

1713

1713

WÄRMERÜCKGEWINNER IN RAUMLUFTTECHNISCHEN ANLAGEN

Heat Recovery Devices in Ventilation Systems

Rüdiger Külpmann

Technische Universität Berlin

Hermann-Rietschel-Institut für Heizungs- und Klimatechnik
gf. Direktor: Prof. Dr.-Ing. Horst Esdorn

Abstract The increasing number of heat recovery devices in ventilation systems for residential buildings cause the necessity of a standard test procedure.

In this paper the main examination criteria are stated. The test facilities to determinate the efficiencies and the air leakage of heat recovery devices are specified. The used test procedure is discribed.

The results from different heat recovery units indicate the suitability of the developed test equipment.

1. Einleitung

Mit Hilfe von Raumlufthechnischen Anlagen sind die Möglichkeiten gegeben, den Luftwechsel in Gebäuden definiert auf das hygienisch erforderliche Mindestmaß zu beschränken und durch Energierückgewinnung aus der Abluft die Lüftungswärmeverluste zu minimieren. Es ist zu erwarten, daß zukünftig eine Vielzahl von Wärmerückgewinnungsgeräten auf dem Markt angeboten wird.

Damit ergibt sich die Notwendigkeit, durch einheitliche Beurteilungsbedingungen, Wärmerückgewinner in allen betriebswesentlichen Eigenschaften vergleichbar zu machen.

In diesem Bericht werden die bisherigen Ergebnisse

eines Forschungsvorhabens mitgeteilt, dessen Ziel die Entwicklung eines Normprüfverfahrens für Wärmerückgewinner im Leistungsbereich der Wohnungslüftung ist.

Dazu war eine Versuchseinrichtung zu konzipieren, zu bauen und zu erproben. Die Prüfanlage sollte es ermöglichen, unabhängig von äußeren Witterungsbedingungen, für die Abluftseite alle im Bereich der Wohnungslüftung interessierenden Luftzustände und für die Außenluftseite alle in üblichen Regionen der Bundesrepublik Deutschland auftretenden Außenluftzustände nachzubilden. Das Prüfverfahren und die Prüfeinrichtung sollten an einer Reihe unterschiedlicher Typen von Wärmerückgewinnern getestet werden.

2. Untersuchungsmethoden

An Hand der in Bild 1 aufgeführten Beurteilungskriterien wird nachstehend das entwickelte Prüfverfahren dargestellt.

2.1 Beschreibung des Prüflings

In der Beschreibung des Prüflings müssen neben der Klassifikation (VDI 2071 Blatt 1) auch konstruktive Angaben enthalten sein.

Die wesentlichen sind:

Abmessungen, Gewichte, Werkstoffe des Prüflings, ggf. Zusammensetzung und Menge eines Umlaufmediums, Einbauvorschriften, Versorgungs- und Entsorgungsanschlüsse, Art und Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen.

2.2 Konstruktive Beurteilung des Prüflings

Die konstruktive Beurteilung des Prüflings ist erforderlich bezüglich seines Verhaltens bei extremen Druck- und Temperaturdifferenzen zwischen den Luftströmen.

Das Verhalten unter diesen Extremzuständen wird auch experimentell überprüft. Diese Prüfung kann jedoch keine Aussage über das Langzeitverhalten und über eventuelle Schwachpunkte

in bezug auf mechanische Empfindlichkeit

2.3 Leistungskennzahlen

Eine getrennte Ermittlung der Leistungsziffer und latenter Energieübertragungsziffer, Rückwärmzahl und Rückfeuchtzahl gemessen im folgenden beschriebenen Versuchsverfahren

In Bild 2 ist ein Fließschema der Anlage dargestellt. Die Anordnung und die Auslegung entsprechen im Bereich der Wohnungslüftung zu einem Volumenstrom von 300 bis 1000 m³/h extremen Winterzuständen ($t_{21} = -10$ bis zu extremen Sommerzuständen $t_{21} = 30$ °C) alle Zustände einstellbar. Ablufttemperatur t_{11} = 18 - 26 °C; $x_{11} = 0,01$ bis 0,02 werden.

Die Funktion der Anlage sei zur "Winterzustand" erläutert: Über den kontinuierlich arbeitenden feuchter D bzw. dessen Bypass die Kühlstufen C3, C2 und CT2 über einen Kaltwassersatz verlaufend über einen Solekühlkreislauf mit dem Ventilator V2 und den Strömungsgläsern in den Meßstreckenbereichen

Zur Bestimmung des Feuchtegehalts der Abluft wird über das Meßgerät die Volumenstrommessung (t_{21}) an. Nach der Bestimmung (p_{21}) tritt der Außenluft

in bezug auf mechanische Empfindlichkeit liefern.

2.3 Leistungskennzahlen

Eine getrennte Ermittlung der Leistungskennzahlen nach sensibler und latenter Energieübertragung, dargestellt als Rückwärmzahl und Rückfeuchtzahl gemäß Bild 1, ist mit dem im folgenden beschriebenen Versuchsaufbau möglich.

In Bild 2 ist ein Fließschema der Prüfanlage dargestellt. Die Anordnung und die Auslegung erlauben die Einstellung von korrespondierenden Außenluft- und Abluftzuständen, die im Bereich der Wohnungslüftung zu erwarten sind. Für einen Volumenstrom von 300 bis 1000 m³/h sind außenluftseitig von extremen Winterzuständen ($t_{21} = -15\text{ }^{\circ}\text{C}$; $x_{21} = 0,8\text{ g/kg}$) bis zu extremen Sommerzuständen ($t_{21} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$; $x_{21} = 12\text{ g/kg}$) alle Zustände einstellbar. Abluftseitig können charakteristische Zustandsbereiche für den Wohnbereich und für Naßräume ($t_{11} = 18 - 26\text{ }^{\circ}\text{C}$; $x_{11} = 3 - 13\text{ g/kg}$) eingestellt werden.

Die Funktion der Anlage sei zunächst für den Prüffall "Winterzustand" erläutert:

Über den kontinuierlich arbeitenden Adsorptions-Luftentfeuchter D bzw. dessen Bypass B2 durchströmt die Außenluft die Kühlstufen C3, C2 und CT2. Die Kühler C2 und C3 werden über einen Kaltwassersatz versorgt, der Kühler CT2, der für Lufttemperaturen kleiner 8 °C die weitere Kühlung übernimmt, über einen Solekühlkreislauf. Über den nachfolgenden Ventilator V2 und den Strömungsgleichrichter G2 tritt die Außenluft in den Meßstreckenbereich AU (Außenluft) ein.

Zur Bestimmung des Feuchtegehaltes wird ein Teilstrom abgezogen und über das Meßgerät (X21) geführt. Daran schließen sich die Volumenstrommessung (V21) sowie die Temperaturmessung (t_{21}) an. Nach der Bestimmung des statischen Druckes (p_{21}) tritt der Außenluftstrom in den WRG-Prüfling ein.

Auf der Abluftseite werden für den "Winterzustand" der Lufterhitzer H1 sowie die Dampfbefeuchter M10 und M11 benötigt. Die Meßgrößenbestimmung erfolgt in gleicher Weise wie bei der Außenluftseite.

Die aus dem WRG-Prüfling austretenden Luftströme werden nach der Messung der statischen Drücke $(P22)/(P12)$, der Temperaturen $(t22)/(t12)$, der Volumenströme $(V22)/(V12)$ und der Feuchtegehalte $(x22)/(x12)$ gemischt und erneut dem Kreislauf zugeführt.

Zur Einstellung des gewünschten Differenzdruckes zwischen der Außenluft- und Abluftseite dienen die Drosseln D1 und D2. Über den Ventilator V4 und die Drosselklappen D3 bis D6 wird das Druckniveau gegenüber der Umgebung aufgeprägt.

Für die Einstellung von "Sommerzuständen" werden außenluftseitig der Luftherhitzer H2 und abluftseitig der Wasserkühler C1 eingesetzt. Eine Einstellung von niedrigeren Feuchtegehalten auf der Abluftseite gegenüber der Außenluftseite wird durch Umschaltung des Luftentfeuchters D zur Abluftseite und Betrieb des Dampfbefeuchters M1 auf der Außenluftseite ermöglicht.

Auf die Meßgrößen sei hier nur kurz eingegangen:

Die Temperaturen in den Luftkanälen werden, wie in Bild 3 dargestellt, in 4 für alle Wärmerückgewinner-Prüflinge gleichen Temperaturmeßebenen erfaßt. Diese bestehen jeweils aus einem Gitter von 39 in Reihe geschalteten Thermoelementverbindungsstellen (Fe-CuNi) mit einer mittleren Gitterteilung von 2 cm. Zur Erzielung eines praktisch isothermen Strömungsprofils vor den Meßebenen dienen Wirbeleinbauten an den Wärmeaustauscher-Austrittsseiten. Eintrittsseitig wird durch die jeweilige Durchflußmeßeinrichtung vor den Temperaturmeßebenen eine ausreichende Durchmischung der Luft erreicht.

Der Feuchtegehalt wird nach der psychrometrischen Methode gemessen. In Bild 4 ist der Aufbau des Psychrometers skizziert. Die Temperaturdifferenz und die psychrometrische Temperaturdifferenz und Feuchtegehalt werden ebenfalls mit Thermoelementen

Als besondere Merkmale sind zu nennen: Kontinuierliche Befeuchtung des Bauprüflings durch Feuchtkugeltemperaturmessung, Minimalschutzrohrstrecke für die Feuchtkugeltemperaturmessung, Wärmeleitungssperren und Strahlungsabschirmung der Meßluft vor Eintritt in die Meßebenen, um das Sinken der Feuchtkugeltemperaturpunkt zu verhindern.

Für die Erfassung der Luftmasse werden Düsen nach ISA mit dem Verhältnis $d/D = 0,6$ verwendet. DIN 1952 (1982).

Als Druckmeßaufnehmer dienen piezoelektrische Ausgangsgeräte.

Der Prüfstand ist mit einer Messungsanlage ausgestattet. Sämtliche Messungen werden in einem 12 Bit A/D-Wandler weiterverarbeitet.

Die durchgeführten Versuche wurden bei verschiedenen Außenluftzuständen durchgeführt: $x_{21} = 0,8 \text{ g/kg}$ und $t_{21} = 32 \text{ °C}$

Zur Bestimmung der Rückwärme wurden die Ergebnisse der Vorversuche bei $t_{21} = 0 \text{ °C}$ und $x_{21} = 3,0 \text{ g/kg}$ verwendet.

"Winterzustand" der Luft-
ter M10 und M11 benötigt.
gleicher Weise wie bei

den Luftströme werden nach
(P22)/(P12), der Tempera-
ne (V22)/(V12) und der
c und erneut dem Kreis-

ferenzdruckes zwischen
en die Drosseln D1 und
Drosselklappen D3 bis D6
Umgebung aufgeprägt.

änden" werden außenluft-
ftseitig der Wasserkühler
niedrigeren Feuchtege-
r der Außenluftseite wird
ers D zur Abluftseite
auf der Außenluftseite

eingegangen:

werden, wie in Bild 3
Gewinner-Prüflinge
Diese bestehen jeweils
schalteten Thermoement-
er mittleren Gittertei-
praktisch isothermen
lienen Wirbeleinbauten
ten. Eintrittsseitig
Beinrichtung vor den
e Durchmischung der Luft

Der Feuchtegehalt wird nach der psychrometrischen Methode gemessen. In Bild 4 ist der Aufbau des hierfür entwickelten Psychrometers skizziert. Die Temperaturmessungen (psychrometrische Temperaturdifferenz und Feuchtkugeltemperatur) erfolgen ebenfalls mit Thermoelementen.

Als besondere Merkmale sind zu nennen:
Kontinuierliche Befeuchtung des Baumwollstrumpfes für die Feuchtkugeltemperaturmessung, Minimierung von Fremdwärmeinflüssen durch Führung der Thermodrähte in Luftrichtung, Schutzrohrstrecke für die Feuchtkugeltemperatur-Meßleitung, Wärmeleitungssperren und Strahlungsschutzrohr über dem Feucht- und Trockenkugelmeßbereich, gegebenenfalls Vorwärmung der Meßluft vor Eintritt in den Meßfühler, um ein Absinken der Feuchtkugeltemperatur unter den Gefrierpunkt zu verhindern.

Für die Erfassung der Luftmassenströme vor und nach dem Prüfling werden Düsen nach ISA 1932 mit einem Öffnungsverhältnis $d/D = 0,6$ verwendet. Die Auswertung erfolgt gemäß DIN 1952 (1982).

Als Druckmeßaufnehmer dienen Tauchglockenmanometer mit analogem elektrischen Ausgangssignal.

Der Prüfstand ist mit einer Datenerfassungs- und verarbeitungsanlage ausgestattet. Sämtliche analogen Eingangssignale werden in einem 12 Bit A/D-Wandler digitalisiert und zur weiteren Verarbeitung der Zentralrecheneinheit zugeführt.

Die durchgeführten Versuchsreihen umfaßten je Prüfling 5 verschiedene Außenluftzustände zwischen $t_{21} = -15\text{ °C}/x_{21} = 0,8\text{ g/kg}$ und $t_{21} = 32\text{ °C}/x_{21} = 12\text{ g/kg}$.

Zur Bestimmung der Rückwärm- und Rückfeuchtzahlen wurde nach dem Ergebnis der Vorversuche ein mittlerer Betriebszustand von $t_{21} = 0\text{ °C}/x_{21} = 3,0\text{ g/kg}$ für die Außenluftseite gewählt,

da sich in diesem Betriebszustand die Meß- und Regelgenauigkeit des Prüfstandes als am günstigsten herausgestellt hat.

Auf der Abluftseite wurde zur Bestimmung der Rückwärmzahl der Feuchtegehalt der Abluft jeweils so gefahren, daß der Taupunkt unterhalb der Eintrittstemperatur für die Außenluft lag. Die Ablufttemperatur wurde bei allen Versuchen auf 22 °C gehalten.

Versuche zur Bestimmung der Rückfeuchtzahl wurden zusätzlich mit einem abluftseitigen Feuchtegehalt von $x_{11} = 8 \text{ g/kg}$ durchgeführt. Als Bezugswerte der Massenströme gelten der Außenluftaustrittsstrom (\dot{m}_{22}) und der Ablufteintrittsstrom (\dot{m}_{11}), da diese Größen auch den Sollwerten der RLT-Anlage entsprechen. Bei den Prüfungen wurden diese $\pm 20 \%$ um die Auslegungsmassenströme variiert. Die statische Druckdifferenz $p_{22} - p_{11}$ zwischen der Außen- und Abluftseite wurde im Bereich von 0 ... 20 Pa eingestellt.

2.4 Leckluftströme

Infolge von Undichtheiten kann sowohl ein Luftaustausch zwischen den Luftwegen eines WRG und der Umgebung ("externer Leckluftstrom") als auch zwischen den Luftwegen ("interner Leckluftstrom") auftreten.

Die Leistungskennzahlen können hierdurch erheblich beeinflußt werden. Die Änderung der Rückwärmzahl ϕ_2 mit externem Leckluftstrom zu der Rückwärmzahl ϕ_{20} ohne Leckluft zeigt beispielhaft die untere Darstellung in Bild 5. Ein Übertreten von Abluft zur Außenluftseite wirkt sich ähnlich aus. Durch eine Druckdifferenz $p_{22} - p_{11} > 0$ kann dieser interne Leckluftstrom jedoch von der Außenluftseite zur Abluftseite gerichtet werden, so daß eine Fehlmessung der Leistungskennzahlen ausgeschlossen ist.

Im Bild 5 ist der Versuchsaufbau zur Ermittlung der möglichen Leckluftströme skizziert. Der externe Leckluftstrom \dot{m}_{Ex} wird an

der Durchflußmeßeinrichtung (\dot{V}) bei Druckdifferenzen zur Umgebung gesamten Wärmerückgewinner. Bei der Luftstromes \dot{m}_1 wird die Abluftseite positiven Differenzdruck zur Außenluftseitig angeordnete Ventil druck $p_2 - p_0 = 0$ hält und dadurch tene Luft über die Durchflußmeß-

Unter Beachtung der jeweiligen wurden als maximale Druckdifferenzen externen Leckluftstromes $\Delta p_{1/2} = \Delta p_1 = 300 \text{ Pa}$ bei der Feststellung mes.

2.5 Mitführungsluftstrom

Zusätzlich zum externen und zum von der Druckdifferenz zwischen bei regenerativen Wärmerückgewinnung der Austauschflächen Luftaustausch zwischen den Luftmasse verbleibende Luft (hier: u.U. durch spezielle Spüleinrichtungen). Diese Übertragungsgröße muß ermittelt werden. Wenn keine wird der Mitführungsluftstrom bisher "Mitrotationsluft") am Hohlraumvolumens und entsprechenden Austauschern mit Spüleinrichtungen z.B. mit Impfmethode ermittelt.

Daneben kann bei den genannten von Luftbeimengungen (Partikel) über Haftvorgänge an den Austauschern diese von denen durch Mitführung müssen bei der Messung der Leckluftstroms abgezogen werden, bei denen Haften

der Durchflußmeßeinrichtung (\dot{V}) bei positiven und negativen Druckdifferenzen zur Umgebung gemessen. Er gilt für den gesamten Wärmerückgewinner. Bei der Messung des internen Leckluftstromes \dot{m}_I wird die Abluftseite des Prüflings auf einen positiven Differenzdruck zur Umgebung gebracht, während der außenluftseitig angeordnete Ventilator (V2) einen Differenzdruck $p_2 - p_0 = 0$ hält und dadurch nur die intern übergetretene Luft über die Durchflußmeßstelle (\dot{V}) absaugt.

Unter Beachtung der jeweiligen herstellerseitigen Grenzwerte wurden als maximale Druckdifferenzen für die Messung des externen Leckluftstromes $\Delta p_{1/2} = \pm 500$ Pa aufgeprägt sowie $\Delta p_1 = 300$ Pa bei der Feststellung des internen Leckluftstromes.

2.5 Mitführungsluftstrom

Zusätzlich zum externen und zum internen Leckluftstrom, der von der Druckdifferenz zwischen den Luftwegen abhängt, tritt bei regenerativen Wärmerückgewinnern mit wechselnder Beaufschlagung der Austauschflächen durch Außen- und Abluft ein Luftaustausch zwischen den Luftwegen durch in der Speicher- masse verbleibende Luft (hier: "Mitführungsluft") auf, der u.U. durch spezielle Spüleinrichtungen reduziert werden kann. Diese Übertragungsgröße muß unter normalen Betriebsbedingungen ermittelt werden. Wenn keine Spüleinrichtungen vorhanden sind, wird der Mitführungsluftstrom (bei rotierenden Austauschern bisher "Mitrotationsluft") am genauesten durch Vermessen des Hohlraumvolumens und entsprechende Umrechnung bestimmt. Bei Austauschern mit Spüleinrichtung kann er nur experimentell, z.B. mit Impfmethode ermittelt werden.

Daneben kann bei den genannten WRG-Typen auch ein Austausch von Luftbeimengungen (Partikel, Keime, Geruchsstoffe u.a.m.) über Haftvorgänge an den Austauschflächen erfolgen. Wenn diese von denen durch Mitführungsluft getrennt werden sollen, müssen bei der Messung der Mitführungsluft Impfstoffe verwendet werden, bei denen Haftvorgänge (Anlagerung, Adsorption

u.ä.) ausgeschlossen werden können.

Da bisher in der Praxis zwischen den beiden genannten Übertragungsmechanismen nicht unterschieden wird, wurden hierfür bei der bisherigen Entwicklung des Prüfverfahrens Meßmethoden angewendet, bei denen weniger der innere Übertragungsmechanismus im Vordergrund steht als vielmehr die praktische Bedeutung der Impfstoffe. Die Prüfungen wurden zum einen mit Staubpartikeln und zum anderen mit Bakterien durchgeführt.

Bei der Partikelmessung wurden die Partikelkonzentration und die Korngrößenverteilung in beiden Luftströmen mit einem in fünf Kornfraktionen unterteilenden Partikelzähler bestimmt. Die Aufgabe der Partikel erfolgt durch Zerstäubung einer Suspension auf der Abluftseite in ausreichender Entfernung vor der Meßstelle. Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit wird dabei der Außenluftstrom über ein Schwebstofffilter (Klasse S) auf geringstmögliche Partikelkonzentration gebracht, so daß die am Austritt des Außenluftstromes gemessenen Konzentrationen praktisch ausschließlich auf die genannten internen Übertragungsmechanismen zurückgeführt werden können. Bei der Messung wird die Außenluftseite des Austauschers auf der Austrittsseite auf leichtem Überdruck gegenüber dem Eintritt der Abluftseite gehalten, so daß eine Beeinflussung des Meßergebnisses durch internen Leckluftstrom ausgeschlossen ist.

In analoger Weise wurden Messungen mit Bakterien durchgeführt. Eine mit Bakterienkulturen beladene Suspension wurde über einen Zerstäuber in den Abluftweg eingesprüht. Die Messung erfolgte mit 4 Anderson-Samplern, bei denen die Abscheidung in sechs unterschiedlichen Fraktionen erfolgt. Die Auswertung wurde durch Bebrüten der Proben und Auszählen der Kulturen vorgenommen.

Als Übertragungsrates ist das Verhältnis definiert: Differenz

der Partikelzahl bzw. Anzahl der koloniereinheiten zwischen der Außenluftseite zu der auf der Ablufteintritts-

Eine weitere Beeinflussung der Rückwärmestrom über die Umschließungsflächwärmedurchgangswiderstand der Wärme von $R = 1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ wird dieser jedoch

2.6 Druckverluste

Die luftseitigen Druckdifferenzen Austrittsseiten der Wärmerückgewinnung über den Umfang gleichverteilten statischen Druck erfaßt und über Taupunktische Ausgangssignale umgesetzt für mindestens drei verschiedene Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt. Die gen Druckverluste bei WRG mit Um den Richtlinien der VDI/VDE 3512

2.7 Hilfsenergien

Die Leistungsaufnahme von Hilfspumpen und Antriebe für rotierende wurde unter praktischen Betriebs-

2.8 Kondensations- und Einfrier-

In den Untersuchungen zum Verdunstung und Vereisung wurde mehreren Stufen bis $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ a Zustand $t_{11} = 22 \text{ }^\circ\text{C}/x_{11} = 8 \text{ g}$ Die Messungen erfolgten jeweils stellten Frostschutzeinricht-

Zur Kennzeichnung des Einfrierdes abluftseitigen Druckverlustes Z_F von 5 h bei konstant geh-

der Partikelzahl bzw. Anzahl der koloniebildenden Bakterieneinheiten zwischen der Außenluftaustritts- und Eintrittsseite zu der auf der Ablufteintrittsseite.

Eine weitere Beeinflussung der Rückwärmzahl wird durch den Wärmestrom über die Umschließungsflächen bewirkt. Bei einem Wärmedurchgangswiderstand der Wärmedämmung des Prüflings von $R = 1,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ wird dieser jedoch ausreichend begrenzt.

2.6 Druckverluste

Die luftseitigen Druckdifferenzen wurden an den Ein- und Austrittsseiten der Wärmerückgewinner-Prüflinge mit je 4 über den Umfang gleichverteilten Bohrungen für den statischen Druck erfaßt und über Tauchglockenmanometer in elektrische Ausgangssignale umgesetzt. Die Druckverluste werden für mindestens drei verschiedene Luftmassenströme bei einer Temperatur von $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bestimmt. Die Bestimmung der wasserseitigen Druckverluste bei WRG mit Umlaufwasser erfolgt gemäß den Richtlinien der VDI/VDE 3512 / Blatt 3.

2.7 Hilfsenergien

Die Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen (z.B. Umwälzpumpen und Antriebe für rotierende Speichermassen u.a.m.) wurde unter praktischen Betriebsbedingungen gemessen.

2.8 Kondensations- und Einfrierverhalten

In den Untersuchungen zum Verhalten der Prüflinge bei Kondensation und Vereisung wurde die Außenlufttemperatur in mehreren Stufen bis $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ abgesenkt, während der Abluftzustand $t_{11} = 22 \text{ }^\circ\text{C}/x_{11} = 8 \text{ g/kg}$ konstant gehalten wurde. Die Messungen erfolgten jeweils mit den zur Prüfung bereitgestellten Frostschutzeinrichtungen.

Zur Kennzeichnung des Einfrierverhaltens wurde der Anstieg des abluftseitigen Druckverlustes über einer Betriebszeit t_p von 5 h bei konstant gehaltenem Abluftmassenstrom benutzt.

Überstieg der Druckverlust vor Ablauf der 5 Stunden **Meßzeit**, den doppelten Wert gegenüber kondensationsfreiem **Betrieb**, wurde die Zeit bis zum Erreichen dieses Wertes als kennzeichnende Größe festgehalten.

2.9 Regelungs- und Steuereinrichtungen

Aufgrund der gewählten Versuchsanlagenkonzeption mit Zusammenführung von Fortluft- und Zuluftstrom nach dem Wärmerückgewinner-Prüfling wirken sich Änderungen im Übertragungsverhalten des Prüflings infolge von Regelvorgängen nicht auf den Eintrittszustand in die Luftaufbereitungsstrecken aus. Damit ergeben sich auch gute Voraussetzungen für eine Prüfung des Betriebsverhaltens zugehöriger Regel- und Steuereinrichtungen.

3. Untersuchungsergebnisse

Die Ergebnisse für drei Testreihen mit Wärmerückgewinnern der Kategorie I bis III (gemäß VDI 2071, Blatt 1) sind in den Tabellen 1 bis 3 dargestellt.

Die durchgeführten Testreihen ergaben, daß alle angestrebten Luftzustände mit der vorgestellten Versuchsanlage stabil einstellbar sind und daß die Meßanordnung die an sie zu stellenden Anforderungen erfüllt.

Einschließlich der erzielten Regelgenauigkeit der Anlage kann die Rückwärmzahl mit einer Meßunsicherheit von $\pm 3\%$ und die Rückfeuchtzahl mit einer solchen von $\pm 5\%$, bezogen auf eine Leistungskennzahl von 50 %, bestimmt werden.

Tabelle 1: Prüfling 1

1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie I (Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 90$ Art und Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen: n Regel- und Steuerungseinrichtungen: n

2.) Externer Leckluftstrom:

$P_{1/2} - P_0$ [Pa]
+ 500
- 500

3.) Interner Leckluftstrom:

$P_1 - P_2$ [Pa]
+ 320

4.) Mitführungsluftstrom: entfällt

5.) Rückwärmzahl/Rückfeuchtzahl:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N}$	$\frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$
0,8	0,8
0,8	1,0
1,0	0,8
1,0	1,0
1,0	1,0
1,2	1,0
1,2	1,0

Tabelle 1: Prüfling 1

1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie I (Rekuperator)Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 960 \text{ kg/h}$

Art und Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen: keine

Regel- und Steuerungseinrichtungen: nicht zur Prüfung beigelegt

2.) Externer Leckluftstrom:

$p_{1/2} - p_0 \text{ [Pa]}$	$\frac{\dot{m}_{Ex}}{\dot{m}_N} \text{ [%]}$
+ 500	< 1
- 500	< 1

3.) Interner Leckluftstrom:

$p_1 - p_2 \text{ [Pa]}$	$\frac{\dot{m}_I}{\dot{m}_N} \text{ [%]}$
+ 320	< 1

4.) Mitführungsluftstrom: entfällt5.) Rückwärmzahl/Rückfeuchtzahl:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N}$	$\frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	ϕ_2	ψ_2
0,8	0,8	0,49	-
0,8	1,0	0,51	-
1,0	0,8	0,44	-
1,0	1,0	0,48	-
1,0	1,2	0,50	-
1,2	1,0	0,43	-
1,2	1,2	0,48	-

Fortsetzung Tabelle 1

6.) Luftseitiger Druckverlust bei 20 °C

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N} ; \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]
0,8	93	84
1,0	122	116
1,2	174	153

7.) Versuch zur Bestimmung des Einfrierverhaltens:

Außenlufteintrittszustand	t_{21}/x_{21}	:	- 10 °C/1 g/kg
Ablufteintrittszustand	t_{11}/x_{11}	:	22 °C/8 g/kg
Massenstromverhältnis	$\dot{m}_{22}/\dot{m}_{11}$:	1 $\frac{\dot{m}_N}{\dot{m}_N}$
Versuchsdauer	Z_F	:	1,9 h
Druckanstiegsverhältnis	$\frac{\Delta p_{E1}}{\Delta p_1}$:	> 2

Tabelle 2: Prüfling 2

- 1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie II
 Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 96$
 Art und Zusammensetzung des Umlaufmedi-
 Wasser/Gefrierschutzmittel; 34 Vol.
 Art und Leistungsaufnahme von Hilfsei-
 Flüssigkeitsumwälzpumpe: $p_{e1} = 0,1$
 Flüssigkeitsseitiger Druckverlust: Δp
 Nennmassenstrom des Umlaufmediums \dot{m}_W
 Regel- und Steuereinrichtungen: nicht

2.) Externer Leckluftstrom:

$p_{1/2} - p_0$ [Pa]	\dot{m}_{Ex} [kg/h]		\dot{m}_E AU-Seite
	AU-Seite	AB-Seite	
300	-46,30	-48,24	-4,8
400	-51,56	-54,36	-5,1
500	-56,45	-58,52	-5,1
-300	43,50	44,83	4,1
-400	45,00	46,15	4,1
-500	48,56	50,11	5,1

$\dot{m}_{Ex} < 0$: Leckluftstrom zur Umgebung

3.) Interner Leckluftstrom: entfällt

4.) Mitführungsluftstrom: entfällt

Tabelle 2: Prüfling 2

Δp_2 [Pa]
84
116
153

altens:

- 10 °C/1 g/kg
- 22 °C/8 g/kg
- 1 $\frac{m_N}{m_N}$
- 1,9 h
- > 2

1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie II (Kreislaufverbund)

Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 960$ kg/h

Art und Zusammensetzung des Umlaufmediums:

Wasser/Gefrierschutzmittel; 34 Vol. % Gefrierschutzmittelanteil

Art und Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen:

Flüssigkeitsumwälzpumpe: $P_{el} = 0,110$ kW

Flüssigkeitsseitiger Druckverlust: $\Delta p_{W2} = 239$ hPa; $\Delta p_{W1} = 232$ hPa

Nennmassenstrom des Umlaufmediums \dot{m}_W : 0,22 kg/s

Regel- und Steuereinrichtungen: nicht zur Prüfung beigelegt

2.) Externer Leckluftstrom:

$P_{1/2} - P_0$ [Pa]	\dot{m}_{Ex} [kg/h]		\dot{m}_{Ex}/\dot{m}_N [%]		$\Sigma \dot{m}_{Ex}$ [kg/h]	$\Sigma \dot{m}_{Ex}/\dot{m}_N$ [%]
	AU-Seite	AB-Seite	AU-Seite	AB-Seite		
300	-46,30	-48,24	-4,82	-5,03	- 94,54	- 9,85
400	-51,56	-54,36	-5,37	-5,66	-105,92	-11,03
500	-56,45	-58,52	-5,88	-6,10	-114,97	-11,98
-300	43,50	44,83	4,53	4,67	88,33	9,20
-400	45,00	46,15	4,69	4,81	91,15	9,50
-500	48,56	50,11	5,06	5,22	98,67	10,28

$\dot{m}_{Ex} < 0$: Leckluftstrom zur Umgebung gerichtet

3.) Interner Leckluftstrom: entfällt

4.) Mitführungsluftstrom: entfällt

Fortsetzung Tabelle 2

5.) Rückwärmzahl/Rückfeuchtzahl:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N}$	$\frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	ϕ_2	ψ_2
0,9	0,9	0,51	-
0,9	1,0	0,54	-
1,0	0,9	0,47	-
1,0	1,0	0,50	-
1,0	1,1	0,51	-
1,1	1,0	0,46	-
1,1	1,1	0,48	-

6.) Luftseitiger Druckverlust bei 20 °C:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N} ; \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]
0,9	89	83
1	102	97
1,1	118	116
1,2	135	133

7.) Versuch zur Bestimmung des Einfrierungsverhaltens:

Außenlufteintrittszustand	t_{21}/x_{21}	: - 15 °C/0,8 g/kg
Ablufteintrittszustand	t_{11}/x_{11}	: 22 °C/8 g/kg
Massenstromverhältnis	$\dot{m}_{22}/\dot{m}_{11}$: 1 \dot{m}_N/\dot{m}_N
Versuchsdauer	Z_F	: 5 h
Druckanstiegsverhältnis	$\Delta p_{E1}/\Delta p_1$: 1,61
Eintrittstemperatur des Umlaufmediums	t_{W11}	: + 3 °C

Tabelle 3: Prüfling 3

- 1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie II
 Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 9$
 Ausführung des Wärmeträgers:
 Rotierender, sorptionssensibler W
 Art und Leistungsaufnahme von Hilfe
 Antriebsmotor für Rotor: $P_{e1} = 0$
 Regel- und Steuereinrichtungen: nicht

2.) Externer Leckluftstrom:

$P_{1/2} - P_0$ [Pa]	\dot{m}_{Ex} [g/s]
300	-71
400	-71
500	-81
-300	61
-400	61
-500	61

 $\dot{m}_{Ex} < 0$: Leckluftstrom3.) Interner Leckluftstrom: nicht4.) Mitführungsluftstrom:

Ohne Taupunktunterschreitung
 Mit Taupunktunterschreitung

$P_{22} - P_{11}$ [Pa]	Gesamtkeimübertragung [%]	
	A	B
+20,6	0,03	0
-17,5*	1,72*	0

*) einschließlich internem Leck

Tabelle 3: Prüfling 3

1.) Gerätespezifikation: WRG-Kategorie III (Regenerator)Nennluftmassenstrom: $\dot{m}_2 = \dot{m}_1 = \dot{m}_N = 960 \text{ kg/h}$

Ausführung des Wärmeträgers:

Rotierender, sorptionssensibler Wärmeträger ohne Spülsegment

Art und Leistungsaufnahme von Hilfseinrichtungen:

Antriebsmotor für Rotor: $P_{el} = 0,312 \text{ kW}$

Regel- und Steuereinrichtungen: nicht zur Prüfung beigelegt

2.) Externer Leckluftstrom:

$p_{1/2} - p_0$ [Pa]	\dot{m}_{Ex} [kg/h]	\dot{m}_{Ex}/\dot{m}_N [%]
300	-71,29	-7,43
400	-79,98	-8,33
500	-88,00	-9,17
-300	67,72	7,05
-400	74,78	7,79
-500	81,44	8,48

 $\dot{m}_{Ex} < 0$: Leckluftstrom zur Umgebung gerichtet3.) Interner Leckluftstrom: nicht gemessen4.) Mitführungsluftstrom:

Ohne Taupunktunterschreitung der Abluftfeuchte : A

Mit Taupunktunterschreitung der Abluftfeuchte : B

$p_{22} - p_{11}$ [Pa]	Gesamtkeimübertragungsrate [%]		Gesamtpartikelübertragungsrate [%]	
	A	B	A	B
+20,6	0,03	0,03	2,07	2,41
-17,5*	1,72*	1,38*	3,06*	3,33*

*) einschließlich internem Leckluftstrom

ψ_2
-
-
-
-
-
-
-

Δp_2 [Pa]
83
97
116
133

tens:

- 15 °C/0,8 g/kg

22 °C/8 g/kg

1 \dot{m}_N/\dot{m}_N

5 h

1,61

+ 3 °C

Fortsetzung Tabelle 3

5.) Rückwärmzahl/Rückfeuchtzahl:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N}$	$\frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	ϕ_2	ψ_2
0,8	0,8	0,72	0,70
0,8	1,0	0,80	0,74
1,0	0,8	0,65	0,62
1,0	1,0	0,72	0,69
1,0	1,2	0,75	0,67
1,2	1,0	-	-
1,2	1,2	-	-

6.) Luftseitiger Druckverlust bei 20 °C:

$\frac{\dot{m}_{22}}{\dot{m}_N} ; \frac{\dot{m}_{11}}{\dot{m}_N}$	Δp_1 [Pa]	Δp_2 [Pa]
0,8	33	34
1,0	40	44
1,2	55	-

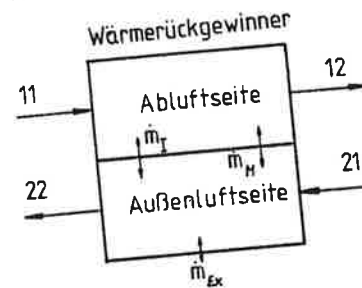
7.) Versuch zur Bestimmung des Einfrierverhaltens:

Außenlufteintrittszustand	t_{21}/x_{21}	:	- 14,5 °C/0,8 g/kg
Ablufteintrittszustand	t_{11}/x_{11}	:	22 °C/8 g/kg
Massenstromverhältnis	$\dot{m}_{22}/\dot{m}_{11}$:	1 \dot{m}_N/\dot{m}_N
Versuchsdauer	Z_F	:	5 h
Druckanstiegsverhältnis	$\Delta p_{E1}/\Delta p_1$:	1,18

Hermann - Rietschel-Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

PRÜFVERFAHREN
WÄRMERÜCKGEWINNER

BEZEICHNUNGEN (VDI 2071/1 (1))



RÜCKWÄRMZAHL

$$\phi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

BEURTEILUNGSKRITERIEN

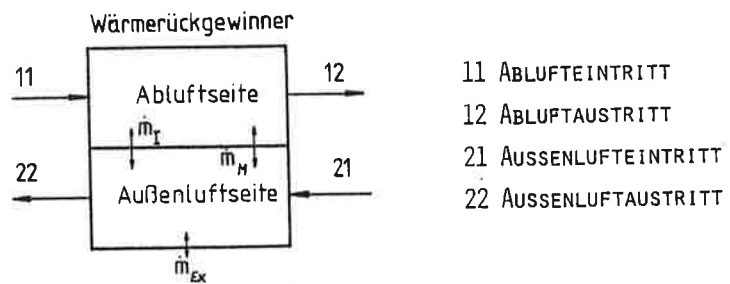
- BESCHREIBUNG DES PRÜFVERFAHRENS
- KONSTRUKTIVE BEURTEILUNGSKRITERIEN
- LEISTUNGSKENNZAHLEN
- EXTERNER LECKLUFTSTROM
- INTERNER LECKLUFTSTROM
- MITFÜHRUNGSLUFTSTROM
- DRUCKVERLUSTE
- HILFSENERGIEN
- VERHALTEN BEI KONDENSATION
- REGULINGS- UND STEUERUNGSVERFAHREN
- EMPFINDLICHKEIT GEGENÜBER VERÄNDERUNGEN
- REINIGUNGSFÄHIGKEIT

Hermann - Rietschel-Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

PRÜFVERFAHREN FÜR
WÄRMERÜCKGEWINNER

BILD 1

BEZEICHNUNGEN (VDI 2071/1 (1982))



RÜCKWÄRMZAHL

$$\phi_2 = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$$

RÜCKFEUCHTZAHL

$$\psi_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

BEURTEILUNGSKRITERIEN

- BESCHREIBUNG DES PRÜFLINGS
- KONSTRUKTIVE BEURTEILUNG
- LEISTUNGSKENNZAHLEN
- EXTERNER LECKLUFTSTROM \dot{m}_{Ex}
- INTERNER LECKLUFTSTROM \dot{m}_I
- MITFÜHRUNGSLUFTSTROM \dot{m}_M
- DRUCKVERLUSTE
- HILFSENERGIEN
- VERHALTEN BEI KONDENSATION UND VEREISUNG
- REGULINGS- UND STEUEREINRICHTUNGEN
- EMPFINDLICHKEIT GEGEN VERSCHMUTZUNG
- REINIGUNGSFÄHIGKEIT

ψ_2

0,70

0,74

0,62

0,69

0,67

-

-

Δp_2 [Pa]

34

44

-

tens:

- 14,5 °C/0,8 g/kg

22 °C/8 g/kg

1 \dot{m}_N/\dot{m}_N

5 h

1,18

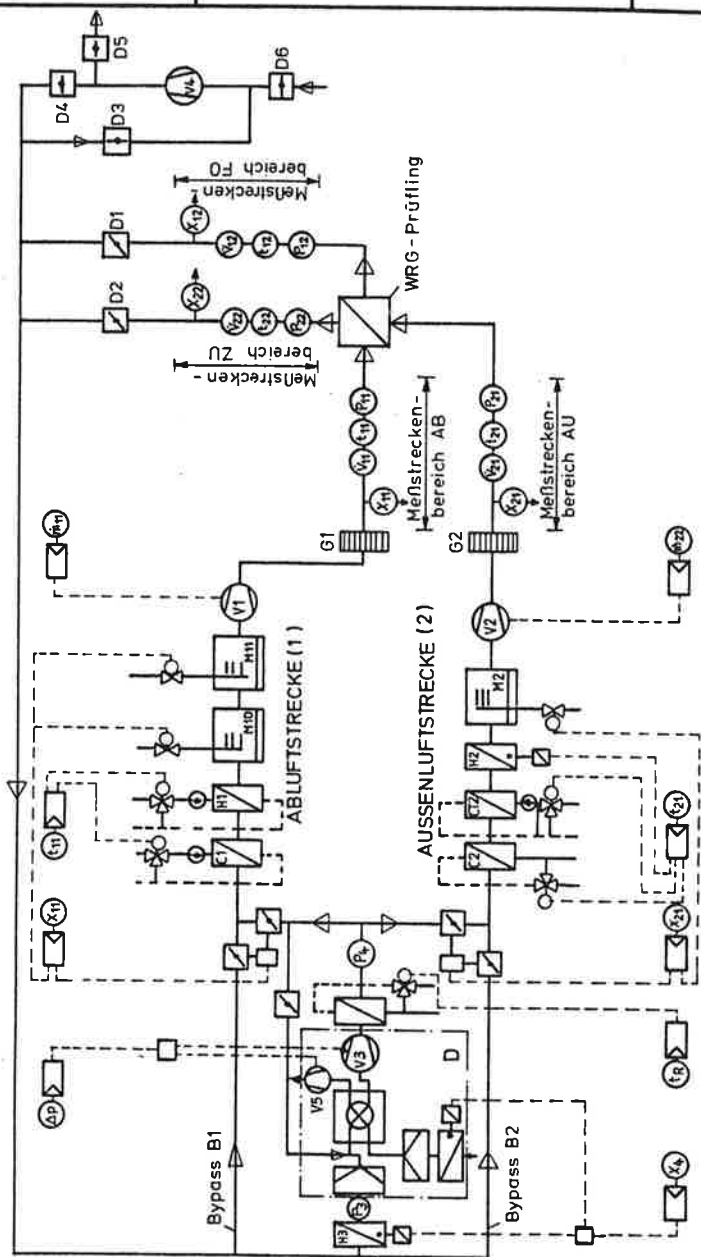
2,05+

2,12-

Hermann - Rietschel-Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

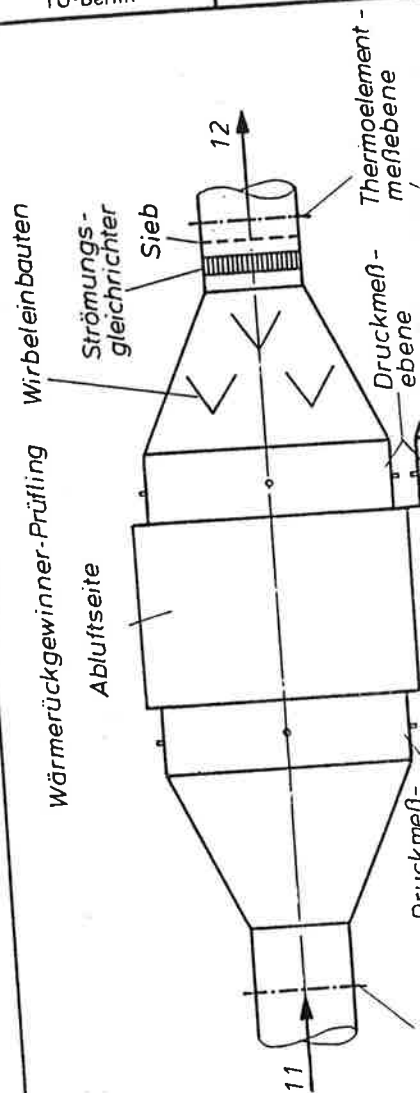
Prüfverfahren für Wärmerück-
gewinner, Versuchsstand
(Fließschema)

Bild 2



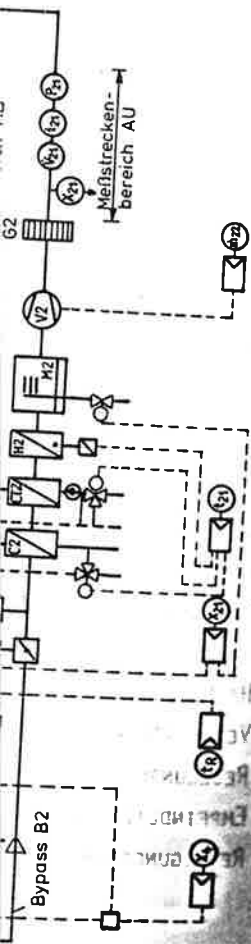
Hermann - Rietschel-Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

Prüfverfahren -
gewinner,
Temperaturmeß-



Wärmerück-
sstand

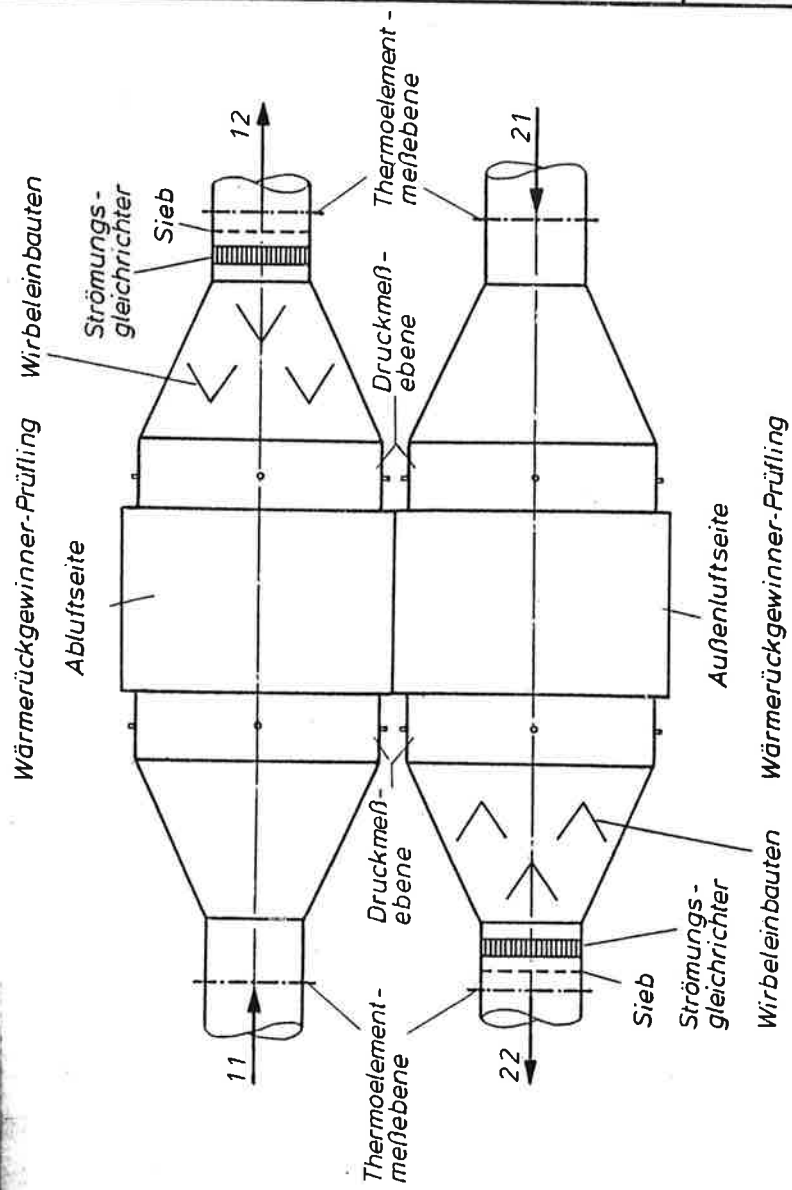
Bild 2

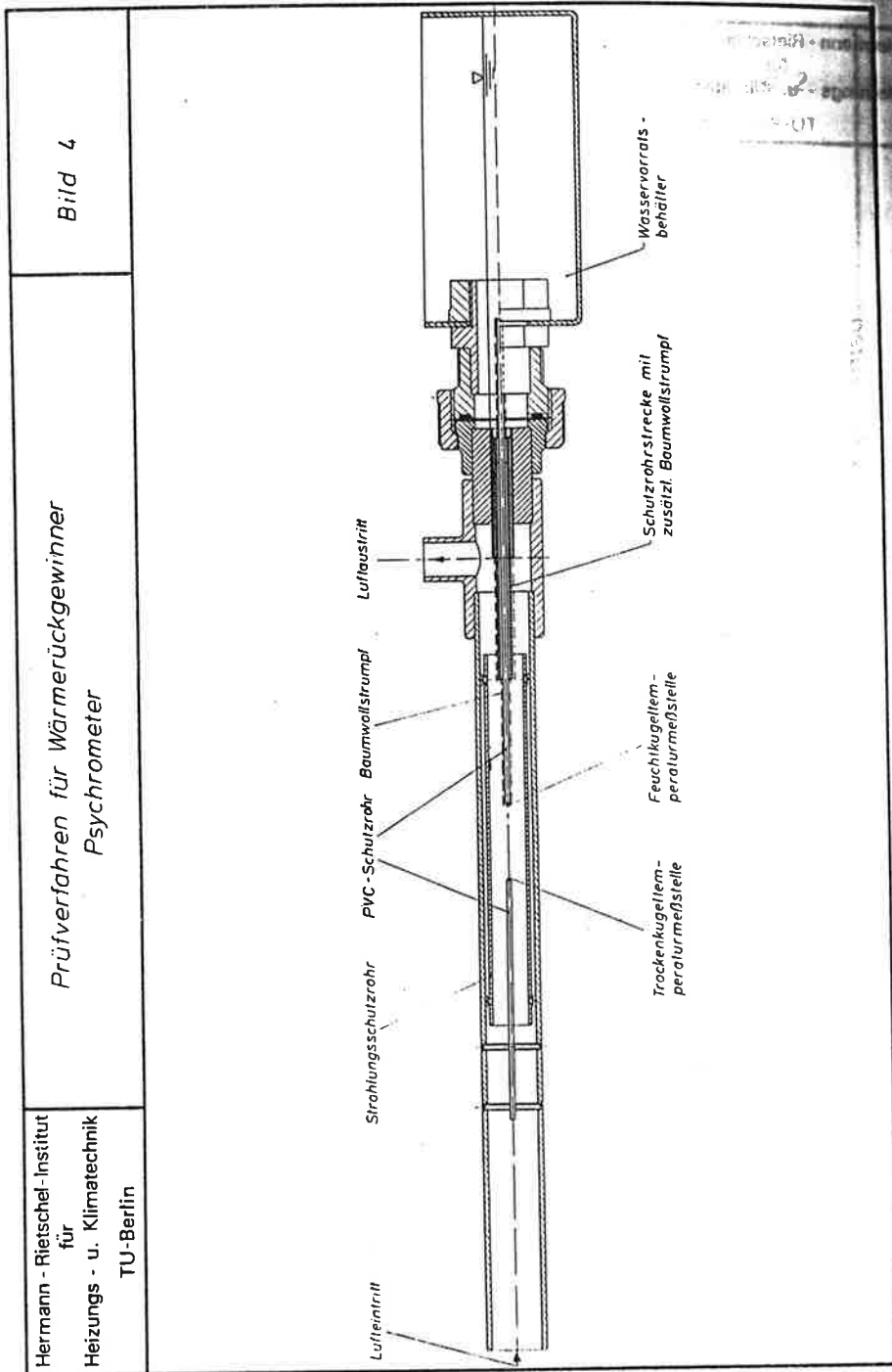


Hermann - Rietschel-Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

Prüfverfahren für Wärmerück-
gewinner,
Temperaturmeststellen

Bild 3



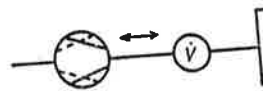


Hermann - Rietschel - Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

Prüfverfahren
gewinner
Meßanordnu

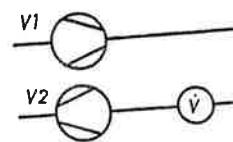
Hermann - Rietschel - Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

Ventilator (umsteuerbar) Durchfluß - Meßgerät

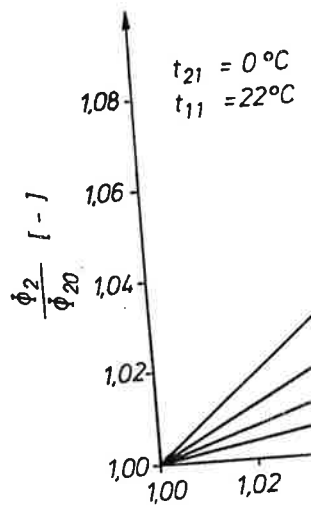


Meßanordnung

Ventilator Durchfluß Meßgerät



Meßanordnu

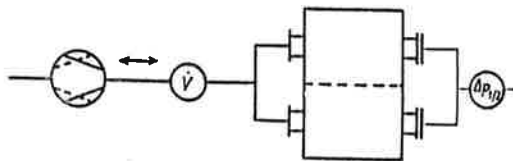


Hermann - Rietschel - Institut
für
Heizungs - u. Klimatechnik
TU-Berlin

Prüfverfahren für Wärmerück-
gewinner
Meßanordnung, Leckluftströme

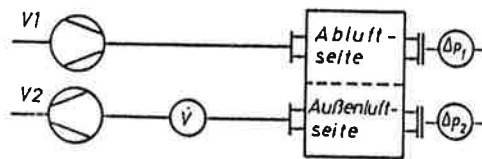
Bild 5

Ventilator (umsteuerbar) Durchfluß - Meßgerät WRG $\Delta p_{1/2} = p_{1/2} - p_0 \leq 0 \text{ Pa}$



Meßanordnung: Externer Leckluftstrom

Ventilator Durchfluß - Meßgerät WRG $\Delta p_1 = p_1 - p_0 > 0 \text{ Pa}$ $\Delta p_2 = p_2 - p_0 = 0 \text{ Pa}$



Meßanordnung: Interner Leckluftstrom

