

Jahresbericht 2004, 2. Dezember 2004

Projekt Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen

Autor und Koautoren	Adrian E. Weitnauer
beauftragte Institution	Weitnauer Messtechnik
Adresse	Eich 1, 8752 Näfels
Telefon, E-mail, Internetadresse	055 612 51 31, www.weitnauer-messtechnik.ch
BFE Projekt-/Vertrag-Nummer	100492/150602
Dauer des Projekts (von – bis)	1. November 2003 bis 31. März 2005

ZUSAMMENFASSUNG

In der Schweiz werden nach der Einführung des neuen Zivilschutzkonzepts rund 3000 unterirdische Anlagen existieren. Jede dieser Anlagen ist nur schwach frequentiert, trotzdem muss die Ernstfallfähigkeit jederzeit oder mindestens nach definierter Inbetriebnahmezeit gewährleistet sein. Die Anlagen müssen wegen der möglichen Schimmelbildung und der Gefahr von Radon oder Methan mit frischer Luft gespült und in aller Regel mechanisch entfeuchtet werden, damit minimale Anforderungen an das Raumklima zur Lagerung von Gütern erfüllt werden.

Durch optimale Ausnutzung der Differenzen des Feuchtigkeitsgehalts zwischen Anlageninnerem und der Umgebung ist es möglich, die energieintensive mechanische Entfeuchtung zu reduzieren, ja sogar zwischenzeitlich ganz darauf zu verzichten.

Dieses Projekt dient nun dazu, das Sparpotenzial nachzuweisen, wenn alle Anlagen der Schweiz durch einen entsprechenden Regler ausgerüstet würden. Wie sich gezeigt hat, ist ein wichtiger Meilenstein die Sensorik. Die Anlageneigentümer lassen sich nur dann zum Einsatz einer Automatik motivieren, wenn es gelingt, die Kosten dafür tief zu halten.

Projektziele

In der Schweiz werden nach der Zivilschutzreorganisation noch rund 3000 Anlagen existieren. Das *Bundesamt für Zivilschutz* nennt als Zielgrösse für die Anlagen, dass diese 4.7% der Gesamtbevölkerung Raum bieten sollen. Dies entspricht also 330'000 Bettenplätzen in der Schweiz mit im Mittel über 100 Bettenplätzen pro Anlage.

Der Energieaufwand zur reinen Entfeuchtung jeder Anlage liegt bei 10'000 kWh/a. Durch optimales Lüften dürfte dieser Aufwand um mindestens 20% bis 30% reduziert werden können. Das ergibt eine Einsparung von 2000 kWh bis 3000 kWh pro Jahr, was sich in Kosteneinsparungen von mindestens 200.- bis 300.- pro Jahr und Anlage manifestiert.

Hochgerechnet auf die ganze Schweiz ergeben sich so mögliche Einsparungen im Bereich von 10 Gigawattstunden oder rund einer Million Schweizer Franken pro Jahr.

Mit Hilfe dieser Studie soll nun die genaue Abschätzung des Potenzials dieser Massnahme ermöglicht werden. Das vorgeschlagene Verfahren kann selbstverständlich für alle Anwendungen Einsatz finden, wo eine Lüftung bereits vorhanden ist und gleichzeitig eine Notwendigkeit zur Entfeuchtung besteht.

Aktuell werden Zivilschutzanlagen durch mobile Geräte entfeuchtet. Zusätzlich sind Schaltuhren installiert, die in den Nachtstunden eine minimale Belüftung sicherstellen, denn ein Luftaustausch ist nach der TWU (Technische Weisungen für den Unterhalt von Zivilschutzanlagen) ohnehin gefordert. Die Notwendigkeit der Zwangslüftung ist wegen des Eindringens von Schadgasen wie Radon und Methan aus dem Untergrund durch die Gebäudehülle gegeben. Aus dem Gesichtspunkt der energiesparenden Entfeuchtung ist somit eine Optimierung möglich und auch sinnvoll.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Die Steuerrechner wurden aufgebaut, die Sensorik in mehreren Schritten evaluiert. Weiter wurde eine Anzahl von TESTO testostor 171 Datenloggern beschafft und kalibriert.

Gleichzeitig wurde mit einer eigens aufgebauten Wetterstation die lokale Witterung genauer studiert. Diese Daten dienen dazu, den Steueralgorithmus zu testen und Vergleichsdaten für untersuchte Sensoren zu erhalten.

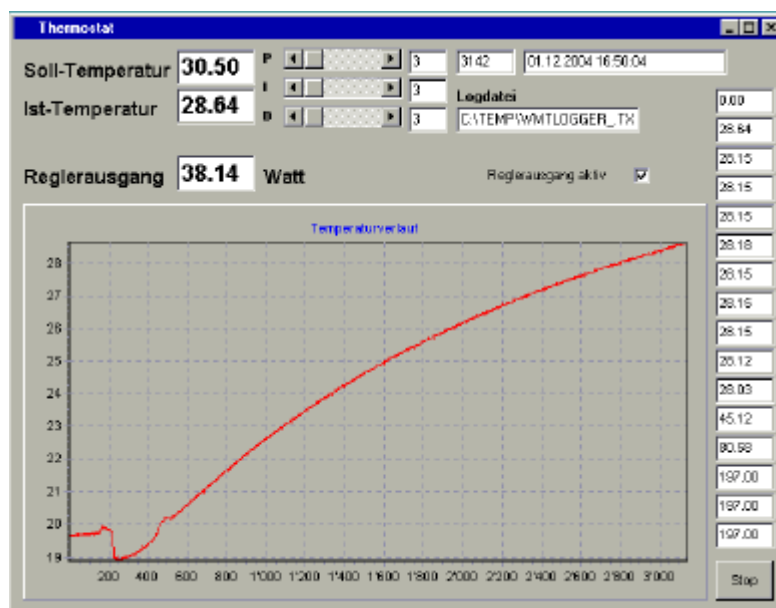
Eine weitere Aufgabe war die Konzeption des Steueralgorithmus. Es zeigte sich bald, dass dieser empfindlich auf Ungenauigkeiten in der Messung reagiert. Es ist ein Ziel des Projekts, auch eine Lösung für die Sensorik zu nennen. Diese muss neben der hohen Messgenauigkeit auch sehr günstig zu beschaffen und herzustellen sein. Leider wird der zweite Punkt von den eingeführten Produkten nicht erreicht. Wir stellen uns einen engen Kostenrahmen vor, der von den Anlageneigentümern vor dem gegenwärtigen finanziellen Hintergrund noch akzeptiert werden dürfte.

Wir haben uns schliesslich entschieden, einen robusten Sensor auf der Basis eines SENSIRION-Chips zu entwickeln. Dieser musste sich im Rahmen vieler Versuchsreihen in der Klimakammer und auch im Aussenbereich bewähren.

KLIMAKAMMER

In einer geregelten Klimakammer werden alle Sensoren möglichst nahe beieinander platziert. Alle Sensoren werden mit einer Rate von 15 Sekunden abgetastet; der digitale PID-Regler arbeitet dagegen mit einer Abtastrate von einer Sekunde. Geregelt wird auf die Isttemperatur in der Nähe des Luftauslasses in die Versuchskammer. Der Regler überwacht gleichzeitig die Temperaturhomogenität im oberen Bereich der Versuchskammer mit 9 Temperatursensoren, welche mit drei Sekunden abgeastet werden. Gemäss den Logdateien liegt die Temperaturhomogenität – sofern die Kammer nicht geöffnet wird – bei besser als 0.2°C.

Das untenstehende Bild zeigt den Regler in Aktion: gezeigt wird ein Aufheizvorgang auf 30.5°C. Im linken oberen Bereich sind Soll- und Isttemperatur sowie die aktuelle Heizleistung in Watt. In der Mitte die PID-Reglerparameter. Am rechten Rand sind die Temperaturen aufgeführt. Die zweite Zelle zeigt die Isttemperatur, danach folgen die 9 Werte der Homogenitätsfühler.



Die Versuchskammer wird mit einem Luftstrom, welcher durch einen Ventilator erzeugt wird, von rund 2 bis 5 m/s durchströmt. Mit Hilfe eines kleinen Dampfgenerators können Feuchtigkeits-sprünge erzeugt werden. Der erzeugte Dampfstoß wird mit einer Düse direkt in den Luftstrom eingebracht. Da die Luft nicht getrocknet werden kann, wird der umgekehrte Vorgang durch Austausch der Kammerluft bewerkstelligt. Dazu ist eine spezielle Luftklappe vorhanden.

Für diese Versuchsreihe wurden verschiedene Sprünge ausgeführt, um das Verhalten der Sensoren aufzuzeichnen.

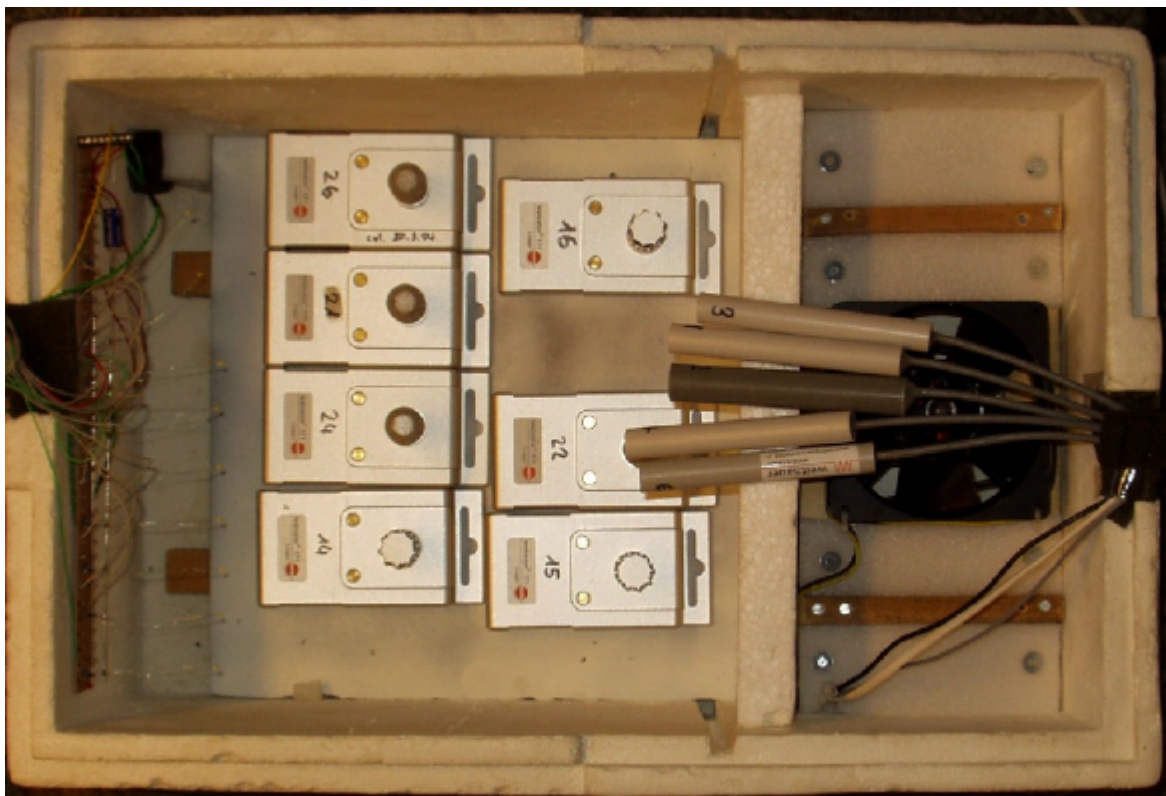
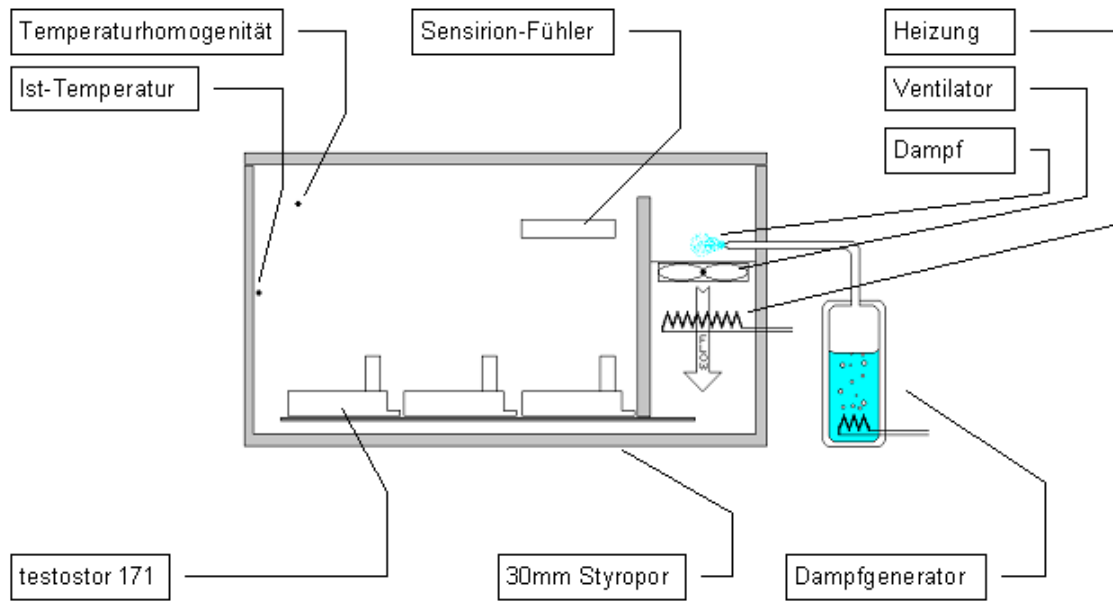
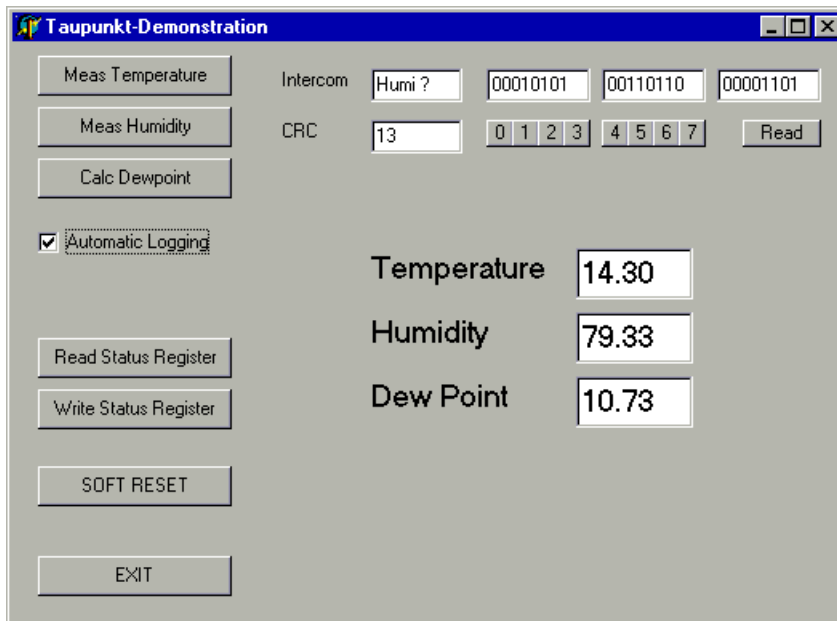


Bild: geöffnete Klimakammer mit Prüflingen (TESTO testostor 171 und fünf Sensoren aus dem Feldversuch). Die feinen Drähte auf der linken Seite sind die neun Temperaturfühler zur Homogenitätsüberwachung. Das rechte Drittel des Raums wird eingenommen durch die Lüfter- und Heizeinheit. Nicht erkennbar auf dem Bild ist das dünne Röhrchen, das den Dampf aus dem Dampfgenerator in die Kammer transportiert.

AUFBAU DER SENSOREN

Die Sensirion-SHT15-Sensorchips wurden an ein Flachkabel gelötet, das den Sensorchip an einen eigens entwickelten Kabelverstärker anschliesst. Mit Hilfe dieses Verstärkers können die Signale über mindestens 100m lange Kabel transportiert werden. Da die Sensoren nur langsam abgetastet werden, reicht eine Clockrate von etwa einer Millisekunde völlig.



Die Kommunikation mit den Sensoren ist über eine proprietäre digitale Schnittstelle gelöst. (Das Bild oben zeigt die eigens von uns entwickelte Software zur Sensorprüfung)

Das Verhalten der nackten Sensorchips ist gut. Auf Empfehlung von Sensirion wurden die Sensorchips in die neuen Kapfen eingepackt. Die Kapfen wurden mit den Sensorchips verklebt, damit keine Luft aus dem Innenraum in den Messraum eindringen kann.

Weil die Chips in Sensoren verwendet werden sollen, die recht robust sein müssen, wurde der gesamte Aufbau in ein Kunststoffrohr eingebracht. Damit entsteht ein hermetisch abgeschlossener Sensor mit 120mm Länge und einem Durchmesser von 15mm.

Die Sensoren werden mit einem eingeklebten Kabel von 3m Länge versehen, an dessen Ende ein Universalstecker montiert ist.

Es ist vorgesehen, durch SMD-Bauteile eine weitere Miniaturisierung zu erreichen. Dadurch dürfte der Sensor nicht viel dicker als das Kabel werden.

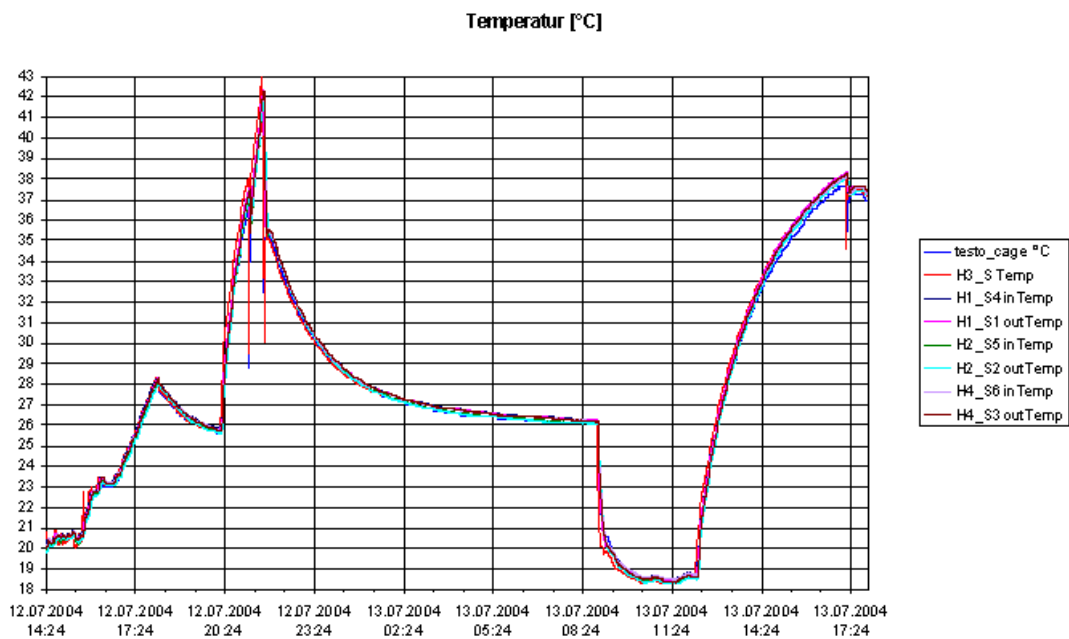
Wie diese Versuchreihe klarstellt, ist es sehr wichtig, dass der Gasraum hinter der Sensoreinheit möglichst klein oder gar vergossen ist.

ERGEBNISSE DER SENSORVALIDIERUNG

Sensorbezeichnung

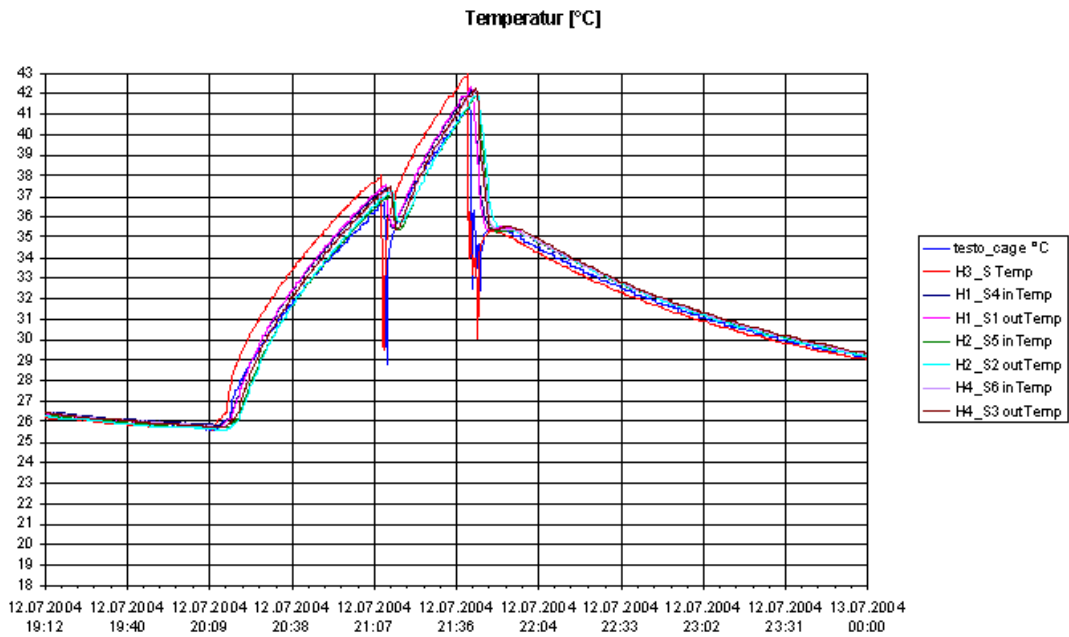
Sensor	Bezeichnung	Beschreibung
testo_cage	Offener Testo testostor 171	Datenlogger Nr. 16 zum Vergleich
H3_S	“nackter” SHT15	Sensor ohne Gehäuse
H1_S1	Sensor Nr. 1 (Aussen)	Gekapselter Aufbau mit Kappe
H1_S4	Sensor Nr. 4 (Innen)	dito
H2_S2	Sensor Nr. 2 (Aussen)	dito
H2_S5	Sensor Nr. 5 (Innen)	dito
H4_S3	Sensor Nr. 3 (Aussen)	dito
H4_S6	Sensor Nr. 6 (Innen)	dito

Temperaturgang

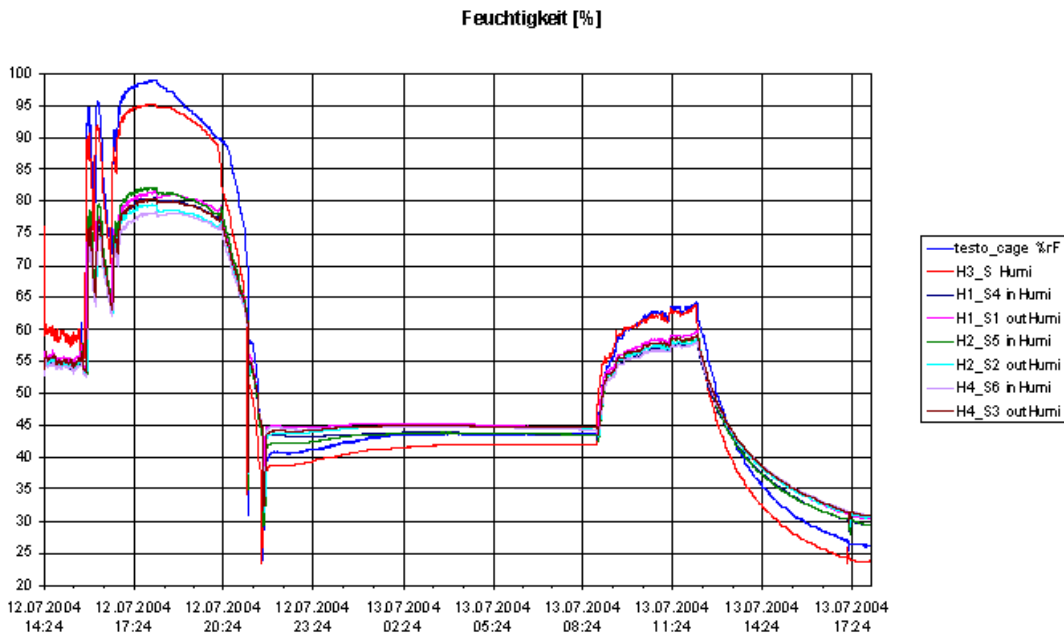


Der Temperaturgang ist recht gut. Durch die Kapselung reagieren die Sensoren etwas langsamer als der nackte Sensor oder gar der Testo-Logger. Die Unterschiede der Messwerte sind gering. Die Temperaturmessung ist somit gelöst und auch problemlos.

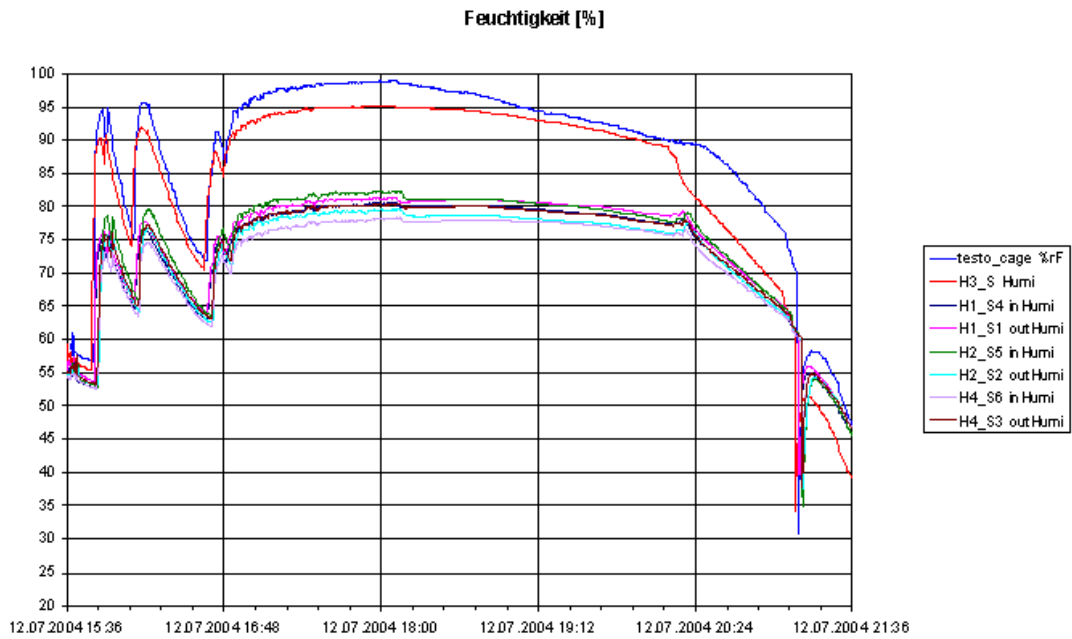
Das nächste Bild zeigt einen vergrößerten Ausschnitt des Temperatursprungs. Die geringe horizontale Verschiebung ist auf einen Unterschied der Abtastuhren zurückzuführen.



Relative Feuchtigkeit

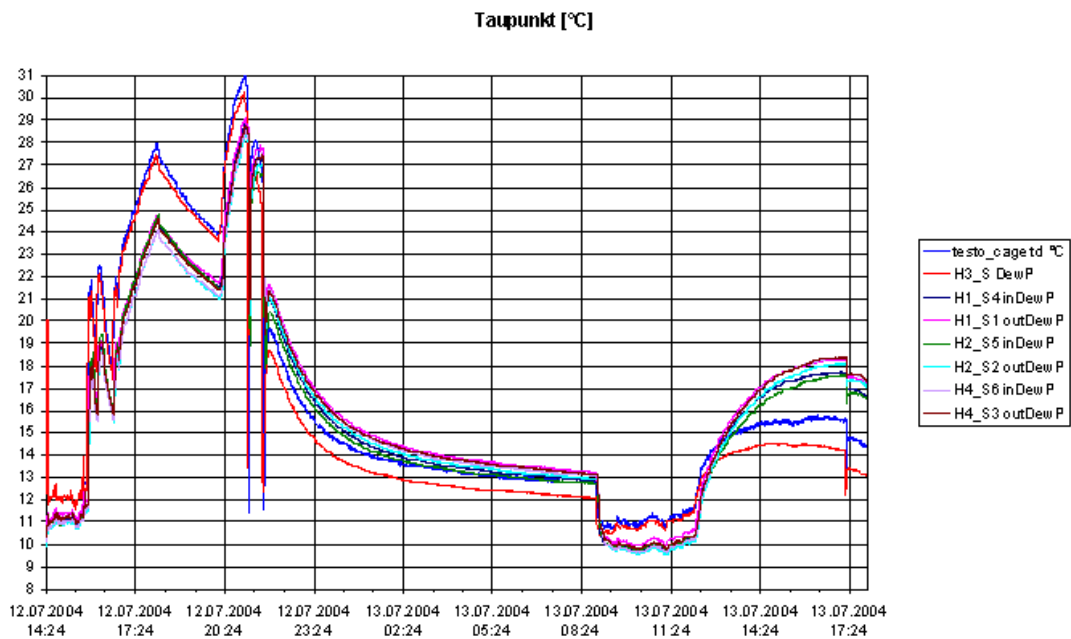


Die relative Feuchtigkeit wird ungenügend erfasst. Obwohl die Sensoren sehr rasch zu arbeiten scheinen, entstehen grosse Amplitudenfehler. Auch bei langer Ausgleichszeit scheint sich dies nicht auszugleichen. Der nackte Sensorchip hingegen arbeitet recht gut, obwohl ein Unterschied zwischen dem testostor und dem Chip unschwer zu erkennen ist. Diese Differenz beträgt bis zu 5% rel. Feuchte.



Dieses Bild zeigt den zeitlich gedehnten Verlauf mit den Dampfstoßversuchen. Alle Sensoren zeigen ein rasches Verhalten. Aber die Messwerte sind zu ungenau.

Taupunkt



In Funktion der relativen Feuchtigkeit ist auch die Ermittlung des Taupunktes stark beeinträchtigt.

Fazit

Die Kappen für die Sensoren scheinen mehr Probleme zu verursachen als sie zu lösen versprechen. Ich spreche hier die Dichtungsprobleme an. Die Sensorkappe führt nämlich dazu, dass eine Vorder- und eine Rückseite entsteht, die durch Diffusion zu Messfehlern führen kann.

Ich halte es nach den Versuchen für besser, den ganzen Sensorchip dem zu messenden Medium auszusetzen. Dies allein stellt sicher, dass keine Diffusionsprobleme auftreten.

Die Verwendung der Kappe könnte dazu führen, dass sich hinter der Membran Feuchtigkeit ansammelt. Dies könnte nach einer langen Periode mit hohen Temperaturen und hoher Luftfeuchtigkeit passieren. Dieser Effekt hat in der Vergangenheit schon oft zu Problemen in Schaltschränken geführt.

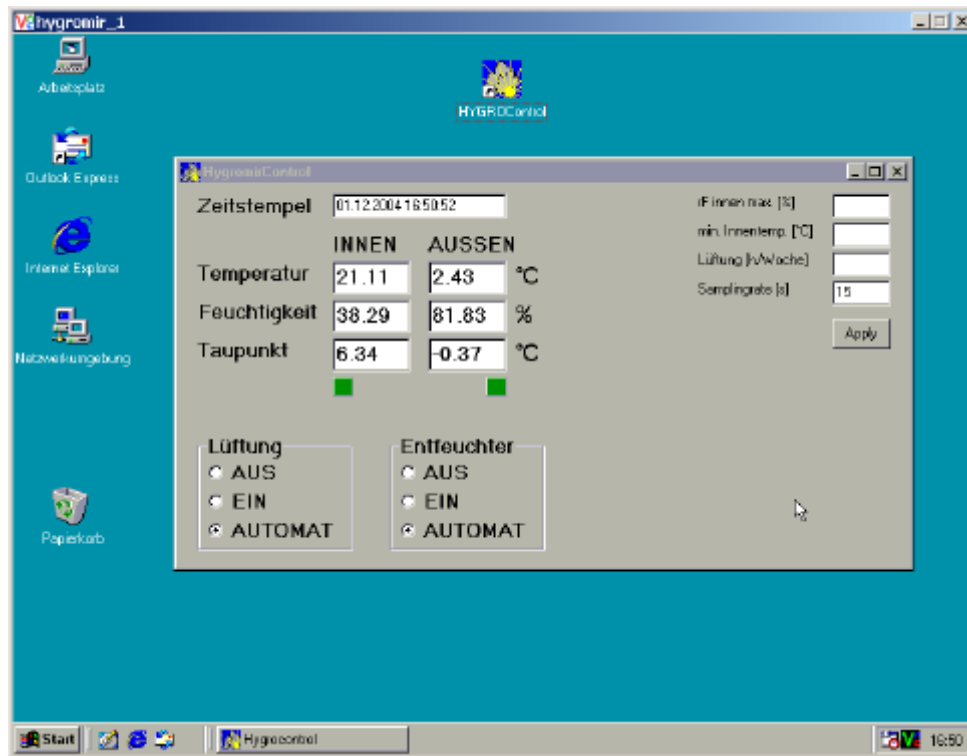


Die teuren TESTO-Datalogger scheinen eine „digitale Kosmetik“ bei den Messwerten für die Feuchtigkeit anzuwenden. Sie zeichnen sich aus durch eine äusserst hohe Reaktionsgeschwindigkeit. Allerdings werden die Feuchtigkeitswerte bei 100% rH einfach rechnerisch begrenzt. Dieses Verhalten zeigen die SENSIRION-Chips nicht.

SOFTWARE UND HARDWARE DER DATENLOGGER

Die Software für die Regelrechner wurde in unserem Hause entwickelt. Wir haben uns für eine Hochsprache entschieden, weil sich dadurch die Funktionen zur Registrierung und die Rechenalgorithmen in Fließkomma-Arithmetik aufbauen lassen. Im fertigen Produkt muss aus Kostengründen darauf verzichtet werden.

Die Software arbeitet mit der Hardware in den spezifisch konfigurierten Rechnern und verfügt nur über wenig Bedienungsmöglichkeiten.



Der Rechner ist auf der Basis eines normalen PCs aufgebaut, der zusätzlich mit Messwandlerkarten, Schnittstellenkarten und Treiberschaltungen für die Sensoren sowie die direkte Ansteuerung von Lüftung und Entfeuchtern ausgestattet wurde.

Damit Eingriffe von Dritten unterbleiben, wurden Eingabegeräte und Monitor entfernt. Bei Bedarf werden die Rechner passwortgeschützt über Ethernet ferngesteuert.

Es hat sich gezeigt, dass die Geräte auf diese Weise zuverlässig arbeiten.

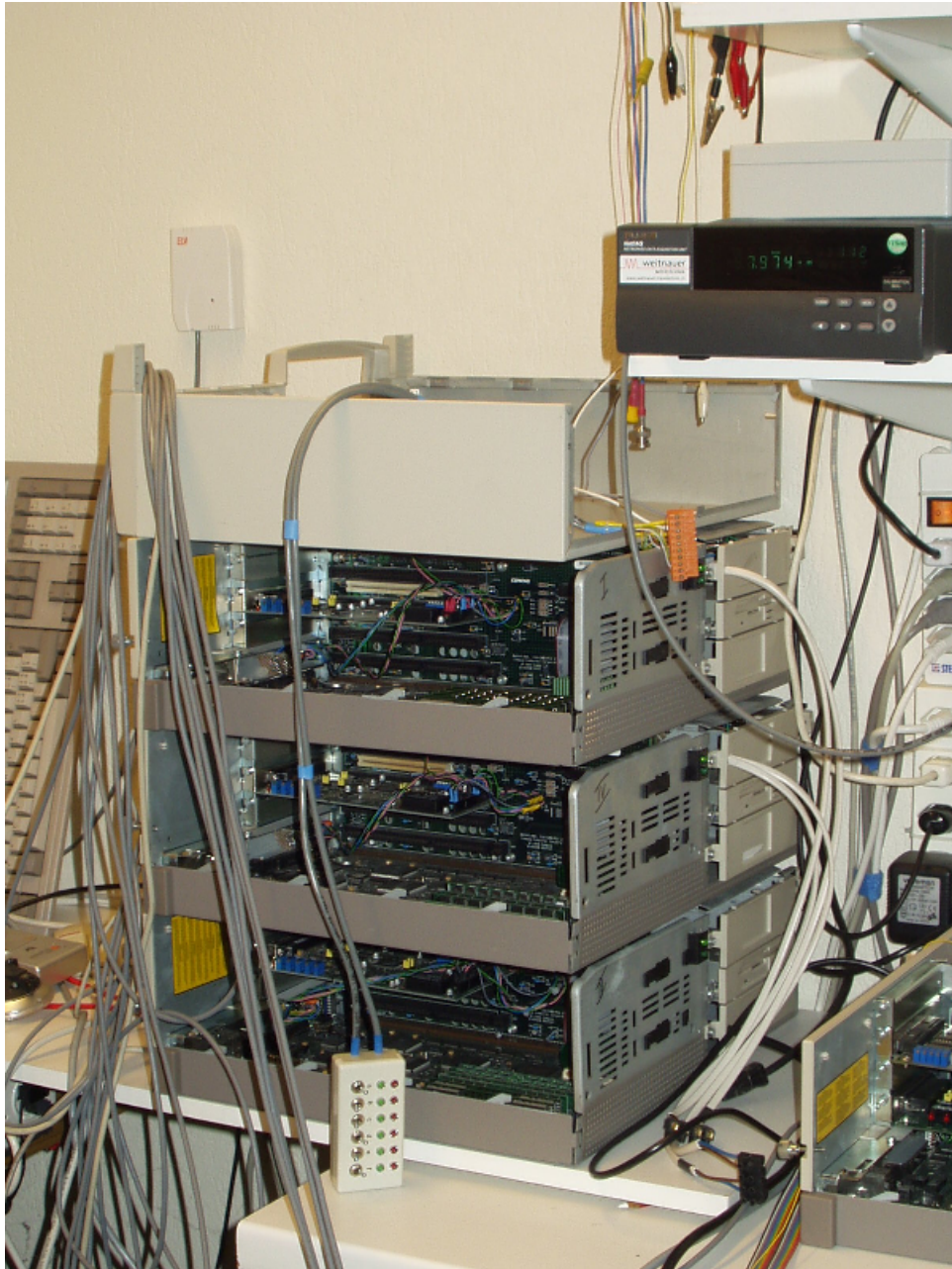
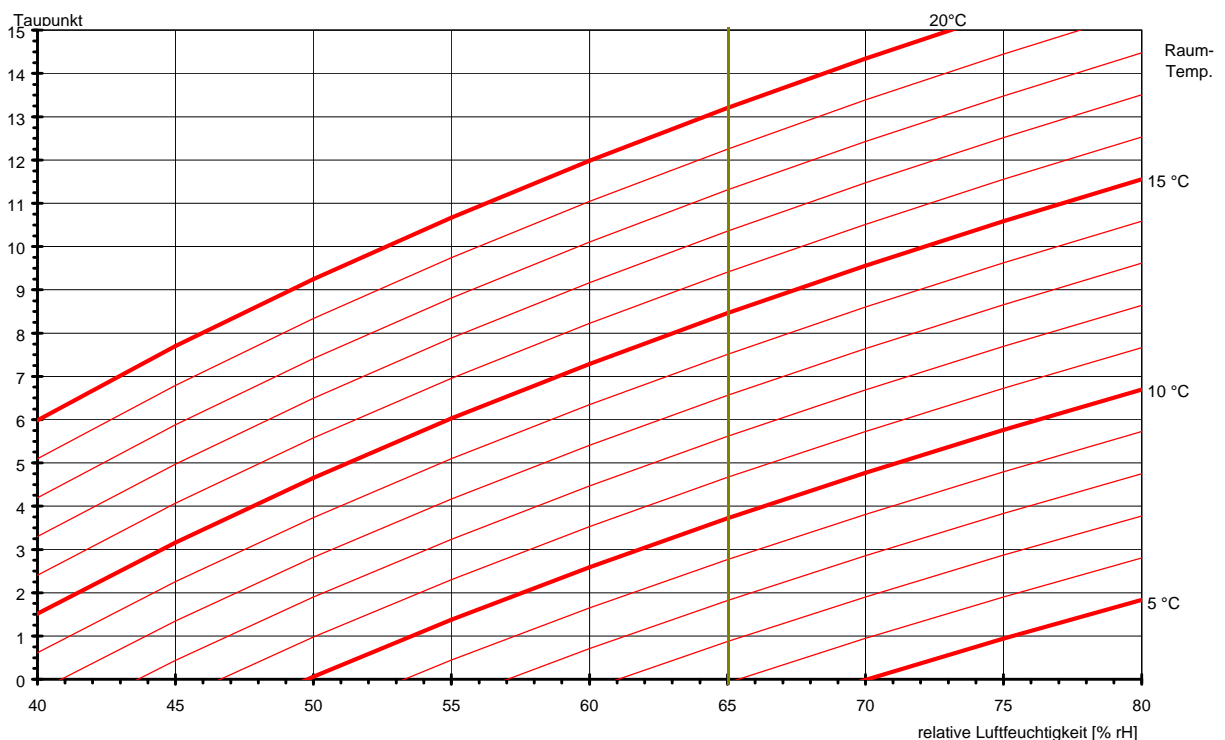


Bild: Die vier Datenlogger- und Steuerrechner bei der Inbetriebnahme im Labor.

TÄGLICHER TAUPUNKTVERLAUF

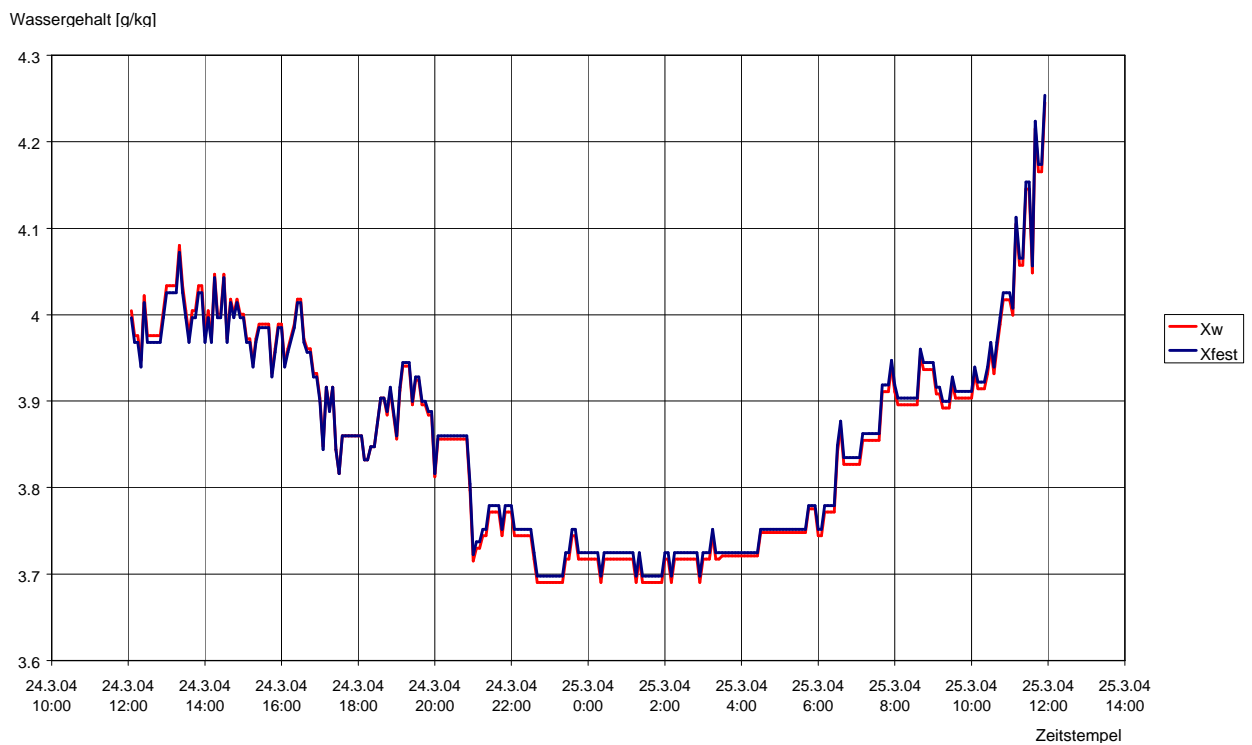
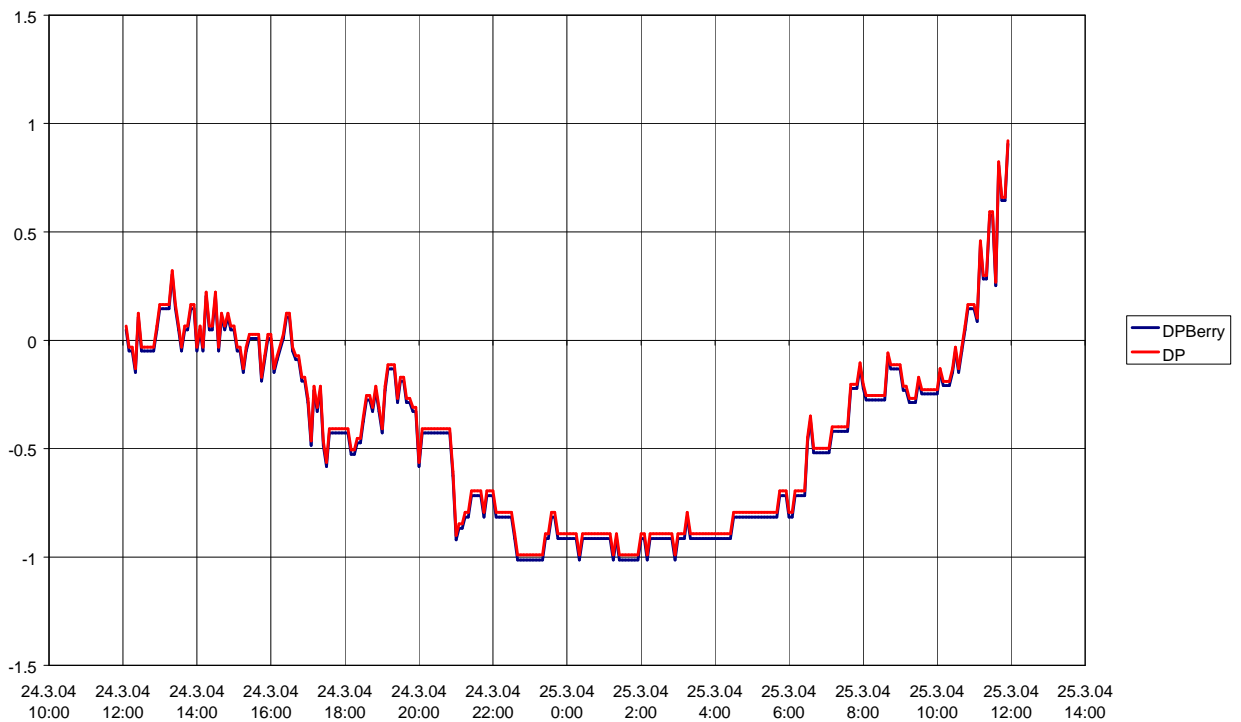
Der Taupunkt ist eine mögliche Grösse, mit der die Regler arbeiten. Noch interessanter ist der Parameter „Wassergehalt“, also die absolute Menge Wasser pro Kilogramm Raumluft. Als Beispiele für solche Tagesgänge sollen die folgenden Diagramme dienen.

Die Aufgabe des Reglers ist es eine Innenraumbedingung von maximal 65% rH und einer möglichst hohen Raumtemperatur zu erreichen. Je höher die Raumtemperatur, desto rascher und effizienter ist der Wegtransport der feuchten Luft. Um beim Betrachten der Diagramme die Entfeuchtungseffizienz abschätzen zu können, folgt erst ein Diagramm, das den Taupunkt als Funktion von Luftfeuchtigkeit und Raumtemperatur darstellt. Der Bereich über 70% rH gilt als zu feucht. Da davon auszugehen ist, dass die Raumtemperatur zwischen 10°C und 15°C liegen wird, muss also die Taupunkttemperatur der Frischluft unterhalb von 5°C bis 9°C liegen.



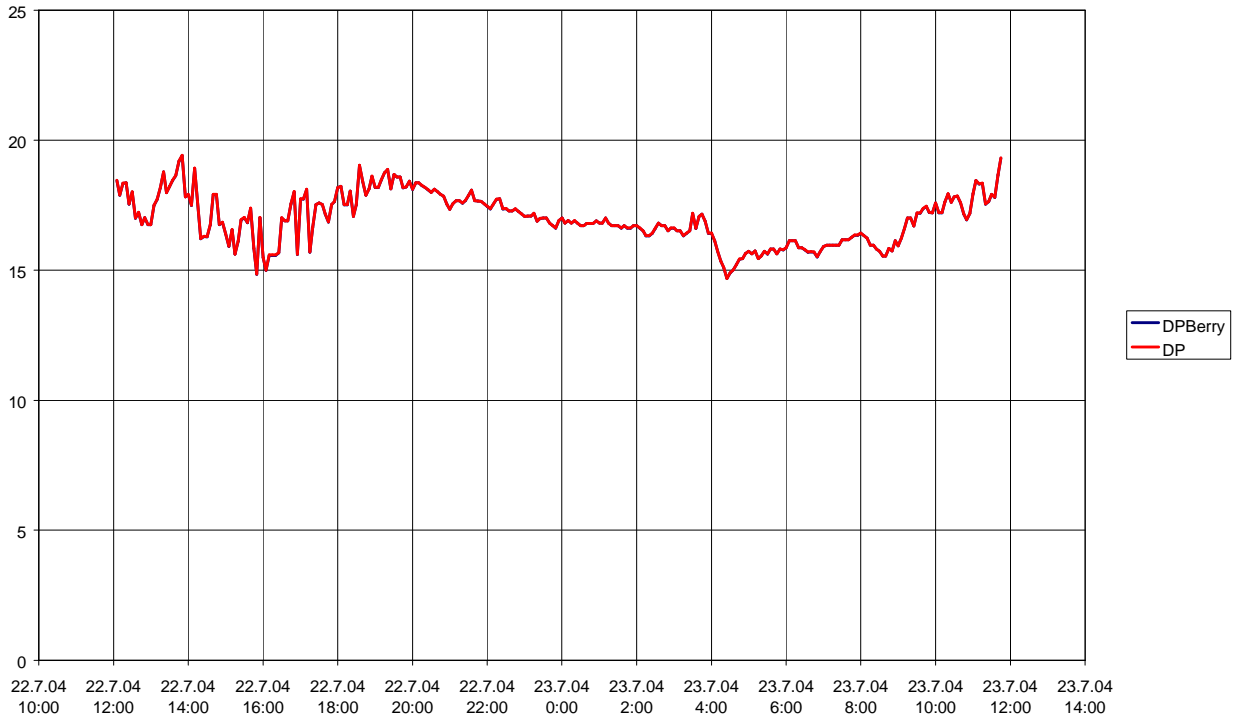
An einem späten Märztag war es recht kühl, was erstaunlicherweise dazu führte, dass praktisch den ganzen Tag hindurch die Lüftung in Betrieb stehen konnte. Nun musste der Regler bei drohend tiefer Raumtemperatur abschalten. (Anmerkung: DP steht für „DewPoint“, also Taupunkt. DPBerry wird nach einem Algorithmus nach Berry berechnet, DP nach einem eigenen Algorithmus, der die Situation bei Frost separat beurteilt)

Das obere Diagramm zeigt den Verlauf des Taupunkts, während das untere jenen des Wassergehalts darstellt. Aus dem unteren Diagramm kann entnommen werden, dass aus der 12°C kühlen Innenluft bei 65% rH pro 1000 m³ Rauminhalt rund 2 Liter Wasser „herausgelüftet“ werden können.

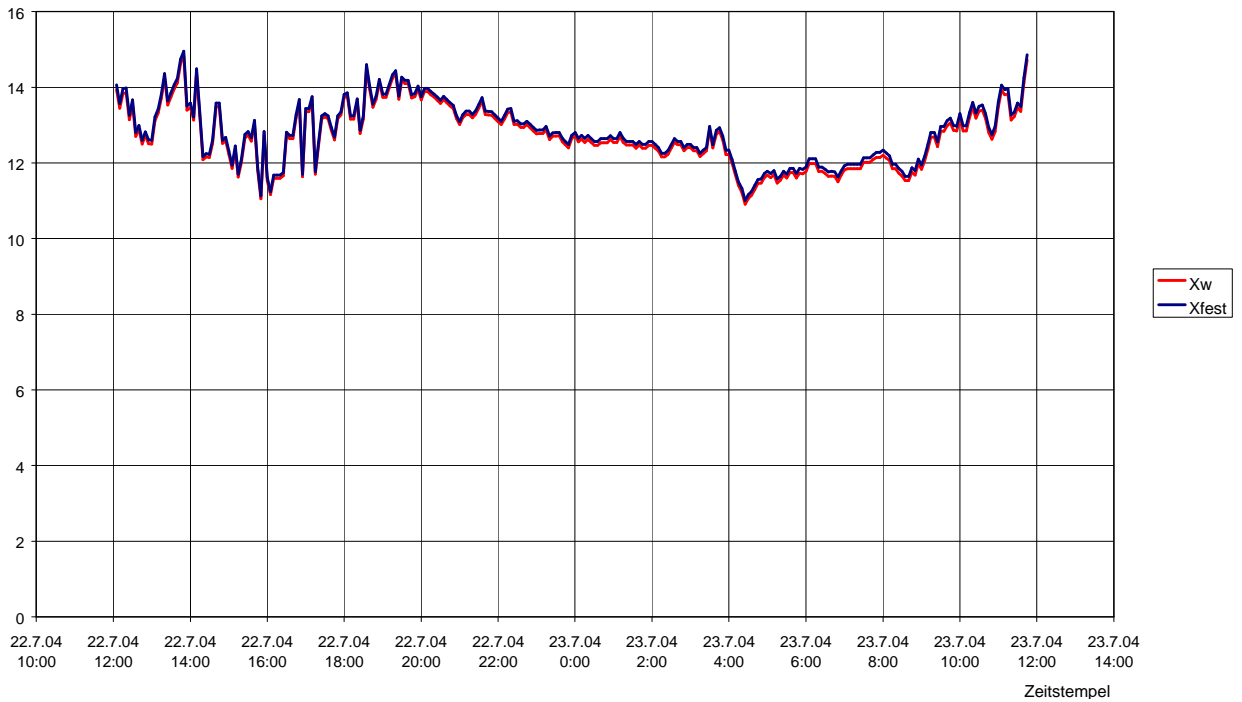


Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich natürlich an einem warmen Sommertag. Es ist klar ersichtlich, dass hier praktisch nie gelüftet werden kann. Im Sommer ist also die mechanische Entfeuchtung Pflicht, wenn die Luftfeuchtigkeit im Innenraum zu hoch zu werden droht.

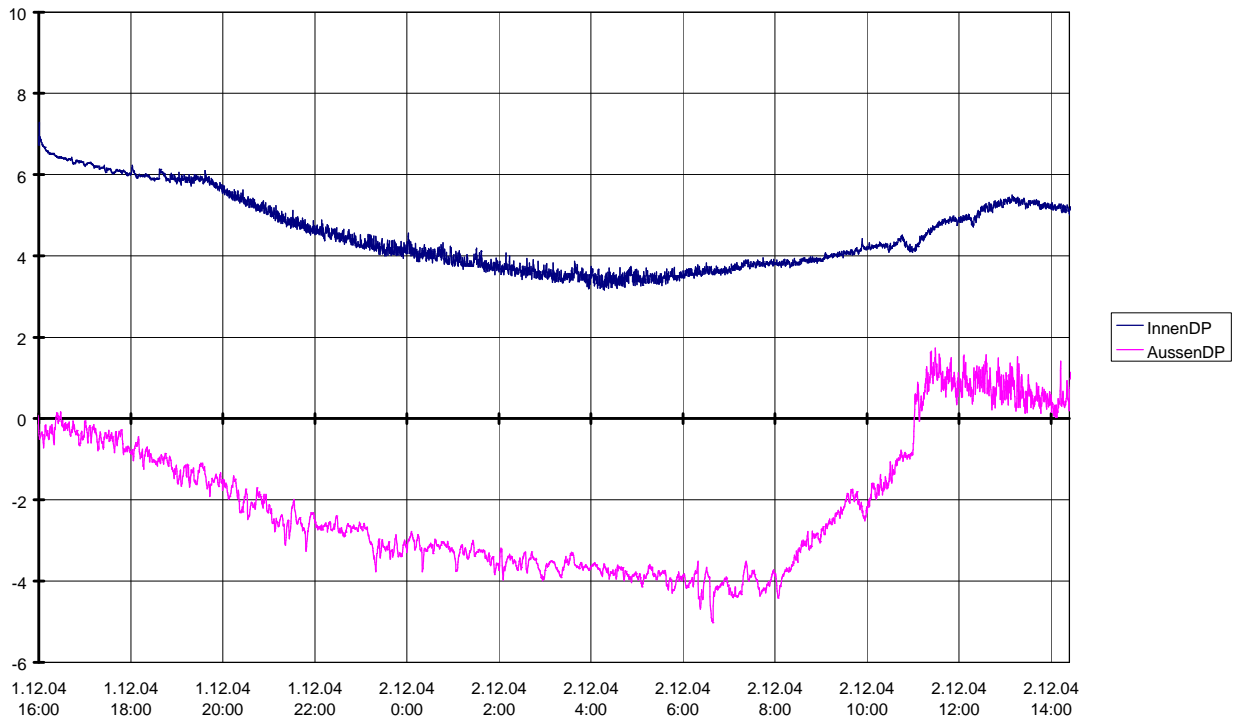
Was aber viel schwerer wiegt, ist die Erkenntnis, dass beim Lüften pro 1000 m³ Rauminhalt rund 10 bis 15 Liter Wasser in den Innenraum gepumpt werden. Das Lüften muss also wohl kontrolliert erfolgen, sonst muss diese überschüssige Feuchtigkeit mit viel Energie mechanisch entfernt werden.



Wassergehalt



Als abschliessender Vergleich soll das folgende Diagramm eines beheizten Raums, das kurz vor Abgabetermin noch in dieses Dokument aufgenommen worden ist, dienen. Trotz optimaler Bedingungen darf hier nicht gelüftet werden, da die Raumluft bereits zu trocken ist!



Nationale Zusammenarbeit

Dem Ingenieurbüro Weitnauer Messtechnik stehen während der Projektlaufzeit Personen aus dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS), dem Bundesamt für Armeematerial und Bauten (BAB) und dem Amt für Zivilschutz in Glarus beratend und tatkräftig zur Seite.

Sehr gefreut hat mich, dass mit der Firma SENSIRION in Zürich ein Partner gewonnen werden konnte, der auf Probleme eingegangen ist und eine Anzahl von Sensorchips zur Verfügung gestellt hat.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Nachdem die Initialisierungsarbeiten und der Aufbau der Messrechner gegen Ende Februar 2004 abgeschlossen werden konnten, wurde die Validierung der Software und der Sensorik durchgeführt. Es zeigte sich bald, dass die verschiedenen Feuchtigkeitssensoren unterschiedliche Messdaten lieferten, obwohl das spezifizierte Toleranzband eigentlich viel enger sein müsste. Aus der Theorie zeigt sich, dass die Sensorik eine sehr wichtige Rolle spielt, mit deren Funktion steht und fällt das Verfahren.

Um die Sensoren genauer zu überprüfen, wurde der geplante Einbau der Geräte verschoben und die Sensoren unter Laborbedingungen geprüft. Dazu wurde eine geregelte, ventilierte Klimakammer aufgebaut, mit der eine sehr gute Temperaturkonstanz erreicht werden kann. In dieser Kammer wurden die Sensoren verschiedenen Feuchtigkeitssprüngen ausgesetzt und deren Verhalten überprüft.

Die Ergebnisse zeigten, dass der fertige Aufbau der Sensoren erneut überdacht werden musste. Speziell im Hochfeuchtebereich, der für diese Anwendung recht wichtig ist, haben alle Sensoren Probleme: die Reaktionsgeschwindigkeit auf Feuchtigkeitsänderungen ist erheblich herabgesetzt. Dieser Effekt ist physikalisch bedingt und kann nicht per Software kompensiert werden; dazu ist ein spezielles Sensordesign notwendig.

Diese Entscheidung hat uns im Zeitplan enorm zurückgeworfen und hat viele Messdaten zur Makulatur werden lassen. **Somit muss der Feldversuch unbedingt in den Sommer 2005 hinein verlängert werden**, damit eine ganze Winterperiode nach Vorschrift gearbeitet werden kann.

Referenzen

„Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen“, Projektbeschreibung, Adrian Weitnauer

F.A. Berry, Handbook of Meteorology, McGraw-Hill

Handbuch Heizungs- und Klimatechnik, Recknagel, 1993

Thermodynamik, Baer, 1889

Taschenbuch der Physik, Kuchling, 1982

Datasheet SENSIRION SHT-Sensors, SENSIRION, 8052 Zürich