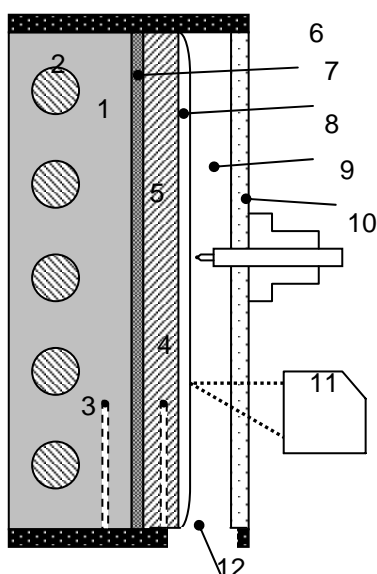


Abb. 2: Querschnitt aus Versuchsluftkühler 1

- 1: Kühlelement
- 2: Kühlkanäle
- 3: Kühlelementtemperaturmessung
- 4: Vereisungsplattentemperatur
- 5: Vereisungsplatte
- 6: Zwischenschicht
- 7: Eis-/Frostschicht
- 8: Spaltkanal
- 9: Sichtfenster
- 10: Frostoberflächentemperaturmessung
- 11: Laserdistanzsensor
- 12: Verschliessbare Öffnung für Abtauung

Zur Bestimmung der Frostoberflächentemperatur ist eine Positioniervorrichtung hergestellt worden, welche es erlaubt, die Spitze eines Thermoelements exakt auf der Frostoberfläche zu platzieren.

Am Ende eines Versuchs kann die gesamte abgeschiedene Frostmasse gemessen werden, indem die Vereisungsplatte mit dem Frost demontiert und gewogen wird.

In der Vereisungsplatte befinden sich drei eingefräste Taschen, die mit demontierbaren Aluminiumplättchen bestückt sind. Dadurch kann die lokale Frostdichte ermittelt werden.

Es wird ausserdem eine *digitale Fotokamera* eingesetzt, um Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten des *Frostwachstums* zu machen. Für visuelle *Beobachtung der Abtauung* wird eine digitale *Video-kamera* benutzt.

2.2.3 Messdatenerfassung

Alle Messdaten werden über einen Datenlogger in den PC übertragen. Dazu wird das Lab-HLK (Anwendung von LabView) verwendet. Die Messdaten werden in eine Excel-Tabelle übertragen. Laufend werden durch Berechnungen Kenngrössen ermittelt, um so erste Auswertungsergebnisse verfolgen und interpretieren zu können.

2.2.4 Konstruktion, Fabrikation, Montage und Inbetriebsetzung der Versuchsanlage

Der *Versuchsluftkühler* wurde in der Zentralen Werkstatt der HTA Luzern durch die Labormechaniker der Abteilung Maschinentechnik hergestellt und montiert. Die Montage der *Luftaufbereitungsanlage* führten die Mechaniker der Abteilung HLKS aus. Ende Juni begann die Inbetriebsetzung und das Messdatenerfassungssystem wurde fertig erstellt.

Nach ersten Versuchen wurde klar, dass ein nicht zu vernachlässigender Wärmeeinbruch in den Versuchsluftkühler 1 trotz guter Isolation herrscht. Bereits ein kleiner Wärmeeinbruch bewirkt eine nicht tolerierbare Änderung der Enthalpie des Luftstroms. Als Massnahme wurde eine Kühlbox um den Versuchsluftkühler gebaut: Die Temperatur der den Versuchsluftkühler umgebenden Luft wird geregelt, wodurch die Temperaturdifferenz und somit der Wärmeeinbruch minimiert werden.

Die Frostoberflächentemperaturmessung erbrachte von Beginn an stark streuende Werte, so dass sich eine Verbesserung der Methode aufdrängte. Der Einsatz von sehr feinen Thermoelementen konnte kaum eine Verbesserung erzielen. - Es wird nun versucht, die Frostoberflächentemperatur auf rechnerischem Weg zu ermitteln.

2.3 OBERFLÄCHEN-BESCHICHTUNG VON LAMELLEN-LUFTKÜHLERN

2.3.1 Eigenschaften geeigneter Oberflächen-Beschichtungen

Die Literatur gibt über die Eigenschaften einer Beschichtung, welche Frostbildung vermindern und/oder die Abtauung verbessern soll, keine Anhaltspunkte. Folgende physikalische Eigenschaften einer Luftkühleroberfläche könnten von Bedeutung sein: Kontaktwinkel (hydrophob, hydrophil), Rauigkeit, Reibung mit Wasser und die Molekülart an der Oberfläche. Will man alle diese Einflüsse variieren, müssten eine Vielzahl von Beschichtungen hergestellt und Versuche durchgeführt werden. Der finanzielle und zeitliche Aufwand dafür wäre innerhalb dieses Projektes zu gross. Es ist denkbar mit finanzieller Unterstützung aus der Industrie ein Projekt zu lancieren, welches ausschliesslich beschichtete Lamellen-Wärmeübertrager untersucht.

2.3.2 Erste Untersuchungen mit beschichteter Platte

Die ETH Lausanne hat bereits zwei Beschichtungen bezüglich Eis- und Frostbildung und der Abtauung getestet [3]. Am Versuchsluftkühler 1 wurde auf die ebene Kühlplatte eine Phosphonsäure als Beschichtung aufgebracht. Gemäss Versuchen an der ETH-L zeigte sie eine verbesserte Abtauung. Im Rahmen einer sechswöchigen Diplomarbeit wurden an der HTA Luzern die unbeschichtete und die beschichtete Platte untersucht und die Ergebnisse verglichen.

2.4 VERSUCHE AM EINSEITIG GEKÜHLTEN EBENEN SPALTKANAL

2.4.1 Versuchsparmeter

Der Mechanismus der Eis- und Frostbildung ist bei unterschiedlichen Temperaturen, relativen Feuchten und Reynoldszahlen des Luftstromes sowie bei unterschiedlichen Kühlwandtemperaturen in einem *ebenen einseitig gekühlten Spalt* untersucht worden. Alle Versuche wurden mit 12 mm Plattenabstand durchgeführt. Es zeigt sich, dass die geplanten Versuche mit 20 mm Plattenabstand keine weiteren Erkenntnisse bringen werden, da der Druckverlust mit zunehmender Frostdicke – bis 5 mm - bisher sehr gering war.

Die folgende Tabelle gibt die Versuchsparmeter an zur Untersuchung des Mechanismus der Frost- und Eisbildung:

Versuchsparmeter	Grenzen	Parameterwerte
mittlere Geschwindigkeit der anströmenden Luft w_L	0.5..4 m/s	0.5, 1, 2, 4 [m /s]
Temperatur der anströmenden Luft ϑ_{Le}	-12 .. 7 °C	-12, -2, 2, 7 [°C]
relative Feuchte φ	70% .. 95%	70, 85 , 95 [%]
Temperaturdifferenz $\vartheta_{Le}-\vartheta_W$	5..12	5, 8, 12 [K]

Tab. 1: Versuchsparmeter

2.4.2 Durchgeführte Versuche

Alle geplanten Versuchsreihen zur Untersuchung des Frostbildungsprozesses an der unbeschichteten *Frostbildungsplatte* sind abgeschlossen worden. Insgesamt wurden sieben Versuche mit einstündiger, sieben mit dreistündiger und zehn mit achtstündiger Versuchsdauer gefahren. Zudem wurden mehrere Kontrollversuche und Versuche für Eichungen durchgeführt. Auch Langzeitversuche bis zu 40 Stunden Versuchsdauer mit Frostdicken bis zu 5 mm fanden statt.

An der hydrophob beschichteten Kühlplatte wurden 9 Versuche zur Untersuchung der Frostbildung durchgeführt.

Versuche zur Untersuchung des Abtauprozesses wurden mit 7°C und -2°C Luftteintrittstemperatur mit beschichteter und unbeschichteter Frostbildungsplatte durchgeführt. Alle Versuche wurden wiederholt gefahren, um das stochastische Verhalten genauer zu erfassen, wie z.B. die Anzahl von Wassertropfen auf der Frostbildungsplatte am Schluss der Versuche.

2.4.3 Versuchsauswertung

Es sind die wichtigsten Größen der Frostbildung auf das Verhalten von Luftkühlern auf Grund der Messergebnisse in Abhängigkeit von Ort und Zeit aus den einzelnen Versuchen ermittelt worden: Frostdicke, -dichte, -wärmeleitfähigkeit, Wärmewiderstand zwischen Luft und Kühlwand und der Druckverlust. Die Auswertungen letzter Versuchsreihen sind noch im Gange.

Die angestrebte Untersuchung des Analogie-Defekts zwischen Wärme- und Stoffübertragung ist noch nicht gelungen, wegen den Schwierigkeiten mit der Messung der Frostoberflächentemperatur.

2.4.4 Ergebnisse der bisherigen Auswertungen

Da das Versuchsprogramm im jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen ist, werden nur zusammengefasste Ergebnisse aus den bisherigen Versuchen präsentiert.

2.4.4.1 Eis- und Frostbildung an unbeschichteter Platte

Übertragener Wärmestrom von der Luft auf die Kühlplatte

Der von der Luft abgegebene Wärmestrom wird sowohl aus der Enthalpiestromdifferenz zwischen Luft- und Austritt der Kühlplatte als auch aus der Temperaturdifferenz über die Kühlplatte (mit Zwischenschicht) ermittelt. Um die zwei ermittelten Wärmeströme zu vergleichen, müssen auch die Wärmestrahlung zwischen Frostfläche und gegenüberliegender Wand und der vorhandene Wärmeeinbruch zwischen Kühlbox und Luftkühler berücksichtigt werden.

Als wichtigstes Versuchsergebnis gilt, dass bei keinem der durchgeführten Versuche der übertragene Wärmestrom im Verlauf der Zeit – bis zu 8 Stunden Versuchsdauer und 5 mm Frostschildicke – abgenommen hat. Der Luftvolumenstrom wurde dabei konstant gehalten.

Ebenfalls bei allen Versuchen zeigt sich zu Versuchsbeginn während etwa 30 bis 50 Minuten eine Zunahme des von der Luft abgegebenen Wärmestromes um etwa 30 bis 50 %. Dieser Befund wird erklärt durch eine Zunahme der Wärmeübergangszahl infolge der Rauigkeit und der Oberflächenvergrößerung des Frostes (siehe Abb. 3).

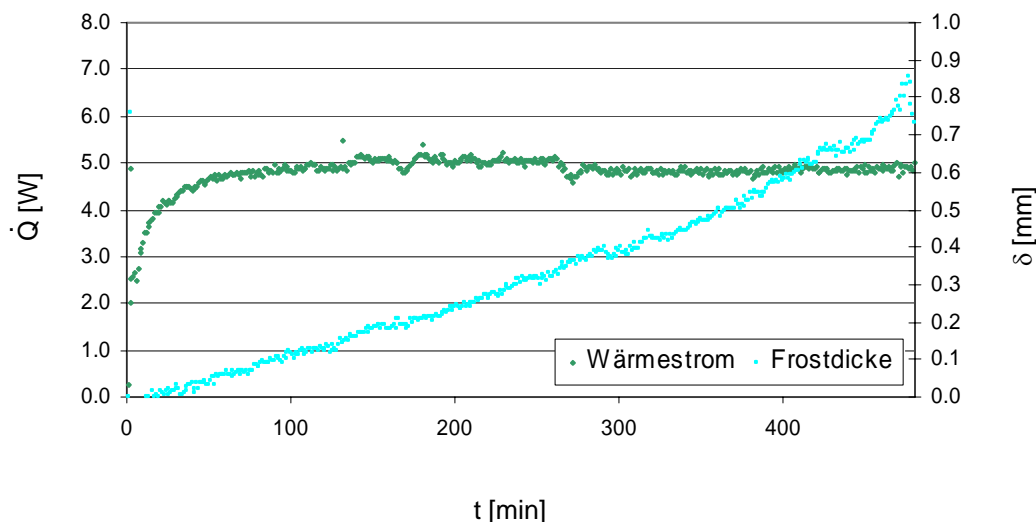


Abb. 3: Wärmestrom von der Luft an die Kühlplatte und lokaler Frostdickenverlauf an der Eintrittskante

$$\vartheta_{\text{Luft}} = 4^{\circ}\text{C}; \varphi = 70 \%; c_{\text{Luft}} = 1 \text{ m/s}; \vartheta_{\text{Platte}} = -4^{\circ}\text{C}$$

In einer weiteren Phase (etwa 50 Minuten nach Versuchsbeginn) bleibt der von der Luft abgegebene Wärmestrom konstant oder nimmt leicht zu.

Der *Wärmestrom bleibt konstant* bei jenen Versuchen, wo die Taupunkttemperatur kleiner als 0°C ist (Abb. 3). Die Wärmeübergangszahl strebt dabei auf einen konstanten Wert zu und auch der Wärmeleitwiderstand der Frostschild bleibt konstant, dh. das Verhältnis von Wärmeleitfähigkeit des Frostes und Frostdicke bleibt konstant.

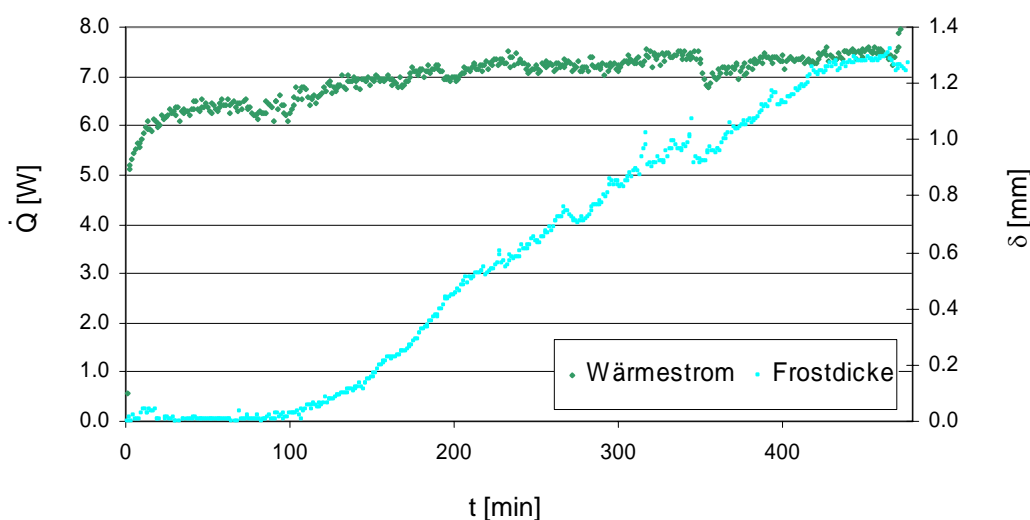


Abb. 4: Wärmestrom von der Luft an die Kühlplatte und lokaler Frostdickenverlauf an der Eintrittskante

$\vartheta_{\text{Luft}} = 7^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 85\%$; $c_{\text{Luft}} = 1\text{ m/s}$; $\vartheta_{\text{Platte}} = -1^{\circ}\text{C}$

Bei Versuchen mit Taupunkttemperaturen der Luft oberhalb von 0°C konnten wir in der zweiten Phase nochmals eine Zunahme des übertragenen Wärmestromes feststellen, jedoch mit viel geringerem Anstieg als in ersten Phase (Abb. 4). Bei diesen Bedingungen kann die Frostoberflächentemperatur bis auf 0°C ansteigen. An der Frostoberfläche scheidet sich dann Wasser ab, das in den porösen Frost durch kapillare Wirkung eindringt und aufgrund der niedrigeren Temperatur dort gefriert. Da die Wärmeleitfähigkeit so entstandener Schichten erheblich besser als des porösen Frostes ist, sinkt die Frostoberflächentemperatur wieder unter den Gefrierpunkt ab, und es beginnt von neuem Frostbildung. Diese Vorgänge können sich mehrfach wiederholen, wodurch sich abwechselnd lockere und kompakte Frostsichten aufbauen. Man spricht von „Vergletscherung“.

Phänomen der unterkühlten Tropfen

Zu Beginn der Versuche mit Taupunkttemperaturen der Luft über 0°C kondensiert zuerst der Wasserdampf als Tropfen auf der Wärmeübertragerfläche aus. Die Tropfen beginnen dann anzuwachsen und gefrieren noch nicht, obwohl die Plattentemperatur unter 0°C liegt. Erst wenn die Tropfen genügend lange unterkühlt sind, erstarren sie. Die Grösse der Tropfen bei der Erstarrung hängt von der Unterkühlung ab. Bei stärkeren Unterkühlungen gibt es kleinere Tropfen. Dies konnte aufgrund der Temperaturverteilung auf der Vereisungsplatte ermittelt werden.

Bei Taupunkttemperaturen unterhalb von 0°C gibt es wahrscheinlich auch zuerst eine Tropfenkondensation. Der Grund zu dieser Annahme ist eine matte Schicht, die die Vereisungsplatte im ersten Moment überzieht. Diese matte Schicht hat eine grosse Ähnlichkeit mit den unterkühlten Tropfen. Daraus interpretieren wir, dass diese matte Schicht aus winzigen unterkühlten Tropfen besteht. Die Literatur bestätigt diese Annahme. Erst bei sehr tiefen Plattentemperaturen gibt es von Anfang an direkte Desublimation.

2.4.4.2 Abtauung an unbeschichteter Platte

Als Kriterium für den Beginn der Abtauung wurde die auf der Frostbildungsplatte abgeschiedene Frostmasse gewählt. Bei Luft Eintrittstemperatur von 7°C wurde jeweils eine Frostmasse von 18 g auf die Kühlfläche von $200 \times 350\text{ mm}$ und bei -2°C eine Frostmasse von 13 g aufgebaut. Die Abtauung wurde eingeleitet durch Umschalten vom Kühlsolekreislauf auf den Warmwasserkreislauf mit 70°C . Der Abtauvorgang wurde visuell (Videokamera) und messtechnisch erfasst.

Ein typischer Temperatur-Verlauf der Abtauung an der Kühlplatte ist in Abb. 5 dargestellt. Zuerst wird die Eis- und Frostschrift auf den Tripelpunkt erwärmt. Dann beginnt sie zu schmelzen. In einigen Fällen beobachtet man nach Erreichen des Tripelpunktes ein *Abgleiten* der Eis- und Frostschrift in Form von Schneematsch. Erst wenn das gesamte Eis geschmolzen oder abgeglitten ist, erwärmt sich das restliche Wasser auf der Wärmeübertrageroberfläche und die Temperatur steigt weiter an.

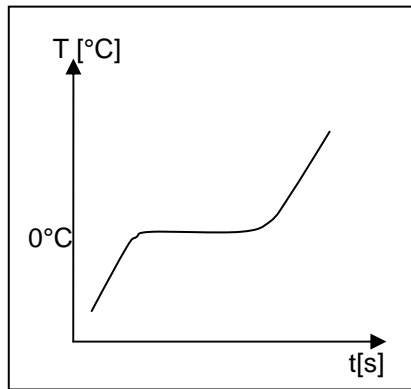


Abb.5: Temperaturverlauf einer Wärmeübertragerfläche beim Abtauen

Die Masse und somit die Wärmespeicherfähigkeit des Versuchsluftkühlers 1 ist relativ gross. Das bedeutet, dass je nach dem wie tief die Temperatur der Vereisungsplatte ist, die Erwärmung des Luftkühlers bis zum Tripelpunkt von Wasser schon unterschiedlich gross ist. Die Zwischenschicht für die Temperaturdifferenz-Erzeugung verstärkt durch die schlechte Wärmeleitung diesen Effekt noch. Bei den Abtauversuchen am Versuchsluftkühler 1 ist deshalb der Bereich des Schmelzens der Eis- und Frostschrift kaum durch ein Verweilen der Plattentemperatur bei 0°C erkennbar (Abb. 6).

Verlauf der Temperatur der Frostbildungsplatte

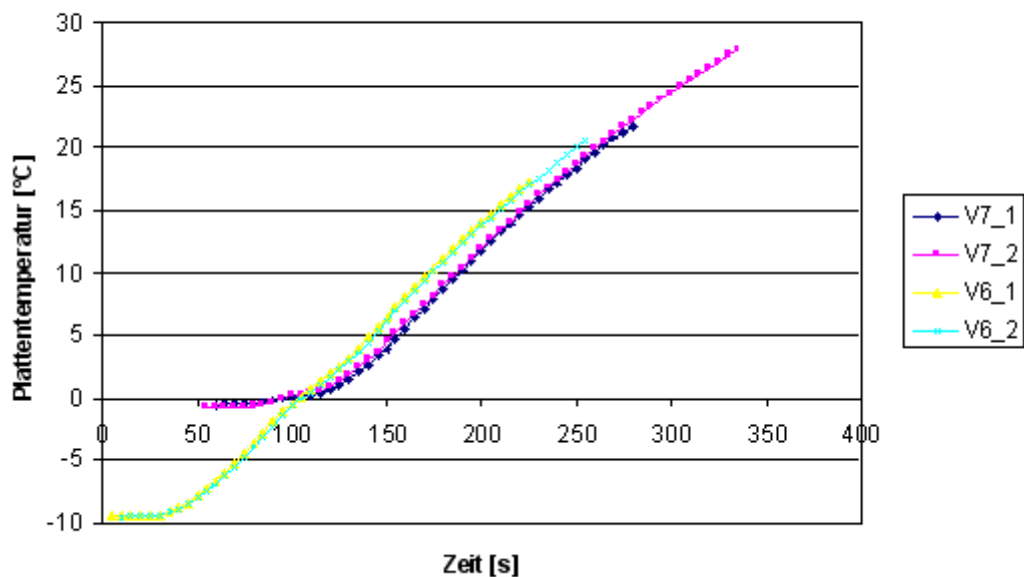


Abb. 6: Temperaturverläufe der Frostbildungsplatte beim Abtauen.

V7: $\vartheta_{\text{Luft}} = 7^{\circ}\text{C}$; $\vartheta_{\text{Platte}} = -1^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 85\%$; $c_{\text{Luft}} = 1^{\text{m/s}}$; $m_{\text{Frost}} = 14 \text{ g}$

V6: $\vartheta_{\text{Luft}} = -2^{\circ}\text{C}$; $\vartheta_{\text{Platte}} = -10^{\circ}\text{C}$; $\varphi = 85\%$; $c_{\text{Luft}} = 1^{\text{m/s}}$; $m_{\text{Frost}} = 18 \text{ g}$

In Abb. 6 ist erkennbar, dass die Temperaturverläufe beim Abtauen bei beiden Versuchsbedingungen einen analogen Verlauf haben.

In den Videoaufnahmen zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede zwischen den beiden Versuchen mit -2°C und 7°C Lufteintrittstemperatur. Bei 7°C Lufteintrittstemperatur gleitet der Frost teilweise als Schneematsch ab und am Ende des Abtauvorgangs bleiben nur vereinzelt Tropfen auf der Frostbildungsplatte zurück. Bei den Versuchen mit -2°C Lufteintrittstemperatur wird die ganze Frostmasse aufgetaut, es gleitet kein Schneematsch ab. Am Ende des Abtauvorgangs bleiben sehr viele Tropfen auf der Frostbildungsplatte haften.

Es gilt nun zu ermitteln, von welchen Einflüssen das unterschiedliche Verhalten beim Abtauen abhängt. Wahrscheinlich ist, dass die an der Wärmeübertragerfläche abgeschiedene Frostmasse eine grosse Rolle spielt. Aber auch der Einfluss der Frosteigenschaften wird in weiteren Versuchen einbezogen.

2.4.4.3 Verfröstungs- und Abtauversuche an hydrophob beschichteter Kühlplatte

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurden einige Verfröstungs- und Abtauversuche an einer Phosphonsäure-beschichteten Platte [4] durchgeführt, aus denen sich folgende provisorische Aussagen machen lassen:

Bei allen bisher durchgeführten Versuchen mit der Phosphonsäure-beschichteten Platte hat sich mehr Frostmasse abgeschieden als bei der unbeschichteten Platte. Die Dicke der Frostschrift etwa vergleichbar gross. Also ist dichter Frost mit einer besseren Wärmeleitfähigkeit entstanden ist. Der an die beschichtete Frostbildungsplatte übertragene Wärmestrom im Verlaufe der Zeit, also mit wachsender Frostschrift, angestiegen. Aber bereits das Ergebnis der unbeschichteten Platte ist interessant: mit steigender Frostschrift bleibt der übertragene Wärmestrom konstant.

Beim Vergleich des Abtauprozesses einer beschichteten und unbeschichteten Platte sind keine Unterschiede beobachtbar. Auch die Abtauzeit ist etwa bei beiden Versuchen gleich gross. Erwähnenswert ist, dass am Ende des Abtauvorgangs bei bestimmten Versuchsbedingungen an der unbeschichteten Platte eine grosse Anzahl von Tropfen hängen bleiben. Bei den gleichen Versuchsbedingungen an der beschichteten Platte sind quasi keine Tropfen vorhanden.

Es hat sich gezeigt, dass die Wirkung der Beschichtung durch Verschmutzungen beeinträchtigt wird: Nach dem Abtauprozess bleiben an verschmutzten Stellen mehr Tropfen zurück als an unverschmutzten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Beschichtung zwei positive Effekte haben könnte: Einerseits bildet sich kompakterer Frost, welcher die Wärme besser leitet und andererseits hat es am Ende eines Abtauvorgangs weniger Tropfen auf der Frostbildungsplatte.

2.5 KONZEPTE FÜR VERSUCHSLUFTKÜHLER IN WEITEREN ETAPPEN

Zur Zeit werden neue Versuchsserien mit einem *Versuchsluftkühler 2* geplant. Das Konzept des Versuchsluftkühlers 2 besteht aus zwei ebenen und parallelen gekühlten Platten, die gegeneinander verschoben werden können. Oben und unten wird der Spaltkanal durch Plexiglas begrenzt. Mit Variieren des Plattenabstand von 2 bis 10 mm wollen wir den Einfluss der Spaltweite auf die Frostbildung den übertragenen Wärmestrom und insbesondere den Druckverlust der Luftstromes untersuchen. Wie beim Versuchsluftkühler 1 messen wir die Temperatur und die Feuchte der Luft am Ein- und Austritt, die Frostdicke und den Druckverlust.

In einer weiteren Etappe sollen etwa 3 kleine Luftkühler mit verschiedenen Lamellenabständen gebaut werden, die dann in einer Klimakammer ausgemessen werden.

2.6 OPTIMALE GEOMETRIE EINES LAMELLENLUFTKÜHLERS

In einer Diplomarbeit [5] an der HTA Luzern wurden die optimalen Abmessungen eines trocken betriebenen Lamellenluftkühlers berechnet. Daraus sind folgende Resultate zu entnehmen:

- a) Der optimale Betriebszustand liegt luftseitig im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung mit Reynoldszahlen zwischen 1000 und 5000 (für die Spaltströmung). Die Korrelationen aus der Literatur für den Wärmeübergang in engen Spaltkanälen sind teilweise widersprüchlich.
- b) Für den unverfrosten Betrieb eines Luftkühlers kann die Rippendicke recht klein gewählt werden. Der Rippenwirkungsgrad sinkt erst bei einer Rippendicke unter 0.15 mm deutlich ab. Bei Betrieb mit einer Eis- und Frostsicht ist der Rippenwirkungsgrad höher als bei Betrieb ohne Frost. Das bedeutet, dass die Rippendicke noch kleiner als 0.15 mm sein darf. Der Rippendicke sind von der Herstellung Grenzen gesetzt.
- c) Für geringen Druckverlust und geringe Wärmeübertragerfläche soll die Apparatelänge klein gewählt werden.

3 Nationale Zusammenarbeit

Mit der ETH Lausanne ist eine Zusammenarbeit im Bereich der Beschichtungen entstanden. Die Abteilung BIO-E in hat bereits ein BFE Forschungsprojekt durchgeführt [3], welches das Abtauverhalten von zwei verschiedenen beschichteten Luftkühlern mit einem unbeschichteten vergleicht. Wir konnten eine Aluminiumplatte an der ETH Lausanne beschichten lassen und im Rahmen einer Diplomarbeit an der HTA Luzern testen.

Weitere Zusammenarbeiten sind vorgesehen mit:

Kälte-Wärme-Technik AG Belp

WT-Systemtechnik AG Alterswil

CSEM Alpnach

4 Internationale Zusammenarbeit

- *Politecnico di Milano*, Professor E. Macchi hat die Eis- und Frostbildung an Luftkühlern in Zusammenarbeit mit *LU-VE Contardo* (Hersteller von Luftkühlern) vor allem experimentell untersucht, inklusive das Betriebsverhalten von Luftkühlern unter Frostbildung. Dieser Besuch in Milano hat wertvolle Anregungen gegeben. Für eine weitere Zusammenarbeit sind sie interessiert.
- Wir besuchten auch Alpha-Innotec in Kassendorf Deutschland, der grösste Lieferant für Luft-Wärmepumpen in der Schweiz. Diese Firma scheint uns bis jetzt der kompetenteste Partner werden zu können. Bisher gaben sie nur sehr spärlich Informationen ab, jedoch wären sie bereit, innerhalb eines Vertrages mit uns längerfristig zusammen zu arbeiten.

5 Bewertung 2003 und Ausblick 2004

Gegenüber der Planung wurde das bestehende Simulationsprogramm nicht erweitert. Abklärungen haben gezeigt, dass es vorläufig keiner 2 oder 3 dimensional Berechnung der Wärmeleitung von Frost über die Lamellen in die Rohre bedarf. Allgemeine Erkenntnisse über das Optimierungsmodell der Lamellen-Luftkühler wurden erreicht.

Bisher sind keine Abtauversuche mit Ventilatornachlauf durchgeführt worden

Für die Inbetriebnahme und das Austesten der Versuchsanlage und der Messsysteme musste mehr Zeit aufgewendet werden als geplant war. Schwierigkeiten machten uns vor allem die Wärmeeinbrüche, die Messung der Frostoberflächentemperatur und der Frostdicke.

Aus den bisherigen Versuchen haben wir die folgenden Erfolge erreicht:

In der Literatur ist zu finden: Die Frostschrift mit ihrem Wärmeleitungswiderstand wirkt in einem Luftkühler als Isolation. Ausserdem verringert die Frostschrift den freien Strömungsquerschnitt der Luftkühler und erhöht damit den Druckverlust. Aufgrund der Ventilator Kennlinie sinkt der Luftvolumenstrom. Die reduzierte Luftmenge bewirkt eine niedrigere Lufttemperatur und damit einen zusätzlichen Anstieg der Verfrosterung. Frostdicke und Wärmeleitfähigkeit der Frostschrift haben damit einen der wichtigsten Einflüsse auf das Verhalten der Luftkühler während der Eis- und Frostbildung.

Bei den experimentellen Untersuchungen in unserem Projekt LOREF halten wir den Luftvolumenstrom am Eintritt in den Luftkühler konstant. Da die Kanalbreite im Verhältnis zur Frostdicke sehr gross ist, bleibt der Druckverlust sehr klein. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der der Luft entnommene Wärmestrom während der Frostbildung um den latenten Anteil grösser als bei trockenen Bedingungen ist und im Verlaufe der Zeit mindestens einen konstanten Wert hat. Die Erhöhung der Wärmeübergangszahl infolge der Rauigkeit der Frostschrift hebt den negativen Einfluss ihres Wärmeleitungswiderstandes auf. Daraus schliessen wir, dass der Druckverlust eine der wichtigsten Einflussgrössen auf das optimale Verhalten des Luftkühlers während der Frost- und Eisbildung ist.

Es ist vorgesehen in *Etappe 2* mit engerer Kanalbreite Versuche über Wärmeübertragung und Druckverlust durchzuführen.

Nach dem Abtauzyklus haften Tropfen abgeschmolzenen Frostes an der Luftkühleroberfläche und gefrieren bei erneutem Heizbetrieb. Der Druckverlust wird grösser und der Luftkühler verstopft an diesen Stellen schnell. Die Ergebnisse der Diplomarbeit zum Thema Abtauung mit beschichteter Platte zeigen, dass nach der Abtauung nicht einzelne Tropfen auf der Platte vorhanden sind, sondern ein Film entsteht. Weitere Erkenntnisse sollen durch Versuche mit anderen Frostzuständen (Lufteintrittstemperatur und Kühlflächentemperatur) gewonnen werden.

6 Referenzen

- [1] A. Lür: **Reifbildung an parallelen, gekühlten Platten eines mit feuchter Luft laminar durchströmten Kanals**, Doktorarbeit an der Technischen Universität Darmstadt, 1999.
- [2] Offerte an das *Bundesamt für Energie (BFE)* zur Ausschreibung des Forschungsprojektes *Optimale Nutzung von Umgebungsluft als Wärmequelle für Wärmepumpen*, 2003.
- [3] P. Hoffmann, G. Kulik, M. Zehnder: Abschlussbericht **Oberflächenbehandlung zur Vereisungsverringerung**, ETH Lausanne, 2003
- [4] T. Stirnimann: **Die Kühlung feuchter Luft unterhalb des Tau- und Gefrierpunktes an hydrophob beschichteten Lamellen-Wärmeübertragern**, Diplomarbeit an der HTA Luzern, 2003.
- [5] M. Imfeld: **Konzept zur Optimierung der Geometrie von Lamellen-Luftkühlern KOGLa**, Diplomarbeit an der HTA Luzern, 2003.
- [6] H. Lotz: **Wärme- und Stoffaustauschvorgänge in bereifenden Lamellenrippen-Luftkühlern im Zusammenhang mit deren Betriebsverhältnissen**, Doktorarbeit an der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1968.
- [7] Y. Hayashi: **Study of Frost Formation based on a Theoretical Model of the Frost Layer**, Heat Transfer Japanese Research Vol. 26 p. 79, 1977.
- [8] H.W. Schneider: **Equation of the growth rate of frost forming on cooled surfaces**, Int. J of Heat and Mass Transfer Vol. 21, 1978
- [9] C.T. Sanders: **The influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers**, Phd Dissertation, Technische Hogeschool, Delft University 1974.
- [10] Machielsen: **Influence of frost formation and defrosting on the performance of air coolers: standards and dimensionless coefficients for the system designer**, *International journal of refrigeration* p. 283-290, 1989.
- [11] Max Ehrbar, Stefan Bertsch: **Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern**, Interstaatliche Hochschule für Technik Buchs, 2002.