

Schlussbericht **21. November 2005**

# Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen

ausgearbeitet durch  
Adrian E. Weitnauer  
dipl. El.-Ing. ETH/SIA

Weitnauer Messtechnik  
Eich 1  
8752 Näfels

055 612 51 31 (Telefon)

055 612 51 65 (Telefax)

[www.weitnauer-messtechnik.ch](http://www.weitnauer-messtechnik.ch)

**Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.**

**Weitere Informationen über das Programm „Elektrizität“ des Bundesamts für Energie stehen auf folgender Web-Seite zur Verfügung:**

[www.electricity-research.ch](http://www.electricity-research.ch)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>2</b>
<b>Résumé.....</b>	<b>2</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>2</b>
<b>1. Ausgangslage, Vorgehen .....</b>	<b>3</b>
1.1 Bedeutung	3
1.2 Projektpartner	3
1.3 Projektziele	3
1.4 Vorgehen	4
<b>2. Technik.....</b>	<b>5</b>
2.1 Funktionsprinzip	5
2.2 Mechanische Entfeuchtung	7
2.3 Sensorik	8
2.4 Regler	11
2.5 Einsatz in der Zivilschutzanlage GLS	13
2.6 Einsatz in der Zivilschutzanlage NEB	16
2.7 Lokale Witterungsdaten	19
<b>3. Markt und Akteure.....</b>	<b>21</b>
3.1 Anbieter	21
3.2 Know-how	21
<b>4. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale .....</b>	<b>22</b>
4.1 Illustration der Funktion anhand von Messdaten	22
4.2 Zivilschutzanlage GLS	24
4.3 Zivilschutzanlage NEB	25
4.4 Abschätzung des Potenzials und der Wirtschaftlichkeit	26
4.5 Rückzahldauer der Investition	26
<b>5. Umsetzung.....</b>	<b>27</b>
5.1 Allgemeines	27
5.2 Feedback	27
<b>6. Quellenverzeichnis .....</b>	<b>28</b>

## Zusammenfassung

In der Schweiz werden nach der Einführung des neuen Zivilschutzkonzepts rund 3000 unterirdische Schutzanlagen 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 radioaktivem 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 Messgenauigkeit ist vor allem im Hochfeuchtebereich oft ungenügend.

Das Projekt zeigt, dass die Nutzung dieser Idee den Energieverbrauch pro Anlage um rund 3000 kWh pro Jahr reduzieren kann. Hochgerechnet auf alle Anlage ergibt sich eine Einsparung von 9 GWh, was Energiekosten von etwa 1.5 Millionen Franken entspricht.

## Résumé

En suisse existent 3000 bâtiments souterrains pour la protection civile. Un des plus grands problèmes dans ces bâtiments est l'humidité trop élevée souvent. Un autre problème est l'accumulation des gazes comme méthane ou radon radioactif.

Le climat dans ces bâtiments doit être contrôlé à l'aide des déshumidificateurs et une ventilation, qui consomment beaucoup d'énergie électrique.

L'utilisation de la différence entre l'humidité absolu d'intérieur et de l'environnement rends possible de réduire ou renoncer à la déshumidification mécanique à l'aide de la ventilation contrôlée.

Ce projet a manifesté que l'application de cette méthode peut réduire la consommation d'énergie électrique de 3000 kWh par bâtiment et année. Extrapolé, ce sont 9 GWh ou 1.5 millions francs par année dans toute la suisse.

## Abstract

For the protection of the civilian population in switzerland, there are 3000 subterranean buildings. One of the greatest problems in these buildings is the increased humidity, which can lead to mould. Another problem is the possibility of the accumulation of gases such as methane or radioactive radon.

These problems are currently solved by a combination of ventilation and mechanic dehumidification, which costs electrical energy.

This study shows, that the energy-consuming dehumidification can be reduced by using the difference of the absolute humidity between the environment and the interior of the building. This can decrease the power consumption by 3000 kWh per building.

The projection for the whole country of Switzerland shows, that the measures can reduce the consumption of electrical energy by 9 GWh or 1.5 million swiss francs per year.

# 1. Ausgangslage, Vorgehen

## 1.1 Bedeutung

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 Belüftung und Entfeuchtung jeder Anlage liegt durchschnittlich bei 10'000 kWh/a. Die tägliche Belüftung eliminiert Schadgase aus dem Untergrund und sichert eine minimale Luftbewegung im Anlageninnern, damit keine „Feuchtigkeitsnester“ entstehen können. Da im Innern der Anlage eine verhältnismässig geringe Temperatur herrscht, muss mit mobilen Entfeuchtungsgeräten die Luftfeuchtigkeit in Grenzen gehalten werden.

Die ursprüngliche Annahme lautete, dass durch optimales Lüften der Energieaufwand um mindestens 20% bis 30% reduziert werden könnte, was einer Einsparung von 2000 kWh bis 3000 kWh pro Jahr, respektive mindestens CHF 300.- pro Jahr und Anlage entspräche. Gesamtschweizerisch dürfte gemäss dieser Annahme also eine Einsparung von 6 bis 10 GWh elektrischer Energie oder weit über einer Million Franken Energiekosten pro Jahr resultieren.

## 1.2 Projektpartner

Für das Projekt konnten das Bundesamt für Zivilschutz, das Kantonale Amt für Zivilschutz Glarus und die Gemeinden als Anlageeigentümer gewonnen werden.

Die Sensorchips für unsere Sensoren wurden freundlicherweise von der Firma SENSIRION AG, Stäfa, zur Verfügung gestellt.

Federführend für alle Arbeiten war die Firma Weitnauer Messtechnik in Näfels.

## 1.3 Projektziele

Die Studie soll diese Annahme des Potenzials dieser Massnahme unter Beweis stellen und seine technische Machbarkeit nachweisen. 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) 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.

## 1.4 Vorgehen

Das hier besprochene Verfahren (genauere Beschreibung nachstehend) begründete die Idee nach einem Versuchsbetrieb in wenig genutzten Räumen mit nahezu konstanter Temperatur. Das Verfahren steht und fällt mit der Sensorik. Diese muss robust, vergleichsweise genau und trotzdem sehr preiswert sein, damit sich ein Einsatz auch wirtschaftlich lohnt.

Somit wurde in einer ersten Phase nach einer Evaluation ein passender Sensor entwickelt. Dieser Sensor musste sich in einer Klimakammer bewähren. Anschliessend wurden die Messrechner gebaut und die Software dafür entwickelt. Die „Messrechner“ enthalten den Regler und dienen gleichzeitig als Messdatenlogger. Danach wurden die Versuchsanlagen bestimmt und die Messrechner installiert. Während der abschliessenden Versuchsphase wurden verschiedene Regleralgorithmen und Parametersätze erprobt.

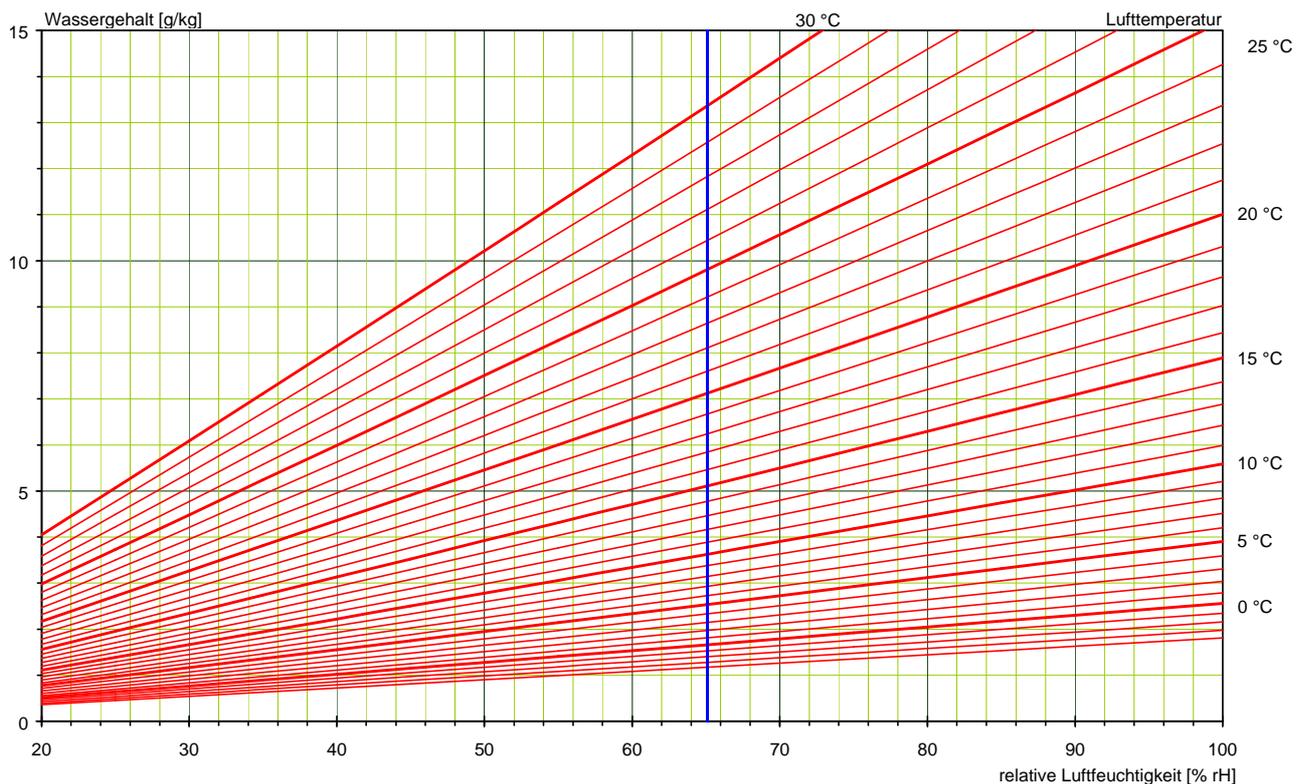
## 2. Technik

### 2.1 Funktionsprinzip

Der hier vorgestellte Entfeuchtungsregler nutzt die Eigenschaft der Luft, bei höherer Temperatur mehr Feuchtigkeit aufzunehmen. Man kann davon ausgehen, dass dank der grossen thermischen Masse einer unterirdischen Anlage die Innentemperatur nahezu konstant bleibt – selbst dann, wenn mit der mechanischen Lüftungsanlage der Innenraum belüftet wird. Diese thermische Masse macht sich sehr nachteilig bemerkbar, wenn die Zivilschutzräume bezogen werden. Trotz grosser Heizleistung dauert es einige Tage, bis die Temperatur im Innern auf einigermaßen angenehme Werte angestiegen ist.

Ein grosses Problem ist jedoch die Luftfeuchtigkeit, die Schäden am Lagergut verursacht und das Wachstum von Schimmel begünstigt. Hohe Luftfeuchtigkeiten im Innenraum treten normalerweise im Sommer oder nach längerem Aufenthalt von Personen – zum Beispiel militärische Wiederholungskurse – auf. Die Erfahrungen im Rahmen dieser Studie zeigten, dass die Innentemperatur zwischen etwa 10°C im Februar und 18°C im August schwankt. Die Zielgrösse für die Luftfeuchtigkeit ist auf 65% rF definiert.

Gemäss der untenstehenden Grafik enthält somit ein Kilogramm Luft zwischen 4 und 7 Gramm Wasser. Dies entspricht etwa 5 bis 8 Gramm Wasser pro Kubikmeter Raumvolumen.

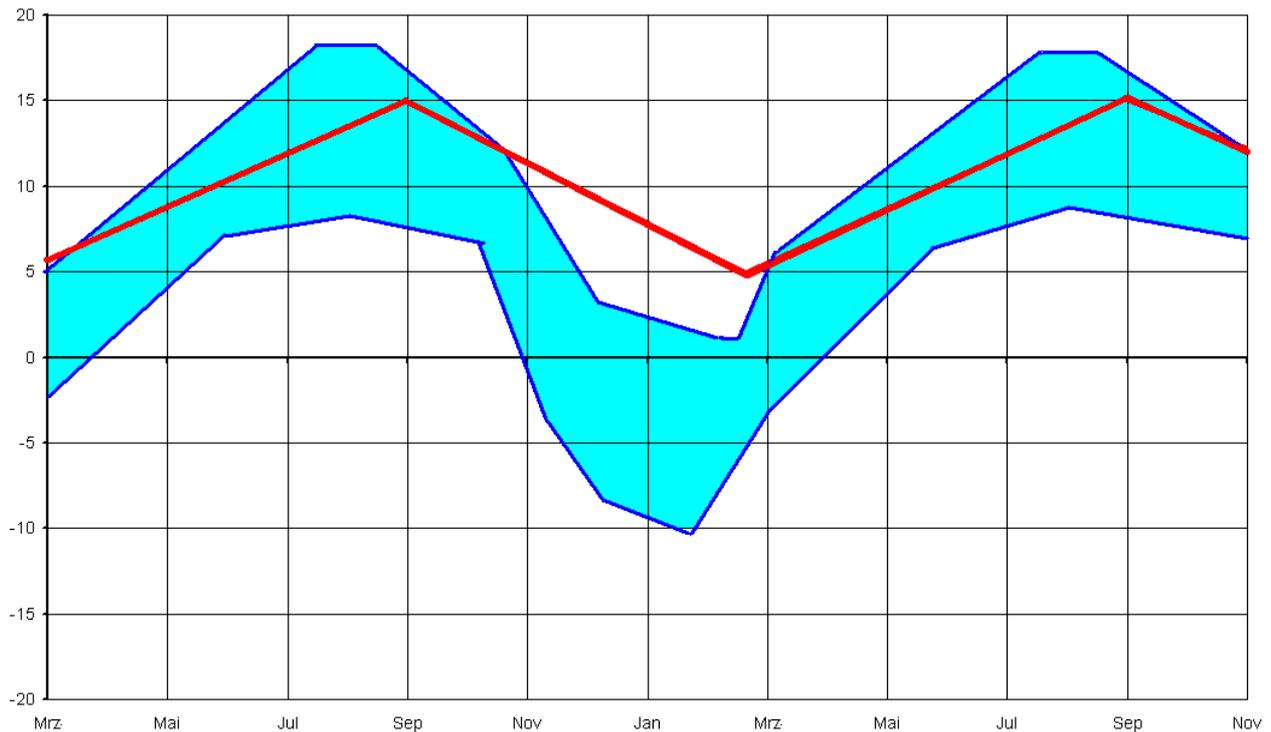


Der Feuchtigkeitsgehalt der Aussenluft schwankt wesentlich stärker. Im Winter enthält die Luft wesentlich weniger Feuchtigkeit als im Sommer. Weiter treten Schwankungen je nach Wetterlage auf.

Daraus erwuchs die Idee, einen einfachen Regler zu konstruieren, der mit zwei Sensoren laufend den Feuchtigkeitsgehalt der Aussen- bzw. Innenluft ermittelt und die Lüftungsanlage steuert.

Die folgende Grafik zeigt den Taupunktschwankungsbereich (blau) bei schematischem Witterungsverlauf und den Taupunkt im Innern einer typischen Anlage (rot). Daraus ist ersichtlich, dass die rote Linie, welche den Taupunkt bei maximaler Luftfeuchtigkeit im Innern der Anlage zeigt, in den Wintermonaten November bis März deutlich oberhalb der Taupunkt-Schwankungsbreite der Aussenluft verläuft. In der Übergangszeit und in den Sommermonaten verläuft die rote Linie innerhalb des blauen Schwankungsbereichs.

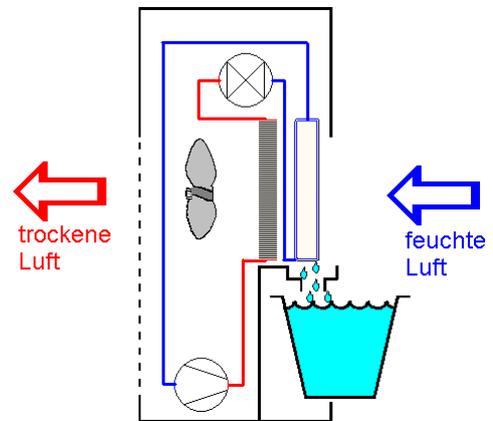
Die Aufgabe des Reglers ist es nun, die Lüftung genau dann einzuschalten, wenn die Aussenluft einen geringeren Wassergehalt als die Innenluft aufweist.



Es kann je nach Witterung durchaus vorkommen, dass auch im Sommer das Rauminnere durch Lüften entfeuchtet werden kann. Andererseits ist es auch möglich, dass in einem feuchten, regnerischen Sommer – wie zum Beispiel dem Sommer 2005 – niemals gelüftet werden dürfte.

## 2.2 Mechanische Entfeuchtung

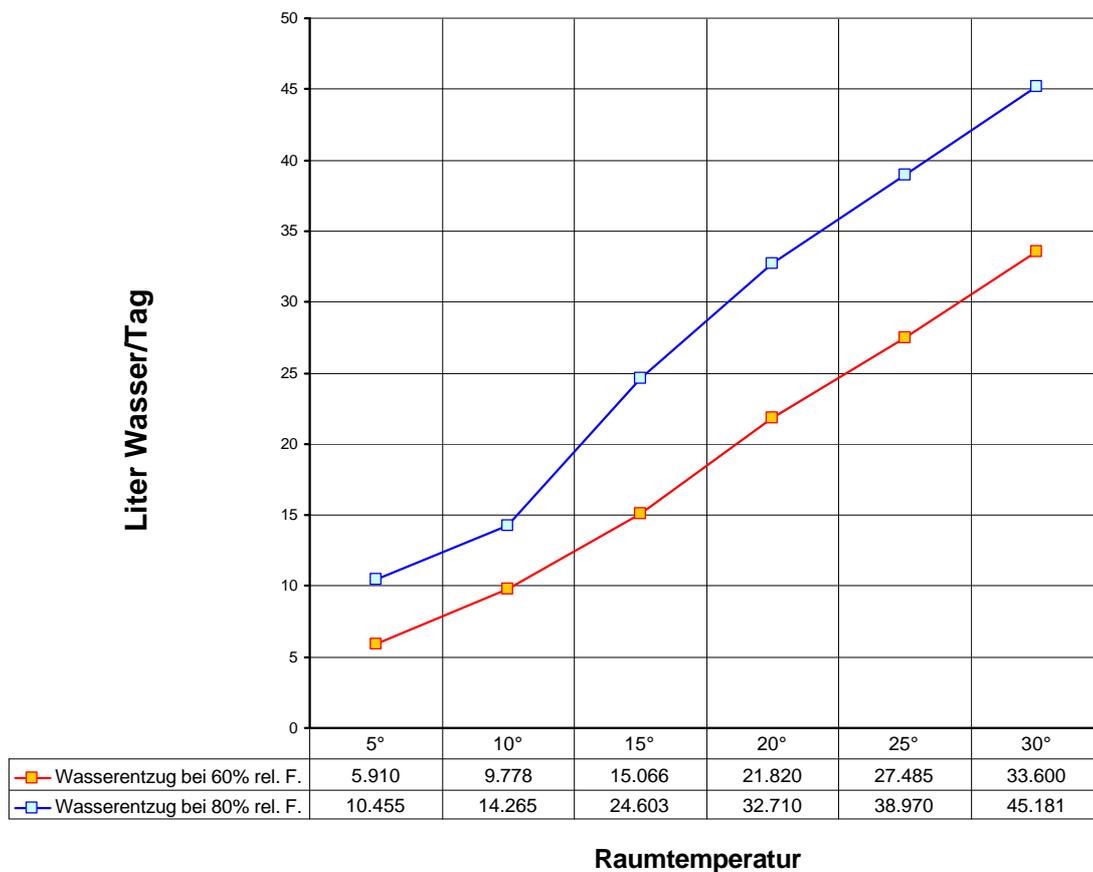
Die in den Zivilschutzanlagen eingesetzten mobilen Entfeuchtungsgeräte arbeiten nach dem Wärmepumpenprinzip. Dabei wird die Raumluft durch ein Gebläse durch einen Verdampfer geführt, wo sie weit unter den Taupunkt abgekühlt wird. Das überschüssige Wasser kondensiert aus und tropft in den Wasserbehälter oder fließt über einen Schlauch ab. Die nun getrocknete, aber kalte Luft wird weiter zum Kondensator geführt, wo sie wieder aufgeheizt und als trockene, erwärmte Luft ausgeblasen wird.



Dieses Entfeuchtungsprinzip arbeitet mit steigender Temperatur und Luftfeuchtigkeit immer effizienter. Die Grafik unten zeigt die Entfeuchtungsleistung eines typischen Entfeuchtungsgerätes in Liter Wasser pro Tag in Funktion der Raumtemperatur und der Feuchtigkeit.

Die Zivilschutzanlagen weisen Temperaturen im Jahresmittel von unter 15°C auf bei Raumfeuchtigkeiten von 60%, wo die Entfeuchtungseffizienz schon deutlich vermindert ist. Auf den Stromverbrauch des Gerätes wirken sich die Umgebungsbedingungen dagegen kaum aus.

Wasserentzug Wärmepumpenentfeuchter  
bei 60 und 80% relativer Feuchtigkeit



## 2.3 Sensorik

Zur rechnerischen Ermittlung des Wassergehaltes oder des Taupunktes muss gleichzeitig die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit gemessen werden. Während die Temperaturmessung technisch keine grossen Anforderungen mehr stellt und auch erstaunlich grosse Genauigkeiten erreicht, stellt die Feuchtigkeitsmessung noch immer ein Problem dar.

Zur Temperaturmessung wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von geeigneten Werkstoffen ausgenutzt. Im industriellen Bereich benutzt man dazu üblicherweise Platin. Damit die Auswerteelektronik einfacher gebaut werden kann, setzt man jedoch immer häufiger eng tolerierte Halbleiterelemente ein.

Die Messung der relativen Feuchte ist ungleich schwieriger. Das präziseste und leider aus Kostengründen völlig ungeeignete Verfahren ist die direkte Taupunktmessung mit einem temperaturgeregelten Spiegel. Dieser Spiegel wird nun langsam abgekühlt, bis sich Feuchtigkeit darauf niederschlägt. Die aktuelle Spiegel-Temperatur entspricht nun dem Taupunkt der Luft, derjenigen Temperatur also, bei der die Luft mit Wasser gesättigt ist. Der Spiegel wird automatisch gereinigt und wieder aufgewärmt. Anschliessend beginnt der Zyklus von neuem.

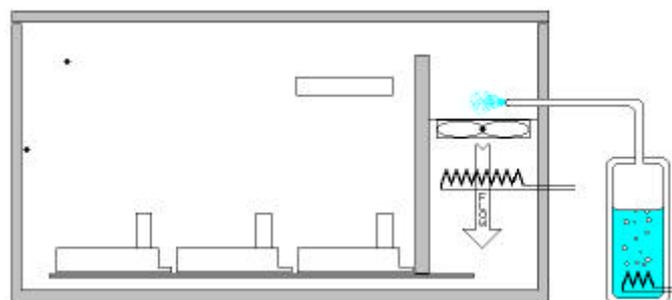
Die beiden anderen Verfahren nutzen das Bestreben von gewissen Werkstoffen, sich mit Feuchtigkeit zu sättigen; dabei stellt sich mit der umgebenden feuchten Luft ein Gleichgewichtszustand ein. Eine erste Variante nutzt die Leitfähigkeit von Salzen, eine andere die Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl von Kunststoffen. Das erste Verfahren ist nicht mehr gebräuchlich, weil der Sensor nicht betaubar ist. Dabei würde die Salzoberfläche, die das fühlende Element darstellt, zerstört. Diesbezüglich robuster ist der Polymersensor, welcher als Kondensator ausgeführt wird. Die Auswerteelektronik braucht nur die Kapazität zu messen.

Die Diffusionsprozesse im Sensorelement sind leider dafür verantwortlich, dass der Sensor nicht eben schnell arbeiten kann. Die Kapazität ist sehr stark nichtlinear und im Bereiche von hohen Feuchtigkeiten nimmt die Genauigkeit ab und das Zeitverhalten wird sehr langsam. Die Ansprechzeit steigt dabei von wenigen Sekunden auf mehrere Stunden! Im Extremfall – bei gesättigter Luft – kann es sogar Tage dauern, bis der Endwert erreicht wird.

Für den industriellen Einsatz taugliche Sensoren sind sehr teuer: diese kosten mindestens einige hundert bis weit über tausend Franken. Wenn die hier vorgestellte Energiesparidee auch wirtschaftlich interessant sein soll, darf die Sensorik nicht teuer sein.

Im ersten Jahr dieses Projektes wurde deshalb die Frage der Sensorik eingehend analysiert. Es wurde sogar gezeigt, dass Sensoren von verschiedenen Herstellern vor allem im Hochfeuchtebereich Resultate liefern, die nicht miteinander vergleichbar sind. Die Unterschiede betragen je nach Versuch bis zu 10 % rel. Feuchte. Dies übersteigt die Typenangaben gewaltig.

In einer eigens aufgebauten temperaturgeregelten Messkammer wurden verschiedene Sensoren auf ihre Eignung überprüft. In der Messkammer können mit Hilfe eines Dampfgenerators Feuchtigkeitssprünge erzeugt werden. Damit liessen sich Gleichlaufversuche machen.

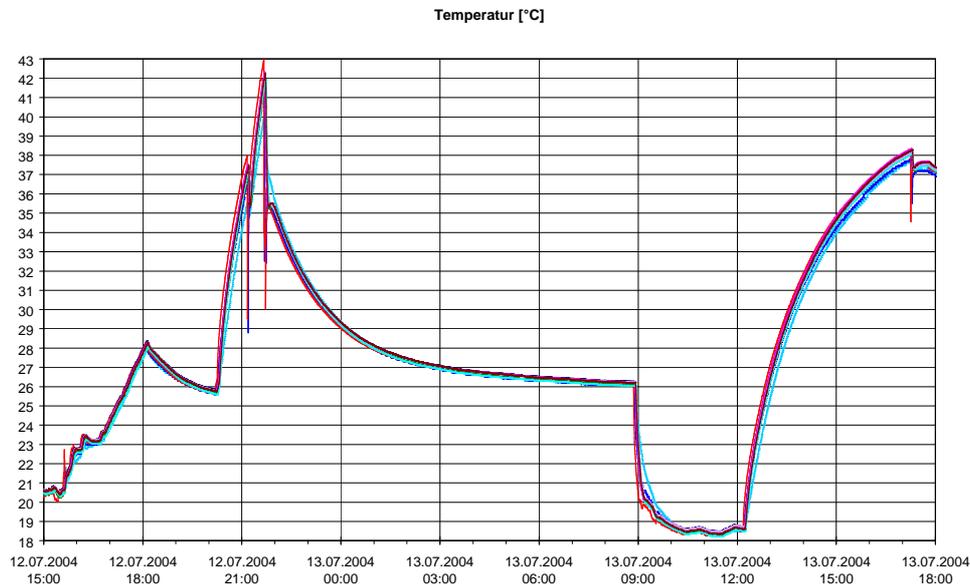


*Geregelte Messkammer*

Der Temperaturgang ist in jedem Fall recht gut. Durch Kapselung mit Schutzgittern reagieren die Sensoren etwas langsamer. Sinterkörper als Sensorschutz führen zu stark erhöhten Ausgleichs-

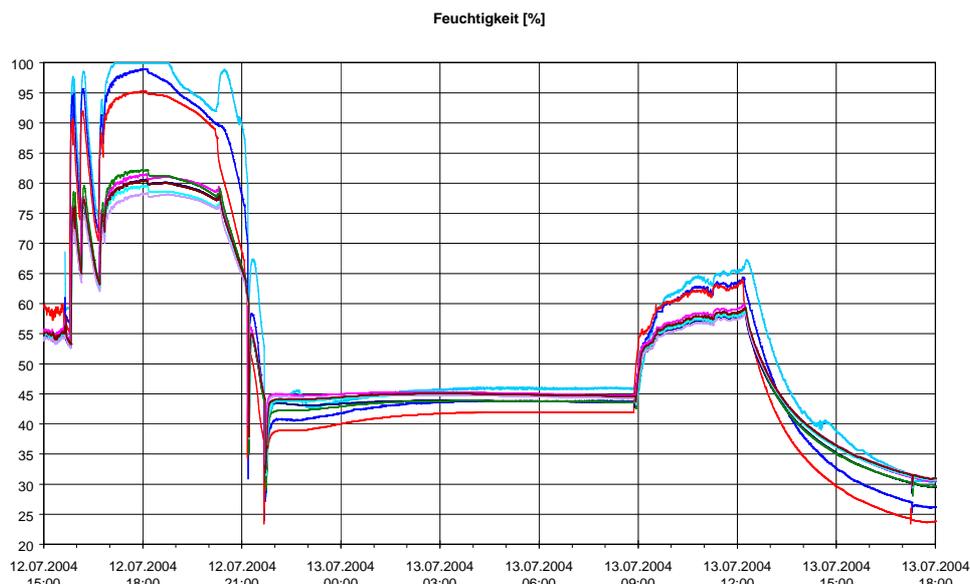
zeiten. Bei Sinterkörpern besteht sogar die Gefahr, dass sich Feuchtigkeit in der Sensorkammer ansammelt.

Die Unterschiede der Messwerte sind gering. Die Temperaturmessung ist somit gelöst und auch problemlos.



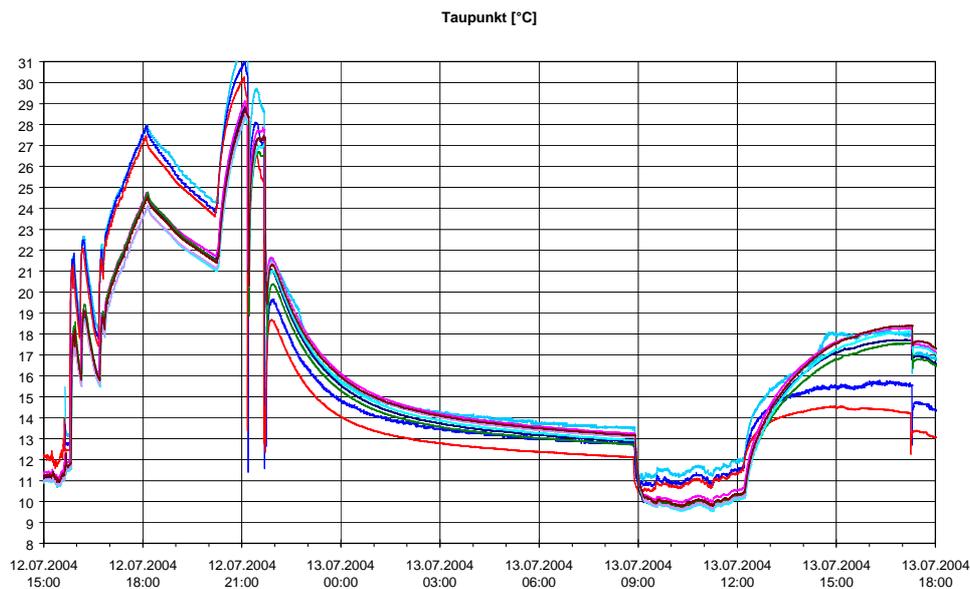
*Temperaturverlauf*

Die relative Feuchtigkeit jedoch wird ungenügend erfasst. Obwohl die Sensoren sehr rasch zu arbeiten scheinen, entstehen grosse Amplitudenfehler. Auch bei langer Wartezeit scheint sich dies nicht auszugleichen. Die Sensoren eines Herstellers scheinen sogar eine rechnerische Kosmetik zu enthalten, die die Messwerte auf 100 % begrenzt. Speziell bei hohen Feuchtigkeiten stellen sich Genauigkeitsprobleme ein.

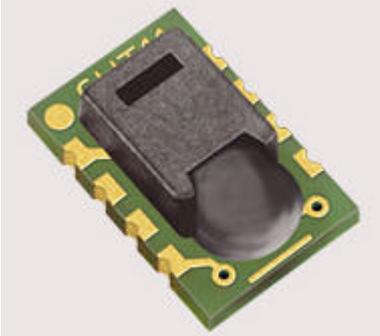


*Feuchtigkeitsgang*

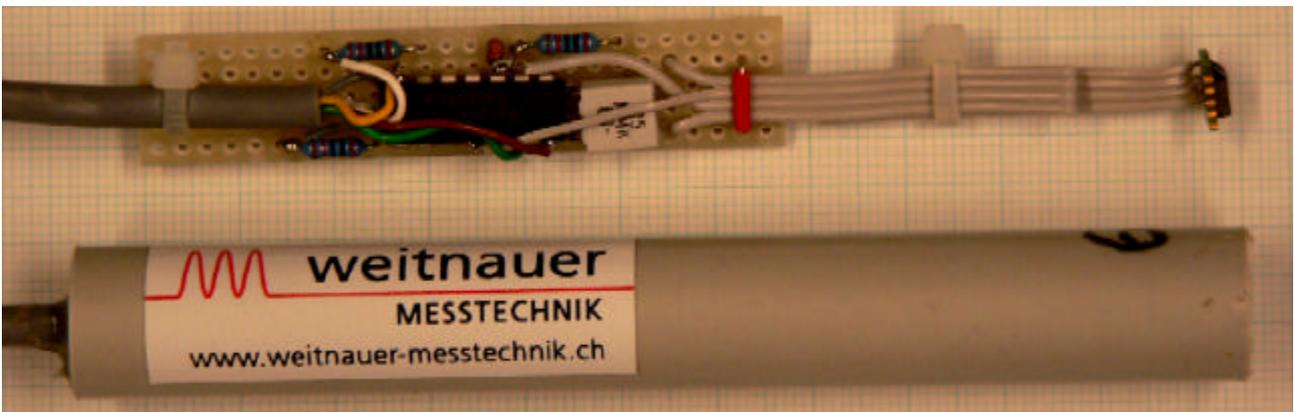
In Funktion der relativen Feuchtigkeit ist natürlich auch die Ermittlung des Taupunktes stark fehlerbehaftet, wie das nächste Bild zeigt.



Nach einer ausführlichen Evaluationsphase wurde beschlossen, dass der Sensor auf Basis eines CMOS-Sensorchips für diesen Zweck selbst hergestellt werden soll. Die Firma SENSIRION AG, Stäfa, stellte uns eine Anzahl von Chips zur Verfügung. Unsere Aufgabe war die Entwicklung einer Schnittstellenschaltung mit digitalem Kabelverstärker und ein einfaches, aber robustes Gehäuse.



Sensorchip SENSIRION SHT zur Taupunktmessung

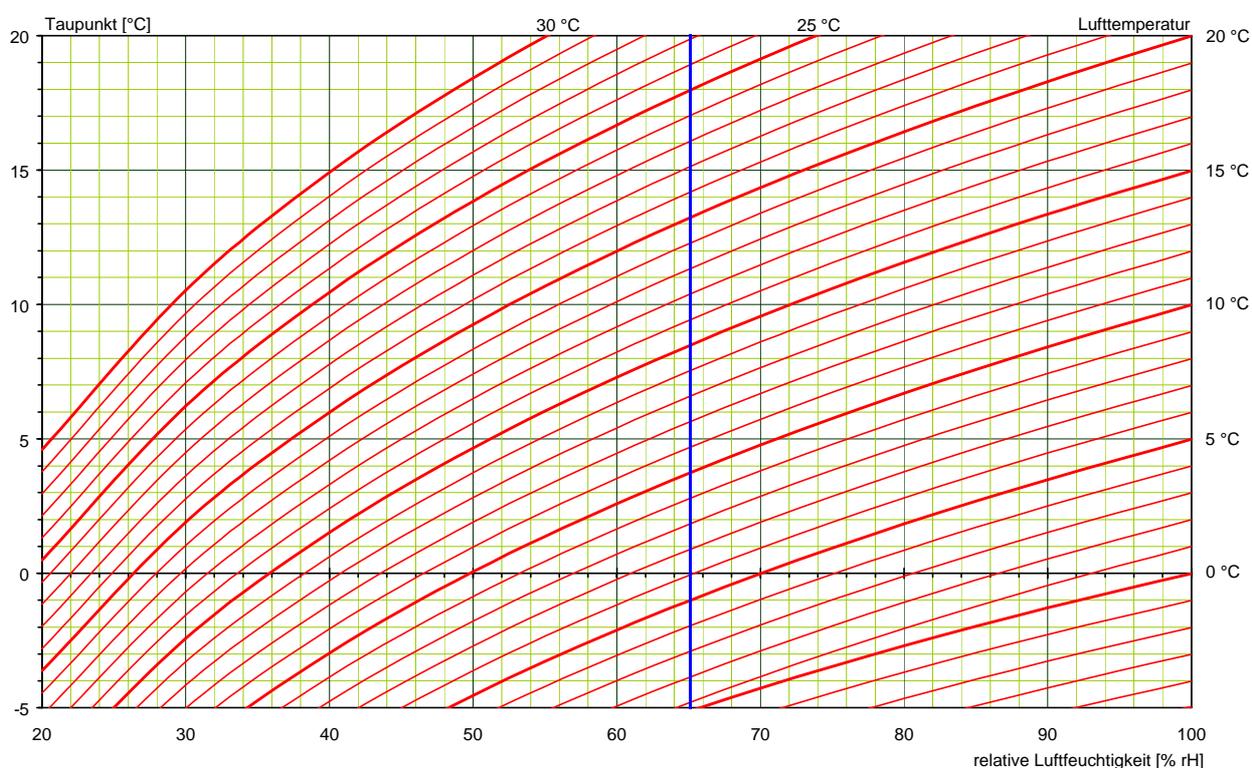


Ansicht der fertigen Sensoreinheit mit und ohne Gehäuse

## 2.4 Regler

Der Regler ist auf der Basis eines PC aufgebaut. Zur Kommunikation mit den Sensoren sind Schnittstellenkarten notwendig. Der PC dient gleichzeitig als Datenlogger und kann dank seiner einfachen Programmierbarkeit zum Testen von verschiedenen Algorithmen verwendet werden.

Nun stellt sich die Frage, welche Messgrösse verwendet werden soll. Es geht schliesslich um den tatsächlichen Wassergehalt der Luft. Genau so gut kann aber auch der Taupunkt verwendet werden. Zur Berechnung des Wassergehaltes ist der Luftdruck notwendig; näherungsweise könnte selbstverständlich ein konstanter Wert vorgegeben werden. Trotzdem entschlossen wir uns schliesslich, den Taupunkt zu verwenden. Die folgende Abbildung zeigt die mit unserem Algorithmus ermittelten Kurvenscharen des Taupunktes in Abhängigkeit von relativer Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur. (Die blaue senkrechte Linie definiert die obere Feuchtigkeitsgrenze für die Zivilschutzanlagen.)



Die Regler- und Datenloggerapplikation wurde in einer gängigen Hochsprache für Windows-Zielsysteme entwickelt. Gegen Eingriffe von Dritten haben wir uns geschützt, indem die Rechner nur über Ethernet steuerbar sind, also über keinerlei Tastatur, Maus oder Bildschirm verfügen.

Die Applikation liest alle 15 Sekunden von beiden Sensoren die Werte für Temperatur und Feuchtigkeit und ermittelt daraus die Taupunkte. Eine Plausibilitätskontrolle erfolgt durch Prüfung der Kommunikation per Prüfsumme.

Die Parametrierung des Reglers erfolgt direkt auf dem Applikationsfenster. Der Regleralgorithmus vereinigt vier Teilfunktionen, die die beiden Ausgänge, Lüftung und Entfeuchtung, schliesslich ansteuern.

Die vier Teilfunktionen „Entfeuchten“, „Heizen“, „Trocknen“ und „Zwangslüftung“ werden je nach den ermittelten Messwerten aktiv.

Die im Laufe dieses Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Funktion „Zwangslüftung“ eher nicht benutzt werden sollte. Obwohl auch die Zwangslüftung witterungsabhängig ausgeführt ist, hat sie immer wieder dazu geführt, dass die Luftfeuchtigkeit im Gebäudeinnern angestiegen ist.

Entfeuchten	Die Entfeuchter werden freigegeben, wenn die Luftfeuchtigkeit über den Maximalwert angestiegen ist. Bei Entfeuchten ist die Lüftung gesperrt. Während den Versuchen wurden die Entfeuchter manuell abgeschaltet, so dass nur per Lüftung getrocknet werden konnte.
Heizen	Dieser Spezialfall ist zu Versuchszwecken realisiert. Die Idee ist, dass die Lüftung dann in Betrieb gesetzt wird, wenn die Innentemperatur tiefer als die Aussen-temperatur, falls gleichzeitig die Aussenluft nicht mehr Wasser enthält als die Innenluft.
Trocknen	Das Trocknen ist der angestrebte Normalfall. Diese Betriebsart ist dann aktiv, wenn die Aussenluft weniger Wasser enthält als die Innenluft. Es hat sich gezeigt, dass die Einschaltbedingung stark auf die Parametrierung von Schalthysterese und Taupunktdifferenz reagiert. Gleichzeitig muss sichergestellt sein, dass ein Unterkühlen des Gebäudeinneren nicht stattfindet, was generell im Winter passieren könnte. Aus diesem Grunde wird für den Winterbetrieb auch die Einführung einer Minimalfeuchtigkeit notwendig.
Zwangslüftung	Die Betriebsart „Zwangslüftung“ wurde übernommen von der technischen Weisung für Schutzbauten. Dort ist definiert, dass die Lüftungsanlage täglich mindestens zwei Stunden in Betrieb genommen werden soll.  Die Studie hat klar gezeigt, dass diese Massnahme vor allem im Sommer viel Feuchtigkeit ins Gebäudeinnere transportiert, welche von den Entfeuchtern wieder entfernt werden muss. Somit sollte im endgültigen Regler auf die Zwangslüftung verzichtet werden.

Die obenstehende Bildschirmkopie zeigt die laufende Anwendung. Die Betriebsart und die Lüftungszeit des aktuellen Tages und der sechs Vortage sind direkt ersichtlich. Alle Betriebszustände und Messwerte werden bei jedem Abtastvorgang im Logfile abgespeichert.

Wenn die Lüftung aktiviert ist, ist auch die Freigabe der Entfeuchter gesperrt.

## 2.5 Einsatz in der Zivilschutzanlage GLS

Für den Versuchsbetrieb wurden zwei unterschiedliche Anlagen, die von der Grösse her aber einigermassen vergleichbar sind, bestimmt. Diese erste Anlage ist eine Unterfluranlage, die als Untergeschoss eines Verwaltungsgebäudes realisiert ist. Der Zweck der Baute interessiert hier nicht weiter.



Das nebenstehende Bild zeigt die Inbetriebnahme des Reglers im Ventilationsraum. Die Zuleitungen zu den Sensoren werden durch die Dichtung der Panzertüre geführt. Die Ansteuerung des zentralen Lüftungsaggregates erfolgt per potenzialfreiem Relaiskontakt, der den Schalterkontakt im Steuerschrank ersetzt.

Der Laptop dient zur Fernsteuerung des Steuerrechners per Netzwerk-Verbindung. Über diese Verbindung werden die Parametrierungen vorgenommen und bei den regelmässigen Kontrollgängen die Logdaten ausgelesen.



Der Innensensor befindet sich im Aufenthaltsraum und hängt frei von einem isolierten Wasserrohr von der Decke herab.



Der Aussensensor ist in dieser Anlage weit vom Regelrechner entfernt. Weil mehrere Panzertüren überwunden werden mussten, verwendeten wir hier das bewährte und robuste F2E-Telefonkabel der Armee zur Signalübermittlung. Das Bild zeigt die Übergabestelle im Vorraum vor dem Nebeneingang.

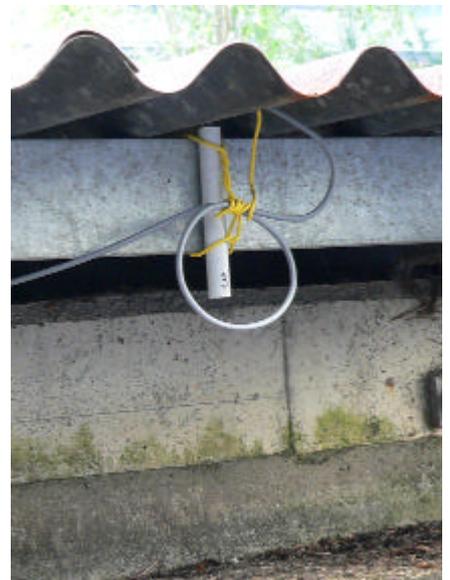


Der Sensor befindet sich vor Tropfwasser geschützt unter einem Blechdach. Dank guter Beschattung durch zwei hohe Gebäude ist das Dach gut vor Sonneneinstrahlung geschützt, welche Messfehler hervorrufen könnte.



Der Versuchsbetrieb hat unter Beweis gestellt, dass die Ausenmessdaten mit guter Qualität erfasst werden. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für das Funktionieren der Anlage.

Die Tatsache, dass der Montageort von der Strasse her nicht einblickbar ist, hat uns vor Vandalenakten bewahrt.



Die Anlage GLS verfügt über zwei Entfeuchtungsgeräte, welche im Aufenthaltsraum und im Kommunikationsraum stehen.

Die Geräte besitzen einen Hygrostat, der die Laufzeit begrenzen soll. In aller Regel aber sind die Hygrostaten zu tief eingestellt, so dass die Entfeuchter meist durchlaufen, weil sie die Feuchtigkeit nicht auf den eingestellten Wert reduzieren können.

Die Entwässerung erfolgt direkt über den Bodenablauf.



Bei Versuchsbeginn stand der Entfeuchter im Kommunikationsraum in einer Wasserlache, weil der Bodenablauf verstopft war. Die Rostflecken auf dem Boden neben dem Ablauf sind noch Überbleibsel davon. Dieser Entfeuchter konnte also seine Arbeit gar nicht mehr erfüllen und konsumierte völlig nutzlos täglich 18 kWh elektrische Energie.



Der Rechner ist auch hier direkt neben dem Schaltschrank aufgestellt. Das Lüftungsgerät ist am linken Bildrand gerade noch zu erkennen. Der Innensensor wurde an der Wand (keine Aussenwand!) des Aufenthaltsraumes montiert.



Die Platzierung des Aussensors war nicht eben einfach. Die Anlage befindet sich auf freiem Feld, wodurch geschützte Möglichkeiten fehlen. Der Sensor wurde deshalb in einem Notausstiegschacht direkt unter dem Schutzgitter befestigt. Der Schacht führt direkt auf eine Wiese.

Der Algenbewuchs im Schacht zeugt von der hohen umgebenden Feuchtigkeit. Dies liess bereits vermuten, dass der Sensor trotz höchstmöglicher Position vermutlich zu hohe Feuchtigkeitswerte liefern würde.

Nach einer Umplatzierung in die Mitte des Gitters konnte dieser Mangel etwas gemildert werden. Die Positionierung des Aussensors ist kritisch, ganz im Gegensatz zum Innensensor. Bei der allfälligen Realisation des Reglersystems muss für den Aussensor eine ähnliche Lösung mit Witterungsschutz wie bei Wetterstationen gefunden werden.

Die Kabelzuführung geschieht auch hier durch die Dichtung der Panzertüre. Damit das abgeschirmte Kabel nicht zu stark gequetscht wird, haben wir Abstandshalter aus Karton aufgeklebt.

Trotzdem wurde das Kabel einmal beschädigt, was zu Messfehlern geführt hat.



Das Entfeuchtungsgerät in der Anlage vermag gemäss Datenblatt rund 1000 Kubikmeter Luft pro Stunde umzuwälzen und besitzt bei 20°C und 70% Feuchtigkeit eine Entfeuchtungsleistung von 31 Litern pro Tag.

Seine elektrische Anschlussleistung beträgt 760 W.

Bei der Inbetriebnahme war der eingebaute Hygrostat auf 40% eingestellt, was ein viel zu tiefer Wert ist. Das Gerät arbeitete denn auch rund um die Uhr.



Die Abbildung rechts zeigt das geöffnete Lüftungsgerät mit seinem elektrischen Antrieb. Die Antriebsleistung ist umschaltbar zwischen 0.75 kW und 2.2 kW.

Das Lüftungsgerät kann bei Filterbetrieb und voller Leistung 1200 Kubikmeter Luft pro Stunde fördern. Bei Frischluftbetrieb steigert sich der Volumenstrom auf das Doppelte.

Da ohne Umbauten an der elektrischen Anlage nur die kleine Stufe bei Automatikbetrieb geschaltet werden kann, beträgt die Luftleistung bei Frischluftbetrieb noch etwa 1000 Kubikmeter pro Stunde. Somit benötigt ein voller Luftwechsel mindestens zwei Stunden Laufdauer.

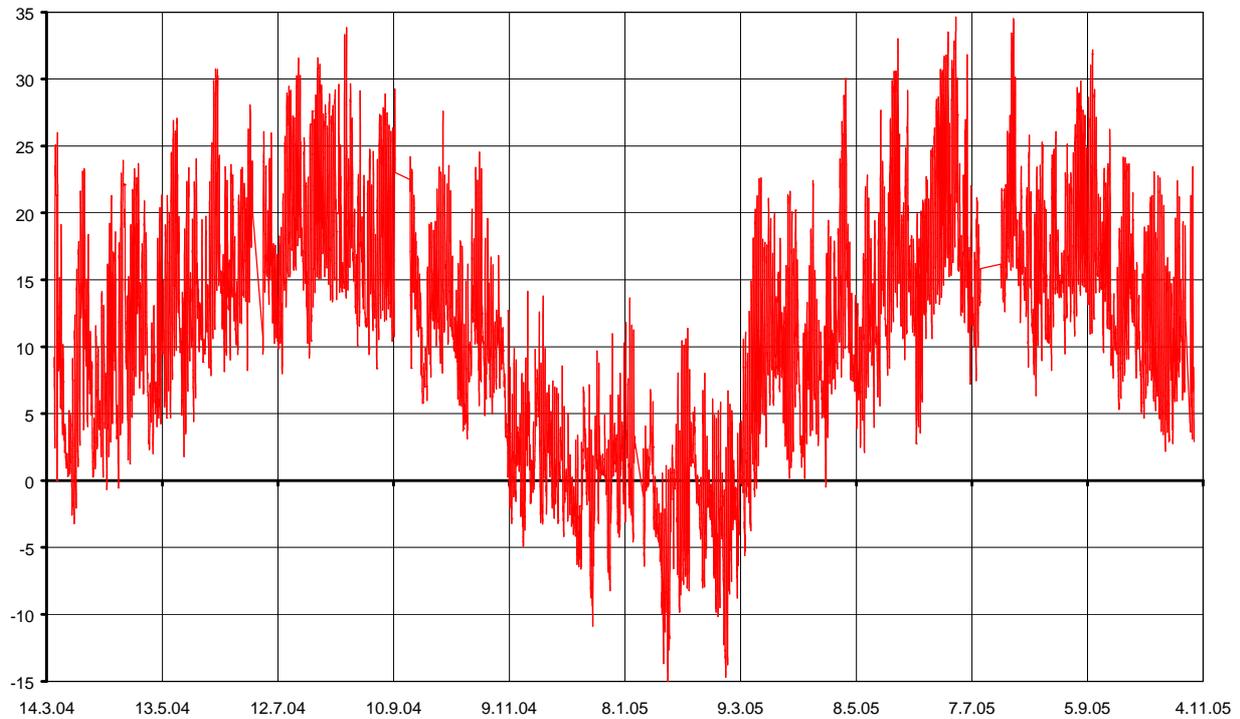


Dem Luftstrom wird immer ein Teil der Raumluft beigemischt, was zu einem Teil-Umluftbetrieb führt. Diese Massnahme soll vor allem im Winter zu starke Temperaturschwankungen verhindern. Selbst bei reinem Umluftbetrieb können „kalte Ecken“ wirksam verhindert werden, was auch ein Grund dafür ist, dass die Zwangslüftung in der Verordnung des Bundesamtes für Zivilschutz vorgeschrieben ist.

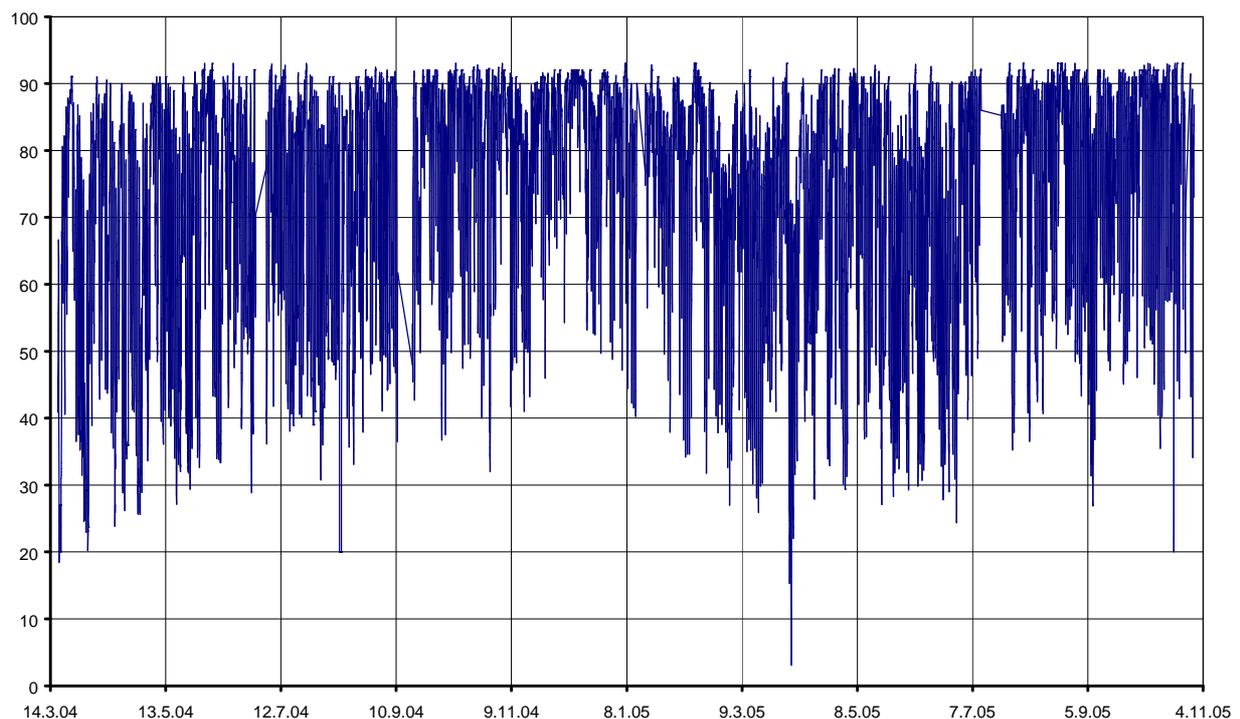
## 2.7 Lokale Witterungsdaten

Der lokale Witterungsverlauf wurde während dem gesamten Versuchsbetrieb aufgezeichnet. Die Daten des ersten Jahres dienen zum Entwurf des Reglers, diejenigen des zweiten Jahres zur Überprüfung der Aussendaten der Regler.

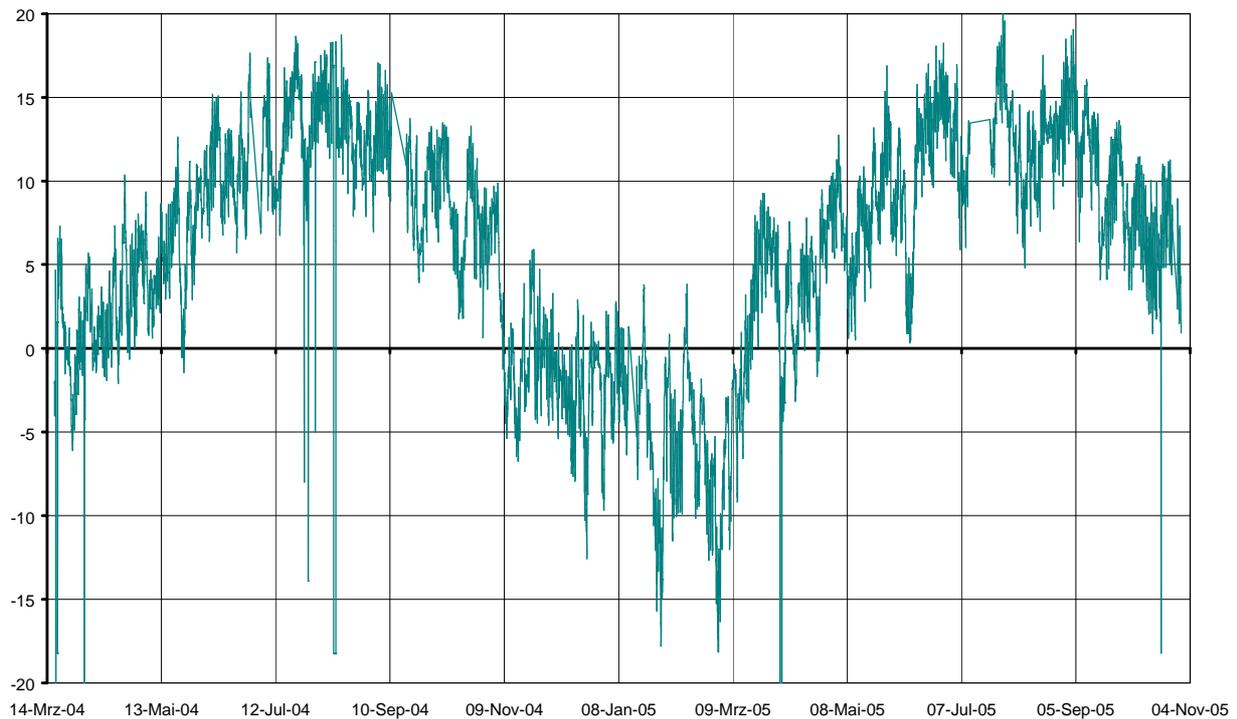
### Temperatur [°C]



### Feuchtigkeit [% rH]

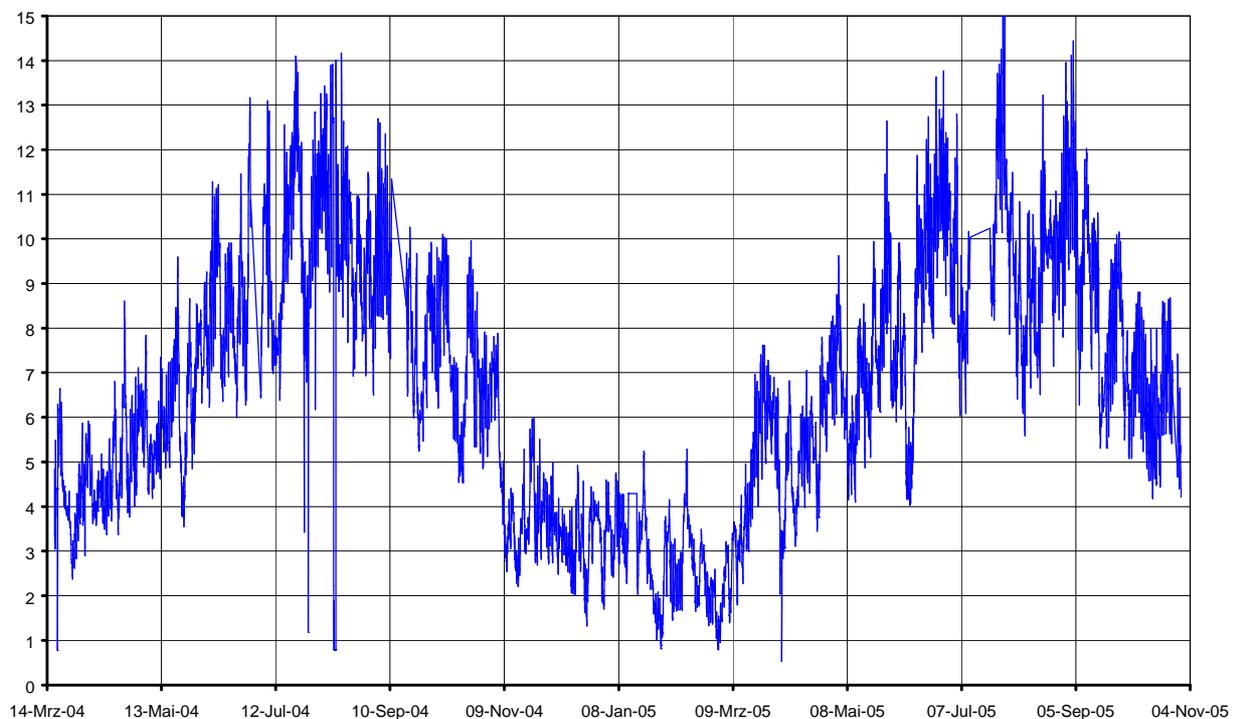


## Taupunkt [°C]



Bemerkung: In den hier berechneten Grafiken sind Ausreisser zu erkennen, die auf Messartefakte zurückzuführen sind.

## Wassergehalt [g/kg]



Die Werte für den Wassergehalt streuen bei höherer Temperatur stärker als jene des Taupunktes. Dies ist auch der Grund für die getroffene Entscheidung, nach dem Taupunkt zu regeln.

## 3. Markt und Akteure

### 3.1 Anbieter

Der Markt für derartige Lüftungsregler ist zur Zeit nicht erschlossen. Einerseits ist „die Schweiz gebaut“, andererseits befindet sich die Bundesverwaltung seit Jahren in einem dauernden Reorganisationsprozess, der ein Planen und Optimieren nicht eben fördert. Weiter erfordern die Sparmassnahmen der Verwaltungen einen höheren Automatisierungsgrad im Unterhaltsbetrieb, weil schlicht die Leute fehlen, die die Kontrollgänge durchführen. Ein Leitsystem, gekoppelt mit einer Alarmierungsmöglichkeit eröffnet neue Anwendungen von wenig genutzten Anlagen, sei es als Lagerraum oder für den Kulturgüterschutz.

Im Bereich des Zivilschutzes betätigen sich seit Jahren gut etablierte Firmen, welche die Spezialausrüstung liefern und warten.

Die hier ausgearbeitete Idee für eine Klimaregelung könnte jedoch auch ausserhalb von Zivilschutzanlagen zur Anwendung gelangen: die Voraussetzung dafür ist einzig, dass die thermische Masse des Gebäudes möglichst hoch ist und eine Lüftungsanlage vorhanden ist oder einfach eingebaut werden kann. Das könnten alle Arten von Lager sein, die durch eine Ventilationsanlage belüftet werden.

Lüftungsanlagen sind in modernen Energiekonzepten nicht mehr wegzudenken, so ist der strenge Minergie-Standard ohne Zwangslüftung nicht erreichbar. Allerdings zeigen Minergie-Gebäude im Winter oft eine eher zu geringe Luftfeuchtigkeit, welche bei den Bewohnern Komforteinbussen in Form von trockenen Schleimhäuten oder beim Holzwerk übermässigen Schwund auslösen kann.

Die Sensorik wird immer kostengünstiger bei gesteigerter Zuverlässigkeit. Dies hilft mit, die Steuerungen günstiger zu konstruieren, was wiederum die Rückzahldauer vermindert.

### 3.2 Know-how

Das Know-How des Verfahrens liegt – wie auch die Arbeiten im Rahmen dieses Forschungsauftrages gezeigt haben – in der Platzierung der Sensoren und in der genauen Parametrierung des Reglers. Der lange Zeitraum, der zur Betrachtung notwendig ist, verhindert ein Parametrieren nach der „Try and Error“-Methode. Schliesslich nutzt das Verfahren den Witterungsjahresgang!

Auch in das Thema „Know-How“ fällt die Kunst, die Anlagen zu warten, auf einen aktiven Betrieb (z.B. Belegung infolge militärischer Übungen) vorzubereiten und die Anlage nach aktivem Betrieb wieder in den Unterhaltsbetrieb zurück zu fahren. Nach einer Belegung sind die Anlagen noch kurze Zeit warm, gleichzeitig herrscht im Innern eine sehr hohe Luftfeuchtigkeit. Diese Feuchtigkeit muss raschmöglichst wieder entfernt werden. Hier kann ein Regler nach der oben beschriebenen Methode helfen.

Im Hochfeuchtebereich zeigen alle Sensoren sehr unterschiedliches Verhalten; das Problem scheint noch nicht gelöst zu sein. Um Sensoren auch bei höheren Feuchtigkeiten einsetzen zu können, wurden in unserem Hause verschiedene Anstrengungen unternommen.

## 4. Einspar-Möglichkeiten und -Potenziale

### 4.1 Illustration der Funktion anhand von Messdaten

Die unten abgebildete Messreihe verdeutlicht die Funktion des Regelsystems. Die blaue Linie ist die relative Feuchtigkeit im Anlageninnern (blaue Skala rechts), während die rote Linie die Innentemperatur zeigt.

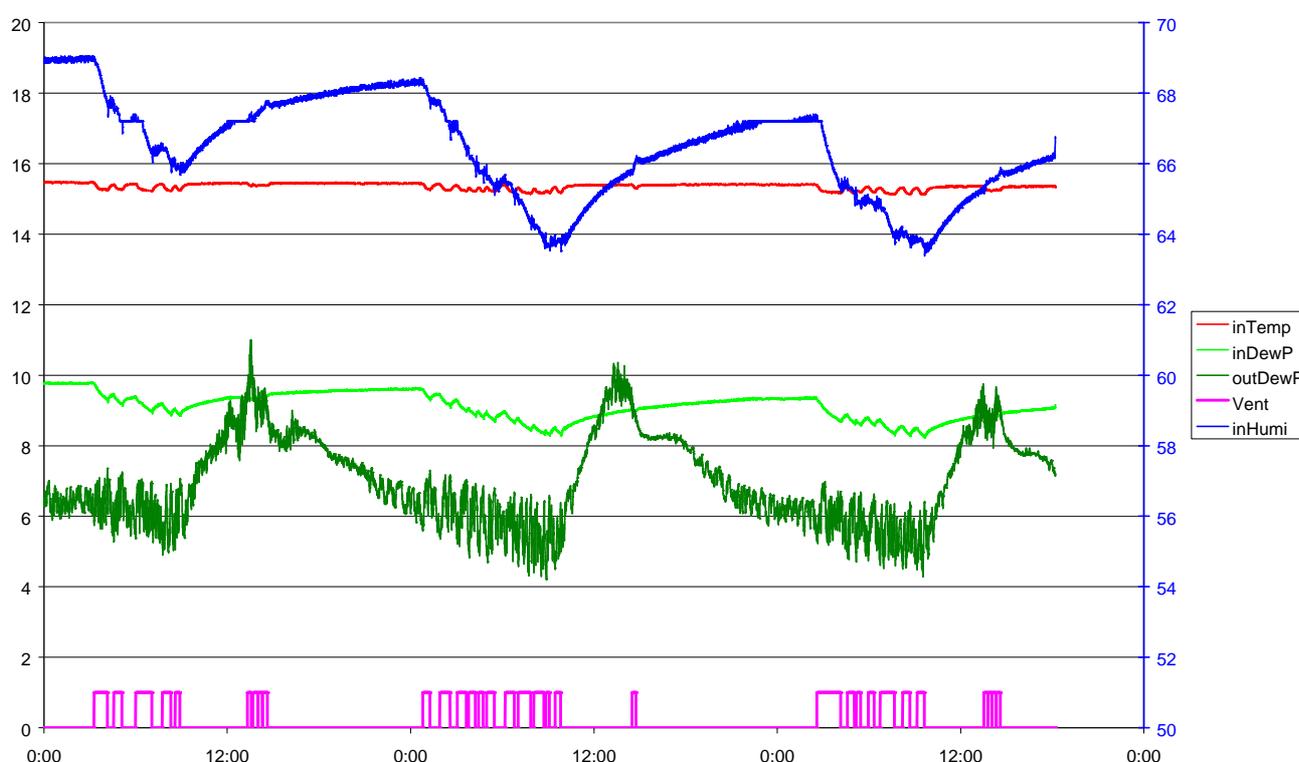
Die beiden grünen Linien sind die berechneten Taupunkte, hellgrün im Innern und dunkelgrün derjenige der Aussenluft.

Der lila Kurvenzug zeigt die Freigabe der Lüftung. Die starken Schwankungen der Aussenfeuchtigkeit infolge ganz leichtem Wind führen trotz grosser Hysterese zu vielen Schaltaktionen während den günstigen Zeiten. Gut erkennbar ist die Wirkung: innerhalb von etwa 4 Stunden sinkt die Luftfeuchtigkeit um bis zu 4%.

In diesem betrachteten Zeitraum von 66 Stunden war die Lüftung total 330 Minuten in Betrieb. Der Energiekonsum betrug 4.2 kWh – und dies völlig ohne mechanische Entfeuchtung.

(Ohne den Regler wäre die Lüftung täglich 2 Stunden – von 22:00 bis 24:00 als Zwangslüftung in Betrieb gewesen. Gleichzeitig wären mit den bei Versuchsbeginn angetroffenen Einstellungen beide Entfeuchter ständig in Betrieb gewesen. Der Energiekonsum hätte somit über 100 kWh betragen. Dafür hätte die Feuchtigkeit vermutlich bei etwa 60% gelegen.)

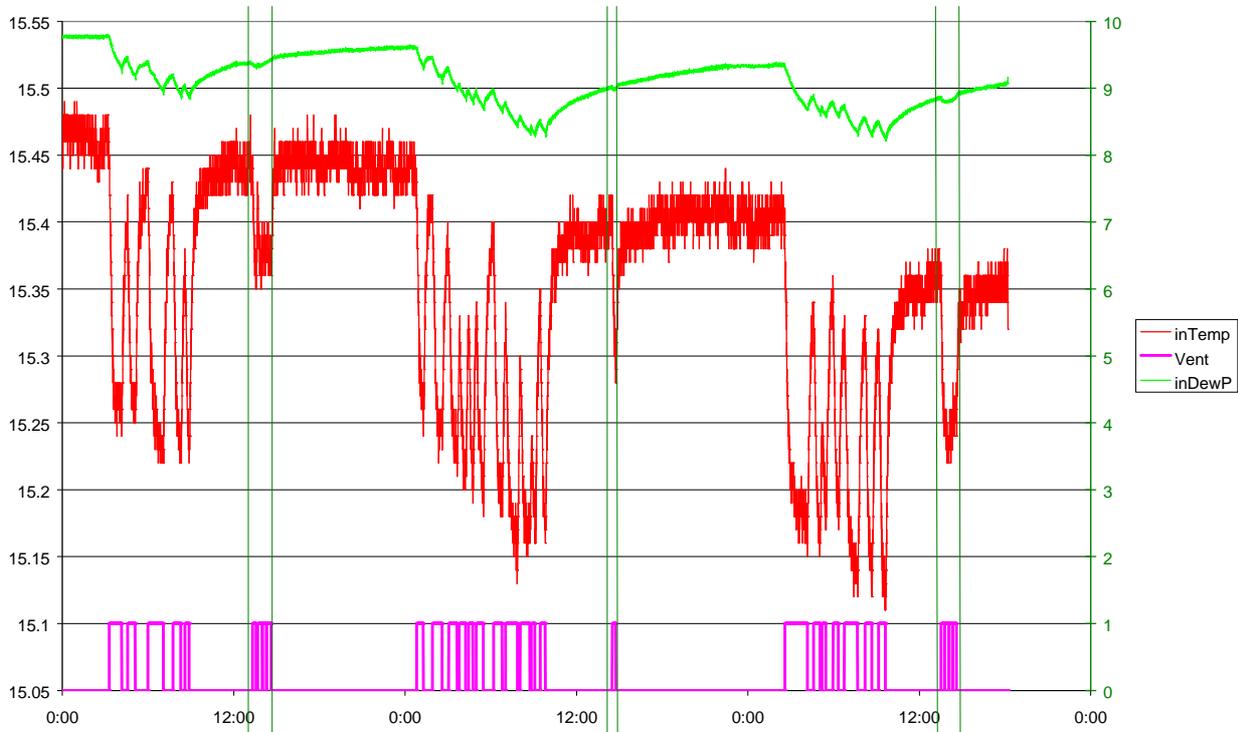
Allerdings muss darauf hingewiesen werden, dass die Innenfeuchtigkeit gemäss den Weisungen des Zivilschutzamtes nicht über 65% liegen sollte.



Die lila Kurve zeigt aber jeweils um etwa 14:00, dass gelüftet wurde trotz schlechten Wassergehaltsbedingungen. Der Grund dafür ist der „Heizbetrieb“. Die Aussentemperatur stieg wesentlich an, während der Aussentaupunkt stellenweise unter dem Innentaupunkt lag. Somit wurde die Einschaltbedingung erfüllt.

Die Funktion „Heizen mit Frischluft“ scheint allerdings nicht die gewünschten Erfolge zu bringen. Auf der untenstehenden Grafik sind die Bereiche „Heizen mit Frischluft“ mit senkrechten dunkel-

grünen Linien markiert. Gut erkennbar auf der vergrößerten Grafik ist, dass die Innentemperatur absinkt, statt zu steigen, wie beabsichtigt. Viel läuft glücklicherweise nicht falsch, denn der Taupunkt (grün, rechte Skala) sinkt ebenfalls ab.



Der Grund für dieses Verhalten ist erklärbar: der Luftweg über die Luftfassung und die unterirdischen Rohrleitungen kann gar nicht genügend erwärmt werden. Da die warme Aussenluft trotzdem einen tiefen Taupunkt aufweist, kann das Anlageninnere getrocknet werden.

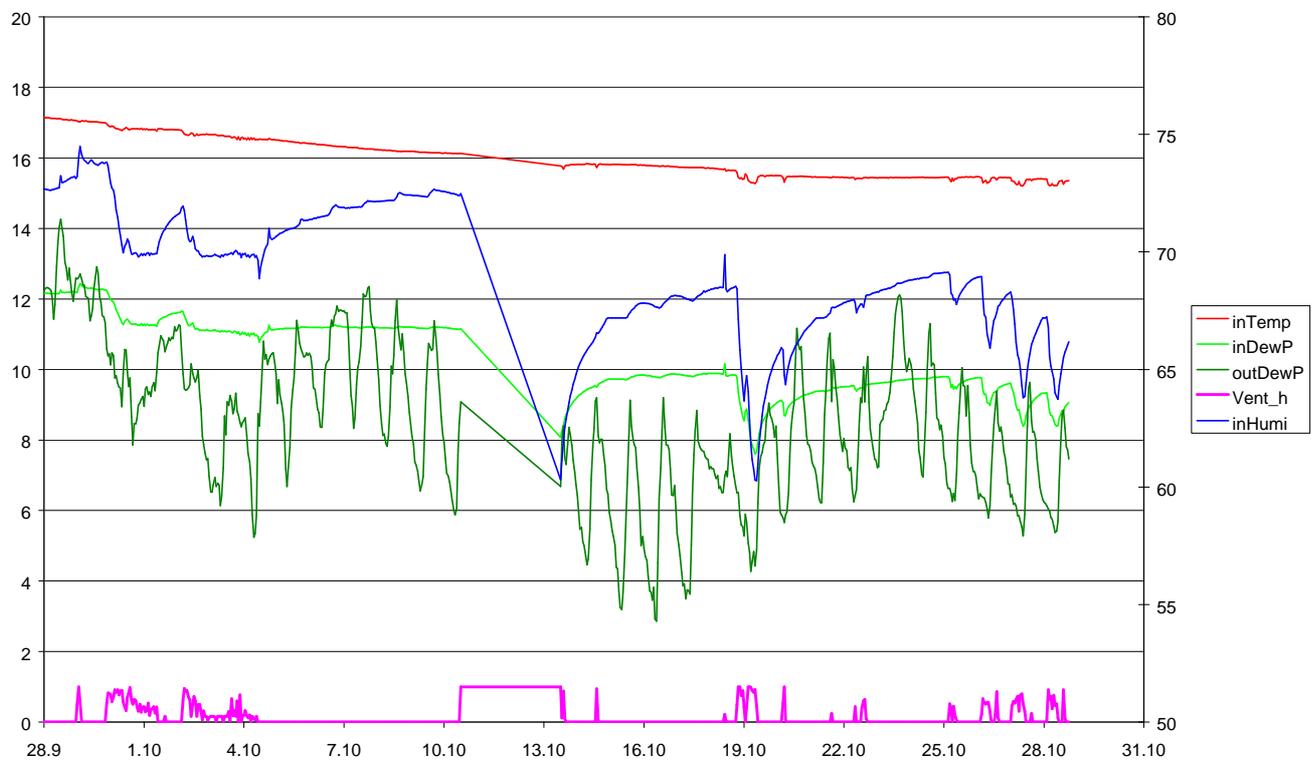
Ganz verwerfen möchte ich die Idee des „Heizens“ trotzdem nicht. Im Frühjahr muss das Innere der Schutzbaute möglichst rasch auf höhere Temperaturen gebracht werden, da sonst das Entfeuchten mit Aussenluft später gar nicht möglich ist. Es ist denkbar, dass bei längerer Lüftungsdauer die Zuluftkanäle nach und nach erwärmt werden können.

## 4.2 Zivilschutzanlage GLS

Die Bedingungen während dem Sommer waren so schlecht, dass ein Lüftungsbetrieb nicht möglich war. Ausserdem war die Zivilschutzanlage im September durch Militär belegt. Die Luftfeuchtigkeit war beim Übergang in den Unterhaltsbetrieb mit rund 75% sehr hoch.

Man erkennt, wie der Regler die Anlage rasch auf 70% hinuntertrocknen kann – ganz ohne den Einsatz von Entfeuchtungsgeräten. Allerdings blieb die Feuchtigkeit linealgerade auf 70% trotz eigentlich guten Bedingungen. Ein Überprüfen des Algorithmus brachte es an den Tag: ein Überlegungsfehler hatte sich eingeschlichen! Dieser blieb den ganzen Sommer wegen den fehlenden Lüftungsmöglichkeiten unentdeckt.

Danach begann die Luftfeuchtigkeit wieder langsam zu steigen – eine Schlechtwetterperiode hatte begonnen.



Im Monat Oktober bezog die Anlage für die Lüftung eine elektrische Energie von 75 kWh. Die Entfeuchter waren bewusst abgeschaltet.

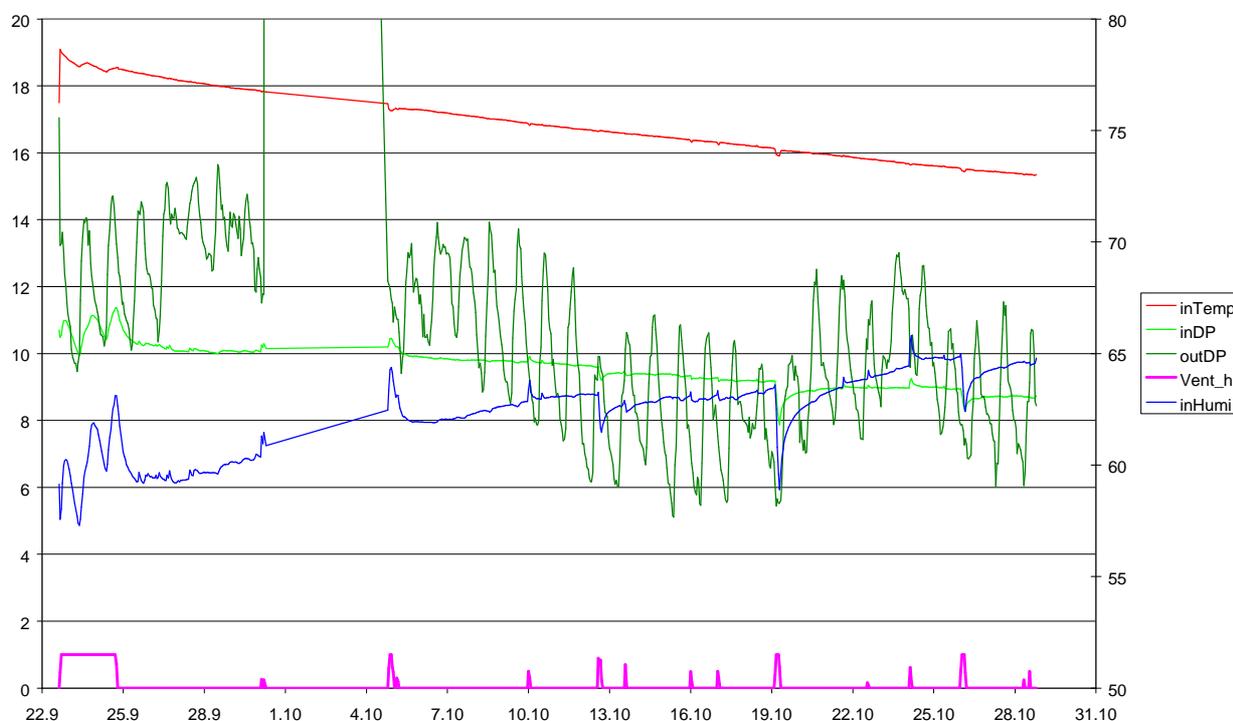
Im Sommer bezog die Anlage pro Monat durchschnittlich 100 kWh für die Lüftung und 800 kWh für die Entfeuchtung. (Die Heizung während der Belegung ist bewusst nicht berücksichtigt.)

### 4.3 Zivilschutzanlage NEB

Bei der Zivilschutzanlage NEB fiel auf, dass die Temperatur im Innern recht hoch war. Erst wurde dies auf die besondere Lage zurückgeführt. Einem Mitarbeiter fiel dann auf, dass der Elektroluft-erhitzer beim Einschalten der Lüftung automatisch in Betrieb gesetzt wurde. Eine Abklärung ergab, dass dies vom Anlageneigentümer offenbar so gewünscht war, damit die Temperatur im Innern nicht so stark abfallen würde. Dadurch hatte die Anlage natürlich nie Feuchtigkeitsprobleme, dafür eine hohe Stromrechnung.

Nach Abschalten des Luftherhizers stieg die Feuchtigkeit im Anlageninnern kontinuierlich an. Wie vorhergesagt scheint die Aussenmessung zu hohe Werte für die Feuchtigkeit zu liefern. Deshalb fallen die Einschaltzeiten recht kurz aus.

Das kontinuierliche Absinken der Temperatur (rote Linie) zeigt, dass sich die Anlage nach dem Wegfallen der Heizung langsam der Umgebung anpasst.



Vom 1.10. bis zum 4.10. fiel der Aussensensor aus: das Kabel erlitt einen Defekt durch Quetschung in der Panzertüre.

Ein weiterer interessanter Fehler betrifft die Zeit vom 22.9. bis zum 25.9. auf. Durch einen Manipulationsfehler blieb die Lüftung dauernd eingeschaltet. Die Innenfeuchtigkeit zeigt genau die Welligkeit des Taupunktes der Aussenluft. Nach dem Abschalten sinkt die Feuchtigkeit rasch ab, was durch die Aufnahmekapazität des Bauwerkes erklärt werden kann.

Im Monat Oktober bezog die Anlage für die Lüftung eine elektrische Energie von nur 16 kWh. Der Entfeuchter war auch hier bewusst abgeschaltet. Trotzdem lag die Feuchtigkeit immer unter 65%.

Im Sommer bezog der betrachtete Teil der Anlage pro Monat durchschnittlich 90 kWh für die Lüftung und 500 kWh für die Entfeuchtung. Hinzu kamen noch 500 kWh für die Heizung: total 1090 kWh pro Monat. Die Stromrechnung bewies den hohen Verbrauch: pro Jahr bezog die Anlage im letzten Jahr knapp 30000 kWh.

#### 4.4 Abschätzung des Potenzials und der Wirtschaftlichkeit

Der Versuchsbetrieb zeigt, dass in der Übergangszeit mit Hilfe des Reglers die Luftfeuchtigkeit im Innern von Zivilschutzanlagen innerhalb des Toleranzbereichs gehalten werden kann. Der Zielwert beträgt 65 %, in den Versuchsanlagen betrug die Feuchtigkeit 65% bis 68%. In den Wintermonaten ist das Entfeuchten mit Aussenluft durchwegs möglich, unter der Voraussetzung, man achtet darauf, dass die Innentemperatur nicht zu stark absinkt.

Klar zum Ausdruck kam allerdings auch, dass ein reiner Entfeuchtungsbetrieb mit der Lüftung während den Sommermonaten (Mai bis August) nicht realisiert werden kann. Hier stellt sich die Frage, ob das Bundesamt für Zivilschutz an der Bestimmung für die Zwangslüftung festhält. Jedes Lüften während den Sommermonaten bringt viel Feuchtigkeit ins Anlageninnere. Eine rechnerische Abschätzung zeigte, dass in einer einzigen Sommernacht bis zu 5 Liter Wasser pro Stunde ins Gebäudeinnere gelüftet werden kann. Somit sollte auf die Zwangslüftung verzichtet werden.

Die betrachteten Zivilschutzanlagen beziehen im Normalbetrieb (Unterhaltsbetrieb) für Lüftung und Entfeuchtung pro Jahr je 8000 kWh Energie. Während dem Sommerhalbjahr ändert sich mit dem Einbau des witterungsgeführten Entfeuchtungsreglers nichts. In den sieben Monaten von Winter und Übergangszeit kann mit Hilfe des Entfeuchtungsreglers mit reiner Lüftung die Innenfeuchtigkeit unter dem Zielwert gehalten werden. Nimmt man 100 kWh als den monatlichen Bedarf für die Lüftung an, erkennt man, dass der Energiebedarf für Lüftung und Entfeuchtung deutlich unter 5000 kWh (etwa 4000 kWh im Sommer und 700 kWh im Winter) sinkt.

**Das Sparpotenzial liegt also bei über 3000 kWh pro Jahr und Anlage.**

**Hochgerechnet auf die ganze Schweiz resultiert somit ein Sparpotenzial von 9 GWh, was bei einem mittleren Strompreis von 17 Rappen eine finanzielle Einsparung von über 1.5 Millionen Franken pro Jahr ergibt.**

#### 4.5 Rückzahldauer der Investition

Gemäss den Angaben in den Stromrechnungen führen diese Energieeinsparungen zu finanziellen Einsparungen von rund 500 Franken pro Jahr und Anlage.

Die Sensorik und der Regler – welcher in den Schaltschrank eingebaut wird, dürfte für einen Verkaufspreis von rund 2000 Franken zu realisieren sein. Die Installationskosten in den Anlagen beschränken sich auf den Ersatz der Schaltuhr durch den Regler und das Verlegen von zwei geschirmten Schwachstromleitungen. Allerdings muss eine Schwachstromleitung durch die Aussenhülle der Zivilschutzanlage geführt werden. Der Aussensensor wird mit Vorteil an einem Antennenmast oder in einem Luftfassungsschacht, sofern dieser von mehreren Seiten geöffnet ist, befestigt. Die Kosten für die Installation dürften also 1000 Franken nicht übersteigen.

$$ROI = \frac{\text{Investition}}{\text{Einsparung}} = \frac{3000}{500} = 6$$

Die Investition dürfte somit in 6 Jahren durch die Einsparungen wieder wettgemacht sein.

## 5. Umsetzung

### 5.1 Allgemeines

Die Umsetzung der hier vorgeschlagenen Sparmassnahme ist eigentlich einfach und kostengünstig möglich. Die grösste Schwierigkeit ist das Platzieren der Sensoren, namentlich des Aussenfühlers. Dieser muss vandalensicher so angebracht werden, dass er von der Umgebungsluft gut umspült wird. Von einem Platzieren des Aussensensors in einem Notausstieg ist leider – wie der Versuch gezeigt hat – abzuraten.

Die Zuleitungen zu den Sensoren müssen in den Ventilationsmaschinenraum geführt werden. Dazu ist die Aussenhülle an einer Stelle zu durchdringen, was mit grossen Schwierigkeiten verbunden sein könnte. Die Zuleitung des Innenfühlers in den Aufenthaltsraum ist dagegen wesentlich einfacher.

Der Regler liegt noch nicht publikumstauglich als Ersatz der Lüftungszeitschaltung vor. Mit der Entwicklung wird noch zugewartet, bis die Erkenntnisse des zweiten Winters vorliegen. Das neue Gerät soll im Rahmen von Publikationen, welche sich auf diese Studie beziehen, in der Fachpresse vorgestellt werden.

### 5.2 Feedback

Nach Abschluss der Studie wurden die Ergebnisse mit Personen des kantonalen Zivilschutzamtes und mit Personen des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz diskutiert.

Ein Anlageninspektor des Bundesamtes für Bevölkerungsschutz zeigte sich überzeugt von der Idee. Er betonte, dass das Verständnis für die physikalischen Hintergründe bei Ventilationen oft nicht einfach zu vermitteln seien. Es gebe immer wieder Anlagenwarte, die die Lüftung bei trockenem Sommerwetter in Betrieb nehmen würden und sich dann über die gestiegene Luftfeuchtigkeit wundern würden. Er fand, dass ein derartiger Automat den Betrieb einer Zivilschutzanlage stark vereinfachen könne. Die mobilen Entfeuchtungsgeräte müssten jedoch durch den Regler einbezogen werden, denn nur so könne eine optimale Funktion erreicht werden. Allerdings erkannte er die Lüftungsklappen als zusätzlichen Problempunkt, denn diese sind grundsätzlich manuell zu bedienen und steuern die Anteile von Frischluft und Umluft. Wenn die Frischluftklappe ganz geschlossen ist, kann natürlich die Anlage nicht mehr entfeuchtet werden. Umgekehrt betonte er die Wichtigkeit des Umluftanteiles: damit wird die Luft im Rauminnen umgewälzt, damit keine „feuchten Ecken“ entstehen können. Somit kann im Sommer auf die Umwälzung der Luft per Zwangslüftung offenbar nicht verzichtet werden, dann muss jedoch die Frischluftklappe zur Verhinderung eines Feuchtigkeitseintrages ganz geschlossen werden. Er bestätigte, dass die Entfeuchtungsgeräte in den Anlagen oft nicht korrekt eingestellt seien. Gar keine Probleme sah er bei den Installationsarbeiten: er sagte ausdrücklich, dass ein Durchbohren des Aussenhaut absolut kein Problem darstelle, denn der Überdruck in der Anlage kompensiert die Undichtigkeit. Auch der Explosionsschutz sei trotz solcher Durchführungen immer gewährleistet, was durch Versuche nachgewiesen worden sei. Er betonte, dass es grundsätzlich Sache des Eigentümers (im Normalfall die örtliche Gemeinde) sei, an den Anlagen Veränderungen vorzunehmen, das Bundesamt könne nur empfehlen, selten aber vorschreiben.

Ein Anlagenbetreuer lobte die Möglichkeit, die Messwerte grafisch auswerten zu können. Dies würde die korrekte Einstellung der Luftklappen und Parameter vereinfachen. Das Arbeiten mit der Taupunkttafel sei ihm klar, allerdings sei der Regler „dauernd vor Ort“ und könne so das Raumklima besser regeln und sicherlich am Energie sparendsten arbeiten.

Im Rahmen einer Weiterbildungsveranstaltung für Anlagenwarte wurde das Prinzip erläutert und auf die Einsparmöglichkeiten aufmerksam gemacht. Die Teilnehmer zeigten sich beeindruckt und interessiert.

## 6. Quellenverzeichnis

- „Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen“, Jahresbericht 2004, Adrian E. Weitnauer
- „Effizientes Entfeuchten von abgeschlossenen Räumen“, Projektbeschreibung, Adrian E. Weitnauer
- F.A. Berry, Handbook of Meteorology, McGraw-Hill
- Handbuch Heizungs- und Klimatechnik, Recknagel, 1993
- Taschenbuch der Physik, Kuchling, 1982
- Datasheet SENSIRION SHT-Sensors, SENSIRION, 8712 Stäfa
- Technische Weisungen für den Unterhalt von Schutzbauten (TWU 2000), Bundesamt für Zivilschutz
- Technische Datenblätter für die Luftentfeuchter, ESCO Schönmann AG
- Datenblätter zum Wasserentzug für die Luftentfeuchter, Roth Kippe AG
- Technische Datenblätter, Munters AG