

Über die Feuchteübertragung von Rotoren

Dr.-Ing. Edgar Beck

Rotationswärmeaustauscher übertragen neben der Wärme auch Feuchte; die Effizienz dafür ist durch die Rückfeuchtzahl Ψ_2 definiert [1]. Wie hoch diese ist, hängt vom Rotormaterial und von den Luftkonditionen ab. Durch die Vielzahl dieser Einflussgrößen war bisher eine zusammenhängende Darstellung der Messwerte bei verschiedenen Betriebsbedingungen nicht möglich.

Mit einer neu definierten Bezugsgröße, dem Kondensationspotenzial κ , können jetzt die Ergebnisse unterschiedlicher Messreihen bei unterschiedlichen Luftkonditionen zusammenhängend und aussagekräftig dargestellt werden. Daraus lassen sich neue Funktionsmodelle und Beurteilungskriterien für die Feuchteübertragung ableiten.

Bei der Auswertung von Messwerten für die Rückwärmzahl Φ_2 von Rotoren gibt es auch bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen, insbesondere unterschiedlichen Temperaturen, annähernd gleiche Ergebnisse und somit keine Darstellungs- und Interpretationsprobleme.

Anders ist dies bei der Rückfeuchtzahl Ψ_2 , die besonders bei Kondensationsrotoren sehr stark von den Konditionen der Abluft und Außenluft abhängt. Ein Vergleich verschiedener Messwerte für die Rückfeuchtzahl Ψ_2 war deshalb bisher nicht möglich; es gibt zu viele Einflussparameter (Temperatur und Feuchte für Außenluft und Abluft) mit zu großen Wertebereichen.

Deshalb wurden bisher immer nur Teilergebnisse, beispielsweise die Rückfeuchtzahl in Abhängigkeit der Warmluftfeuchte bei konstanten Kaltluftkonditionen, dargestellt. Mit den verschiedenen Parametern erhält man so entsprechend viele Einzelergebnisse, ein Überblick über die Feuchteübertragung lässt sich aber nicht gewinnen.

Das Kondensationspotenzial κ als neue Bezugsgröße

Kondensationsrotoren aus glattem, unbehandeltem Metall (meist Aluminium) übertragen Feuchte nur, wenn auf der Warmluftseite Kondensat entsteht und dieses von der Außenluft (teilweise) wieder aufgenommen wird. Es liegt deshalb nahe, als Bezugsgröße für die Feuchteübertragung das Kondensationspotenzial der warmen Luft zu wählen. Dies ist die Feuchtedifferenz zwischen der Warmluftfeuchte und der Sättigungsfeuchte der Kaltluft, mit der der Zustandspunkt im hx-Diagramm definiert wird, auf den die Warmluft maximal abgekühlt werden kann (Bild 1).

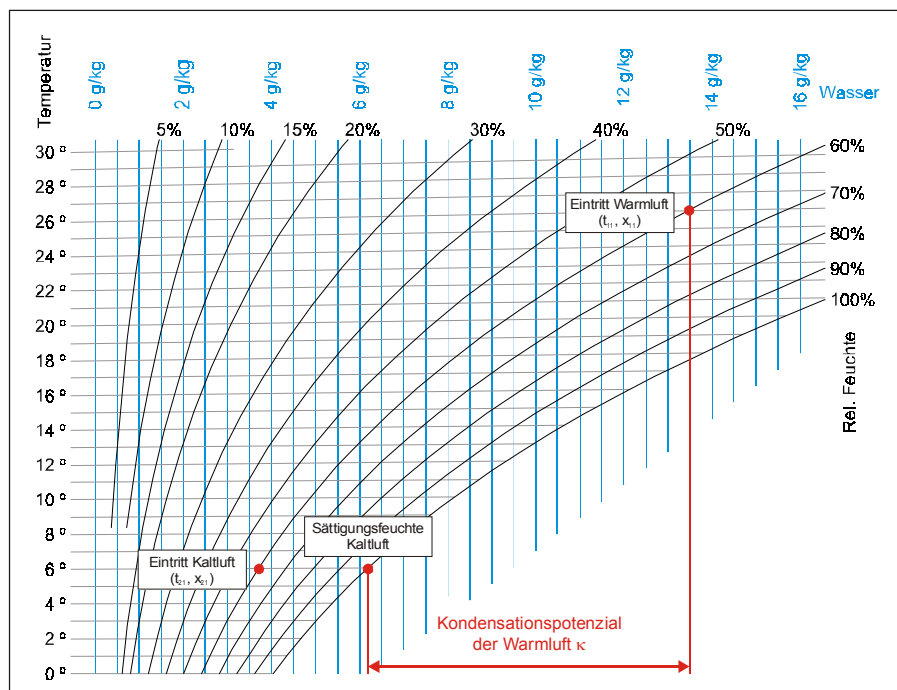


Bild 1: Definition des Kondensationspotenzials κ

Damit wird das Verhältnis zweier Luftzustände bezüglich einer möglichen Kondensation auf der Warmluftseite dargestellt, wobei die Temperaturdifferenz vernachlässigt wird. Dies ist – wie die nachfolgenden Diagramme zeigen – unter folgenden Voraussetzungen möglich:

- Die Temperaturen von Warm- und Kaltluft liegen im üblichen Bereich der Luft- und Klimatechnik.
- Die Rückwärmzahl der Rotoren liegt bei ca. 70 % (oder höher). Da die Temperaturverteilung über der Rotorfläche unterschiedlich ist und Warm- und Kaltluft im Gegenstrom geführt werden, ergeben sich damit lokal Rückwärmzahlen von mehr als 90 %, was an diesen Stellen schnell zur Kondensation führt.

Aus der Definition des Kondensationspotenzials folgt:

- Je größer das Kondensationspotenzial ist, desto größer ist die zu erwartende Kondensatmenge auf der Warmluftseite.
- Ist das Kondensationspotenzial null, so kann theoretisch kein Kondensat entstehen; die Rückfeuchtzahl von Kondensationsrotoren muss also ebenfalls null sein.
- Bei negativem Kondensationspotenzial besteht keine Möglichkeit der Kondensatbildung; Feuchteübertragung von der Warmluft auf die Kaltluft ist hier also nur durch Sorption möglich.

(An sich macht die Zahlenangabe für negatives κ keinen Sinn, da die Feuchteübertragung in diesem Bereich konstant, also unabhängig vom Kondensationspotenzial, sein müsste. Praktisch wird mit höheren negativen κ -Werten aber die Temperaturdifferenz $t_{11} - t_{21}$ kleiner, was in geringem Maße auch die Effizienz der Sorption mindert (siehe Diagramm 5). Dies kann somit dargestellt werden.)

Aus der Definition ergeben sich zwei Betriebsbereiche, die man plastischer als Winterbetrieb (positives κ) und Sommerbetrieb (negatives κ) bezeichnen kann. Nicht berücksichtigt im Kondensationspotenzial ist die Feuchte der Kaltluft x_{21} , so dass sich als aufzutragender Wert die Rückfeuchtzahl Ψ_2 empfiehlt.

$$\Psi_2 = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$$

1. Index: 1 Warmluft
 2 Kaltluft

2. Index: 1 Eintritt
 2 Austritt

Als Werte für diese Darstellung werden Ergebnisse verschiedener Messreihen am Lüftungstechnischen Prüflabor der Hochschule für Technik und Architektur Luzern (früher Zentralschweizerisches Technikum Luzern) verwendet [2, 3, 4, 5, 6]. Dabei gilt immer ein Massenstromverhältnis von 1,0 und ein Druckverlust von ca. 130 Pa. Die Drehzahl des Rotors ist konstant, variiert aber von Rad zu Rad. Die Rückwärmzahl Φ_2 beträgt mindestens 70 %.

Die Feuchteübertragung von Kondensationsrotoren

Trägt man die Messergebnisse der Rückfeuchtzahlen eines Kondensationsrotors über dem Kondensationspotenzial auf, so erhält man Diagramm 1.

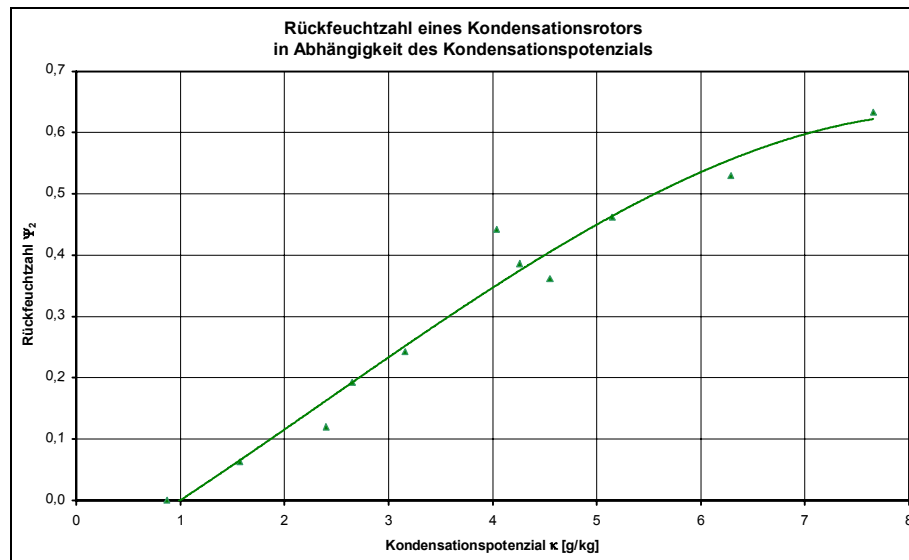


Diagramm 1: Rückfeuchtzahl Ψ_2 eines Kondensationsrotors

Man sieht, dass die Rückfeuchtzahl mit sinkendem Kondensationspotenzial abnimmt und beim Wert von ca. 1 g/kg den Wert null erreicht. Dies ist nachvollziehbar, da einerseits nicht das gesamte Kondensat von der Kaltluft aufgenommen wird (zur Erinnerung: die Rückfeuchtzahl Ψ_2 ist auf die Feuchteerhöhung der Kaltluft bezogen) und andererseits der theoretische Beginn der Kondensation bei einem Kondensationspotenzial von 0 g/kg in der Praxis nicht erreicht wird.

Die Messwerte zeigen auch, dass mit Kondensationsrädern Rückfeuchtzahlen bis ca. 65 % erreichbar sind. Die Fachliteratur bestätigt dies [7].

Die allgemein gültige Darstellung der Rückfeuchtzahl in Diagramm 1 kann auch wieder zurück übersetzt werden, d.h. auch die Darstellung in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für einen bestimmten Abluftzustand ist möglich (Diagramm 2).

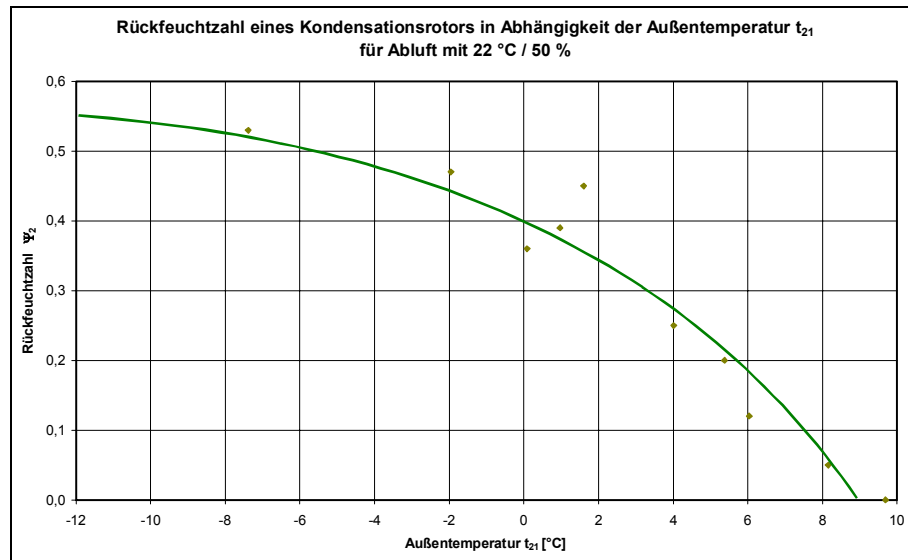


Diagramm 2: Rückfeuchtzahl Ψ_2 eines Kondensationsrotors bei gegebenen Abluftkonditionen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur t_{21}

Die Feuchteübertragung von hygroskopischen Rotoren

Unter hygroskopischen Rotoren werden hier Rotationstauscher verstanden, deren metallischer Füllkörper durch chemische Behandlung (Beizen) eine kapillare Struktur hat. Bis ca. 1996 ging man davon aus, dass diese hygroskopischen Räder die Feuchte nur durch Sorption übertragen und somit die Rückfeuchtzahl unabhängig von den Luftkonditionen annähernd konstant bleibt. Messungen am Zentralschweizerischen Technikum Luzern und Veröffentlichungen von Herstellern solcher Räder [8] zeigten dann aber, dass dem nicht so ist: Die Rückfeuchtzahl für eine definierte Abluft (beispielsweise 22 °C / 50 %) ist bei tiefen Außenlufttemperaturen am höchsten und nimmt mit steigender Kaltlufttemperatur deutlich ab.

Auch hier war bisher eine zusammenhängende Darstellung von Messwerten bei unterschiedlichen Konditionen nicht möglich, so dass die Versuchung groß ist, als Bezugsgröße ebenfalls das Kondensationspotenzial zu wählen.

Das Ergebnis ist in Diagramm 3 dargestellt. Man sieht, dass die Rückfeuchtzahl ähnlich wie beim Kondensationsrotor mit dem Kondensationspotenzial abnimmt, die Neigung allerdings geringer ist. Bei einem Kondensationspotenzial um null gibt es aller-

dings eine Unstetigkeit: Die Rückfeuchtzahl geht von ca. 25 % auf 12 % zurück, um dann bei negativem Kondensationspotenzial (Sommerbetrieb) weiter abzunehmen. Mit den Erkenntnissen des Kondensationsrotors lässt sich Folgendes vermuten:

- Die Feuchteübertragung des hygroskopischen Rotors besteht aus zwei Komponenten, nämlich der Sorption und der Kondensation.
- Dabei ist der Sorptionsanteil sehr gering und dürfte (bei dem gemessenen Rad) nur bei ca. 12 % liegen.
- Mit Beginn der Kondensation ($\kappa > 0$) wird die Feuchteübertragung stark verbessert; sie steigt mit dem Kondensationspotenzial weiter an.
(Im Bereich von $\kappa = 0$ gibt es vermutlich lokal im Rotor erstmals Kondensat, das sich wegen der kapillaren Oberflächenstruktur des gebeizten Aluminiums gut verteilt und so besser als beim Kondensationsrotor von der Kaltluft aufgenommen wird.)
- Der Rückgang der Rückfeuchtzahl bei negativem Kondensationspotenzial (Sommerbetrieb) ist auf die gleichzeitig kleiner werdende Temperaturdifferenz zurückzuführen (siehe Diagramm 5).

Werte für den Winterbetrieb eines anderen hygroskopischen Rotors, die generell etwa 10 % höher liegen als die des Rotors in Diagramm 3, untermauern die oben angeführte These. Sie zeigen aber auch, dass die Effizienz der Feuchteübertragung von hygroskopischen Rotoren vom Beizverfahren, also vom Hersteller, abhängt.

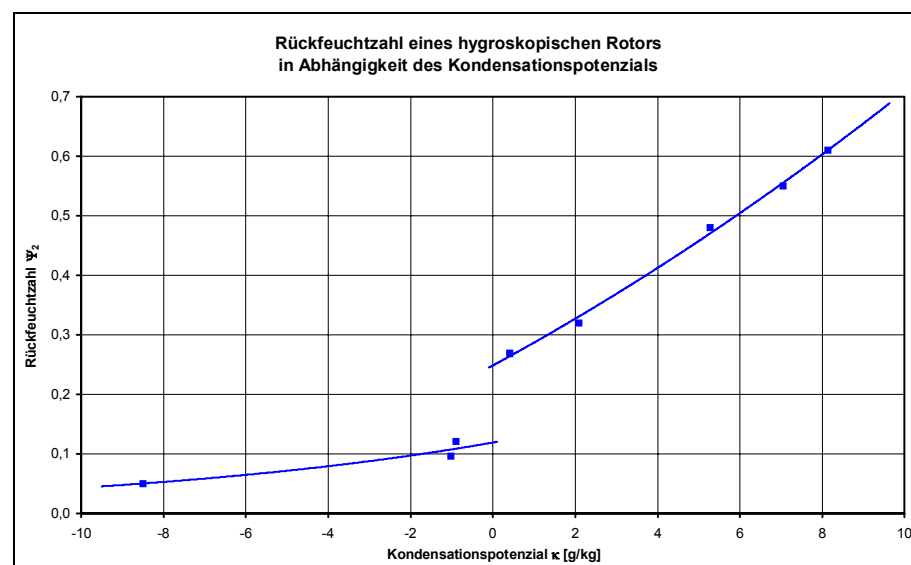


Diagramm 3: Rückfeuchtzahl Ψ_2 eines hygroskopischen Rotors

Mit der Darstellung der Feuchteübertragung über dem Kondensationspotenzial können auch hygroskopische Rotoren generell beurteilt werden. Beispielsweise ist dies durch

den Anteil der Sorption an der gesamten Feuchteübertragung oder – noch einfacher – durch die Rückfeuchtzahl bei negativem Kondensationspotenzial (Sommerbetrieb) möglich.

Feuchteübertragung von Enthalpierotoren

Unter Enthalpierotoren werden hier Rotationstauscher verstanden, bei denen die Feuchteübertragung durch reine Sorption, also ohne Kondensation, erfolgt. Entsprechend muss die Rückfeuchtzahl unabhängig vom Kondensationspotenzial annähernd konstant sein. Solche Rotoren bestehen aus einer Füllmasse, meist Aluminium, die beispielsweise mit Lithiumchlorid, Silikagel, Molekularsieben oder Spezialharzen beschichtet ist. In Europa werden solche Rotoren aus Kostengründen nur in Sonderanwendungen eingesetzt. Die Messwerte aus [5, 6] bestätigen die einwandfreie Funktion auch bei negativem Kondensationspotenzial; es gibt keine Unstetigkeit bei $\kappa = 0$ (Diagramm 4).

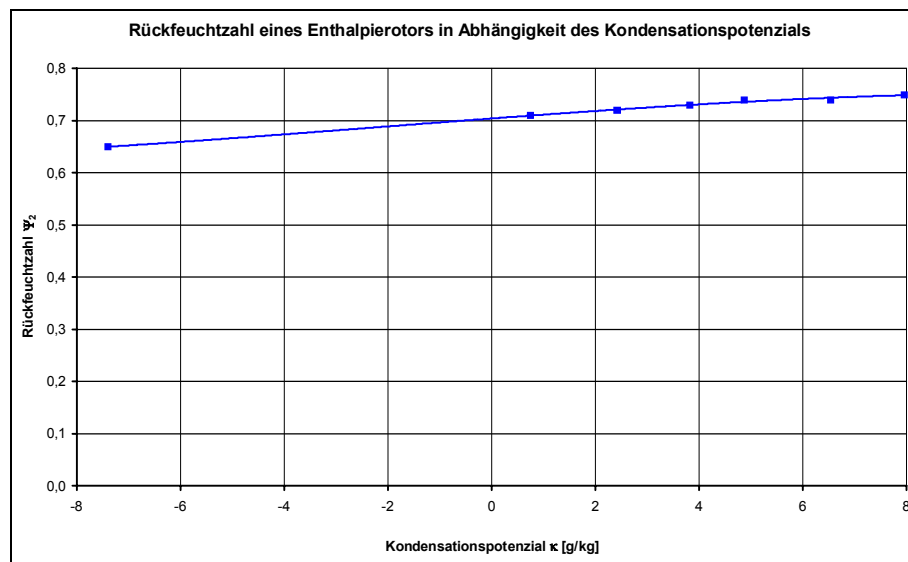


Diagramm 4: Rückfeuchtzahl Ψ_2 eines Enthalpierotors

Der (geringe) Rückgang der Rückfeuchtzahl mit sinkendem Kondensationspotenzial lässt sich mit der gleichzeitig sinkenden Temperaturdifferenz, eine treibende Kraft bei der Sorption, erklären (Diagramm 5).

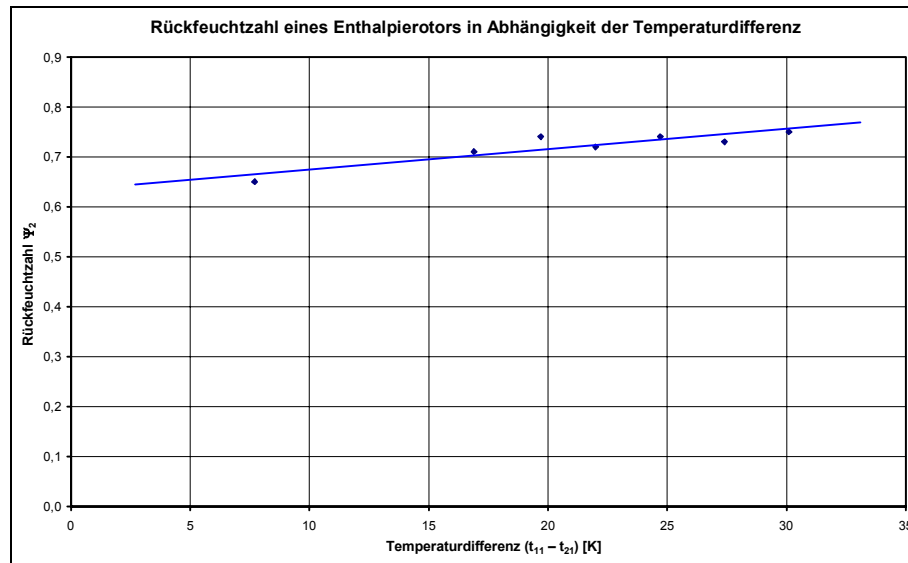


Diagramm 5: Rückfeuchtzahl Ψ_2 eines Enthalpierotors in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz $t_{11} - t_{21}$

Zusammenfassung

Aus den Diagrammen mit der neu eingeführten Bezugsgröße des Kondensationspotenzials kann folgendes Resümee gezogen werden:

- Mit dem Funktionsmodell der Kondensation auf der Warmluftseite in Funktion des Kondensationspotenzials lässt sich die Feuchteübertragung aller Rotortypen für alle Betriebszustände widerspruchsfrei erklären.
- Die Feuchteübertragung eines Rotors kann durch einige wenige Messwerte angegeben werden. Auch die Qualität eines Rotors lässt sich aus der Darstellung über dem Kondensationspotenzial ablesen.
- Kondensationsrotoren übertragen bei entsprechendem Kondensationspotenzial, sprich tiefen Außentemperaturen, ähnlich große Feuchtemengen wie hygroskopische Rotoren. Dieser Tatsache tragen bereits einige Hersteller in ihren Berechnungsprogrammen Rechnung.
Damit ist die früher angegebene Empfehlung, bei nicht gewünschter Feuchteübertragung Kondensationsrotoren einzusetzen, beispielsweise bei Schwimmbad-Abluft, nicht mehr aufrecht zu erhalten.
- Die gemessenen hygroskopischen Rotoren sind nicht so gut, wie bisher angenommen wurde; bezüglich der Feuchteübertragung im Winterbetrieb sind sie nur unwesentlich besser als Kondensationsrotoren.

- Die Feuchteübertragung hygroskopischer Räder im Sommerbetrieb hängt stark von der chemischen Behandlung, der Geometrie und der Drehzahl ab; ein guter Rotor dürfte max. ca. 25 % erreichen. (Beim Rotor in Diagramm 3 sind es nur ca. 12 %). Die Trocknung der feuchten Außenluft bei Kühlbetrieb ist deshalb zu gering.
- Mit dem unstetigen Verhalten der Feuchtübertragung von hygroskopischen Rädern werden die verwirrend unterschiedlichen Messwerte bei unterschiedlichen Betriebskonditionen erklärbar.

Folgerungen

Mit den gewonnenen Erkenntnissen sind folgende Anwendungsempfehlungen sinnvoll:

- Bei Lüftungsanlagen ohne mechanische Kühlung, d.h. also für den Einsatz im Winterbetrieb, sind Kondensationsrotoren für die Wärme- und Feuchtigkeitsübertragung in den meisten Fällen ausreichend. Auf den Einsatz hygroskopischer Räder kann verzichtet werden.
(Dies entspricht übrigens der Verwendung von Rotoren in Skandinavien, wo hygroskopische Räder nicht eingesetzt werden.)
- Für den Sommerbetrieb, also für die Trocknung und Kühlung der warmen Außenluft, sollten Enthalpieräder eingesetzt werden; hygroskopische Rotoren haben zu geringe Rückfeuchtzahlen.
(In Japan und im Süden der USA, wo die Trocknung der Außenluft im Vordergrund steht, werden ausschließlich Enthalpieräder eingesetzt.)
- Generell sollten nur Rotoren eingesetzt werden, deren Leistung durch Messungen an unabhängigen Prüfinstituten bestätigt ist. Das gilt besonders für die Rückfeuchtzahlen, und hier wiederum speziell für den Sommerbetrieb, sprich für negative κ -Werte.

Literatur

- [1] VDI 2071: Wärmerückgewinnung in RLT-Anlagen, 1997, Beuth Verlag Berlin
- [2] Furter R., Frei B., Egolf P.W.: Nachweis der Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeüberträger, NEFF – Nationaler Energie-Forschungs-Fonds Schlussbericht Projekt № 250.2, Januar 1997
- [3] Furter R., Keller P.: Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten von Wärmerückgewinnern im Teillastbetrieb, Bundesamt für Energie, Dezember 2000
- [4] Prüfbericht HP-9922/1, Hochschule für Technik und Architektur Luzern, Prüfstelle HLK, September 2000
- [5] Test Report HP-9921, Hochschule für Technik und Architektur Luzern, Prüfstelle HLK, Juni 1999
- [6] Prüfbericht HP-0040, Hochschule für Technik und Architektur Luzern, Prüfstelle HLK, Juni 2000
- [7] Holmberg R.: Geringe Vereisungsgefahr bei Wärmerückgewinnern mit rotierenden Speichermassen, HLH 1983 № 6, VDI-Verlag Düsseldorf
- [8] Hagenbruch D.: Feuchterückgewinnungsleistung von Rotationswärme-austauschern, TGA-Magazin 1993 № 6, Bahmann GmbH Stuttgart