

**Experimentelle und theoretische Untersuchungen
einer Gebäudefassade mit wandintegrierten Wärmerohren**

Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Berthold Stanzel
aus Bad Nauheim / Hessen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. A. Voß
Tag der mündlichen Prüfung:	01.07.1997

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Universität Stuttgart
1997

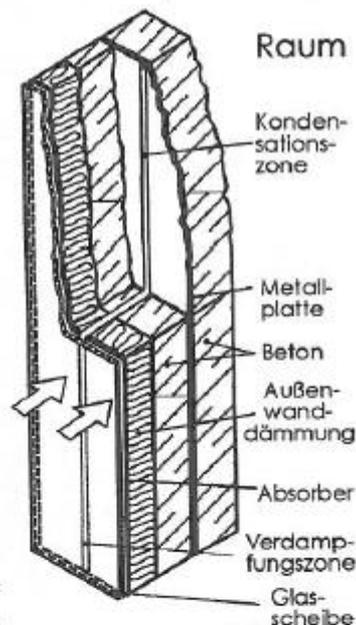
KURZFASSUNG

Das Funktionsprinzip der Wärmediodenwand beruht darauf, daß ein dochtloses Wärmerohr (Thermosiphon) mit seinem unteren Teil (Verdampfungszone) mit einer Absorberfläche verbunden ist, welche die Außenfläche der Hauswand bildet. Das z-förmig gebogene Rohr des Thermosiphons durchstößt die hinter dem Absorber liegende Wärmedämmung und endet in der wärmespeichernden Schicht der Wand. Dort ist das obere Ende des Thermosiphons - die sogenannte Kondensationszone - mit einer Metallplatte verbunden, die in einiger Entfernung von der Innenoberfläche liegt. Erwärmt die Sonnenstrahlung den Absorber, so verdampft in der Verdampfungszone das Wärmeträgermedium und der aufsteigende Dampf kondensiert unter Abgabe seiner Verdampfungswärme in der Kondensationszone. Die abgegebene Wärme wird über die Metallplatte in die Wand eingespeichert und zeitverzögert an den Raum abgegeben. Bis zum Erreichen des thermodynamisch kritischen Zustandes des Wärmeträgermediums können auf diese Weise hohe Wärmeströme übertragen werden.

Im überkritischen Zustand ist das gesamte Wärmeträgermedium verdampft und der Wärmetransport durch freie Konvektion im Thermosiphon ist im Vergleich zum Wärmetransport durch Verdampfung und Kondensation sehr gering. Es kann von einem „Abschalten“ der Wärmeübertragung im Thermosiphon gesprochen werden. Dieses thermische Verhalten ist bei „kritisch befüllten“ Wärmerohren zu beobachten. Dabei ist die Füllmenge so bemessen, daß die mittlere Dichte aus gasförmiger und flüssiger Phase der kritischen Dichte des Arbeitsmediums entspricht. Da die Verdampfung nur unten und die Kondensation nur oben stattfinden kann (nicht aber umgekehrt), wird der Thermosiphon als „Wärmediode“ bezeichnet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Versuchsanlage zur Wärmediodenwand aufgebaut und das thermische Verhalten von „kritisch befüllten“ Thermosiphons für die Stoffe Chlortrifluormethan (R13), Kohlendioxid (CO₂) und Distickstoffoxid (N₂O) untersucht. Die Messungen dienen zudem der Validierung eines mathematischen Modells, das das thermische Verhalten mit hoher Genauigkeit beschreibt.

Die Berechnungen des Jahreswärmebedarfs für den sogenannten „Referenzraum“ mit einer Fensterfläche von 3,5 m² und 7 m² konventionell wärmegeämmter Wand zeigen, daß der auf die Wohnfläche bezogene Heizenergiebedarf bei 77 kWh/(m²a) liegt. Wird die konventionell gedämmte Wand durch eine Wärmediodenwand mit Azeton befüllten Thermosiphons ersetzt, so sind Energieeinsparungen von 37 % möglich. Da Azeton jedoch in der Wärmediodenwand nicht den kritischen Zustand erreicht, kommt es auch nicht zum „Abschalten“ des Wärmetransports und es treten 145 unbehaglich warme Stunden pro Jahr im Referenzraum auf. Werden die Thermosiphons mit Distickstoffoxid kritisch befüllt, so sind mit der Wärmediodenwand Heizenergieeinsparungen von 31 % bei weitestgehender Einhaltung der thermischen Behaglichkeit möglich.



Aufbau der Wärmediodenwand

ABSTRACT

The thermal diode wall was investigated in order to develop a new, passive-solar façade. It reduces the space heating demand and at the same time achieves comfortable summer conditions. Our investigations show that both requirements can be met by using critically filled thermosyphons (thermosyphon is the expression for a wickless heat pipe) containing fluids with a critical temperature between approximately 25 to 35 °C. The fluid mass, filled into the thermosyphon, is identical to the product of the critical density and the volume of the thermosyphon. Chlorotrifluoromethane (R13, $\vartheta_k = 28,8$ °C), Carbon Dioxide (CO_2 $\vartheta_k = 31,1$ °C) and Nitrous Oxide (N_2O , $\vartheta_k = 36,4$ °C) were used as fluids.

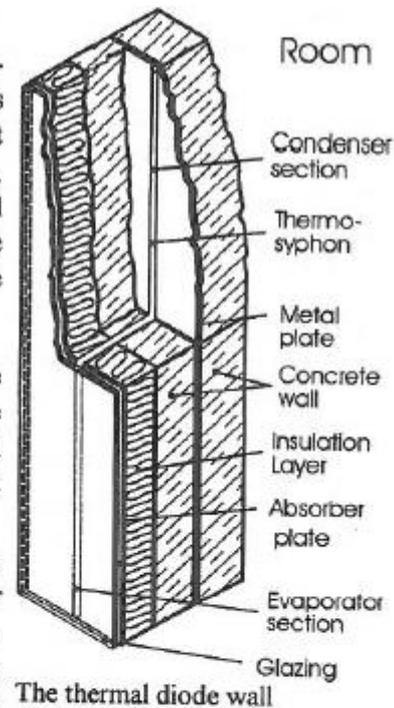
As the picture shows the lower end of the thermosyphon - the vertical evaporator section - is bonded to the absorber plate, which is located on the wall outside surface. The transport section is bent away from the absorber into the wall. Its upper end - the vertical condenser section - is also bonded to a metal plate which serves as a fin. It is positioned inside the wall.

When sunshine heats the absorber, the working fluid will evaporate in the evaporator, steam will flow to the condenser, release its heat of evaporation by condensing and the condensate will flow back to the evaporator.

This transport mechanism breaks down when the thermodynamic critical point is reached. The entire working fluid is then gaseous and natural convection becomes the main heat transfer mechanism. This results in a poor heat transfer. Since both the phase change mechanism and the natural convection mechanism can only transport heat in one direction, from the lower to the upper end, the thermosyphon acts as a thermal diode.

An experimental set-up was constructed to investigate the thermal behaviour of a thermal diode wall. The measurements were used to validate a mathematical model of the thermal diode wall. Measured and calculated heat fluxes and temperatures are in good agreement.

The calculation of the annual heat demand for a so called „reference room“ with a window area of 3,5 m² and 7 m² of conventionally insulated wall is 77 kWh/(m²a) per square meter of floor area and year. Replacing the conventionally insulated wall with a thermal diode wall with acetone filled thermosyphons reduces the heat demand to 48,4 kWh/(m²a) - a saving of 37 %. However 145 unpleasantly warm hours per year occur and thermal comfort is not achieved. Using a diode wall with thermosyphons filled with Nitrous Oxide reduces the heat demand to 52,8 kWh/(m²a) - a saving of 31 % compared to the reference room. Savings of 40 % are possible using a selective absorber, which in turn led to 42 unpleasantly warm hours per year. Their number can be reduced to 30 by increasing the wall thickness to 300 mm, which seem to be acceptable.



INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT.....	III
INHALTSVERZEICHNIS.....	V
FORMELZEICHEN	VII
KURZFASSUNG.....	IX
ABSTRACT.....	X
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	1
2 LITERATURÜBERBLICK.....	4
3 VERSUCHSANLAGE.....	11
3.1 Versuchsaufbau.....	11
3.1.1 Vorüberlegungen zum Versuchsaufbau	11
3.1.2 Aufbau des Absorberkastens.....	15
3.1.3 Aufbau des Wandkastens.....	16
3.1.4 Aufbau der Thermosiphons.....	18
3.2 Meßtechnik.....	21
3.2.1 Heizleistung	21
3.2.2 Wärmeströme.....	22
3.2.3 Temperaturen.....	25
3.2.4 Druck und Sattdampftemperatur im Thermosiphon.....	26
3.3 Wärmebilanzen	27
3.4 Arbeitsmedien	29
3.5 Versuchsdurchführung	31
4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....	33
4.1 Thermisches Verhalten eines mit Kohlendioxid kritisch befüllten Thermosiphons.....	33
4.1.1 Thermisches Verhalten bei „weicher Abschaltung“	33
4.1.2 Thermisches Verhalten bei „harter Abschaltung“	38
4.2 Wärmeübergangskoeffizienten in der Heiz- und Kühlzone.....	39
4.2.1 Wärmeübergangskoeffizienten im Thermosiphon EK1	40
4.2.2 Wärmeübergangskoeffizienten im Thermosiphon E2.....	45
4.3 Wärmeübertragung im Thermosiphon bei unter- und überkritischen Zuständen	49
4.3.1 Filmkondensation in der Kondensationszone bei unterkritischen Zuständen	49
4.3.2 Blasensieden in der Verdampfungszone bei unterkritischen Zuständen	50
4.3.3 Filmsieden in der Verdampfungszone bei unterkritischen Zuständen.....	56
4.3.4 Einphasige, natürliche Konvektion bei überkritischen Zuständen.....	59
4.4 Örtliches Wärmeübertragungsverhalten der kritisch befüllten Thermosiphons.....	60
4.5 Wärmeübergangskoeffizienten für das Berechnungsprogramm	67

5	MATHEMATISCHES MODELL EINES RAUMES MIT INTEGRIERTER WÄRMEDIODENWAND	69
5.1	Mathematisches Modell einer Gebäudewand	69
5.1.1	Numerische Lösung des Differentialgleichungssystems	69
5.1.2	Modellierung des Wandaufbaus	73
5.2	Mathematisches Modell des Absorbers und der Innenrippe	76
5.2.1	Energiebilanz eines Volumenelements des Absorbers	77
5.2.2	Energiebilanz eines Volumenelements der Innenrippe	80
5.3	Einbindung der Rippengleichung in das mathematische Modell der Wand	82
5.3.1	Wärmeübertragungsvermögen des Thermosiphons	82
5.3.2	Wärmebilanz des Absorbers mit integriertem Thermosiphon	83
5.4	Einbindung des Berechnungsprogramms zur Wärmediodenwand in das Simulationsprogramm TRNSYS	87
6	VERGLEICH DER VERSUCHS- UND BERECHNUNGSERGEBNISSE	89
6.1	Überprüfen der Energiebilanzen	89
6.2	Vergleich des berechneten thermischen Verhaltens mit Meßwerten	90
7	VORGABEN ZUR SYSTEMSIMULATION	95
7.1	Geometrische und bauphysikalische Daten des Gebäudes	95
7.2	Beschreibung des Nutzerverhaltens	96
7.3	Thermische Behaglichkeit	97
7.4	Meteorologische Daten	100
7.5	Festlegung der Grundkonfiguration	101
8	ERGEBNISSE DER THEORETISCHEN UNTERSUCHUNGEN	102
8.1	Untersuchung des Wärmebrückeneffekts	102
8.2	Jahresheizwärmebedarf und thermische Behaglichkeit eines Raumes mit einer konventionell wärmedämmten Südfassade	104
8.3	Wärmediodenwand mit acetonbefüllten Thermosiphons	107
8.4	Wärmediodenwand mit kritisch befüllten Thermosiphons	114
8.5	Untersuchung konstruktionsbedingter, nutzerabhängiger und weiterer Parameter	126
8.5.1	Untersuchung konstruktionsbedingter Parameter	127
8.5.2	Untersuchung nutzerabhängiger Parameter	129
8.5.3	Untersuchung weiterer Parameter	132
8.6	Entwicklung einer verbesserten Variante der Wärmediodenwand	133
9	ZUSAMMENFASSUNG	138
	ANHANG A	142
	ANHANG B	146
	ANHANG C	149
	LITERATURVERZEICHNIS	157