

Forschungsprogramm UAW  
Umgebungswärme, WKK, Kälte

# Oberflächenbehandlung zur Vereisungsverringerung

ausgearbeitet durch  
Patrik HOFFMANN, Gerit KULIK, Michele ZEHNDER  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne  
CH-1015, Lausanne  
[patrik.hoffmann@epfl.ch](mailto:patrik.hoffmann@epfl.ch)

im Auftrag des  
**Bundesamtes für Energie**

Seite 2

## 1. Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes ist die Verminderung der Eisbildung und die Verkürzung des Abtauvorgangs von Luftkühlwärmetauschern (Aluminiumlamellen). Durch Hydrophobisierung der Wärmetauscheroberfläche soll die Wasserkondensation vermindert und der Abtauvorgang durch schnelleres Abfließen von Wasser verkürzt werden. Höchste wasserabweisende Wirkung wird durch hohe Oberflächenrauigkeit und eine von Wasser nicht benetzende Oberfläche (Perfluorosilanzmoleküle) bewirkt.

Die Aluminiumhydrophobisierung wurde auf sandgestrahlten Modellstücken optimiert. Die vergleichenden Betriebstests erfolgten an oberflächenbehandelten und unbehandelten Miniaturversionen des Wärmetauschertyps im LENI/EPFL. Drei Miniaturwärmetauscher wurden konstruiert, welche sich durch die Eigenschaften Rauigkeit und Unbenetzbarkeit unterscheiden: (i) Vergleichswärmetauscher (ORIGINAL), aus den Lamellen wie geliefert aufgebaut, (ii) aufgerauhte und mit einer Siliziumdioxidschicht versehene und perfluorosilanisierte extrem wasserabweisende Lamellenoberfläche (LOTUS), (iii) Tauchbehandlung der glatten Aluminiumlamellen mit einer wasserabweisenden Phosphorsäurebeschichtung (ORGPHOS).

Erstaunlicherweise zeigte der extrem wasserabweisende aufgerauhte Wärmetauscher (LOTUS) ein deutlich schlechteres Abtauverhalten als der „ORIGINAL“ Wärmetauscher. Obgleich die gleiche Wassermenge in den Kühlzyklen abgeschieden wurde, dauerte der Abtauvorgang deutlich länger als beim ORIGINAL, da Eisscheiben beim Abtauen nicht herausgleiten. Der glatte wasserabweisende Wärmetauscher (ORGPHOS) zeigte eine deutlich geringere Menge an kondensiertem Eis nach dem Abtauen (ca. 25% weniger) und aus diesem Grund auch ein deutlich schnelleres Abtauen.

Die Dimensionen der Miniwärmetauscher sind realitätsnah und deshalb können die gewonnenen Erkenntnisse direkt angewendet werden. Aus den erzielten Ergebnissen in diesem Projekt ist ein nutzbares Potenzial ersichtlich, Luft/Wasser Wärmepumpen noch effizienter betreiben zu können.

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichtes verantwortlich.

Seite 3

## Abstract

The aim of this project was the diminution of the ice formation and the acceleration of the thawing cycle (defrosting) of air - water heat-pumps (aluminum fins). The water condensation should be diminished and the defrosting time shortened (faster flowing of thaw-water) by creating hydrophobic surfaces. Highest water repellence was achieved by high surface roughness and application of a strongly hydrophobic surface coating consisting of perfluorosilanes. Hydrophobic coatings were optimized on sand blasted aluminum model substrates. Comparative function tests were carried out with uncoated, and differently coated miniature versions of the type of heat exchanger existing at LENI/EPFL.

Three geometrically identical miniaturized heat exchangers were fabricated. They differed in roughness and surface wettability. (i) (ORIGINAL), non-treated fins flat and not hydrophobic as delivered; (ii) (LOTUS), rough silicon oxide coated and perfluorosilanized fins, resulting in strongly hydrophobic fin surface; (iii) (ORGPPOS), dip coated in diluted phosphonic acid solution, flat and hydrophobic fin surface.

Surprisingly, the rough and strongly repellent heat-exchanger "LOTUS" resulted in worse defrosting behavior than the "ORIGINAL" heat-exchanger. Even so equal amounts of water were condensed during the freezing cycles on both heat exchangers, the defrosting took much longer for the "LOTUS" exchanger. This is probably due to the fact that large ice plates cannot slide out between the fins during the defrosting cycle from the rough "LOTUS" exchanger. The best performance showed the flat and hydrophobic heat-exchanger "ORGPPOS". The amount of condensed ice is 25% less than on the "ORIGINAL" and defrosting time was therefore much shorter.

The dimensions of the mini-heat-exchangers are close to reality and the obtained results can therefore be applied directly. The project results furthermore reveal a strong potential to improve the efficiency of air-water heat-exchangers.

Seite 4

## 2. Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung.....	2
Abstract.....	3
3. Ausgangssituation.....	5
4. Projektziel.....	6
5. Herstellung und Charakterisierung der modifizierten Oberflächen.....	7
5.1 Oberflächeneigenschaften.....	7
5.2 Messtechniken.....	11
5.3 Angewendete Beschichtungen.....	11
5.3.1 Sol-Gel Prozess.....	12
5.3.2 Silanisierung.....	13
5.3.3 Phosphonsäure.....	13
5.4 Resultate der modifizierten Oberflächen.....	14
5.5 Herstellung der beschichteten Lamellen.....	16
6. Herstellung und Erprobung der Testwärmetauscher.....	17
6.1 Grundaufbau.....	17
6.2 Ausgeführte Beschichtungen.....	18
6.3 Versuchsaufbau.....	19
6.4 Wärmetauscher-Messungen.....	20
6.5 Resultate der beschichteten Wärmetauscher.....	21
7. Ungelöste Probleme.....	26
8. Vorschlag der Weiterführung.....	26
9. Symbolverzeichnis.....	28
10. Bibliographie.....	29
10. Bibliographie.....	29
11. Abbildungsverzeichnis.....	30

Seite 5

### 3. Ausgangssituation

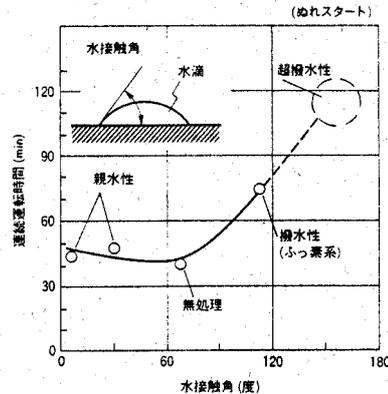
Wärmepumpen erfreuen sich einer stetig wachsenden Popularität. Dank substanzieller Steigerung der Effizienz, der minimierten Geräuschemissionen und der Zuverlässigkeit der Technologie konnte mit der Wärmepumpe ein, im von fossilen Energieträgern beherrschten Heizungsmarkt, konkurrenzfähiges Produkt entwickelt werden, welches einen grossen Teil der benötigten Energie direkt aus der Umgebung bezieht. Besonders im Neubaumarkt konnte der Marktanteil wesentlich erhöht werden und erreicht in der Schweiz im Jahre 2002 einen Anteil von über 40% <sup>1</sup>. Im bedeutenderen Renovations-Sektor konnte sich die Wärmepumpe bisher nur schlecht durchsetzen, da im allgemeinen viel höhere Systemtemperaturen gefahren werden müssen. Aktuelle Forschungsprojekte konzentrieren sich auf die Entwicklung effizienter und umweltfreundlicher Wärmepumpen, unter anderem auf umweltfreundliche Kältemittel, nachfrageorientierte Regelung und die Kombination einer Wärmepumpe mit einer Lüftungsanlage. Im Rahmen des vom Bundesamt für Energie durchgeführten Forschungsprogramm „Swiss Retrofit Heat Pump“ wurden am Labor für industrielle Energietechnik an der ETH Lausanne (LENI-EPFL) verschiedene effizienzsteigernde Massnahmen für Luft/Wasser Wärmepumpen erarbeitet und auch getestet [1], [2]. Teile dieser Vorhaben sind bereits erfolgreich vermarktet worden. Die in diesem Gebiet gesammelten Erfahrungen zeigen ein beträchtliches Einsparungspotenzial bei den Abtauverlusten auf. Eine Verminderung von 5 - 10% auf die Jahresarbeitszahl wird durch die Abtauung des Lamellen-Verdampfers verursacht.

Diverse Abtau-Strategien wurden in [3] und [4] miteinander verglichen und berechnet, ohne aber eine bedeutende Verbesserung des Abtauverhaltens zu erreichen. Neue Technologien im Bereich der Nanotechnologie ermöglichen die Herstellung von stabilen, stark hydrophoben Oberflächen. Die Verlängerung der Abtaupause durch den Einsatz solcher hochwertigen Oberflächen hat Yoshiyuki und Ahiko vorausberechnet [5]. Die Abb. 1.1 sagt bei einem Kontaktwinkel (X-Achse) von 160° eine Verdoppelung der Abtaupause (Y-Achse) voraus !

---

<sup>1</sup> Weitere aktualisierte Angaben können im Internet unter [www.ehpa.org](http://www.ehpa.org) oder [www.fws.ch](http://www.fws.ch) entnommen werden.

Seite 6



**Abbildung 1:** Abtaupausen von Lamellen Verdampfern in Abhängigkeit des Gleichgewichtskontaktwinkels der Lamellenoberflächen mit Wasser nach [Yoshiyuki und Ahiko 1992]

#### 4. Projektziel

Das Projektziel ist die Schaffung einer neuartigen Oberfläche für Verdampferlamellen von Wärmepumpen oder Kältemaschinen, die eine effizientere Abtauung ermöglicht und die durch die wasserabweisende Oberflächenstruktur nach der Abtauphase eine geringere Restwassermenge zurückbehält. Diese Eigenschaften ermöglichen eine längere Abtaupause und verringern im selben Masse die Abtauverluste. Daraus ergibt sich ein erhebliches Energiesparpotenzial von einigen Prozent in Bezug auf die Jahresarbeitszahl. Zudem könnte eine Oberfläche mit solchen Eigenschaften durch Tröpfchenkondensation bei Temperaturen über  $0^{\circ}\text{C}$  und hoher Luftfeuchtigkeit eine Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten auf der Luftseite erwirken.

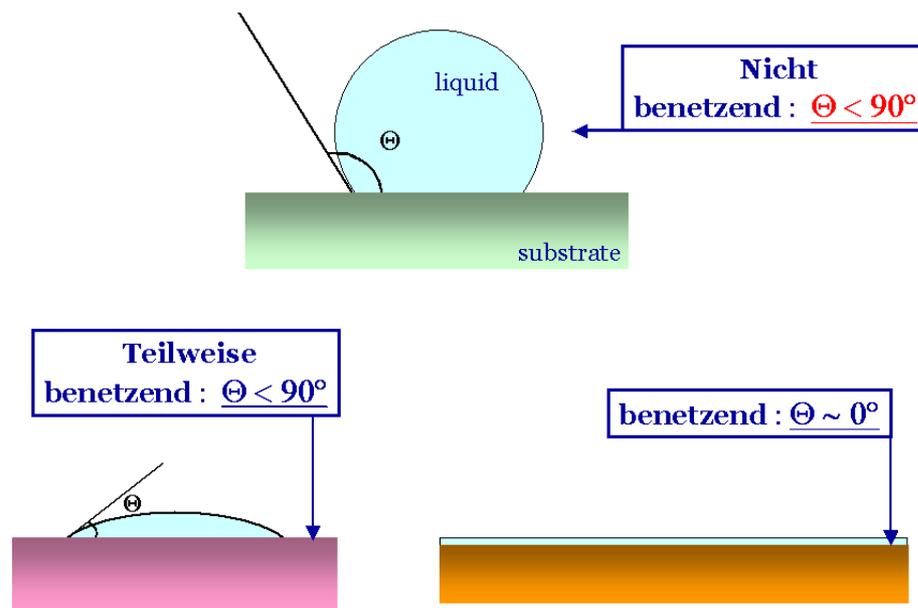
Das Projekt kann in drei Etappen realisiert werden: 1) Vorbereitung und Instandsetzung der benötigten Messmethoden, Anlagen und Materialien für die Herstellung und Charakterisierung der modifizierten Lamellen, 2) Schichtherstellung und -optimierung 3) Charakterisierung der neuen Lamelleneigenschaften wie Oberflächenrauigkeit und Wasserabweisung und vergleichende Betriebstests der Wärmetauscher.

Seite 7

## 5. Herstellung und Charakterisierung der modifizierten Oberflächen

### 5.1 Oberflächeneigenschaften

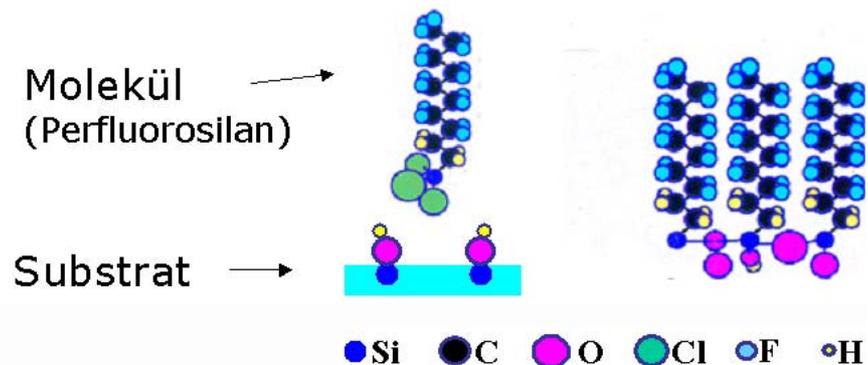
Die für das Ziel dieses Projektes interessante Oberflächeneigenschaft ist die Benetzbarkeit. Im System einer Luft-Wasser Wärmepumpe beschreibt die Benetzbarkeit das Verhalten von Wasser und Eis auf den Lamellenoberflächen. Es gibt generell drei Benetzungskategorien: 'benetzend', 'teilweise benetzend' und 'nicht benetzend' (Abb.2). Wasser benetzt hydrophile (wasserliebende) Oberflächen, z.B. sauberes Glas. Hydrophobe Oberflächen wie Teflon<sup>®</sup> werden von Wasser gemieden, es benetzt nicht oder nur teilweise.



**Abbildung 2:** Grundsätzliche Verhaltensmuster von Flüssigkeiten auf glatten Substraten.

In diesem Projekt sollen die von Wasser teilweise benetzten Wärmetauscherlamellen (an Luft verschmutztes Aluminium) eine stark hydrophobe Oberfläche erhalten. Dafür wurde ein relativ langkettiges Molekül aus der Familie der Silane angewendet (Abb.3). Mit diesem Molekül wurde im Labor APL/STI/EPFL in der Vergangenheit schon ausgiebig gearbeitet. Das Molekül besteht aus einem Siliziumatom als Kopf und einem teflonartigen Schwanz. Das Siliziumatom geht eine kovalente chemische Bindung mit z.B.  $\text{SiO}_2$  Oberflächen ein. Auf diese Weise kann man einen teflonartigen Film auf der Substratoberfläche herstellen.

Seite 8



**Abbildung 3:** Kugelmodell des verwendeten Perfluorosilans. Die acht -CF<sub>2</sub> Gruppen bilden eine hydrophobe Kette. Teflon ist ein Polymer, das aus solchen perfluorierten längeren Ketten aufgebaut ist.

Durch die kovalente Anbindung ist dieser Film sehr widerstandsfähig. Man kann den Film zur Reinigung mit Seife und Wasser bürsten, ohne dass er dadurch entfernt wird. Die Qualität der Beschichtung hinsichtlich der hydrophoben Eigenschaften hängen sehr stark von der Dichte der Moleküle auf der Oberfläche ab. Durch eine quantitative chemische Elementanalyse nach dem Beschichtungsprozess (X-Ray Photon Spectroscopy - XPS) konnte das nachgewiesen werden. In der Tabelle in Abbildung 4 ist gezeigt, dass die erhöhte Anzahl der Fluor Atome auf der Oberfläche einen höheren Kontaktwinkel für Wasser (in der Tabelle 123°, 117° oder 96°) bewirkt.

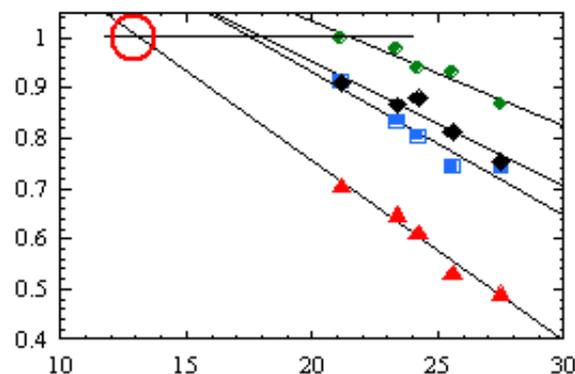
Eine weitere interessante Grösse zur Beschreibung der

XPS signals	⊕ = 123°		⊕ = 117°		⊕ = 96°	
	0°	70°	0°	70°	0°	70°
<b>F 1s</b>	<b>28</b>	<b>31</b>	<b>25</b>	<b>29</b>	<b>17</b>	<b>21</b>
C 1s	14	30	18	31	14	28
Si 2p	40	21	39	21	47	27
O 1s	18	18	19	18	21	24

**Abbildung 4:** Resultate der quantitativen chemischen Analyse (X-Ray Photon Spectroscopy - XPS). Die Angabe 0° bedeutet senkrechte Beobachtung und 70° bedeutet schräge Beobachtung mit erhöhter Oberflächen-empfindlichkeit. Am Beispiel der roten Zahlen für das Element Fluor ist ersichtlich, dass die höher wasserabweisende Silanschicht dichter gepackt ist.

Seite 9

Oberflächeneigenschaften ist das Zisman-Diagramm (benannt nach W.A. Zisman). Man erhält mit diesem Plot einen Richtwert für die Oberflächenenergie der Beschichtung. Das ist sehr nützlich, da es bis heute praktisch unmöglich ist, die wahre Oberflächenenergie einer festen Oberfläche zu messen. Je niedriger dieser Wert ist, um so hydrophober ist die Oberfläche. Für Teflon<sup>®</sup> wurde 18mN/m ermittelt, für Metalloberflächen, die generell sehr energiereich sind, liegt dieser Wert im Bereich von 2000mN/m. Um ein Zisman-Diagramm zu erstellen, werden die Kontaktwinkel von einigen verschiedenen Ölen auf der gleichen Oberfläche gemessen. Der Kosinus dieser Messwerte wird auf der Ordinate aufgetragen. Die dazugehörigen x-Werte sind die jeweiligen Oberflächenspannungen der Öle. Alle Wertepaare sollten eine Gerade bilden, die extrapoliert wird, um deren x-Wert aus dem Wertepaar (x;cos1) zu ermitteln.



**Abbildung 5:** Zisman-Diagramm zur Ermittlung der kritischen Oberflächen(Grenzflächen-)energie einer Oberfläche. Je niedriger diese Energie, um so wasserabweisender die Oberfläche. Die roten Dreiecke sind Daten der Silanschicht aus dem APL/EPFL, die anderen sind kommerzielle Schichten.

Dieser x-Wert ist eine Grenzflächenenergie oder Grenzflächenspannung und wird als maximale Oberflächenenergie der untersuchten Oberfläche angesehen.

In der folgenden Abbildung sind schräge Seitenansichten von Tropfen verschiedener Flüssigkeiten auf einem mit Perfluorosilanen beschichteten SiO<sub>2</sub> Substrat gezeigt. Diese Beschichtung entspricht der Kurve mit den roten Dreieckssymbolen im Zisman-Diagramm (Abb. 5) und ist die kleinste Oberflächenenergie, die im APL/EPFL auf glatten Oberflächen erreicht wurde. Besonders hervorzuheben ist die ölabweisende Eigenschaft, die im internationalen Vergleich am stärksten

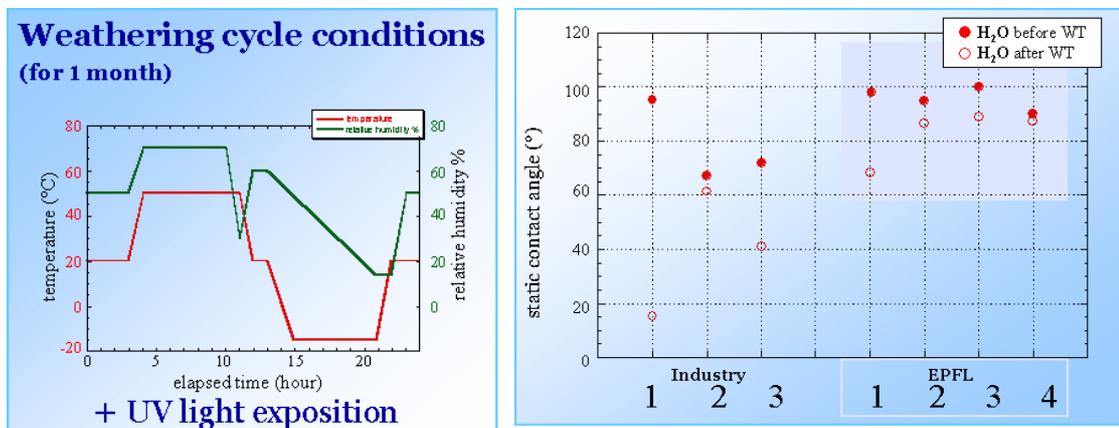
Seite 10



**Abbildung 6:** Kontaktwinkel von zwei polaren (Wasser und Dijodomethan), und einer unpolaren Flüssigkeit (Dekan, ein kurzkettiges Öl) auf der Perfluorosilanschicht.

ausgeprägt ist.

Um die Widerstandsfähigkeit der silanbeschichtung zu testen, wurden beschichtete  $\text{SiO}_2$  Substrate einen Monat lang (= 30 Tageszyklen) kontinuierlichem Wechsel von Umgebungstemperatur ( $-15^\circ\text{C}$  ..  $+50^\circ\text{C}$ ), relativer Luftfeuchtigkeit (15% .. 70%) und UV-Bestrahlung ausgesetzt (siehe Abb. 7). Nach diesem Wettertest (WT), welcher etwa einem Jahr mitteleuropäischer Bewitterung entspricht, wurde ein Verlust von ca.  $10^\circ$  des Wasserkontaktwinkels festgestellt, was im Vergleich zu anderen wasserabweisenden Beschichtungen (im der Abbildung mit 'Industry' benannt) wenig ist.



**Abbildung 7:** Links: Schema der durchgeführten Parameter-änderungen im Wettertest für einen Tages-zyklus. Rechts: Statischer Kontaktwinkel von Wasser auf den perfluorosilanisierten Proben vor (gefüllte Kreise) und nach (hohle Kreise) den Wettertests.

Seite 11

## 5.2 Messtechniken

In diesem Projekt wurden folgende Parameter untersucht: Wie im nächsten Abschnitt 5.3 ausgeführt wird, spielt die Oberflächenrauigkeit des Substrates eine Rolle. Deshalb wurde die Aluminiumlamellenoberfläche mit einem Profilometer (Alphastep) vermessen und die Oberflächenrauigkeit mit dem RMS Wert beziffert. Für die Untersuchung der Silanschichteigenschaften wurde ein Goniometer mit Videoaufzeichnung verwendet und die Leichtigkeit des Wassertropfenabrollens durch Probenneigungen festgestellt. An einem Beispiel wurde ebenfalls die Resistenz der Schicht nach einem Gefrier- und Abtauzyklus mittels XPS nachgewiesen.

## 5.3 Angewendete Beschichtungen

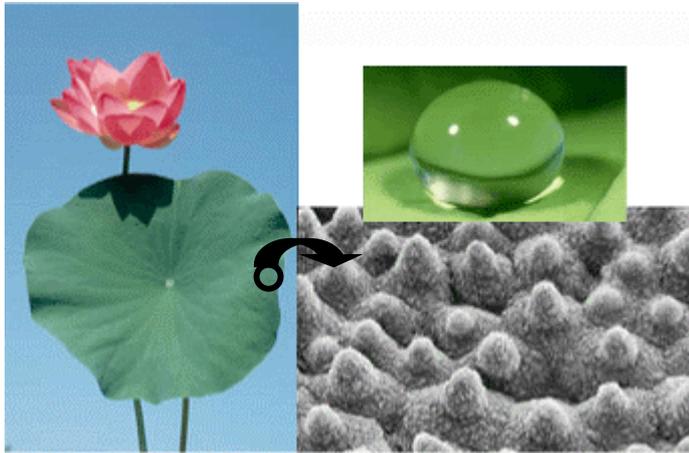
Die Silanisierung ist eine chemische Reaktion, bei der kovalente chemische Bindungen gebildet werden. Sie funktioniert nicht direkt auf Aluminium. Es muss eine dünne Zwischenschicht von  $\text{SiO}_2$  fest auf dem Alu aufgebracht werden.

Da die Aufbringung dieser Zwischenschicht zu ungewollten Nebeneffekten führen kann (zum Beispiel Inhomogenität der Schicht), wurde auch eine andere Substanzklasse, die nicht zu den Silanen gehört, angewendet. Diese Substanzen sind Phosphonsäuren und haben den Vorteil, dass sie direkt mit Aluminium reagieren. Phosphonsäurebeschichtungen werden erst seit Kurzem im APL/EPFL verwendet. Analoge detaillierte Untersuchungen wie die im Abschnitt 5.1 beschriebenen Untersuchungen von Silanschichtoberflächen liegen noch nicht vor.

Bevor die einzelnen Beschichtungsprozesse näher beschrieben werden, soll auf einen weiteren wichtigen Parameter hingewiesen werden. Dieser Parameter ist die Rauigkeit des Substrates, also der Aluminiumlamellen. Es könnte vorteilhaft sein, die Lamellen vor der chemischen Modifizierung mechanisch aufzurauen. Aus der Literatur ist schon seit 1936 bekannt (Wenzels Rauigkeitsfaktor [6]), dass hydrophobe Oberflächen hydrophober werden, wenn sie rau sind (Rauigkeit im Mikrometerbereich ausreichend). Das biologische Vorbild ist die in den Tropen ansässige Lotusblume. In unserem Projekt bestehen zwei Möglichkeiten, rauhe Lamellenoberflächen zu schaffen: a) Aufrauung des Aluminiums selbst (realisiert durch Sandstrahlen, Abb. 1) und b) kreieren der Rauigkeit mit der aus chemischen

Seite 12

Gründen erforderlichen  $\text{SiO}_2$  Lage zwischen Aluminium und Perfluorosilan.



<http://www.botanik.uni-bonn.de/system/lotus/de/>

**Abbildung 8:** Die Lotusblume, das biologische Vorbild perfekt hydrophober Oberflächen. Das Phänomen beruht auf einer mikrostrukturierten Blattoberfläche (Objektgröße im Bild ca.  $20\mu\text{m}$ ) übersät mit Wachskristallen (Grauskala Rasterelektronenmikroskopbild).

### 5.3.1 Sol-Gel Prozess

Mit einem Sol-Gel Prozess wurde die  $\text{SiO}_2$  Zwischenschicht hergestellt. Eine  $\text{SiO}_2$  Oberfläche präsentiert sich in der Realität als Si-OH Oberfläche (Protonenanlagerung durch die Luftfeuchtigkeit). Das ist genau die Art von Oberfläche, die für eine Silanisierung Voraussetzung ist. Von verschiedenen Sol-Gel Prozessen für die  $\text{SiO}_2$  Zwischenlage wurde eine saure Variante (resultiert in einer relativ glatten  $\text{SiO}_2$  Schicht) und eine basische Variante (Bildung mikrometergrosser  $\text{SiO}_2$  Partikel, tragen zur Oberflächenrauigkeit bei) auf den Modellaluminiumstücken probiert [7] und [8]. Es hat sich die basische Verarbeitung durchgesetzt, da sie nach der Silanisierungsreaktion abrollende Wassertropfen aufwies. Der Sol-Gel Prozess wird durch eine 30 minütige Trocknung und ein einstündiges sintern bei  $450^\circ\text{C}$  abgeschlossen.

Seite 13

### 5.3.2 Silanisierung

Die kettenförmigen Silanmoleküle haben einen funktionalen -Si- Kopf und gehen eine kovalente, (sehr feste chemische Bindung) -Si-O-Si- Brücke mit einer Si-OH Oberfläche (z.B. Glas) ein [9]. Nach der Sol-Gel Vorbehandlung führen wir eine Silanisierung in flüssiger Phase durch. Eine Monolage aus den verwendeten Perfluorosilanmolekülen ist ca. 1.1nm dick. Die Perfluorosilane sind besonders wasserabweisend, da ihre Kettenstruktur dem Teflon ähnelt. Diese Moleküle werden in Toluol gelöst und die vorbehandelten Aluminiumstücke für eine Zeit von 20 Stunden in inerter Atmosphäre (besonders wichtig ist der Wasserausschluss) eingetaucht.

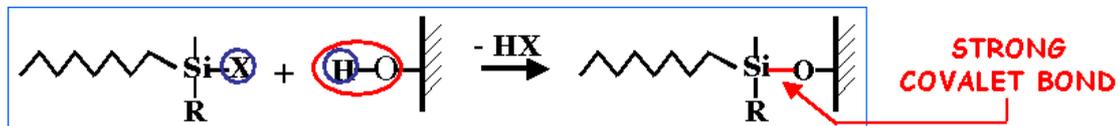


Abbildung 9: Schema der Silanisierungsreaktion.

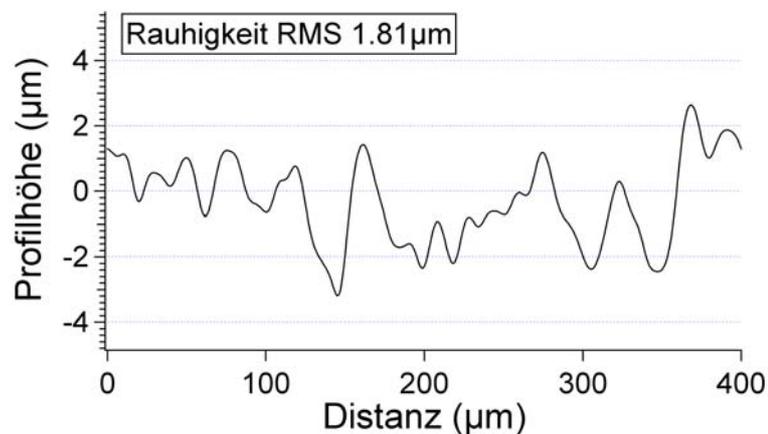
### 5.3.3 Phosphonsäure

Die Beschichtung aus Phosphonsäuremolekülen wurde gewählt, da sie anders als die Silane chemisch mit dem Aluminium reagiert und direkt auf dem Aluminium aufgetragen werden kann. Die Beschichtung erfolgte basierend auf einer 1996 veröffentlichten Methode [7], die spezifisch angepasst wurde. Gemäss den Autoren erhält man durch Eintauchen von Substraten in wenigen Stunden eine Adsorption der Phosphonsäuremoleküle auf der Oberfläche. Da Aluminium an Luft eine natürliche Oxidschicht bildet, welche durch starke Adsorption von Schmutzpartikeln inhomogen beschichtet ist, wurden die Aluminiumlamellen im Sauerstoff-Plasma gereinigt und danach in die 0.6 millimolare Lösung der Para-Ethyl-Phenyl-Phosphonsäure in Tetrahydrofuran (THF) bei Zimmertemperatur für 15 Stunden eingetaucht.

Seite 14

## 5.4 Resultate der modifizierten Oberflächen

Wie in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben wurde, sind raue Oberflächen vorteilhaft für die Hydrophobizität. Eine Alternative zur Rauigkeitserzeugung mittels der  $\text{SiO}_2$  Abscheidung ist das Sandstrahlen des Aluminiums. In Abb. 10 ist ein Oberflächenprofil von sandgestrahltem Aluminium gezeigt. Es wurde dafür das Strahlmittel BR 650N verwendet. Die erzeugte Rauigkeit liegt im optimalen Bereich und beträgt  $1.8\mu\text{m}$ .



**Abbildung 10:** Das Oberflächenprofil und die erzeugte Rauigkeit einer sandgestrahlten Aluminiumprobe.

Für die Beschichtung unter Verwendung der Perfluorosilane sollte der Sol-Gel Prozess gefunden werden, der die besseren Resultate nach der Silanisierung liefert. Sowohl die saure als auch die basische Variante wurden auf glattem und auf sandgestrahltem Aluminium angewendet. In Abb. 2 und 3 sind typische Resultate gezeigt (Seitenansicht von auf der Oberfläche sitzenden Wassertropfen). Die Angaben 15 bzw. 30 Minuten beziehen sich auf die Länge der Sol-Gel Behandlung.



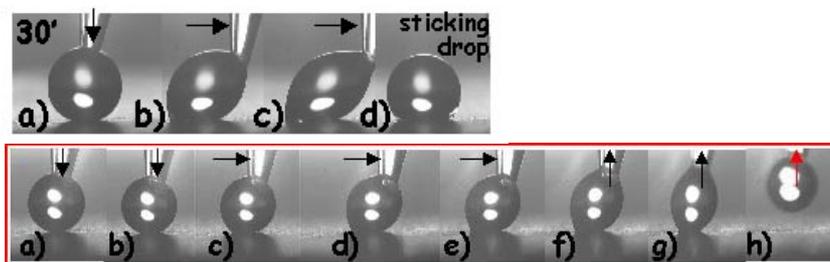
**Abbildung 11:** Links: Perfluorosilanisiertes Aluminium mit saurer Sol-Gel Schicht, gezeigt ist der statische Kontaktwinkel von Wasser. Rechts: Perfluorosilanisiertes Aluminium mit basischer Sol-Gel Schicht.

Werte für die statischen Kontaktwinkel (Gleichgewichtskontaktwinkel) von Wasser sind für die beste jeweilige Beschichtung angegeben (30min). Es stellte sich schnell

Seite 15

heraus, dass die Resultate auf dem sandbestrahlten Aluminium eindeutig besser waren als auf dem glatten Alu, unabhängig von saurer oder basischer Sol-Gel Prozessführung.

Im Fall einer basischen Sol-gel Beschichtung auf sandgestrahltem Aluminium mit nachfolgender Silanisierung blieben die Wassertropfen mit einem Durchmesser von 2mm bei einer Oberflächenneigung von  $45^\circ$  nicht mehr hängen, sondern rollten ab ohne jegliche Spuren zu hinterlassen. Dieses dynamische Verhalten kann näherungsweise mit nachstehender Bildfolge beschrieben werden. Es wurde versucht, den noch an der Glaskapillare hängenden Tropfen auf der Oberfläche entlang zu schleifen. In Abb. 12 obere Reihe (saurer Sol-Gel Prozess) ist sichtbar, dass der Tropfen letztendlich von der Kapillare abreißt und auf der Oberfläche verbleibt. Ganz anders ist das in Abb. 12 untere Reihe (basischer Sol-Gel Prozess). Der Tropfen löst sich sehr leicht von der Oberfläche und springt zurück an die Kapillare. Deshalb wurde für alle folgenden Experimente die basische Sol-Gel Variante gewählt.



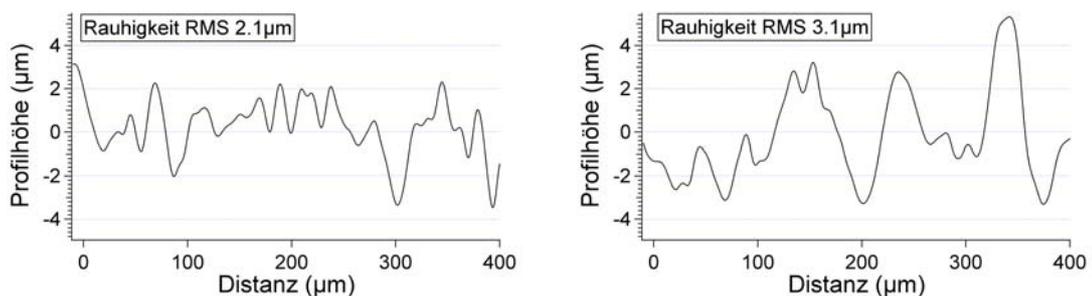
**Abbildung 12:** Obere Bildreihe: Wassertropfenschleifen auf der Oberfläche mit saurer Sol-Gel-Beschichtung. Untere Reihe: Wassertropfenschleifen auf der Oberfläche mit basischer Sol-Gel-Beschichtung. Der Tropfen gleitet mühelos über lange Strecken.

Die Beschichtung mit Phosphonsäuremolekülen erfolgte wie beschrieben direkt auf dem Aluminium. Mit diesen weniger hydrophoben Molekülen wurde eine Beschichtung mit einem Wasser-Benetzungswinkel von  $90^\circ$  erreicht. Die Wassertropfen rollten erwartungsgemäss auch nicht ab.

Seite 16

## 5.5 Herstellung der beschichteten Lamellen

Um die Suche nach der optimalen Prozesstechnologie für die Aluminiumaufrauhung, die notwendige Zwischenschicht von  $\text{SiO}_2$  Partikeln und der hydrophoben Silanbeschichtung zu vereinfachen, wurde am Anfang auf Modellaluminiumstücken von wenigen Quadratzentimetern (kein Originallamellenmaterial) gearbeitet. Das Sandstrahlen der nur  $200\mu\text{m}$  dicken Aluminiumlamellen kann die Lamellen leicht derart verbiegen, dass eine Montierung zur Wärmepumpe nicht mehr möglich ist. Eine Verbiegung kann nur durch sehr erfahrene Handarbeit verhindert werden. Die Alternativmethode chemisches Ätzen zur Aufrauhung der Lamellen wurde experimentell ausgeschlossen. Es wurden zwei Firmen mit dem Sandstrahlen von einigen Lamellen beauftragt. Die erzeugten Rauigkeiten (Abb. 13) unterscheiden sich etwas von der auf den Modellstücken (Abb. 10).



**Abbildung 13:** Die Oberflächenprofile von in Auftrag gegebenen Sandstrahlarbeiten an originalen Wärmetauscherlamellen. Für den Bau der Testwärmetauscher wurden jene Lamellen links verwendet.

Aufgrund der Tatsache, dass eine Wärmepumpe aus über 400 Lamellen der Grösse  $13 \times 60 \text{cm}$  besteht, wurden miniaturisierte Wärmetauscher aus den wenigen sandgestrahlten Lamellen hergestellt. Es wurden dafür die Lamellen benutzt, deren Rauigkeitswert (RMS) näher an dem der Modellstücke liegt (Abb. 13). Nachfolgend wurden die Lamellen im montierten Zustand dem Sol-Gel Prozess und der Silanisierung bzw. Phosphonsäurebeschichtung unterzogen.

Seite 17

## 6. Herstellung und Erprobung der Testwärmetauscher

### 6.1 Grundaufbau

Aus den von Wärmepumpenherstellern gebräuchlichen Komponenten (Lamellen und Rohre) wurden drei geometrisch identische Rohr-Lamellen-Verdampfer hergestellt (siehe Abb. 6.1). Die Einheiten bestehen aus

- 15 original Aluminium-Lamellen von der Firma Behr Industrietechnik in Mylau-D, 10x15 cm herausgeschnitten, 0.2 mm Dicke, mit vorgefertigten Löchern für die Kupferrohre mit Lamellenabstand 3mm.
- 8 Kupferrohre  $\varnothing$ Aussen 10 mm / 0.5 mm x 16 cm.
- 7 Rohrbogen, Kupfer, Achsabstand 25 mm.

Der ausgewählte Lamellen-Ausschnitt entspricht einem wiederkehrenden Muster des Durchganges einer einzelnen Kältemittelgruppe.



**Abbildung 14:** Kleinwärmetauscher aus 15 Aluminium-Lamellen 10x13cm, 8 Kupferrohre.

Die Anzahl Lamellen ist etwa um eine Grössenordnung kleiner als im Realfall. Der Lamellenabstand beträgt 3 mm. Um einen möglichst kleinen Wärmewiderstand zwischen den Rohren und den Lamellen zu erreichen, wurden die Kupferrohre nach der Montage auf das Lamellenpaket mittels eines Dornes mechanisch aufgeweitet. Das Anlöten der Rohrbogen erfolgte bei gleichzeitiger Kühlung der Aluminium-Lamellen im Wasserbad. Es konnte damit die thermische Beanspruchung der Lamellen auf das Minimum reduziert werden. Die letzte Etappe, das in diesem Bericht beschriebene Beschichtungsverfahren, wurde jeweils erst nach dem Bau des Kompaktwärmetauschers ausgeführt.

## 6.2 Ausgeführte Beschichtungen

In den nächsten Abschnitten dieses Kapitels werden die Testmessungen erläutert und deren Resultate dargelegt. Die Testmessungen wurden an drei Objekten durchgeführt. Davon ist eines ein Miniwärmetauscher, dessen Lamellen nicht verändert wurden. Dieser ist das Referenzobjekt, ein üblicher Wärmetauscher aber mit kleineren Dimensionen. Vergleichend zu der Referenz wurden Tests an zwei weiteren Wärmetauschern durchgeführt, deren Lamellen nach Abschnitt 5.3 modifiziert wurden. Mit Hilfe dieser drei Wärmetauscher wurden die beiden bestimmenden Parameter Rauigkeit und Wasserabweisung der Lamellenoberfläche getrennt studiert. Die im folgenden benutzten Namen und Details der drei Testobjekte sind in nachstehender Tabelle (Tab.1) zusammengefasst.

	<b>ORIGINAL</b>	<b>LOTUS</b>	<b>ORGPHOS</b>
<b>Alu Oberfläche</b>	glatt	sandgestrahlt	glatt
<b>Alu Rauigkeit RMS</b>	0.27µm	2.1µm	0.27µm
<b>Sol-Gel Schicht</b>	keine	SiO <sub>2</sub> Partikel	keine
<b>chem. Beschichtung</b>	keine	Perfluorosilan	Phosphonsäure
<b>Wasserabweisung</b>	gering	sehr hoch	hoch
<b>stat.Kontaktwinkel</b>	60°	130°	90°
<b>H<sub>2</sub>O (23°C, 45%RH)</b>			

**Tabelle 1:** Überblick über die Eigenschaften der getesteten Wärmetauscher

Die beiden Wärmetauscher ,ORIGINAL' und ,LOTUS' bilden die beiden Extreme hinsichtlich der Benetzung bzw. Nichtbenetzung durch Wasser. Das unterschiedliche Benetzungsverhalten von Wasser auf den beschriebenen Testobjekten kann mit einem einfachen Test beschrieben werden. Wenn der wie übliche Wärmepumpen beschaffene ,ORIGINAL' Wärmetauscher in einen Eimer Wasser getaucht und wieder herausgezogen wird, bleibt er nass. Der ,LOTUS' Wärmetauscher hingegen lässt sämtliches Wasser beim Herausziehen abperlen, so dass er schnell wieder vollkommen trocken ist. Der ,ORGPHOS' genannte Testwärmetauscher steht bezüglich seiner Benetzungseigenschaften zwischen ,ORIGINAL' und ,LOTUS', seine Oberflächenrauigkeit ist identisch mit der des ,ORIGINAL' Wärmetauschers.

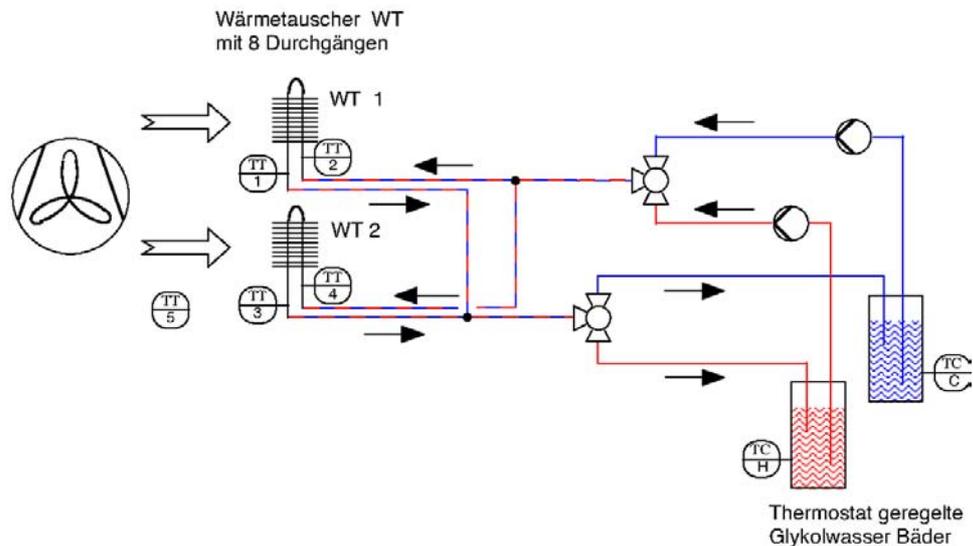
Seite 19

### 6.3 Versuchsaufbau

Die in Tabelle 2 aufgeführten Messgrößen wurden für die Vergleichsversuche ausgewählt.

Kühlzyklus	Abtauen
Luft; T = 0°C; 2 m/s; Rel. Luftfeuchte = 85% - 95%	Luft; T = 0°C; Ventilator ausgeschaltet; Rel. Luftfeuchte = 85%-95%
Glykol/Wasser (Glythermin 42, 35%); T= -10°C; 2x4 l/min	Glykol/Wasser (Glythermin 42, 35%); T= 10°C; 2x4 l/min
<b>Tabelle 2:</b> Parameter der Wärmetauscherexperimente	

Die eingestellten Bedingungen der Umgebungsluft wurden mittels eines separaten Klimakreises geregelt und die Messungen erfolgten in einer ca. 100m<sup>3</sup> grossen Klimakammer.



**Abbildung 15:** Versuchsaufbau der Vergleichsmessungen der Kompaktwärmetauscher im Abtauverhalten.

Das die beiden Wärmetauscher durchfliessende Glykolwasser (gemessene 4 l/min) wird in 2 separaten Thermostat geregelten Bädern (ca. 10 l Inhalt) auf ihrer jeweiligen Temperatur gehalten. Es sind dies ein „warmes“ Bad bei 10°C für die Abtauphase und ein kaltes Bad bei -10°C für die Kühlphase. Die Kühlphase erfolgte bei diesen hohen Luftfeuchtigkeiten während einer Dauer von 40 min. Die Temperatur des Glykolwassers welches durch gleichzeitiges Umschalten der Dreiwegventile während der Abtauphase zu den

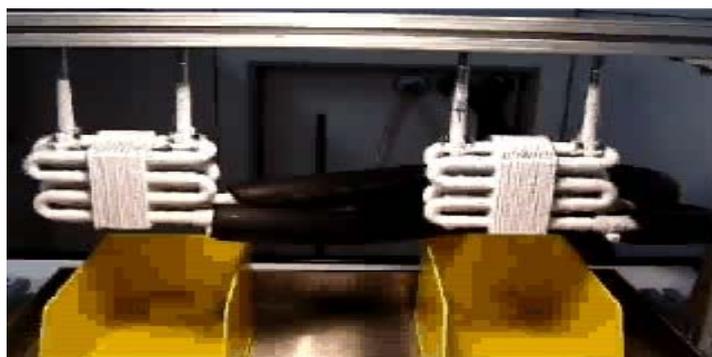
Seite 20

Wärmetauschern geleitet wird, erscheint im Vergleich zu einer Wärmepumpen geführten Abtauung (Eintrittsgas bei 40°C – 60°C) relativ gering. Durch den höheren Wärmeübergang mit dem flüssigen Glykol werden aber vergleichbare Bedingungen auf der Lamellenseite erreicht. Die Abtauung erfolgte bei abgestelltem Ventilator. Ca. 20s vor dem erneuten Umschalten auf den Kühlmodus wurde der Ventilator wieder eingeschaltet, um möglichst viel Restwasser aus den Lamellen zu blasen. Der gesamte Versuchsaufbau ist in der Abb. 15 dargestellt.

Die erhobenen Messdaten welche fortwährend aufgezeichnet wurden bestehen aus 4 Temperaturen im Glykolkreis und einer Luft-Temperatur. Diese wurden mit Thermoelementen vom Typ K (Nickel/Chrom) mit einer Präzision von +/- 0.2 K gemessen. Dazu wurde die von den Wärmetauschern abgetropfte Wassermenge gesammelt und durch Wägen verglichen. Der wesentliche Teil dieser Versuchsreihe besteht aus dem aufgezeichneten Filmmaterial, aus welchem verschiedene der in diesem Berichtsteil aufgeführten Standbilder stammen.

#### 6.4 Wärmetauscher-Messungen

Die Betriebstests beinhalteten mehrere Kühl- und Abtauprozesse am unbehandelten ‚ORIGINAL‘ und behandelten (wasserabweisenden) Wärmetauscher unter realistischen Bedingungen. Das Hauptaugenmerk lag bei den Vereisungs- und Abtauzeiten sowie dem Energieverbrauch.



**Abbildung 16 :** Zwei Testwärmetauscher (rechts „ORIGINAL“ und links „LOTUS“) nach 40 minütigem Kühlzyklus.

Zum Vergleich der Eigenschaften der hergestellten Rohr-Lamellen Kleinwärmetauscher, wurden im wesentlichen 2 Messreihen vorgenommen. Diese Messreihen hatten zum Ziel, eine qualitative Aussage des Abtauverhaltens hydrophob beschichteter Lamellenoberflächen zu machen. Es sollte eine

Seite 21

sichtbare Verbesserung gegenüber der unbehandelten Lamellen resultieren, damit sich auch die Mehrkosten bei der Herstellung solcher Beschichtungen rechtfertigen lassen.

Durch einen sehr hohen Kontaktwinkel der Wassertropfen wurden folgende Vorteile erwartet:

Geringere Kontaktlänge auf der Lamelle eines einzelnen Eistropfens, daher weniger benötigte Abtauenergie, bis das Eis evakuiert ist.

Schnelleres Abgleiten und Verkürzung der Abtauphase.

Reduzierte Rest-Wasser Menge am Ende der Abtauphase und daraus resultierend eine längere Kühlphase bei gleichen Abtaukriterien.

Vor allem aus den Punkten 2 und 3 wurde ein wesentlicher Vorteil einer wasserabweisenden Beschichtung erwartet.

## **6.5 Resultate der beschichteten Wärmetauscher**

### **Vergleich „LOTUS“ und „ORIGINAL“**

Diese erste Vergleichs-Serie wurde nach dem oben beschriebenen Versuchsaufbau durchgeführt.

Die Beobachtung der Wärmetauscher hat eindeutig gezeigt, dass die durchgeführte Beschichtung nicht perfekt auf der Oberfläche gehalten hat und kleine Rückstände im Abtauwasser festgestellt werden konnten.

Die Wassermenge des LOTUS Wärmetauschers ist nahezu identisch mit derjenigen des ORIGINAL Wärmetauschers. Während des Abtauens zeigen die beiden Wärmetauscher allerdings ein sehr stark unterschiedliches Verhalten:

Der ORIGINAL Wärmetauscher ist nach 70s praktisch eisfrei, während die Abtauphase des beschichteten LOTUS Wärmetauschers noch nach 3 Minuten nicht beendet ist. Die Bildserie veranschaulicht das Herausgleiten von Eisscheiben aus den parallel angeordneten senkrecht stehenden Lamellen des ORIGINAL Wärmetauschers (Abb. 19).

Seite 22



**Abbildung 17:** „LOTUS“ Wärmetauscher, Abtauphase zwischen 90 - 105 s

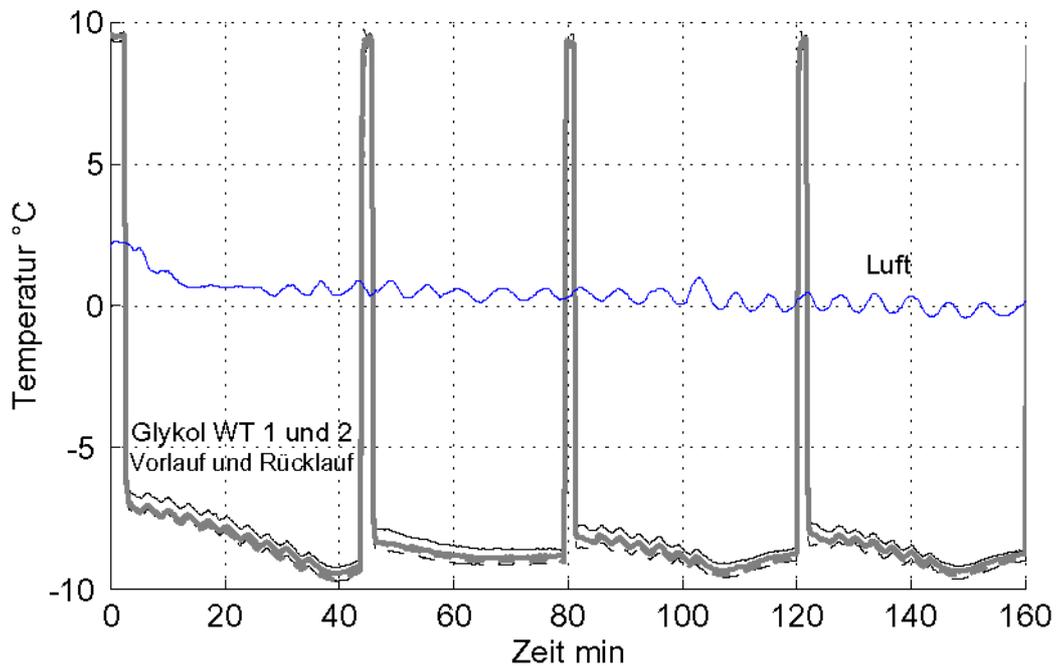
Im Gegensatz hierzu blättern einzelne Eisbereiche von der Lamellen-Kante des LOTUS Wärmetauschers nach vorne ab (Abb. 17) und gleiten nicht nach unten. Diesen beobachteten Unterschied, den wir hauptsächlich auf die Rauigkeit der Oberflächen zurückführen, welche das Herausgleiten von Eisscheiben verhindert, machen wir für die deutliche Verlängerung der Abtauzeit verantwortlich. Mit diesen kleinen Wärmetauscher Einheiten kann zudem nicht geklärt werden, ob die Beschichtung einen Einfluss auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat. Auch die nachfolgend eingebauten Temperatursonden ergeben diesbezüglich keinen Aufschluss.

Die aus den Labortests auf einer Aluminiumplatte erfolgreich durchgeführten Abrolltests konnten leider keine Verbesserungen während der Abtautests erbringen. Die beschichtete Einheit hat sichtbar schlechter abgeschnitten und eine neue Beschichtungstechnik basierend auf einer glatten Oberfläche musste berücksichtigt werden. Diese resultierte in einer 2. Testreihe.

Seite 23

### Vergleich „ORGPHOS“ und „ORIGINAL“

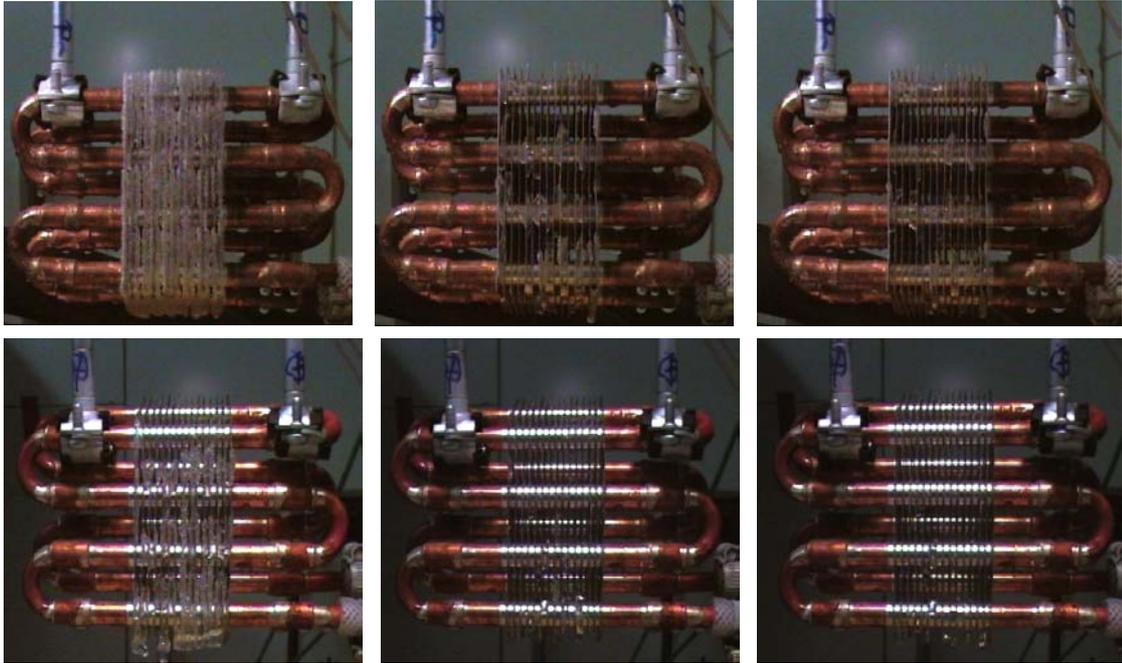
Messungen von insgesamt 4 Abtauzyklen des ORGPHOS Wärmetauschers erlauben einen beschränkten Aufschluss der getesteten Beschichtung. Die durchgeführten Temperaturmessungen zeigen, dass sich die beobachteten Unterschiede nicht auf eine schlechte Temperaturverteilung zurückführen lassen können. Die auf dem Glykolwasser gemessenen Werte sind sehr nah beieinander und lassen keinen weiteren Aufschluss zu (Abb. 18).



**Abbildung 18:** Temperaturmessungen während der Abtautests mit den ORGPHOS und ORIGINAL Testwärme-tauschern.

Wie die Bildserie weiter unten (Abb. 19) zeigt, taute der beschichtete Wärmetauscher merklich schneller ab und die über die vier Abtauzyklen resultierende Wassermenge war auch geringer (34 g gegenüber 43 g). Das unterschiedliche Verhalten flachte aber bei zunehmender Anzahl Abtauzyklen ab und in der letzten Abtauung waren die Unterschiede kaum noch auszumachen.

Seite 24



**Abbildung 19:** Vergleich des Abtauzustandes nach 35, 45 und 50 Sekunden Wasserdurchlauf (10°C)  
obere Reihe: ORIGINAL-Wärmetauscher, untere Reihe: ORGPPOS-Wärmetauscher.

In der nachfolgenden Tabelle werden die Vergleichsmessungen zwischen ORIGINAL und ORGPPOS zusammengefasst.

Experiment	WT 1	WT 2	Abtauzeit WT1:WT2	Wassermenge WT1:WT2	Bemerkungen
1	ORIGINAL	LOTUS	1m20s / 2m30s	-	Eis- scheiben gleiten heraus
2a	ORIGINAL	ORGPPOS	1m30s	43ml/ 34ml	Erster Abtau- vorgang
2b	ORIGINAL	ORGPPOS	1m20s		
2c	ORIGINAL	ORGPPOS	1m20s		
2d	ORIGINAL	ORGPPOS	-		

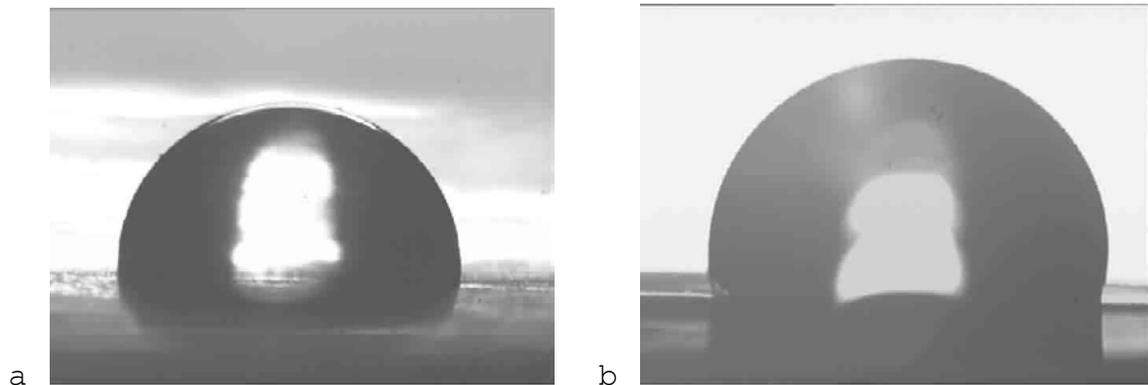
**Tabelle 3:** Durchgeführte Kühl- und Abtauprozesse

Seite 25

Die Vergleichsmessungen an den beschichteten Testwärmetauschern haben folgende Ergebnisse ergeben:

Die LOTUS Beschichtung hat sehr schlechte Abtauqualitäten ausgewiesen. Diese können auf die erhöhte Oberflächenrauigkeit zurückgeführt werden. Beschichtungen mit so hohen Kontaktwinkel haben aus theoretischer Sicht die besten Erfolgchancen auf eine reelle Verbesserung des Abtauens von Lamellenverdampfern. Es sollten hier die vorhandenen Kompetenzen noch besser ausgeschöpft werden.

Die ORGPHOS Beschichtung hat eine Verbesserung aufgezeigt, mit der es sich lohnen würde Aufwand und Ertrag einer solchen Lösung weiterzuverfolgen. Es konnte nicht abschliessend geklärt werden, ob diese Beschichtung eine genügende Beständigkeit aufweist.



**Abbildung 20:** Wassertropfen zur Messung der Benetzungswinkel auf ORGPHOS beschichteten Aluminiumlamellen a) bevor ) nach einem Vereisungsexperiment.

Seite 26

## 7. Ungelöste Probleme

Der Einfluss der Wasser-Benetzbarkeit von Lamellenoberflächen auf die Effizienz von Wärmetauschern ist noch nicht eindeutig verstanden. Zur Verwirklichung des „Lotus“-Effekts ist die Erhöhung der Rauigkeit der Lamellen nötig, aber diese beeinflusst nicht nur die Benetzungs- und Abroll-eigenschaften von Flüssigkeiten, sondern auch das Herausgleiten von Eisscheiben. Dieser dynamische Prozess dominiert und scheint die Verbesserung der Benetzungseigenschaften deutlich zu übertreffen. Die durchgeführten Versuche, lassen allerdings kein zweifelsfreies Urteil zu. Die Aluminiumbeschichtung mit Phosphonsäuren oder Phosphorsäureestern wird bereits in der Automobilindustrie für die Schmutzabweisung von Aluminiumfelgen untersucht [10]. Die Haltbarkeit solcher Schichten in unterschiedlichen Umgebungen ist allerdings noch nicht allgemein zugänglich.

## 8. Vorschlag der Weiterführung

Weitere Verbesserung der Beschichtung durch die Aufbringung von Perfluorophosphonsäuren und Phosphorsäureestern auf glatte Lamellenoberflächen sind die eindeutig nächsten Schritte die bezüglich einer Verbesserung der Nichtbenetzbarkeit untersucht werden sollten. Dies wird in einem Projekt mit der Fachhochschule Luzern als direkte Weiterführung des vorliegenden Projektes durchgeführt. Hierzu kommen auch die in diesem Projekt neu synthetisierten Chemikalien zum Einsatz.

Der Einfluss von Rauigkeit auf die Benetzbarkeit von Oberflächen wird zur Zeit am APL über einen sehr grossen Bereich untersucht. Dabei wurde bereits festgestellt, dass die 30%-ige Bedeckung von 8 nm durchmessenden Partikeln auf einer glatten Oberfläche den Benetzungswinkel um ca.  $10^\circ$  erhöht. Weiterhin wurde bereits gezeigt, dass der echte „Lotus-Effekt“ Mikro- und Nanostrukturen benötigt. Diese Ergebnisse auf Wärmetauscher-Effizienz zu übertragen ist allerdings nicht direkt möglich wie in diesem Bericht gezeigt wurde. Die fluid-mechanischen Einflüsse der Rauigkeit auf die Gesamteffizienz scheint eine dominierende Rolle zu spielen, speziell wenn grössere Eisplatten komplett aus dem Wärmetauscher herausgleiten können. Deshalb sollten auch dynamische Untersuchungen wie zum Beispiel Reibungsmessungen von Eis auf unterschiedlich beschichteten und strukturierten Substraten untersucht werden.

Seite 27

Generell sollten die vorläufigen Ergebnisse durch eine detailliertere Studie bestätigt werden. Diese Ergebnisse sollten integriert werden in ein globales Konzept in dem weitere Parameter, wie zum Beispiel die Geometrie der Eisplatten berücksichtigt werden. Keilförmige Eisplatten würden sicherlich das Herausgleiten erleichtern, allerdings erfordert dies deutliche Veränderungen im Design der Wärmetauscher. Sämtliche Kosten und Einsparungen wie die Herstellkosten, Wartungskosten, Betriebskosten (Kühlzyklen, Abtaupausen) usw. müssen global optimiert werden. Dies ist nur in relativ umfangreichen Projekten mit Industriebeteiligung realistisch durchführbar.

Unser Ziel ist es mit diesem Projekt unsere Kompetenzen im Bereich Oberflächenbeschichtung anzubieten um in Zusammenarbeit mit kompetenten Partnern die Erhöhung der Effizienz von Wärmetauschern zu erreichen.

Im Rahmen einer Weiterführung des Projektes der Wärme-tauschereffizienz sowie die Untersuchung an anderen Wärme-tauschertypen (z.B. Flüssigkondensatoren mit Prof. J.R. Thome LICM/EPFL), glauben wir, dass die ursprünglich erhofften Verbesserungen durchaus erreicht werden können, dass allerdings eine vertiefende Studie nötig ist um das ideale Verhältnis zwischen Rauigkeit und Oberflächenchemie zu bestimmen.

Seite 28

## 9. Symbolverzeichnis

ORGPPOS: Wärmetauscher mit Phosphonsäurebeschichtung

RMS: root mean square

SiO<sub>2</sub>: Siliziumdioxid

THF: Tetrahydrofuran

UV: ultraviolett

XPS: X-Ray Photon Spectroscopy

Seite 29

## 10. Bibliographie

- [1] M.Zehnder (1999b) et al. Wärmepumpe mit Hilfskreislauf zur Kondensatunterkühlung, Phase 2: Experimentelle Untersuchung. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, 1999. ENET-Nr. 195329
- [2] M.Zehnder (2002) et al. Pompe à chaleur air-eau à haute température, phase 2: Cycle à injection optimisé, essais journaliers et compresseur booster; Analyse thermo-économique. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, 2002. ENET-Nr. 220219
- [3] M.Zehnder (1999a) und D.Favrat. Pompe à chaleur biétagée à haute performance, Phase 2: Dégivrage par énergie à basse exergie. Bundesamt für Energie, 1999. ENET-Nr. 194465
- [4] S.Bertsch und M.Ehrbar. Verbesserung des Abtauens bei luftbeaufschlagten Verdampfern, Phase 2: Bewertung der Abtauprozesse. Schlussbericht. Bundesamt für Energie, 2002. ENET-Nr. 220187
- [5] Tsuda, Y. und Iwamoto, A.. Antifrosting Heat Exchanger. National Technical Report No. 38, ISSN: 0028-0291, p. 108-113, 1992
- [6] R.N. Wenzel, Resistance of solid surfaces to wetting by water, aus Industrial and Engineering Chemistry, 28, Seiten 988-994, 1936.
- [7] C.J. Brinker and G.W. Scherer: The physics and chemistry of sol-gel processing, aus Sol-Gel Science, Academic Press, Inc.: New York, 1990.
- [8] L.L. Hench and J.K. West, Chemistry Review, 90, Seiten 33-73, 1990.
- [9] R.K. Iler: The chemistry of silica, John Wiley and Sons: New York, 1979.
- [10] U. König: Applications of Nanotechnologies in automobile applications, keynote lecture at Nanoconference St. Gallen, September 2003.

Seite 30

## 11. Abbildungsverzeichnis

- Abb 1:** Abtaupausen von Lamellen Verdampfern in Abhängigkeit des Gleichgewichtskontaktwinkels der Lamellenoberflächen mit Wasser nach [Yoshiyuki und Ahiko 1992]
- Abb 2:** Grundsätzliche Verhaltensmuster von Flüssigkeiten auf glatten Substraten.
- Abb 3:** Kugelmodell des verwendeten Perfluorosilans.
- Abb 4:** Resultate der quantitativen chemischen Analyse (X-Ray Photon Spectroscopy - XPS).
- Abb 5:** Zisman Diagramm zur Ermittlung der kritischen Oberflächen(Grenzflächen-)energie einer Oberfläche
- Abb 6:** Kontaktwinkel von zwei polaren (Wasser und Dijodomethan), und einer unpolaren Flüssigkeit (Dekan, ein kurzkettiges Öl) auf der Perfluorosilanschicht.
- Abb 7:** Wettertests
- Abb 8:** Die Lotusblume, das biologische Vorbild perfekt hydrophober Oberflächen.
- Abb 9:** Schema der Silanisierungsreaktion.
- Abb 10:** Das Oberflächenprofil und die erzeugte Rauigkeit einer sandgestrahlten Aluminiumprobe.
- Abb 11:** Perfluorosilanisiertes Aluminium mit saurer und basischer Sol-Gel Schicht, gezeigt ist der statische Kontaktwinkel von Wasser.
- Abb 12:** Wassertropfenschleifen auf der Oberfläche mit saurer und basischer Sol-Gel-Beschichtung.
- Abb 13:** Die Oberflächenprofile von in Auftrag gegebenen Sandstrahlarbeiten an originalen Wärmetauscherlamellen.
- Abb 14:** Kleinwärmetauscher aus 15 Aluminium-Lamellen 10x13cm, 8 Kupferrohre.
- Abb 15:** Versuchsaufbau der Vergleichsmessungen der Kompaktwärmetauscher im Abtauverhalten.
- Abb 16:** Zwei Testwärmetauscher (rechts „ORIGINAL“ und links „LOTUS“) nach 40 minütigem Kühlzyklus.
- Abb 17:** „LOTUS“ Wärmetauscher, Abtauphase zwischen 90 - 105s
- Abb 18:** Temperaturmessungen während der Abtautests mit den ORGPHOS und ORIGINAL Testwärmetauschern.
- Abb 19:** Vergleich des Abtauzustandes nach 35, 45 und 50 Sekunden Wasserdurchlauf (10°C)  
obere Reihe: ORIGINAL-Wärmetauscher, untere Reihe: ORGPHOS-Wärmetauscher.

Seite 31

**Abb 20:** Wassertropfen zur Messung der Benetzungswinkel auf ORGPHOS beschichteten Aluminiumlamellen a) bevor ) nach einem Vereisungsexperimenten.