

Modellgestützte Untersuchung außenaufgestellter, großvolumiger Warmwasserspeicher mit trans- parenter Wärmedämmung

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Markus Gensbaur
(geb. Gerschitzka)

aus Günzburg

Hauptberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. K. Spindler

Mitberichter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. T. Urbaneck

Tag der mündlichen Prüfung: 25.11.2020

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung

der Universität Stuttgart

2021

Inhaltsverzeichnis

Widmung	iii
Danksagung	v
Erklärung über die Eigenständigkeit der Dissertation	vii
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
Nomenklatur	xiii
Inhaltsverzeichnis	xix
1 Einleitung	1
1.1 Zielstellung und Aufbau der Arbeit	2
1.2 Stand der Technik	3
1.3 Abgrenzung zu bisherigen Arbeiten	9
2 Grundlagen	11
2.1 Wärmetransportphänomene außenaufgestellter Warmwasserspeicher	11
2.1.1 Speichermedium	11
2.1.2 Wärmedämmung	14
2.1.3 Thermischer Kontakt zur Umgebung	17
2.2 Numerische Modellbildung und Simulation	25
2.2.1 Knotenmodelle	26
2.2.2 KNN-Modelle	27
3 Untersuchungsmethodik	31
3.1 Versuchsstände	31
3.1.1 Versuchsträger zur Untersuchung transparenter Wärmedämmungen	31
3.1.2 Versuchsstand zur Visualisierung von Luftströmungen	33
3.1.3 Vakuumgedämmter, außenaufgestellter WWS mit TWD im Realmaßstab	34
3.1.4 Vakuumwärmegeprägter WWS im Technikumsmaßstab	37
3.1.5 PUR-Granulat wärmegeprägter WWS im Realmaßstab	38

3.2	Numerische Methoden	40
3.2.1	Dynamische Modellierung in der Simulationsumgebung TRNSYS	40
3.2.2	Modellgestützte Parameteridentifikation mit MATLAB	41
3.3	Untersuchung der Wärmeverluste großer Warmwasserspeicher	43
3.3.1	Klassifizierung der Methoden	43
3.3.2	Numerische Speichermodelle	45
4	Begleitende Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab	47
4.1	Experimentelle Vorversuche zur TWD-Struktur im Labormaßstab	47
4.1.1	Anwendungsrelevante TWD-Eigenschaften	49
4.1.2	Thermisches Verhalten verschiedener TWD-Strukturen	50
4.1.3	Einfluss der Spaltweite	52
4.1.4	Oberflächentemperaturverteilung des Absorbers	54
4.1.5	Auswahl einer TWD-Struktur für den Realmaßstab	56
4.2	Strömungsanalyse in Spalten hoher Aspektverhältnisse	57
4.2.1	Strömungsanalyse bei inhomogenem Absorberrtemperaturfeld	58
4.2.2	Bedeutung der Ergebnisse für den Großmaßstab	59
4.3	Untersuchungen zur Vakuumwärmedämmung im Technikumsmaßstab	60
4.3.1	Leckage- und Evakuierungsdauermessung	60
4.3.2	Temperaturabhängigkeit des Vakuumdrucks	60
5	Experimentelle Untersuchungen im Realmaßstab	63
5.1	WWS mit transparenter Wärmedämmung	63
5.1.1	Einfluss der Umgebungsbedingungen	64
5.1.2	Einfluss der Wärmetransportvorgänge innerhalb der TWD	70
5.1.3	Einfluss des Speicherbetriebszustands	73
5.2	WWS ohne transparente Wärmedämmung	77
5.2.1	Analyse der Speicherwärmeverluste mit Testsequenzen	77
5.2.2	Vergleich zu Labormessungen	86
5.2.3	Oberflächentemperatur der Wandwärmedämmung	88
6	Numerische Modellierung des thermischen Verhaltens einer TWD	91
6.1	Analytischer Modellansatz mit Knotenmodellen	91
6.1.1	Modellentwicklung	91
6.1.2	Verfahren zur Parameteridentifikation	96
6.1.3	Qualitative und quantitative Modellbewertung	97
6.1.4	Untersuchung zur Dauer der Testsequenz	102
6.1.5	Sensitivitätsanalyse	106

6.1.6	Modellparameterkonfiguration des TWD-Modells	109
6.2	Empirischer Modellansatz mit künstlichen neuronalen Netzen	112
6.2.1	Vergleich der Modellierungsarten	113
6.2.2	Anwendung der KNN-Modellierung	117
6.3	Gekoppelte Modellierung von TWD und WWS	119
7	Simulation des Anwendungsfalls SolarAktivHaus	123
7.1	Modellaufbau und Bewertungskenngrößen	123
7.2	Simulationsstudien und Sensitivitätsanalyse	124
8	Schlussbetrachtung	129
8.1	Zusammenfassung	129
8.2	Ausblick	131
	Literaturverzeichnis	133
A	Anhang	145
A.1	Ausgewählte Ähnlichkeitskennzahlen der Wärme- und Stoffübertragung	145
A.2	Sichtfaktoren ausgewählter Geometrien	146
A.3	Ausgewählte Nußelt-Korrelationen	147
A.4	Sensorverteilung verschiedener Messaufbauten	149
A.5	Schemazeichnung verschiedener Versuchsstände	150
A.6	Simulationsmodell SolarAktivHaus	151
A.7	Betrachtung der Wärmegestehungskosten für ein SolarAktivHaus	152