

Dezentrale Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels ortsfester Regeneratoren

*Jürgen Lehmann, Prof. Dr.-Ing., Michael Löffler, Dr.-Ing., Max Mertins
Universität Karlsruhe (TH) Fakultät für Architektur/TA, Englerstr.7,
D-76128 Karlsruhe, Tel: +49 721 608 2890; Fax: 49 721 608 6157
e-mail: michael@fbta.uni-karlsruhe.de*

Zusammenfassung

Lüftungsanlagen mit regenerativer Wärmerückgewinnung können nach Ansicht der Autoren zu einer weiten Verbreitung kommen, da die Einzelgeräte kostengünstig hergestellt werden können und die Möglichkeiten zur Wärmerückgewinnung ausgezeichnet sind [1].

Die Dimensionierung einer regenerativen Wärmerückgewinnung ist sehr komplex, aufgrund der Vielzahl der Parameter (Taktzeit, Masse, Volumen und Baugröße des Regenerators, Wärmeübergang und Druckabfall am Regenerator, Feuchte und Temperatur der Außen- und Raumluft). Aus diesem Grund gestaltet es sich z.B. sehr schwierig, Aussagen über Wirkungsgrad oder Niederschlag von Kondensat im Regenerator zu treffen.

Um Aussagen zu erhalten über den Einfluß der genannten Parameter auf Rückwärmzahl, Druckabfall und Niederschlag von Kondensat wurde ein geeignetes Simulationswerkzeug entworfen. In dem Artikel wird der Aufbau des Programmes und die Modellierung des Feuchte - Wärme - und Lufttransportes gezeigt. Außerdem werden erste Ergebnisse gezeigt über Bedingungen, bei welchen im Regenerator mit bleibendem Kondensat gerechnet werden muß. Die Ergebnisse entscheiden über die möglichen Anwendungsgebiete für Regeneratoren (z.B. Wohnräume, Schlafräume oder Feuchträume).

1 Überblick

Die geltende Wärmeschutzverordnung von 1995 (WSV 95) und die geplante Energiesparverordnung 2000 (ESV 2000) zielen auf eine Reduzierung des Energiebedarfs von Gebäuden. In den Verordnungen wird die Wärmerückgewinnung aus der Abluft durch eine kontrollierte Wohnungslüftung einbezogen und als wichtige Maßnahme zur Verringerung des Energieverbrauchs vorgeschlagen. Die Forderungen der WSV 95 konnten meist noch durch Verbesserung von Gebäudeaußenhautkomponenten wie Fenster und Außenwände erfüllt werden. Die Forderungen der ESV 2000 jedoch erfordern den Einsatz von Wärmerückgewinnungsmaßnahmen. Die Rückgewinnung von Wärme aus der Abluft war bisher, insbesondere beim Gebäudebestand, sehr kostenintensiv und aufwendig. Zentrale Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung erfordern einen hohen Investitionsaufwand und erhöhen die Baukosten. Daher stellt die freie Lüftung über Fenster, Türen und sonstige Öffnungen in der Gebäudehülle heutzutage die am

weitesten verbreitete Art der Lüftung dar. Der Umfang der freien Lüftung wurde experimentell [2] und anhand von Simulationswerkzeugen [3] untersucht, wobei der Luftwechsel stark abhängt vom Nutzerverhalten und Windverhältnissen außerdem müssen Simulationsverfahren um so hochwertiger sein, je niedriger der angestrebte Heizwärmebedarf ist.

Der von der WSV angesetzte Luftwechsel wird in der Praxis jedoch weit unter- oder überschritten, was zu Feuchteschäden oder zu unnötigen Energieverlusten führen kann. Die energetischen Vorteile von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind allgemein bekannt. Wegen hoher Investitions- und Betriebskosten werden solche Anlagen noch nicht häufig, vor allem nicht im Wohnungsbau eingesetzt. Wie Untersuchungen zeigen, konnte eine wesentliche Annäherung von Ökonomie und Ökologie dabei bisher nicht gelingen [4].

Ziel eines unserer Forschungsprojekte ist die Ausarbeitung von Vorschlägen zur Verwendung und Auslegung von dezentralen Lüftungsgeräten mit Regenerator, die bei hoher Effektivität und geringem Stromverbrauch nur unerhebliche Baukostenerhöhungen verursachen.

Dezentrale Anlagen mit Regenerator können kostengünstig hergestellt und mit geringen baulichen Veränderungen eingebaut werden.

Der Bedarf an Fremdenergie ist im Vergleich zu zentralen Anlagen sehr gering. Die Handhabung bedarfsgerecht betriebener dezentraler Anlagen wurde bisher noch nicht gründlich untersucht. Aus diesem Grund herrscht in der Baubranche Unsicherheit über die Verwendung dieser Anlagen.

Es ist erforderlich, die Rahmenbedingungen für den Einsatz der regenerativen Lüftungstechnik zu untersuchen und allgemein bekannt zu machen.

Die Nutzung solcher Geräte zur geregelten Raumluftentfeuchtung mit Wärmerückgewinnung, welche bei der Altbausanierung sinnvoll eingesetzt werden können ist möglich. Feuchteschäden bei Altbauten, welche häufig durch den Austausch der alten undichten Fenster entstehen, könnten durch diese Geräte vermieden werden.

In der Juli-Ausgabe 1997 der Zeitschrift *Heizung Lüftung/Klima Haustechnik* (HLH) [5] wurde von einem kostengünstigen regenerativen Lüftungsgerät zur Einzelraumlüftung berichtet (siehe Abbildung 1). In einem Gehäuse befindet sich der wärmespeichernde Regenerator, z.B. Metallspäne. Ein Ventilator läßt in wechselnden Zeitintervallen die Abluft aus dem Raum und die Frischluft am Regenerator entlangstreichen. Zwei gegenläufig geschaltete Ventilatoren in zwei Gehäusen oder zwei Gehäuseteilen sind erforderlich, um den Druckausgleich im Gebäude zu gewährleisten.

Mit diesem Gerät kann man sehr hohe Energieeinsparungen bei Neu- und Altbauten erreichen die über den Ergebnissen üblicher rekuperativer Plattenwärmetauscher liegen.

Bisher bestehen keine Simulationswerkzeuge, welche speziell für den Regenerator die Wärme- und Feuchteverhältnisse bei der Verwendung im Wohnungsbau aufzeigen. Nachfolgend werden die physikalischen Grundlagen der Wärme- und Feuchteübertragung und das verwendete mathematische Simulationsverfahren dargestellt. Anschließend werden erste Simulationsergebnisse dargestellt. Bemerkenswert ist, daß es bei

Lüftungsgeräten mit Regenerator nur bei extrem hohen Luftfeuchtigkeiten zu einem bleibenden Niederschlag im Regenerator kommt.

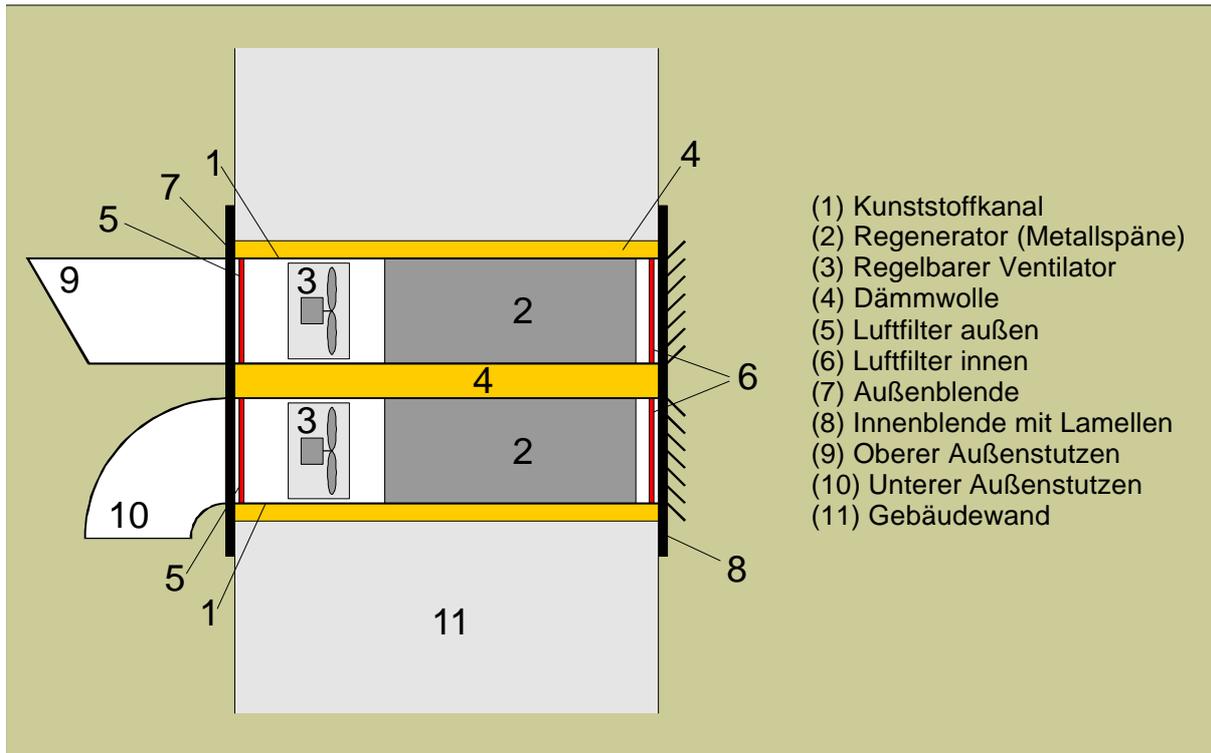


Abbildung 1: Lüftungsgerät mit Regeneratoren

2 Physikalische Grundlagen

Das Problem des Lüfters mit Aluminium oder jeder anderen metallischen Füllung als Regenerator ist die Kopplung von Wärme- und Stoffübertragung. Entsprechende Programme für gekoppelte Wärme- und Feuchteübertragung können das Problem des Regenerators lösen [6]. Dennoch wurde ein eigenes Programm geschrieben, um den Eigenheiten der Regeneratorberechnung gerecht zu werden.

Gerade die Kondensation und die Möglichkeit der Kumulation von Wasser im Regenerator, welche bei den Berechnungen explizit dargestellt wird, hat Auswirkungen auf die hygienischen Verhältnisse im Bereich des Regenerators und bestimmt dadurch das Einsatzfeld von Regeneratoren im Wohnungsbau.

Bisher wurde die Bildung von Eis im Regenerator noch nicht implementiert. Die damit einhergehenden Verschiebungen in der Wärmebilanz sollen noch integriert werden.

2.1 Formelzeichen

Die Variablen der Wärme- und Stoffströme im Regenerator sind in der folgenden Abbildung 2 dargestellt.

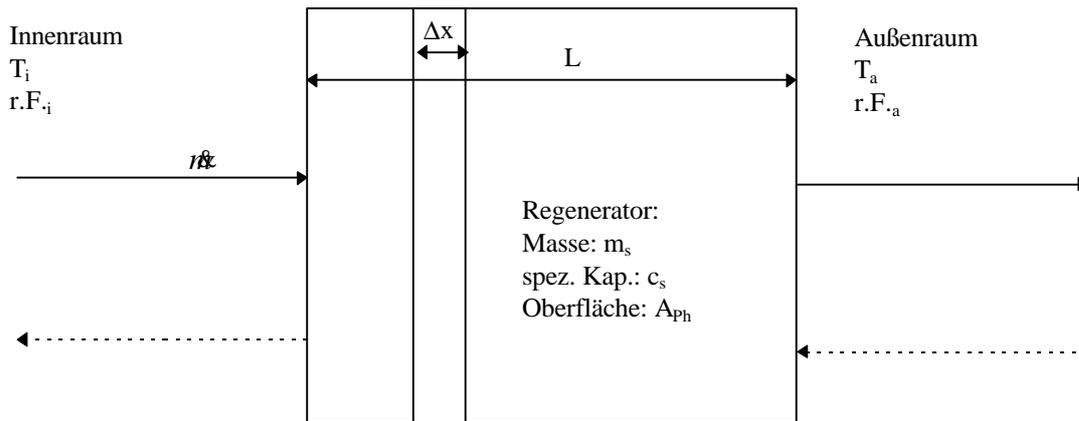


Abbildung 2: Regenerator - physikalische Größen

In den weiteren Berechnungen werde die folgenden Variablen verwendet:

h_v^0	J/gK	spez. Verdampfungsenthalpie von Wasser
λ	W/mK	spez. Wärmeleitfähigkeit
ν	m ² /s	dynamische Viskosität
A_{ph}	m ²	innere Oberfläche des Regenerators
X	g/m ²	Beladung des Regenerators
Y	-	Beladung der Luft (absolute Feuchte)
α	W/m ² K	Wärmeübergangskoeffizient am Regenerator
β	m/s	Stoffübertragungskoeffizient

Indizes:

g	=	gas
l	=	liquid
s	=	solid
Ph	=	Phasengrenze flüssig-gasförmig

2.2 Diskretisierung

2.2.1 Räumliche Diskretisierung

Das Volumen V des Regenerators wird in n Abschnitte unterteilt. In jedem Abschnitt werden später die Wärme und die Feuchte der Luft und die Wärme des Regenerators und des evtl. kondensierenden Wassers bilanziert.

$$\Delta V = V / n \quad \text{Gleichung 1}$$

Je feiner die Unterteilung des Regenerators ist, um so geringer ist der Fehler durch die räumliche Diskretisierung. Bei beliebig kleinen Abschnitten ($n \rightarrow \infty$) wird jedoch die erforderliche Rechenzeit zur Bilanzierung beliebig groß.

2.2.2 Zeitliche Diskretisierung

Die Luft-, Wasser- und Regenerator Temperaturen in einem Regeneratorabschnitt ΔV gleichen sich aneinander an. Die Zeit Δt , die hierfür zur Verfügung steht (Verweilzeit)

läßt sich aus dem Volumen des Abschnittes und aus dem Luftvolumenstrom durch den Regenerator bestimmen. Die räumliche und zeitliche Diskretisierung ist über den Volumenstrom gekoppelt:

$$\Delta t = \Delta V / \frac{\partial V}{\partial t} \quad \text{Gleichung 2}$$

2.3 Bilanzierung

2.3.1 Stoffbilanz

In den Bilanzräumen werden die Luftmengen und die Wassermengen bilanziert. Dabei werden die Stoffströme in den Bilanzraum und aus dem Bilanzraum hinaus aufsummiert. Die Massenerhaltung des Wassers innerhalb des Regeneratorabschnittes ΔV ist durch die folgende Gleichung 3 bestimmt:

$$\Delta A_{\text{Ph}} \frac{dX}{dt} = -\Delta m_g \frac{dY}{dt} \quad \text{Gleichung 3}$$

Mit der folgenden Gleichung 4 wird die zwischen der flüssigen und gasförmigen Wasserphase übertragene Wassermenge quantifiziert. Dabei ist β der Stoffübergangskoeffizient, dessen Berechnung später gezeigt wird. Das treibende Gefälle für die Stoffübertragung ist dabei die Differenz zwischen Feuchtebeladung Y der Gasphase und der Feuchtebeladung Y_{Ph} an der Regeneratoroberfläche:

$$\Delta A_{\text{Ph}} \frac{dX}{dt} = -\rho_g \beta \Delta A_{\text{Ph}} (Y - Y_{\text{Ph}}(T_1)) \quad \text{Gleichung 4}$$

2.3.2 Energiebilanz

Innerhalb der Regeneratorabschnitte und innerhalb der Verweildauer in dem jeweiligen Abschnitt werden die sensiblen und die Verdampfungs- oder Kondensationswärmen des Wassers bilanziert und der Temperatenausgleich zwischen Luft, Regenerator und evtl. Wasser berechnet. Dabei spielt der Wärmeübergang α zwischen der Luft und dem Regenerator eine Rolle.

Die Energiebilanz des Regenerators in einem Abschnitt wird in der folgenden Gleichung 5 dargestellt. Die Temperatur der flüssigen Phase des Wassers T_1 wird später mit der Temperatur des Regenerators T_s im jeweiligen Abschnitt gleichgesetzt, da die Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Regenerator für einen sofortigen Temperatenausgleich sorgen, vor allem wenn Metallspäne als Regenerator verwendet werden (die Biot-Zahl Bi des Regenerators ist entsprechend klein).

$$\Delta A_{\text{Ph}} \frac{d(T_1 X)}{dt} C_1 + \Delta m_s c_s \frac{dT_s}{dt} = \Delta A_{\text{Ph}} \Delta h_v^0 \frac{dX}{dt} + \alpha \Delta A_{\text{Ph}} (T_g - T_s) \quad \text{Gleichung 5}$$

Die Energiebilanz in der Luft innerhalb eines Abschnittes ΔV wird durch die folgende Gleichung 6 beschrieben:

$$\frac{d(T_g Y)}{dt} \Delta m_g c_{p,v} + \frac{dT_g}{dt} \Delta m_g c_{p,g} = \alpha \Delta A_{\text{Ph}} (T_s - T_g) \quad \text{Gleichung 6}$$

2.3.3 Berechnung von α und β

Entsprechend der Ähnlichkeitstheorie [7] gelten die folgenden Abhängigkeiten:

$$\text{Reynolds-Zahl: } Re = \frac{ud}{\nu}; \quad \text{Biot-Zahl: } Bi = \frac{\alpha d}{\lambda_i}$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α wird über die folgende Formel berechnet.

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d}, \quad \text{mit } Nu = 0,664\sqrt{Re} Pr^{0,25} \quad \text{und } Pr=0,7 \text{ (Luft)} \quad \text{Gleichung 7}$$

Mit dem Gesetz von Lewis [8], welches für das System Wasser/Luft recht gut erfüllt ist, kann aus dem Wärmeübergangskoeffizienten α der Stoffübergangskoeffizient β berechnet werden:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \rho_g c_{p,g} \quad \text{Gleichung 8}$$

Mit den Molmassen der Gasphase ergibt sich die Feuchtebeladung der Luft:

$$Y_{Ph} = \frac{\tilde{M}_v}{\tilde{M}_g} \frac{p_v}{p - p_v} \quad \text{Gleichung 9}$$

Der Wasserdampfpartialdruck kann aus der Wasserbeladung, zum Beispiel nach der Formel von Glück, bestimmt werden.

$$p_v = 611 \cdot e^{(-1,92375 \cdot 10^{-4} + 7,258 \cdot 10^{-2} T_1 - 2,581631 \cdot 10^{-4} T_1^2 + 6,311955 \cdot 10^{-7} T_1^3 - 1,92 \cdot 10^{-9} T_1^4)} \quad \text{Gleichung 10}$$

Damit sind die physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Wärme- und Stoffübertragung vollständig beschrieben. Nachfolgend wird die Implementierung der Theorie im Rechenprogramm dargestellt.

2.4 Lösungsansatz

Das System aus drei nichtlinearen Differentialgleichungen 1. Ordnung wird durch ein lineares homogenes System angenähert, in dem die Variablen mit geringem Einfluß von T über den Zeitschritt Δt gemittelt wurden. Die gemittelten Variablen werden durch einen Strich über dem Buchstaben gekennzeichnet. Es sind die Größen: $\bar{X}, \bar{Y}, \bar{T}_g, \bar{T}_s$.

2.4.1 Gleichungssystem

Das folgende Gleichungssystem zeigt die Bilanzgleichungen, welche den Energie- und Stoffstrom im Regenerator beschreiben. Zunächst die Gleichung für die Stoff- (=Wasser-) übertragung:

$$\Delta m_g \frac{dY}{dt} + r_g b \Delta A_{Ph} Y - r_g b \Delta A_{Ph} Y_{Ph} = 0 \quad \text{Gleichung 11}$$

Dabei ist die Sättigungsfeuchte an der Phasengrenze Y_{Ph} von der durchschnittlichen Temperatur des Wassers auf dem Regenerator \bar{T}_s während eines Berechnungsinterval-

les Δt abhängig (siehe Gleichung 9 und Gleichung 10).

Die folgende Gleichung zeigt die Energiebilanzierung im Regenerator:

$$\left(\Delta A_{\text{Ph}} C_1 \bar{X} + \Delta m_s c_s\right) \frac{dT_s}{dt} + \left(\alpha \Delta A_{\text{Ph}} + \Delta A_{\text{Ph}} c_{p,l} \frac{d\bar{X}}{dt}\right) T_s - \left(\Delta A_{\text{Ph}} \alpha \bar{T}_g + \Delta A_{\text{Ph}} \Delta h_v^0 \frac{d\bar{X}}{dt}\right) = 0$$

Gleichung 12

Die folgende Gleichung zeigt die Energiebilanzierung in der Luft:

$$\left(\Delta m_g c_{p,v} \bar{Y} + \Delta m_g c_{p,g}\right) \frac{dT_g}{dt} + \left(\alpha \Delta m_g + \frac{d\bar{Y}}{dt} \Delta m_g c_{p,v}\right) T_g - \alpha \Delta A_{\text{Ph}} T_s = 0$$

Gleichung 13

2.4.2 Differentialgleichungen

Die Temperaturen von Regenerator und Luft und Wasser innerhalb eines Abschnittes und innerhalb der Verweilzeit gleichen sich an. Die Angleichung wurde als ein exponentieller Temperatenausgleich modelliert.

Die Differentialgleichungen werden dafür auf die Form

$$\frac{df}{dt} + af + b = 0 \quad \text{Gleichung 14}$$

gebracht, wobei f die Funktion der Temperatur von Regenerator oder Luft oder die Wasserbeladung der Luft angibt. Die Lösung ergibt sich zu

$$f(t = \Delta t) = \left(f(t = 0) + \frac{b}{a}\right) e^{-a\Delta t} - \frac{b}{a} \quad \text{Gleichung 15}$$

Die Mittelwerte über den Zeitschritt Δt der Temperaturfunktionen und der Feuchtefunktion \bar{f} lassen sich nach der folgenden Gleichung berechnen:

$$\bar{f}(t = 0, \Delta t) = \frac{1}{a\Delta t} \left(f(t = 0) + \frac{b}{a}\right) (1 - e^{-a\Delta t}) - \frac{b}{a} \quad \text{Gleichung 16}$$

Schließlich wird die Ableitung der Temperaturfunktionen in der Simulationsrechnung als Differenzenquotient dargestellt.

$$\frac{d\bar{f}}{dt} = \frac{f(t = \Delta t) - f(0)}{\Delta t} \quad \text{Gleichung 17}$$

Die Gleichung 14 bis Gleichung 17 wurden in dem Simulationsprogramm für Regeneratoren als Kern der Massen- und Energiebilanzierung als Iterationsalgorithmus implementiert. Dabei wird die Iteration in einem Abschnitt nach einem vorgegebenen Konvergenzkriterium beendet.

3 Ergebnisse von Simulationsrechnungen

In der folgenden Abbildung 3 und Abbildung 4 auf Seite 9 werden Ergebnisse aus Simulationsrechnungen dargestellt. Die Achsen decken den gesamten Feuchtebereich der

Innenraum- und Umgebungsfeuchte ab. Die Innenraumtemperatur ist bei beiden Abbildungen 20°C und die Außentemperatur 0°C.

Die Rückwärmzahlen des Lüftungsgerätes sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Rückwärmzahlen liegen bei etwa 80%.

Abbildung 4 zeigt den Anteil an übertragener Feuchte. Die homogene Farbe im unteren Bereich des Feuchtefeldes zeigt den Bereich trockener Wärmeübertragung. Die homogene Farbe im rechten oberen Bereich des Feuchtefeldes zeigt den Bereich einer Kumulation von Wasser auf dem Regenerator. In diesen Feuchtebereichen darf das Lüftungsgerät mit Regenerator nicht dauerhaft für Raumlüftungszwecke betrieben werden. Die Bereiche, in denen Wasser kumuliert liegen außerhalb des Bereiches der üblichen Feuchte in Wohnräumen. Lüftungsgeräte mit Regenerator können dort eingesetzt werden. Aber auch in Sanitärräumen, in denen kurzzeitig hohe Feuchte auftritt, ist der Einsatz von Regeneratoren möglich.

Weitere Simulationsrechnungen werden bei geringeren Außentemperaturen durchgeführt, um weitergehende Aussagen über den Verwendungsbereich von Regeneratoren zu treffen.

4 Ergebnisse

Es wurde ein handliches und umfangreiches Werkzeug zur Berechnung des Einsatzfeldes von Regeneratoren zur Raumlüftung konzipiert. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, daß Lüftungsgeräte mit Regeneratoren in dem betrachteten Temperaturbereich zur Lüftung von Wohngebäuden eingesetzt werden können, ohne daß Wasser im Regenerator akkumuliert. Die Wirkungsgrade liegen bei etwa 80%. Zweck des Simulationsprogrammes ist eine Wirkungsgradoptimierung des Regenerators (Masse, Geometrie, Material, Taktzeit).

Ein weiteres Ziel ist die Berücksichtigung der Eisbildung im Regenerator, um das Verhalten des Regenerators bei Frost untersuchen zu können.

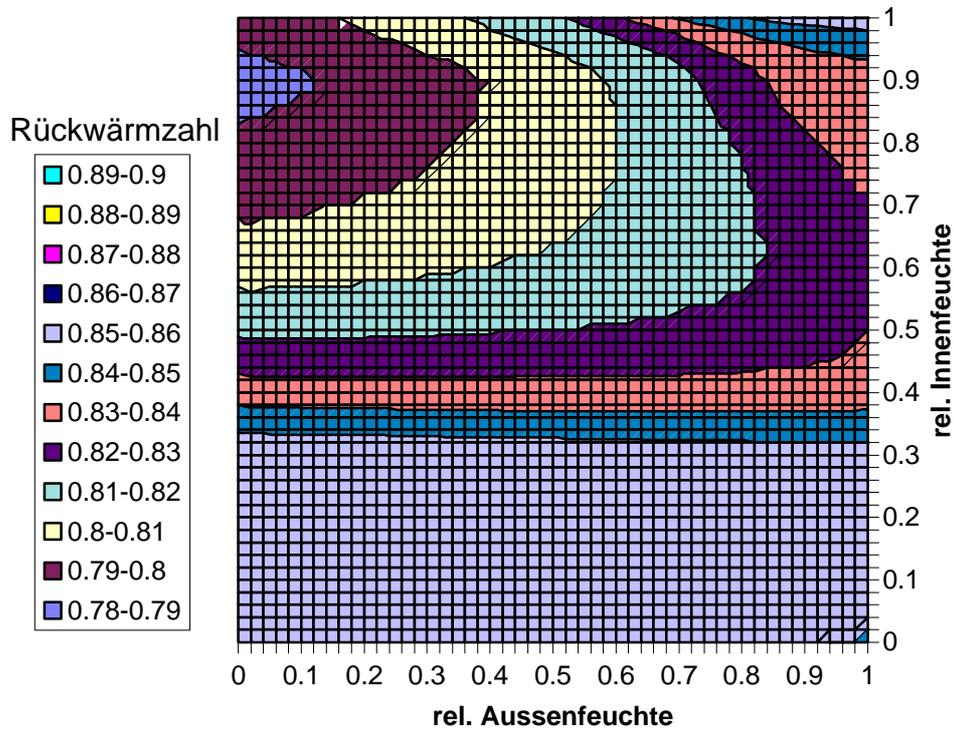


Abbildung 3: Rückwärmzahl bei 10s Taktzeit

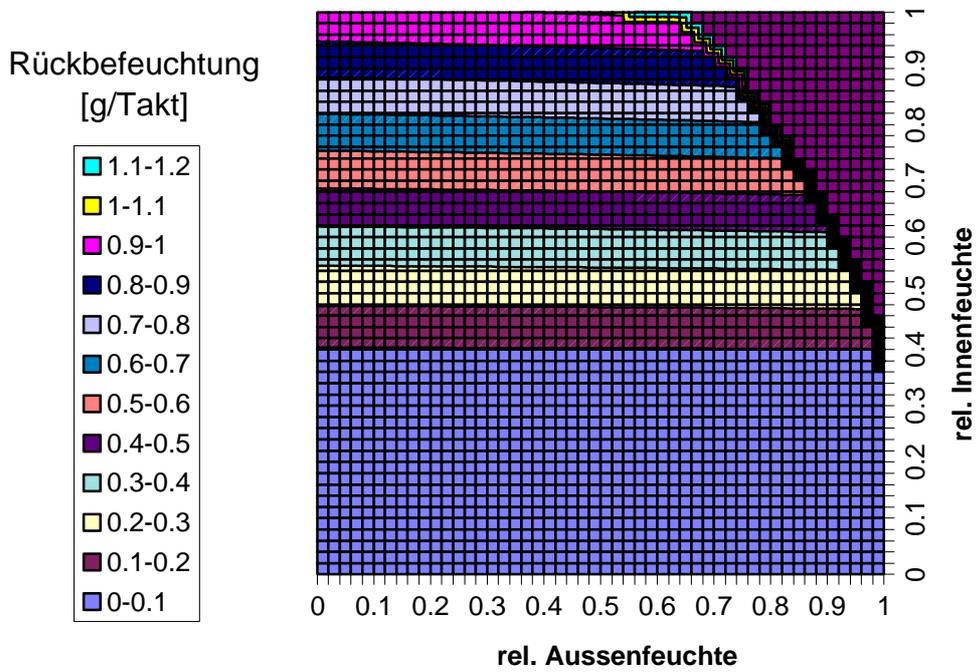


Abbildung 4: Rückbefeuchtung bei 10s Taktzeit

5 Literaturangaben

- [1] Jürgen Lehmann, Michael Löffler: Dezentrale bedarfsorientierte Wärmerückgewinnung aus der Abluft mittels ortsfester Regeneratoren. in: Festschrift zum 60. Geburtstag von Karl Gertis. IRB Verlag Stuttgart. 1998. S. 143-155.
- [2] A. Maas, D. Schmidt, G. Hauser: Experimentelle Quantifizierung zum Luftaustausch bei Querlüftung, wksb 42/98. Download: <http://www.bpy.uni-kassel.de>.
- [3] Wulf Groth: Betriebsdatenauswertung der Verbrauchswerte eines Niedrigenergiehauses unter besonderer Beachtung des Nutzereinflusses und der Lüftungswärmeverluste, Diplomarbeit an der TU Braunschweig, Inst. f. Wärme-und Brennstofftechnik, 1998.
- [4] J. Reiß. H. Erhorn: Niedrigenergiehäuser Heidenheim, Abschlußbericht, BMBF Forschungsprojekt 0329058 A, Stuttgart, Juli 1994.
- [5] Michael Löffler: Raumlüftung mit regenerativer Wärmerückgewinnung, in: HLH Bd.48 (1997), Nr.7, Juli 1997, S.38-40.
- [6] Häupl, Peter: Wärme-, Luft- und Feuchtetransport in gedämmten Umfassungskonstruktionen. In: Dresdner Bauklimatische Hefte, Heft 1, Dresden 1996, S. 29ff.
- [7] VDI-Wärmeatlas, 6. Auflage, Düsseldorf 1991, S.N1ff, S. O5ff, und: Holger Martin: Wärmeübertrager, Stuttgart, 1988.
- [8] Ernst-Ulrich Schlünder: Einführung in die Stoffübertragung, Vieweg, Braunschweig 1996, S.20.