

Energieeffiziente Naturumlaufabtauung einer CO₂-Wärmepumpe

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von: Kai Kosowski

aus: Hildesheim

eingereicht am: 26. März 2009

mündliche Prüfung am: 19. Januar 2010

Referenten: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Köhler

Prof. Dr.-Ing. Andrea Luke

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Ferit Küçükkay

2010

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	V
Abstract	VI
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Literaturübersicht	1
1.1.1 Historischer Überblick	1
1.1.2 Vereisung und Abtauung des Verdampfers	2
1.1.3 Naturumlauf – Stand der Wissenschaft	3
1.2 Ziel der Arbeit	5
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	5
2 CO₂-Wärmepumpe für hochwärmegedämmte Gebäude	9
2.1 Niedrigstenergie- und Passivhaus-Standard	9
2.2 Möglichkeiten der Wärmeversorgung und Wärmespeicherung	11
2.3 CO ₂ als Kältemittel für Wärmepumpen	13
2.4 Wärmepumpensystem im Passivhaus	16
2.5 Wärmequellen	17
2.5.1 Erdreichbasierte Wärmequellen	18
2.5.2 Umgebungsluft als Wärmequelle	19
3 Problematik der Verdampfervereisung	23
3.1 Reifbildung	23
3.1.1 Wachstumsphasen	24
3.1.2 Dicke und Dichte der Reifschicht	25
3.1.3 Wärmeleitfähigkeit der Reifschicht	26
3.2 Auswirkung der Reifbildung auf den Wärmepumpenprozess	27
3.3 Gängige Abtauverfahren	30
3.3.1 Heißgasabtauung	32
3.3.2 Prozessumkehrabtauung	33

4	Innovativer Lösungsansatz mit CO₂ als Kälteträger in der Abtaugung	37
4.1	Naturumlauf – Stand der Technik	38
4.1.1	Antrieb durch Gravitation	38
4.1.2	Antrieb durch Kapillarkräfte	43
4.2	Neuartige Naturumlaufabtaugung	43
4.3	Vergleich zu den Standardabtauverfahren	45
4.3.1	Abtaueffizienz	45
4.3.2	Abtaudauer	47
4.3.3	Energiebedarf	48
5	Versuchsanlage	51
5.1	Rohrleitungs- und Instrumentenfließbild	51
5.2	Aufbau der Anlage	53
5.2.1	Wärmequelle	54
5.2.2	Kältekreislauf / Wärmepumpenkreislauf	54
5.2.3	Wärmesenke	57
5.3	Messverfahren	57
5.3.1	Verdampferwägung	57
5.3.2	Wärmequelle	58
5.3.3	Kältemittelkreislauf	60
5.3.4	Wärmesenke	60
6	Modellerstellung	61
6.1	Modellierung von Wärmeübertragern	61
6.1.1	Methoden der Modellierung	61
6.1.2	Sandwich-Struktur	62
6.1.3	Zellen	63
6.2	Naturumlauf	64
6.2.1	Kältemittel-Basiszelle	65
6.2.2	Erweiterung der Erhaltungsgleichungen	65
6.2.3	Zusammenfassende Betrachtung des Gleichungssystems	69
6.3	Komponenten des Naturumlaufts	70
6.3.1	Steigrohr und Fallrohr	70
6.3.2	Gaskühler mit Abscheidefunktion	71
6.3.3	Eismasse am Verdampfer	72
6.3.4	Horizontalleitung	74
7	Experimentelle und simulative Ergebnisse	75
7.1	Experimentelle Untersuchungen des Naturumlaufts	75
7.1.1	Abtaugung mit Naturumlauf	75

7.1.2	Füllmengenvariation für die Naturumlaufabtauung	82
7.2	Simulative Untersuchungen des Naturumlaufs	88
7.2.1	Anpassung des Modells	88
7.2.2	Einfluss der Wärmekapazität	90
7.2.3	Höhenvariation	91
7.3	Experimentelle Untersuchungen zur Heißgasabtauung	94
8	Energetische Bewertung	97
8.1	Jahresarbeitszahl	97
8.1.1	Leistungszahl der Wärmepumpe	98
8.1.2	Klimadaten und Bedarfswerte des Referenzhauses	99
8.1.3	Bestimmung der Eismasse am Verdampfer	101
8.1.4	Vergleich der Abtauverfahren	104
8.1.5	Jahresarbeitszahl und Mehraufwand	108
8.2	Parametervariation	111
8.2.1	Einfluss der Eismasse	111
8.2.2	Einfluss der Verdichtereffizienz	112
8.2.3	Einfluss der unteren Speichertemperatur nach Abtauung	114
8.3	Schlussfolgerungen	114
9	Zusammenfassung	117
	Literaturverzeichnis	119
A	Messtechnik	135
B	Bestimmung der luftseitig übertragenen Leistungen	137
B.1	Luftseitige Temperaturen	137
B.2	Luftseitige Strömungsgeschwindigkeit	137
B.3	Luftseitige Leistung	137
C	Bestimmung der Eismasse	141
C.1	Umrechnung der Messdaten	141
C.2	Messdaten	142
D	Jahresarbeitszahlen und Mehraufwand im Passivhaus	145