

# **Nutzung rekuperativer Wärmerückgewinner in Lüftungsanlagen unter kalten Klimabedingungen**

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

vorgelegt von

**Olga Kaschtschejewa**

aus Minsk, Belarus

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Petr Dziachek

Belorussische Nationale Technische Universität

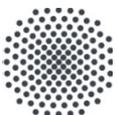
Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos

Tag der Einreichung:

10.10.2017

Tag der mündlichen Prüfung:

09.05.2018



Universität Stuttgart

**IGE** Institut für Gebäudeenergetik  
2018

ISBN – 978 – 3 – 9811996 – 7 – 3

D93

Universität Stuttgart, **IGE**  
Institut für Gebäudeenergetik  
Pfaffenwaldring 35  
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 62085  
Fax.: 0711 / 685 - 62096

Stuttgart, Mai 2018

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorandin und wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Gebäudeenergetik der Universität Stuttgart. Sie wurde ermöglicht und teilweise finanziert durch den Deutschen Akademischen Austauschdienst (DAAD), wofür ich mich vielmals bedanken möchte.

Ein besonderer Dank gilt meinen Doktorvätern Herrn Prof. Dr.-Ing Michael Schmidt und Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Petr Dziachek für die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit und stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion. Das mir entgegengebrachte Vertrauen und ihr Engagement haben mich während meiner Arbeit ermutigt und essentiell zum Gelingen beigetragen.

Mein ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die Übernahme des Mitberichts und wertvolle Hinweise bei der Anfertigung der Arbeit.

Mein ganz herzlicher Dank gilt meiner Familie, die immer ein zuverlässiger Rückhalt für mich war und mir das Studium ermöglicht hat. Ganz besonderer Dank gilt hierbei meiner Mutter für Übersetzungen und Sprachkorrekturen meiner Arbeit. Ebenfalls möchte ich mich herzlich bei meinem Lebensgefährten Philip Kirmse für sein Verständnis und Unterstützung bedanken.

Mein besonderer Dank gilt allen Kollegen und Studenten des Instituts der Gebäudeenergetik und der HLK Stuttgart GmbH für die angenehme Zusammenarbeit, Unterstützung und Freundschaft. Für fachliche Beratung und Unterstützung bei den experimentellen Untersuchungen möchte ich mich bei den Herren Jing Dai, Bernd Klein, Bernd Röhl, Christian Stäbler, Yuanchen Wang herzlich bedanken. Weiterhin danke ich Dr. Tobias Henzler und Martina Ellinger für die Hilfe bei der Veröffentlichung der Arbeit.

Bei meinen Freunden Kostantin Kluchinskij und Dr. Natalia Makarova möchte ich mich für die Beratung in numerischer Modellierung bedanken.

Stuttgart, im Mai 2018

Olga Kaschtschejewa



## Kurzfassung

Wärmerückgewinner reduzieren den Energieaufwand für die Luftbehandlung in raumluftechnischen Geräten und tragen zur Energieeinsparung und Verringerung des Treibhausgasausstoßes im Gebäudesektor bei. Bei der Wärmeübertragung in Wärmerückgewinnern kann Wasserdampfkondensation sowie Reif- oder Eisschichtbildung auftreten. Eine voranschreitende Vereisung des Wärmerückgewinners wird mit Frostschutzstrategien verhindert, um die Betriebssicherheit von raumluftechnischen Geräten sicherzustellen. Die genannten Vorgänge und Maßnahmen haben einen Einfluss auf die Energieeinsparung des Wärmerückgewinners.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Jahresbetrieb eines Wärmerückgewinners unter Berücksichtigung von Kondensation und Frostschutzstrategien zu analysieren und die Jahresenergieeinsparung von Wärmerückgewinnern unter unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zu ermitteln. Hierbei werden Luft-Luft-Plattenwärmerückgewinner mit wasserdampfundurchlässigen Platten untersucht.

Dafür werden ein physikalisch-mathematisches Modell der Wärmeübertragung mit Wasserdampfkondensation erstellt und experimentelle Untersuchungen der Wärmerückgewinnung mit Wasserdampfkondensation durchgeführt. Um den Einfluss der Frostschutzstrategie auf den Betrieb zu analysieren, werden die Einfriergrenzen von Gegenstromwärmerückgewinnern mit einem Ein-/Austrittsbereich in Kreuzstromführung mittels numerischer Modellierung bestimmt. Die aus den Messungen und der Modellierung gewonnenen Erkenntnisse fließen gemeinsam mit in der Literatur vorhandenen Einfriergrenzwerten für Kreuzstrom-Wärmerückgewinner in die Simulationen des Jahresbetriebs von RLT-Geräten ein. Der Frostschutz des Wärmerückgewinners wird dabei durch eine elektrische Vorerwärmung realisiert. Die Simulationen werden für Wärmerückgewinner mit unterschiedlichen Temperaturänderungsgraden durchgeführt. Anschließend wird die Jahresenergieeinsparung der Wärmerückgewinner zusammengestellt und damit als Ergebnis eine Systematisierung der Jahresenergieeinsparungen in Abhängigkeit der klimatischen Bedingungen, der Temperaturänderungsgrade und des Wärmeübertragertyps erarbeitet.

## **Abstract**

Heat recovery in ventilation units reduces energy consumption for ventilation and contributes to the energy savings in buildings as well as to the reduction of the greenhouse gas emission. Heat recovery in heat exchanger can occur with condensation or frost-/ice formation. An extended freezing of heat exchangers should be prevented with frost protection strategies in order to assure reliable operation of ventilation units. All of this has an impact on the energy savings achievable with the heat recovery.

The aim of the present work is to analyse the impact of condensation and frost protection of the annual heat recovery cycle and to investigate energy savings achievable in different climate conditions. Air-to-air plate heat exchangers with water-vapor-tight plates are considered in this work.

Therefore a physical-mathematical model of the heat transfer with water vapor condensation has been developed and experimental investigations of the heat recovery with water vapor condensation have been fulfilled. Freezing-limit-temperatures for counter-flow heat exchanger with cross-flow inlet/outlet zone have been determined by means of numerical modeling.

Findings gained from the measurements and modeling together with the data from previous publications were applied in simulation of the annual operation cycle of a ventilation unit with heat recovery. The simulations have been conducted for heat exchangers with different thermal efficiency. The frost protection of the heat exchanger has been implemented by an electrical preheating. As a result the annual energy savings due to heat recovery have been systematized. The energy savings has been ordered taking into account the impact of the climatic conditions, the temperature efficiency and the type of heat exchanger.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>Nomenklatur .....</b>	<b>10</b>
<b>Dimensionslose Kennzahlen.....</b>	<b>15</b>
<b>Abkürzungen .....</b>	<b>16</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>17</b>
1.1 Literaturübersicht .....	23
1.1.1 Einfluss der Kondensation auf die Wärmerückgewinnung .....	23
1.1.2 Einfluss des Einfrierens auf die Wärmerückgewinnung.....	27
1.1.3 Die Jahresenergieeinsparung durch Wärmerückgewinnung unter Berücksichtigung der Kondensation und des Einfrierens .....	28
1.2 Konsequenzen für die vorliegende Arbeit .....	30
<b>2 Wärme- und Stoffübertragung in rekuperativen Luft - Luft Wärmeübertragern .....</b>	<b>32</b>
2.1 Modell der Wärmeübertragung .....	32
2.2 Konvektiver Wärmeübergang in ebenen Kanälen.....	35
2.3 Übertragungsvorgänge bei Kondensation von Wasserdampf.....	38
2.3.1 Kondensation von Wasserdampf an der Platte .....	38
2.3.2 Kondensation von Wasserdampf im Luftstrom.....	40
2.3.3 Kopplung der Wärme- und Stoffübertragung in Kanälen von Wärmerückgewinnern .....	44
<b>3 Numerische Modellierung der Wärmeübertragung in rekuperativen Luft- Luft-Wärmerückgewinnern.....</b>	<b>51</b>
3.1 Physikalisch-mathematisches Modell der Wärmeübertragung im rekuperativen Wärmerückgewinner .....	51
3.2 Numerische Modellierung der gekoppelten Wärme- und Stoffübertragung im rekuperativen Wärmerückgewinner .....	61
3.2.1 Allgemeiner Ansatz zur Lösung der Differentialgleichungen .....	61
3.2.2 Allgemeines Berechnungsprinzip des Wärmerückgewinners.....	62
3.2.3 Reihenfolge der Luftparameterberechnung in der Zelle .....	62

3.2.4	Bestimmung der Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten .....	67
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen der Wärme- und Stoffübertragung in Wärmerückgewinnern.....</b>	<b>69</b>
4.1	Aufbau der Prüfstände und untersuchten RLT-Geräte .....	69
4.2	Überprüfung des physikalisch-mathematischen Modells und dessen numerische Implementierung.....	75
4.2.1	Bestimmung der Lufttemperaturen am Ein-/Austritt des Wärmerückgewinners.....	76
4.2.2	Bestimmung der Temperaturzunahme der Luft im Ventilator und infolge des Strömungswiderstandes.....	78
4.2.3	Bestimmung des Umgebungseinflusses .....	80
4.2.4	Bestimmung des Einflusses der Plattenprofilierung auf die Wärmeübertragung der untersuchten Wärmerückgewinner.....	84
4.2.5	Vergleich von Simulationsergebnissen und Messungen .....	85
<b>5</b>	<b>Einfriergrenzen der KGS-Wärmerückgewinner .....</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>Einfluss der Kondensation von Wasserdampf auf die Wärmerückgewinnung .....</b>	<b>98</b>
6.1	Einfluss der Luftkonditionen auf die Zunahme des Temperaturänderungsgrades durch Kondensation.....	98
6.1.1	Einfluss der relativen Abluftfeuchte und der Außenlufttemperatur auf den Temperaturänderungsgrad.....	98
6.1.2	Einfluss des Luftmassenstromes auf den Temperaturänderungsgrad .....	103
6.2	Einfluss der Wasserdampfkondensation auf die Wärmerückgewinnung ....	104
6.2.1	Änderung der Temperatur des Luftstromes infolge Kondensation ...	104
6.2.2	Wärmestrom an die Außenluft infolge der Wasserdampfkondensation .....	111
6.3	Vergleich der Zunahme des Temperaturänderungsgrades durch Kondensation in KS- und KGS-Wärmerückgewinnern.....	119
6.3.1	Zunahme des Temperaturänderungsgrades durch Kondensation in KS-Wärmerückgewinnern mit unterschiedlicher Kanalgeometrie.....	119

6.3.2 Vergleich der Zunahme des Temperaturänderungsgrades durch Kondensation in KS- und KGS-Wärmerückgewinnern .....	123
<b>7 Jahresenergieeinsparung des RLT-Gerätes mit Wärmerückgewinner bei unterschiedlichen Klimabedingungen .....</b>	<b>126</b>
7.1 Randbedingungen der Simulation.....	126
7.1.1 Gebäude .....	126
7.1.2 Nutzung.....	127
7.1.3 Luftaustausch.....	127
7.1.4 Feuchtelasten und Raumluftfeuchte.....	127
7.1.5 Klimatische Bedingungen.....	129
7.2 RLT-Gerät.....	129
7.2.1 Grundaufbau des RLT- Gerätes .....	129
7.2.2 Wärmerückgewinner .....	131
7.2.3 Frostschutzstrategie .....	134
7.2.4 Nacherwärmer.....	139
7.2.5 Ventilatoren .....	139
7.3 Analyse des Jahresbetriebes des Plattenwärmerückgewinners unter Berücksichtigung der Frostschutzstrategie .....	141
<b>8 Zusammenfassung .....</b>	<b>152</b>
<b>9 Literatur .....</b>	<b>156</b>
<b>10 Anhänge .....</b>	<b>167</b>
<b>Anhang 1.</b> Empirische Gleichungen für die Berechnung des Wärmeübergangs in durchströmten ebenen Kanälen .....	167
<b>Anhang 2.</b> Ableitung der Differentialgleichungen des Temperaturverlaufes der Außenluft und der Platte.....	169
<b>Anhang 3.</b> Diskretisierung und Transformation des Differentialgleichungssystems zur Lösung mittels Gauss-Seidel-Iteration.....	172
<b>Anhang 4.</b> Druckabfall in der RLT-Anlage .....	181