

Performance Audit Tool PAT: ein Expertensystem zur Detektion und Diagnose von Fehlverhalten von HLK-Anlagen in realen Gebäuden

Peter Gruber, Sabine Kaldorf, Landis & Staefa Zug

Zusammenfassung

Das auf einem Expertensystem basierenden Performance Audit Tool PAT ist ein Prototyp eines automatischen Gebäudeüberwachungssystems um Fehlverhalten von HLK-Anlagen zu detektieren und zu diagnostizieren. Der Ablauf eines Audits soll der folgende sein: Vom Gebäudeleitsystem werden täglich Daten von Anlagenteilen, Zonen, Teilsystemen und vom Gebäude selber gesammelt. Nachts werden darauf die Daten mit dem Expertensystem analysiert und morgens liegt jeweils ein Report für den Operator vor, der auf Fehlverhalten und mögliche Ursachen aufmerksam macht. Es werden Fehlverhalten bezüglich Energieverbrauch und Komfort untersucht. Für die Analyse werden keine aktiven Tests gemacht und keine on-line Benutzereingaben verlangt. Damit das PAT für verschiedene Gebäude eingesetzt werden kann, müssen Informationen über das Gebäude und das konfigurierte Regelungssystem eingegeben werden und in einer Datenbank abgelegt werden. Der Prototyp läuft seit knapp einem Jahr in einem Bürogebäude, in dem drei Zonen und eine zentrale Luftaufbereitungsanlage überwacht werden. Der vollautomatische Ablauf ist dabei noch nicht ganz gewährleistet. Weitere Installationen sind geplant.

Resumé

Le logiciel avec le nom PAT (Performance Audit Tool) est un prototype d'un système de surveillance automatique des installations de climatisation d'un bâtiment basé sur un système d'expert pour détecter et diagnostiquer des fausses performances. Le déroulement d'un "Audit" est le suivant: Des données du bâtiment, des zones, des composants et des systèmes partiels, sont accueillies jour par jour. Pendant la nuit les données sont périodiquement analysées avec le système d'expert. Le matin, un rapport est produit pour l'opérateur qui est fait attentif aux défauts et leurs causes possibles. Des essais actifs et des dialogues avec l'opérateur ne sont pas nécessaires pour l'analyse. Pour que le PAT est usable pour des bâtiments différents il est nécessaire que des informations concernant le bâtiment et le système de control sont entrées dans une base de données. Le prototype est en opération pour un an dans un bâtiment d'office dans lequel une centrale pour le traitement de l'air et trois zones sont surveillées. Le déroulement automatique n'est pas encore complèt. D'autres installations sont prévues.

Summary

The Performance Audit Tool PAT is a prototype of an automatic building supervision system capable of detection and diagnosis of underperformance of HVAC installations. It is based on an expert system. The Audit is done as follows: data from plants, components, zones and the whole building are collected daily by the building energy management system (BEMS). At night time the data are analysed by the expert system and a report is generated each morning for the operator of the building indicating underperformance relating to energy and comfort and its possible causes. No active testing or user inputs are needed for the audit. In order to be able to apply the PAT to different buildings, information about the building and the configuration of its control system have to be entered in a data base beforehand. The prototype is running since one year in an office building, where 3 zones and one central air handling unit (CAHU) are supervised. The whole Audit process is not completely automated. Further installations are planned.

1. Was liefert das PAT ?

Gemäss Aussagen von verschiedener Seite (Betreiber, Planer, Installateur, Benutzer,...) ist der Betrieb eines Gebäudes in vielen Fällen nicht optimal. Die Gründe dafür sind vielfältig; unter anderem sind dies Zeitdruck, Koordinationsschwierigkeiten während der Projektierung, Planung, Bau und Inbetriebnahme, nicht energiebewusstes Benutzerverhalten, graduelle Verschlechterung von Komponenten und Nutzungsänderungen während des Betriebs. Die genannten Unzulänglichkeiten können grobe Fehler und /oder schleichendes Fehlverhalten verursachen. Ziel des Performance Audit Tool PAT ist es, mithilfe eines Expertensystems die schleichenden Fehler zu finden; die groben Fehler können durch einfachere Methoden erkannt werden. Das Tool soll dabei den Operator des Gebäudeleitsystems oder einer Anlage mit Hilfe von Berichten in den drei folgenden Situationen unterstützen:

- der Operator hat zwar nur wenige Objekte zu überwachen, muss die Kontrolle aber in zeitlich kurzen Abständen tun (zeitlich repetitive Arbeit)
- der Operateur hat sehr viele Objekte zu überwachen, muss dies aber relativ selten tun (mengenmässig repetitive Arbeit)
- Kombination der beiden oberen Anforderungen

Die Fehlverhalten, die detektiert werden sollen, beziehen sich auf Komforteinbussen sowie auf Energieverschwendung.

Im folgenden werden zwei Beispiele (ohne Berichte) während der Heizperiode gezeigt, in denen das Expertensystem Fehlverhalten erkannt hat. Beide Beispiele stammen vom gleichen Bürogebäude.

Zentrale Luftaufbereitungsanlage

Im beobachteten Gebäude wird Luft in einer zentralen Luftaufbereitungsanlage vorkonditioniert. Das Anlagenschema der Luftaufbereitung ist in Fig.1.1 dargestellt. Die Anlage besteht grundsätzlich aus einer Zulufttemperatur und -feuchterege lung mit Wärmerückgewinnung. In einer ersten Analyse beschränken wir uns nur auf die Temperaturen. Die wichtigsten Signale für diesen Fall sind für den 10. Februar 1998 in Fig.1.2 in 10 Minutenschritten aufgezeichnet: es sind dies der Heiz- und der Kühlsollwert der Zulufttemperatur, der Istwert der Zulufttemperatur, die Rücklufttemperatur, die Aussentemperatur, die Stellsignale für das Heiz- und Kühlventil sowie das Wärmerückgewinnungsrad WRG (skaliert von 0-10) und der Betriebsmodus (skaliert 0/1) der Anlage. Das PAT liefert für diesen Tag für die zentrale Luftaufbereitungsanlage folgende Fehlermeldung:

Während der ganzen Belegungszeit (7-18:30) wird ein Fehler in der Ansteuerung des WRG und des Heizventils gemeldet. Die Ursache dieses möglichen Fehlverhaltens wird hier nicht näher diagnostiziert. Bei den gegebenen Temperaturverhältnissen (Rücklufttemperatur höher als Zulufttemperatur) könnte es möglich sein, die Zuluft nur über das WRG zu heizen, falls dieses einen hohen Wirkungsgrad hat. Da die genauen Wirkungsgradkurven des WRG nicht bekannt sind, wird vorsorglich ein Fehler angezeigt.

Klimatisierte Zone

Die aufbereitete Luft wird sodann in verschiedene Zonen, die mit Raumgeräten ausgerüstet sind, verteilt. Eine dieser Zonen ist in Fig.2.1 schematisch dargestellt. Sie wird mit einem konstanten Luftvolumenstrom belüftet und über eine Kühldecke gekühlt und mit einem Radiator geheizt. Für die dargestellte Zone 71 sind die folgenden Signale über die gleiche Zeitperiode aufgezeichnet: Kühl- und Heizsollwert, Isttemperatur, Aussentemperatur, Stellsignale für Heiz- und Kühlventil sowie der Betriebsmodus. Für die Zone meldet das Expertensystem mehrere Fehler:

- 1) Der Kühlsollwert ist nachts zu tief (0-5:30 und 22-24). Da in diesen Zeitperioden die Anlage nicht in Betrieb ist, ist diese Fehlermeldung nicht von Bedeutung
- 2) Der Heizsollwert ist während der Belegungszeit zu hoch (23Grad). Die Diagnose gibt als mögliche Ursachen erhöhter Benutzerkomfort, Raumtemperatursensor-Offset, Zugluft und kalte Abstrahlung an.
- 3) Der Raum ist im Heizbetrieb zeitweise zu kalt (8-9:40, 14:10-15:20). Diese Situation wird detektiert, falls die aufintegrierte Differenz zwischen dem Istwert und einem Toleranzband um den

Sollwert eine gewisse Schwelle überschreitet. Viele mögliche Ursachen (15) werden mangels genügender weiterer Informationen angegeben.

4) Es wird überflüssiges Heizen im Heizbetrieb während dreier kurzer Perioden (10:40-10:50, 13:10-13:30, 16:20-16:30) angezeigt. Diese Meldung erfolgt, falls der Istwert mindestens 30min. immer über 0.5 Grad über dem Sollwert liegt. Es werden wiederum mehrere mögliche Ursachen diagnostiziert.

5) Es wird ein inkonsistenter Messwert kurz vor 12 angezeigt (Raumtemperatur liegt über Rücklufttemperatur).

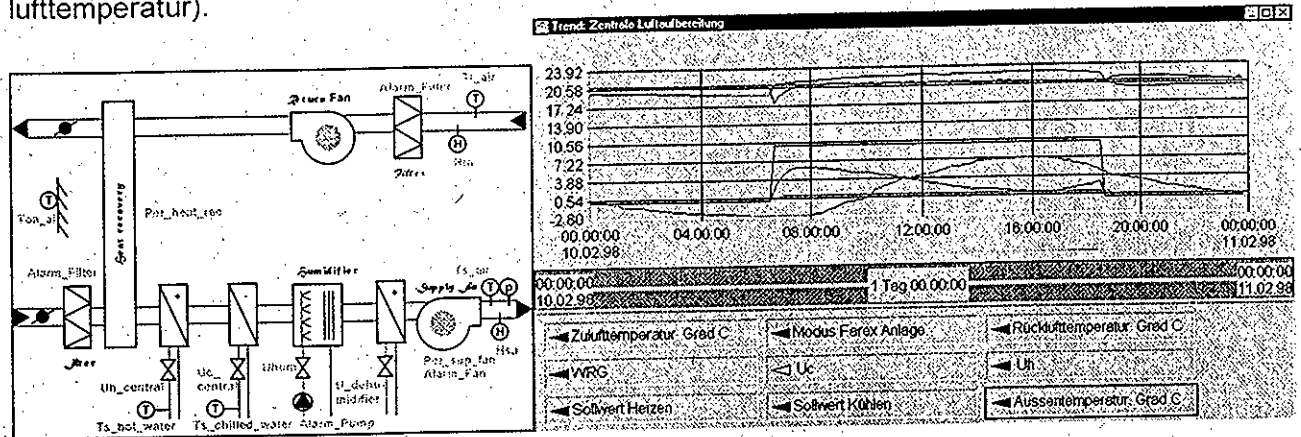


Fig. 1.1: Schema der Luftaufbereitung

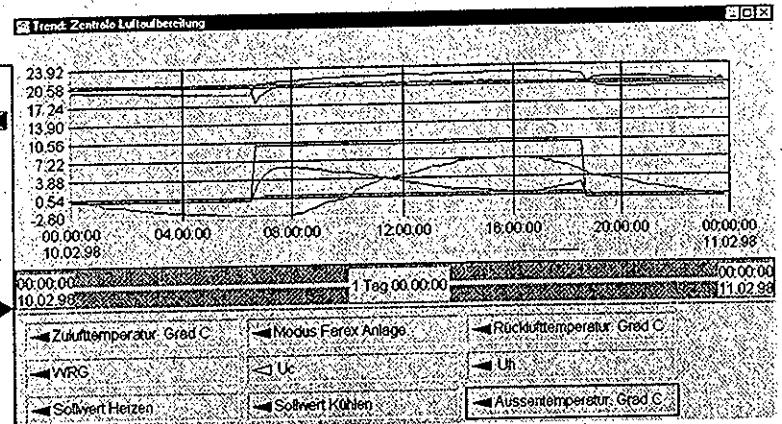


Fig. 1.2: Signale der Luftaufbereitung vom 10.2.1998

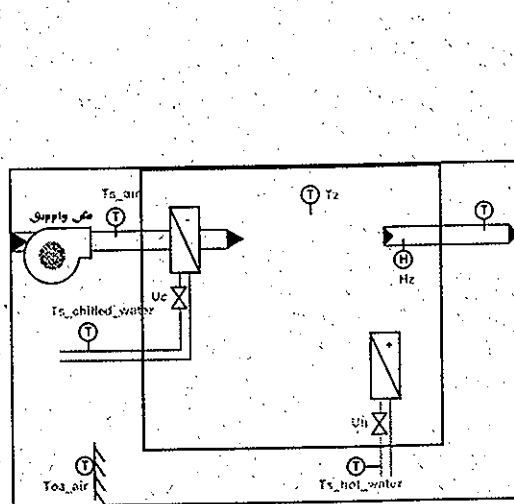


Fig.2.1: Schema der Zone

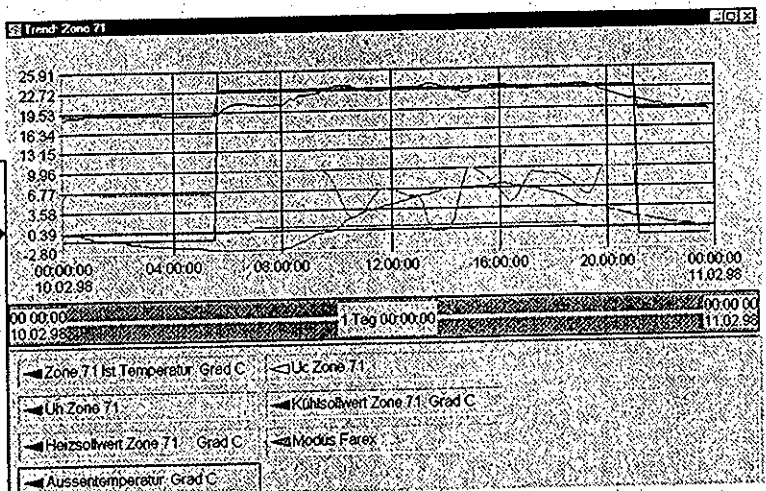


Fig.2.2: Signale der Zone vom 10.2.1998

2. Der Aufbau des PAT

Aus welchen Teilen besteht nun das PAT? In Fig.3 ist dessen modularer Aufbau wiedergegeben. Folgende Komponenten können unterschieden werden:

- Die "Data" Komponente lädt die Zeitreihen (normalerweise 10 min Intervalle) von der internen Datenbank des Gebäudeleitsystems (BEMS) in eine eigene **Trenddaten Archiv Datenbank**. Dabei müssen verschiedene BEMS spezifische Datenmanagement -Tools integriert werden. Ungültige Daten werden durch Vergleich mit Grenzwerten aussortiert und fehlende Daten werden bis zu einem gewissen Grad interpoliert.
- Die "Configuration Information" Komponente bietet ein Benutzer Interface an, mit dem die Konfigurationsdaten für ein spezifisches Gebäude in eine relationale **Konfigurationsdatenbank** eingegeben werden kann. In dieser werden folgende Daten über folgende Objekte abgespeichert:

1. Gebäudetopologie (Zonen, Stockwerke)
 2. HLK System (Subsysteme, Anlagen, Komponenten, Anlageparameter)
 3. Datenpunktdefinitionen (Namen, technische Adresse, Benutzeradresse)
 4. Datenpunkt-funktionen und -lokalitäten (z.B. Zonentemperatur der Zone xxx)
 5. "Fahrplan" für den Betrieb (Arbeitszeiten, Ferien,...)
 6. Auslegewerte der Anlage (z.B. Temperaturen)
- Die "**Knowledge**" Komponente enthält: 1) das für die Fehlerdetektion nötige Expertenwissen über den korrekten Betrieb eines Gebäudes und 2) das für die Diagnose nötige Expertenwissen über mögliche Ursachen. Beide Teile sind in Regeln, die Entscheidungsbäume bilden, formuliert, die in einer **Wissensdatenbank** abgespeichert sind.
 - Die "**Audit**" Komponente verbindet das Expertenwissen und die Konfigurationsinformation, damit die archivierten Daten interpretiert werden können. Fälle von Fehlverhalten und deren mögliche Ursachen werden aus dieser Komponente in die Resultate Datenbank exportiert.
 - Die "**Results**" Komponente enthält eine **Resultatdatenbank**, in der die gefundenen Fehlverhalten und ihre mögliche Ursachen abgelegt werden. Auf dieser Datenbank können auch Berichte über die Resultate des Audits erstellt werden.

Das Expertenwissen und der Audit selber sind mit der Expertensystem Shell Level 5 Object realisiert worden. Diese Software wiederum ist so in eine konventionelle relationale Datenbankumgebung eingebettet, dass der Benutzer die Shell normalerweise nicht zu sehen bekommt. Als relationale Datenbank wurde MS Access gewählt, Visual Basic wurde benutzt für das Schreiben von Zusatzfunktionen.

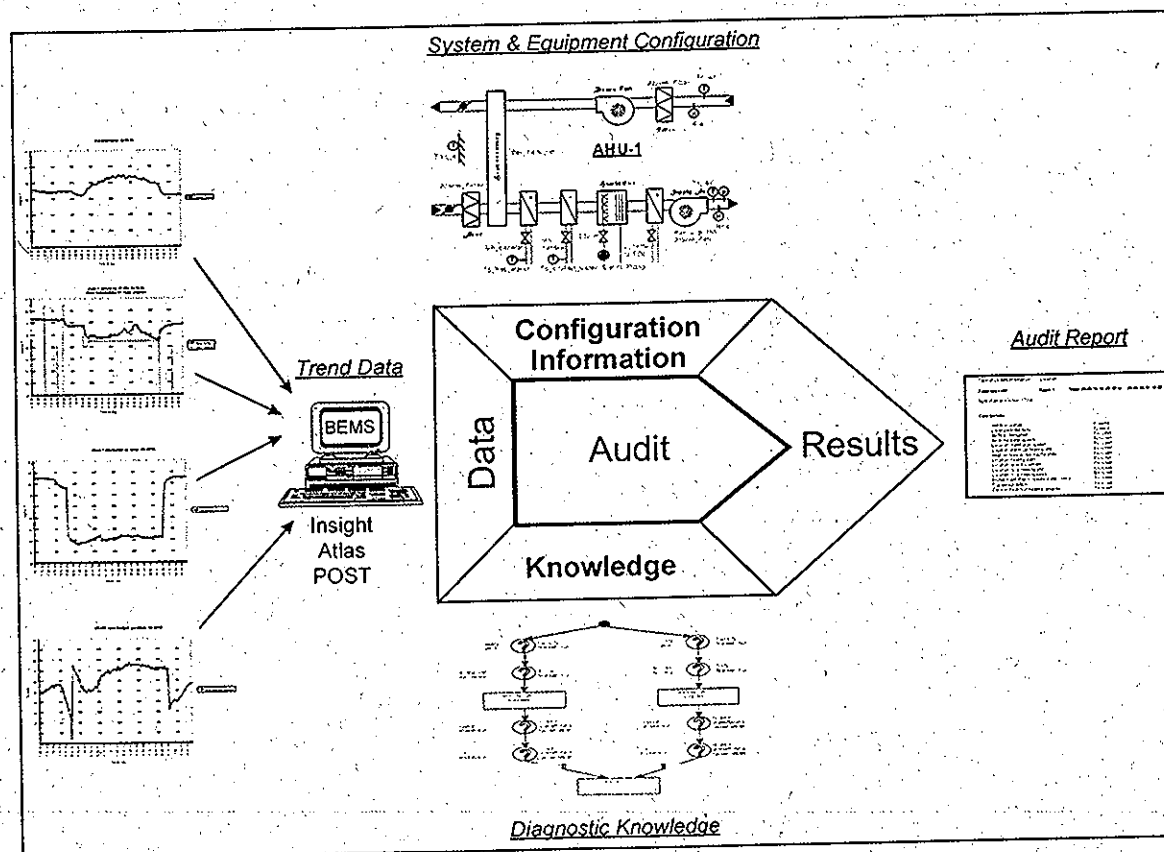


Fig.3: Aufbau des Performance Audit Tool PAT

3. Was kann das PAT ?

Der Kern des PAT ist die Wissensbasis und die Inferenzmaschine. Folgende Hauptpunkte können über diese Teile ausgesagt werden:

- Die Regeln für die Fehlerdetektion und -Diagnose sind so geschrieben worden dass sie mit konfigurierbaren Werten der Konfigurationsdatenbank parametrisiert werden können. Sie sind in dieser Hinsicht generisch formuliert. Wenn immer möglich, werden auch Schwellwerte allgemeingültig pro Modul und Betriebsmodus angegeben

Regelbeispiel 1: **Wenn** die Aussentemperatur für länger als die *relevante Zeit* über der *Auslegungstemperatur des Kühlsystems* gewesen ist, dann werden die Zonen als nicht zu warm betrachte.

Die spezifische Werte der *relevanten Zeit* und der *Auslegungstemperatur des Kühlsystems* für ein bestimmtes Gebäude werden dann erst während des Gebäude-Audits aus der Konfigurationsdatenbank gelesen. Dies erlaubt, das System für verschiedene Gebäude zu konfigurieren, da die Konfigurationsdatenbank diejenige Information über das Gebäude und sein Leitsystem enthält, die neben den fest eingestellten Schwellwerten nötig sind, um die spezifischen Parameter der Regeln festzulegen. Die Regeln selber werden durch den Benutzer nicht verändert. Sie wurden mithilfe von Gebäude- und Leitsystemexperten aufgestellt und sind vor dem eigentlichen Audit in die Wissensbasis eingegeben worden. Es ist zu bemerken, dass viele der Regeln nicht nur "Steady state"-Beziehungen sondern auch zeitabhängige Ursache-Wirkungs-Beziehungen beschreiben.

Regelbeispiel 2: **Wenn** die Fehlersumme gebildet aus der Differenz zwischen der Zonentemperatur und dem effektiven Kühlsollwert, unter Berücksichtigung von natürlichen Fluktuationen die Toleranz von 10 Kelvinminuten übersteigt und dies während der Belegungszeit auftritt und die mittlere Aussentemperatur während der letzten Tage den Auslegungswert des Kühlsystems nicht überschritten hat und es keinen bekannten Fehler des Aussentempersensors gibt und die Anlage nicht gerade für Wartungszwecke ausgeschaltet worden ist dann wird daraus geschlossen dass die "Zone zu warm" ist und es werden Ursachen dafür gesucht.

Weiter können Regeln zur Diagnose vorkommen, die mehrere Zonen und die zentrale Luftaufbereitungsanlage miteinander verknüpfen.

Beispiel 3: Es wurde festgestellt, dass eine Zone zu warm ist. Es wird nun unter anderem folgendes geprüft: **Wenn** die Zone durch eine zentrale Kühlung versorgt wird, gibt es dann **ähnliche** Zonen wie die fehlerhafte, in denen das **gleiche** Problem (Zone zu warm) auftritt ?

- Die Tiefe des "Audits" wird bestimmt durch die zur Verfügung stehende Information, die in die Konfigurationsdatenbank eingegeben worden ist. Das bedeutet, dass effektiv nur diejenigen Teile der Regeln abgearbeitet werden, die durch die eingegebenen Informationen zur Detektion und Diagnose fähig sind. Das heißt, dass eine genauere Beschreibung des Gebäudes und seines Regelungssystems eine detailliertere Analyse des Gebäudeverhaltens ermöglichen wird. Damit kann am Anfang eine kleinere Systemkonfiguration mit **kleinerem** Engineering Aufwand aufgebaut worden. Um eine genauere Analyse des Gebäudeverhaltens zu erhalten, kann die Konfiguration schrittweise erweitert werden.
- Die Diagnose erfolgt in drei Schritten:

- i) Vorverarbeitete Daten werden benutzt, um Problembereiche (Fehlverhalten) zu **detektieren**. Das Fehlverhalten kann sich auf Zonen (z.B. "zu kalt") Teilsysteme (z.B. "gleichzeitig Heizen und Kühlen in der zentralen Luftaufbereitungsanlage") oder auf das ganze Gebäude (z.B. "überhöhter Energieverbrauch") beziehen. Zu Beginn wurde vor allem auf bekannte Probleme mit energieintensiven Elementen Wert gelegt. Die Detektion erfolgt mittels **forward chaining**, d.h. es wird von den Daten (Fakten) ausgegangen und versucht, ob mit diesen Daten alle Bedingungen für bestimmte Fehlverhalten erfüllt werden können.
- ii) Der Grund für das Fehlverhalten wird so gut als möglich **lokalisiert** (isoliert). Z.B. wird die Ursache des Fehlverhaltens "Zone zu kalt" in der Zulufttemperatur ("Zulufttemperatur zu tief") lokalisiert. Die Lokalisierung ist ein Zwischenschritt zur Diagnose. Vielmals sind die Daten nicht genug aufschlussreich, um eine genaue Lokalisierung vornehmen zu können
- iii) Ist die Lokalisierung gelungen, dann wird im letzten Schritt ein Liste der möglichen Ursachen, die zum lokalisierten Fehlverhalten führen können, **diagnostiziert**. Die Schritte ii) und iii) können zusammenfallen oder sogar ganz ausfallen (z.B. falls nur eine Ursache zu einem Fehlverhalten vorhanden ist). Beide Schritte werden mittels **backward chaining** durchgeführt, d.h. man geht von Ursachen (Schlussfolgerungen) eines Fehlverhaltens aus und prüft, ob alle Bedingungen, die zu den ausgewählten Ursachen führen, erfüllt sind. Wenn zu wenig Fakten bekannt sind, um alle Bedingungen, die zu einer bestimmten Ursache nötig sind, auswerten zu können, dann kann im allgemeinen diese Ursache nicht ausgeschlossen werden.

Fig.4 zeigt den Entscheidungsbaum, der zum beschriebenen Fehler in der zentralen Luftaufbereitungsanlage (siehe unter Abschnitt 1) geführt hat. In diesem Fall wird nur eine Ursache angegeben; damit wird der Baum mit forward chaining abgearbeitet.

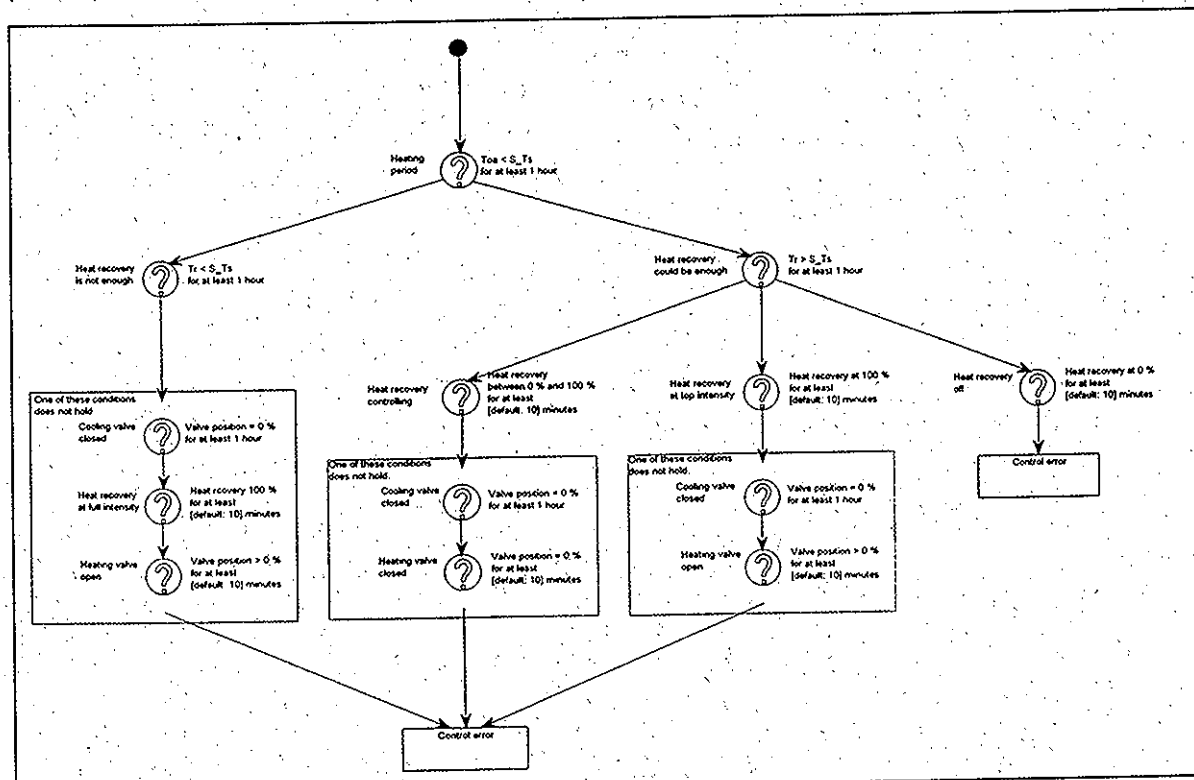


Fig.4: Entscheidungsbaum für fehlerhafte Steuerung der zentralen Luftaufbereitungsanlage

Im Anhang sind die jetzigen Möglichkeiten des PAT nochmals in einer in englischer Sprache abgefasster Tabelle zusammengefasst. Es gibt drei Module: Zone, zentrale Luftaufbereitungsanlage (CAHU) und Kältemaschine (Chiller). Die Zone ist am besten ausgetestet,

die Kältemaschine noch gar nicht. In der Liste sind die folgenden Kenngrößen pro Modul angegeben.

- 1) die Anzahl und die Art der **Punkte (Messwerte)**, die für die **Detektion** aller erfasster Fehlverhalten nötig sind.
- 2) die zusätzliche Anzahl und die Art der **Punkte (Messwerte)**, die für die **Lokalisierung und Diagnose** aller erfasster Ursachen nötig sind.
- 3) die Anzahl und die Art der **Parameter**, die für den ganzen Audit (Detektion, Lokalisation und Diagnose) nötig sind.
- 4) die Anzahl und die Art von detektierbaren Fehlverhalten
- 5) die Anzahl **Entscheidungsbäume**
- 6) die Anzahl **diagnostischer Regeln**
- 7) die Anzahl von **Schlussfolgerungen (Ursachen)**

4. Erfahrungen, Ausblick

Aus den bis jetzt vorliegenden Versuchen, können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden.

- Der Audit in der gewünschten Form mit einem Expertensystem ist grundsätzlich möglich und erfolgreich.
- Die Regeln müssen schrittweise (Learning by doing) erweitert, verbessert und/oder verfeinert werden. Gefundenes Fehlverhalten muss anschliessend mit am Betrieb des Gebäude beteiligten Personen diskutiert werden. Dadurch lassen sich gewisse Fehlinterpretationen und Missverständnisse eliminieren.
- Die gewählte Expertenumgebung ist sorgfältig bezüglich Komfort (und nicht nur bezüglich Preis) auszuwählen.
- Die erhaltenen Resultate müssen über ein weiteres "Expertensystem" gefiltert werden, um die Reportflut handhabbar zu halten und eine vernünftige Auswertung zu erlauben.
- Das Hauptproblem der Anwendbarkeit liegt in der Zeit, die es braucht, um das System auf ein spezifisches Gebäude zu konfigurieren. Solange keine integrale Datenbank zur Verfügung steht, ist eine automatische Konfigurierung nicht möglich. Das Aufsetzen des Systems auf verschiedene Gebäudeleitsysteme mit unterschiedlichen Philosophien und Namensgebung machen Anpassungen bei verschiedenen Schnittstellen notwendig.

Der laufende Versuch mit dem Bürogebäude wird weitergeführt. Mit den Resultaten soll die Wissensbasis überprüft und gegebenenfalls bereinigt werden. Weitere Installationen sind noch eingeplant. Es ist aber nicht an eine Erweiterung des Programms auf weitere Module gedacht. Dazu ist die gewählte Entwicklungsumgebung zu instabil und benutzerunfreundlich. Wir sind aber überzeugt, dass die bereinigte Wissensbasis Grundlage für ein weiteres Tool sein wird.

5. Danksagung

Die Erfahrungen, die momentan mit dem PAT gemacht werden, sind Bestandteil des Beitrags der Landis & Stäfa am IEA Annex 34: "Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings" und werden damit vom BEW unterstützt.

Referenzen

- [1] Sabine Kaldorf, Peter Gruber: Performance Audit Tool PAT: an Expert System based Tool for the Detection and Diagnosis of Building Underperformance, IEA Annex 34: Working paper AN34/CH/290997/1.0, Boulder US
- [2] Sabine Kaldorf: Knowledge Based Module Design, PAT-1003, Internal report Landis & Gyr Building Control Corp. 1996
- [3] Level 5 Object Reference Guide, Information Builders, 1995

Anhang

Table: current status of PAT capabilities

	Zone	CAHU	Chiller
number and type of points needed for detection	9 temperatures control signals operation mode	12 temperatures control signals operation mode humidity pressure, speed	4 status pressure load
additional number and type of points needed for localisation and diagnosis	12 temperatures local commands CO2	14 temperatures operation modes alarms control signals	9 temperatures pressures
number and type of parameters needed for detection, localisation and diagnosis	15 identifiers thresholds schedule design parameters	15 identifiers thresholds	21 identifiers thresholds design parameters
number and type of detectable underperformances total number:36	11 for zone 1 for building <ul style="list-style-type: none">• too hot/too cold (2)• too much heating/cooling (2)• sensor defect/offset (4)• cooling/heating ineffective (2)• higher energy consumption (2)	21 for CAHU 1 for building (same as for zone) <ul style="list-style-type: none">• supply too hot/ cold (2)• too humid/ dry (8)• simultaneous heating/cooling (1)• wrong control combinations (2)• sensor error/ offset (5)• exceeded energy consumption (2)• pressure too high/low (2)	2 <ul style="list-style-type: none">• evaporator pressure too low (1)• condenser pressure too high (1)
number of decision trees total number:28	11	15	2
number of diagnostic rules total number: ca. 250	ca. 100 plus ca. 35 for structuring	ca. 100 plus ca. 35 for structuring (same as for zone)	ca. 15
number of conclusions total number:86	25 for detection in zone, fault cause in zone 11 for detection in zone, fault cause in CAHU	41	9