



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

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

FELDVERGLEICH VON WÄRME- UND ENTHALPIEÜBERTRAGERN IN KOMPAKT- LÜFTUNGSGERÄTEN

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: 30. September 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

Bereichsleiter BFE: Andreas Eckmanns, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

Programmleiter BFE: Charles Filleux, filleux.REN@bhz.ch

Projektnummer: 101657

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
Abstract	1
1. Ausgangslage.....	2
2. Ziel der Arbeit	5
3. Lösungsweg	5
4. Ergebnisse.....	12
5. Diskussion	43
6. Schlussfolgerungen.....	43
Referenzen.....	43

Zusammenfassung

In vom BFE geförderten Erfolgskontrollen an Niedrigenergiegebäuden wurden tiefe Raumluftheuchten während einigen tausend Jahresstunden gemessen. Moderne Kompaktlüftungsgeräte werden zunehmend mit Wärme- und Feuchteübertragung auf dem Markt angeboten. Eine Möglichkeit, das Feuchteniveau anzuheben, stellen Enthalpietauscher mit dampfdurchlässiger Membran dar. Mit dem Einsatz eines Enthalpietauschers kann nicht nur Wärme, sondern auch ein grosser Teil der Luftfeuchtigkeit aus der Abluft zurückgewonnen werden. In einem Feldvergleich wurden der wechselseitige Einsatz von Enthalpie- und Wärmetauschern an vier Standorten untersucht. Rechnerisch wurde abgeschätzt, wie sich ein Rotor mit Ionenaustauschharz verhalten hätte. Der Feldvergleich hat ergeben, dass Enthalpietauscher in der Lage sind, das Feuchteniveau anzuheben. Voraussetzung hierzu sind interne Feuchtelasten, abgeglichen und der Belegung angepasste Luftvolumenströme sowie nicht zu hohe Geräteleckagen. Eine Überfeuchtung, die systembedingt auf den Einsatz des Enthalpietauschers zurückzuführen wäre, konnte nicht festgestellt werden. Die Messkampagne war geprägt von aufeinander folgenden Wintermonaten mit teilweise deutlichen Wärmeüberschüssen. Ansonsten wären die Unterschiede zwischen Enthalpie- und Wärmetauschern deutlicher ausgefallen.

Abstract

In an efficiency review on low energy buildings promoted by the Swiss Federal Office of Energy, low air humidity has been measured during thousands of annual hours. Modern compact ventilation units are being increasingly offered with transmission of heat and moisture. One possibility to raise the air humidity level is an enthalpy exchanger with steam-permeable membranes. With an enthalpy exchanger you can not only recover heat but also a good part of the humidity of the return air. In a comparative field study alternate applications with enthalpy or heat exchangers have been analysed at four different locations. Also calculations have been made to estimate how a rotating heat exchanger with ion-exchange resin would have performed. The comparative field study has shown that the enthalpy exchanger is able to raise the humidity level. Conditions for this are internal humidity loads, balanced air volume rates which correspond to occupancy as well as low leakages of the ventilation unit. Over-moistening due to the system with enthalpy exchanger was not found. The measurements have been affected by a sequence of winter months which have been partially warmer than usual. Otherwise the difference between enthalpy and heat exchanger would have been more distinct.

1. Ausgangslage

Ein dichtes, mit einer geschickten Komfortlüftung ausgerüstetes Haus weist aufgrund des kontrollierten, geringen Luftaustausches im dafür kritischen Winter eine höhere Luftfeuchtigkeit auf als ein in den 60-er Jahren gebautes, undichtes Haus.

In vom BFE geförderten Erfolgskontrollen an Niedrigenergiegebäuden wurden zudem während einigen tausend Jahresstunden tiefe Raumluftheuchten gemessen [4]. Moderne Kompaktlüftungsgeräte werden nun zunehmend mit Wärme- und Feuchteübertragung auf dem Markt angeboten.

Die effiziente Nutzung der Luft durch die Anordnung des Wohn-/Esszimmers im Überströmbereich zwischen Schlafräumen und Küche und Bad erlaubt eine Minimierung der notwendigen Luftmenge bei guter Luftqualität. Dadurch sinkt die Abfuhr von Feuchtigkeit aus der Wohnung. Diese Luftführung ist in einer Wohnung meist problemlos, da kaum je alle Räume gleichzeitig belegt sind. Geschieht dies anlässlich einer Party trotzdem, kann im seltenen Fall mit Fensterlüftung nachgeholfen werden.

Allerdings sind die ausgetauschten Luftmengen in Praxis häufig höher sind, weil

- die Hülle weniger dicht ist,
- das Wohn-/Esszimmer nicht im Überströmbereich liegt,
- wegen der Nutzung oder der Verwendung der Zuluft als Wärmeträger für die Raumheizung ein höherer Luftwechsel gewünscht wird,
- in der Wohnung aufgrund von deren Grösse oder der seltenen Anwesenheit der Bewohner weniger Wasser verdampft wird.
- am Standort wegen speziell tiefen Aussenlufttemperaturen die Menge der mit der Aussenluft zugeführten Feuchtigkeit speziell gering ist
- Oberflächen im Innenraum, die keine Feuchtigkeit aus der Raumlufte speichern können, einen Ausgleich zwischen wärmeren und kälteren Wetterperioden und zwischen Zeiten hoher und tiefer Wasserdampfproduktion verhindern.

In diesen Fällen ist ein mit einem Plattentauscher ausgerüstetes Enthalprierückgewinnungsgerät (ERG), das nicht nur Wärme, sondern auch Wasserdampf überträgt, eine gute und hygienisch einwandfreie Lösung zur Verbesserung des Komforts gegenüber dem Wärmerückgewinnungsgerät (WRG).

Konventionelle Methoden zur Erhöhung der Feuchtigkeit in belüfteten Wohnungen:

- Eine aktive Befeuchtung der Zuluft mit zentralen Befeuchtungsgeräten ist hygienisch problematisch. Wird die regelmässige Wartung vernachlässigt, kann das System zum Bakterienherd werden. Die Methode ist für die Wohnungslüftung deshalb unüblich.
- Durch geeignetes Benutzerverhalten kann die Feuchtigkeit erhöht werden, indem die Badezimmer-türen nach dem Duschen offen gelassen werden. Der Dampf gelangt so in die anderen Räume. Wird die Küchenhaube nur selten eingesetzt, wird ebenfalls weniger Dampf aus der Wohnung entfernt.
- Die dezentrale Befeuchtung funktioniert am einfachsten mit Pflanzen, die viel Feuchtigkeit an die Luft abgeben. Reicht dies nicht aus, helfen mobile, einfach reinigbare Luftbefeuchter nach dem Verdunstungsprinzip, die weit weniger Strom verbrauchen als Verdampfergeräte.

Muss eine Wohnung über längere Zeit regelmässig manuell befeuchtet werden, werden der Arbeitsaufwand und der Energieverbrauch spürbar. In diesen Fällen ist der Enthalpietauscher eine mögliche Variante.

Mit dem Einsatz eines Enthalpietauschers kann nicht nur Wärme, aber auch etwa 65% der Luftfeuchtigkeit aus der Abluft zurückgewonnen werden. Dabei wird die in der Abluft enthaltene Energie aus der Kondensation für die Befeuchtung zurück gewonnen. Die Konstruktion als Plattentaucher mit getrenntem Zu- und Abluftstrom gewährleistet einen auch langfristig hygienisch einwandfreien Betrieb.

Die Physik der Dampfübertragung:

Dampf aus der feuchten Abluft wird an der kühleren Oberfläche der Membran adsorbiert. Diese Art von Kondensation findet über der Taupunkttemperatur statt, wie dies von Trockenmitteln, beispielsweise Silikagel, bekannt ist. Die Membran enthält einen hohen Anteil Salz und saugt den Wasserdampf wie ein Schwamm auf. Ähnlich dem Wassertransport in Pflanzen wandern die Wassermoleküle durch Osmose in flüssiger Form durch die Membran, angetrieben durch das Konzentrationsgefälle der Feuchtigkeit von der Abluft- zur Zuluftseite. Auf der Aussenluftseite verdampft das Wasser an der Membranoberfläche und wird vom trockeneren Zuluftstrom aufgenommen. Der grösste Teil des Salzes ist chemisch an das Membranmaterial gebunden und wird sich im Wasser nicht lösen und nicht wegspülen lassen.

Die Ablagerung von Fett auf der Wärmetauschoberfläche verringert die Durchlässigkeit für Wasserdampf. Es wird deshalb empfohlen, die Abluftfassung in der Küche mindestens 3 m neben dem Kochherd anzuordnen. Die Reinigung erfolgt trocken mit dem Staubsauger. Alterungstests lassen eine Lebensdauer des Tauschers von etwa 15 Jahren erwarten. Die Luftverteilungen nach dem Lüftungsgerät dürfen nicht durch einen ungedämmten Raum geführt werden. Die gegenüber Aussenbedingungen feuchtere Zuluft verliert sonst nicht nur die im Wärmetauscher zurückgewonnene Energie, sondern könnte zudem in den Leitungen kondensieren und so hygienische Probleme verursachen.

Das Temperaturverhältnis der Wärmerückgewinnung ist gegenüber dem normalen Wärmetauscher etwas reduziert. Trotzdem ist die mit dem Enthalpietauscher ausgetauschte Energiemenge, inklusive der im Wasserdampf enthaltenen Verdampfungswärme, deutlich höher.

	Wärmetauscher		Enthalpietauscher	
Temperaturverhältnis bei 150 m ³ /h	Sensibel	95%	Sensibel	86%
Feuchteverhältnis bei 150 m ³ /h	Latent	0%	Latent	63%

* Bei Abluft 22°C/40% rel. Feuchte, Aussenluft 0°C/75% rel. Feuchte

Tabelle 1: Wirkungsgrad des Comfoair G90 mit Wärme- und Enthalpietauscher [2]

Die Membrane transportiert Wassermoleküle wegen deren hoher dielektrischer Konstante und kleinen Abmessungen. Im Betrieb verhält sie sich wie eine gesättigte Salzlösung, was die Absorption von nicht polaren Molekülen, wie Methan oder Hydrogensulfiden, minimiert. Sogar Methanol, ein ebenfalls starker Dipol, wird von der Membran nicht absorbiert. Kleine polare Verschmutzungen in real vorkommenden geringen Konzentrationen werden in der Membran zurückgehalten. Die Membran hat keine Poren, weshalb Gase kaum durch das Material diffundieren können. Mikroorganismen können wegen ihren im Vergleich zu Wasser grossen Abmessungen nicht in die Membran eindringen.

Zusätzlich wirkt die hohe Salzionenkonzentration in der Membran antimikrobiell. Bakterien, Hefe, Schimmel und alle Mikroorganismen, die bisher getestet wurden, wachsen nicht auf dem Membranmaterial. Mikroorganismen sterben auf der Oberfläche innerhalb weniger Tage ab, trotz optimalen Wachstumsbedingungen von 80 % Feuchte und einer Lufttemperatur von 25 °C für die Pilztests respektive 35 °C für die Bakterientests, sowohl auf neuer wie auch auf künstlich gealterter Membranoberfläche.

Das Verfahren wurde vor 8 Jahren erstmals getestet und seit 5 Jahren zahlreich in der Wohnungslüftung eingesetzt, ohne negative Hygiene Erfahrungen auch in feucht-heissem Klima.

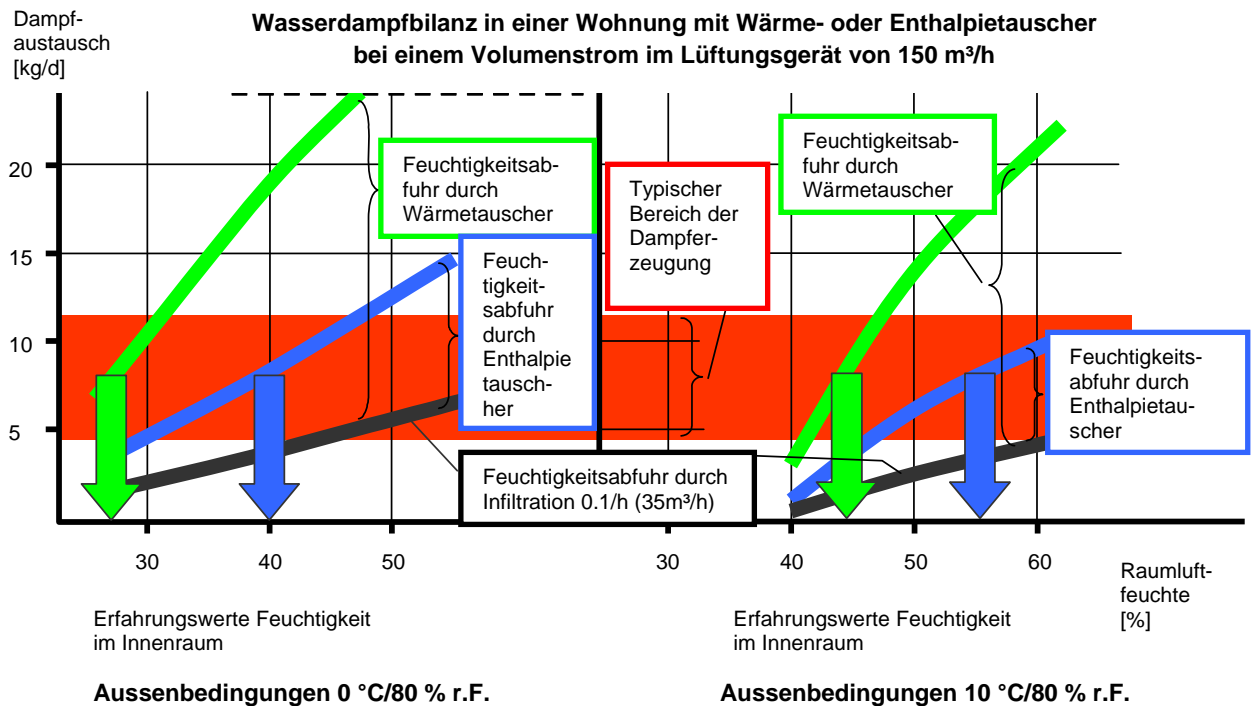


Abbildung 1: Freigesetzte Wasserdampfmenge bei unterschiedlichen Aussenbedingungen nach [2].

Abbildung 1 aus [2] zeigt die in einer durchschnittlichen Wohnung freigesetzte Wasserdampfmenge im Vergleich zur Menge, die von der Komfortlüftung mit Wärme- oder Enthalpietauscher abgeführt wird. Bei einer typischen Aussenlufttemperatur von 0 °C im Winter wird mit dem normalen Wärmetauscher auch bei einer relativen Feuchtigkeit von nur 30 % mehr Wasserdampf abgeführt und entsprechend die relative Feuchte im Raum unter diesen Wert sinken.

Demgegenüber wird mit dem Enthalpietauscher ein Gleichgewicht bei einem komfortablen Wert von etwa 40 % r.F. erreicht. In Abbildung 1 wird sichtbar, dass im sehr dichten Gebäude bei Aussenlufttemperaturen um 10 °C auch bei 60 % r.F. im Innenraum nicht genug Dampf aus der Wohnung mit normaler Dampfproduktion entfernt wird. In einer solchen Wohnung kann es also zu feucht werden. Weil es damit zu Schimmelpilzbildung an immer noch kühleren Aussenwänden kommen kann, wird mit einem Comfoair-G90-300 der weitere Anstieg der Feuchtigkeit durch eine automatische Regelung der Luftmenge vermieden.

2. Ziel der Arbeit

In einem Feldvergleich soll untersucht werden, ob Enthalpietauscher gegenüber Wärmetauschern in der Lage sind, das Feuchtigkeitsniveau signifikant zu erhöhen. In der Übergangszeit ist aufgrund der Konstruktion und Regelbarkeit des Enthalpietauschers mit einer Überfeuchtung zu rechnen. Die Feldstudie soll diesen Aspekt behandeln. Zudem soll der Einsatz eines Rotors mit Ionenaustauschharz unter den gleichen Bedingungen rechnerisch betrachtet werden. Die Erkenntnisse der Feldstudie sollen in Form eines Schlussberichts und eines Tagungsbeitrags am Statusseminar 2008 dem Publikum zugänglich gemacht werden.

3. Lösungsweg

1. Ausrüsten der durch den Industriepartner Zehnder Comfosystems ausgewählten Wohnungen in Engelberg und Baar mit Datenloggern zur Erfassung der relativen Feuchte und der Temperatur in der Abluft. Zu Vergleichszwecken wurden in 3 Wohnungen zusätzlich Datenlogger zur Erfassung der Raumluft-Feuchte und –Temperatur installiert.
2. Je 3 Wohnungen an beiden Standorten wurden mit Enthalpietauschern ausgerüstet. Die verbleibenden 6 Wohnungen an den beiden Standorten wurden mit Wärmetauschern ausgestattet.
3. Wechselweiser Einsatz von Enthalpie- und Wärmetauscher während vordefinierter Perioden. Insgesamt sind drei Beobachtungsperioden vorgesehen (Nov.-Dez./Jan.-Feb./Mrz.-Apr.)
4. Wiederholung der Messkampagne im Folgejahr aufgrund der Erfahrungen aus den Objekten in Engelberg und Baar mit besser zugänglichen Objekten in Einsiedeln und Winterthur.
5. Kalkulatorischer Vergleich und Abschätzung des Verhaltens eines Rotors mit Feuchteübertragung unter gleichen Bedingungen.
6. Verfassen des Schlussberichts mit Zielpublikum Hersteller und Planer. Die Erkenntnisse werden nach Absprache mit dem Industriepartner zukünftig in Weiterbildungsveranstaltungen der HTA Luzern eingebracht.
7. Die Erkenntnisse werden in einen Beitrag am Statusseminar 2008 "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen" umgesetzt.

Durch verschiedene Umstände konnte erst verspätet mit der Installation der Datenlogger in den beiden Objekten in Engelberg und Baar begonnen werden. Erschwerend kam hinzu, dass die Zugänglichkeit zu den Wohnungen in Objekten nicht immer einfach war. Um das Benutzerverhalten ausschliessen zu können, mussten die Wärme- und Enthalpietauscher regelmässig gewechselt werden. Der Gewichtung der Zugänglichkeit wurde zu Projektbeginn zu wenig Rechnung getragen. Für die zweite Messkampagne wurden daher einfach zugängliche Objekte in Einsiedeln und Winterthur mit zentraler Platzierung der Kompaktlüftungsgeräte im Keller ausgewählt.

Untersuchte Objekte

Objekt 1: Schutzengelstrasse 59 und 61, 6340 Baar



Abbildung 2: Ansicht des Messobjekts in Baar.

Objekt 2: Gerschnistrasse 8 und 10, 6390 Engelberg



Abbildung 3: Ansicht des Messobjekts in Engelberg.

Objekt 3: Haltenrebenstrasse 43, 8408 Winterthur



Abbildung 4: Ansicht des Messobjekts Haltenrebenstrasse 43 in Winterthur.

Messprotokoll der Volumenströme

Die Volumenströme wurden am 12. Dezember 2006 mit dem Messgerät Flowfinder 1.08HP299 der Prüfstelle HLK ermittelt.

Bezeichnung Block D EG	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Bezeichnung Block D EG
Küche	20	16	Essen
Bad	34	15	Wohnen
Korridor	23	16	Büro
Dusche/WC	35	20	Kind 1
Reduit	32	23	Eltern
-		20	Kind 2
Summe	144	110	Summe

Bezeichnung Block D 1.OG	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Bezeichnung Block D 1.OG
Küche	29	14	Wohnen
Umkleide	25	16	Essen
Bad	25	20	Kind 1
Dusche/WC	30	21	Kind 2
Reduit	35	20	Kind 3
-		20	Eltern
Summe	144	111	Summe

Tabelle 2: Ermittelte Volumenströme für 2 Wohneinheiten in Winterthur.

Objekt 4: Eisenbahnstrasse 19a und 19b, 8840 Einsiedeln



Abbildung 5: Ansicht des Messobjekts Eisenbahnstrasse in Einsiedeln.

Bezeichnung	Grösse [Zimmer]	Beheizte Fläche [m ²]	Belegung [-]
Block B5 W1	4 1/2	106	2
Block B6 W2	3 1/2	84	2
Block B7 W3	5 1/2	144	3
Block A7 W4	5 1/2	144	4

Tabelle 3: Detailangaben zum Messobjekt in Einsiedeln.

Messprotokoll der Volumenströme

Die Volumenströme wurden am 12. Dezember 2006 mit dem Messgerät Flowfinder 1.08HP299 der Prüfstelle HLK ermittelt.

Bezeichnung <i>Block B W3</i>	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Bezeichnung <i>Block B W3</i>
Küche	23	30	Wohnen
Küche	24	29	Wohnen
Dusche/WC	33	17	Büro
Bad	30	20	Gästezimmer
Bad	29	23	Eltern
-		29	Kinderzimmer
Summe	139	148	Summe

Bezeichnung <i>Block B W1</i>	Abluft [m³/h]	Zuluft [m³/h]	Bezeichnung <i>Block B W1</i>
Küche	25	17	Wohnen
Küche	24	17	Wohnen
Bad	21	17	Fernsehraum
Bad	25	14	Schlafzimmer
Dusche/WC	38	23	Büro
Summe	133	88	Summe

Tabelle 4: Ermittelte Volumenströme für 2 Wohneinheiten in Einsiedeln.

Die Abweichungen in der Volumenstrombilanz für die Wohneinheit Block B W1 sind signifikant. Hier drängt sich eine Nachregulierung der Anlage auf.

Eingesetzte Enthalpie- und Wärmetauscher: Zehnder Comfoair G90-300 von Storkair



Abbildung 6: Das Zehnder Comfoair G90-300 von Storkair im Objekt Engelberg



Abbildung 7: Das Zehnder Comfoair G90-300 von Storkair im Objekt Baar.

Das Zehnder Comfoair G90-300 von Storkair (Abbildung 6, Abbildung 7) verfügt über einen Kreuzgegenstrom-Wärmetauscher. Dieser kann gegen einen Enthalpietauscher ausgetauscht werden. Das Gerät kann über einen Volumenstrombereich von 40 bis 260 m³/h mit EC-Gleichstrommotoren betrieben werden. Es sind Grobstaubfilter eingebaut, welche durch die optionalen Pollenfilter F7 ersetzt werden können. Das Gerät kann über drei Stufen gesteuert werden. Ein automatisch schaltender Bypass und ein stufenlos geregelter Frostschutz gehören zum Lieferumfang.

Nach einem vorgegebenen Zeitplan wurden die Enthalpietauscher- und Wärmetauscher-Module periodisch ein- und ausgebaut.

Eingesetzte Messmittel der Prüfstelle HLK der HTA Luzern

In die Kompaktlüftungsgeräte Zehnder Comfoair G90-300 wurden Datenlogger platziert, die kontinuierlich Temperatur und relative Feuchte der Abluft und Aussenluft erfassen. Zudem wurden Datenlogger in Wohnräumen und im Aussenbereich platziert. Die erweiterte Messunsicherheit beträgt für die Temperatur ± 0.5 K sowie für die relative Feuchte ± 3 %r.F.



Abbildung 8: Rotronic Datenlogger vom Typ Hygrolog der Prüfstelle HLK im Zehnder Comfoair G90-300.

Versuchsprogramm der beiden Messkampagnen 2006 und 2007

Im Objekt Einsiedeln wurden während der Messperioden je zwei Enthalpietauscher (ET) und Wärmetauscher (WT) eingesetzt. Im Objekt Winterthur wurden je fünf Enthalpie- und Wärmetauscher eingesetzt. Pro Periode sind jeweils die Hälfte der Wohnungen mit Wärmetauschern und die andere Hälfte mit Enthalpietauschern ausgerüstet. Vor Beginn einer neuen Periode wurden die Wärme- und Enthalpietauscher gewechselt (Tabelle 5).

Bezeichnung Periode	Objekt Baar		Objekt Engelberg	
Winter 2006	Wohnung 1/3	Wohnung 2	Wohnung 1-3	
1.1 15.02.-03.03.2006	ET	ET	ET	-
1.2 03.03.-31.03.2006	WT	WT	WT	-
1.3 31.03.-18.05.2006	ET	WT	ET	-

Bezeichnung Periode	Objekt Winterthur		Objekt Einsiedeln	
Sommer 2006	Wohnung 1-5	Wohnung 6-10	Wohnung 1-2	Wohnung 3-4
2.1 18.07.-02.08.2006	ET	WT	-	-
2.2 02.08.-08.08.2006	WT	ET	-	-
2.3 08.08.-15.08.2006	ET	WT	-	-

Bezeichnung Periode	Objekt Winterthur		Objekt Einsiedeln	
Herbst 2006	Wohnung 1-5	Wohnung 6-10	Wohnung 1-2	Wohnung 3-4
3.1 17.10.-24.10.2006	ET	WT	ET	WT
3.2 24.10.-01.11.2006	WT	ET	WT	ET
3.3 01.11.-07.11.2006	ET	WT	ET	WT
3.4 07.11.14.11.2006	WT	ET	WT	ET

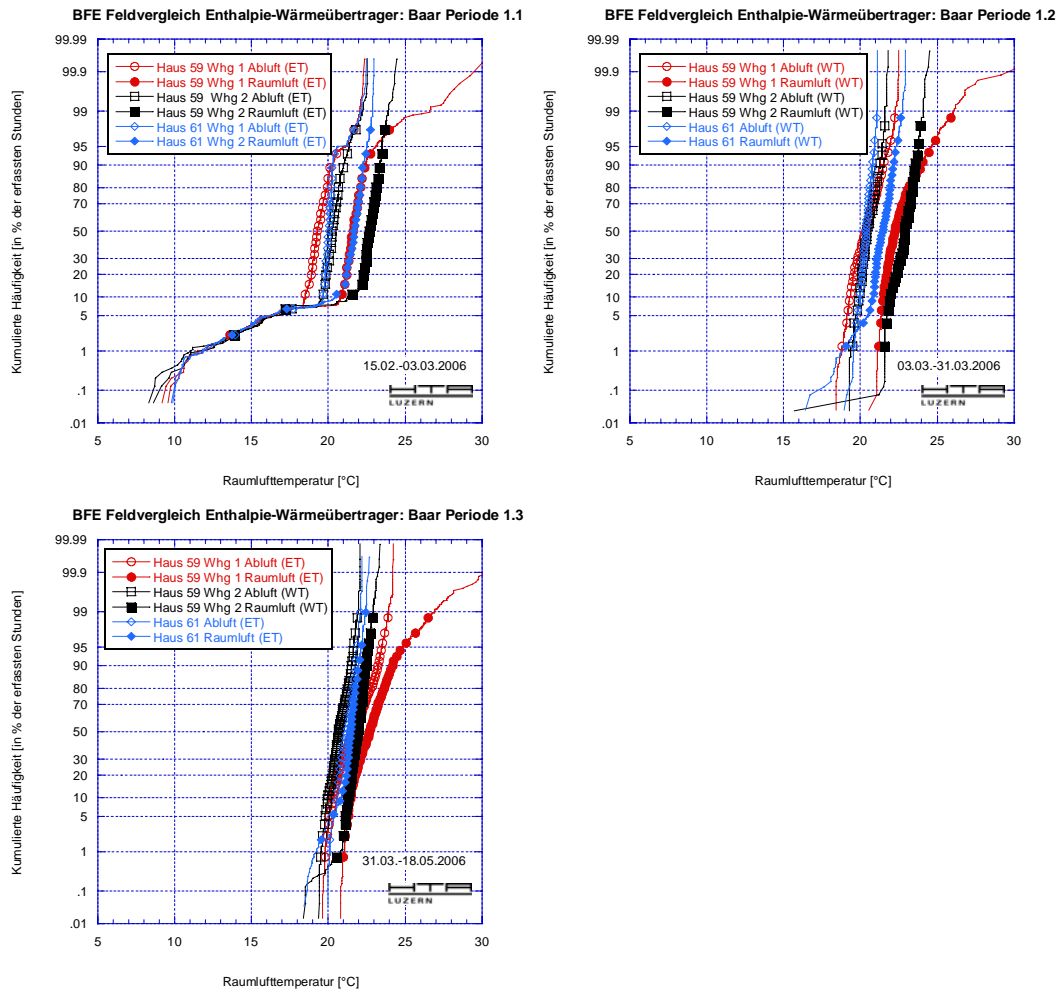
Bezeichnung Periode	Objekt Winterthur		Objekt Einsiedeln	
Winter 2007	Wohnung 1-5	Wohnung 6-10	Wohnung 1-2	Wohnung 3-4
4.1 14.11.-12.12.2006	ET	WT	ET	WT
4.2 12.12.-29.01.2007	WT	ET	WT	ET
4.3 30.01.-06.02.2007	ET	WT	ET	WT
4.4 06.02.-19.02.2007	WT	ET	WT	ET

Tabelle 5: Enthalpie- und Wärmetauscher im periodischen Wechsel.

4. Ergebnisse

Die kumulierten Häufigkeiten der Raumlufttemperatur, der Raumluftfeuchte, der Differenz der absoluten Feuchte (Abluft – Aussenluft) sowie der Aussenlufttemperatur werden im Folgenden angegeben. Dadurch können Aussagen über die Häufigkeit von registrierten Werten gemacht werden, welche unter oder über einem bestimmten Wert liegen.

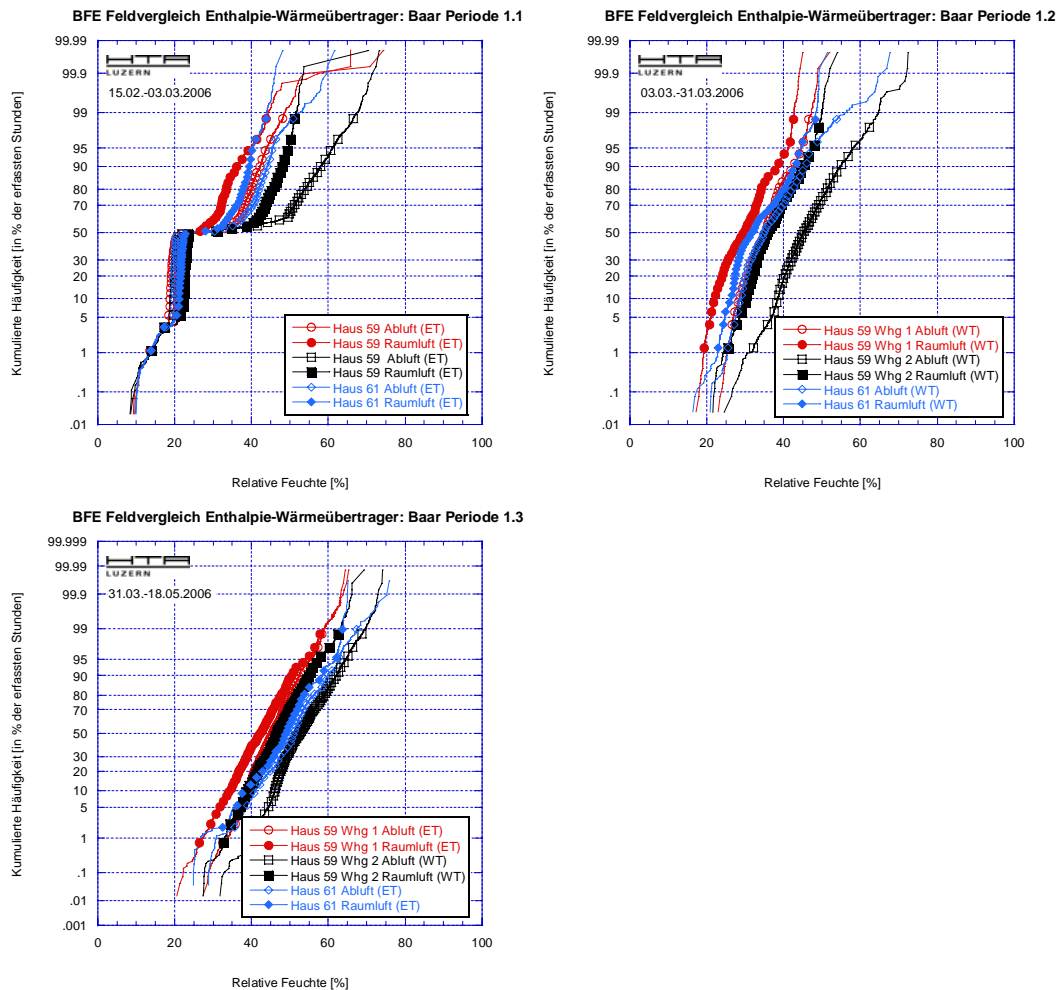
Baar Winter 2005/2006 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur



Figur 1: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur für Baar im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

Gemäss Figur 1 sind in der Periode 1.1 an 5 % aller erfassten Stunden Raumlufttemperaturen unter 17 °C festgestellt worden. Dies ist auf den Einfluss offen stehender Fenster zurückzuführen. In Haus 59 Whg. 1 sind Einflüsse feststellbar, die auf Sonneneinstrahlung zurück schliessen lassen.

Baar Winter 2005/2006 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte

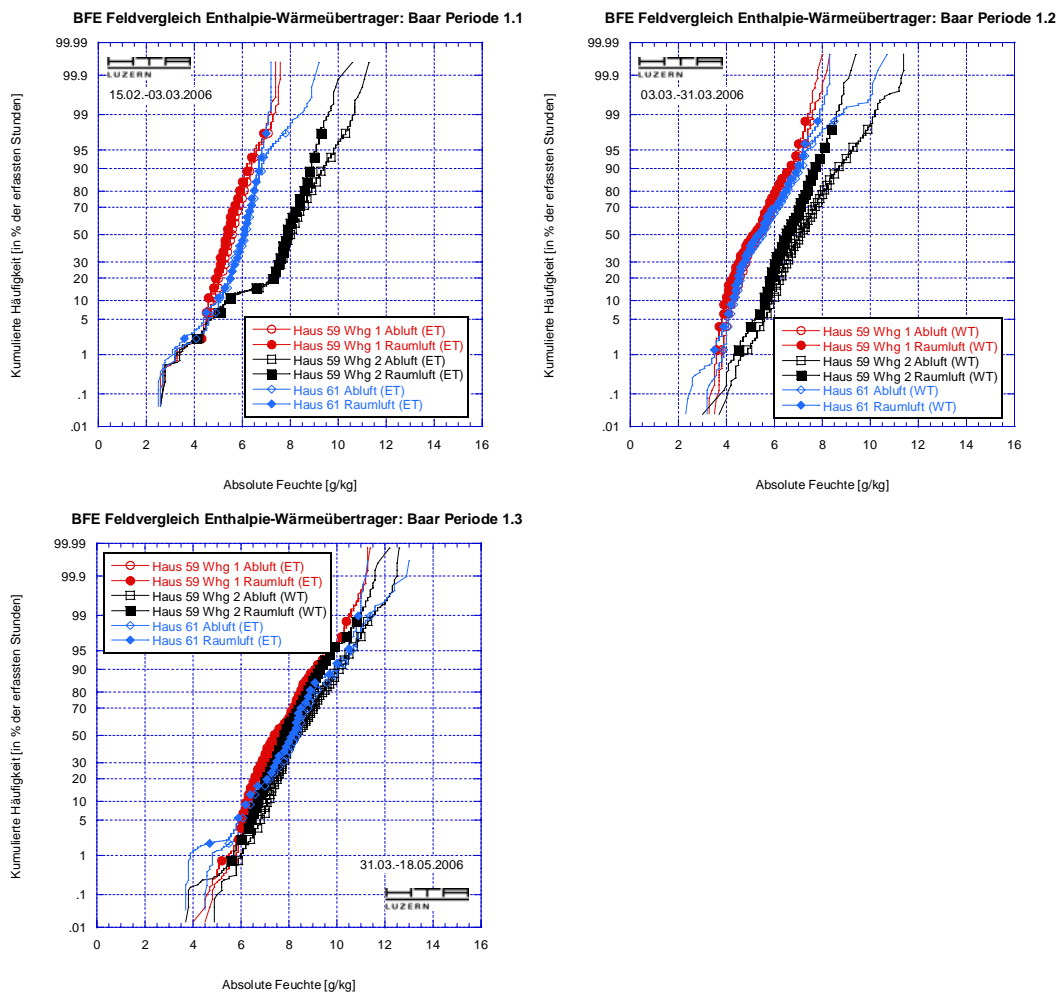


Figur 2: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Baar im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

Das Verhalten der Raumlufffeuchte unterscheidet sich in Periode 1.1 stark vom Verhalten der beiden anderen Perioden. Dies ist wiederum mit dem Einfluss offen stehender Fenster zu erklären. Eindringende Aussenluft wird bei konstanter niedriger absoluter Feuchte erwärmt - daraus resultiert eine niedrige relative Feuchte. Beachtliche 50% aller erfassten Stunden liegen unter 20 % r.F. In den anderen beiden Perioden ist dieses Verhalten nicht mehr zu beobachten. Die Daten sind ohne nennenswerte Ausreißer normalverteilt.

In der Periode 1.3 werden an maximal 30% aller erfassten Stunden Raumlufffeuchten von über 60 % erfasst. Eine eigentliche Überfeuchtung kann nicht festgestellt werden.

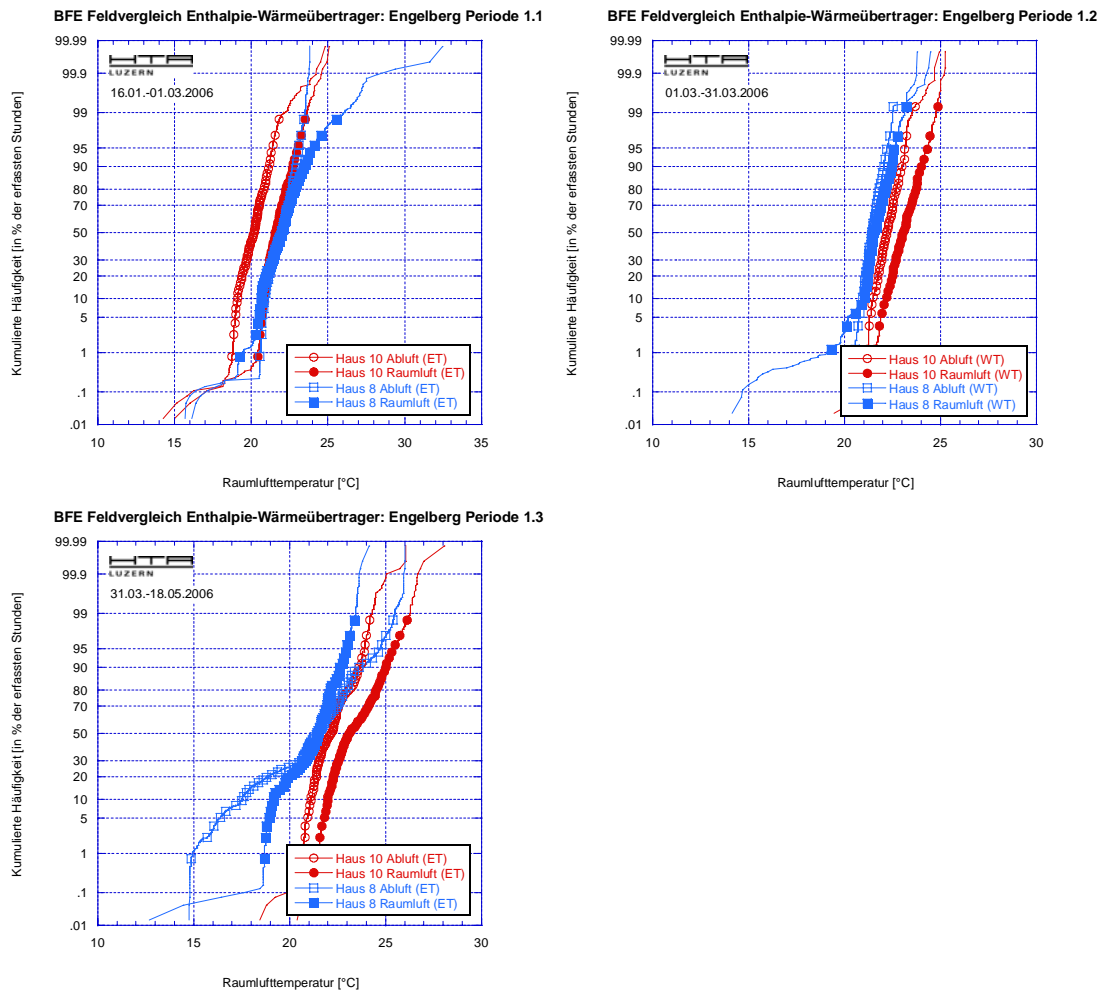
Baar Winter 2005/2006 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der absoluten Feuchte



Figur 3: Kumulierte Häufigkeiten der absoluten Feuchte für Baar im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

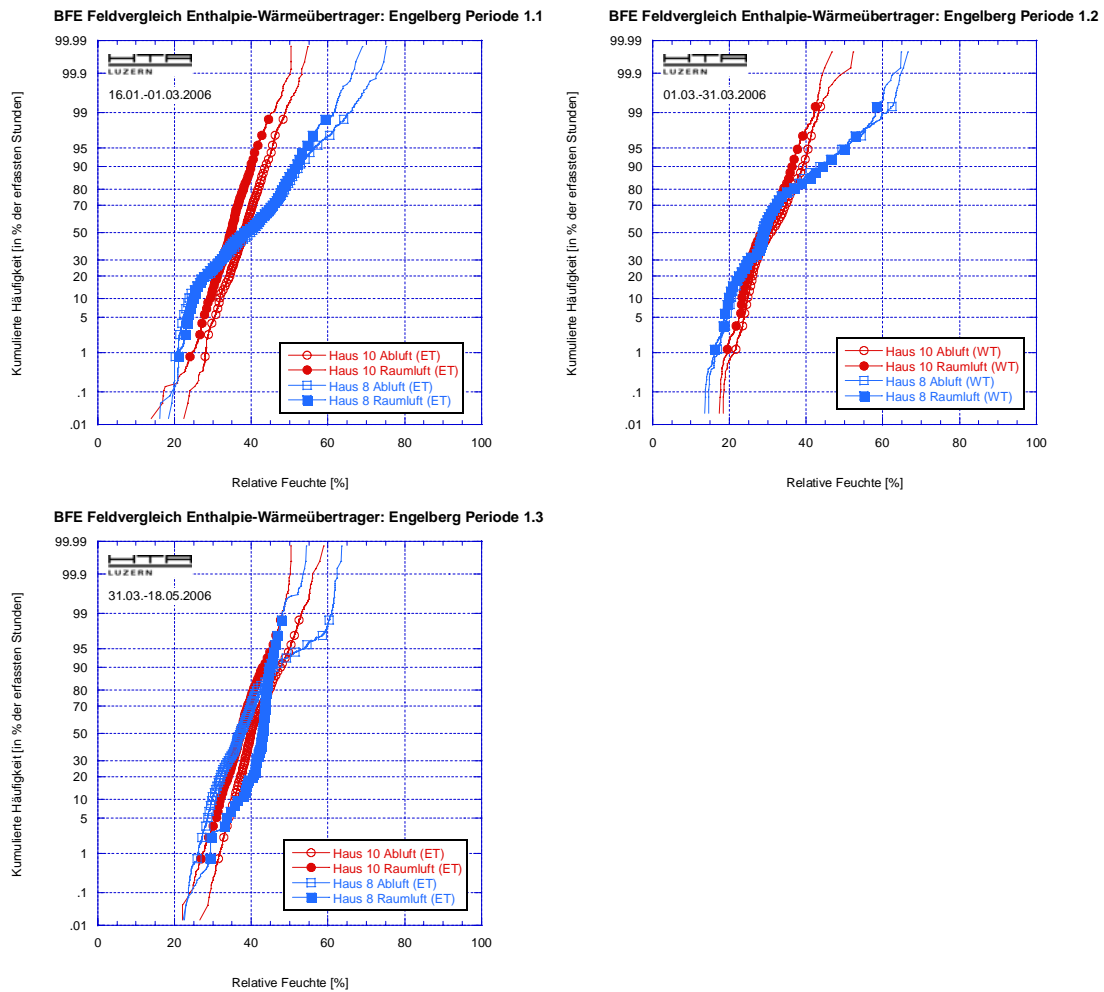
Die Unterschiede im absoluten Feuchtegehalt zwischen Abluft und Raumluft fallen pro Wohnung klein aus.

Engelberg Winter 2005/06 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur



Figur 4: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur für Engelberg im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

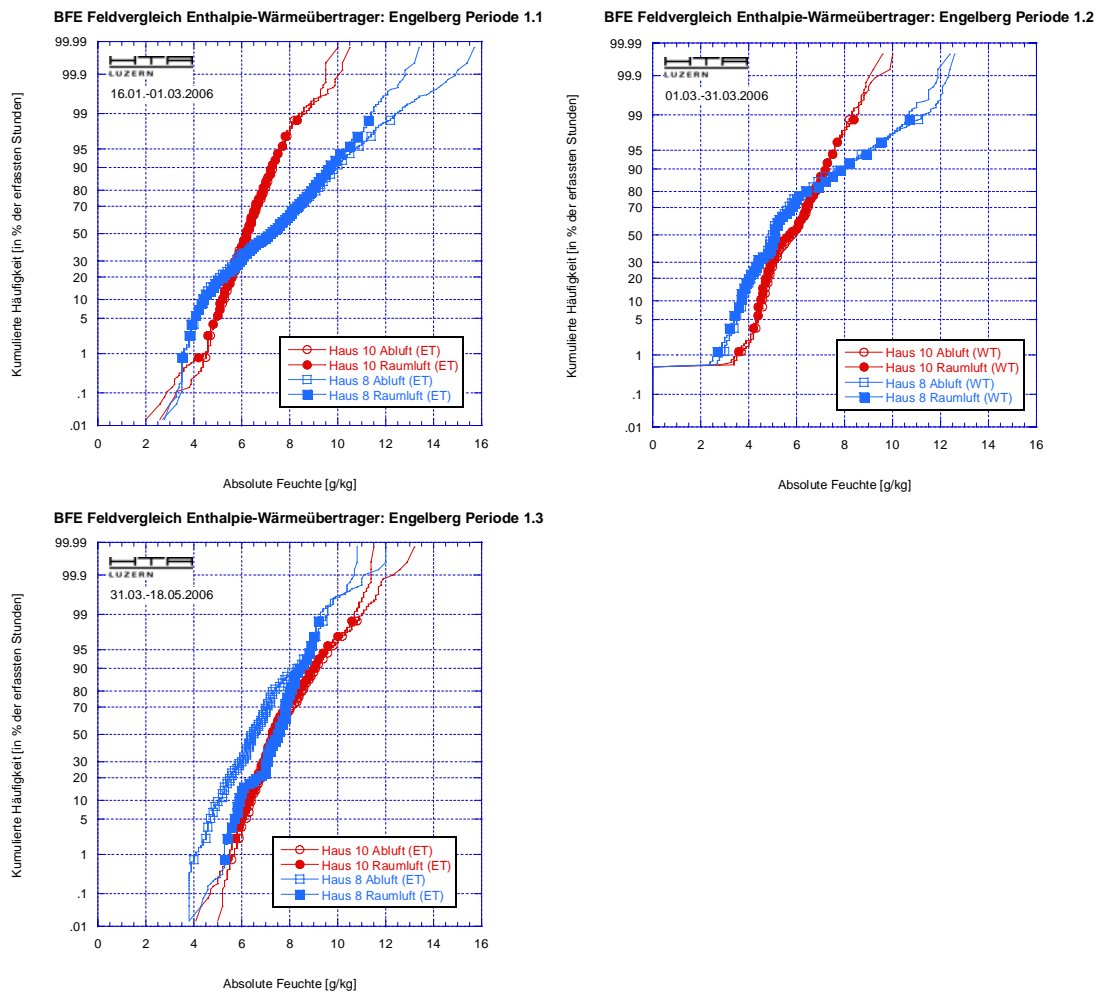
Engelberg Winter 2005/2006 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 5: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Engelberg im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

Trotz Enthalpietauscher sind an rund 30 % aller erfassten Stunden Raumlufffeuchten unter 30 % verzeichnet worden. Die internen Lasten sind in diesen Wohneinheiten eindeutig zu klein. Die Belegungsdichten und die Aufenthaltsdauer fallen klein aus. In der Periode 1.3 werden praktisch keine Raumlufffeuchten über 60 % registriert.

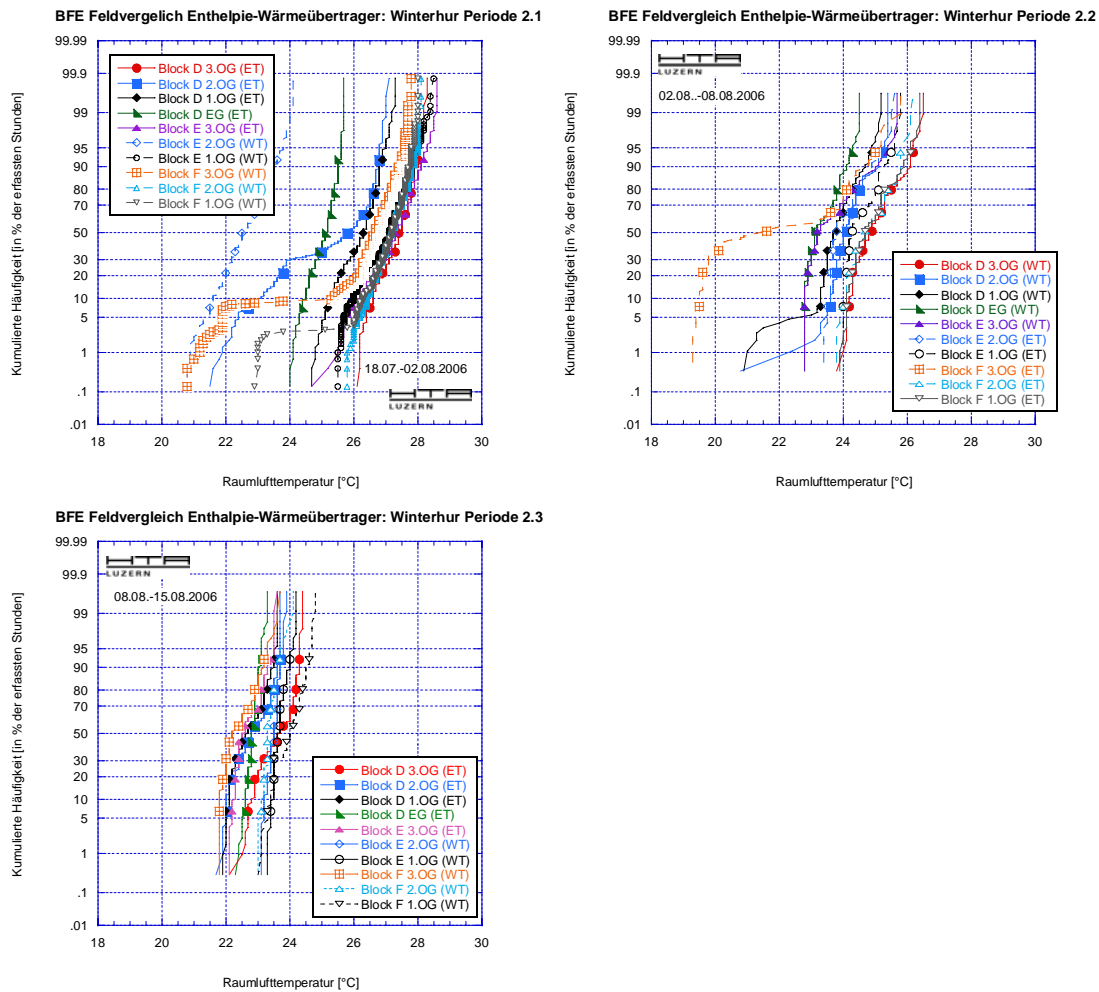
Engelberg Winter 2005/2006 und Frühling 2006: Kumulierte Häufigkeiten der absoluten Feuchte



Figur 6: Kumulierte Häufigkeiten der absoluten Feuchte für Engelberg im Winter 2005/2006 und Frühling 2006.

Die Unterschiede im absoluten Feuchtegehalt zwischen Abluft und Raumlufte fallen – wie bereits in Baar beobachtet – klein aus.

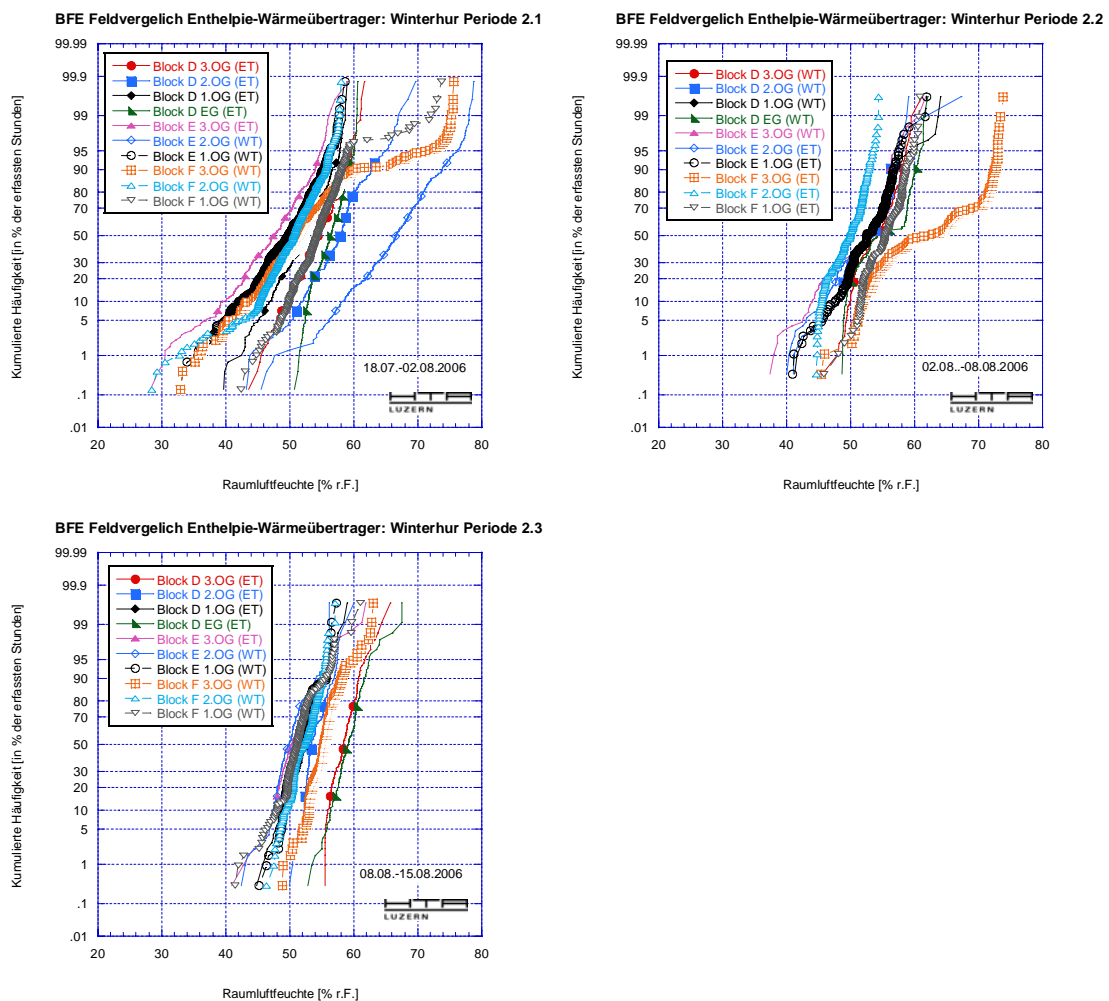
Winterthur Sommer 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur



Figur 7: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur für Winterthur im Sommer 2006.

Die Raumlufthtemperaturen geben die Witterungsverhältnisse wieder. Die Periode 2.1 war geprägt von warmem Sommerwetter, wogegen die Perioden 2.2 bis 2.3 mehrheitlich von schlechter Witterung geprägt wurden.

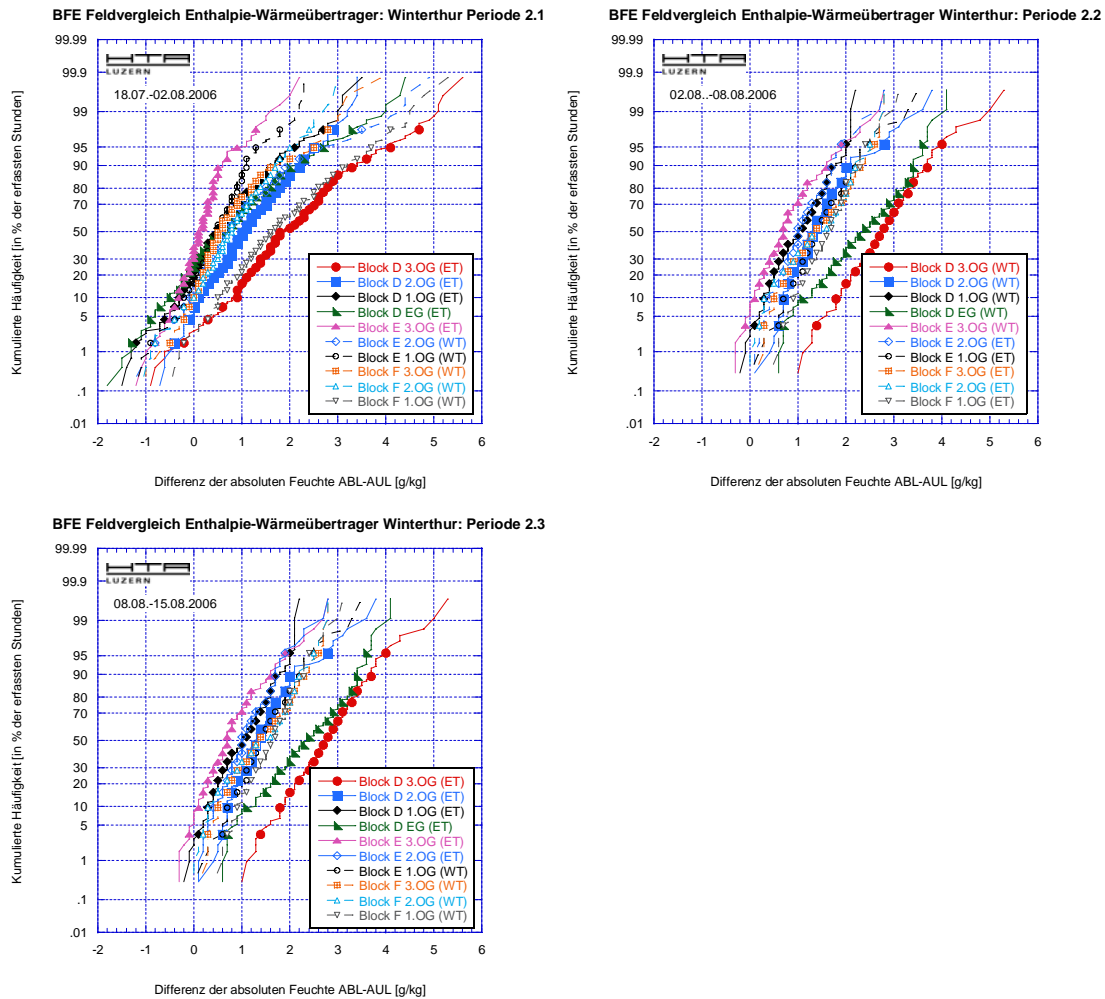
Winterthur Sommer 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 8: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Winterthur im Sommer 2006.

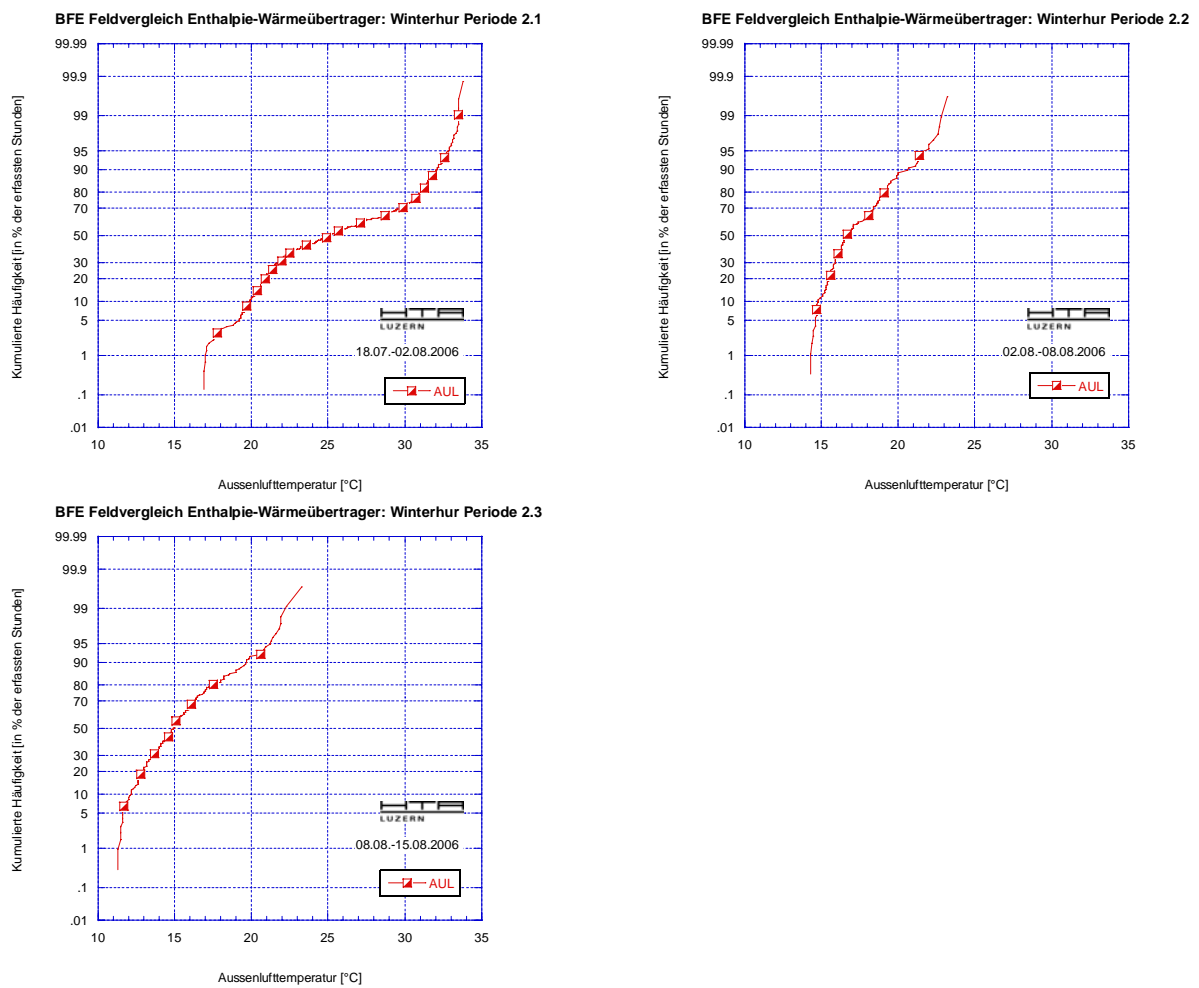
In der Periode 2.1 werden für einzelne Wohneinheiten hohe Häufigkeiten mit Raumlufffeuchten von über 60 % ausgewiesen. Diese Werte lassen sich aber nicht auf den Enthalpietauscher zurückführen, da in allen drei Fällen Wärmetauscher im Einsatz waren.

Winterthur Sommer 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL



Figur 9: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte für Winterthur im Sommer 2006.

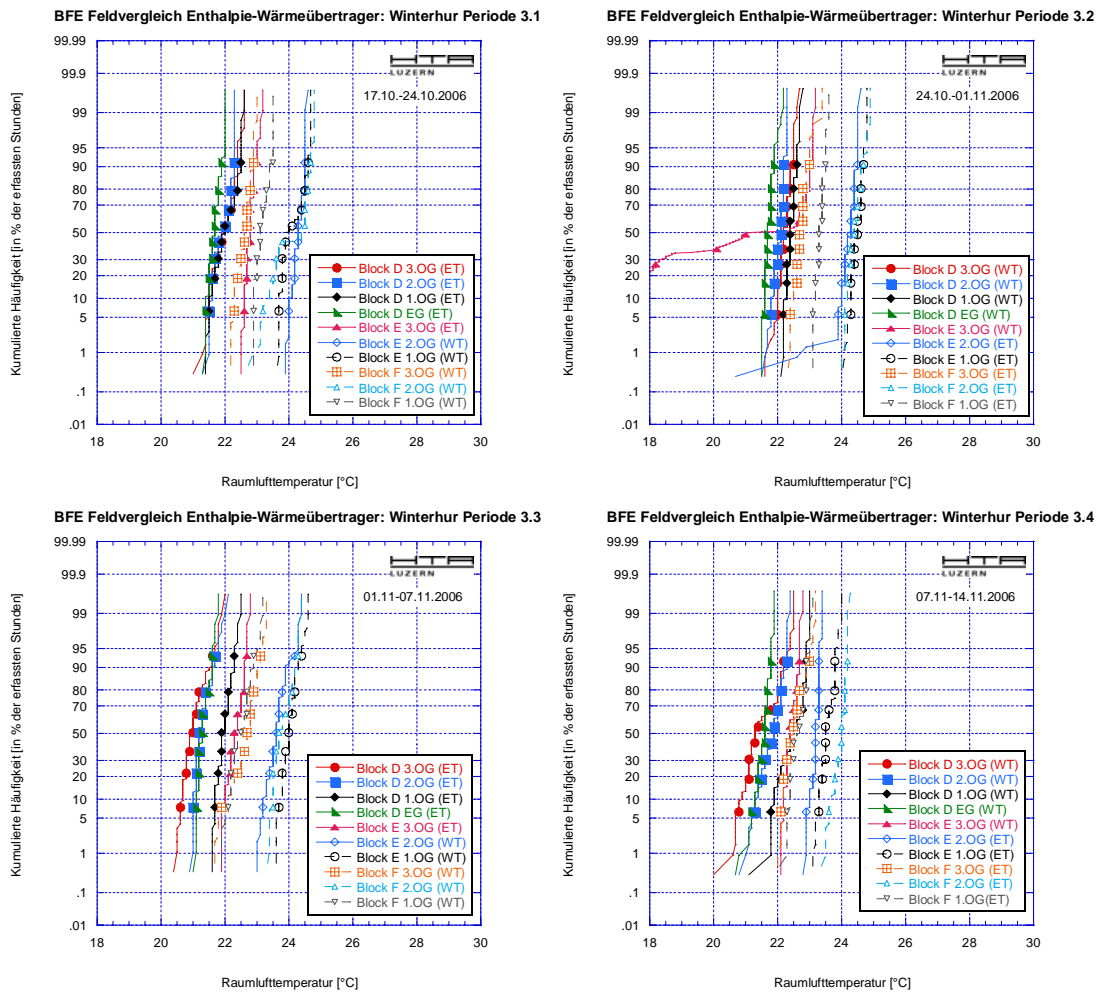
Winterthur Sommer 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur



Figur 10: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur für Winterthur im Sommer 2006.

In den betrachteten Sommerperioden wurde eine markante Verschiebung hin zu tieferen Aussenlufttemperaturen festgestellt. Nach anfänglichen sommerlichen Temperaturen konnten kaum mehr Werte über 20 °C registriert werden. 90 % aller registrierten Werte lagen in den Perioden 2.2 und 2.3 unter 20 °C.

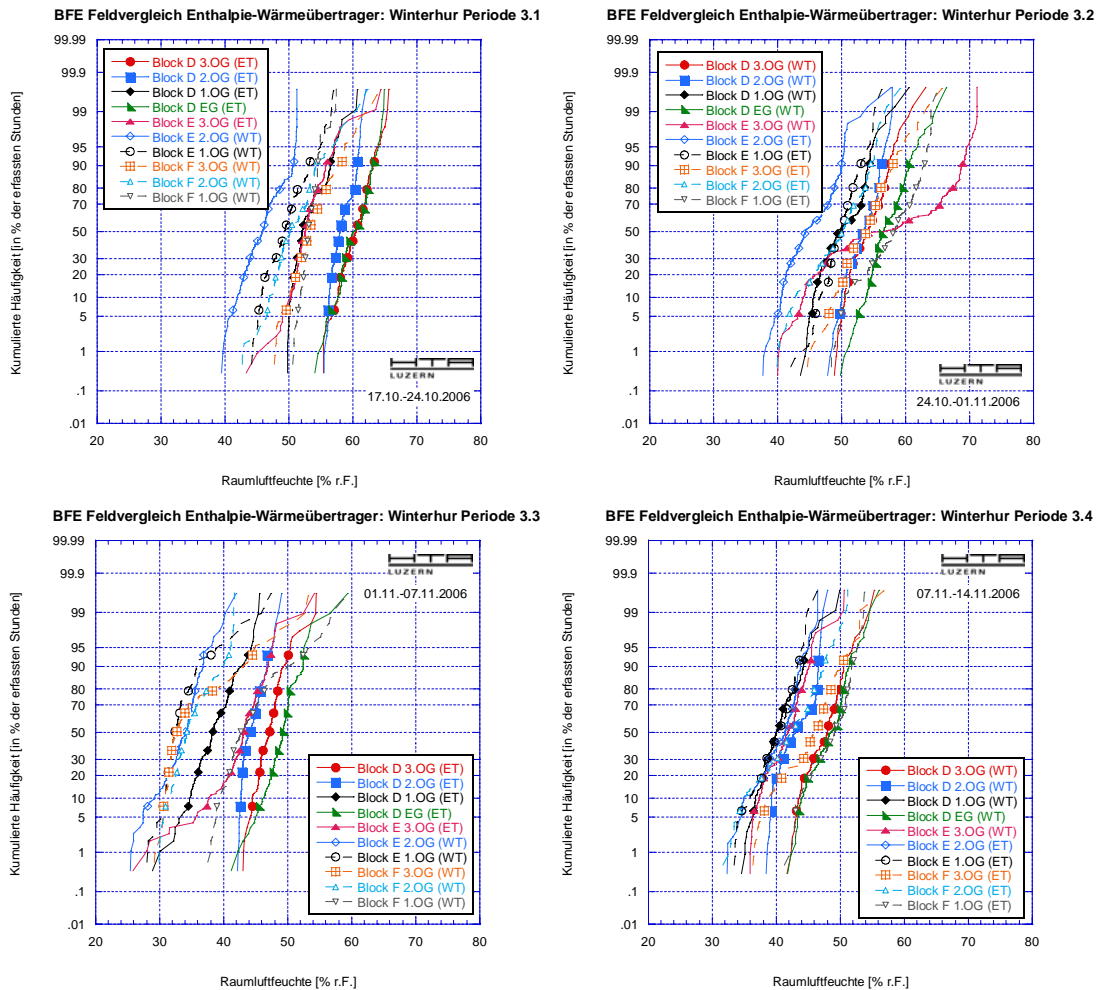
Winterthur Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur



Figur 11: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur für Winterthur im Herbst 2006.

Die registrierten Raumlufthtemperaturen sind sehr konstant, die Variation pro Wohnung beträgt etwa 1K. Die festgestellten Abweichungen in Periode 3.2 sind auf offene Fenster oder Balkontüren zurückzuführen.

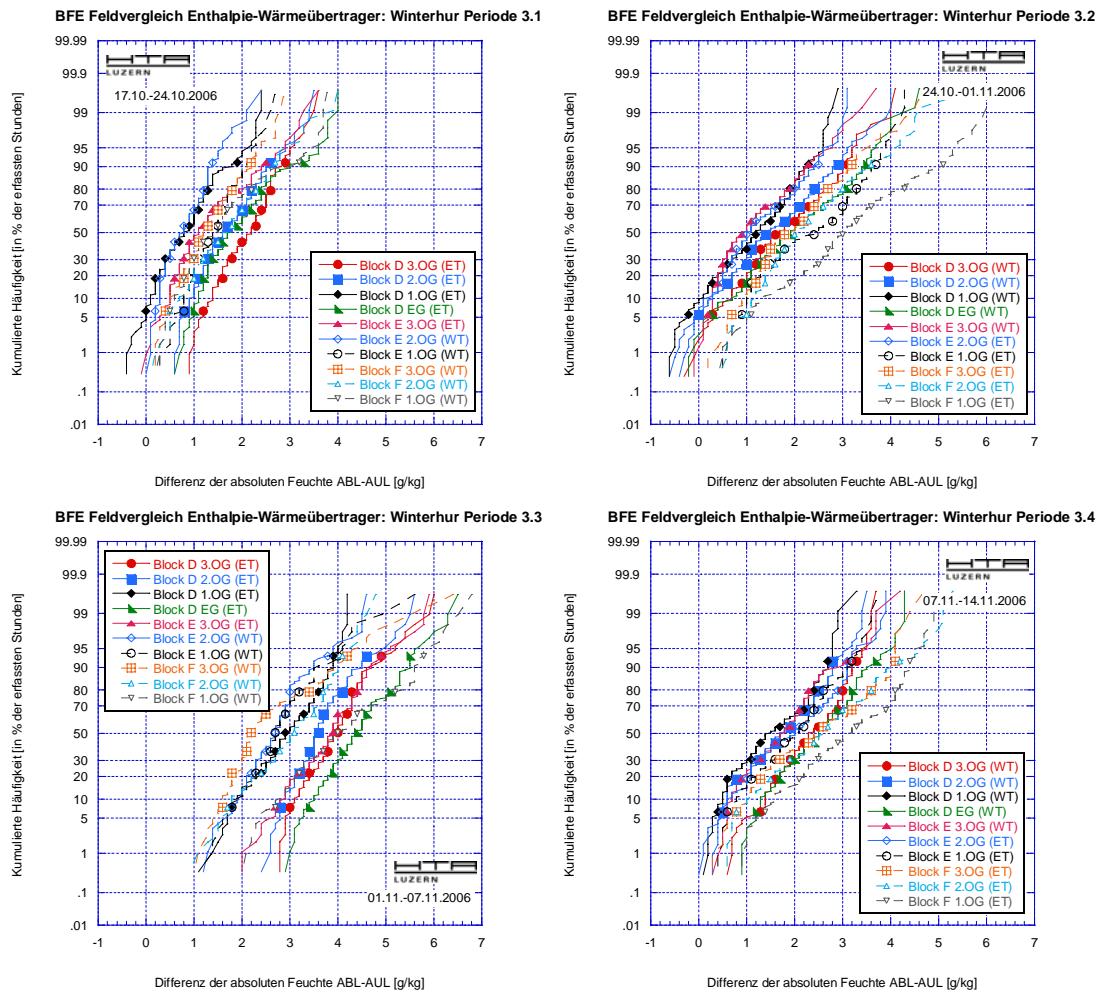
Winterthur Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 12: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Winterthur im Herbst 2006.

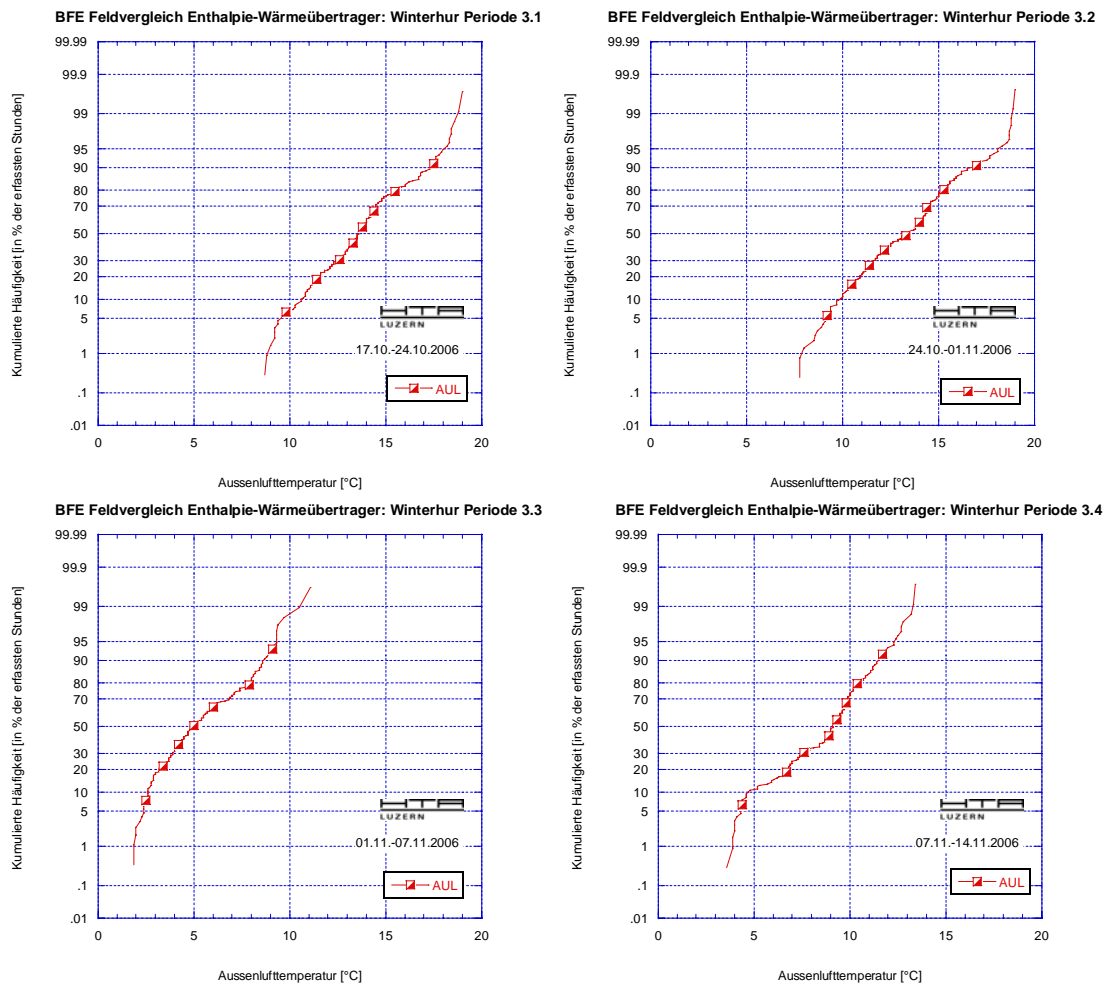
In den beobachteten Herbstperioden sind fast keine Raumlufffeuchten unter 30 %r.F. registriert worden. Hingegen sind in der Übergangszeit in einigen Wohnungen Raumlufffeuchten über 60 %r.F. an 30 bis 50 % aller erfassten Stunden registriert worden. Diese Überschreitungen betrafen mit Enthalpie-tauscher bestückte Wohneinheiten.

Winterthur Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL



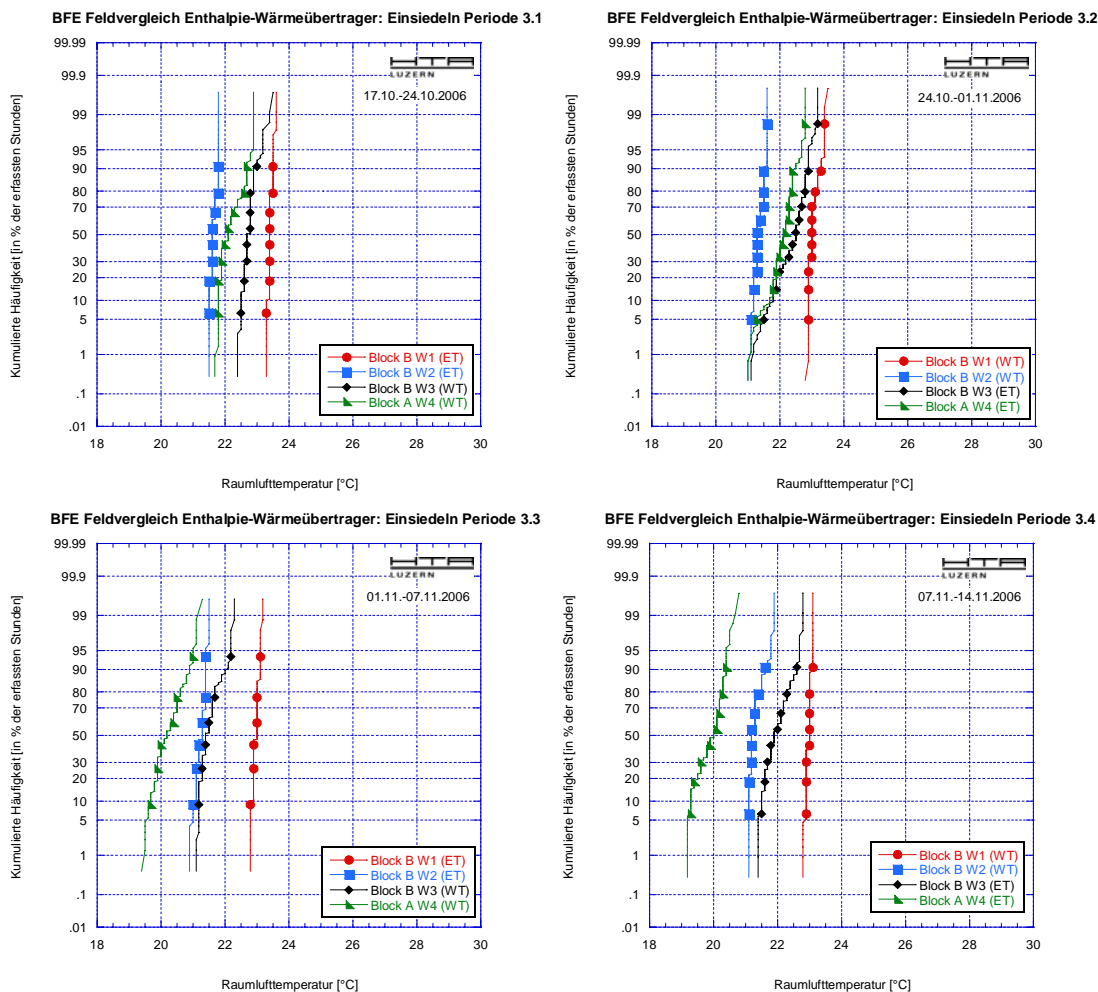
Figur 13: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte für Winterthur im Herbst 2006.

Winterthur Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur



Figur 14: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur für Winterthur im Herbst 2006.

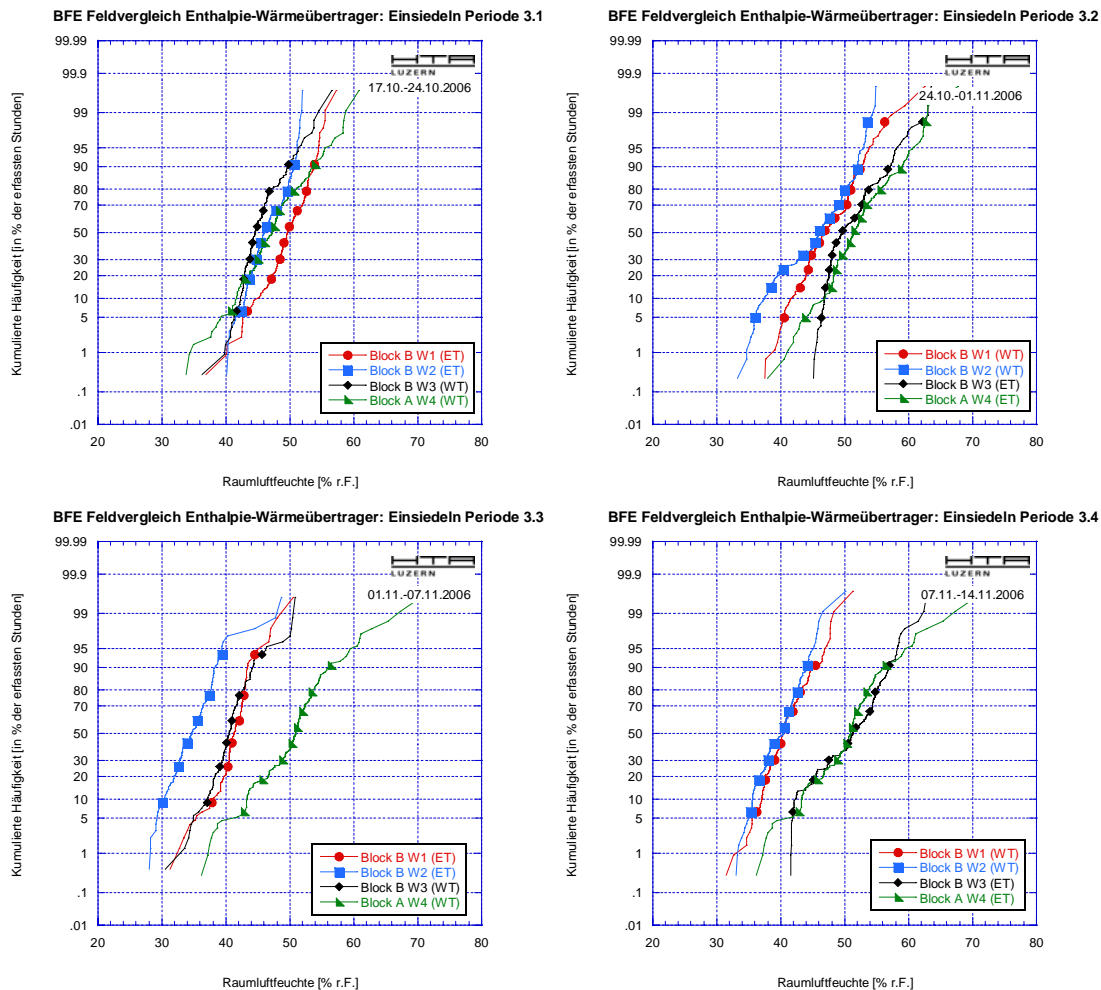
Einsiedeln Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur



Figur 15: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur für Einsiedeln im Herbst 2006.

Die erfassten Raumlufttemperaturen sind über weite Bereiche konstant. Unter den Wohnungen stellen sich Unterschiede von 2 bis 3 °C ein. Die Unterscheide zwischen Enthalpietauscher und Wärmetauscher sind nicht signifikant.

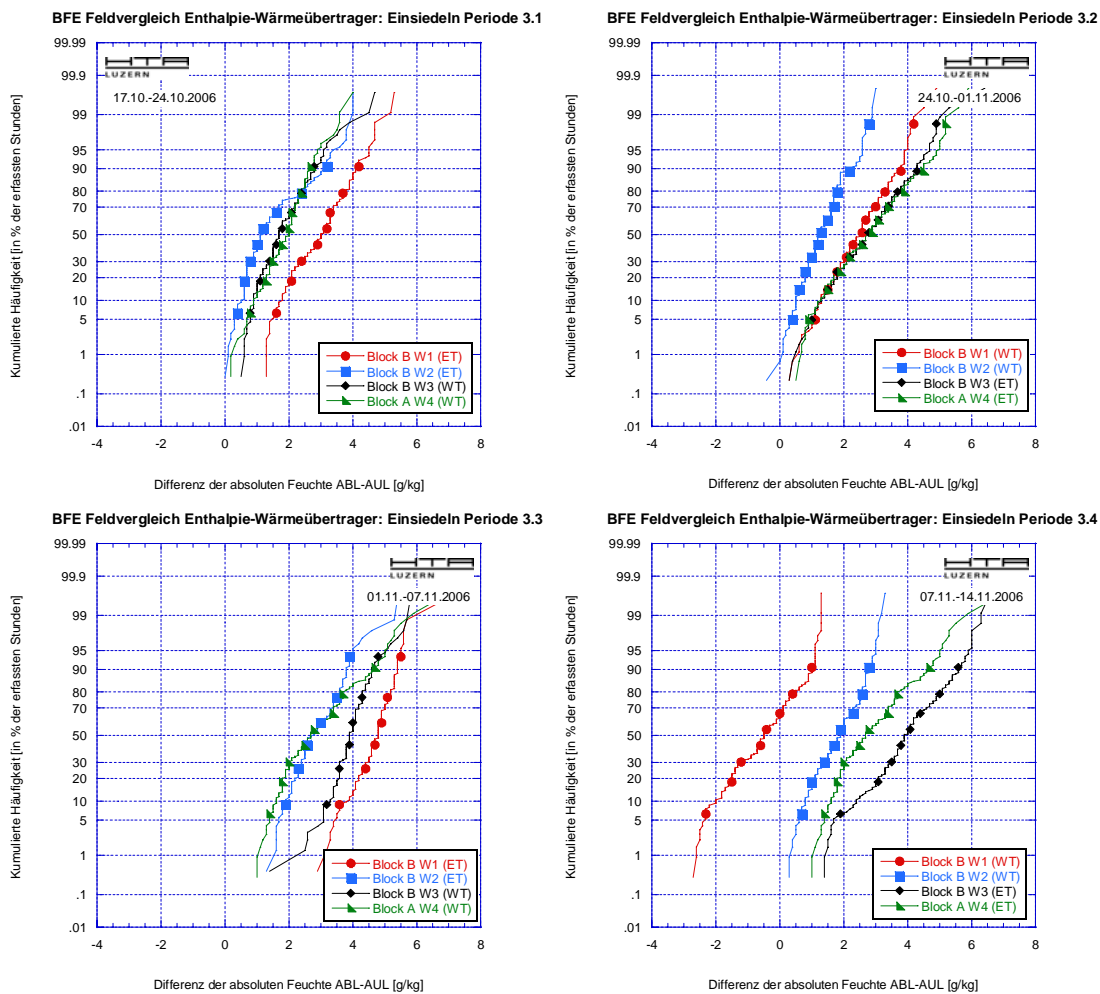
Einsiedeln Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 16: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Einsiedeln im Herbst 2006.

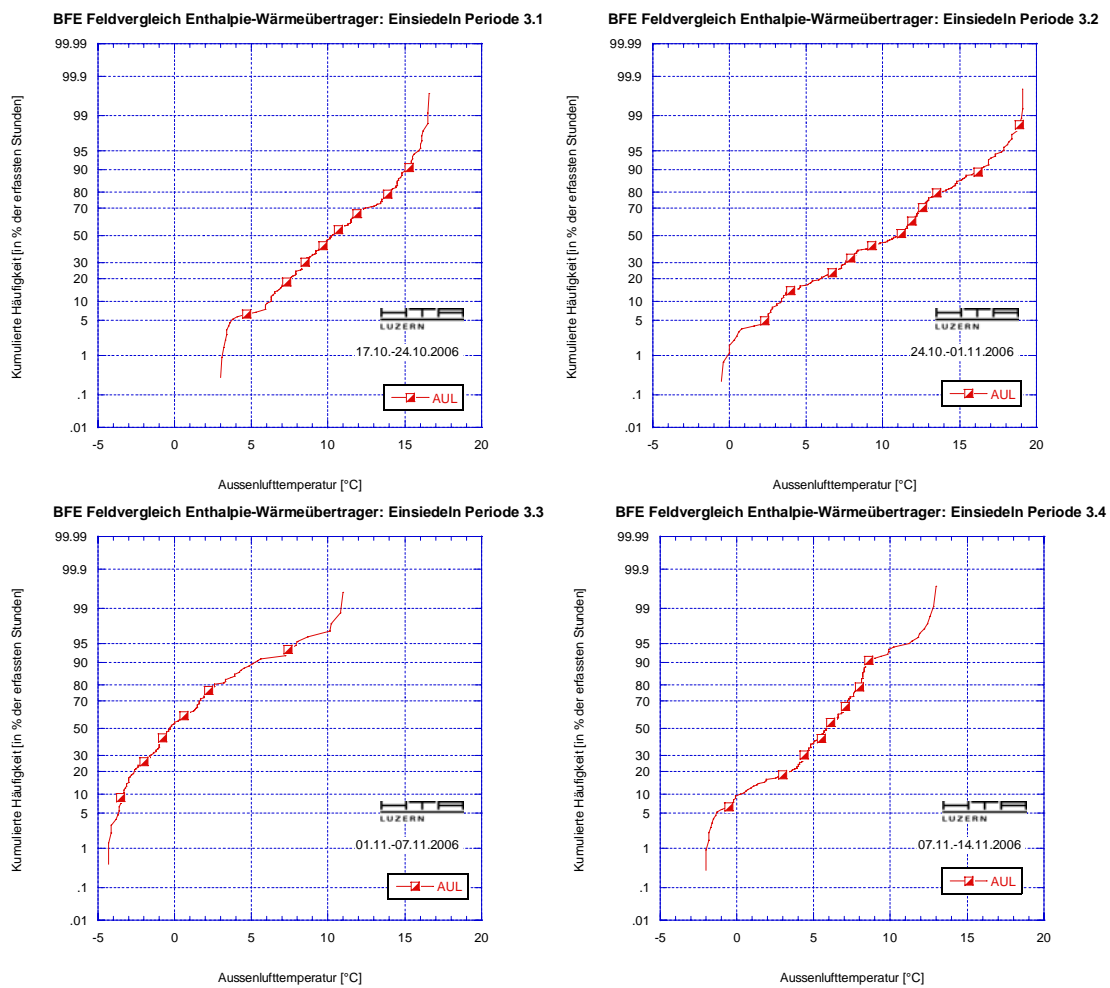
In der Periode 3.4 wurden in Wohnungen mit Enthalpietauscher signifikant höhere Raumlufffeuchten registriert. Der Unterschied beträgt etwa 10%r.F. Zu beachten bleibt aber, dass gleichzeitig in einer Wohnung mit Enthalpietauscher auch Raumlufftemperaturen von unter 20°C an 50% aller erfassten Stunden registriert wurden, was zu höherer Raumlufffeuchte führt.

Einsiedeln Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL



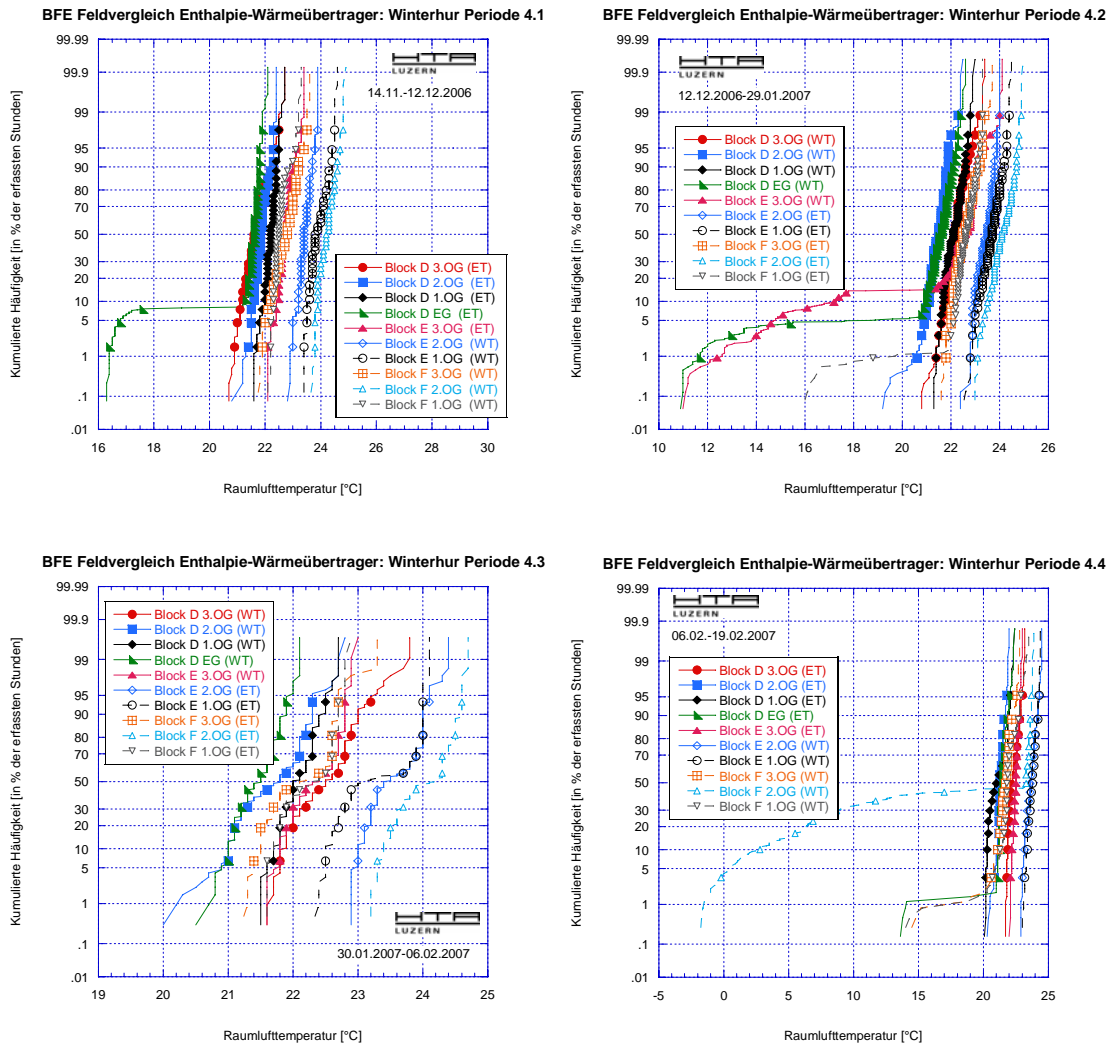
Figur 17: Kumulierte Häufigkeiten der absoluten Feuchte ABL-AUL für Einsiedeln im Herbst 2006.

Einsiedeln Herbst 2006: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur



Figur 18: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur für Einsiedeln im Herbst 2006.

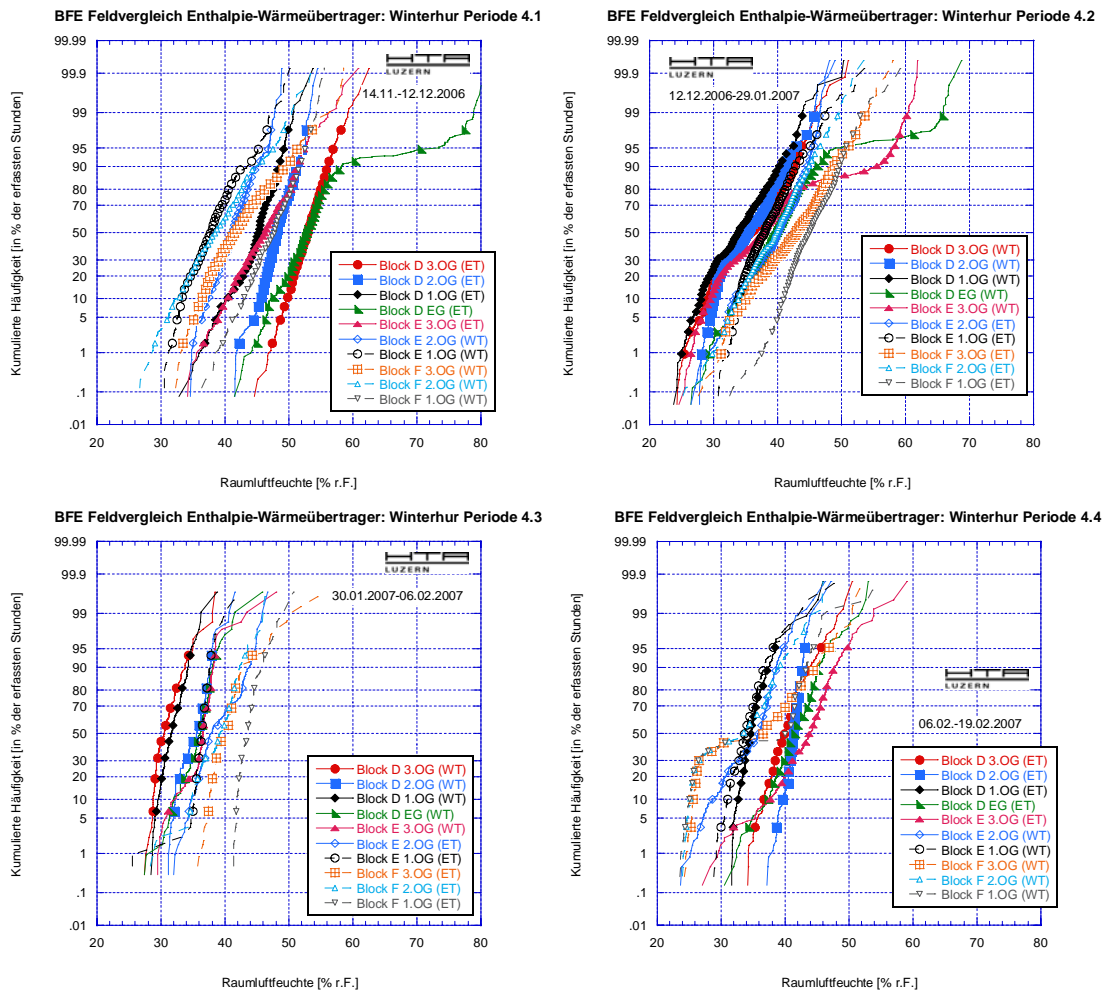
Winterthur Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur



Figur 19: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufthtemperatur für Winterthur im Winter 2007.

Offensichtlich lassen die Bewohner Fenster oder Balkontüren über einige Stunden offen stehen. Die erfassten Werte entsprechen keiner Normalverteilung mehr, wie dies der Regel entspricht. Es sind deutliche Differenzen zwischen Mittel- und Medianwert zu verzeichnen, was auf die beobachteten „Ausreisser“ hindeutet.

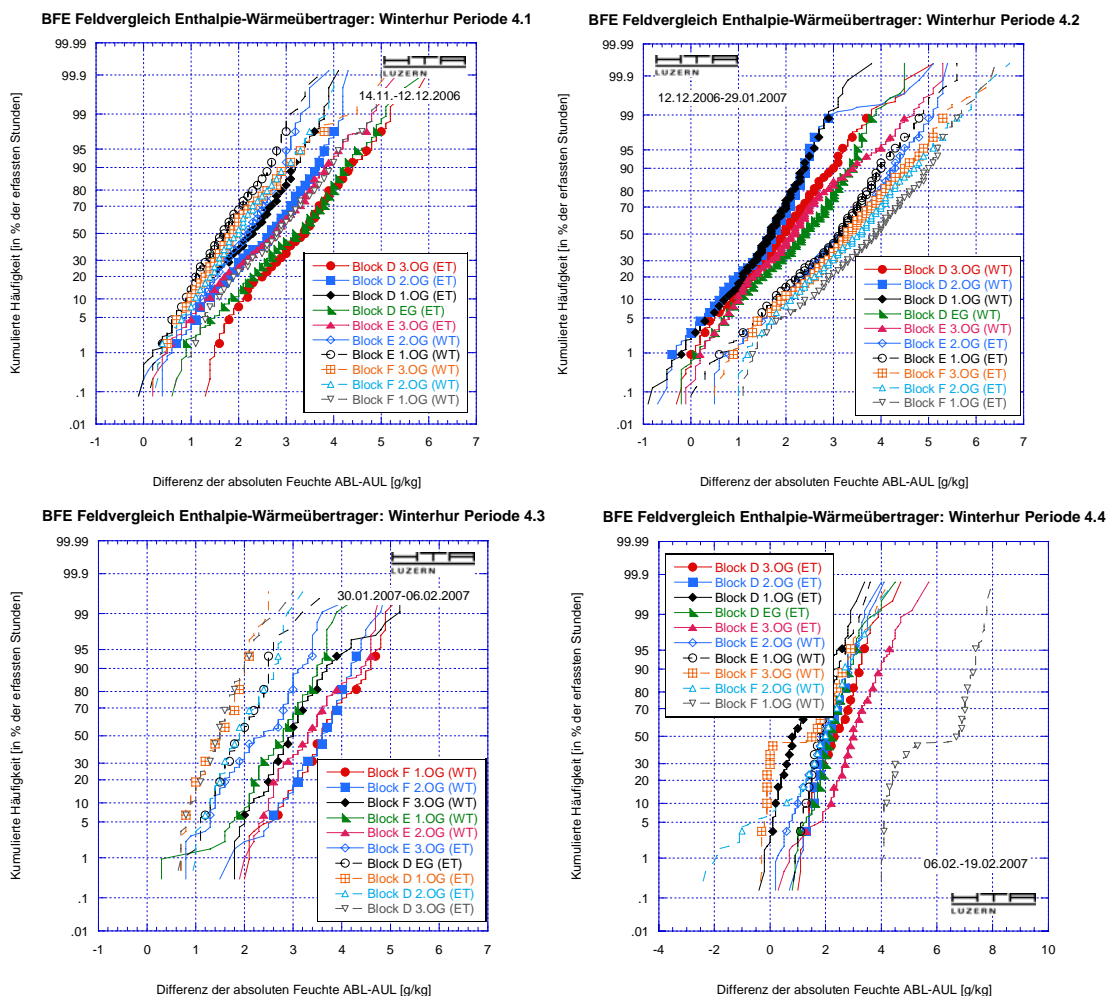
Winterthur Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 20: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Winterthur im Winter 2007.

Die hohe Anzahl erfasster Stunden mit Raumlufftemperaturen deutlich über 21°C bleibt nicht ohne Einfluss auf das Niveau der relativen Feuchte. An 5 bis 30 % aller erfassten Stunden liegt die relative Feuchte unter 30 %. Der Einfluss des Enthalpietauschers auf das Feuchteniveau ist erkennbar. Er beträgt je nach Periode 5 bis 10 %r.F. In Block D EG sind in der Periode 4.1 an 10 % aller erfassten Stunden Werte über 60 %r.F. zu verzeichnen. Dies hängt aber nicht mit dem Enthalpietauscher zusammen, sondern mit tiefen registrierten Raumlufftemperaturen an ebenfalls 10% aller erfassten Stunden.

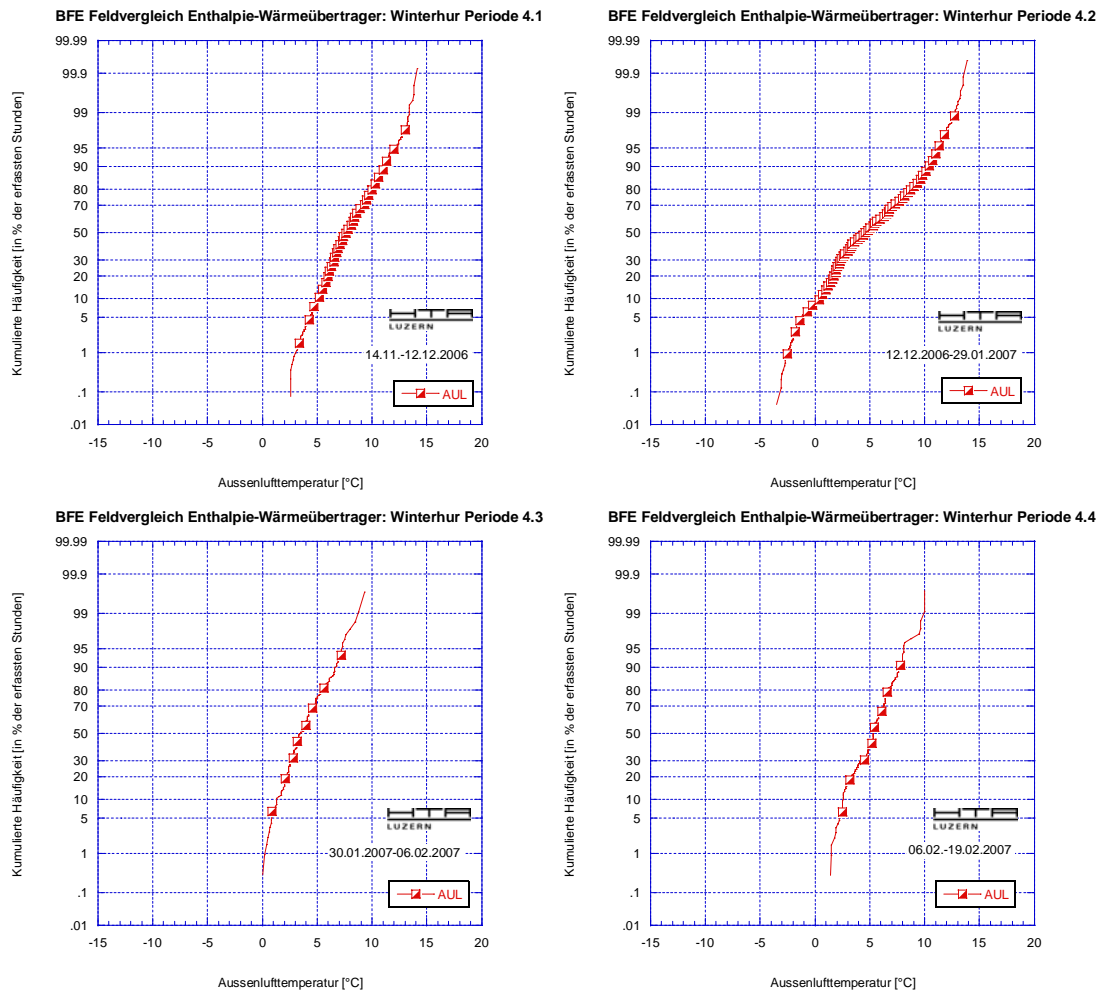
Winterthur Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL



Figur 21: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL für Winterthur im Winter 2007.

Der Einfluss des Enthalpietauschers auf die Differenz der absoluten Feuchte zwischen Abluft und Aussenluft ist in einigen Perioden signifikant feststellbar. Er beträgt 1 bis 2 g/kg absolute Feuchte.

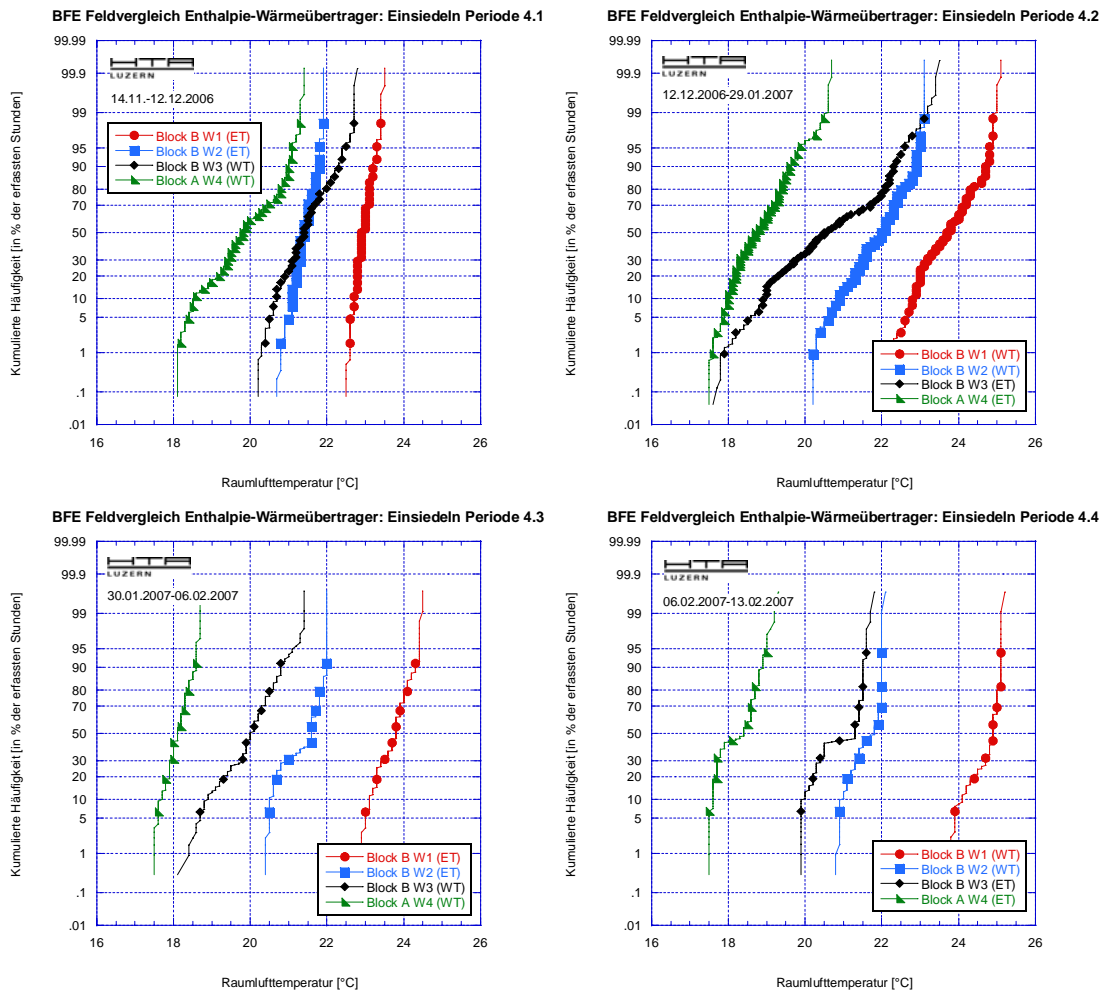
Winterthur Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur



Figur 22: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur für Winterthur im Winter 2007.

Es wurden kaum Stunden mit Aussenlufttemperaturen von unter 0° C registriert. Die aufeinander folgenden Monate mit Wärmeüberschüssen im Winter 2006/2007 blieben auch für diese Messkampagne nicht ohne Folgen. Es fehlen lange Perioden mit Aussenlufttemperaturen deutlich unter 0 °C.

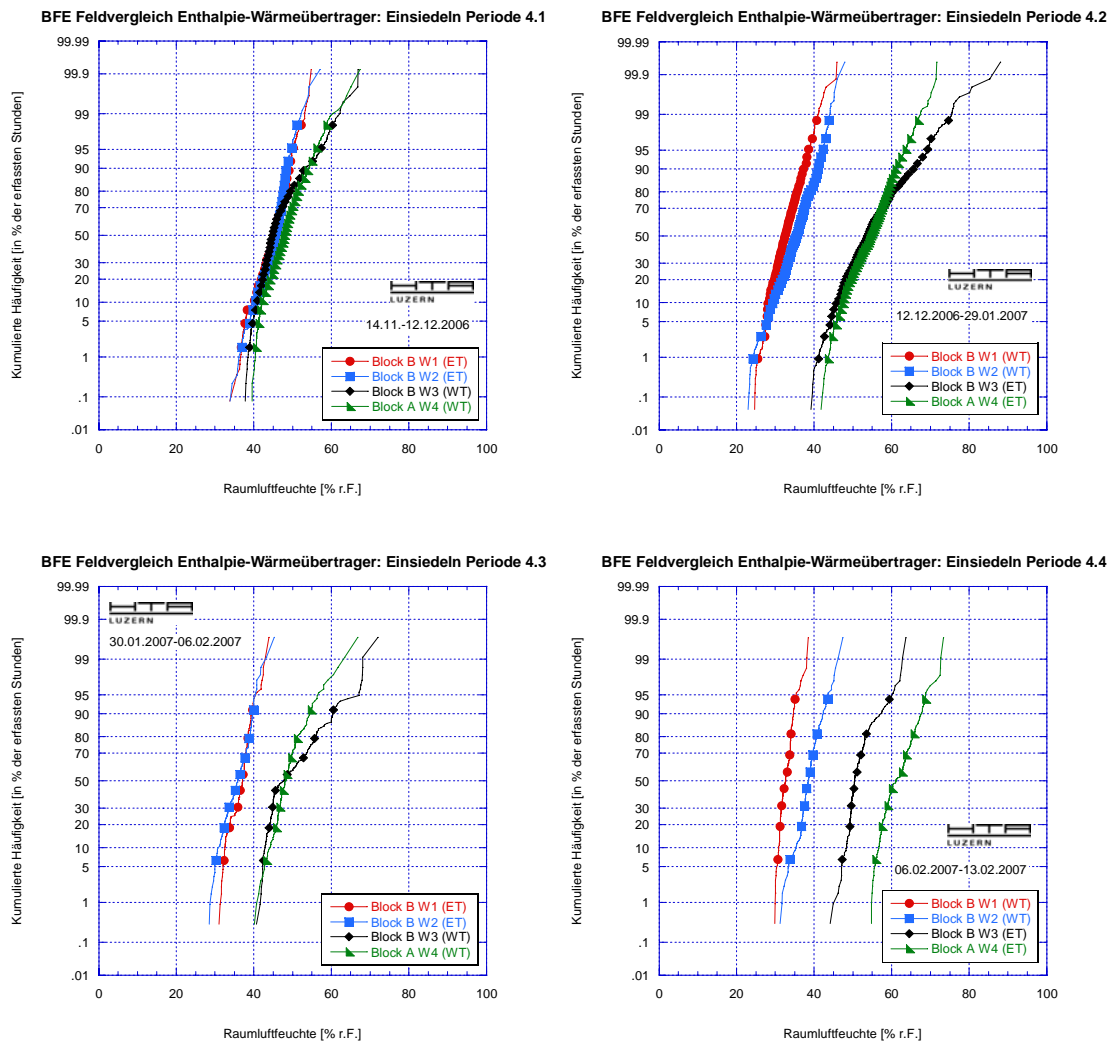
Einsiedeln Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur



Figur 23: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufttemperatur für Einsiedeln im Winter 2007.

Bemerkenswert ist die weite Spanne der registrierten Raumlufttemperaturen von 17 bis 25°C. Diese sind unabhängig vom eingesetzten System

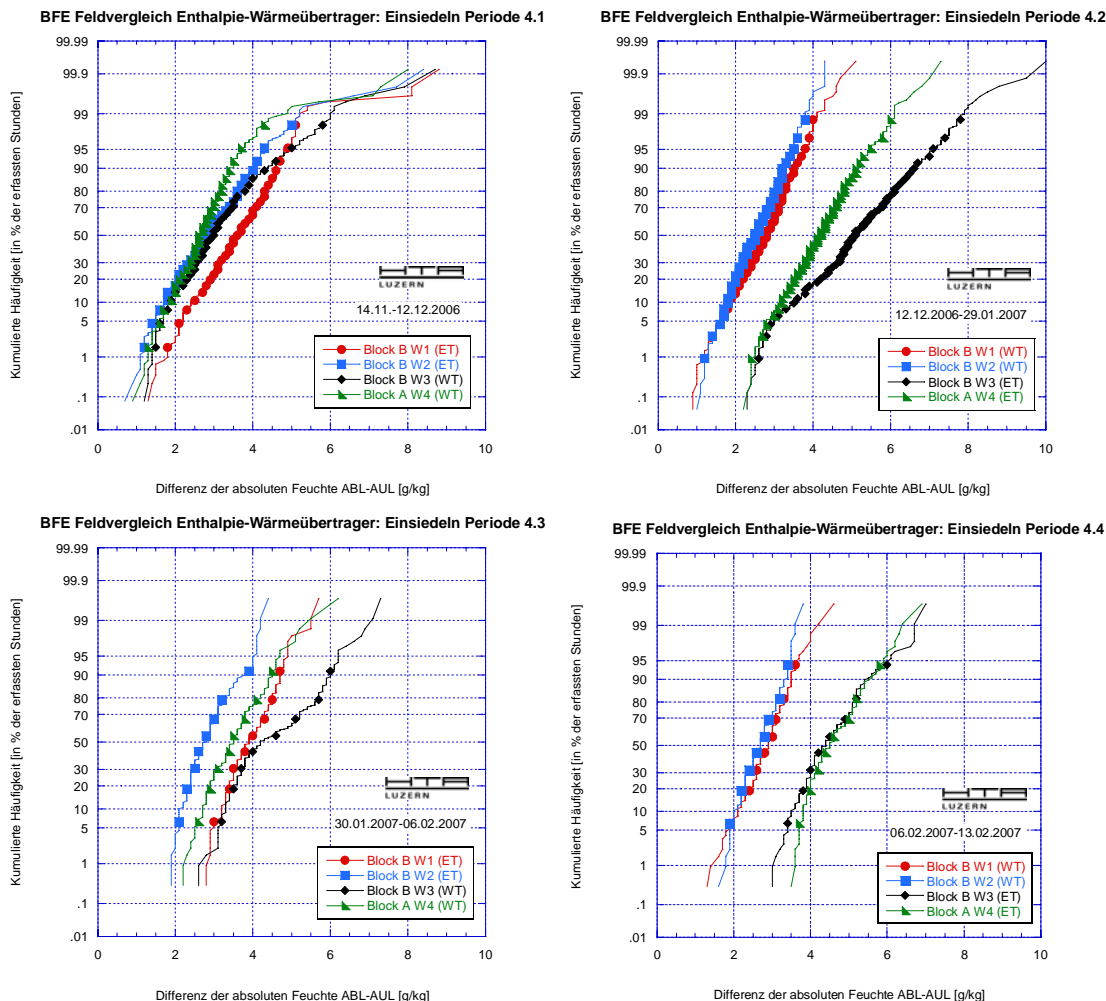
Einsiedeln Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte



Figur 24: Kumulierte Häufigkeiten der Raumlufffeuchte für Einsiedeln im Winter 2007.

Unter 30 %r.F. liegende Werte wurden je nach Periode an 5 % aller erfassten Stunden registriert. Diese Stunden betrafen Wohnungen mit Wärmetauschern. Über 60 %r.F. liegende Werte wurden in der Periode 4.4 vor allem in Block A W4 registriert. Zu beachten ist, dass dazu korrespondierende tiefe Raumlufftemperaturen von unter 19°C an 90 % aller erfassten Stunden registriert wurden

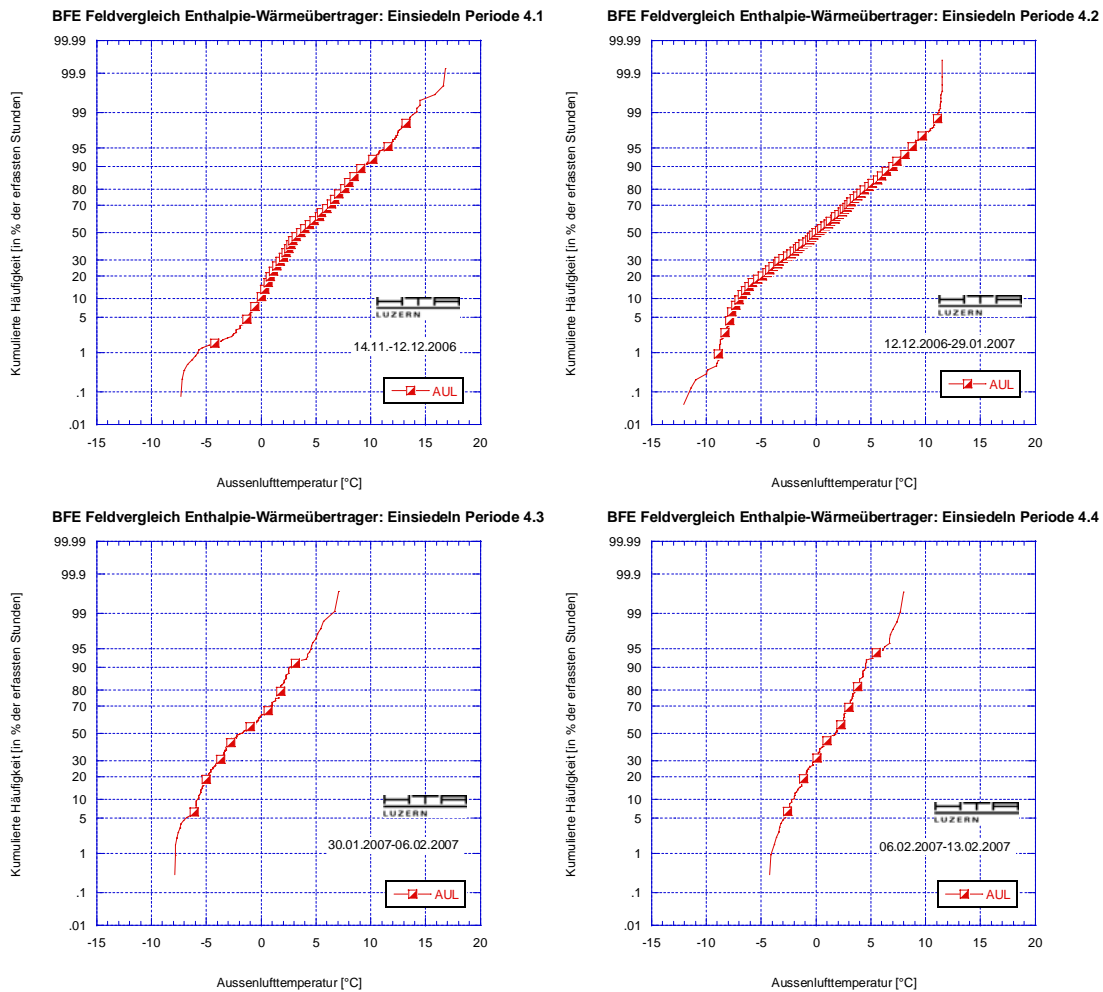
Einsiedeln Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL



Figur 25: Kumulierte Häufigkeiten der Differenz der absoluten Feuchte ABL-AUL für Einsiedeln im Winter 2007.

In den Perioden 4.2 und 4.4 ist ein deutlicher Unterschied zwischen Enthalpietauscher und Wärmetauscher feststellbar. Er beträgt für rund 2 bis 3 g/kg absolute Feuchte. In den anderen Perioden 4.1 und 4.3 sind die Unterschiede weniger signifikant, wenn nicht sogar konträr. Aus Figur 26 ist ersichtlich, dass in den Perioden 4.2 und 4.4 die kumulierte Häufigkeit der Aussenluft für 0°C 50 % resp. 30 % betrug.

Einsiedeln Winter 2007: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur



Figur 26: Kumulierte Häufigkeiten der Aussenlufttemperatur für Einsiedeln im Winter 2007.

Die registrierten Minimal- und Maximalwerte der Aussenluft betrugen in den vier Perioden -12°C resp. 17°C. Unter 0 °C liegende Aussenlufttemperaturen wurden je nach Periode an 10 bis 65 % aller erfassten Stunden registriert.

Kalkulatorischer Vergleich und Abschätzung des Verhaltens eines rotierenden Enthalpietauschers

Um einen kalkulatorischen Vergleich und die Abschätzung des Verhaltens eines rotierenden Enthalpietauschers vornehmen zu können, wurde ein im BFE Projekt Feuchte in Niedrigenergiebauten [3] verwendetes Excel-Programm erweitert (Abbildungen 9 bis 12). Mit einigen Anpassungen können die gemessenen Daten des Standortes Einsiedeln übernommen werden, um zu untersuchen, wie sich ein rotierender Enthalpietauscher verhalten hätte. Am Standort Einsiedeln wurden die Kenndaten wie Wohnungsvolumen, mechanischer Luftvolumenstrom, Feuchteabgaben und die Belegung erhoben und als Eingabewerte verwendet (Abbildungen 9 bis 10). Ursprünglich sollten die auf dem Prüfstand für Kompaktlüftungsgeräte ermittelten Kennlinien für die Feuchteübertragung verwendet werden. Es hat sich aber gezeigt, dass im Feldeinsatz tiefere Übertragungswerte realisiert werden (Abbildung 11). Die bei der Laborprüfung festgestellten Leckagen wirken sich bei Seriengeräten im Feldeinsatz aus. Auf der Basis der vorerwähnten Eingabedaten erfolgten die Berechnungen. Die Darstellung erfolgt in Form von kumulierten Häufigkeiten (Figur 27 bis 30). Es wird auch eine Aussage über die internen Feuchtelasten gemacht. (Figur 31 bis 32).

Abbildung 9: Allgemeine Eingabedaten für Block B W1 (links) und Block A W4 (rechts).

Abbildung 10: Eingabedaten zur Personenbelegung für Block B W1 (links) und Block A W4 (rechts).

Eingabe WRG

Daten WRG mit Feuchteübertragung

Aussentemperatur: -22 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 °C

Feuchteübertragung: 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50

Aussentemperatur: 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 °C

Feuchteübertragung: 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50 0.50

Schliessen Abbrechen

Eingabe WRG

Daten WRG mit Feuchteübertragung

Aussentemperatur: -22 -20 -18 -16 -14 -12 -10 -8 -6 -4 -2 0 2 4 °C

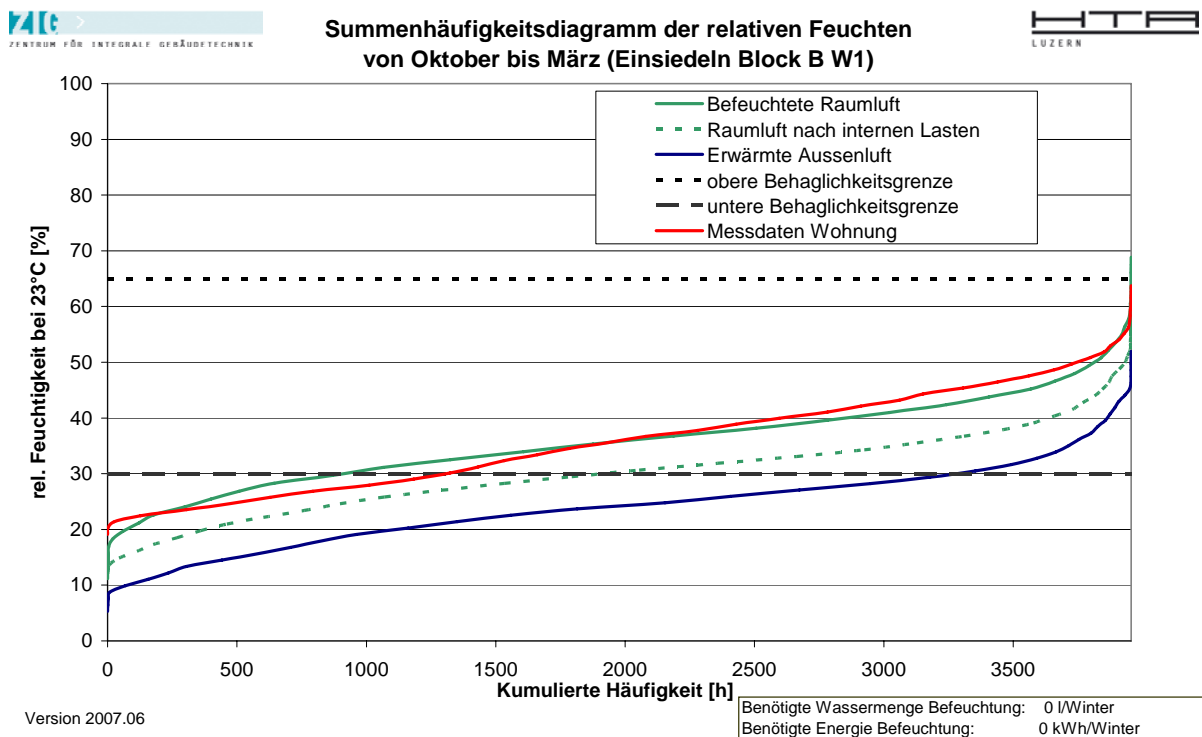
Feuchteübertragung: 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.62 0.53

Aussentemperatur: 6 8 10 12 14 16 18 20 22 24 26 28 30 32 °C

Feuchteübertragung: 0.44 0.35 0.27 0.18 0.09 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01

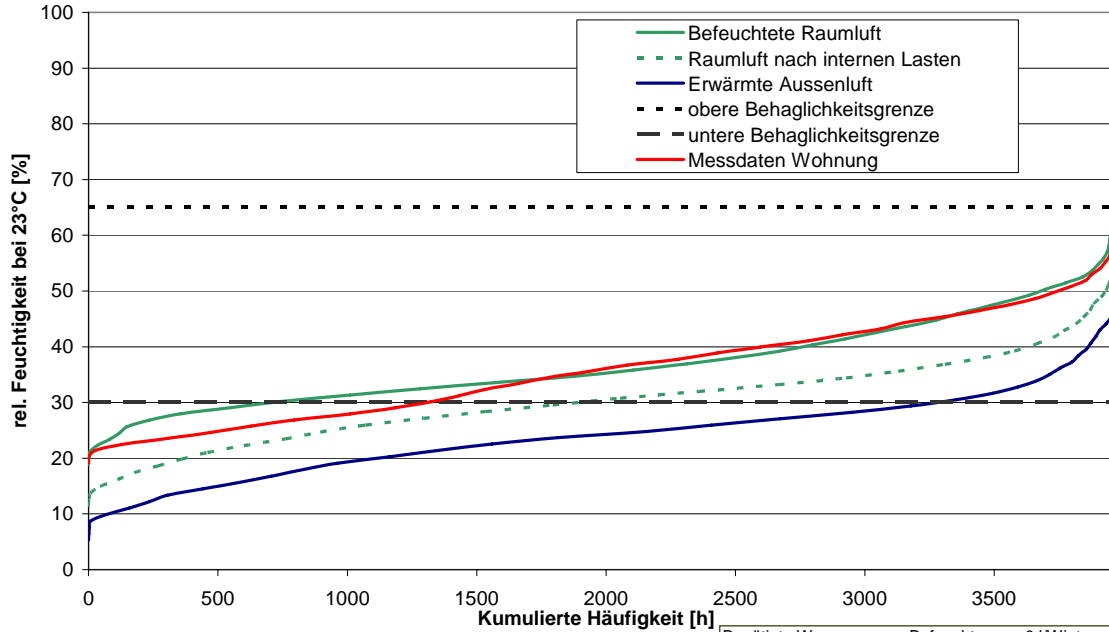
Schliessen Abbrechen

Abbildung 11: Eingabedaten zur Feuchteübertragung mit Enthalpietauscher (oben) und mit Rotor (unten).



Figur 27: Die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte für Block B W1 mit Enthalpietauscher (Membran).

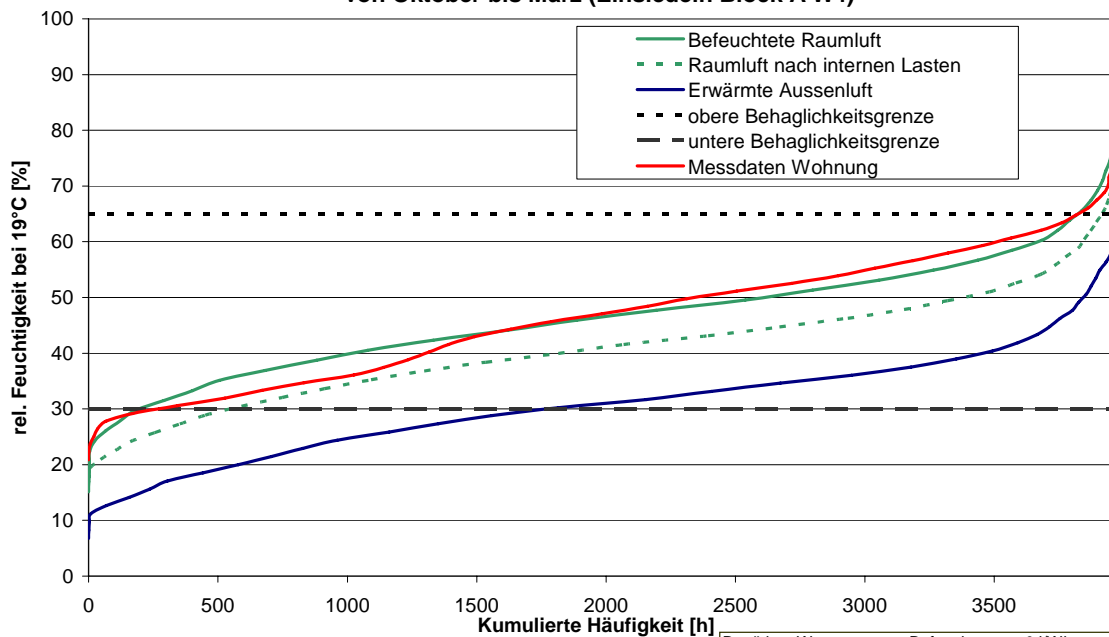
Summenhäufigkeitsdiagramm der relativen Feuchten von Oktober bis März (Einsiedeln Block B W1)



Version 2007.06

Figur 28: Die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte für Block B W1 mit Rotor (Ionenaustauscharz).

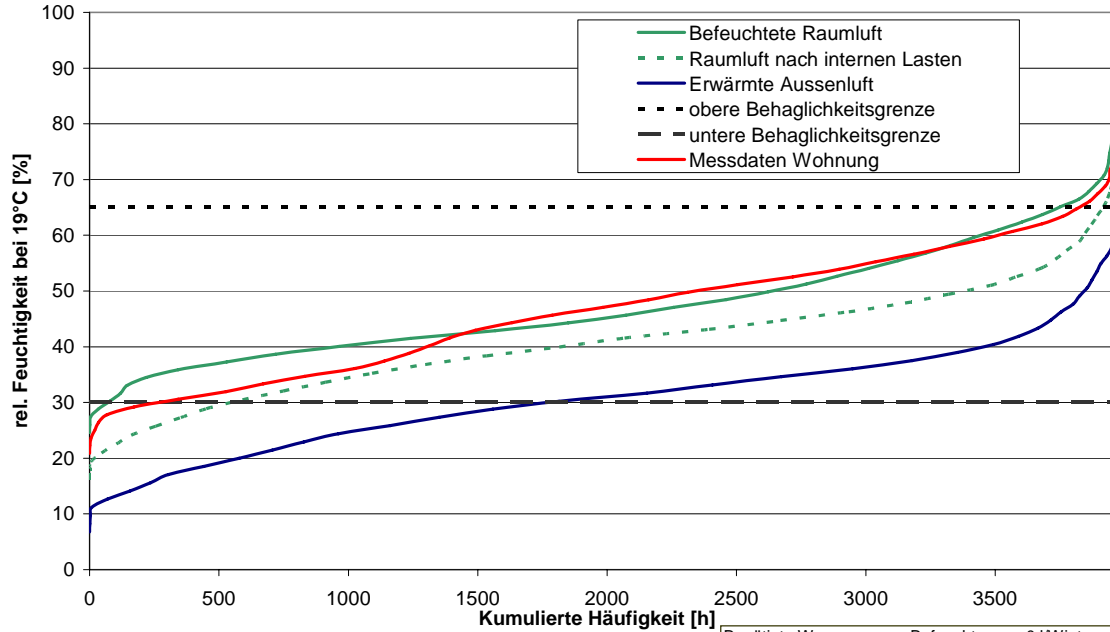
Summenhäufigkeitsdiagramm der relativen Feuchten von Oktober bis März (Einsiedeln Block A W4)



Version 2007.06

Figur 29: Die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte für Block A W4 mit Enthalpietauscher (Membran).

Summenhäufigkeitsdiagramm der relativen Feuchten von Oktober bis März (Einsiedeln Block A W4)

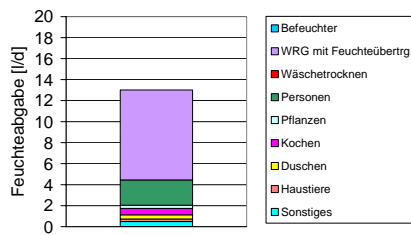


Version 2007.06

Benötigte Wassermenge Befeuchtung: 0 l/Winter
Benötigte Energie Befeuchtung: 0 kWh/Winter

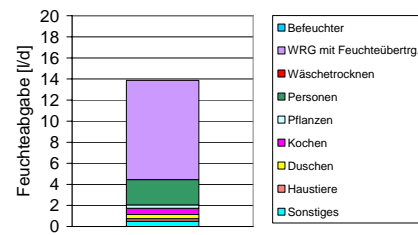
Figur 30: Die kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte für Block A W4 mit Rotor (Ionenaustauscharz).

durchschnittliche Feuchteabgaben von Oktober bis März



Version 2007.06

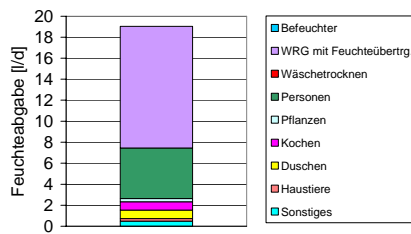
durchschnittliche Feuchteabgaben von Oktober bis März



Version 2007.06

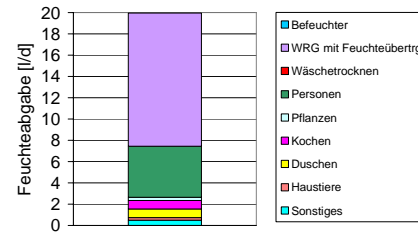
Figur 31: Feuchteabgaben für Block B W1 mit Enthalpietauscher (links) und mit Rotor (rechts).

durchschnittliche Feuchteabgaben von Oktober bis März



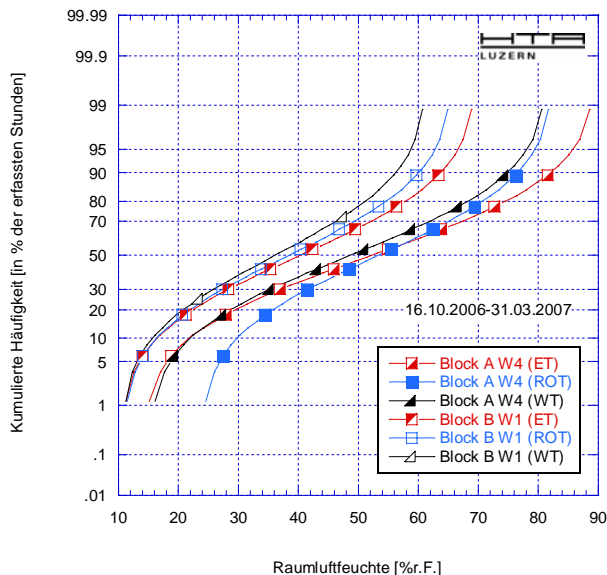
Version 2007.06

durchschnittliche Feuchteabgaben von Oktober bis März



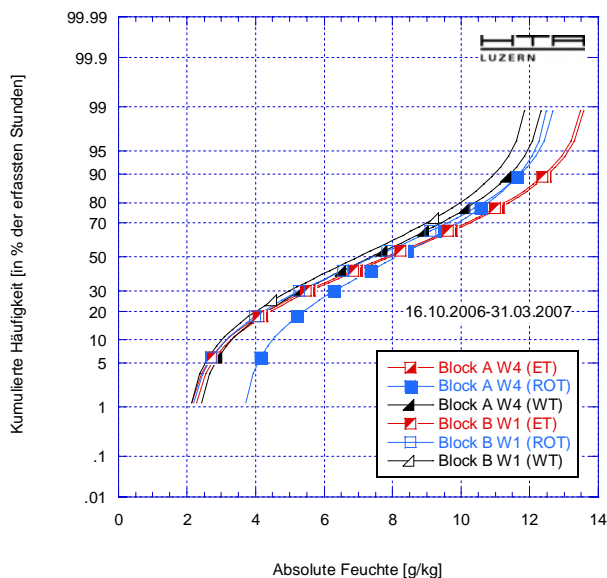
Version 2007.06

Figur 32: Feuchteabgaben für Block A W4 mit Enthalpietauscher (links) und mit Rotor (rechts).



Figur 33: Kumulierte Häufigkeit der relativen Feuchte beim Systemvergleich für Einsiedeln.

Bei niedriger Belegung wie in Block B W1 (2 Personen) ist kaum ein Unterschied zwischen Enthalpietauscher und Rotor feststellbar (Figur 33). Bei höherer Belegung wie in Block A W4 (4 Personen) machen sich deutlichere Unterschiede bemerkbar. So wirkt sich die Veränderung der Rotordrehzahl bei hoher relativer Feuchte aus. Das höhere Feuchteverhältnis des Rotorsystems wird bei tieferen relativen Feuchten und höherer Belegung sichtbar. Beim Rotor wären an 10 % aller erfassten Stunden Werte unter 30 %r.F. registriert worden. Beim Enthalpietauscher wäre dies an 20 % aller erfassten Stunden der Fall gewesen.



Figur 34: Kumulierte Häufigkeit der absoluten Feuchte beim Systemvergleich für Einsiedeln.

Die Enthalpietauscher zeigen bezüglich niedriger absoluter Feuchte bei niedriger und mittlerer Belegung identisches Verhalten (Figur 34). Dieses Verhalten ist auch identisch mit dem Rotor bei niedriger Belegung. Einzig der Rotor kann sich bei mittlerer Belegung abheben. Bei höherer absoluter Feuchte zeigen Rotor und Enthalpietauscher leicht unterschiedliches Verhalten. Ein Einfluss der Belegung auf das Verhalten ist nicht feststellbar.

5. Diskussion

Beim wechselweisen Einsatz von Enthalpie- und Wärmetauschern in 4 Objekten hat sich gezeigt, dass Enthalpietauscher einen Beitrag zur Komfortsteigerung in Niedrigenergiebauten leisten können. Die Voraussetzung dazu ist das Vorhandensein interner Feuchtelasten. Interne Feuchtelasten entstehen beim Aufenthalt von Menschen in Gebäuden, beim Vorhandensein von Pflanzen und dem regelmässigen Gebrauch von Kochstellen sowie Nasszellen.

Der Winter 2006/2007 war gekennzeichnet durch aufeinander folgende monatliche Wärmüberschüsse. Bei deutlich tieferen Aussenlufttemperaturen und entsprechender Frequenz derselben würde sich ein deutlicheres Bild über die Wirkungsweise des Enthalpietauschers ergeben.

Rechnerische Vergleiche zwischen Enthalpietauscher mit Membran und Rotor mit Ionenaustauschharz haben ergeben, dass bei niedriger Belegung kaum ein Unterschied zwischen Enthalpietauscher mit Membran und Rotor mit Ionenaustauschharz feststellbar ist, obwohl der Rotor das höhere Feuchteverhältnis aufweist. Die Möglichkeit der Rotor-Drehzahlvariation senkt bei hoher relativer Feuchte und normaler Belegung (4 Personen) das Feuchteniveau um 10 % r.F. ab. Diese Option steht dem Enthalpietauscher nicht zur Verfügung. Bei tiefer relativer Feuchte und niedriger Belegung sind Unterschiede im Verhalten kaum feststellbar und die beiden Prinzipien in ihren Auswirkungen damit nahezu identisch.

Es hat sich bei den rechnerischen Vergleichen zudem gezeigt, dass das Feuchteverhältnis im Feld kleiner ausfällt als im Labor. Vorhandene Leckagen tragen zu diesem Umstand bei. Die Seriengeräte unterscheiden sich bisweilen deutlich von den im Labor untersuchten Geräten. Hier besteht noch ein grosses Potenzial zur Qualitätssteigerung. Das Lüftungsverhalten der Benutzer und die Infiltration ist bei dieser Betrachtung nicht zu vernachlässigen. Ebenso ist einmal mehr darauf hinzuweisen, dass Anlagen mit kontrollierter Wohnungslüftung schlecht abgeglichen sind. Unnötig grosse Druckverluste in Kanalnetzen tragen zu diesem Umstand bei.

6. Schlussfolgerungen

Enthalpietauscher stellen eine Möglichkeit dar, die relative Feuchte in Räumen anzuheben und damit zur Komfortsteigerung beizutragen.

Ohne interne Feuchtelasten und bei hohen spezifischen Luftmengen pro Person kann jedoch der Enthalpietauscher - und damit auch ein anderes System, das auf Feuchteübertragung basiert - seine Wirkung nicht richtig entfalten.

Der Unterschied der absoluten Feuchte zwischen Abluft und Aussenluft beträgt beim Einsatz des Enthalpietauschers 1 bis 2 g/kg.

Eine Überfeuchtung, die auf den Einsatz des Enthalpietauschers direkt zurückzuführen wäre, konnte nicht festgestellt werden. Die Simulation der Jahresverläufe lässt theoretisch eine zeitweise, durch die Enthalpietauscher verstärkte Überfeuchtung erwarten [3]. Die Messungen zeigen aber, dass die kritischen Bedingungen im Frühling und Sommer auftreten, wenn die Raumluftfeuchte weit stärker durch die Fensterlüftung als durch die Enthalpietauscher bestimmt wird.

Die Messkampagne war geprägt von aufeinander folgenden Wintermonaten mit teilweise deutlichen Wärmeüberschüssen. Der Winter 2006/2007 war ein – bisheriger - Ausnahmefall. Bei tieferen Aussenlufttemperaturen hätten sich die Unterschiede zwischen Enthalpie- und Wärmetauscher wohl deutlicher gezeigt.

Referenzen

- [1] Kriesi R., Frei B., Dittmar C.: *Enthalpie-Plattentauscher ein weiterer Schritt zur Komfortsteigerung*, 10. Internationale Passivhaustagung, Tagungsband, Seiten 179 – 184, Hannover 2006.
- [2] Kriesi R., Frei B., Schnyder Ph.: *Der Enthalpie-Plattentauscher Comfohygro zur weiteren Verbesserung des Komforts im Innenraum*, 14. Schweizerisches Status-Seminar Energie- und Umweltforschung im Bauwesen, Tagungsband, Seiten 179 – 184, Zürich 2006.
- [3] Frei B., Moosberger S., Wenger L. et al.: *Feuchte in Niedrigenergiebauten*, Forschungsprogramm Rationelle Energieverwendung in Gebäuden, Schlussbericht und Teilberichte, Bundesamt für Energie BFE, Horw 2007.
- [4] B. Frei, F. Reichmuth, H. Huber: *Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser*, Schlussbericht, BFE Projekt Vergleichende Auswertung schweizerischer Passivhäuser, 98 Seiten, Horw 2004.