



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für  
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK  
**Bundesamt für Energie BFE**

# FEUCHTE IN NIEDRIGENERGIEBAUTEN

## Schlussbericht

Ausgearbeitet durch

**Beat Frei**

**Hochschule Luzern - Technik & Architektur**

**Zentrum für Integrale Gebäudetechnik**

Technikumstrasse 21 6048 Horw, beat.frei@hslu.ch, <http://www.hslu.ch/zig>

## **Impressum**

Datum: 23. November 2007

**Im Auftrag des Bundesamt für Energie**, Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

[www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)

Bereichsleiter BFE: Andreas Eckmanns, [andreas.eckmanns@bfe.admin.ch](mailto:andreas.eckmanns@bfe.admin.ch)

Programmleiter BFE: Charles Filleux, [filleux.REN@bhz.ch](mailto:filleux.REN@bhz.ch)

Projektnummer: 101843

Bezugsort der Publikation: [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

### **Unter Beteiligung folgender Industriepartner:**

Hovalwerk AG, Vaduz FL

Zehnder Comfosystems AG, Wädenswil

Drexel und Weiss GmbH, Wolfurt A

CompetAir GmbH, Thalwil

Axair AG, Pfäffikon

Nordmann Engineering AG, Dornach

**Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.**

## **Inhaltsverzeichnis**

Zusammenfassung .....	2
Abstract .....	2
1. Ausgangslage.....	3
2. Ziel der Arbeit.....	3
3. Lösungsweg .....	3
4. Ergebnisse.....	4
4.1 Experimenteller Vergleich von Kompaktlüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung .....	4
4.2 Bedarfsgeregelte Zuluftvolumenströme nach CO <sub>2</sub> .....	11
4.3 Rechnerische Untersuchung zur Überfeuchtungsproblematik .....	15
4.4 Auswirkungen von Massnahmen auf die Raumluftfeuchte .....	18
4.5 Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Systemen.....	23
4.6 Analyse neuer Ansätze und Vorschläge zur möglichen Umsetzung.....	29
5. Diskussion .....	33
6. Schlussfolgerungen.....	35
Referenzen .....	36

## Zusammenfassung

Zeitgemäße Kompaktlüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung weisen ein hohes Feuchteverhältnis aus, entsprechen den hygienischen Anforderungen nach VDI 6022, unterbieten den Grenzwert für die spezifische Ventilatorleistung deutlich und kommen dem Zielwert nahe. Die untersuchten Kompaktlüftungsgeräte der Funktionsprinzipien Plattenwärmeübertrager mit Membran und Rotor mit Ionenaustauschharz erfüllen die meisten der oben genannten Anforderungen. Für die Effizienz der Feuchteübertragung ist der Abluftzustand eine wichtige Grösse. Der Plattenwärmeübertrager mit Membran reagiert empfindlicher auf eine Veränderung des Abluftzustandes als der Rotor mit Ionenaustauschharz. Es wurden Grenzlinien der minimal und maximal erwünschten Feuchteübertragung definiert. Bedarfsgeregelte Volumenströme nach CO<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub>/Feuchte bilden eine sehr gute Ergänzung zur Feuchterückgewinnung und Dampfbefeuchtung. Dieses Prinzip setzt bei den zu hohen personenspezifischen Volumenströmen an, die durch Unterbelegung entstehen. Durch dynamische Simulation konnte gezeigt werden, dass die Führungsgrössen CO<sub>2</sub> und Feuchte die Stunden unter 30 % Raumluftfeuchte im Vergleich zur Führungsgröße CO<sub>2</sub> nochmals reduzieren können. Unter bestimmten Randbedingungen ist eine reine Wärmerückgewinnung kombiniert mit einer Dampfbefeuchtung in einigen Fällen energetisch besser als eine Feuchterückgewinnung. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass Wärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung rund 10 %-Punkte weniger sensible Wärme übertragen als klassische Wärmeübertrager.

## Abstract

State-of-the-art compact ventilation units with humidity recovery show high humidity ratios, the specific ventilator performance is lower than the limit value and is near the target value. The compact ventilation units which have been tested – one with a heat exchanger and membrane and one with a rotating heat exchanger with ion-exchange resin – meet most of the requirements mentioned above. For the efficiency of the humidity transfer the conditions of the return air are very important. The plate heat exchanger with membrane is more sensitive to changes of the conditions of the return air than the rotor with ion-exchange resin. Limits for minimum and maximum humidity transfer have been defined. Need-regulated flow rates after CO<sub>2</sub> or CO<sub>2</sub>/humidity are a very good addition to humidity recovery and steam humidification. This principle approaches the problem of person-specific flow rates which are too high due to low occupancy. Dynamic simulations have shown that CO<sub>2</sub> and humidity as reference inputs reduce the hours when room air humidity is under 30 % r. h. compared to systems with CO<sub>2</sub> as the only reference input. In some cases under certain conditions heat recovery combined with steam humidification is better than humidity recovery. One of the main reasons is that heat exchangers with humidity recovery have 10 % points lower values of sensible heat transfer compared to classical heat exchangers.

## **1. Ausgangslage**

In Wohnungen mit kontrollierter Wohnungslüftung (Komfortlüftung) ist die Raumluftqualität zwar besser als bei Wohnungen mit Fensterlüftung (vgl. z.B. Praxistest MINERGIE [14]), dies wird aber in erster Linie durch eine höhere Aussenluftrate erreicht. Neben dem allgemein gesunkenen Feuchteanfall im Wohnbereich sowie den häufig beobachteten Raumlufttemperaturen von 22 bis 25°C, führt dies in vielen Fällen zu tiefen relativen Raumluftfeuchten. So wurden in Erfolgskontrollen von schweizerischen Passivhäusern Raumluftfeuchten von unter 30 % r.F. an einigen tausend Jahresstunden gemessen [9]. Es besteht das Risiko, dass einerseits - nicht nur in Niedrigenergiehäusern - vermehrt zentrale Dampfbefeuchter eingesetzt werden und andererseits die kontrollierte Wohnungslüftung das Image von trockener Luft bekommt. Aus energiepolitischer Sicht soll dies verhindert werden. Beim Einsatz von Dampfluftbefeuchtern wird unnötigerweise hochwertige Primärenergie umgesetzt, was aus Sicht der 2000-Watt-Gesellschaft und der Exergie wo möglich zu vermeiden ist.

## **2. Ziel der Arbeit**

Ziel der Arbeit ist ein Vergleich zwischen der Feuchterückgewinnung, den bedarfsgeregelten Volumenströmen nach CO<sub>2</sub> und der Dampfbefeuchtung. Die Grundlagen werden durch Experimente und Simulationen geschaffen. Die Auswirkungen auf den Energiebedarf der untersuchten Systeme und deren Kombinationen werden berechnet und stehen Planern und Interessierten in Form eines Schlussberichts zur Verfügung.

## **3. Lösungsweg**

In einem ersten Schritt wurden heute auf dem Markt erhältliche Kompaktlüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung experimentell miteinander verglichen. Diese Untersuchungen fanden auf dem Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur statt.

Durch Simulation wurde der Einsatz von bedarfsgeregelten Volumenströmen im Musterhaus SIA 384.201 rechnerisch untersucht. Die Führungsgrössen waren CO<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>/Feuchte.

Ebenfalls durch Simulation wurden danach untersucht, wie sich die Raumluftfeuchte verhält, falls keine Massnahmen ergriffen werden oder ein System mit bedarfsgeregelten Volumenströmen nach CO<sub>2</sub> respektive ein Rotor mit Ionenaustauschharz respektive ein Plattenwärmeübertrager mit Membran eingesetzt werden. Als weiterer Variationsparameter wurde der Einfluss der Belegung mit untersucht. Die Darstellung der Resultate erfolgt in Diagrammen der kumulierten Häufigkeit.

Mittels rechnerischer Untersuchung wurde die Überfeuchtungsproblematik behandelt, welche im Übergangsbereich bei der Feuchterückgewinnung eintreten kann. Ein einfaches Berechnungstool wurde weiter entwickelt, damit Anwender den Einfluss von Massnahmen auf die Raumluftfeuchte selber überschlägig abschätzen können.

Es wurde abgeschätzt, wie sich die Luftbefeuchtung und die Feuchterückgewinnung auf den gesamten Energiebedarf eines Wohnhauses auswirken. Die Abschätzungen werden am Musterhaus SIA384.201 durchgeführt, das auch bei den Simulationen verwendet wird. Die hier durchgeföhrt Berechnungen haben die Qualität von Handberechnungen, die mit Werten aus genaueren Berechnungen ergänzt wurden.

Abschliessend wurden neue Ansätze untersucht und Vorschläge zur möglichen Umsetzung gemacht.

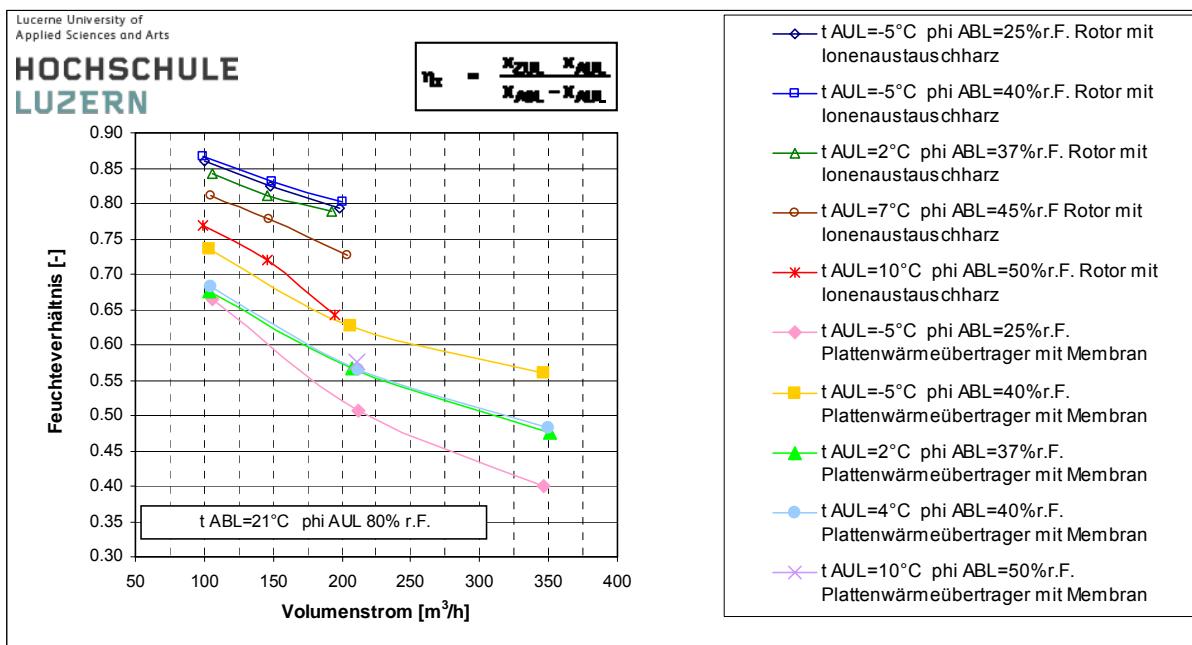
## 4. Ergebnisse

### 4.1 EXPERIMENTELLER VERGLEICH VON KOMPAKTLÜFTUNGSGERÄTEN MIT FEUCHTERÜCKGEWINNUNG

An der Hochschule Luzern – Technik & Architektur wurden auf dem Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte drei Kompaktlüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung untersucht. Es handelt sich um folgende Systeme:

- Rotor mit Ionenaustauschharz
- Plattenwärmeübertrager mit Membran
- Kapillarventilator

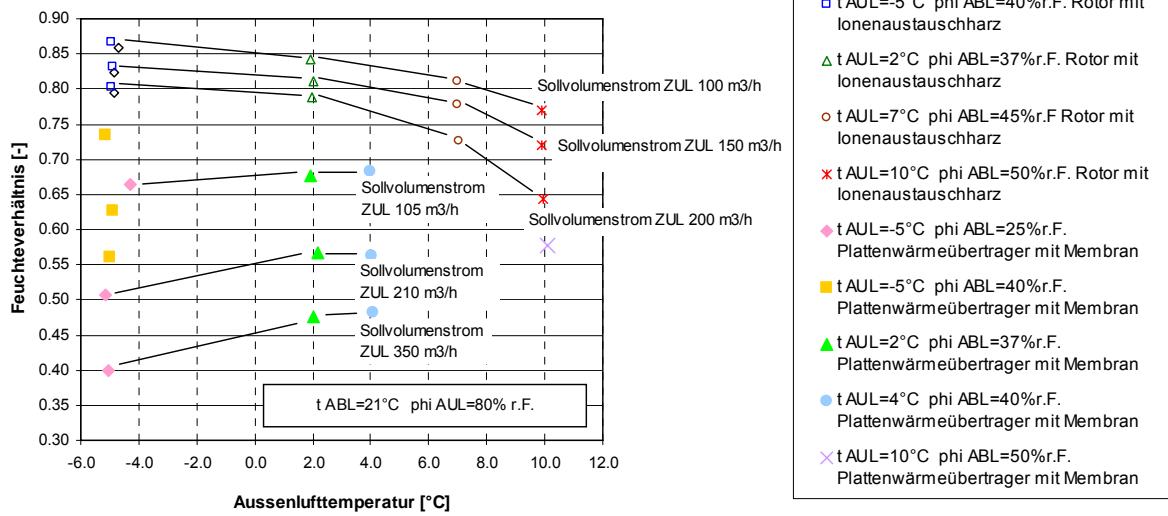
Die Resultate der Geräteprüfungen werden in den Teilberichten [1], [2] und [3] behandelt. Nachfolgend wurden die Resultate des Rotors mit Ionenaustauschharz und des Plattenwärmeübertragers mit Membran zusammengefasst und in den *Figuren 1 bis 3* aufgetragen. Die Resultate des Kapillarventilators werden separat behandelt. Das Feuchteverhältnis  $\eta_x$  wird aus dem Verhältnis der Differenz der absoluten Feuchte zwischen Zuluft und Aussenluft und der Differenz der absoluten Feuchte zwischen Abluft und Aussenluft gebildet.



**Figur 1:** Feuchteverhältnis in Abhängigkeit des Volumenstroms für den Rotor und den Plattenwärmeübertrager.

Aus *Figur 1* geht hervor, dass der Rotor mit Ionenaustauschharz die höchsten Werte für das Feuchteverhältnis in Abhängigkeit des Volumenstroms ausweist. Bemerkenswert ist, dass der Rotor nicht sehr stark auf eine Veränderung der Abluftfeuchte reagiert. Der Unterschied liegt im Bereich der Messunsicherheit für das Feuchteverhältnis. Bedeutend markanter fällt der Unterschied für den Plattenwärmeübertrager mit Membran aus. Das System reagiert signifikant auf eine Veränderung des Abluftzustandes. Diesem Umstand muss Rechnung getragen werden, da in Niedrigenergiebauten mit konstantem Volumenstrom die Abluftfeuchten eher bei 25 % als bei 40 % liegen (siehe in [9]). Der Rotor zeigt eine kleinere Abhängigkeit des Feuchteverhältnisses vom Volumenstrom.

$$\eta_x = \frac{x_{ZUL} - x_{AUL}}{x_{ABL} - x_{AUL}}$$



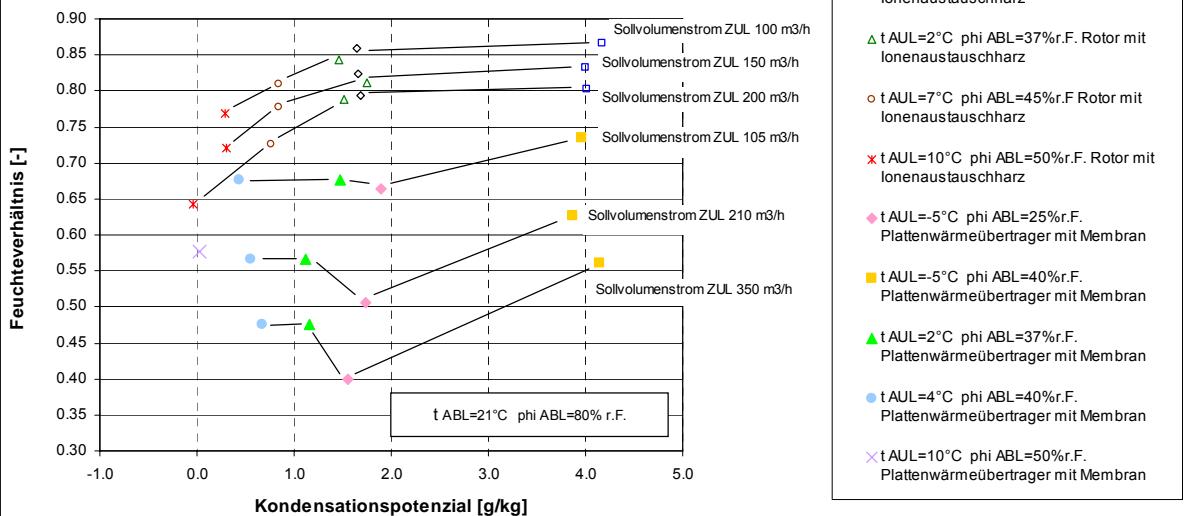
**Figur 2:** Feuchteverhältnis in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für den Rotor und den Plattenwärmeübertrager.

Aus Figur 2 geht hervor, dass der Rotor mit Ionenaustauschharz und der Plattenwärmeübertrager mit Membran für die Abhängigkeit des Feuchteverhältnisses von Außenlufttemperatur gegenläufige Charakteristika aufweisen. Beim Rotor mit Ionenaustauschharz nimmt mit steigender Außenlufttemperatur das Feuchteverhältnis ab, was auf die Rotordrehzahlregelung zurückzuführen ist. Gegenläufig verhält sich dazu der Plattenwärmeübertrager mit Membran: Bei steigender Außenlufttemperatur werden konstante oder gar leicht höhere Feuchteverhältnisse ausgewiesen.

Wie in Kapitel 4.3 aufgezeigt wird, entspricht die Charakteristik des Rotors mit Ionenaustauschharz recht gut dem Verlauf, der aus Sicht der Raumluftfeuchte gewünscht wird. Die Charakteristik des Plattenwärmeübertragers mit Membran ist gegenüber einer wünschenswerten idealen Charakteristik gerade gegenläufig. Dies würde sich theoretisch in der Übergangszeit nachteilig in Form von Überfeuchtung auswirken. Das Gerät erhöht aber in diesem Fall den Volumenstrom, um der Überfeuchtung entgegenzuwirken. Allerdings sinkt dadurch das Temperaturverhältnis um einige Prozentpunkte.

$$\eta_x = \frac{x_{ZUL} - x_{AUL}}{x_{ABL} - x_{AUL}}$$

$$K = \frac{x_{ABL} - x_{AUL}}{x_{ABL} - x_{ZUL}}$$



**Figur 3:** Feuchteverhältnis in Abhängigkeit des Kondensationspotenzials für den Rotor und den Plattenwärmeübertrager.

Das Kondensationspotenzial  $\kappa$  definiert sich über die Differenz der absoluten Feuchte der Abluft und der absoluten Feuchte der Aussenluft bei Sättigung.

Der Rotor mit Ionenaustauschharz zeigt über einen weiten Bereich des Kondensationspotenzials hohe Werte für das Feuchteverhältnis (*Figur 3*). Der Plattenwärmeübertrager mit Membran hat absolut die tieferen Feuchteverhältnis-Werte über den ganzen Bereich des Kondensationspotenzials. Eine eigentliche Tendenz ist im Gegensatz zum Rotor nicht erkennbar. Allerdings deuten die Daten auf Taupunktunterschreitung hin, was zum ausgeprägten Minimum bei -5 °C Aussenlufttemperatur und einer Abluftfeuchte von 25 % führt. Der Rotor deutet für kleine Werte des Kondensationspotenzials ein stärkeres Absinken des Feuchteverhältnisses an. Allerdings nehmen die Unsicherheiten infolge der Messunsicherheiten für kleine Kondensationspotenziale definitionsgemäss stark zu.

Die spezifische Ventilatorleistung  $p_{SFP}$  beschreibt das Verhältnis der totalen elektrischen Aufnahmeleistung (Ventilatoren, Steuerung, Hilfsantriebe) zum Mittelwert von Zuluft- und Abluftvolumenstrom. Für den Rotor mit Ionenaustauschharz beträgt die spezifische Ventilatorleistung 0.41 W/(m<sup>3</sup>/h). Zu beachten ist, dass die Leistungsaufnahme durch den Rotor inbegriffen ist. Für den Plattenwärmeübertrager mit Membran weist die spezifische Ventilatorleistung einen Wert von 0.29 W/(m<sup>3</sup>/h) auf. Der grosse Unterschied zwischen Rotor und Plattenwärmeübertrager wurde nicht unbedingt erwartet. Aufgrund der Konstruktion des Plattenwärmeübertragers mit einer dampfdurchlässigen Membran wäre eine höhere spezifische Ventilatorleistung zu erwarten gewesen. Als Vergleichswert sei hier noch die spezifische Ventilatorleistung  $p_{SFP}$  von 0.34 W/(m<sup>3</sup>/h) für das Gerät angeführt, welches bei den bedarfsgeregelten Volumenströmen nach CO<sub>2</sub> zum Einsatz kommt. Gemäss SIA Merkblatt 2023 [11] halten somit alle drei Geräte den Grenzwert von 0.42 W/(m<sup>3</sup>/h) ein. Den Zielwert von 0.20 W/(m<sup>3</sup>/h) für energetisch gute Anlagen verfehlten jedoch alle deutlich. Hier besteht noch ein grösseres Entwicklungspotenzial, welches im BFE Projekt *Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Klein-Lüftungsanlagen* ebenfalls an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur untersucht wird [15].

## Rechnerische Abschätzung über das Verhalten von Kompaktlüftungsgeräten mit Feuchterückgewinnung

Die Grundlage der Simulationen mit *IDA Indoor Climate and Energy (ICE)* [12] bildet das Musterhaus SIA 384.201. Die Simulationen sind in den Teilberichten [6] und [7] ausführlich beschrieben worden. Den zwei untersuchten Systemen mit Feuchteübertragung liegen die folgenden Charakteristika der Feuchteübertragung in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur zugrunde (*Tabelle 1*):

Aussenlufttemperatur [°C]	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10	12	14	16
<b>Feuchteverhältnis [-]</b> Rotor mit Ionenaus-tauschharz	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.01
<b>Feuchteverhältnis [-]</b> Plattenwärmeübertrager mit Membran	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

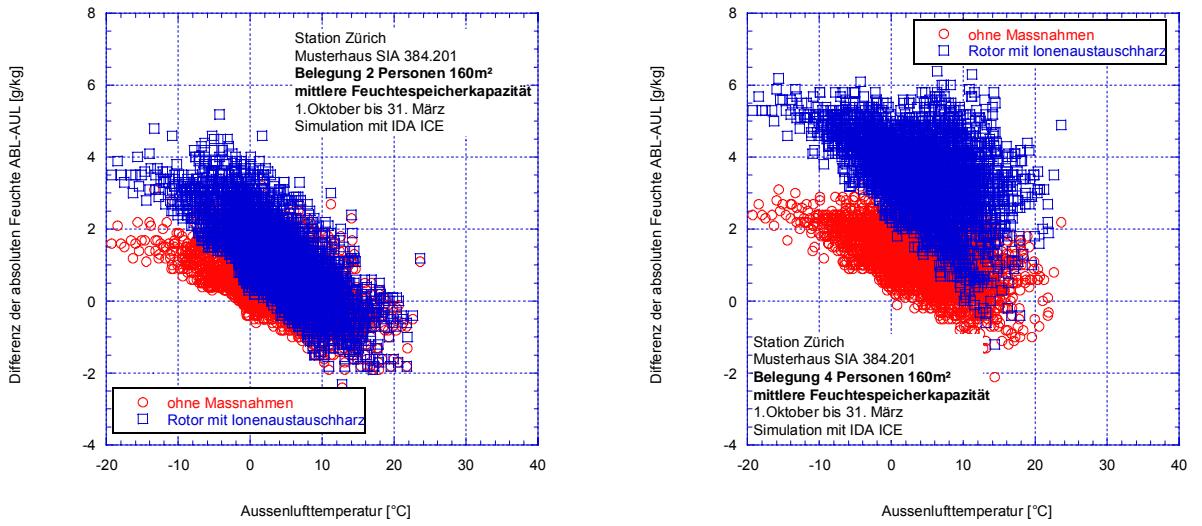
**Tabelle 1:** Charakteristika der Feuchteübertragung für die Systeme Rotor und Plattenwärmeübertrager.

Die Simulationen für die Station Zürich SMA wurden für folgende Varianten durchgeführt. Die Variantenbezeichnungen beziehen sich auf den Teilbericht [7]:

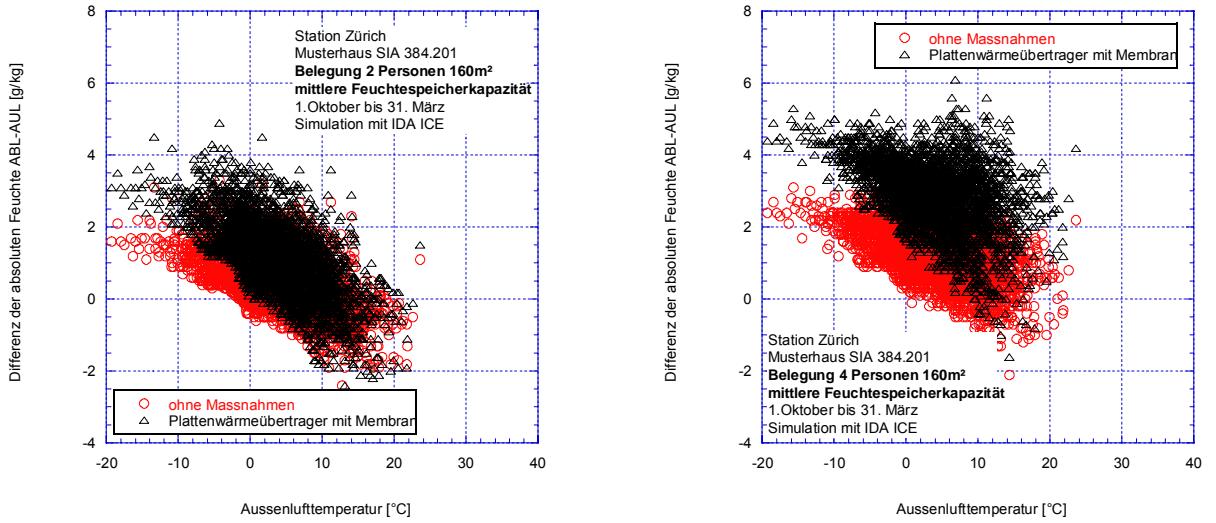
Variante	Personenzahl	Feuchtespeicherkapazität Raum	Regelstrategie Volumenstrom	Feuchterückgewinnung
18	2	mittlere	konstant	ohne
17	2	mittlere	variabel CO <sub>2</sub>	ohne
19	2	mittlere	konstant	Rotor mit Ionenaus-tauschharz
20	2	mittlere	konstant	Plattenwärmeübertrager mit Membran
7	4	mittlere	konstant	ohne
2	4	mittlere	variabel CO <sub>2</sub>	ohne
8	4	mittlere	konstant	Rotor mit Ionenaus-tauschharz
16	4	mittlere	konstant	Plattenwärmeübertrager mit Membran

**Tabelle 2:** Simulierte Varianten für den Systemvergleich.

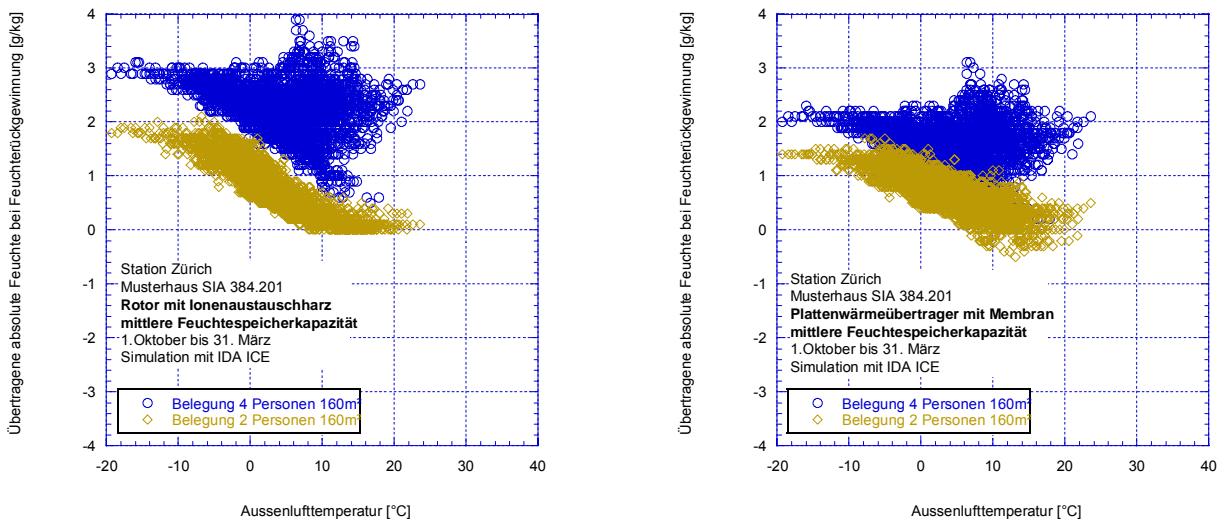
Mit den durch die Simulation im Stundenschritt ausgegebenen Werten für die absolute Feuchte der Aussenluft (AUL) und Abluft (ABL) konnte deren Differenz als Indikator für den Feuchtegewinn im Raum berechnet werden. Für die Variante ohne Feuchterückgewinnung bezeichnet dieser Wert die innere Feuchtelast. In den *Figuren 4 und 5* sind die Differenzen der absoluten Feuchte zwischen Abluft und Aussenluft für die Varianten 18-19-20 sowie 7-8-16 aufgetragen.



**Figur 4:** Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für den Rotor mit Ionenaustauschharz.

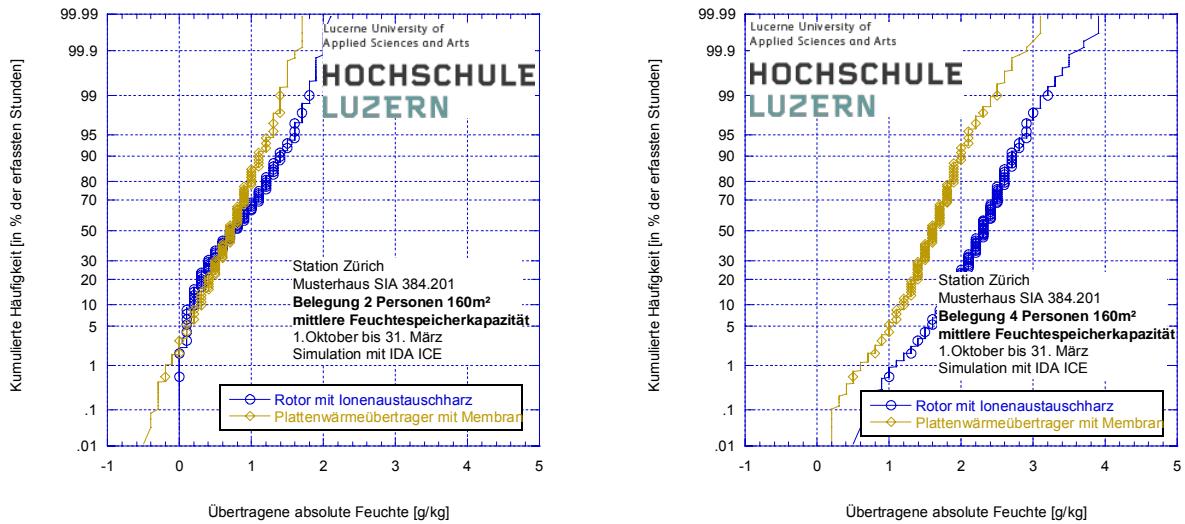


**Figur 5:** Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für den Plattenwärmeübertrager mit Membran.



**Figur 6:** Übertragene absolute Feuchte in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für zwei Systeme mit unterschiedlicher Belegung.

Figur 6 zeigt den Einfluss der Belegung auf die übertragene Feuchte der beiden Systeme Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran.



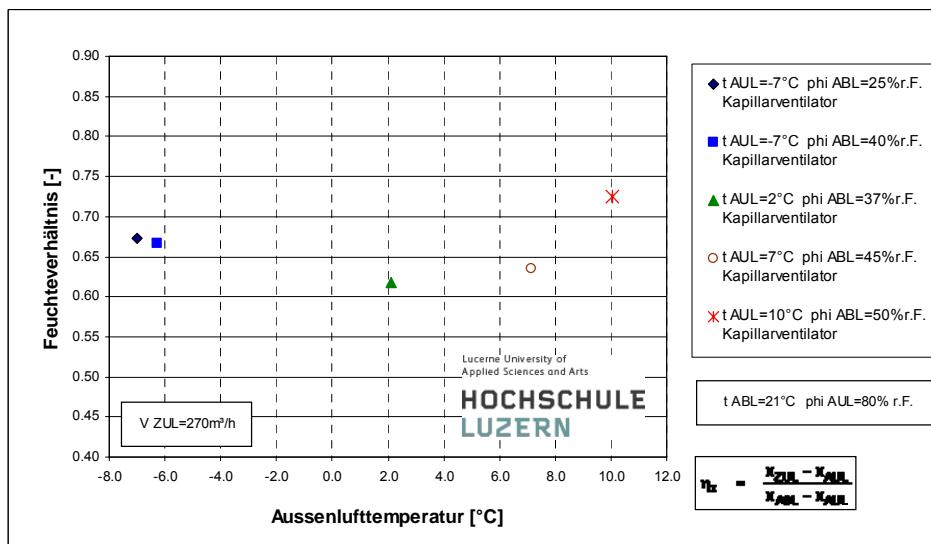
**Figur 7:** Kumulierte Häufigkeit der übertragenen absoluten Feuchte in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für den Rotor und den Plattenwärmeübertrager.

Aus Figur 7 wird ersichtlich, wie sich die Drehzahlregelung des Rotors mit Ionenaustauschharz auf die kumulierte Häufigkeit der übertragenen absoluten Feuchte auswirkt. Der Plattenwärmeübertrager mit Membran ohne Regelmöglichkeit und damit nahezu konstanter Übertragungscharakteristik zeigt eine Normalverteilung der Werte. Deutlich ersichtlich ist der Einfluss der Belegung auf die beiden Charakteristiken. Werden bei einer Belegung von 2-Personen für die beiden Feuchterückgewinnungssysteme an 60 bis 80 % aller Stunden übertragene absolute Feuchten von weniger als 1 g/kg ausgewiesen, sinkt dieser Prozentsatz bei 4-Personen auf 1 bis 5 %.

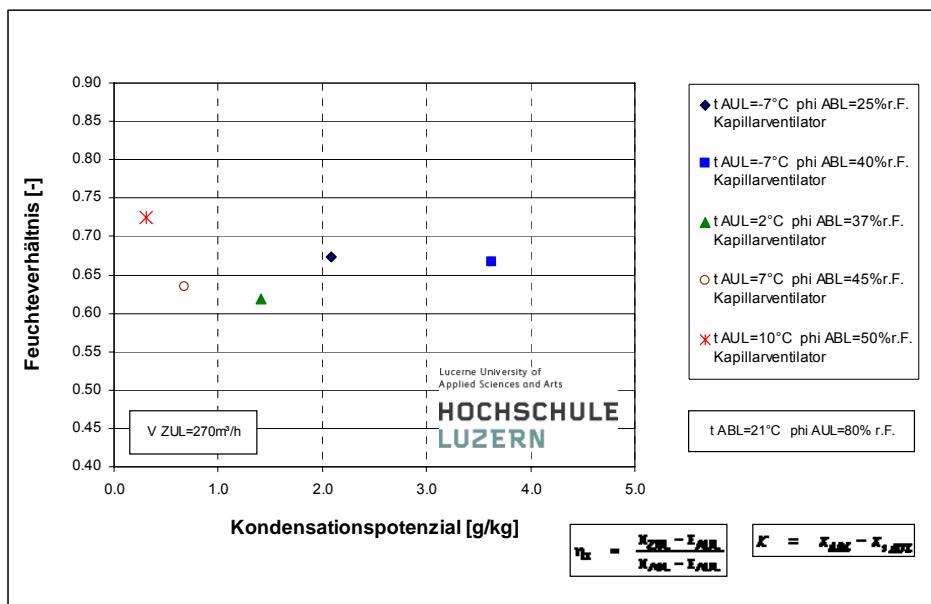
### Kapillarventilator

Da die beiden Systeme Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran mit dem System Kapillarventilator aufgrund der bedeutend höheren Leckagen des Kapillarventilators nicht direkt verglichen werden können, wird dieses System separat behandelt. Der Teilbericht [1] befasst sich mit dem Kapillarventilator.

Das SIA Merkblatt 2023 [11] fordert, dass der Aussenluftanteil an der Zuluft mindestens 95 % betragen muss. Aufgrund der bei Prüfstandsmessungen [1] ermittelten systembedingten Abluftleckage von rund 46 % kommt der Kapillarventilator für eine Anwendung in Wohnbauten somit nicht in Frage. Es ist aber eine Anwendung ausserhalb des von SIA 2023 definierten Einsatzgebietes zum Beispiel als Wandgerät für grössere Räume mit tieferen Anforderungen an die Zuluftqualität denkbar.



**Figur 8:** Feuchteverhältnis in Abhängigkeit der Aussenlufttemperatur für den Kapillarventilator.



**Figur 9:** Feuchteverhältnis in Abhängigkeit des Kondensationspotenzials für den Kapillarventilator.

Die spezifische Ventilatorleistung  $p_{SFP}$  beträgt für das Kapillarventilator-System 0.6 W/(m<sup>3</sup>/h). Das SIA Merkblatt 2023 [11] gibt einen Grenzwert von 0.42 W/(m<sup>3</sup>/h) vor.

## 4.2 BEDARFSGEREGELTE ZULUFTVOLUMENSTRÖME NACH CO<sub>2</sub>

In vom BFE geförderten Erfolgskontrollen an Niedrigenergiegebäuden wurden während einigen tausend Jahresstunden Raumluftfeuchten von unter 30 % gemessen [9]. Es stellte sich daher die Frage, ob durch bedarfsgeregelte Zuluftvolumenströme sowohl Befeuchtung und als auch Feuchterückgewinnung vermieden werden können. Die entsprechende Lösungsstrategie wurde durch einen Industriepartner vorgeschlagen und mittels dynamischer Gebäudesimulation in mehreren Varianten untersucht.

Mit dem Simulationsprogramm *IDA Indoor Climate and Energy 3.0* [12] wurden auf der Basis des Musterhauses SIA 384.201 drei Wohnungsvarianten, welche sich in Wohnfläche, Personenzahl und Nutzungsprofil unterscheiden, untersucht. Dabei wurde von Standard-Feuchtelasten ausgegangen. Mit weiteren Varianten wurde der Einfluss der Feuchtespeicherkapazität der Wände auf das Verhalten der relativen Raumluftfeuchte sowie der Unterschied zweier verschiedener Regelstrategien untersucht.

Die Simulationsvarianten unterscheiden sich zusammengefasst in folgenden Werten:

**Personenzahl PZ 4, 2, 1**

**Feuchtespeicherkapazität FK hoch, mittel, ohne**

**Regelstrategie RS nach CO<sub>2</sub> oder nach CO<sub>2</sub> und Feuchte (CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O)**

**Allen Varianten gemeinsam ist die Platzierung des CO<sub>2</sub>-Sensors in der Zone Wohnen.**

Die Platzierung des CO<sub>2</sub>-Sensors erfolgte nach der Vorgabe des Industriepartners. Das BFE Projekt *CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung von Wohn- und Schulhausbauten* [16] untersucht unter anderem den Einfluss der Platzierung von CO<sub>2</sub>-Sensoren an unterschiedlichen Standorten.

Die Datengrundlage der Simulationen und die daraus ermittelten Resultate sind im Teilbericht [6] ausführlich beschrieben und zusammengestellt worden. Es wurden insgesamt 7 Varianten definiert:

	Personenzahl	Feuchtekapazität	Regelstrategie
Variante 1: PZ 4, FK ohne, RS CO <sub>2</sub>	4	ohne	CO <sub>2</sub>
Variante 2: PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	4	mittel	CO <sub>2</sub>
Variante 3: PZ 4, FK hoch, RS CO <sub>2</sub>	4	hoch	CO <sub>2</sub>
Variante 4: PZ 2, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	2	mittel	CO <sub>2</sub>
Variante 5: PZ 1, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	1	mittel	CO <sub>2</sub>
Variante 6: PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	4	mittel	CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O
Variante 7: PZ 4, FK mittel, RS konstant	4	mittel	konstant

**Tabelle 3:** Untersuchte Simulationsvarianten (die hinterlegten Felder markieren die Abweichung von der Basisvariante 2)

Ausgewertet wurden für das Wohnzimmer und das Schlafzimmer die Anzahl Stunden im Januar mit relativer Luftfeuchte unter 30 %. Dabei sind einerseits die Anzahl Stunden (ohne Berücksichtigung der Raumbelegung) wie die Anzahl Personenstunden (Stunden gewichtet mit der Anzahl im Raum anwesenden Personen) ausgewiesen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Resultate.

		Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5	Variante 6	Variante 7
		PZ 4, FK ohne, RS CO <sub>2</sub>	PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	PZ 4, FK hoch, RS CO <sub>2</sub>	PZ 2, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	PZ 1, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	PZ 4, FK mittel, RS konstant
<b>Woh-</b> <b>nen</b>	# Pers.Std. < 30 % Abweichung von V2	38 + 660 %	5 -	5 ± 0 %	5 ± 0 %	0 - 100 %	1 - 80 %	113 + 2'260 %
<b>Januar</b>	# Stunden < 30 % Abweichung von V2	110 + 156 %	43 -	14 - 67 %	42 - 2 %	164 + 281 %	36 - 16 %	267 + 621 %
<b>Schla-</b> <b>fen</b>	# Pers.Std. < 30 % Abweichung von V2	80 + 100 %	40 -	0 - 100 %	74 + 85 %	81 + 103 %	40 ± 0 %	90 + 225 %
<b>Januar</b>	# Stunden < 30 % Abweichung von V2	105 + 275 %	28 -	0 - 100 %	49 + 75 %	117 + 318 %	23 - 18 %	242 + 864 %

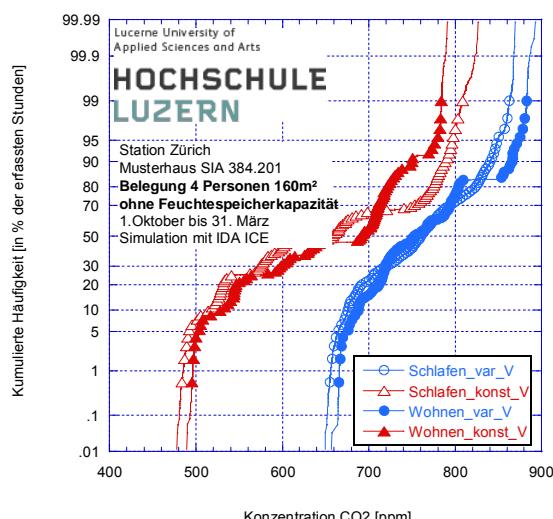
**Tabelle 4:** Anzahl Personenstunden und Anzahl Stunden während des Monats Januar mit relativer Luftfeuchte unter 30 %.

Es zeigt sich, dass die Feuchtespeicherkapazität der Wandoberflächen vor allem in Räumen mit wenig und im Tagesverlauf stark schwankender Feuchteproduktion - wie es typischerweise in Schlafzimmern zusammentrifft - eine entscheidende Rolle spielt (Varianten 1 bis 3).

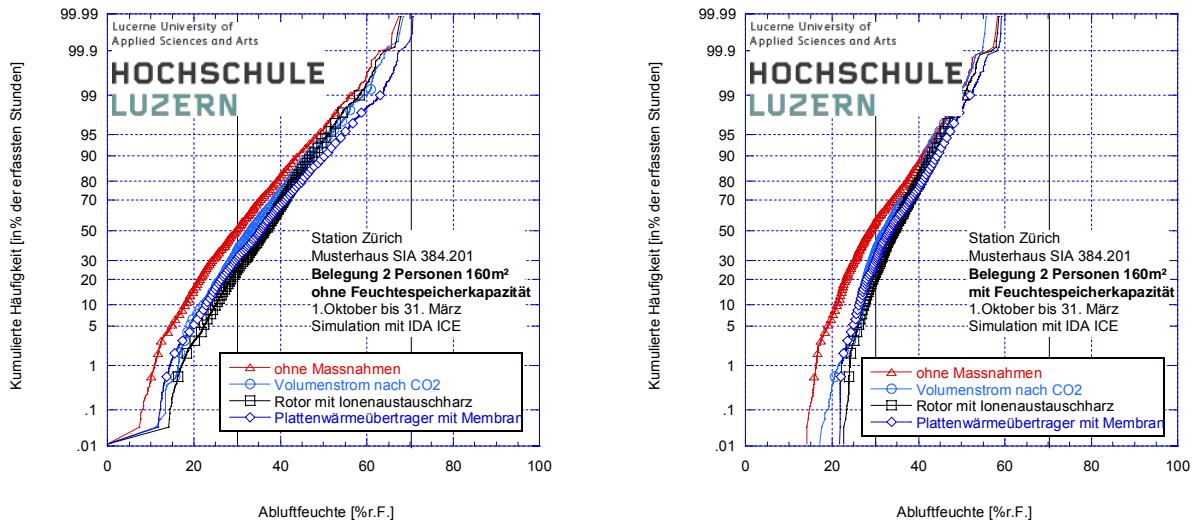
Der Feuchtebedarf im Winter kann mit üblicherweise anstehender Feuchteproduktion (Personen, Pflanzen, Kochen, Duschen, Wäschetrocknen) gedeckt werden. Kritisch sind hingegen Wohnungen mit tiefen Anwesenheitszeiten. Dies sind typischerweise Single-Haushalte, wo kaum gekocht wird, keine oder wenig Pflanzen herumstehen und die Räume nur während der Nacht belegt sind (Variante 5). In diesen Fällen wird eine dosierte Raumluftbefeuchtung empfohlen.

Eine intelligente Lüftungsregelung, wie die vom Industriepartner vorgeschlagene Steuerung des Luftvolumenstroms nach dem CO<sub>2</sub>-Gehalt, ist Bedingung für die Gültigkeit obiger Aussagen. Mit konstantem Auslegungs-Luftvolumenstrom fällt die relative Raumluftfeuchte regelmäßig entscheidend unter die Toleranzgrenze von 30 % (Variante 7). Mit geregeltem Luftvolumenstrom geschieht dies nur noch während wenigen Stunden (Vergleich der Varianten 2 und 7 in [6]). Eine zusätzliche Reduktion der Lüftung bei trockener Luft bringt im untersuchten Beispiel gegenüber einer reinen CO<sub>2</sub>-Regelung verhältnismässig wenig (Variante 6).

Die Bedarfsregelung der Lüftung nach CO<sub>2</sub> hat keine wesentliche Einbusse der Luftqualität zur Folge. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration bleibt in allen Simulationsvarianten jederzeit unter dem Pettenkofer-Wert von 1000 ppm. Einen beispielhaften Vergleich zeigt *Figur 10*.

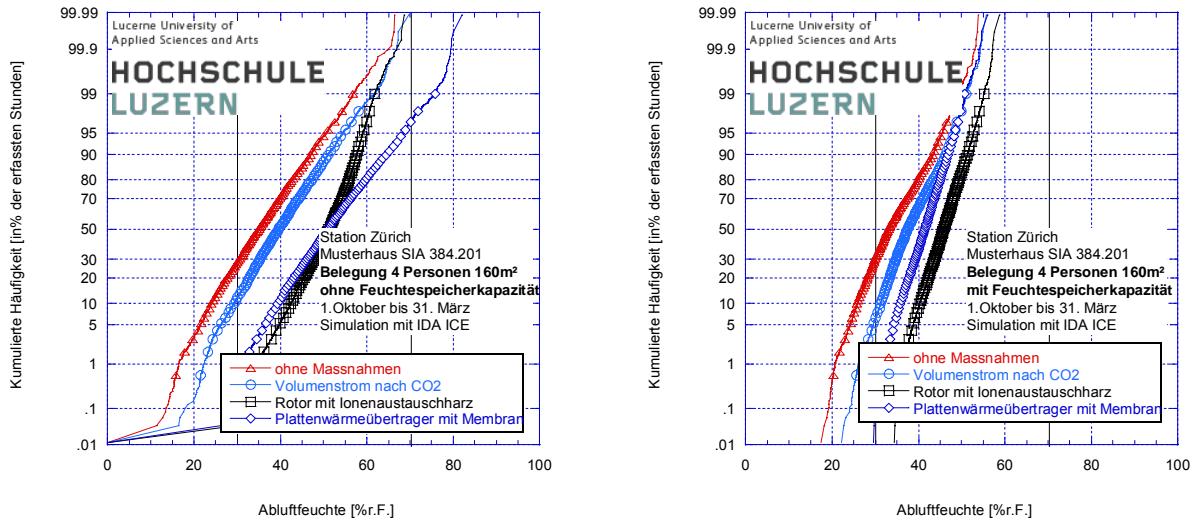


**Figur 10:** Kumulierte Häufigkeit für die CO<sub>2</sub>-Konzentration bei konstantem und variablem Volumenstrom.



**Figur 11a, b:** Kumulierte Häufigkeit der Abluftfeuchte bei unterschiedlicher Systemwahl.

Figur 11 zeigt, dass beim 2-Personenhaushalt (80 m<sup>2</sup>/Person) mit einer erheblichen Anzahl von Stunden mit Werten unter 30 % r.F. gerechnet werden muss. Ohne Massnahmen werden 50 % aller Stunden unter 30 % r.F. ausgewiesen. Gemäss Simulation werden die besten Werte für den Rotor mit Ionenaustauschharz ausgewiesen. Die Stunden mit Abluftfeuchte unter 30 % können mit dieser Lösung gegenüber der Variante ohne Massnahmen erheblich auf 20 % reduziert werden. Im Zwischenbereich bewegen sich die bedarfsgeregelten Volumenströme nach CO<sub>2</sub> (40 %) und der Plattenwärmevertrager mit Membran (30 %). Bei den bedarfsgeregelten Volumenströmen besteht noch ein Verbesserungspotenzial mittels CO<sub>2</sub>/Feuchte-Regelung. Zu erwähnen ist, dass auch der Rotor mit Ionenaustauschharz bedarfsgeregelt betrieben werden kann. Signifikant ist, dass die Feuchtespeicherkapazität bei lediglich 2 Personen auf 160m<sup>2</sup> keinen wesentlichen Einfluss hat. Lediglich bei hohen Abluftfeuchten ist ein merklicher Unterschied feststellbar, da offensichtlich diese Maximalwerte durch die vorhandene Feuchtespeicherkapazität gemindert werden.

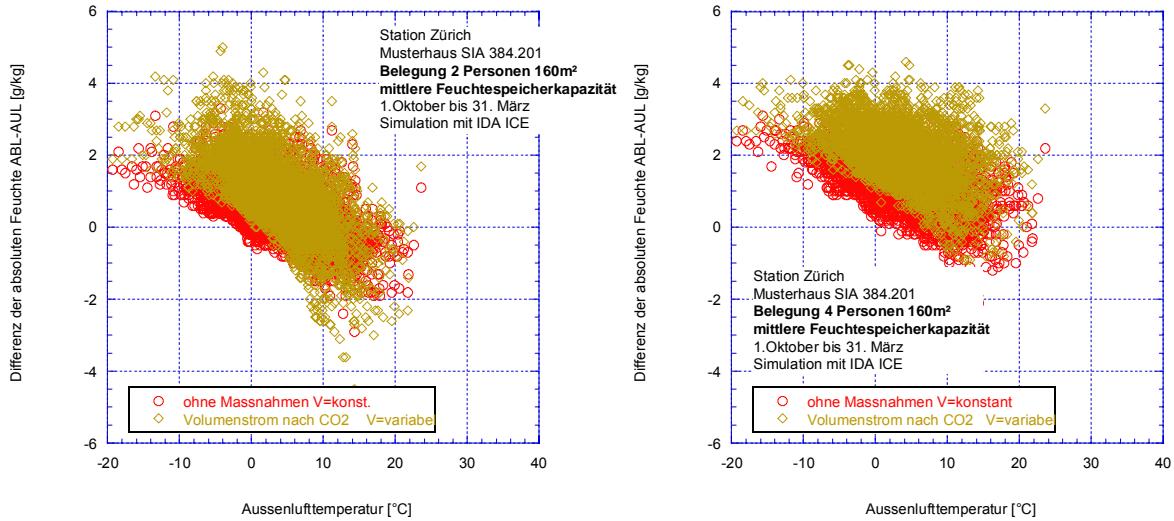


**Figur 12a, b:** Kumulierte Häufigkeit der Abluftfeuchte bei unterschiedlicher Systemwahl und Personenbelegung.

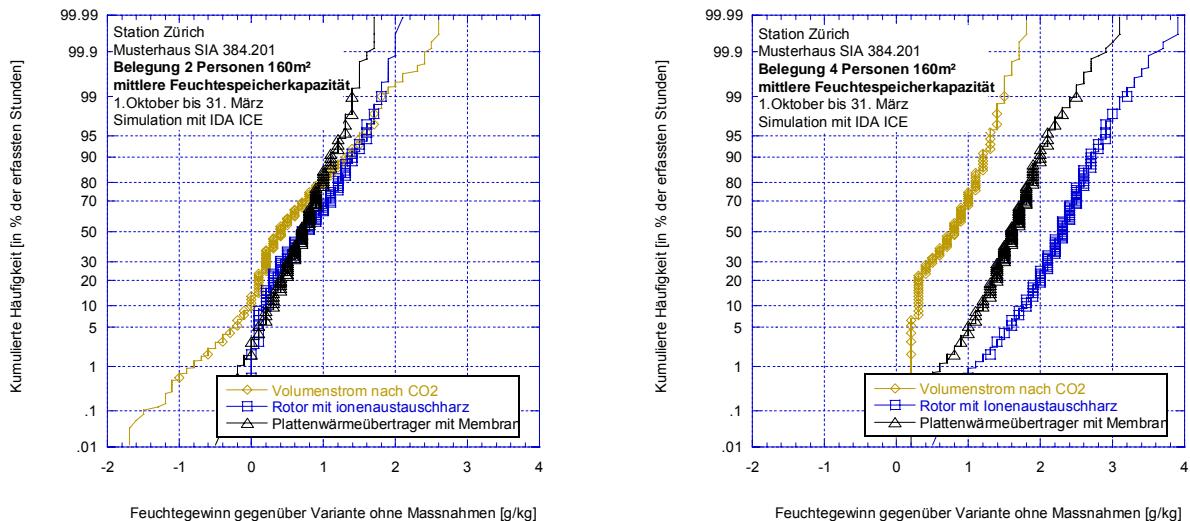
Figur 12 zeigt sehr deutlich, wie sich die Drehzahlregelung des Rotors mit Ionenaustauschharz im 4-Personenhaushalt mit 40 m<sup>2</sup>/Person auf den Verlauf der kumulierten Häufigkeit auswirkt. Die Abluftfeuchte unterschreitet den Wert von 30 % r.F. an sehr wenigen Stunden, die 70 % Marke wird nie überschritten. Bei vorhandener Feuchtespeicherkapazität werden gar keine Unterschreitungen der 30 %-Marke ausgewiesen. Die Variante der bedarfsgeregelten Volumenströme nach CO<sub>2</sub> weist an 5 bis 10 % aller erfassten Stunden Abluftfeuchte-Werte unter 30 % r.F. aus. Hingegen wird die 60 % Marke nach oben hin nie überschritten. Für den Plattenwärmevertrager mit Membran zeigt sich folgendes Bild: Wegen des niedrigeren Feuchteverhältnisses werden etwas mehr Werte mit Abluftfeuchte unter 30 % ausgewiesen. Deutlicher wird der Unterschied zum drehzahlgeregelten Rotor mit Ionenaustauschharz hin zu höheren Abluftfeuchten. Aufgrund der konstanten Feuchteübertragungscharakteristik kann der Plattenwärmevertrager mit Membran gemäss Simulation nicht reagieren und überträgt theoretisch im unerwünschten Bereich noch Feuchte (siehe Kapitel 4.3). Allerdings sind in der Praxis

diese Geräte derart ausgestattet, dass sie in diesem Fall den Volumenstrom erhöhen, um die Überfeuchtung zu vermeiden.

Ohne Massnahmen werden im 4-Personenhaushalt an 25 bis 30 % aller erfassten Stunden Werte unter 30 % Abluftfeuchte ausgewiesen. Die Variante mit den bedarfsgeregelten Volumenströmen zeigt im Vergleich mit der Variante ohne Massnahmen über den ganzen Bereich eine konstante Feuchtedifferenz von 10 % r.F. Hin zu höheren Abluftfeuchten werden keine Werte über 70 % ausgewiesen und nur ganz wenige über 60 %.



**Figur 13:** Vergleich der beiden Varianten ohne Feuchteübertragung mit konstantem oder variabilem Volumenstrom.



**Figur 14:** Kumulierte Häufigkeit der übertragenen absoluten Feuchte für drei Varianten.

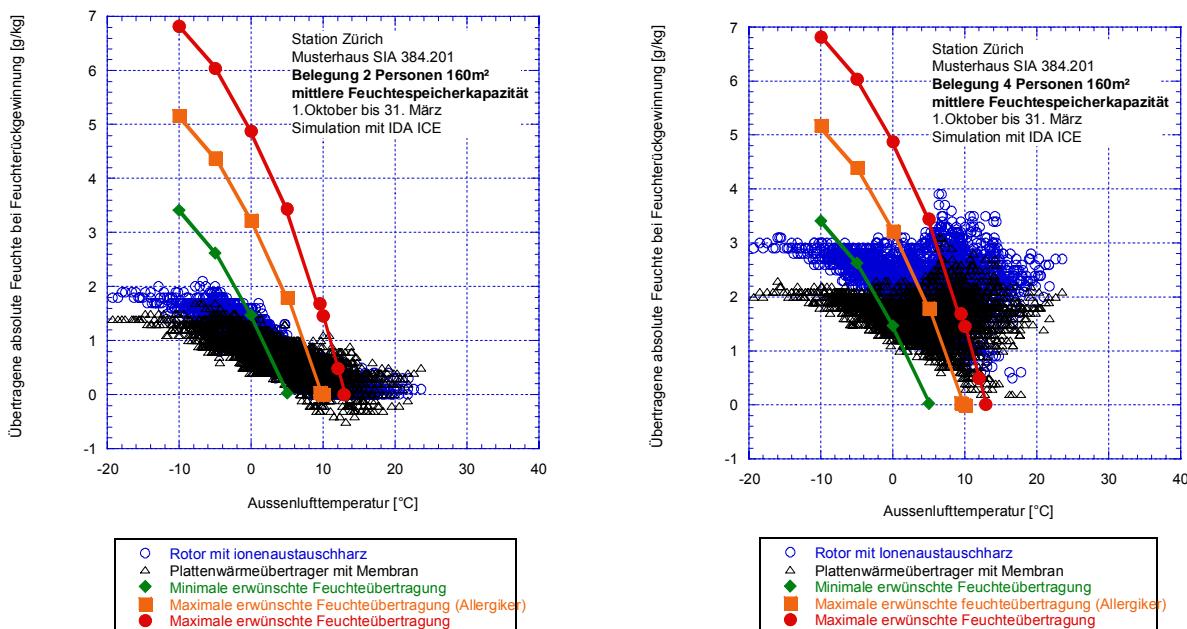
Durch Differenzbildung lässt sich im Vergleich mit den Varianten 7 / 18 ohne Feuchteübertragung für jede weitere Variante eine übertragende absolute Feuchte berechnen (siehe Tabelle 2). Diese berechnet sich aus der jeweiligen Differenz zwischen Abluft und Außenluft. Da der Außenluftzustand bei allen Varianten gleich ist, kann nach einer Umformung direkt die Differenz der Abluftfeuchten berechnet werden. Diese Berechnungen wurden für die Varianten 2 / 17 (Volumenstrom nach  $\text{CO}_2$ ), 8 / 19 (Rotor mit Ionenaustauschharz) und 16 / 20 (Plattenwärmevertrager mit Membran) durchgeführt. Die Variantenbezeichnungen beziehen sich hierbei auf Tabelle 2.

Figur 14 zeigt die kumulierten Häufigkeiten der übertragenen absoluten Feuchte für die Varianten Rotor mit Ionenaustauschharz, Plattenwärmevertrager mit Membran und bedarfsgeregelte Volumenströme. Hieraus ist ersichtlich, dass mit einem Ionenaustauschharz-Rotor rund 2 g/kg mehr absolute Feuchte im Raum wirksam werden als mit einer Volumenstromregelung nach  $\text{CO}_2$ . Es ist zu beachten, dass mit einer Volumenstromregelung nach  $\text{CO}_2$  immerhin 0 bis 2 g/kg absolute Feuchte mehr im

Raum wirksam werden als ohne Massnahmen. Die Simulationen mit *IDA Indoor Climate and Energy* [12] in den Teilberichten [6] und [7] haben den Einfluss der Feuchtespeicherkapazität für die Varianten mit Volumenstromregelung nach CO<sub>2</sub> untersucht (siehe Tabelle 4).

#### 4.3 RECHNERISCHE UNTERSUCHUNG ZUR ÜBERFEUCHTUNGSPROBLEMATIK

Die rechnerische Untersuchung erfolgte einerseits durch dynamische Gebäudesimulation mittels *IDA Indoor Climate and Energy* [12] und andererseits durch weitergehende Berechnungen der wünschenswerten Feuchteübertragung. Wie bereits im Kapitel 4.3 beschrieben wurden auf der Basis des Musterhauses SIA 384.201 verschiedene Varianten zwecks Untersuchung der bedarfsgeregelten Zuluftvolumenstromregelung nach CO<sub>2</sub> untersucht. Für die nachfolgenden Berechnungen wurden weitere zwei Varianten mit Feuchterückgewinnung berechnet. Einerseits wurden ein Rotor mit Ionen austauschharz (Varianten 8/19) und andererseits ein Plattenwärmeübertrager mit Membran (Varianten 16/20) als Variationsparameter eingesetzt.



**Figur 15a, b:** Übertragene absolute Feuchte für die Systeme Rotor und Plattenwärmeübertrager.

In Figur 15 werden die beiden Systeme Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran miteinander verglichen. Neben der berechneten übertragenen Feuchte sind Grenzlinien für die erwünschte minimale und maximale Feuchteübertragung eingetragen:

- |                 |  |
|-----------------|--|
| Minimum         | Die Feuchteübertragung ist gerade so gross, dass die relative Raumluftfeuchte bei mindestens 30% liegt, auch wenn im Raum kein Feuchtezuwachs ( $\Delta x = 0$ ) vorhanden sein sollte. Bei einem Feuchtezuwachs von 1,5 g/kg ergibt sich eine relative Raumluftfeuchte von ca. 40%.   |
| Maximum         | Die Feuchteübertragung ist so gross, dass die relative Raumluftfeuchte 60% nicht überschreitet, wenn der Feuchtezuwachs im Raum $\Delta x = 1,5$ g/kg beträgt.   |
| Max. Allergiker | Die Feuchteübertragung ist so gross, dass die relative Raumluftfeuchte 50% nicht überschreitet, wenn der Feuchtezuwachs im Raum $\Delta x = 1,5$ g/kg beträgt. Die obere Grenze von 50% während des Winters entspricht einer Empfehlung für Hausstaubmilben-Allergiker und findet sich in einer Broschüre des Schweizerischen Zentrums für Allergie, Haut und Asthma [10]. |

Den Grenzlinien liegen die Annahmen zu Grunde, dass die Raumlufttemperatur 21 °C beträgt und die relative Außenluftfeuchte bei 85 % liegt.

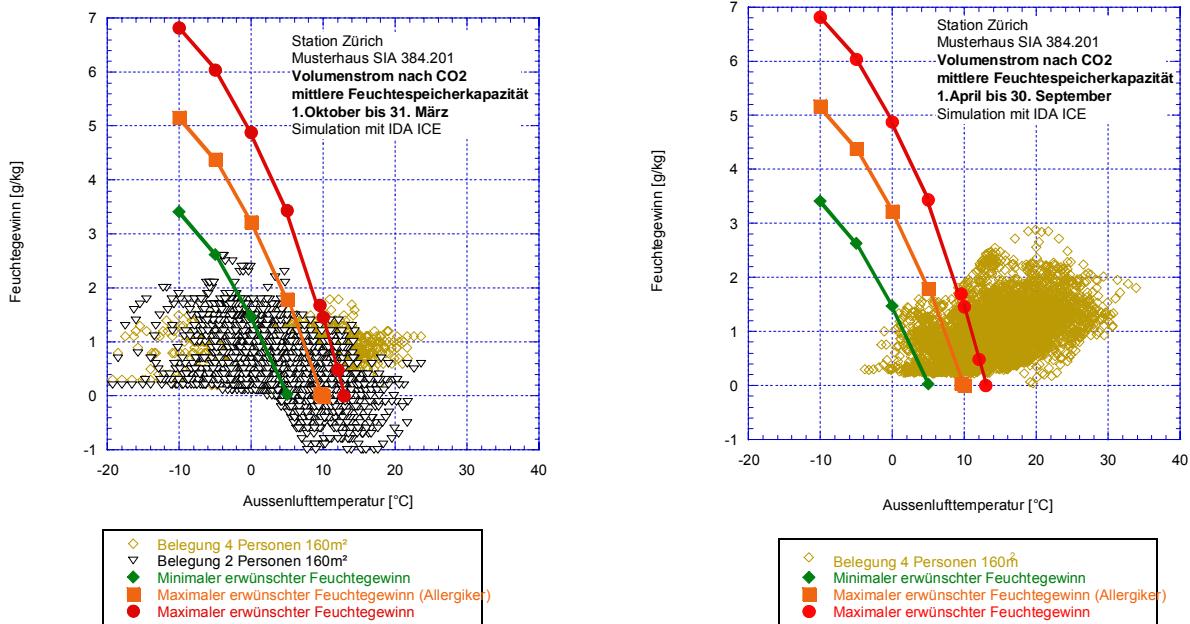
Die rechnerische Untersuchung durch Simulation der Raumluftzustände im Musterhaus SIA 384.201 zeigt, dass bei einer Belegung von 2 Personen auf 160 m<sup>2</sup> infolge fehlender interner Lasten nicht mit einer Überfeuchtung zu rechnen ist.

Die Wärmerückgewinnung ist bis zu einer Aussenlufttemperatur von ca. 16 °C erwünscht. Die obere Grenze der Feuchterückgewinnung liegt aber bei +10°C (Hausstaubmilben-Allergiker bis 13°C). Ein allfälliges vorzeitiges Ausschalten der Wärmerückgewinnung würde zu einem höheren Heizwärmebedarf und - je nach Luftdurchlässen - zu einer geringeren thermischen Behaglichkeit führen. Der Mehrbedarf an Heizwärme, resp. Endenergie für die Raumheizung ist abhängig von Gebäude und Heizsystem.

Beim System *Rotor mit Ionenaustauschharz* lässt sich die Wärme- und Feuchtübertragung nicht völlig entkoppeln. Bei +10°C ist die Feuchteübertragung noch so bedeutend, dass die Raumluftfeuchte für Allergiker in der Übergangszeit unerwünscht früh (zu) hoch wird. Insgesamt wird bei einer Belegung von 4-Personen an rund 20 % der Winterhalbjahresstunden eine relative Raumluftfeuchte von über 50 % berechnet (siehe *Figur 12*). Die Berechnung muss aber durch praktische Beobachtungen relativiert werden. Benutzereinflüsse (spez. zunehmendes Fensteröffnen bei höheren Aussenlufttemperaturen) und tiefere reale Belegungsdichten werden in den meisten Fällen zu weniger Überschreitungen der 50 %-Marke führen. Bei +13°C und höher ist die Feuchtübertragung nicht mehr relevant und führt bei einer Standardnutzung – Hausstaubmilbenallergiker - zu keinen Problemen.

Beim System *Plattenwärmeübertrager mit Membran* besteht einerseits über den Sommerbypass die Möglichkeit die Feuchtrückgewinnung auszuschalten. Die Wärmerückgewinnung ist damit selbstverständlich auch ausser Betrieb. Andererseits kann durch die Erhöhung des Volumenstromes die Wärme- und Feuchtübertragung beeinflusst werden, was aber den Elektrizitätsverbrauch erhöht. Hausstaubmilbenallergiker, die sich an die erwähnte Empfehlung halten, müssten bei diesem System ab ca. +5°C auf die Wärmerückgewinnung verzichten und dadurch einen etwas höheren Heizenergieverbrauch in Kauf nehmen. Gemäss Berechnung für den 4-Personenhaushalt im Musterhaus SIA 384.201 wird während lediglich 5 % der Winterhalbjahrstunden eine relative Raumluftfeuchte von 50 % überschritten. Die Erfahrungen aus dem BFE Projekt *Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten* [8] haben aber gezeigt, dass die festgestellten Überschreitungen der Raumluftfeuchte von 60 % nur teilweise auf die Feuchtübertragungscharakteristik des Membran-Plattenwärmeübertragers zurückzuführen sind, da das Benutzerverhalten ebenfalls eine wichtige Rolle spielt. In der Praxis ist vor allem wegen der typischerweise kleineren Personenbelegung und dem Benutzereinfluss nur selten mit Werten von über 60 % zu rechnen.

Im Fall der nach CO<sub>2</sub> bedarfsgeregelten Volumenströme kann im Vergleich mit der Variante ohne Feuchteübertragung ebenfalls von einem Feuchtegewinn gesprochen werden. Durch die CO<sub>2</sub> – Regelung mit variablem Volumenstrom kann im Vergleich mit der Variante Konstantvolumenstrom mehr Feuchte im Raum wirksam werden. *Figur 16* zeigt den Feuchtegewinn in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur. Hieraus geht hervor, dass im Winterhalbjahr auch mit einer CO<sub>2</sub> – Regelung der erwünschte minimale Feuchtegewinn nicht immer eingehalten werden kann.



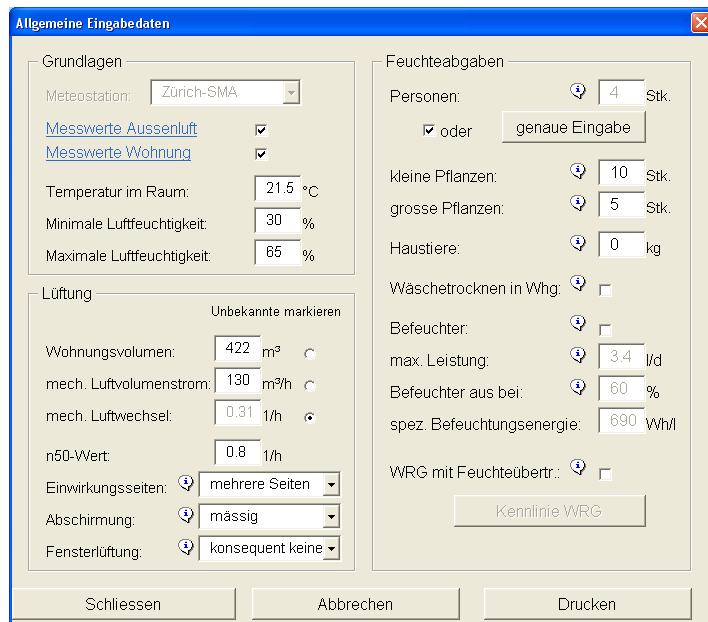
**Figur 16:** Feuchtegewinn in Funktion der Außenlufttemperatur bei der CO<sub>2</sub> – Regelung der Volumenströme.

Die Simulation weist auch bei der CO<sub>2</sub>-Regelung während ca. 10 % der Winterstunden eine höhere relative Raumluftfeuchte als 50 % aus. Wie bereits erwähnt, dürfen aber reale Einflüsse dazu führen, dass auch für Hausstaubmilben-Allergiker kaum ein Überfeuchtungsrisiko besteht. Im Sommerhalbjahr könnte eine reine CO<sub>2</sub>-Regelung gemäss *Figur 16* zu einem Überfeuchtungsproblem führen. Es wird daher empfohlen, diese Art von Regelung zusätzlich mit einer Feuchteüberwachung auszurüsten. Als Alternative wäre auch eine Regelstrategie denkbar, die die Außenlufttemperatur mit berücksichtigt.

#### 4.4 AUSWIRKUNGEN VON MASSNAHMEN AUF DIE RAUMLUFTFEUCHTE

Um für die Auswirkungen von Massnahmen auf die Raumluftfeuchte zu untersuchen, können Planer und Interessierte selten auf Simulationen mit *IDA Indoor Climate and Energy* [12] zurückgreifen. Für diese Anwender wird ein in einer Diplomarbeit [13] an der Hochschule Luzern – Technik & Architektur entwickeltes *Feuchtetool* bereitgestellt. In diesem BFE Projekt wurde das *Feuchtetool* weiterentwickelt. Die Grundlagen für die Annahmen der internen Feuchtelasten (Pflanzen, Tiere und Menschen) wurden in der Literatur nochmals überprüft. Sie bilden eine wichtige Grundlage für das nachfolgend beschriebene Berechnungsprogramm *Feuchtetool*. Die Überprüfung von Literaturquellen hat gezeigt, dass die Annahmen für interne Feuchtequellen üblicherweise zu optimistisch sind. Ein verändertes Benutzerverhalten trägt dazu bei, dass die internen Feuchtequellen insgesamt etwa die Hälfte der in den Normen angegebenen Werte erreichen und so in der Planung häufig zu hoch eingesetzt werden.

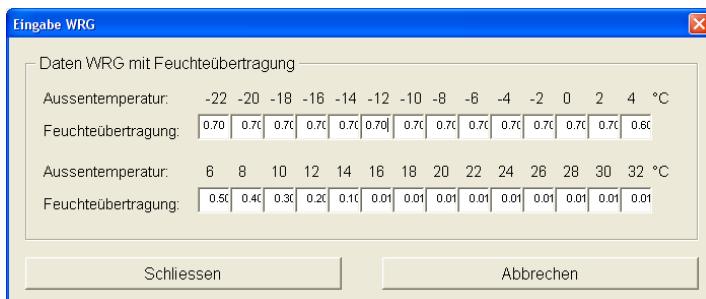
Das Berechnungsprogramm *Feuchtetool* wurde zur Bestimmung der relativen Feuchte auf Jahresbasis entwickelt. Es handelt sich um eine statische Berechnungsmethode, die keine Feuchtespeicherung im Raum beinhaltet. Für die Projektbedürfnisse wurde das Berechnungsprogramm verbessert und um elf Meteostationen erweitert. Allgemeine Eingaben und die Personenbelegung können definiert werden (*Abbildung 1*, *Abbildung 2*). Der Benutzer kann produktsspezifische Kennlinien für Rotoren und Plattenwärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung eingeben (*Abbildung 3*). Der Feuchtesollwert (z.B.  $\varphi_{\text{soll}}=40\text{ \%r.F.}$ ) und die Feuchtegrenzen (z.B.  $\varphi_u=30\text{ \%r.F.}$  und  $\varphi_o=60\text{ \%r.F.}$ ) können selber definiert werden. Zudem können die Leistungsdaten eines Dampflufterzeugers eingeegeben werden (*Abbildung 1*). Kumulierte Häufigkeiten der relativen Feuchte und die durchschnittlichen Feuchteabgaben stehen nach dem Berechnungsgang als Ausgabegrößen in grafischer Form bereit (*Abbildung 4*, *Abbildung 5*).



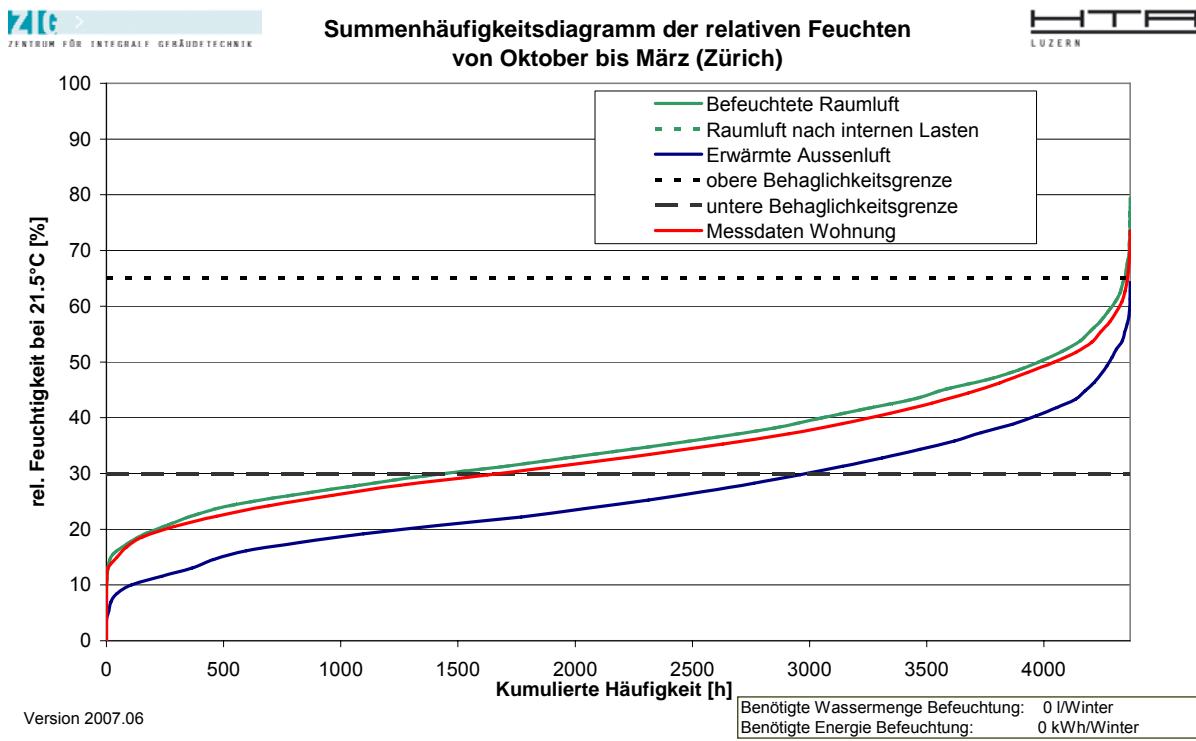
**Abbildung 1:** Allgemeine Eingabedaten für das Berechnungsprogramm Feuchtetool



**Abbildung 2:** Eingabedaten zur Personenbelegung.

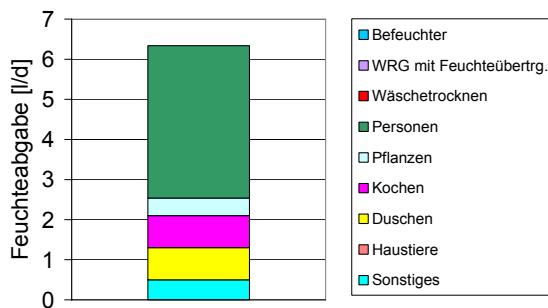


**Abbildung 3:** Eingabedaten zur Kennlinie der Feuchteübertragung eines Rotors mit Ionenaustauschharz.



**Abbildung 4:** Die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte als Ausgabe des Berechnungsprogramms.

durchschnittliche Feuchteabgaben von Oktober bis März



Version 2007.06

Abbildung 5: Die durchschnittlichen Feuchteabgaben als weitere Ausgabe des Berechnungsprogramms.

### Validierung des *Feuchtetools* mittels Simulation mit IDA Indoor Climate and Energy [12]

Um den Einsatz des *Feuchtetools* validieren zu können, wurde auf die dynamische Gebäudesimulation mit *IDA Indoor Climate and Energy* [12] zurückgegriffen. Das Musterhaus SIA 384.201 wurde, wie bereits in den Teilberichten [6] und [7] beschrieben, als Grundlage verwendet. Im ersten Schritt wurden alle Eingabedaten, die für die Simulation verwendet wurden, ebenfalls auf das *Feuchtetool* übertragen. Als Grundlage für die Validierung diente die Variante mit dem 4-Personenhaushalt ohne Feuchtespeicherungskapazität und konstantem Volumenstrom. Dies entspricht Variante 9 in [6]. Die **Aussenklimadaten von Zürich** wurden als **Messwerte Außenluft** im Feuchtetool eingegeben (Abbildung 6). Dies um sicherzustellen, dass Simulation und Berechnung wirklich die gleichen Außenklima-Datensätze verwenden. Danach wurden die **Abluftwerte der Simulation** als **Messwerte Wohnung** eingeben. Soweit möglich wurden die Eingabedaten für die Simulation und das *Feuchtetool* miteinander abgeglichen. Abbildung 6 gibt eine allgemeine Übersicht über die Eingabedaten. Nach einem Berechnungsgang werden die kumulierten Häufigkeiten der relativen Feuchte für die Simulation (*Kurve Messdaten Wohnung*) und das Feuchtetool (*Kurve Befeuchtete Raumluft*) für die Periode Oktober bis März ausgegeben. Es stellt sich heraus, dass das *Feuchtetool* in der Lage ist, die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte für den Fall ohne Feuchtespeicherung und ohne Feuchterückgewinnung qualitativ und quantitativ richtig wiederzugeben.

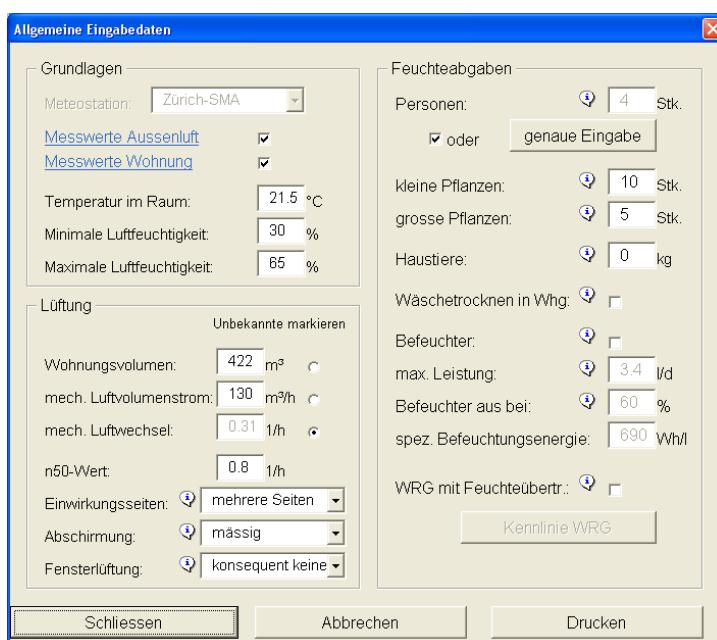
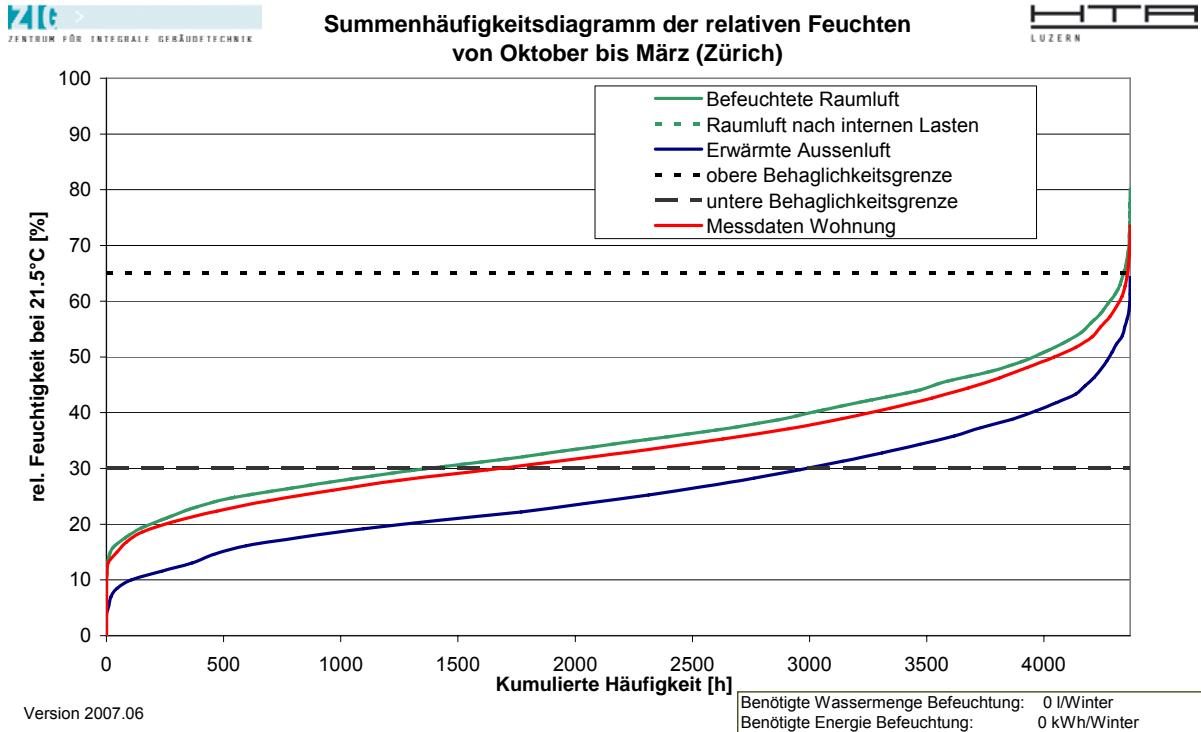


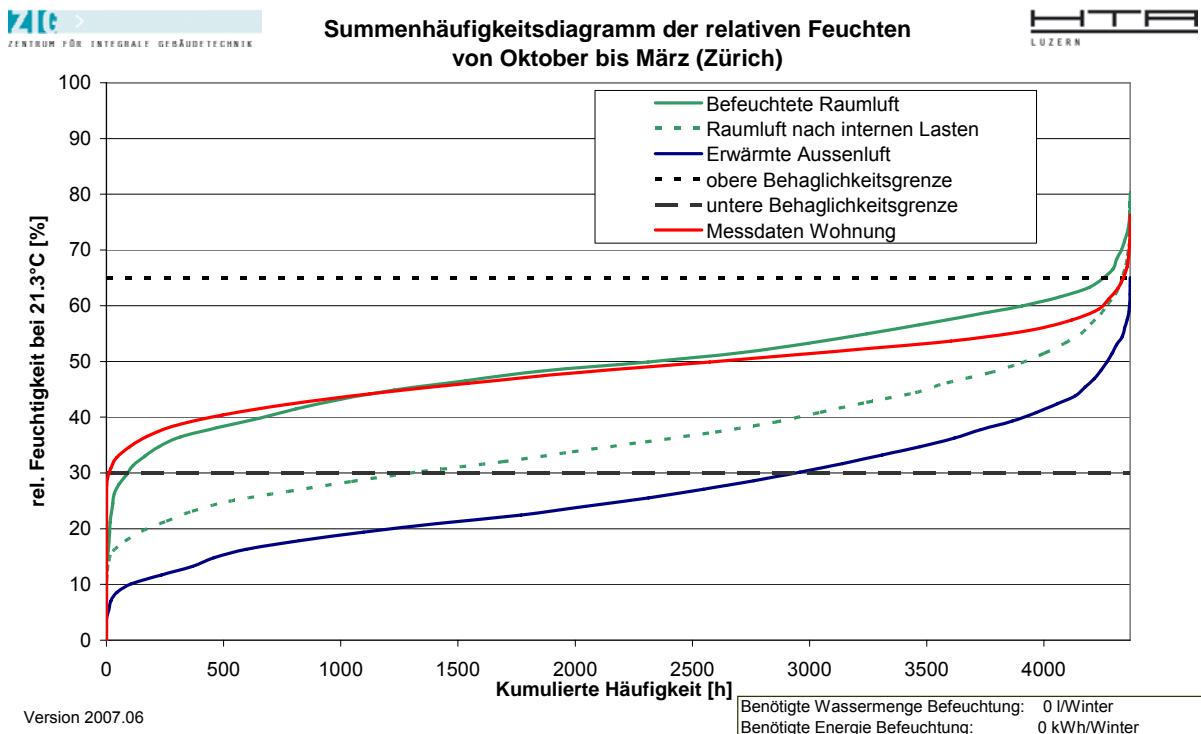
Abbildung 6: Eingaben für das *Feuchtetools* zur Validierung mit der Simulation im Musterhaus SIA 384.201.

**Musterhaus SIA 384.201 4-Personenhaushalt, keine Feuchtespeicherung, keine Feuchterückgewinnung, konstanter Volumenstrom**



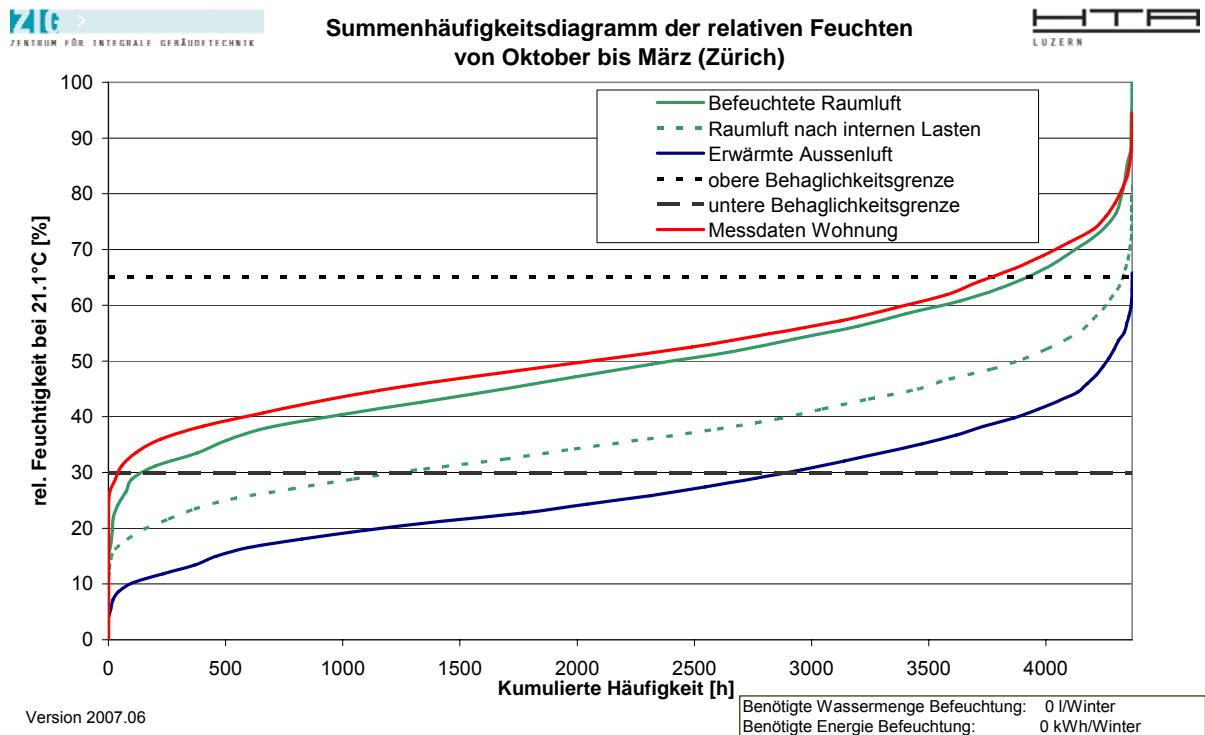
**Figur 17:** Validierung des Feuchtetools durch die Simulationen im Musterhaus SIA 384.201 (Variante 9 in [7]).

Aus Figur 17 geht hervor, dass nur geringfügige Unterschiede zwischen Simulation (Kurve *Messdaten Wohnung*) und Berechnung (Kurve *Befeuchtete Raumluft*) bestehen. Die Differenz beträgt während vieler Halbjahresstunden um die 2.5 % r.F. Der Nutzer ist damit in der Lage sich ein realistisches Bild der zu erwartenden kumulierten Häufigkeiten der relativen Feuchte zu machen.



**Figur 18:** Validierung des Feuchtetools durch die Simulationen im Musterhaus SIA 384.201 (Variante 10 in [7]).

Figur 18 zeigt, dass zwischen Simulation (Kurve *Messdaten Wohnung*) und Berechnung (Kurve *Befeuchtete Raumluft*) Unterschiede bestehen. Für tiefe Raumluftfeuchten beträgt die Differenz rund 2.5 % r.F. bis etwa 1000 Halbjahresstunden. Ab 1500 Halbjahresstunden nimmt die Differenz zwischen Simulation und Berechnung stetig zu und erreicht ihren Maximalwert von 5 % r.F. bei einer Raumluftfeuchte von 60%.



**Figur 19:** Validierung des Feuchtetools durch die Simulationen im Musterhaus SIA 384.201 (Variante 11 in [7]).

Die Berechnungswerte liegen konstant um etwa 2 bis 5% r.F. unter den Simulationswerten. Die qualitativen Verläufe der Simulation und der Berechnung stimmen überein.

## 4.5 AUSWIRKUNGEN AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH VON SYSTEMEN

In diesem Abschnitt wird grob abgeschätzt, wie sich Luftbefeuchtung und Feuchterückgewinnung auf den gesamten Energiebedarf eines Wohnhauses auswirken. Die Abschätzungen werden am Musterhaus SIA384.201 durchgeführt, das auch bei den Simulationen verwendet wird. Die hier durchgeföhrten Berechnungen haben die Qualität von Handberechnungen, die mit Werten (Überträgen) aus genaueren Berechnungen ergänzt sind.

Ausgehend von einem Referenzfall wird der Einfluss der verschiedenen technischen Lösungen abgeschätzt. Es werden nicht reale Produkte mit einander verglichen, sondern es wird versucht die verschiedenen Technologien zu vergleichen.

### Ausgangslage und Grundannahmen

#### Referenzanlage

Belegung	4 Personen
Feuchtanfall	6,3 kg/d
Raumlufttemperatur	21 °C
Lüftungssystem	Einfache Lüftungsanlage (Komfortlüftung)  Wärmerückgewinnung (WRG) mit einem Plattenwärmevertrager ohne Feuchteübertragung. Die Lüftungswärmeverluste werden durch die WRG und die Abwärme der Ventilatoren um 85 % reduziert.  Spezifischer elektrische Aufnahmleistung: 0,35 W/(m <sup>3</sup> /h) Luftvolumenstrom im Normalbetrieb: 130 m <sup>3</sup> /h Durchgehender einstufiger Betrieb während der Heizsaison Frostschutz der WRG durch ideal geregelte Elektrovorwärmung
Heizsaison	230 Tage mit einer mittleren Außenlufttemperatur von 4 °C
Heizung	Eine Wärmepumpe mit einer Jahresarbeitszahl von 3 erwärmt die Zuluft auf Raumlufttemperatur.

Die Raumluft ist in der ganzen Wohnung ideal gemischt.

#### Referenzanlage mit Erdreich-Luft-Wärmeübertrager

Als Untervariante des Referenzfalls wird die Außenluft durch einen Erdreich-Luft-Wärmeübertrager (EWT) vorgewärmt. Dieser ersetzt den elektrischen Vereisungsschutz und reduziert die verbleibenden Lüftungswärmeverluste um 20 %. Der zusätzliche Druckverlust beträgt im Normalbetrieb 20 Pa. Der zusätzliche Energiebedarf für die Luftförderung wird mit einem Ventilatorwirkungsgrad von 20 % berechnet.

Gegenüber dem Referenzfall verändert sich der Bedarf an elektrischer Energie wie folgt:

Mehrverbrauch für die Luftförderung	20 kWh
Minderverbrauch der Wärmepumpe	-37 kWh
Minderverbrauch der elektrischen Frostschutzheizung	-52 kWh
<b>Saldo (negativer Wert = Minderverbrauch)</b>	<b>-69 kWh</b>

**Tabelle 5:** Bilanz der Referenzanlage.

## ENERGIEBILANZ OHNE BEFEUCHTUNG DER RAUMLUFT

### Lüftungsgeräte mit Feuchtrückgewinnung

Die sensible Wärmerückgewinnung der Geräte mit Feuchterückgewinnung wird im Normalbetrieb 10 %-Punkte tiefer eingesetzt als beim Referenzfall.

Um eine Überfeuchtung zu vermeiden, wird der Luftvolumenstrom an 10 % der Stunden um 30 % erhöht. Es wird angenommen, dass die mittlere Aussenlufttemperatur in dieser Zeit bei +10 °C liegt. Die sensible Wärmerückgewinnung ist infolge des höheren Luftvolumenstroms 5 %-Punkte tiefer als beim Normalbetrieb.

Es wird angenommen, dass die spezifische Ventilatorleistung gleich ist wie beim Referenzfall.

### Lüftungsgerät mit Ionenaustauschharz-Rotor

Während des Normalbetriebs liegt die elektrische Aufnahmeleistung des Rotorantriebs bei 9 W. Während dem Betrieb mit erhöhtem Volumenstrom sinkt sie auf 5 W.

Das Feuchteverhältnis beträgt bei Normalbetrieb 70 %.

Ein Frostschutz ist wegen dem hohen Feuchteverhältnis nicht erforderlich.

Ohne Berücksichtigung der Energieeinsparung durch Feuchterückgewinnung - die später behandelt wird - ergibt sich gegenüber dem Referenzfall folgende Bilanz:

Bilanz der Variante Rotor mit Ionenaustauschharz gegenüber (ohne Befeuchtungsenergie)	Referenzanlage	Referenzanlage mit EWT
Mehrverbrauch Rotorantrieb	47 kWh	47 kWh
Mehrverbrauch der Wärmepumpe	146 kWh	183 kWh
Minderverbrauch der elektrischen Frostschutzheizung	-52 kWh	0 kWh
Mehr-/Minderverbrauch Luftförderung	7 kWh	-13 kWh
<b>Saldo (positiver Wert = Mehrverbrauch)</b>	<b>148 kWh</b>	<b>217 kWh</b>

Tabelle 6: Bilanz der Variante Rotor mit Ionenaustauschharz.

### Lüftungsgerät mit Membran-Plattenwärmeübertrager

Das Feuchteverhältnis beträgt bei Normalbetrieb 60 %.

Es wird angenommen, dass eine elektrische Frostschutzheizung erforderlich ist, aber nur halb soviel Energie verbraucht wie beim Referenzfall.

Ohne Berücksichtigung der Energieeinsparung durch Feuchterückgewinnung - die später behandelt wird - ergibt sich gegenüber dem Referenzfall folgende Bilanz:

Bilanz der Variante Plattenwärmeübertrager mit Membran gegenüber (ohne Befeuchtungsenergie)	Referenzanlage	Referenzanlage mit EWT
Mehrverbrauch der Wärmepumpe	143 kWh	180 kWh
Mehr-/Minderverbrauch Frostschutzheizung	-26 kWh	26 kWh
Mehr-/Minderverbrauch Luftförderung	7 kWh	-13 kWh
<b>Saldo (positiver Wert = Mehrverbrauch)</b>	<b>124 kWh</b>	<b>193 kWh</b>

Tabelle 7: Bilanz der Variante Plattenwärmeübertrager mit Membran.

## **Vergleich Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran**

Solange die Raumluft nicht befeuchtet wird, schneidet die Variante Plattenwärmeübertrager mit Membran aus energetischer Sicht geringfügig (20 bis 30 kWh) besser ab. Die Raumluftfeuchte ist aber bei der Variante Rotor mit Ionenaustauschharz höher.

### **Bedarfsgeregelte Volumenströme nach CO<sub>2</sub>**

Die Funktionsweise der CO<sub>2</sub>-Regelung ist im *Kapitel 4.2* beschrieben.

Die CO<sub>2</sub>-Regelung könnte grundsätzlich bei allen bisher behandelten Varianten realisiert werden. Ob sie von allen Gerätelieferanten realisiert wird, ist hier nicht relevant. Hier sollen die Varianten mit möglichst vergleichbaren Annahmen untereinander verglichen werden.

Der mittlere Luftvolumenstrom sinkt durch die CO<sub>2</sub>-Regelung auf 95 m<sup>3</sup>/h. Der Nutzen der WRG steigt bei allen Varianten gegenüber dem Normalvolumenstrom um 3 %-Punkte.

Um eine Überfeuchtung zu vermeiden, entspricht der mittlere Luftvolumenstrom bei Geräten ohne Feuchterückgewinnung an 10 % der Stunden dem Normalbetrieb. Bei den Geräten mit Feuchterückgewinnung ist der Volumenstrom beim Betriebsfall *Überfeuchtungsschutz* gleich hoch wie ohne CO<sub>2</sub>-Steuerung. Während 10 % der Stunden wird also mit 130 resp. 170 m<sup>3</sup>/h gerechnet und an 90 % der Stunden mit 95 m<sup>3</sup>/h.

Bei einer CO<sub>2</sub>-Regelung steigt die relative Raumluftfeuchte bei allen Varianten. Gemäss Simulation liegt der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft nicht über 900 ppm. In dieser Arbeit wird dies als Indikator für eine gute Raumluftqualität bewertet. Der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Regelung auf die Raumluftfeuchte und Raumluftqualität wird im *Kapitel 4.2* detailliert behandelt.

Die folgende Tabelle zeigt die Wirkung der CO<sub>2</sub>-Regelung bei den einzelnen Varianten ohne Berücksichtigung der Energieeinsparung durch Feuchterückgewinnung, die später behandelt wird.

Wirkung der CO <sub>2</sub> -Regelung bei Variante	Referenz-anlage	Referenz-anlage mit EWT	Rotor mit Ionen-austausch harz	Platten-wärme-übertrager mit Membran
Saldo (negativer Wert = Minderverbrauch)	-152 kWh	-126 kWh	-176 kWh	-177 kWh

**Tabelle 8:** Zusammenstellung der Bilanzen für alle Varianten.

Bei den Varianten Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran sind die berechneten Einsparungen zwar grösser als bei den Varianten ohne Feuchterückgewinnung, aber der absolute Verbrauch ist auch mit CO<sub>2</sub>-Regelung immer noch rund 100 bis 150 kWh grösser als bei den Varianten ohne Feuchterückgewinnung.

Sowohl die CO<sub>2</sub>-Steuerung wie auch die Feuchterückgewinnung erhöhen als alleinige Massnahme die Raumluftfeuchte. Wenn die CO<sub>2</sub>-Steuerung - bei einem Gerät ohne Feuchterückgewinnung - als Alternative zu einer Feuchterückgewinnung - ohne CO<sub>2</sub>-Regelung - betrachtet wird, dann schneidet die CO<sub>2</sub>-Steuerung rund 300 kWh besser ab.

## Befeuchtung bei 4-Personen-Haushalt

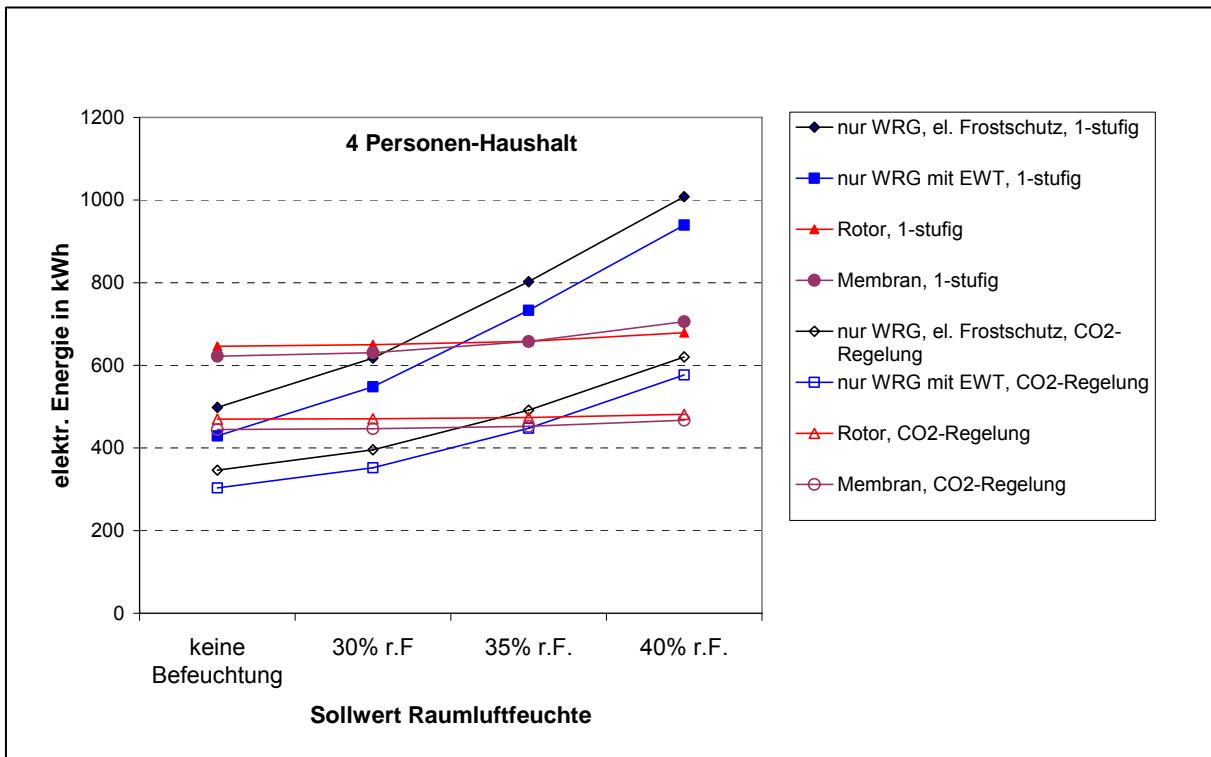
Die Raumluft wird mit einem elektrisch beheizten Dampfbefeuchter ideal auf den Sollwert (Minimalwert) befeuchtet. Für die relative Raumluftfeuchte werden 4 Fälle definiert: keine Befeuchtung, 30 %, 35 % und 40 %.

Der Energiebedarf für die Befeuchtung wird mit dem *Feuchtetool* (siehe Kapitel 4.4) berechnet.

Für die Infiltration werden folgende Parameter eingestellt:

- Wohnungs volumen: 400 m<sup>3</sup>
- $n_{50}$ -Wert: 0,6 h<sup>-1</sup>
- Einwirkungsseiten: mehrere Seiten
- Abschirmung: mässig
- Fensterlüftung: konsequent keine

Figur 20 zeigt den Bedarf an elektrischer Energie während der Heizsaison. Darin eingerechnet sind Luftförderung, Rotorantrieb, Frostschutz, Zuluftwärmung auf Raumlufttemperatur mit Wärmepumpe sowie Befeuchtung mit elektrischem Dampfbefeuchter.



Figur 20: Bedarf an elektrischer Energie während der Heizsaison in Abhängigkeit des Feuchtesollwerts, Variante 4-Personen-Haushalt.

Bei einer Befeuchtung auf 30 % und einstufigem Betrieb ist der Energiebedarf der Referenzanlage kleiner als bei Anlagen mit Feuchterückgewinnung.

Wenn bei allen Varianten eine CO<sub>2</sub>-Regelung vorausgesetzt wird, dann weist die Referenzanlage mit Erdreich-Luft-Wärmeübertrager (EWT) bis zu einem Feuchtesollwert von 35% den geringsten Energiebedarf aus.

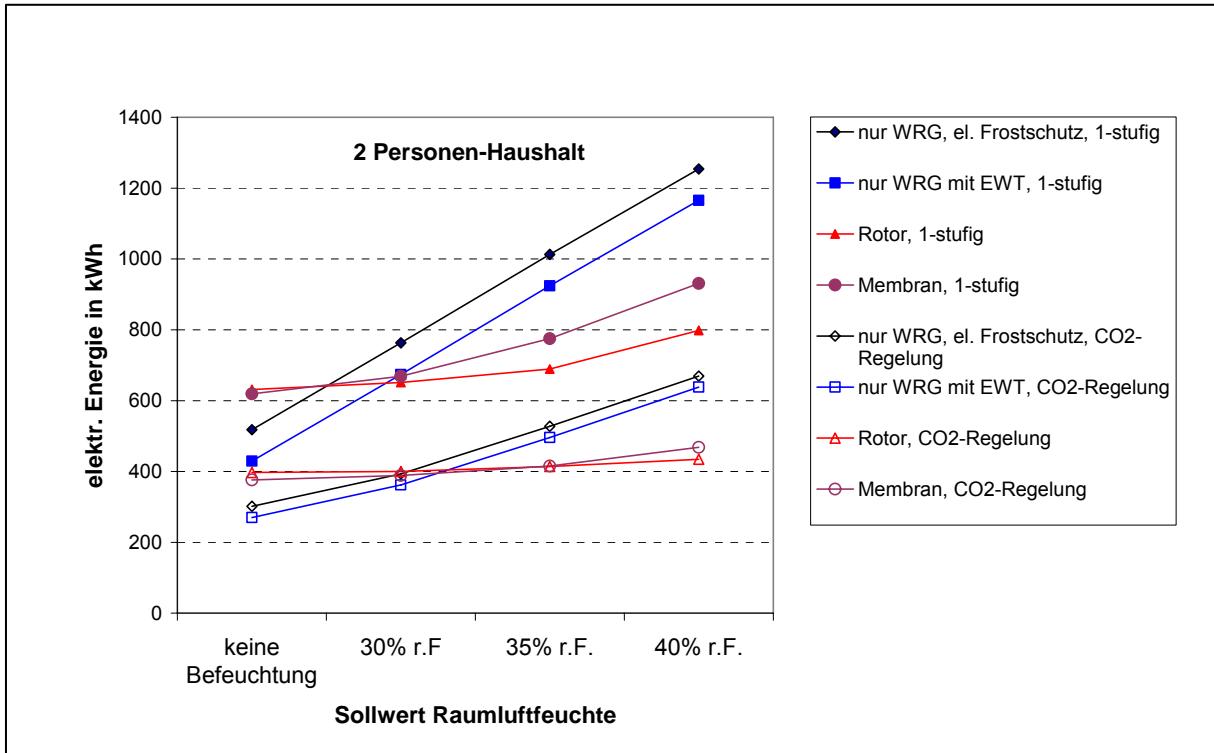
Wenn die CO<sub>2</sub>-Regelung (ohne Feuchterückgewinnung) als Alternative zu einer Feuchtrückgewinnung (ohne CO<sub>2</sub>-Regelung) betrachtet wird, dann verbraucht die Referenzanlage (mit oder ohne EWT) selbst bei einem Feuchtesollwert von 40 % ca. 60 bis 130 kWh weniger elektrische Energie.

## Befeuchtung bei 2-Personen-Haushalt

Analog zu den Simulationen wird eine Variante mit einem 2-Personen-Haushalt im Musterhaus SIA384.201 berechnet.

Die Belegungsdichte (Energiebezugsfläche pro Person) von ca. 80 m<sup>2</sup>/Person widerspiegelt die Situation in schweizerischen Neubauten besser als diejenige des 4-Personen-Haushaltes mit rund 40 m<sup>2</sup>/Person.

Die Annahmen sind im Allgemeinen gleich wie beim 4-Personenhaushalt. Lediglich der mittlere Volumenstrom bei der CO<sub>2</sub>-Regelung beträgt 80 m<sup>3</sup>/h statt 95 m<sup>3</sup>/h.



**Figur 21:** Bedarf an elektrischer Energie während der Heizsaison in Abhängigkeit des Feuchtesollwert für die Variante 2-Personen-Haushalt.

Durch die Überdimensionierung der Anlage - bezogen auf die Belegung mit zwei Personen - sinkt der Feuchtezuwachs durch die internen Feuchtlasten. Gegenüber dem 4-Personenhaushalt nimmt also der Energiebedarf für die Raumluftbefeuchtung zu.

Die einstufig betriebene Lüftung ist für diesen Fall energetisch fragwürdig. Bis zu einem Feuchtsollwert von 30 % ist die Referenzanlage mit Erdreich-Luft-Wärmeübertrager aber immer noch energetisch gleichwertig wie die Varianten mit Feuchterückgewinnung.

Wenn bei allen Varianten eine CO<sub>2</sub>-Regelung vorausgesetzt wird, dann weist die Referenzanlage (mit oder ohne Erdreich-Luft-Wärmeübertrager) bis zu einem Feuchtesollwert von 30 % den geringsten Energiebedarf aus. Bei 35 % r.F. und mehr haben Varianten mit Feuchterückgewinnung den kleineren Energiebedarf.

Wenn die CO<sub>2</sub>-Regelung (ohne Feuchterückgewinnung) als Alternative zu einer Feuchterückgewinnung (ohne CO<sub>2</sub>-Regelung) betrachtet wird, dann verbraucht die Referenzanlage (mit oder ohne EWT) selbst bei einem Feuchtesollwert von 40 % ca. von ca. 130 bis 300 kWh weniger Energie.

## Folgerungen

Unter den hier getroffenen Annahmen ist eine reine Wärmerückgewinnung kombiniert mit einer Dampfbefeuchtung in einigen Fällen energetisch besser als eine Feuchterückgewinnung. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass Wärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung rund 10 %-Punkte weniger sensible Wärme übertragen als klassische Wärmeübertrager. Diese Differenz ist heute mindestens bei energetisch guten Wärmeübertragern vorhanden.

Eine Dampfbefeuchtung ist energetisch sehr sensibel. Eine (zu) hohe Raumluftbefeuchtung kann den Energiebedarf massiv erhöhen. Eine Dampfbefeuchtung ist sinnvoll, wenn sie sehr gezielt eingesetzt und gut geregelt ist. Dabei soll der Sollwert auf 30 % r.F. begrenzt werden.

Ein Vorteil der Feuchterückgewinnung liegt darin, dass sich eine Veränderung der Raumluftfeuchte nur in einem geringen Mass auf den Energiebedarf auswirkt. Dies gilt allerdings nur so lange die Luftvolumenströme der effektiven Personenbelegung angepasst werden. Der Fall des 2-Personen-Haushaltes mit einem konstanten Luftvolumenstrom von 130 m<sup>3</sup>/h zeigt, dass bei überdimensionierten Luftraten der Energiebedarf selbst mit einer Feuchtrückgewinnung bei einem zunehmenden Feuchtesollwert deutlich ansteigt.

Bei angemessenen Luftraten unterscheiden sich die Varianten Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran nur unwesentlich.

Aus energetischer Sicht ist es immer empfehlenswert, zuerst den Luftvolumenstrom der Personenbelegung anzupassen und möglichst bedarfsgerecht zu steuern resp. zu regeln. Wenn dies realisiert wird, bringt eine zusätzliche Feuchterückgewinnung nur bei einem Feuchtesollwert von 35 % und mehr einen energetischen Nutzen.

Falls eine Feuchterückgewinnung als Alternative - und nicht als Ergänzung - zu einer Bedarfssteuerung verstanden wird, führt sie sogar zu einem höheren Energiebedarf.

Diese Abschätzungen zeigen, dass eine alleinige Beurteilung mit dem *Feuchtetool* zu wenig differenziert ist.

Energetisch interessant wäre eine Raumluftbefeuchtung mit dem Verdunstungsprinzip. Die erforderliche Wärmeenergie könnte dabei z.B. mittels Wärmepumpe bereitgestellt werden. Diese Befeuchtungsart würde dazu führen, dass die Referenzanlage mit Erdreich-Luft-Wärmeübertrager bei allen untersuchten Fällen energetisch besser abschneidet als die Feuchterückgewinnung. Die Referenzanlage ohne EWT hätte bis zu einem Feuchtesollwert von 35 % den tieferen Energiebedarf.

### ***Alle Aussagen gelten nur unter den getroffenen Annahmen.***

Die Annahmen beruhen auf typischen Kenndaten von kleinen Lüftungsgeräten und Anlagen. Daten von realen Lüftungsgeräten können zu anderen Resultaten führen.

Für eine allgemeine energetische Bewertung wären weitere Untersuchungen mit der Variation von verschiedenen Parametern erforderlich (Klimadaten, Wärmedämmstandard Gebäude, Heizsystem, Grösse der Lüftungsanlage, Temperatur-Verhältnis der WRG, Vereisungsschutz, Infiltration, Befeuchtungsart, etc.).

Die Problematik von Leistungsspitzen wurde nicht untersucht. Bei weiteren Arbeiten müsste auch dieser Aspekt mit berücksichtigt werden.

Aufgrund der Erkenntnisse besteht Entwicklungsbedarf für die Feuchterückgewinnung mit grösserer Übertragung an sensibler Wärme sowie für hygienisch gute Verdunstungsbefeuchtung für Kleinanlagen.

## 4.6 ANALYSE NEUER ANSÄTZE UND VORSCHLÄGE ZUR MÖGLICHEN UMSETZUNG

Aus heutiger Sicht drängen zwei Ansätze in den Vordergrund:

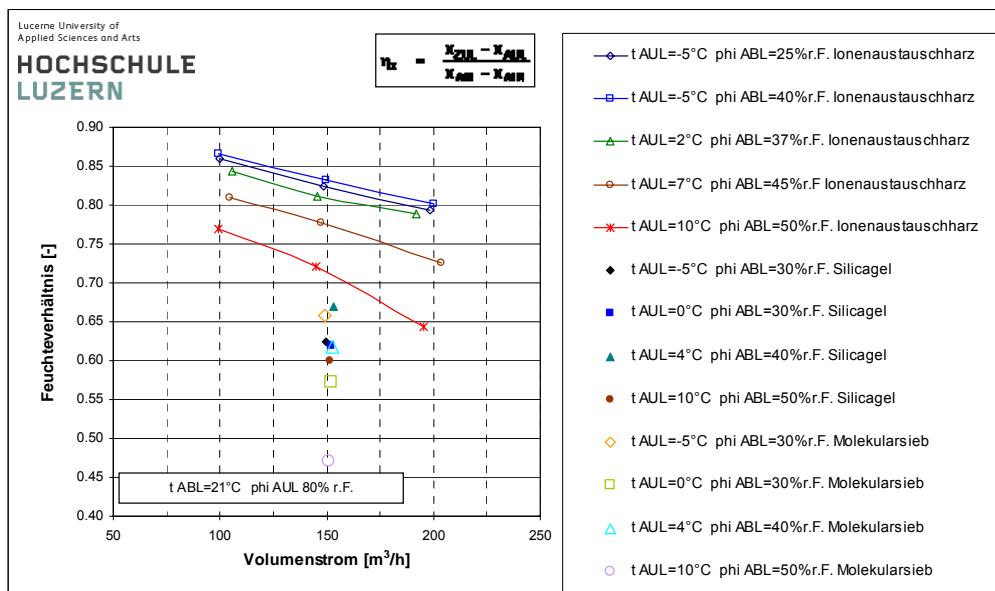
### Verbesserung der Feuchterückgewinnung in Kompaktlüftungsgeräten

### Verbesserung der Strategie der bedarfsgeregelten Volumenströme nach CO<sub>2</sub>

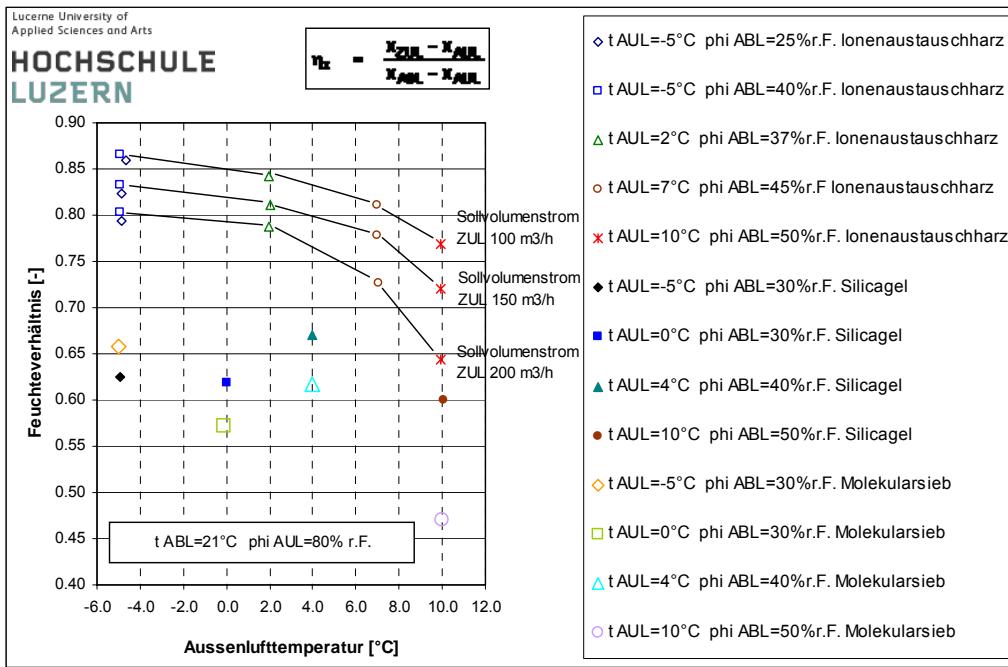
Die beiden Ansätze werden nachfolgend beschrieben.

#### Verbesserung der Feuchterückgewinnung in Kompaktlüftungsgeräten

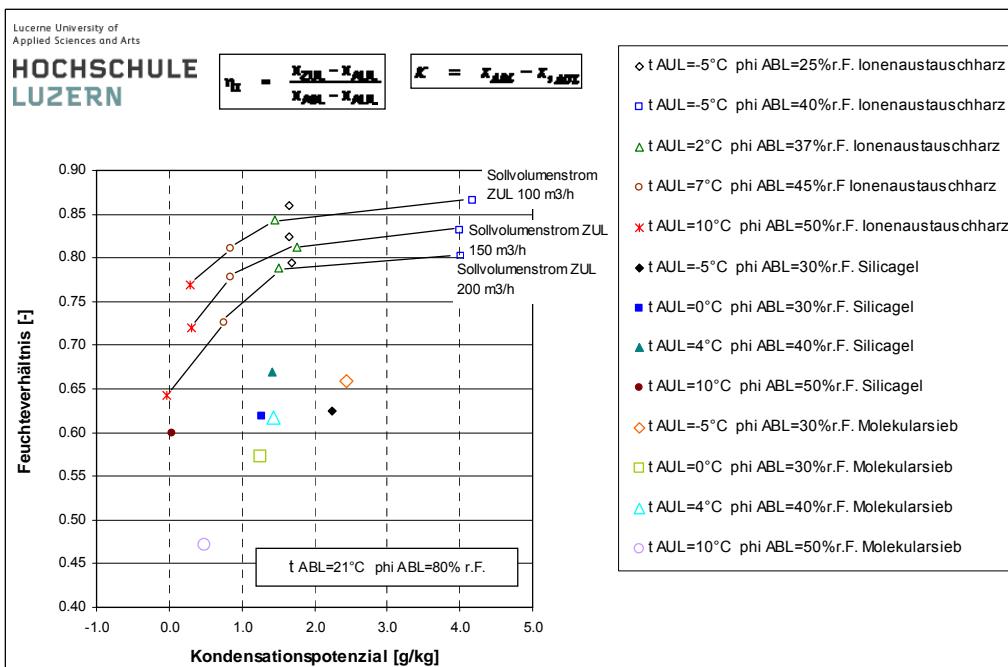
Die Verbesserung der Feuchterückgewinnung in Kompaktlüftungsgeräten kann durch die Wahl eines anderen Feuchteübertragungsmaterials angestrebt werden. Zu diesem Zweck wurde das bisher eingesetzte Ionenaustauschharz mit Silicagel und dem Molekularsieb verglichen. Die Figuren 22 bis 24 zeigen einerseits, dass der Rotor mit Ionenaustauschharz bereits sehr hohe Feuchteübertragungswerte aufweist, und andererseits, dass die beiden Materialvarianten Silicagel und Molekularsieb keine Verbesserung bringen. Die beiden Materialvarianten zeigen zudem, dass bei Rotoren vorderhand kein Weg um das Ionenaustauschharz herumführt.



**Figur 22:** Feuchteverhältnisse in Abhängigkeit des Volumenstroms für verschiedene Rotormaterialien.



Figur 23: Feuchteverhältnis in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur für verschiedene Rotormaterialien.



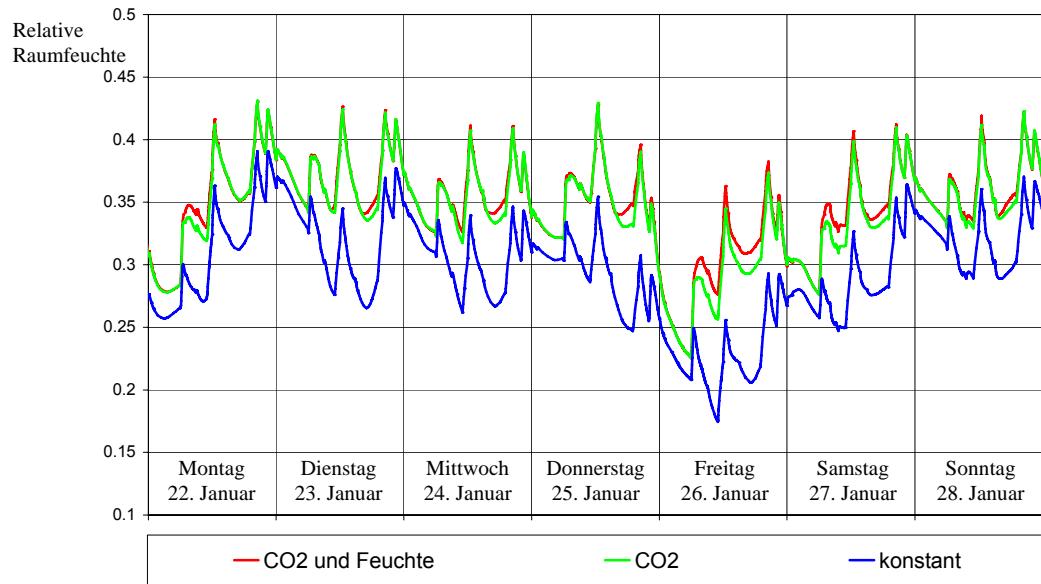
Figur 24: Feuchteverhältnis in Abhängigkeit des Kondensationspotenzials für verschiedene Rotormaterialien.

Die Systeme *Rotor mit Ionenaustauschharz* und *Plattenwärmeübertrager mit Membran* beherrschen den Markt. Derzeit sind keine Alternativen zu den beiden vorerwähnten Systemen in Sicht – es herrscht auch kein Bedarf für ein neues, aber völlig andersartiges System, da die bestehenden Systeme die Marktbedürfnisse ausreichend abdecken.

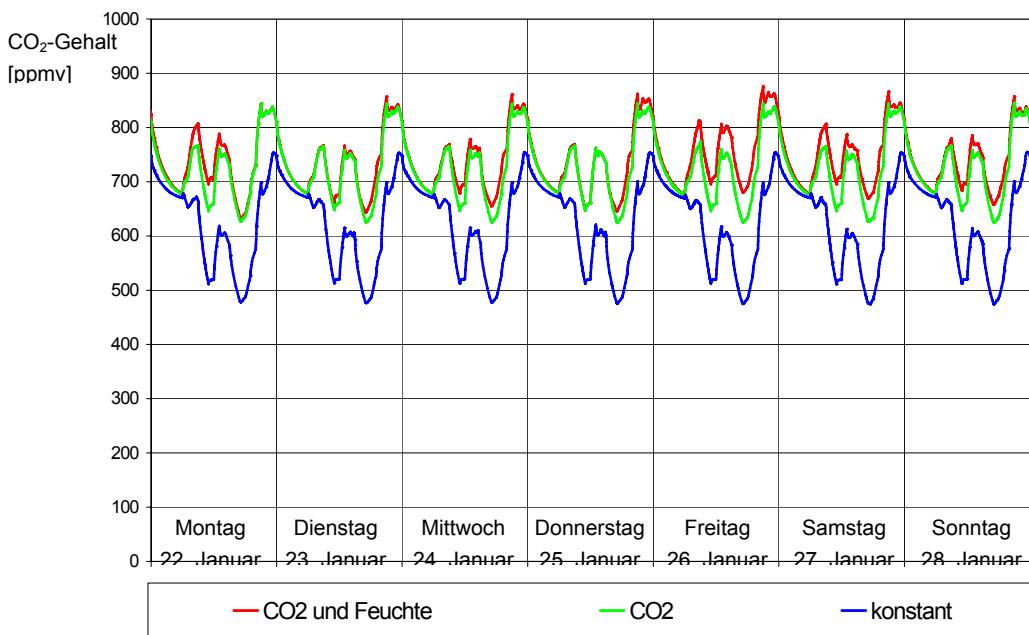
Sowohl der Plattenwärmeübertrager mit Membran als auch der Rotor mit Ionenaustauschharz erfüllen die Anforderungen der Hygiene Richtlinie VDI 6022. Beurteilt werden hier nur Einzelwohnungsanlagen. Bei Mehrwohnungsanlagen ohne Feuchterückgewinnung gibt es Vorbehalte wegen unterschiedlicher Feuchtelasten. Es besteht ein Mangel an Differenzierbarkeit. Aus heutiger Sicht wird für Mehrwohnungsanlagen die wohnungsweise Volumenstromregelung nach CO<sub>2</sub> vorgeschlagen. Sie kombiniert die Vorteile der Einzelwohnungsanlage mit jenen der Mehrwohnungsanlage [11].

## Verbesserung der Strategie der bedarfsgeregelten Volumenströme nach CO<sub>2</sub>

Bedarfsgeregelte Volumenströme nach CO<sub>2</sub> und Feuchte wurden auf Anregung des Industriepartners in ergänzenden Simulationen mit *IDA Indoor Climate and Energy* [12] untersucht. Ziel dieser Regelungsstrategie ist es, bei sehr tiefen relativen Feuchten die Volumenströme noch weiter zu drosseln – unter Inkaufnahme von erhöhten CO<sub>2</sub>-Raumluftwerten. Es wurde eine Woche im Januar für die Station Zürich SMA betrachtet. *Figur 25* aus Teilbericht [6] zeigt die zeitliche Abhängigkeit der Raumluftheuchte von der gewählten Regelungsstrategie.



**Figur 25:** Zeitliche Abhängigkeit der Raumluftheuchte von der Regelungsstrategie.



**Figur 26:** Zeitliche Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration von der Regelungsstrategie.

Aus *Figur 26* geht hervor, dass die CO<sub>2</sub>-Werte im betrachteten Zeitraum jederzeit unkritisch bleiben. Infolge der CO<sub>2</sub>-Feuchte-Regelung steigt der CO<sub>2</sub>-Gehalt etwa um 50 ppm an, was als unkritisch eingestuft wird.

		<b>Variante 1</b> <b>V = variabel CO<sub>2</sub>- Regelung</b>	<b>Variante 2</b> <b>V = variabel CO<sub>2</sub> - Feuchte- Regelung</b>	<b>Variante 3</b> <b>V=konstant ohne Regelung</b>
		PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub>	PZ 4, FK mittel, RS CO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	PZ 4, FK mittel, RS konstant
Wohnen	# Pers.Std. < 30 % Abweichung von V1	5 -	1 -80 %	113 +2'260 %
	# Stunden < 30 % Abweichung von V1	43 -	36 -16 %	267 +621 %
Schlafen	# Pers.Std. < 30 % Abweichung von V1	40 -	40 ±0 %	90 +225 %
	# Stunden < 30 % Abweichung von V1	28 -	23 -18 %	242 +864 %

**Tabelle 9:** Anzahl Personenstunden und Anzahl Stunden während des Monats Januar mit relativer Luftfeuchte unter 30 %.

Aus Tabelle 9 geht hervor, dass die Regelstrategie nach CO<sub>2</sub>-Feuchte 16 bis 18 % weniger Stunden unter 30 % r.F. gegenüber der Regelstrategie nach CO<sub>2</sub> ergibt. Es sind aber weitere Simulationen notwendig um die Jahresverläufe zu berechnen und daraus kumulierte Häufigkeiten zu bestimmen. Zudem muss abgeklärt werden, ob die Regelstrategie der bedarfsgeregelten variablen Volumenströme nach CO<sub>2</sub>-Feuchte nicht auch dazu eingesetzt werden kann, um die in Kapitel 4.3 behandelte Überfeuchtungsproblematik zu behandeln. Analog zur Drosselung des Volumenstroms zur Vermeidung der Austrocknung kann der Volumenstrom zur Vermeidung der Überfeuchtung temporär erhöht werden. Die Simulation mit IDA Indoor Climate and Energy [12] kann hier helfen, kritische Zeiten und Zustände mit Überfeuchtung zu eruieren und die optimale Regelstrategie zu finden und deren Auswirkung auf die Raumluftfeuchte zeitabhängig darzustellen.

## 5. Diskussion

Zeitgemäss Kompaktlüftungsgeräte mit Feuchterückgewinnung weisen ein hohes Feuchteverhältnis aus, entsprechen den hygienischen Anforderungen nach VDI 6022, unterbieten den Grenzwert für die spezifische Ventilatorleistung deutlich und kommen dem Zielwert nahe. Die untersuchten Kompaktlüftungsgeräte der Funktionsprinzipien Wärmeübertrager mit Membran und Rotor mit Ionenaustauschharz erfüllen die meisten der oben genannten Anforderungen. Damit auch noch der Zielwert für die spezifische Ventilatorleistung erreicht wird, bedarf es noch konstruktiver Anstrengungen. Diese werden in einem separaten BFE Projekt gefördert und untersucht. Die beiden Funktionsprinzipien haben sich derart gut im Markt etabliert, dass sich aus heutiger Sicht keine zusätzlichen Anstrengungen für Neuentwicklungen abzeichnen. Ergänzende Untersuchungen zur den Feuchteübertragungseigenschaften von Materialen wie Silicagel und Molekularsieb haben in der Anwendung der rotierenden Matrix tiefere Feuchteverhältnisse zur Folge gehabt. Das Ionenaustauschharz scheint momentan nicht zu übertreffen sein. Eine energetisch interessante Alternative zum Rotor stellt der Wärmeübertrager mit dampfdurchlässiger Membran dar. Allerdings wäre eine noch höhere sensible Wärmeübertragung wünschenswert.

Bedarfsgeregelte Volumenströme nach CO<sub>2</sub> oder CO<sub>2</sub>/Feuchte bilden eine sehr gute Ergänzung zur Feuchterückgewinnung und Dampfbefeuchtung. Dieses Prinzip setzt bei den zu hohen personenspezifischen Volumenströmen an. Diese entstehen durch Unterbelegung, welche in ihrer Wirkung noch durch zu hoch veranschlagte interne Lasten verstärkt wird. Durch dynamische Simulation konnte gezeigt werden, dass die Führungsgrössen CO<sub>2</sub> und Feuchte die Stunden unter 30 % Raumluftfeuchte im Vergleich zur Führungsgröße CO<sub>2</sub> nochmals reduzieren können.

Mittels Handrechnungen wurden die Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Klein-Lüftungsanlagen untersucht. Unter den dabei getroffenen Annahmen ist eine reine Wärmerückgewinnung kombiniert mit einer Dampfbefeuchtung in einigen Fällen energetisch besser als eine Feuchterückgewinnung. Ein wesentlicher Grund liegt darin, dass Wärmeübertrager mit Feuchterückgewinnung rund 10 %-Punkte weniger sensible Wärme übertragen als klassische Wärmeübertrager. Diese Differenz ist heute mindestens bei energetisch guten Wärmeübertragern vorhanden. Eine Dampfbefeuchtung ist energetisch sehr sensibel. Eine (zu) hohe Raumluftbefeuchtung kann den Energiebedarf massiv erhöhen. Eine Dampfbefeuchtung ist sinnvoll, wenn sie sehr gezielt eingesetzt und gut geregelt ist. Dabei soll der Sollwert auf 30 % r.F. begrenzt werden. Ein Vorteil der Feuchterückgewinnung liegt darin, dass sich eine Veränderung der Raumluftfeuchte nur in einem geringen Mass auf den Energiebedarf auswirkt. Dies gilt allerdings nur so lange die Luftvolumenströme der effektiven Personenbelegung angepasst werden. Der Fall des 2-Personen-Haushaltes mit einem konstanten Luftvolumenstrom von 130 m<sup>3</sup>/h zeigt, dass bei überdimensionierten Luftraten der Energiebedarf selbst mit einer Feuchtrückgewinnung bei einem zunehmenden Feuchtesollwert deutlich ansteigt. Bei angemessenen Luftraten unterscheiden sich die Varianten Rotor mit Ionenaustauschharz und Plattenwärmeübertrager mit Membran nur unwesentlich. Aus energetischer Sicht ist es immer empfehlenswert, zuerst den Luftvolumenstrom der Personenbelegung anzupassen und möglichst bedarfsgerecht zu steuern resp. zu regeln. Wenn dies realisiert wird, bringt eine zusätzliche Feuchterückgewinnung nur bei einem Feuchtesollwert von 35 % und mehr einen energetischen Nutzen. Falls eine Feuchterückgewinnung als Alternative - und nicht als Ergänzung - zu einer Bedarfssteuerung verstanden wird, führt sie sogar zu einem höheren Energiebedarf.

Die Dampfbefeuchtung in Niedrigenergiebauten wird dann als zweckmässige Variante betrachtet, wenn im Zusammenspiel mit bedarfsgeregelten Volumenströmen nach CO<sub>2</sub> den speziellen Anforderungen von Astmatikern oder Allergikern Rechnung getragen werden soll. Die Beschränkung des Einsatzes in bedarfsgeregelten Volumenstrom-Anlagen wird massgeblich durch die Regelcharakteristik des Dampfbefeuchters bestimmt. Noch grösseres Gewicht hat aber der Umstand, dass in Konstant-Volumenstrom-Anlagen zu grossen Luftmengen befeuchtet werden müssen, welche durch die effektive Belegung gar nicht nachgefragt werden. Es wird unnötigerweise hochwertige Primärenergie umgesetzt, was aus Sicht der 2000-Watt-Gesellschaft und der Exergie womöglich zu vermeiden ist.

Die Unterbelegung und fehlende zusätzliche interne Lasten haben zur Folge, dass die kumulierten Häufigkeiten der Raumluftfeuchte für die Systeme bei ansonsten gleichen Randbedingungen sehr unterschiedlich ausfallen. Für die Effizienz der Feuchteübertragung ist der Abluftzustand eine wichtige Grösse. Der Wärmeübertrager mit Membran reagiert empfindlicher auf eine Veränderung des Abluftzustandes als der Rotor mit Ionenaustauschharz.

Im Zusammenhang mit Komfortlüftungsanlagen ist der Fokus stark auf die tiefen Raumluftfeuchten ausgerichtet. Die Feuchterückgewinnung kann aber auch zu unerwünschter Überfeuchtung führen. Es

wurden Grenzlinien der minimal und maximal erwünschten Feuchteübertragung sowie der unerwünschten Feuchteübertragung definiert. Anhand der aus den Simulationen gewonnenen Abluft- und Aussenluftzustände konnten übertragene Absolutfeuchtwerte für die Systeme Rotor mit Ionenaustauschharz, Plattenwärmeübertrager mit Membran und bedarfsgeregelte Volumenströme nach CO<sub>2</sub> berechnet werden. Die Grenzlinien und die übertragenen absoluten Feuchten wurden in Abhängigkeit der Aussenluft aufgetragen. Die Hersteller der beiden untersuchten Funktionsprinzipien haben die Problematik der Überfeuchtung erkannt und regeln diese über die Rotordrehzahl oder die Erhöhung des Volumenstroms beim Plattenwärmeübertrager mit Membran.

Ein weiterentwickeltes Berechnungsprogramm namens Feuchtetool kann Planern und Interessierten dabei helfen, zukünftig zu erwartende Raumluftfeuchten in Form von kumulierten Häufigkeiten darzustellen und Auswirkungen der Wahl von Feuchterückgewinnungssystemen grob abzuschätzen. Das bereits früher anhand von Messdaten validierte Berechnungsprogramm wurde mittels dynamischer Gebäudesimulation nochmals validiert. Dabei hat sich gezeigt, dass die Abweichungen zwischen statischer Berechnung ohne Feuchtespeicherung und dynamischer Simulation für einfache Fälle klein sind und für komplexere Anwendungen erwartungsgemäß bei abnehmender Differenzierungsmöglichkeit zunehmen. Die statische Berechnungsmethode berücksichtigt aber aktuelle Erkenntnisse über interne Feuchtelasten, die in den Normen immer noch zu hoch veranschlagt sind, rechnet jedoch ohne Feuchtespeicherung.

Die dynamische Gebäudesimulation mit *IDA Indoor Climate and Energy* ist ein enorm hilfreiches Werkzeug, um das Verhalten der Feuchterückgewinnungssysteme und der bedarfsgeregelten Volumenströme zu untersuchen. Die Möglichkeit der saisonalen Feuchtespeicherung durch Auswahl geeigneter Wandaufbauten sollte aber weiter untersucht werden. Diese Untersuchungen müssten von einer Feldstudie begleitet werden, die zeigen, ob der Feuchtigkeitsaustausch zwischen Raumluft und Wand wie erwartet funktioniert und ob die prognostizierten Werte überhaupt und unter welchen Bedingungen realisiert werden können.

## 6. Schlussfolgerungen

Die beiden Funktionsprinzipien Rotor und Plattenwärmeübertrager mit Membran haben sich derart gut im Markt etabliert, dass sich aus heutiger Sicht keine zusätzlichen Anstrengungen für Neuentwicklungen abzeichnen. Wünschenswert wäre eine Verbesserung des sensiblen Temperaturverhältnisses des Plattenwärmeübertragers.

Die Bedarfsregelung der Volumenströme nach CO<sub>2</sub> ist eine gut ausgereifte Lösung. Die Kombination mit der Regelgröße Feuchte verbessert gemäss Simulation die Ergebnisse nochmals und hilft im Sommer eine allfällige Überfeuchtung zu vermeiden. Wichtig ist die Platzierung des CO<sub>2</sub>-Sensors: Neue Erkenntnisse aus einem BFE Projekt zur Platzierung sollen berücksichtigt werden [16]. Im Übrigen wird die Bedarfsregelung der Volumenströme nach Feuchte bereits seit geraumer Zeit zusammen mit der Feuchterückgewinnung angeboten.

Aufgrund der Erkenntnisse aus den Handrechnungen über den Energiebedarf von Kleinlüftungsanlagen sollten die Berechnungen erweitert und vertieft werden, um weitergehende Aussagen über diese wichtige und noch zu optimierende Kenngröße machen zu können. Aus energetischer Sicht ist es immer empfehlenswert, zuerst den Luftvolumenstrom der Personenbelegung anzupassen und möglichst bedarfsgerecht zu steuern resp. zu regeln.

Durch Simulation und eine Feldstudie sollte untersucht werden, ob und wie die Gebäudemasse zur saisonalen Feuchtespeicherung beitragen kann.

## Referenzen

- [1] L. Wenger, R. Furter: **Wärmerückgewinner Klimabox von Frivent**, Teilbericht 1, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 21 Seiten, Horw 2007.
- [2] L. Wenger, R. Furter: **Lüftungsgerät HomeVent von Hoval**, Teilbericht 2, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 22 Seiten, Horw 2007.
- [3] L. Wenger, R. Furter: **Lüftungsgerät WHR 930 von StorkAir**, Teilbericht 3, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 23 Seiten, Horw 2007.
- [4] D. Sigg, R. Furter: **Dampfluftbefeuchter MinAir**, Teilbericht 4, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 30 Seiten, Horw 2007.
- [5] D. Sigg, R. Furter: **Dampfluftbefeuchter Condair CH1.2**, Teilbericht 5, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 22 Seiten, Horw 2007.
- [6] S. Moosberger: **Thermisch-hygrische Raumsimulation zur Ermittlung des Einflusses der Lüftungsstrategie auf die Raumluftfeuchte**, Teilbericht 6, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten 58 Seiten, Horw 2007.
- [7] S. Moosberger: **Ergänzende Simulationsvarianten zur Ermittlung des Einflusses der Feuchterückgewinnung auf die Raumluftfeuchte**, Teilbericht 6, BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten, 20 Seiten, Horw 2007.
- [8] B. Frei: **Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten**, Schlussbericht, BFE Projekt Feldvergleich von Wärme- und Enthalpieübertragern in Kompaktlüftungsgeräten, 45 Seiten, Horw 2007.
- [9] B. Frei, F. Reichmuth, H. Huber: **Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser**, Schlussbericht, BFE Projekt Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser, 98 Seiten, Horw 2004.
- [10] B. Richiger: **Hausstaubmilbenallergie**, Broschüre, aha! Schweizerisches Zentrum für Allergie, Haut und Asthma, Bern, 2002.
- [11] **Lüftung in Wohnbauten**, Merkblatt 2023, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich 2004
- [12] **IDA Indoor Climate and Energy (ICE)**, Gebäudesimulationsprogramm Version 3.0, Equa Simulation AB, Sunbyberg Schweden, 2007.
- [13] Th. Emmenegger, A. Tschui: **Raumluftfeuchte in Wohnungen**, Diplomarbeit, Hochschule für Technik und Architektur (HTA) Luzern, 118 Seiten, Horw 2004.
- [14] S. Lenel et al.: **Praxistest Minergie® – Erfahrungen aus Planung, Realisierung und Nutzung von Minergie® Bauten**, Verein Minergie®, Schlussbericht Juni 2004
- [15] R. Furter et al.: **Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Klein-Lüftungsanlagen**, Jahresbericht, BFE Projekt Reduktion des Elektrizitätsverbrauchs von Klein-Lüftungsanlagen, Horw 2007.
- [16] W. Hässig et al.: **CO<sub>2</sub>-gesteuerte Lüftung von Wohn- und Schulhausbauten**, 14. Schweizerisches Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, Tagungsband, ETH Zürich September 2006.