

Untersuchung der Nukleation an Wärmeübertrageroberflächen in einem Eisspeicher

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität
Stuttgart zur Erlangung der Würde einer Doktor-Ingenieurin (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Ursina Oechsle

aus Aalen

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. Klaus Spindler

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Groß

Tag der mündlichen Prüfung: 12.05.2020

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
der Universität Stuttgart

2020

Meinem Mann Stephan

gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) sowie am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart. *

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Spindler für die Betreuung der Arbeit und die wertvollen wissenschaftlichen Diskussionen. Weiterer Dank gebührt Herrn Professor Groß vom Institut für Technische Thermodynamik und Thermische Verfahrenstechnik (ITT) der Universität Stuttgart für die Anfertigung des Mitberichts. Bei beiden Herren möchte ich mich zudem herzlich für die schnelle Durchsicht und Beurteilung meiner Arbeit bedanken.

Danken möchte ich der Wieland Wicoatec GmbH, einem Unternehmen der Wieland Gruppe, in Person von Herrn Dr. Till Merkel und Herrn Gerd Sperle, die mich mit der Plasmabeschichtung von Wärmeübertragerrohren und deren Oberflächencharakterisierung unterstützt haben. Weiterer Dank gebührt Frau Professor Luke vom Institut für Thermische Energietechnik der Universität Kassel für das Sandstrahlen von Wärmeübertragerrohren und deren Oberflächencharakterisierung.

Meinen Kollegen, Wolfgang Heidemann, Fabian Schmid, Bernd Bierling, Alexander Frank, Nico Mirl, Norbert Flosdorff und Johannes Brunder möchte ich herzlich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung danken. Dieser Dank gilt ebenso meinen Master-, Studien-, und Bachelorarbeitern sowie studentischen Hilfskräften.

Besonders danke ich meinen Eltern, die mich immer gefördert und unterstützt haben, sowie meinen Schwiegereltern. Herzlichen Dank an meine Schwester für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Mann Stephan für die Unterstützung, das bedingungslose Verständnis und den Rückhalt während der gesamten Zeit der Promotion – ohne ihn wäre all dies nicht möglich gewesen.

Bartholomä, Juni 2020

Ursina Oechsle (geb. Ebert)

** Seit dem 1. Juli 2018 bilden das Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), das Institut für Gebäudeenergetik (IGE) und das Institut für Energiespeicherung (IES) das neue Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE).*

Erklärung über die Eigenständigkeit der Dissertation

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit mit dem Titel

„Untersuchung der Nukleation an Wärmeübertrageroberflächen in einem Eisspeicher“

selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe; aus fremden Quellen entnommene Passagen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bartholomä, Juni 2020



Ursina Oechsle

Kurzfassung

Bei Eisspeichern bildet sich bei der Beladung – Wärmeentzug – eine Eisschicht auf dem Wärmeübertrager, sobald die Nukleationstemperatur erreicht wird. Die Dämmwirkung der wachsenden Eisschicht führt zu einer Abnahme der Beladungsleistung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit und des Materials des Wärmeübertragers sowie der Einfluss der Wasserqualität im Eisspeicher auf die Nukleationstemperatur experimentell und theoretisch untersucht. Durch ein Absenken der Nukleationstemperatur kann die Eisbildung mit Dämmwirkung auf dem Wärmeübertrager verhindert und die Beladung optimiert werden. Unter Anwendung der klassischen Nukleationstheorie wird ein Modell entwickelt, mit dem die Nukleationstemperatur beliebig rauher Oberflächen bestimmt werden kann. Die geringsten Nukleationstemperaturen ergeben sich mit möglichst glatten Oberflächen, die einen möglichst großen Eiskeim-Kontaktwinkel in Wasser auf der Wärmeübertrageroberfläche bilden. Es werden Abkühlversuche mit Wärmeübertragern aus Kupfer, Aluminium, Edelstahl und Polyamid mit verschiedener Oberflächenbeschaffenheit (elektropoliert, sandgestrahlt, plasmabeschichtet) in einem Modell-Eisspeicher durchgeführt. Damit wird die maximal erreichbare Unterkühlung des Wassers vor Einsetzen der Eisbildung bestimmt. Diese hängt direkt von der Nukleationstemperatur ab. Die Abkühlversuche werden mit Reinstwasser, demineralisiertem Wasser und Leitungswasser als Speichermedium durchgeführt, um den Einfluss des Wassers auf die Eisbildung bestimmen zu können. Die Versuche zeigen, dass Leitungswasser weiter unterkühlt werden kann als Reinstwasser. Elektropolierte Edelstahlrohre ermöglichen die größte Unterkühlung. Kunststoffrohre aus Polyamid eignen sich aufgrund einer geringen Unterkühlbarkeit und der schlechten Wärmeleitfähigkeit nicht für einen Einsatz im Eisspeicher. Beim Einfluss der Rauheit ist das Rauheitsprofil die maßgebliche Größe für die erreichbare Unterkühlung. Die Parameter arithmetischer Mittenrauwert R_a und gemittelte Rautiefe R_z sind nicht aussagekräftig. Umso glatter die Oberfläche und umso kleiner der Kontaktwinkel, den ein Wassertropfen auf der Wärmeübertrageroberfläche bilden würde, desto größer ist die Unterkühlung.

Die Ergebnisse dieser Arbeit können zur optimierten Beladung von Eisspeichern genutzt werden, indem ein Zweispeichersystem aufgebaut wird. In einem Behälter wird das Wasser mit hoher Beladungsleistung durch einen eisfreien Wärmeübertrager mit geringer Nukleationstemperatur unterkühlt. Im zweiten Speicher findet Eisbildung statt. Eine Modellierung der Beladungsleistung des Zweispeichersystems zeigt durch die Absenkung der Nukleationstemperatur eine deutliche Verbesserung im Vergleich zum klassischen Eisspeicher.

Abstract

During the loading of ice stores – heat removal – an ice layer forms on the heat exchanger surface once the surface reaches nucleation temperature. The growing ice layer increases the heat conduction resistance; the loading performance decreases.

This work experimentally and theoretically investigates the influence of the surface structure and the material of the heat exchanger as well as the influence of the water quality in the ice store on the nucleation temperature. A reduction of the nucleation temperature avoids an ice growth on the heat exchanger and optimizes the loading performance.

Applying the classical nucleation theory, a model to calculate the nucleation temperature of any rough surface is developed. The smoothest surface, which has the biggest ice nucleus contact angle in water on the heat exchanger surface, reaches the lowest nucleation temperatures.

Cooling experiments are conducted with heat exchangers made of copper, aluminium and stainless steel with different surface structures (electropolished, sandblasted, plasma-coated) in a model ice store; the maximum reachable supercooling of the water, before ice growth starts, is determined. The supercooling depends direct on the nucleation temperature. The cooling experiments are conducted with ultrapure water, demineralized water and tap water to examine the influence of the water on the ice growth. The experiments show that tap water can be supercooled to a higher extend than ultrapure water. Electropolished stainless steel tubes allow the highest supercooling. Plastic tubes made of polyamide are not suitable for ice stores due to the low possible supercooling and the low thermal conductivity. For the roughness influence, the roughness profile is the essential variable. The roughness values R_a und R_z are not of significance. The supercooling grows with a smoother surface and a smaller contact angle which a water drop forms on the heat exchanger surface.

The results of this work can be used for an optimized loading of ice stores by constructing a two-storage system. In one tank, the water supercools with a high loading performance by an ice-free heat exchanger with a low nucleation temperature. In the second tank, ice grows. A modelling of the loading performance shows that the two-storage system significantly improves the loading performance compared to a classical ice store due to the reduction of the nucleation temperature.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Nomenklatur	VII
1 Einleitung	- 1 -
1.1 Stand der Technik und Zielsetzung der Arbeit	- 1 -
1.2 Aufbau der Arbeit.....	- 2 -
2 Grundlagen	- 5 -
2.1 Eisspeicher vs. Kaltwasserspeicher.....	- 5 -
2.2 Eisbildung und Nukleation	- 6 -
3 Theorie zur Modellierung des Beladungsvorganges	- 9 -
3.1 Bestimmung der Nukleationstemperatur mit klassischer Nukleationstheorie.....	- 10 -
3.1.1 Homogene Nukleation	- 10 -
3.1.2 Heterogene Nukleation	- 16 -
3.1.3 Stoffwerte	- 22 -
3.1.4 Eingabewerte und Aufbau des Modells	- 26 -
3.1.5 Kritische Diskussion der klassischen Nukleationstheorie	- 27 -
3.2 Modellierung der Beladungsleistung	- 28 -
3.2.1 Berechnungsgleichungen	- 28 -
3.2.2 Stoffwerte	- 31 -
3.2.3 Vereinfachungen.....	- 36 -
3.2.4 Eingabewerte und Aufbau des Modells	- 38 -
4 Versuchsaufbau	- 43 -
4.1 Messtechnik	- 45 -
4.2 Wasseraufbereitung.....	- 49 -

4.3	Wärmeübertragerrohre	- 49 -
4.3.1	Elektropolierter Wärmeübertrager	- 50 -
4.3.2	Sandgestrahlter Wärmeübertrager	- 50 -
4.3.3	Plasmabeschichteter Wärmeübertrager	- 50 -
4.3.4	Charakteristische Werte der Probekörper	- 51 -
5	Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse zur Nukleationstemperatur	- 53 -
5.1	Versuchsablauf mit typischer Abkühlkurve	- 53 -
5.2	Verifizierung des Modells für die Beladungsleistung mit Versuchen	- 59 -
5.3	Statistische Größen für die Auswertung der Versuche	- 60 -
5.4	Parametervariation für Versuche	- 61 -
5.5	Ergebnisse der Messreihen	- 61 -
5.5.1	Ergebnisse für elektropolierte Wärmeübertrager	- 62 -
5.5.2	Ergebnisse für sandgestrahlte Wärmeübertrager	- 64 -
5.5.3	Ergebnisse für plasmabeschichtete Wärmeübertrager	- 64 -
5.6	Diskussion der Messergebnisse	- 65 -
5.6.1	Einfluss der Rauheit auf die Nukleationstemperatur	- 68 -
5.6.2	Einfluss des Kontaktwinkels auf die Nukleationstemperatur	- 69 -
5.6.3	Einfluss von Rauheit und Kontaktwinkel auf die Nukleationstemperatur..	- 69 -
5.6.4	Einfluss des Wassers auf die Nukleationstemperatur	- 70 -
6	Ergebnisse zur Berechnung der Nukleationstemperatur	- 85 -
6.1	Eingabewerte	- 85 -
6.2	Ergebnisse für die berechnete Nukleationstemperatur	- 86 -
6.3	Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur	- 89 -
6.4	Vergleich der Ergebnisse mit den Versuchen	- 91 -
7	Untersuchungen zur technischen Umsetzung der Forschungsergebnisse	- 95 -
7.1	Untersuchung von Wärmeübertragerrohren aus Kunststoff	- 95 -
7.2	Erstes Konzept zur Optimierung der Beladung	- 97 -
7.3	Zweites Konzept zur Optimierung der Beladung	- 100 -
7.4	Vergleich der Konzepte mit dem klassischen Eisspeicher	- 101 -

8 Zusammenfassung und Ausblick	- 107 -
Literaturverzeichnis	- 111 -
Anhang.....	- 117 -
A.1 Nußelt-Korrelationen.....	- 117 -
A.2 Berechnungen zur Wärmeübertragung	- 120 -
A.3 Genauigkeit der Stoffwerte	- 122 -
A.4 Modellierung in EES	- 123 -
A.5 Messtechnik Versuchsstand	- 125 -
A.6 Kameraaufnahmen der Probekörper.....	- 129 -
A.7 Rauheitsmessung.....	- 131 -
A.8 Rauheitskenngrößen	- 131 -
A.9 Rauheitsprofile.....	- 132 -
A.10 Kontaktwinkelmessung	- 138 -
A.11 Untersuchungen zur Wasserqualität	- 141 -