



**SCHLUSSBERICHT 2000**

Über die Arbeiten gemäss Auftrag: Projekt No: 23749, Vertrags-Nr: 63343

**Titel des Projekts:** Einsatz von Fehlerdetektions- und Diagnosemethoden in realen Gebäuden (IEA Annex 34)

**Zusammenfassung:**

Das Ziel des Projektes bestand darin, bestehende Fehlerdetektions- und Diagnosemethoden im echten Betrieb zu testen. Konkret wurden zwei Methoden an je zwei verschiedenen Objekten in Betrieb genommen und getestet:

- das **Performance Audit Tool PAT**, realisiert mit einem Expertensystem, anwendbar auf Zonen, zentrale Luftaufbereitungsanlagen und ganze Gebäude
- der **Qualitative Modell-Basierte Fehler-Detektor QMBFD**, basierend auf qualitativen Methoden, anwendbar auf zentrale Luftaufbereitungsanlagen

Das **PAT** wurde an einem relativ einfachen Objekt angeschlossen, am zweiten, komplexeren, wurde es aus verschiedenen Gründen nie vollständig in Betrieb genommen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass PAT nicht den Erfolg gebracht hat, den man sich von diesem Tool versprochen hatte. Die Funktionsfähigkeit wurde zwar erbracht, aber verschiedene Faktoren verhinderten, dass das Tool in dieser Form in der Praxis einsetzbar ist: 1. Die Konfiguration des Tools an eine bestimmte Anlage ist zu aufwendig, sobald diese eine gewisse Komplexität besitzt. 2. Die benutzte Experten-System Software weist keine genügende Benutzerfreundlichkeit und Stabilität auf. 3. Die Ankoppelung des Tools an das Gebäudeleitsystem und an die Datenbanken ist aufwendig. Das in den Regeln abgespeicherte Wissen wurde soweit wie möglich ausgetestet und wird für zukünftige Fehlerdetektions- und Diagnosemethoden, die auf Regeln aufbauen, sehr nützlich sein.

Der **QMBFD** konnte erfolgreich an einer Laboranlage und in einem Bürogebäude in Betrieb genommen und ausgetestet werden. Verschiedene Verbesserungen haben zu einem ausgereiften Produkt geführt, das im Betrieb akzeptable Fehlalarmraten bei gleichzeitig guten Fehlerdetektionsfähigkeiten erzielte. Fehler, die detektierbar sind, sind z.B. blockierte Ventile und Klappen, sowie Offsets in verschiedenen Temperaturmessungen. Der QMBFD wird mit höchster Wahrscheinlichkeit als Funktionseinheit in existierenden und zukünftigen Reglern und Gebäudeleitsystemen aufgenommen. Ein verwandtes Verfahren wurde zudem bereits für die Wärmerückgewinnungsüberwachung realisiert.

**Dauer des Projekts:** 1.10.1997 – 1.10.2000

**Beitragsempfänger:** Landis & Staefa Zug  
**Berichtersteller:** Peter Gruber  
**Adresse:** HVAC Applications  
Gubelstrasse, 6301 Zug  
**Telefon:** 041 724 4027  
**Email:** [gruberp@ch.sibt.com](mailto:gruberp@ch.sibt.com)

31. Oktober 2000



# **Inhalt**

|          |                                                          |           |
|----------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>A</b> | <b>Überblick</b>                                         | <b>3</b>  |
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                        | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Angewandte Methoden</b>                               | <b>5</b>  |
|          | 2.1 Expertensystem „PAT“                                 | 5         |
|          | 2.2 Qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor „QMBFD“  | 6         |
| <b>3</b> | <b>Zusammenstellung der Ergebnisse</b>                   | <b>8</b>  |
|          | 3.1 zu den Methoden                                      | 8         |
|          | 3.2 Beiträge zum Annex 34 Report                         | 9         |
|          | 3.3 Weitere Ergebnisse                                   | 10        |
| <b>4</b> | <b>Ausblick</b>                                          | <b>11</b> |
|          | 4.1 Generelles                                           | 11        |
|          | 4.2 PAT                                                  | 12        |
|          | 4.3 QMBFD                                                | 14        |
| <b>5</b> | <b>Referenzen</b>                                        |           |
| <br>     |                                                          |           |
| <b>B</b> | <b>Methoden und ihre Anwendungen</b>                     | <b>17</b> |
| <br>     |                                                          |           |
| <b>1</b> | <b>Qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor QMBFD</b> | <b>17</b> |
| <b>2</b> | <b>Expertensystem PAT</b>                                | <b>29</b> |



# A Überblick

## 1 Einleitung

Im IEA Annex 25 Projekt mit dem Titel “Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis” wurden verschiedene Verfahren, Algorithmen und Methoden entwickelt, die zum Ziel hatten, Fehler zu detektieren und zu diagnostizieren, die einen optimalen Betrieb von HLK-Anlagen verunmöglichen.[3], [4], [27]. Das Schwerp Gewicht lag auf Fehlern, die in der Planung, Installation und Inbetriebnahme oder während des Betriebes entstehen und die sich nicht durch eine Komforteinbusse sondern vor allem durch eine Erhöhung des Energieverbrauchs oder eine Verkürzung der Lebensdauer von Komponenten auszeichnen. Ebenfalls ausgenommen von den Verfahren waren Fehler, die eine Gefahr von Menschen und Anlage sind, da diese von einem separaten Alarmsystem behandelt werden.

Am Ende des IEA Annex 25 Projektes wurde den Beteiligten bewusst, dass die entwickelten Verfahren zu wenig an echten Gebäuden getestet wurden. Deshalb wurde das neue Annex 34 Projekt mit dem Titel “Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings” gestartet. Das Ziel des neuen Annexes war es deshalb, die im Annex 25 entwickelten Verfahren, aber auch neue Verfahren auf ihre Anwendbarkeit zu prüfen, Erfahrungen zu sammeln und verschiedene Verfahren zu vergleichen. Wichtige Punkte, die bei der Anwendbarkeit eine Rolle spielen, sind:

- Aufwand zur Inbetriebsetzung
- Verständlichkeit
- gerätetechnischer Aufwand
- Fehlerdetektionsfähigkeit
- Fehlalarmrate
- Einbindung in das Gebäudeleitsystem
- Benutzerfreundlichkeit

Am IEA Projekt nahmen 12 Länder teil: Belgien, China, Deutschland, Finnland, Frankreich, Grossbritannien, Japan, Kanada, Niederlande, Schweden, Schweiz, USA.

Dieser Schlussbericht beschreibt das Ergebnis des schweizerischen Beitrags.

Die Schweiz beteiligte sich nur partiell am Projekt. Um als Land voll mitzumachen ist eine Beteiligung von mindestens 36 Mannmonaten erforderlich. Die Schweiz hat sich mit einem Anteil von 12 Mannmonaten verpflichtet. Diese partielle Beteiligung wurde von den entsprechenden Stellen akzeptiert. Folgende Personen haben sich zeitweise am Forschungsprojekt beteiligt:

Thomas Bühlmann, Siemens Landis & Staefa Schweiz

Eduardo Dias, Ecole des Mines de Paris, Frankreich

Peter Gruber, Siemens Landis & Staefa Division, Zug

Sabine Kaldorf, ehemals Siemens Landis & Staefa Zug, jetzt Softlab Köln

Carlos Tainha, Siemens Landis & Staefa Frankreich

Die Gesamtleitung hatte Peter Gruber. Zudem wirkte Jürg Tödtli von Siemens Landis & Staefa in verdienstvoller Weise als Berater mit.

Finanziert wurde der Beitrag der Schweiz je zur Hälfte durch das BEW resp. BFE und Siemens Landis & Staefa. Den am Projekt beteiligten Personen möchten an dieser Stelle dem Geldgeber danken.

## 2 Angewandte Methoden

Heutige Gebäudeleitsysteme für HLK-Anwendungen sind dazu vorgesehen, einen spezifizierten Komfort mit vernünftigen Energieaufwand aufrechtzuerhalten. Viele der in Betrieb genommenen Systeme erfüllen aber die Vorgaben nicht, da sie entweder den Komfort nicht einhalten oder/und zuviel Energie verbrauchen. Deshalb ist es von grossem Interesse

- eine Erfolgskontrolle des implementierten Energiekonzeptes durchzuführen
- das richtige Funktionieren von Teilsystemen wie Zonen oder Luftaufbereitungsanlagen zu überwachen
- Fehler zu detektieren
- eine Diagnose von möglichen Fehlerursachen zu unterstützen

Um eine solche Aufgabe effizient durchzuführen, ist es von Vorteil, diese so gut es geht, zu automatisieren. Dies kann auf zwei Arten geschehen:

1) regelmässiges Abarbeiten der gesammelten Daten von mehreren verschiedenen Teilsystemen von zentraler Stelle aus.

2) on-line Überwachung bestimmter Systemteile auf dem Gebäudeleitsystem in Form von lokalen Funktionsblöcken.

Für die erste Anwendung ist von der ehemaligen L & G Technology Innovation AG ein Prototyp eines Hilfsmittels, das sogenannte PAT (**P**erformance **A**udit **T**ool) entwickelt worden [5], für die zweite ein Prototyp eines qualitativen modellbasierten Fehlerdetektors QMBFD (**Q**ualitative **M**odel **B**ased **F**ault **D**etector) im Rahmen des IEA Annex 25 Projektes [1], [2],[6].

Die Methoden sind im Teil B dieses Berichtes neben den Anwendungen detailliert erklärt.

### 2.1 Expertensystem „PAT“

Die Anwendbarkeit des Performance Audit Tools PAT war das erste Teilziel. Die im PAT benützte Methode zur Fehlerdetektion und Diagnose ist ein auf einem Expertensystem basierendes Verfahren. Fehlverhalten wird mithilfe von Regeln, die das korrekte oder fehlerhafte Verhalten von Anlagen und deren Teile beschreiben, festgehalten. Das Performance Audit Tool vollzieht die Überwachung in verschiedenen Schritten:

1. Die Daten, die auf dem Gebäudeleitsystem gesammelt worden sind, werden periodisch abgeholt, z.B. werden die Zeitreihen der relevanten Grössen über einen Tag jeweils nachts übertragen. Die Daten werden auf ihre Gültigkeit getestet und in einer relationalen Datenbank (MS Access) abgespeichert.
2. Die vorverarbeiteten Daten werden danach dazu benützt, um Fälle von unbefriedigendem Verhalten ausfindig zu machen. Um dies zu tun, braucht es neben den aktuellen Daten auch noch die Konfigurationsdaten der Anlage sowie eine Wissensbasis mit Gebäude- und HLK-Expertenwissen. Die Konfigurationsdaten sind ebenfalls in einer relationalen Datenbank abgespeichert. Die Expertensystemumgebung Level 5 Object wird dazu verwendet, das Wissen zur Fehlerdetektion und Diagnose mithilfe von Regeln darzustellen.

3. Das Expertensystem detektiert im eigentlichen Audit nicht nur ein Fehlverhalten, sondern lokalisiert so gut wie möglich, auch dessen Ursache. Die Güte der Diagnose hängt einerseits von den Regeln, andererseits von den zur Verfügung stehenden Messreihen ab.
4. Das Resultat des Audits wird wiederum in eine Access-Datenbank geschrieben. Deshalb sind die mit diesen Resultaten generierten Berichte reine Datenbank-Anwendungen.

Die Vollständigkeit der Regeln und die Richtigkeit der eingestellten Parameterwerte der Regeln (z.B. Schwellwerte) sollte im Rahmen dieses Projektes mit der Inbetriebnahme des Tools an neuen Anlagen untersucht werden.

PAT besitzt drei Interfaces, die von verschiedenen Personen benützt werden:

1. Ein Interface für die Gebäude- und HLK-Experten, die ihr Wissen über Fehlverhalten und deren Ursachen in Form von generischen Regeln formulieren. Diese werden mithilfe von Entscheidungsbäumen dargestellt.
2. Ein Interface für den Service(Field)-Ingenieur, der das PAT für eine spezifische Systemkonfiguration adaptieren muss.
3. Ein Interface für den Systemoperateur (Field engineer, customer), der den z.B. täglichen Report aufsetzt und durchsehen muss.

Die Überprüfung der Tauglichkeit der verschiedenen Interfaces im praktischen Einsatz war ein Hauptziel in diesem Projekt.

PAT ist ein umfangreiches Softwarepaket, das ein Potential für viele Anwendungen hat. Für dieses Projekt beschränkte man sich auf die Temperaturregelung von Zonen und Regelung von zentralen Luftaufbereitungsanlagen.

## **2.2 Qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor „QMBFD“**

Im Gegensatz zum PAT wurden die Grundideen des „QMBFD“-Verfahren schon mehrmals veröffentlicht [1],[4]. Verschiedenste Simulationen und erste Tests an echten Anlagen haben dabei gezeigt, dass das Verfahren eine gute Chance haben könnte, um als neue Überwachungsfunktion erfolgreich benützt zu werden.

Im Rahmen des IEA Annex 25 Projekts mit dem Titel “Real time simulation of HVAC systems for building optimisation, fault detection and diagnosis” wurde ein qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor für eine zentrale Luftaufbereitungsanlage bestehend aus Heizung, Kühlung, Klappen und Regler, entwickelt. Der Detektor enthält ein Modell für ein fehlerfreies Verhalten der Anlage, mit dem qualitative Werte der Steuergrößen im stationären Zustand ausgehend von gemessenen qualitativen Temperaturwerten vorausgesagt werden. Die beobachteten Diskrepanzen zwischen den vorhergesagten qualitativen Steuergrößen und den aktuellen qualitativen Steuergrößen lösen Alarme aus und geben Hinweise auf mögliche Fehler. Der Detektor wurde auf einem Gebäudeleit-system VISONIK der Firma Landis & Gyr implementiert und lief als Version (I) bei Beginn des Annex 34 Projektes seit einem Jahr ohne Unterbruch in einem Bürogebäude.



Der angewandte Detektor ist im Gegensatz zum PAT viel weniger mächtig. Folgende wesentliche Unterschiede sind erwähnenswert:

- Der QMBFD wird nur für zentrale Luftaufbereitungsanlagen angewandt.
- Es werden nur stationäre Zustände untersucht.
- Es gibt keine Diagnose.
- Es werden qualitative Grössen verarbeitet
- Die Implementation in der proprietären Sprache COLBAS ist relativ einfach.
- Eine erste On-line Version (Version (I)) läuft erfolgreich.
- Die Parametrisierung des QMBFD ist wesentlich einfacher als die des PAT

Das Hauptgewicht bezüglich des QMBFD's im Annex 34 Projekt lag auf der Untersuchung der Methode bezüglich der Balance von Vermeidung von Fehlalarmen und Detektionsfähigkeit von Fehlern.

## **3 Geleistete Arbeiten und Ergebnisse**

### **3.1 zu den Anwendungen**

Am Anfang des Projektes bestand die Absicht, die Ressourcen zu 80% auf das PAT und zu 20% auf den qualitativen Fehlerdetektor zu lenken. Während des Projektes gab es aber aus verschiedenen Gründen Schwierigkeiten mit der Umsetzung der Ziele für das PAT. Deshalb wurde beschlossen, die Ressourcen gegen Ende des Projektes auf den qualitativen Fehlerdetektor QMBFD zu konzentrieren, sodass sich nach Ablauf des Projektes ein Aufwand für den QMBFD auf total 37.5% ergibt. Diese Verlagerung ist auch damit begründbar, dass sich neue interessante Arbeiten für den QMBFD ergaben, wie zum Beispiel die Inbetriebnahme des Detektors auf der Anlage in Cergy [18, 20].

#### **3.1.1 PAT**

Das Performance Audit Tool wurde für zwei neue Objekte in Betrieb genommen. Beide Installationen betrafen Anlagen, die sowohl eine Überwachung von zentralen Luftaufbereitung als auch von individuellen Zonenregelung erforderten.

Folgende Arbeiten wurden unternommen:

- Aufnahme von Messdaten von drei Zonen und einer zentralen Luftaufbereitungsanlage, die vom PAT benötigt werden, im Bürogebäude Sennweid und deren Archivierung in einer Datenbank.
- Inbetriebnahme des PAT für die drei Zonen und die zentrale Luftaufbereitungsanlage in Sennweid, Aufsetzen der Konfigurationsdatenbank und Ankoppelung an die Archivdatenbank.
- Anpassungsarbeiten am PAT, um Audits für Zonen und zentrale Luftaufbereitungsanlage im gleichen Audit durchführen zu können.
- Analyse der Betriebsdaten von mehreren Monaten mit dem PAT; Detektion von verschiedenem Fehlverhalten, das mit dem Betreiber besprochen wurde.
- Abklärung für eine Installation von PAT in einem grösseren Objekt in Osnabrück in Deutschland; Beginn einer Inbetriebnahme. Hardwareprobleme und ein personeller Engpass bewirken einen Abbruch dieser Installation.
- Dokumentation des Expertenwissens.
- Publikationen, working papers und Berichte.  
Publikationen: [9], [12]  
Working papers: [24], [25]  
Berichte: [18], [23], [26]

#### **3.1.2 QMBFD**

Der qualitative modellbasierte Fehlerdetektor wurde ebenfalls bei zwei Anlagen installiert. Die beiden Anlagen unterscheiden sich durch folgende Eigenheiten. Die erste Anlage ist eine zentrale Luftaufbereitungsanlage in einem Bürogebäude, die mit einem Wärmerückgewinnungsrad ausgerüstet ist. Auf ihr sind praktisch keine

künstlichen Fehler induzierbar wegen der Störung des Betriebs. Das Hauptgewicht liegt hier deshalb auf der Eliminierung von Fehlalarmen.

Die zweite Anlage ist eine zentrale Luftaufbereitungsanlage in einer Laborumgebung, die mit einer Rückluftbeimischung zur Wärmerückgewinnung ausgerüstet ist. Die Anlage konnte gut zur Durchführung von Versuchen verwendet werden, in denen künstlich Fehler auf der Anlage induziert wurden.

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

- Einsatz einer verbesserten Version (II) in Sennweid inklusive einem Aufbau eines User-Interfaces mit Alarmanzeige und Eingriffsmöglichkeiten für Parameteränderungen.
- Vorbereitung und Inbetriebnahme des Fehlerdetektors auf der Laboranlage in Cergy, Frankreich. Diese Anlage hat Umluftklappen anstelle eines Wärmerückgewinnungsrades zur Wärmerückgewinnung
- Auswertungen von Messungen in Sennweid und Cergy. Aufgrund der Erkenntnisse wurde eine Version (III) entwickelt und in Sennweid und Cergy implementiert.
- Untersuchung der Sensitivität des Fehlerdetektors auf die Stärke einzelner Fehler
- Versuche mit künstlich eingeführten Fehlern auf der Anlage in Cergy [15, 16] und deren Auswertung
- Aufnahme von Betriebsdaten des Detektors Version (III) in Sennweid während eines Jahres und deren Auswertung
- Vergleiche mit anderen Verfahren anhand von echten Messdaten in Zusammenarbeit mit Teilnehmern aus Schweden und der USA [13],[14]
- Publikationen, working papers und Berichte  
Publikationen: [7], [10], [11]  
Working papers: [17], [19], [21], [22]  
Berichte: [15], [16]

### 3.2 Beiträge zum Annex 34 Report

Die Resultate aller Beteiligten im Annex 34 wurden in einem Schlussbericht zusammengetragen:

[8]: A. Dexter, J. Pakanen: „Computer aided evaluation of HVAC system performance: practical application of fault detection and diagnosis techniques in real buildings“, IEA Annex 34, Final report, Nov 2000

Durch die Mitarbeit in mehreren IEA Annex 34 Arbeitsgruppen und im Editing Prozess des Schlussberichtes hat die Schweizer Beteiligung Substantielles zum Gelingen des Gesamtprojektes beigetragen. Eine Schweizer Beteiligung ist in folgenden Beiträgen geleistet worden:

Section A: Introduction

A. 8.2 Qualitative methods for fault detection and diagnosis

P. Gruber

A.8.3 Expert and rule-based system for fault detection and diagnosis

P. Gruber

Section B: Breakout sessions

B. 3: Commissioning of FDD tools

P. Gruber

Section C: Cases Studies

|                                     |           |
|-------------------------------------|-----------|
| C. 10.1 Switzerland Demonstration 1 | P. Gruber |
| C. 10.2 Switzerland Demonstration 2 | P. Gruber |
| C. 10.3 Switzerland Demonstration 3 | P. Gruber |

|                                                    |                                   |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------|
| Section E: Potential for commercial exploitation   | P. Gruber, K. Heinemeier, J. Seem |
| E. 2 Feedback from industrial partners in Annex 34 | P. Gruber                         |

### 3.3 Weitere Ergebnisse

Parallel zu den Arbeiten innerhalb des Projektes wurden zwei weitere Anwendungen von ähnlichen Überwachungsmethoden für verschiedene Regler oder Systeme von Landis & Staefa realisiert.

#### **Überwachung des Wirkungsgrades der Wärmerückgewinnung in der zentralen Luftaufbereitung**

Für diese Anwendung konnte die Methode zur Detektion des stationären Zustandes direkt vom QMBFD übernommen werden. Die Überwachungsmethode ist im Aerogyr-Regler erfolgreich implementiert worden. Sie läuft seit Herbst 1999 und wird vor allem in schwedischen Anlagen verwendet.

#### **Überwachung des Verschmutzungsgrades von Wärmetauschern in Fernwärmeunterstationen**

Diese Funktion konnte neben den im Annex 24 gemachten Erfahrungen ebenfalls von einigen Resultaten aus dem Annex 34-Projekt profitieren. Speziell die Einstellung von Schwellwerten konnte davon profitieren.

## 4 Ausblick

### 4.1 Generelles

Die generellen übergeordneten Ziele dieses Projekts können wie folgt charakterisiert werden:

- Überprüfung der Anwendbarkeit der Methoden und Tools im praktischen Einsatz so wie sie in der Einführung A 1 dieses Berichtes formuliert wurde.
- Evaluation und Optimierung des Nutzens der Methoden und Tools.
- Berücksichtigung spezifischer Kundenbedürfnisse bei der Entwicklung von Methoden und Tools.

Diese Ziele wurden schon im Schlussbericht des Annex 25 Projektes formuliert [27]. Wurden diese Ziele erreicht ?

### Anwendbarkeit

Es hat sich gezeigt, dass der Erfolg bei der Anwendung von Fehlerdetektions- und Diagnose-Methoden von mehreren nicht einfach zu kontrollierenden Faktoren abhängt. Solche Faktoren, die zum Umfeld eines Verfahrens gehören, sind zum Beispiel das Beschaffen von Konfigurationsdaten und die Ankoppelung des Verfahrens and die Rechnerumgebung und den Benutzer (Schnittstellen, Interfaces). Diese Faktoren spielen oft eine wichtigere Rolle als das Verfahren selbst. Wichtig ist auch die Erkenntnis, dass die Inbetriebnahme eines Prototypen an einer einzigen Anlage sicher nicht genügt.

Es muss darauf geachtet werden, dass die ersten praktischen Installationen überzeugend sind und so für den Betreiber und Inbetriebnehmer einen positiven Effekt für nachfolgende Installationen haben.

### Evaluierung und Optimierung des Nutzens

Der Nutzen von Fehlerdetektion- und Diagnoseverfahren wird im Allgemeinen nicht bestritten. Insbesondere sind diejenigen Verfahren begehrt, die die Anzahl Reklamationen an die Adresse des Betreibers reduzieren können. Die Quantifizierung des Nutzens eines speziellen Verfahrens ist im Normalfall schwierig abzuschätzen, da wenig aussagekräftige Daten vorhanden sind.

Der Nutzen eines Verfahrens oder eines Tools liegt nicht nur im Überwachung des Betriebs einer Anlage, sondern auch in der Erleichterung bei der Inbetriebnahme oder Commissioning. In dieser Phase können aktive Tests durchgeführt werden, was im Normalbetrieb weniger gut möglich ist.

### Kundenbedürfnisse

Eine automatische Anzeige von Fehlverhalten während des Betriebs wird von vielen Betreibern als nützlich angesehen, solange diese den Betrieb nicht stört. Um Störungen dieser Art zu vermeiden, muss das Fehlerdetektionsverfahren spezifische Eigenheiten einer bestimmten Installation berücksichtigen. Wird dies nicht getan, ist mit einer zu hohen Fehlalarmrate zu rechnen.

Verfahren und Tools haben deshalb grössere Chancen, eingesetzt zu werden, falls sie auf Standardkonfigurationen zugeschnitten sind. Andererseits muss darauf geachtet werden, dass sie nicht nur zu spezielle Konfigurationen abdecken. In dieser Hinsicht sind die zwei in diesem Projekt untersuchten Verfahren Vertreter der beiden Extreme.

Der qualitative modellbasierte Fehlerdetektor QMBFD deckt einige ganz bestimmte Anzahl Konfigurationstypen von zentralen Luftaufbereitungsanlagen ab. Wie gut das

Verfahren auf eine möglichst grosse Anzahl weiterer Konfigurationstypen ausgedehnt werden kann, wird die erfolgreiche Anwendung des QMBFD entscheidend beeinflussen.

Das Performance Audit Tool PAT lässt im Gegensatz zum QMBFD eine sehr grosse Flexibilität zu. Dies wurde dem Tool teilweise auch zum Verhängnis, da der Konfigurationsaufwand den Einsatz zu teuer machte.

## **4.2 Performance Audit Tool PAT**

Die Funktionsfähigkeit des Tools konnte am ersten Objekt bestätigt werden. Vom zweiten Einsatz fehlen die Erfahrungen bezüglich des Audits. Wie schon erwähnt, konnte das PAT die Erwartungen aus verschiedenen Gründen nicht erfüllen [18],[20]. Die Erfahrungen, die mit dem Tool gemacht wurden, sind in [12] und [25] zusammengefasst. Hauptgründe für den nicht erfolgreichen praktischen Einsatz sind:

- ein viel zu hoher Konfigurationsaufwand des Tools für eine Anlage, sobald diese etwas komplexer ist. Ebenso ist das User-Interface für die Eingabe der manuellen Daten zu wenig komfortabel.
- eine zu wenig komfortable Expertensystem-Umgebung. Das Warten der Wissensdatenbank wurde dadurch zu aufwendig, ebenso das Austesten von neuen Teilen des Tools.
- zu viele Schnittstellen zu verschiedenen externen Datenbanken

Das in den Regeln abgelegte Wissen hingegen wurde mit den durchgeführten Tests auf seine Richtigkeit geprüft, ebenso die benötigten Schwellwerte. Das so gewonnene Know-how ist wertvoll und wird in späteren Projekten zur Verfügung stehen.

Neue Projekte werden in Richtung einfacherer regelbasierter Systeme gehen, die auch ohne eine kommerzielle Expertensystem-Umgebung implementiert werden können.

## **4.3 Qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor QMBFD**

Die Erfahrungen, die mit dem QMBFD gesammelt werden konnten, sind in zweifacher Hinsicht umfangreicher als diejenigen mit dem PAT. Erstens wurden Daten über lange Zeiträume an einer Anlage gesammelt und zweitens wurde das Verfahren nicht nur auf den zwei erwähnten Anlagen getestet sondern auch noch mit aufgenommenen Daten aus Schweden und den USA [13], [14].

Dieses Verfahren war insofern erfolgreich, als es gelang, die meisten Parameter des Detektors so festzulegen, dass sie anlagenunabhängig sind. Dies erleichtert die Inbetriebnahme wesentlich, was auch von betroffenen Service-Personen bestätigt wurde. Ebenso wichtig ist die Tatsache, dass mit den so gewählten Parametern die Fehlalarmquote auf ein vernünftiges Mass reduziert werden konnte. Es hat sich aber auch gezeigt, dass die Anzahl Alarmer und nicht die Anzahl Fehlalarme entscheidend sind für die Akzeptanz des Verfahrens. Gewisse Alarmer werden ausgelöst, da ganz spezifische Eigenheiten einer speziellen Anlage im Verfahren nicht berücksichtigt wurden. Für den Einsatz des Detektors als Funktionsblock in einem Regler oder Systemen wird es entscheidend sein, möglichst viele dieser Eigenheiten im Detektor abzufangen.

Die Vergleichsstudie, die in Schweden im Rahmen des Annex 34 durchgeführt wurde [13], [14], hat gezeigt, dass das Verfahren in verschiedener Hinsicht sehr gut abgeschnitten hat. Es sind dies:

- Aufwand zur Inbetriebnahme
- Verständlichkeit
- Hardwareaufwand (Anzahl Sensoren)
- Fehlalarmrate

Der einzige „Schwachpunkt“ in diesen Versuchen war, dass einige Fehler nicht erkannt werden konnten. Dies hängt wie erwartet mit dem qualitativen Verfahren und der Anzahl Sensoren zusammen.

Hervorzuheben sind schlussendlich die Seiteneffekte, die zu weiteren Anwendungen (Aerogyr Regler von Siemens Landis & Staefa) führten oder existierende verbessern konnten (Verschmutzungsgradüberwachung von Fernwärmetauschern).

## 5 Referenzen

### **Publikationen, die als Vorarbeiten dienen:**

- [1] A.S. Glass, J. Tödtli: Testing Qualitative Model-Based Fault Detection for Air-Handling Units using operational Building Data, IEA Annex 25, Final Report, Technical Book, 1996
- [2] P. Gruber, M. Widmer: Implementation eines automatischen qualitativen Fehlererkennungssystem für Lüftungsanlagen auf einem Gebäudeleitsystem VISONIK, Landis & Stäfa, 1997
- [3] IEA Annex 25 Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis, Source Book, August 1996, Editors J. Hyvärinen, S. Kärki
- [4] IEA Annex 25 Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis, Technical papers of IEA Annex 25, November 1996, editor J. Hyvärinen
- [5] S. Kaldorf, P. Songkakul: PAT Final Report, Landis & Gyr Technology Innovation 1996
- [6] M. Widmer: Fehlererkennungssystem für Lüftungsanlagen, Diplomarbeit Zuger Technikerschule 1995

### **Publikationen, die im Rahmen des Projektes entstanden sind:**

- [7] Th. Bühlmann: Fehlererkennung in Lüftungsanlagen, Funktionen Optimierung und Erweiterung, Zuger Technikerschule, 1997
- [8]: A. Dexter, J. Pakanen: „Computer aided evaluation of HVAC system performance: practical application of fault detection and diagnosis techniques in real buildings“, IEA Annex 34, Final Report, Nov 2000
- [9] P. Gruber, S. Kaldorf: Performance Audit Tool PAT: ein Expertensystem zur Detektion und Diagnose von Fehlverhalten von HLK-Anlagen in realen Gebäuden, 10. Status-Seminar Energieforschung im Hochbau ETH Zürich, 1998
- [10] P. Gruber: Erfahrungen mit einem qualitativen modellbasierten Fehlerdetektor für zentrale Lüftungsanlagen, 11. Status-Seminar Energieforschung im Hochbau, ETH Zürich, 2000
- [11] P. Gruber: Fehlerdetektor für die Lüftung, Gebäudetechnik, Jahrgang 2, Heft 5, Oktober. 2000
- [12] S. Kaldorf, P. Gruber: Performance Audit Tool PAT: an expert system for the detection and diagnosis of building underperformance, submitted to ASHRAE Conference in Atlanta 2001



## Weitere Publikationen

Diese Veröffentlichungen enthalten auch „working papers“ der Annex-Meetings und einige interne Berichte von Siemens Landis & Staefa

[13] P. Carling, P. Isakson: Comparison of three FDD methods based on field data of an AHU, Working paper, IEA Annex 34/SWE/KTH/120400/2.0 April 2000, Liège

[14] P. Carling, P. Isakson: Confronting two FD methods to real building data, IEA Annex 34, Final Report, November 2000, editors A. Dexter, J. Pakanen

[15] E. Dias: Détection de défauts sur la CTA de Cergy, Répresentation du blocage de la vanne eau chaude par utilisation de la batterie électrique de préchauffage (BVP) pour tester le Fehler de SIEMENS, avril 1999

[16] E. Dias: Détection de défauts sur la CTA de Cergy, Essai avec blocage de la vanne eau chaude (BVEC) pour tester le Fehler de SIEMENS, avril 1999

[17] E. Dias, P. Gruber, C. Tainha: Fault injection experiments with the CAHU and the qualitative detector at Cergy near Paris, IEA Annex 34 Working paper AN34/CH/080999/1.0 Yokohama, Japan

[18] P. Gruber: Status-Report zu PAT, Interner Report, Landis & Staefa, Feb 1998

[19] P. Gruber, Th. Bühlmann: Analysis of first field results of the improved model based qualitative fault detector for a central air handling unit (CAHU), IEA Annex 34: Working paper AN34/CH/140998/1.0, Oulu, Finnland

[20] P. Gruber: Zwischenbericht zum Projekt Nr. 23749, Feb 1999

[21] P. Gruber, Th. Bühlmann: “Detection of faults” of the fault detector: improvements of the qualitative model based fault detector scheme, IEA Annex 34, Working paper AN34/CH/060498/1.0 Loughborough, UK

[22] P. Gruber: Sensitivity of the qualitative model based fault detector to certain fault situations of a CAHU, IEA Annex 34: Working paper AN34/CH/140499/1.0 Fontainebleau, France

[23] P. Gruber, S. Kaldorf: Structure of a knowledge base used in an expert system for the detection and diagnosis of building underperformance, Internal report, Siemens Landis & Staefa Zug, April 2000

[24] S. Kaldorf, P. 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, USA

[25] S. Kaldorf, P. Gruber: Experience with an expert system for the detection and diagnosis of building underperformance, IEA Annex 34, Working paper AN/CH/120400/1.0, Liège, Belgien

[26] S. Kaldorf, P. Gruber: Configuration data base for an expert system based tool for building underperformance detection and diagnosis, Internal report, Siemens Landis & Staefa Zug, April 2000

[27] Landis & Gyr, Sulzer Infra, ETH Zürich Labor für Energiesysteme: Methoden zur Fehlererkennung in Haustechnikanlagen, Schlussbericht Bundesamt für Energiewirtschaft, Januar 1997

## **B Methoden und ihre Anwendungen**

### **1 Qualitativer modellbasierter Fehlerdetektor**

#### **Erfahrungen mit einem qualitativen modellbasierten Fehlerdetektor für zentrale Luftaufbereitungsanlagen <sup>\*)</sup>**

Peter Gruber, Siemens Building Technologies  
Landis & Stäfa Division, Zug, CH

##### **Zusammenfassung**

Im vorliegenden Beitrag werden die Erfahrungen, die mit einem Fehlerdetektionsverfahren für zentrale Lüftungsanlagen gemacht worden sind, zusammengefasst. Das angewandte Verfahren basiert auf einem qualitativen, modellgestützten Fehlerdetektor, der die Eigenschaft hat, in Beharrungszuständen der Anlage, verschiedene Fehlverhalten aufgrund von Diskrepanzen zwischen korrekter und wirklicher Steuerung zu detektieren. Die korrekte, auf wenige qualitative Werte reduzierte Steuerung wird durch ein Modell des korrekten Verhaltens vorausgesagt. Die Fehler, die detektiert werden können, sind blockierte Ventile oder Klappe, Ventile, die nicht ganz schliessen oder öffnen, sowie Offsets von Temperaturmessungen. Die Methode wurde erfolgreich in zwei verschiedenen Anlagen in einem Gebäudeleitsystem eingesetzt und zur Produktreife gebracht.

##### **Résumé**

Les expériences, qui étaient faites avec un détecteur des défauts pour des centrales pour le traitement de l'air, sont présentées au suivant. La méthode utilisée est basée sur un détecteur qualitatif dérivée d'un modèle du comportement correct de la centrale aux régimes permanents. Un défaut est détecté quand une différence existe entre les commandes correctes prévues par le modèle et les commandes réels. Les commandes sont limités sur quelques valeurs qualitatifs. Les défauts qui peuvent être détectés, sont des défauts des mesures de température et des défauts de l'actuateur: blockage ou fuite. La méthode était appliquée avec succès dans deux matériels différents. Un développement comme produit est très probable.

##### **Summary**

The experiences are presented which were obtained with a fault detector for a central air handling unit. The fault detector is based on a qualitative model describing the correct behaviour of the controlled plant in steady state. A fault is detected if a discrepancy exists between the correct command signals predicted by the model and the real command signals. The command signals are restricted to a few qualitative values only in order to reduce the dependency of the detector on design data. The faults that can be detected are offsets in temperature measurements and faults in the actuators: blockage of valves or damper and leakage. The method was successfully applied to two different sites and a development to a commercial product is highly probable.

<sup>\*)</sup> abgeänderte Version vom Status-Seminar 2000

## Einleitung

Mängel an Lüftungsanlagen bleiben oft unerkannt, weil beim Komfort keine groben Einbußen festgestellt werden. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn der Regler für die Zulufttemperatur verlangt, dass das Kühlventil geschlossen wird, dieses aber aufgrund einer Blockierung nicht ganz schliessen kann. Wird die Position des Ventils nicht gemessen, bleibt die Blockierung unerkannt, da der Regler durch Öffnen des Heizventils die Kühlung kompensiert und damit den Komfort gewährleistet. Trotzdem sind solche Situationen unbefriedigend, weil sie einen unnötigen Energieverbrauch verursachen. Wie können sie vermieden werden? Oder anders gefragt: Woher nimmt eine Bauherrschaft die Gewissheit, dass Ihre zentrale Luftaufbereitungsanlage effizient läuft?

Natürlich kann der Betreiber eine Überprüfung durch den Service-Ingenieur oder Operateur anordnen. Dies ist aber mit Kosten verbunden. Wirtschaftlich interessanter könnte es sein, eine einfache Überwachung in das Regelsystem einzubauen, die allfälliges Fehlverhalten automatisch erkennt. Das klassische Alarmsystem genügt dafür nicht, erfasst es doch lediglich grobe Fehler und Störungen, die eine Gefahr für Personen oder für die Anlage bedeuten: den Ausfall eines Ventilators, die Druckveränderung durch verstopfte Filter, das Auftreten von Rauch oder das Nichteinhalten von Temperaturschwellwerten. Die erweiterte Überwachung deckt demgegenüber auch Fehler auf, die nicht durch drastisches Verhalten auf sich aufmerksam machen. Darunter fallen Heiz- und Kühlventile, die nicht mehr ganz schliessen, blockierte Klappen oder Offsets bei Messungen der Aussen- oder der Rücklufttemperatur. Diese Fehler werden vom System im Normalfall als Störungen im regeltechnischen Sinne interpretiert und so ausgegeregelt, dass sie nicht erkennbar sind.

## Vorgeschichte

Die in den folgenden Feldversuchen eingesetzte Fehlerdetektionsmethode hat schon eine längere Geschichte hinter sich. Die Grundlagen zu dieser qualitativen modellbasierten Fehlerdetektionsmethode (QMBFD) wurden im Rahmen des IEA Annex 25 Projektes: “Real –Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis” erarbeitet [1],[2],[3]. Im Rahmen des Nachfolgeprojektes IEA Annex 34: “Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings”, das im Jahre 2000 zu Ende geht, wurde die Methode soweit vorangetrieben, dass sie als Funktionseinheit in einer Unterstation eines unserer Gebäudeleitsystem eingesetzt werden kann. Um soweit zu kommen, waren mehrere Versionen nötig.

Eine erste Version (I) wurde im Rahmen einer Diplomarbeit als spezieller Task in der proprietären Programmiersprache COLBAS auf dem PRV Subsystem vom VISONIK Gebäudeautomationssystem realisiert [4]. Diese Version (I) wurde während der Jahre 1996 und 1997 auf einer zentralen Luftaufbereitungsanlage im Bürogebäude “Sennweid” getestet. Ein erster Redesign wurde im Oktober 97 in einer weiteren Diplomarbeit [5] gemacht. Daraus resultierte die Version (II). Damit konnte vor allem die Anzahl der Fehlalarme markant reduziert werden. Um die Anzahl der Fehlalarme nochmals weiter zu reduzieren, wurde im Oktober 98 ein Redesign (III) durchgeführt (Version (III)). Diese Version läuft seit Anfangs 1999 und es wurden nun gute Erfahrungen gesammelt.

## Was kann der Detektor ?

Die Fehlerdetektionsmethode lässt sich auf zentrale Lüftungsanlagen anwenden, die mit einer Wärmerückgewinnung ausgerüstet sind: entweder mit einer Rückluftbeimischung oder mit einer Wärmerückgewinnung mittels Wärmerückgewinnungsrad (WRG) oder Wärmetauscher. Ein Beispiel mit einer Rückluftbeimischung und eines

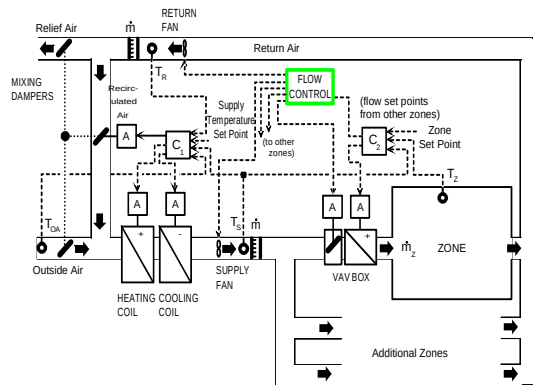


Fig.1: Rückluftbeimischung zur WRG

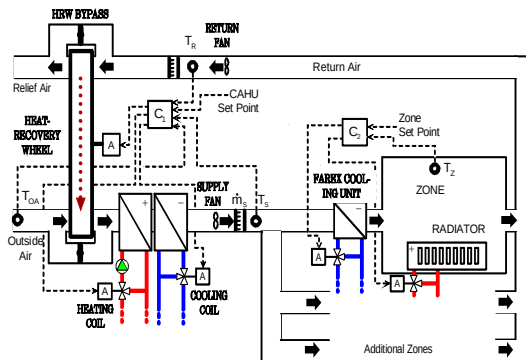
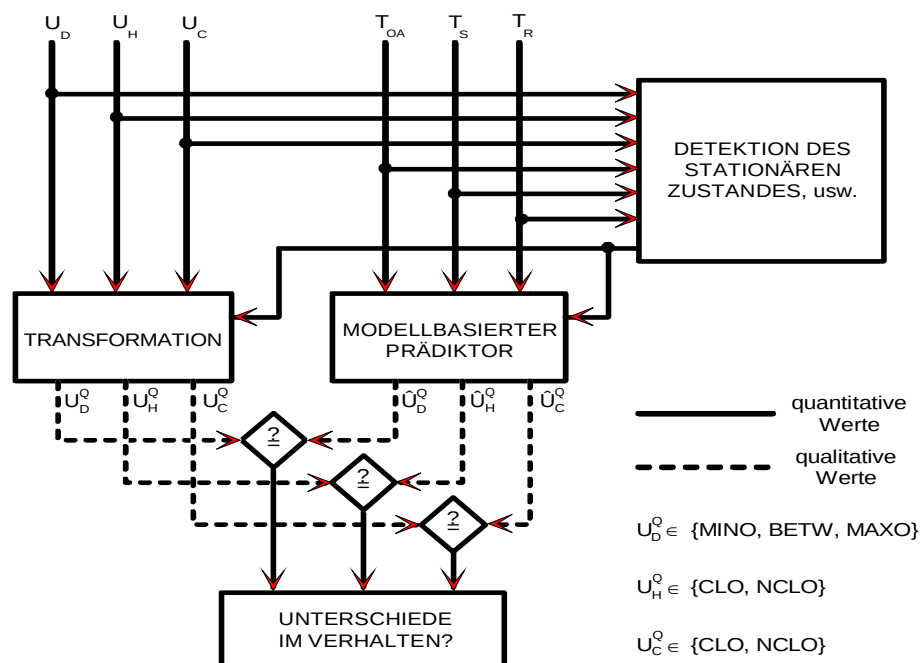


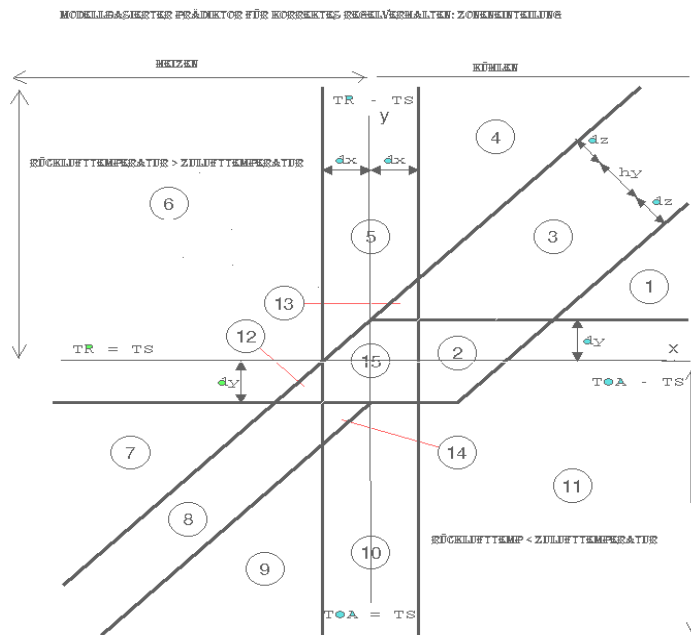
Fig.2: Rad zur WRG

mit einem WRG sind in den Figuren 1 und 2 abgebildet. Die genaue Beschreibung, wie der Detektor funktioniert, kann in [1],[2] und [3] gefunden werden. “

Das Prinzip des Detektors kann ausgehend von Figur 2 wie folgt beschrieben werden: Zunächst erfasst er die Steuersignale  $U_D$ ,  $U_H$ ,  $U_C$  für die Wärmerückgewinnung, das Heizen und das Kühlen sowie die Temperaturen  $T_{OA}$  (Aussenluft),  $T_S$  (Zuluft) und  $T_R$  (Rückluft), nicht aber ein Feuchtwert. Damit diese Signale weiter verarbeitet werden können, müssen sie in einem Beharrungszustand sein. Um festzustellen, ob dies der Fall ist, überprüft ein implementierter “steady-state”-Detektor kontinuierlich die Varianzen.



Figur 3: Struktur des Fehlerdetektors



Figur 4: Modellbasierter Prädiktor für korrektes Regelverhalten: Zoneneinteilung in der Temperaturebene mit den Koordinaten ( $T_{OA}-T_S$ ,  $T_R-T_S$ )

| ZONE | Ansteuerung Heizventil                   | Ansteuerung Rückluftbeimischung         | Ansteuerung Kühlventil                   |
|------|------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| 1    | CLO                                      | MIN                                     | NCLO                                     |
| 2    | CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO          | MAX<br>MIN<br>MIN<br>MIN<br>BETW        | NCLO<br>NCLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO        |
| 3    | CLO<br>CLO                               | MAX<br>MIN                              | NCLO<br>NCLO                             |
| 4    | CLO                                      | MAX                                     | NCLO                                     |
| 5    | CLO<br>CLO<br>NCLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO  | BETW<br>MIN<br>MIN<br>MAX<br>MAX        | CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>NCLO  |
| 6    | CLO<br>CLO<br>NCLO                       | BETW<br>MIN<br>MIN                      | CLO<br>CLO<br>CLO                        |
| 7    | NCLO                                     | MIN                                     | CLO                                      |
| 8    | NCLO                                     | MIN                                     | CLO                                      |
| 9    | NCLO                                     | MAX                                     | CLO                                      |
| 10   | NCLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO  | MAX<br>MAX<br>MIN<br>MIN<br>BETW        | CLO<br>CLO<br>NCLO<br>CLO<br>CLO         |
| 11   | CLO<br>CLO<br>CLO                        | MIN<br>MIN<br>BETW                      | NCLO<br>CLO<br>CLO                       |
| 12   | CLO<br>CLO<br>NCLO<br>NCLO               | BETW<br>MIN<br>MIN<br>MAX               | CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO                 |
| 13   | CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>NCLO  | MAX<br>MAX<br>BETW<br>MIN<br>MIN<br>MIN | NCLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>NCLO |
| 14   | CLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO<br>NCLO<br>NCLO | MAX<br>BETW<br>MIN<br>MIN<br>MAX<br>MIN | CLO<br>CLO<br>NCLO<br>CLO<br>CLO<br>CLO  |
| 15   | ALL                                      | ALL                                     | ALL                                      |

Tabelle: Mögliche korrekte Steuerkombinationen für jede Zone im Falle einer Rückluftbeimischung; das Klappensignal gibt den Anteil Aussenluft an

Im sogenannten Transformationsblock werden die quantitativen Steuersignale  $U_D$ ,  $U_H$ ,  $U_C$  danach auf einige wenige qualitative Steuerwerte  $U_D^Q$ ,  $U_H^Q$  und  $U_C^Q$  reduziert. Die qualitativen Steuerwerte für das Heiz- und Kühlventil können dabei nur die Werte „zu“ oder „offen“ (CLO, NCLO) annehmen, während der qualitative Steuerwert für die Wärmerückgewinnung nur in die Werte „minimale“, „maximale“ oder „mittlere“ Position (MIN(O), BETW, MAX(O) für die Aussenluftklappe) übergeführt werden kann. Dieses Vorgehen vermindert die Abhängigkeit der Methode von anlagespezifischen Grössen, wie Volumenströmen und geometrischen Daten. Sie erlaubt es ausserdem, das korrekte Verhalten der geregelten Anlage als einfaches Modell darzustellen und mithilfe eines sogenannten Prädiktors logisch zu programmieren oder durch Regeln ausdrücken

Graphisch kann das Modell in einer Ebene dargestellt werden (Figur 4). Diese ist unterteilt in drei sogenannte „Temperaturtripel“, eines für die Zulufttemperatur  $T_S$ , eines für die Rücklufttemperatur  $T_R$  und eines für die Aussentemperatur  $T_{OA}$ . Jedes Tripel entspricht in der Ebene mit den Achsen  $x \Rightarrow T_{OA} - T_S$  und  $y \Rightarrow T_R - T_S$  einem eindeutigen Punkt und gibt an, welche qualitativen Steuerkombinationen für ein korrektes Verhalten der Anlage zulässig sind. Das Modell setzt voraus, dass der Sollwert der Zulufttemperatur durch die Regelung eingehalten werden kann. Abweichungen vom Sollwert werden durch Überwachung des Regelfehlers direkt erkannt.

Das qualitative Modell teilt die beschriebene Ebene in verschiedene Zonen (1 bis 15) ein. Die zu einer Zone zulässigen qualitativen Steuerkombinationen sind in einer Liste abgelegt (Tabelle). Sogenannte Vergleicherböcke bestimmen nun, ob zwischen dem vom Regler berechneten und durch die Transformation gebildeten Steuerbefehlstriplel und den vom modellbasierten Prädiktor gelieferten Steuerkombinationen ein Unterschied besteht. Ist dies während einer gewissen Zeit bei einem oder mehreren Steuerbefehlen der Fall, löst der Detektor Alarm aus.

Die Methode hat zwei Merkmale: Erstens macht sie keine genaue Diagnose zu den detektierten Fehlern. Und zweitens erkennt sie nicht jeden Fehler in jedem Beharrungszustand. Die Anzahl von Zuständen, in denen ein spezifischer Fehler erkannt werden kann, hängt von dessen Grösse ab. Je grösser der Fehler, desto mehr Zustände stehen zur möglichen Detektion zur Verfügung.

Die Wirkungsweise soll in der Folge aber an zwei Beispiel erläutert werden:

- 1) Nehmen wir an, der Prädiktor erhalte eine Aussentemperatur, die aufgrund eines Übertragungsfehlers zu hoch ist. Die effektive Aussentemperatur ergäbe einen Zustandspunkt, der in dem in Abbildung 4 gezeigten Modell in der Zone 6 läge. Zu dieser Zone gehören drei mögliche korrekte qualitative Steuerkombinationen (siehe Tabelle). Wird die Aussentemperatur zu hoch gemessen, kann es möglich sein, dass der Zustandspunkt so weit nach rechts verschoben wird, dass dieser in die Zone 4 zu liegen kommt. Zu dieser gehört eine neue qualitative Steuerkombination (Tabelle). Da die Regelung aber mit der effektiven Aussentemperatur als Störung die Zulufttemperatur regelt, wird die vom Regler berechnete und daraus transformierte qualitative Steuerkombination eine zur Zone 6 gehörende sein. Diese steht aber im Widerspruch mit derjenigen, die der Prädiktor aufgrund der zu hohen Aussentemperatur angibt. Genauer gesagt, die vom Prädiktor bestimmten qualitativen Werte für die Aussentemperatur- Klappenansteuerung MAX(O) und die Kühlventilstellung NCLO stimmen nicht mit den vom Regler berechneten

qualitativen Werten überein. Somit zeigen die Vergleiche Diskrepanzen an; ein Fehler wird angezeigt.

- 2) Nehmen wir an, dass die Temperaturen richtig gemessen werden und sich ein Punkt in der Zone 4 ergäbe. Dazu gehört wiederum eine richtige qualitative Steuerkombination Heizventil CLO, Klappenansteuerung MAX(O) und Kühlventil NCLO. Für den gegebenen Zustand sei eine Kühlventilstellung von 10% genügend. Nun werde aber das Kühlventil durch einen Defekt bei 30% blockiert, könne sich also nur noch zwischen 30% und 100% bewegen. Somit wird eine überschüssige Kühlleistung erbracht. Diese wirkt als Störung auf den Zulufttemperatur-Regelkreis. Der Regler der Zulufttemperatur reagiert und versucht, die Störung zu kompensieren. Er schliesst zuerst das Kühlventil (CLO). Da dies keine Wirkung zeigt wird, wird die Klappe aus der MAX(O) Stellung gebracht. Im betrachteten hypothetischen Fall reiche die Rücklufttemperatur nicht aus, um die Blockierung zu kompensieren und das Heizventil wird soweit geöffnet, bis der Zulufttemperatur-Sollwert wieder erreicht wird. Es wird sich somit die folgende qualitative Steuerkombination ergeben: Heizventil NCLO Klappenstellung MINO und Heizventil CLO. Diese stimmt an allen drei Positionen nicht mit der vom Prädiktor bestimmte Kombination überein.

Aufgrund des vereinfachten Modells erkennt der Detektor im Allgemeinen die genaue Ursache des Fehlers allerdings nicht.. Somit ist es immer noch Sache des Service-Ingenieurs den Grund der Störung zu finden. Immerhin erhält er aber den wertvollen Hinweis, dass es sich um einen Fehler beim Steuersignal handelt.

Die Methode hat also, wie schon erwähnt, die Eigenschaft, Fehler zu erkennen, die durch den Regler kompensiert werden, also z.B. nicht über eine Reduktion des Komforts bemerkt werden. Die Regelung behandelt diese Fehler als Störungen und kompensiert sie. Der Detektor hingegen kann diese Fehler mithilfe der Steuersignale und der gemessenen Temperaturen finden.

### 3 Was für Informationen braucht es zur Inbetriebnahme?

Möglichst viele Parameter sollen durch eine Default-Einstellung vorgegeben werden können. Um dies zu erreichen, sind die Parameter eher konservativ eingestellt, d.h. es wird eher die Möglichkeit in Kauf genommen, dass ein echter Fehleralarm verpasst wird um Fehlalarme zu vermeiden.

Die Daten, die es zu einer Inbetriebnahme braucht, können in folgende Kategorien aufgeteilt werden:

Entwurfsdaten: es werden im Prinzip **keine** Entwurfsdaten benötigt. Von Vorteil sind allerdings die maximalen Heiz- und Kühlleistungen und die maximal möglichen Temperaturänderungen über den Heiz- und Kühlelementen. Mit diesen Informationen können gewisse Parameter (Zeitkonstante für Steady state Detektor, Schwellwerte besser d.h. weniger konservativ) eingestellt werden.

Konfigurationsdaten: es müssen alle **Punktparameter** (Adressen,..) zur Verfügung stehen, ebenso die **Art der Wärmerückgewinnung**, die **Lage der Ventilatoren** und die **Temperaturerhöhung pro Ventilator**.

Trainingsdaten: **keine**



Betriebsdaten: dazu gehören **Sollwerte, Scheduler, Betriebsmodus, Hysterese der Economy-Umschaltung, minimale Klappenstellung** für Umluftanlage.

zusätzliche Messungen: **keine**

Schwellwerte für Detektion: es sind verschiedene Schwellwerte einzustellen, viele sind als Default Werte vorgewählt.

*“Steady state” Detektor:* Varianzen für Temperaturen und Steuersignale sind als default Werte ( $[1^\circ]^2$  und  $[7\%]^2$ ) gegeben, ebenso die zeitliche Hysterese (1min).

Detektion von Schwingungen auf den Steuersignalen sind mit Varianzen, die dauernd über  $[20\%]^2$  liegen, charakterisiert

*Fault Detektor:* die Quantifizierung der Steuersignale sind auf 1% default- mässig eingestellt, die Grössen dx,dy und dz, die die Zonenabgrenzungen bestimmen, sind von Modell- Mess- und *“Steady state”*-Unsicherheiten abhängig und ebenfalls defaultmässig ( $0.8^\circ, 0.6^\circ, 0.7^\circ$ ) festgelegt . Ein Parameter, die **Verzögerungszeit, bis ein Alarm ausgelöst wird**, falls ein Fehler erkannt worden ist, **sollte einstellbar sein (10-30min)**.

## 4 Feldtests

### Anlage in Cergy

Hier sollen stellvertretend zwei Fehlersituationen, wie sie an der Anlage in Cergy-Pontoise induziert wurden, dargestellt werden. Bei der Anlage handelt es sich um eine Anlage mit Umluftklappen.

Der induzierte Fehler ist bei beiden Fehlersituationen derselbe: ein blockiertes Heizventil. Die Versuche sind in den Berichten [6] und [7] dokumentiert. Der Unterschied zwischen den beiden Situationen ist der, dass im ersten Fall das Heizventil bei verschiedenen Positionen blockiert wurde (zwischen 25% und 80%), während beim zweiten Versuch das Ventil fix bei ca. 15% blockiert wurde. Ob ein solcher Fehler detektiert werden kann, hängt bei gegebenen Default-Werten des Detektors einerseits von der Position der Blockierung und andererseits von den beiden Temperaturdifferenzen Toa-Ts und Tr-Ts ab. Grundsätzlich wird ein Fehler detektiert, falls:

entweder die Temperaturmessungen so falsch sind, dass gegenüber der wirklichen Lage des Punktes im Diagramm der gemessene so weit verschoben wird, dass Zonengrenzen überschritten werden

oder die Aktuatorblockierung so gross ist, dass zu dessen Kompensation ein anderer Aktuator aktiviert werden muss, sodass sich, um die Zuluft richtig zu regeln, zum gemessenen Punkt im Diagramm eine falsche qualitative Stellsignalkombination, die zu anderen Zonen gehören, ergibt.

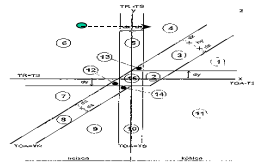
Beide auf den beiden nächsten Seiten dargestellten Fehlersituationen fallen in die zweite Kategorie.

Pro Fall werden vier Diagramme gezeigt. Das erste zeigt, in welche Richtung die Zonengrenze überschritten wird. Die nächsten drei Diagramme zeigen i) all gemessenen Punkte, ii) die Punkte, die im stationären Zustand waren, und iii) diejenigen Punkte, für die ein Fehler angezeigt wurde. Die Punkte des untersten Diagramms sind eine Untermenge der Punkte des mittleren Bildes und diese wiederum eine Untermenge des oberen Bildes. Die Achsen der Diagramme sind durch die Temperaturerhöhungen des Zuluft- und des Abluftventilators, die je zu einem Grad Kelvin angenommen wurden, korrigiert.

**Fig.5:Feldversuche mit induzierten Fehlern in Cergy**

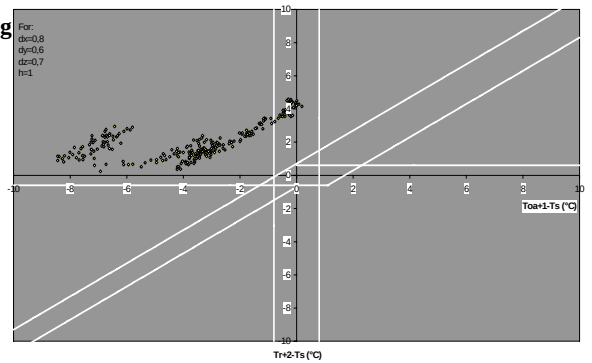
**Fault: heating valve blocked:  
crossing from heating zone (6) via (5) to cooling zone (4)**

heating valve cannot close fully  
consider e.g. the situation: valve stuck at 50%, heat demand is only 20%  
in order to compensate extra heat which acts like an increase in  $T_{oa}$ , the cooling valve opens (zone (4)), which contradicts the possible cooling command of zone (6) of measured point  
---> fault in cooling and damper command signals

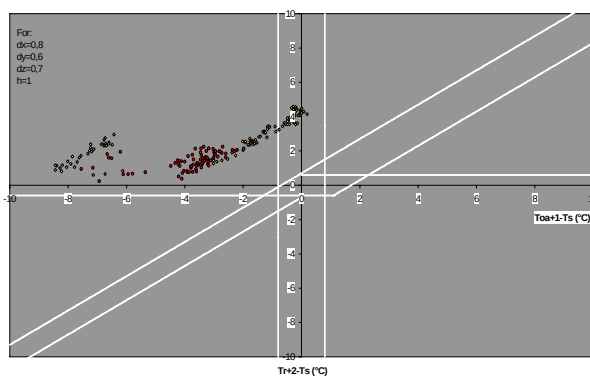


31

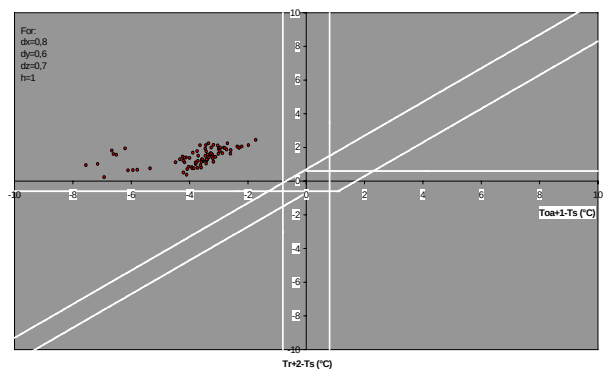
all measured points for different % of blockage



measured points which are in steady state

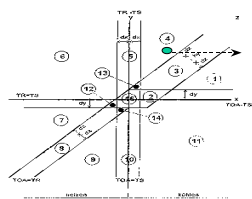


measured steady state points which cause a fault (wrong damper position and cooling valve open)



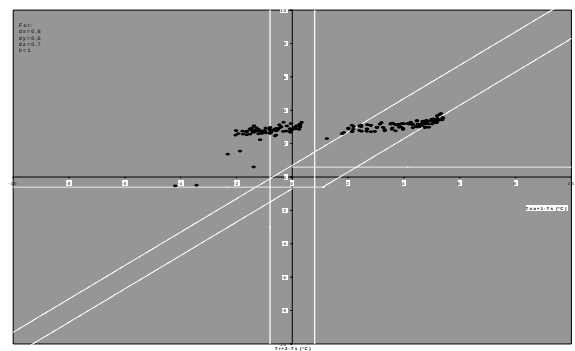
**Fault: heating valve blocked:  
crossing of economy switching zone (3) to zone (1)**

heating valve cannot close fully  
consider e.g. the situation: valve stuck at 15%, the actual heat demand is 0%; in order to compensate extra heat which acts like an increase in  $T_{oa}$ , the damper position is set to min which contradicts the required max position of zone (4)  
---> fault in damper command signals

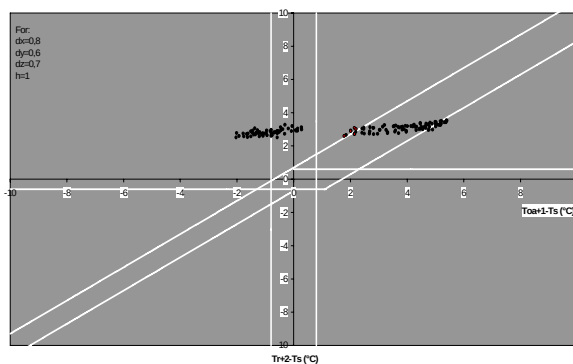


30

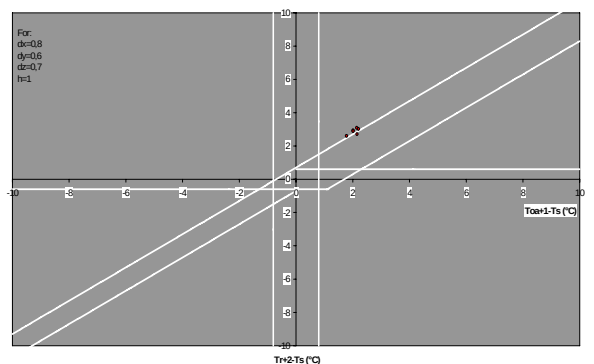
all measured points for 15% blocked valve



measured points which are in steady state



measured steady state points which cause an alarm (wrong damper position)



Im ersten Fall ist die erfasste qualitative Stellkombination in Zone (4) zulässig, aber nicht in der durch die gemessenen Temperaturdifferenzen zugeordneten Zone (6)).

Vom Heizbereich geht man in den Kühlbereich über. In der Zwischenzone (5) sind keine Aussagen möglich, da in dieser Zone sowohl die Kombinationen von Zone (6) und Zone (4) zulässig sind. Es zeigt sich, dass die verschiedenen Blockierungen im ersten Fall alle in mindestens einer Situation detektiert wurden.

Im zweiten Fall ist man nur im Kühlbereich. Die Blockierung bewirkt hier, dass die Position der Klappe durch die Economy-Umschaltung von der maximalen (4) auf die minimale (1) Position umgeschaltet wird, was nach den gemessenen Temperaturdifferenzen nicht erlaubt ist. Die Blockierung muss hier mindestens so gross sein, dass die durch die Blockierung entstandene Temperaturerhöhung grösser als die horizontale Breite der Zone (3) ist. In diesem Fall ist die Fehlererkennung nur in einigen wenigen Punkten möglich, die sehr nahe an der Zonengrenze liegen.

### **Anlage in Sennweid**

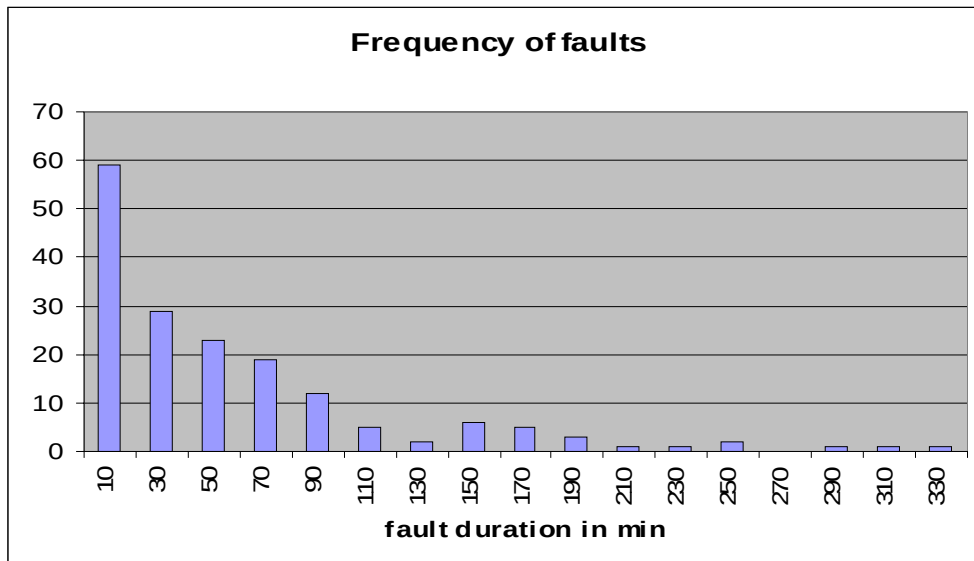
Auf dieser Anlage wurden auch einige wenige Fehler induziert. Sie diente aber vor allem der Untersuchung auf Fehlalarme. Die Anlage war mit einem Wärmerückgewinnungsradschaltwerk ausgerüstet.

Für diesen Test war die zeitliche Alarmschwelle auf 10 Minuten festgesetzt. Aus Figur 6 ist ersichtlich, dass die meisten Alarme eine Dauer von ca. 10 Minuten haben und danach deren Dauer exponentiell abfallen. Es gab sehr wenig Alarme, die länger als drei Stunden anhielten. Weshalb die Alarme wieder verschwanden, ist nicht ersichtlich. Gründe dafür können ein Ende des stationären Zustandes oder langsam sich veränderte Temperaturen sein. Gleichzeitig sieht man aus Figur 7, dass die Alarme praktisch nie in der Heizsaison auftreten. Die Anzahl Alarme kann drastisch gesenkt werden, falls die zeitliche Alarmschwelle auf >30 Minuten heraufgesetzt wird. Eine weitere Reduktion ergibt sich durch das Weglassen derjenigen Situationen, in denen keine oder falsche Messungen durch Übertragungsfehler entstanden. Von den restlichen 46 Alarmen sind 44 auf ähnliche Situationen zurückzuführen, die alle in der energiefreien Zone auftreten: das WRG wird in dieser Anlage nicht sofort abgeschaltet, sondern noch nachgeregelt, was dem optimalen Betrieb, wie er in fehlerfreien Fall definiert wurde, widerspricht. Ein weiterer Alarm ist auf einen induzierten Fehler zurückzuführen und ein Alarm entstand vermutlich beim Umschalten vom Sommer- auf den Winterbetrieb

### **Wie geht es weiter ?**

Die Erfahrungen haben gezeigt, dass sich das entwickelte Fehlerdetektionsverfahren für zentrale Lüftungsanlagen erfolgreich anwenden lässt. Durch den mehrjährigen Einsatz am realen Objekt Bürogebäude "Sennweid" konnten die meisten Schwellwerte so eingestellt werden, dass die Fehlalarmquote beinahe auf Null gesenkt werden konnte und trotzdem gewisses Fehlverhalten gefunden werden konnte. Dies war eine Bedingung für den praktischen Einsatz des Detektors. Die erhaltenen Parameterwerte konnten auch auf die Anlage in Cergy übertragen werden.

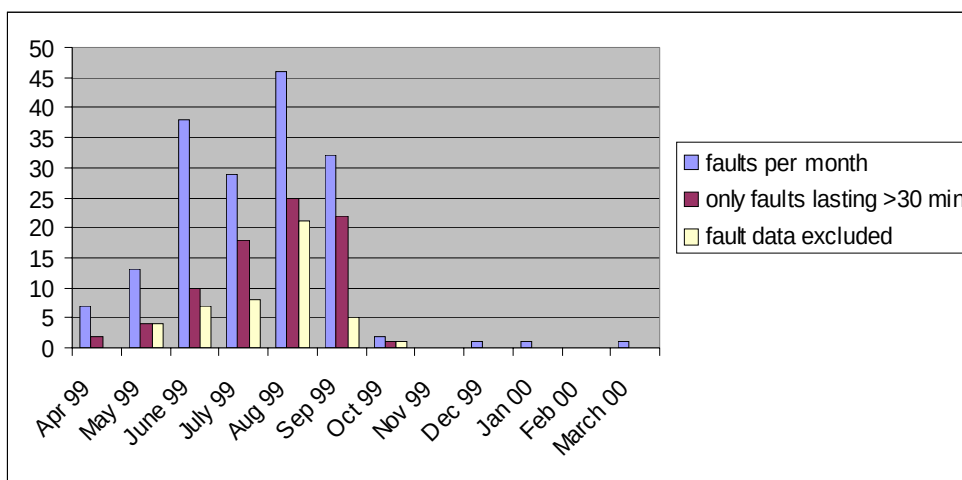
Das Verfahren wird mit grösster Wahrscheinlichkeit als Überwachungsfunktion in das existierende Gebäudeleitsystem Visonik aufgenommen und für neue Systeme als Funktionsblock integriert, der auf Wunsch zugeschaltet werden kann.



time period: April 1999-March 2000 (1 year)

**Fig. 6: Häufigkeit der Alarmdauer**

Fault frequency during the year



46 faults: 44 of the same type --> Heat recovery wheel control in energy free zone

1 injected fault June 11

1 fault Oct 1 ? (operator changed to winter ?)

**Fig. 7: Verteilung der Alarmer über das Jahr**

### Danksagung

Der Autor bedankt sich für die vom Bundesamt für Energie BFE im Rahmen des IEA Annex 34 Projektes finanzielle Unterstützung. Ebenfalls gilt der Dank J.Tödtli, Th.

Bühlmann, M. Widmer und R. Oberhänsli von Landis & Stäfa Zug sowie C. Tainha von Landis & Stäfa Frankreich und E.Dias von der École des Mines à Paris, ohne deren Mithilfe dieses Projekt nicht hätte verwirklicht werden können.

## Referenzen

- [1] IEA Annex 25 on “Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis, Technical papers, editor: J. Hyvärinen, Nov 1996, p.203-247
- [2] A.S.Glass, P.Gruber, J.Tödtli: Qualitative approaches to fault detection and diagnosis, Building Services Engineering Research and Technology, Vol 17 No 3 (1996), B24-B27
- [3] A.S.Glass, P.Gruber, J.Tödtli: Automatische Erkennung von Fehlern in einer zentralen Luftaufbereitungsanlage mit qualitativen Methoden, 8. Schweizerisches Status Seminar 1994 Energieforschung im Hochbau, 15./16. September 1994, S. 189-196
- [4] M. Widmer: Fehlererkennungssystem für Lüftungsanlagen, Implementation in Visonik, Diplomarbeit Zuger Technikerschule, 1995.
- [5] Th. Bühlmann: Fehlererkennung in Lüftungsanlagen, Funktionen Optimierung und Erweiterung, Zuger Technikerschule, 1997.
- [6] E. Dias: Détection de défauts sur la CTA de Cergy, Representation du blocage de la vanne eau chaude par utilisation de la batterie electrique de préchauffage (BVP) pour tester le Fehler de Siemens, avril 1999
- [7] E. Dias: Détection de défauts sur CTA de Cergy, Essai avec blocage de la vanne eau chaude (BVEC) pour tester le Fehler de Siemens, avril 1999

# Performance Audit Tool PAT: an expert system for the detection and diagnosis of building under-performance \*)

Sabine Kaldorf <sup>1)</sup>

Peter Gruber, Siemens Building Technologies, Landis & Staefa Division, Zug

## ABSTRACT

A building energy management system (BEMS) supervises, among other tasks, in an automated way the energy consumption of a building. The detection and diagnosis of faults, underperformance, or abnormalities, however, often is not automated. The operator or other users of the building must conduct this task. Exceptions are the automatic generation of alarms due to faults that might harm people or equipment. Underperformance here is seen as deviation from correct operation in terms of energy, comfort, or equipment. A tool based on an expert system for the detection and diagnosis of underperformance therefore aims at assisting the operator in the most useful way. The Performance Audit Tool, in short "PAT", aims at precisely this purpose. It was developed as a stand-alone system which periodically runs (e.g. once a day at midnight) a remote detection and diagnosis check. Every day, the operator receives a list of possible diagnoses for any detected underperformance. This kind of information is useful to the operator if either the number of objects to be supervised is large (e.g. number of zones, buildings,...) or if the detection and diagnosis must be carried out over a long period of time.

The underperformance types to be detected include excessive energy consumption and comfort issues such as zone temperatures that are too hot or too cold. Their causes may be among others total or partial component failure, wrong parameter settings, operator errors, undersized system capacity, or changes of building, or zone usage. As PAT will not receive any user input during the audit, it will in many cases not be able to indicate the exact cause of an underperformance it has detected. Instead, it will produce a list of possible causes. Additionally, PAT does not cover active testing or provide guidance of service people during testing.

The first objective of this study is to present the structure of the tool in terms of information handling and to apply this environment to two types of systems: to a central air handling unit and to individual zones. The second objective is to talk about experiences made with this type of tool.

\*) submitted to ASHRAE Conference in Atlanta, 2001

1) former Siemens Building Technologies, now Softlab, Cologne

# INTRODUCTION

## History

Expert systems for underperformance or fault detection and diagnosis have been around for a while [Popovic/Bhaktar 1994], [Harmon/King 1987]. There are also quite a variety of commercial expert systems available [Canmet 1999] on the market. Advantages and disadvantages of these systems are sometimes not easily visible. Only when really applying the software does one begin to know the specific capabilities and limitations. At such a stage in development, changing the expert system software is often not possible. Therefore, the risk that an expert system application turns into failure due to unexpected problems cannot be underestimated. Besides the friendliness of both development and support environment, it is equally important that the results of the detection and diagnosis are also presented in such a way that they are understandable to the respective user (service engineer, operator).

Over the past few years, an expert system called "Performance Audit Tool PAT" was developed and tested which automatically supervises building performance [Kaldorf/Gruber 1997], [Gruber/Kaldorf 1998]. Some of this work was part of the IEA Annex 34 project "Computer aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings" [IEA 2000]. At the beginning of the PAT project, the following requirements were formulated:

- In its final state, PAT is installed in a BEMS manufacturer's branch offices or may be at a big customer's offices. It will run at night as a batch job having (remote) automatic access to building data and producing a printed report of its findings.
- In order to be applied to different buildings, PAT needs information about the building's structure, its HVAC equipment and the building control system's configuration as well. To do that efficiently, the configuration setup will be automated as far as possible.
- PAT will not receive additional user inputs during the audit. Therefore, it will in many cases not be able to indicate the exact cause of an underperformance it has detected. Instead, it will produce a list of possible causes.
- PAT does not cover active testing and does not provide guidance of service people during testing.
- PAT has to cover different Building Energy Management Systems (BEMS) systems and therefore requires different interfaces. The user interface must be in German and English.
- The underperformance types to be detected must include comfort issues such as zone temperatures that are too hot or too cold, exceeded energy consumption and abnormal component behavior. For these effects, the term underperformance is preferable to the term fault because underperformance covers a wider range of undesired behavior. Their causes may be among others total or partial component failure, wrong parameter settings, operator errors, undersized system capacity, and changes of usage.

First a prototype was built with a full software framework but with limited diagnostic capabilities. Its principal functionality has been proven. This prototype has been installed and tested in some test sites to evaluate the cost-benefit ratio. Experiences and lessons learned with the application of such a tool at the test sites are summarized in [Gruber/Kaldorf 2000,1].

### **Scope of the paper**

This paper first discusses the general structure of this tool. Then, the structure of the configuration database is introduced. Subsequently, the supervised control applications with their knowledge databases are an issue, followed by discussion of the search methods for detection and diagnosis including an example of a rule tree. Two examples of fault detection and diagnosis for zone control application and a central air handling unit control application show the capabilities of PAT. The experiences derived from using such a tool are summarized at the end and a few recommendations are made in order to avoid future inconveniences for development, setup and support of such a tool. Issues concerning the applicability of such a tool are covered: They include configuration information, expert system shell, and system boundary for the rules in the knowledge database, data pre- and post-processing, and PC environment.



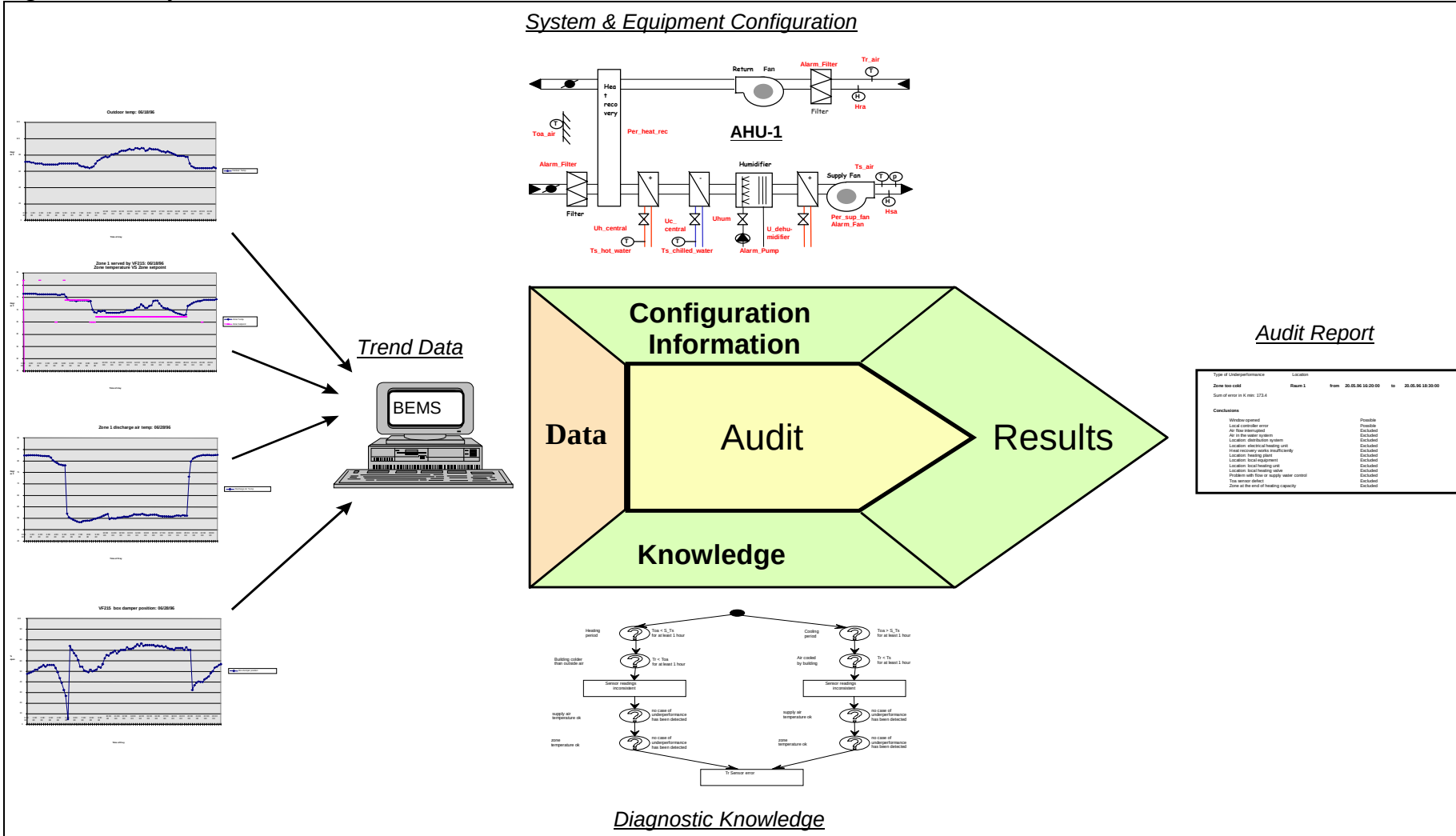
## SYSTEM STRUCTURE OF PAT

If an expert system is used in HVAC applications, typically five main elements are needed for proper operation of the system. These elements store and process input and output data, store configuration information and process knowledge, and execute rules. An expert system shell is a commercially available software which among other things 1) embeds a few of the five elements, 2) handles the editing, storing and maintaining of rules, and 3) enables the user to program the search methods and inference mechanism.

Figure 1 shows the arrangement of these five elements in the developed PAT tool:

- The “Data ” component loads trend data from the BEMS into the PAT **trend data archive database** using existing packages. Existing data management tools for the different BEMS are integrated at the front end of the data acquisition process. Invalid data is detected by comparing the data to upper and lower boundaries and missing data is handled.
- The “Configuration Information” component provides a user interface to enter configuration information (e.g., points, plants, zones) into the **configuration database**. Parts of this “setup” module are the “point parsers” that try to extract automatically information from point names and descriptions. The configuration data is stored in a relational configuration database holding data for each installation on:
  - Building topology (floors, zones)
  - HVAC system (subsystem, equipment, design parameters)
  - Point definitions (read from the BEMS)
  - Point functions (e.g. zone temperature)
  - Connections between points and their setpoints
  - Point locations (minimum: buildings, floors and zones under consideration)
  - Operating schedule and holidays
  - Some fixed operational and design parameters (e.g., design temperatures)
  - Data storage
- The “Knowledge” component contains expert knowledge on improving building performance. Underperformance detection knowledge and diagnostic knowledge are captured in rules forming decision trees that are stored in a **knowledge database**. An expert system was used to capture and store the expertise on improving building performance. The knowledge database, realized with a commercially available expert system shell, was embedded into “conventional” relational databases. Users will only see interfaces to the databases. Only the people maintaining the knowledge database will have to deal with the proprietary technology of the “expert system shell”. Maintenance includes adding, changing and debugging rules as well as setting the search methods. Knowledge databases exist for zone, central air handling unit, and chiller underperformance. The knowledge for each type of underperformance is captured in fault or decision trees. Twenty-eight such trees exist with approximately 250 diagnostic rules and approximately 85 conclusions. An example of such a tree is discussed in the section on search methods.
- The “Audit” component combines knowledge and configuration information to execute the rules by means of trend data. Execution occurs by an inference mechanism and several search methods that are programmed in the expert system shell. Cases of underperformance and their likely causes are exported into the result database

Figure 1: PAT system structure



- The “Results” component consists of a **result database** holding cases of underperformance and diagnostic results. It is automatically filled by the Audit component. The block transforms also the results of the audit into easy-to-understand audit reports.

The prototype uses a commercially available database program for storing the trend data archive, the configuration data, and the results. Modules handling trend and configuration data are written in Visual Basic. In order to enable the exchange of the database system with little effort, those modules that are meant to run as batch jobs use ODBC access to the databases. The user interface for the configuration entry was written as modules inside the database for cost reasons.

## STRUCTURE OF THE CONFIGURATION DATABASE

The data modelling that led to the chosen data structure was based on an entity-relationship model. The main structure of the overall configuration database is shown in Figure 2. It consists of seven major blocks. Each block may consist of several sub-blocks. Each sub-block may contain several tables that are connected via relations. Each table has from a few up to 50 entries with a typical number of approximately 10. The different tables can have a 1:1, a 1:max 1 (is a), a 1:N or a N:N relation. A N:N relation can be further broken down by an additional table into two 1:N relations. The definition of these relations can be found in every standard text book [Ullmann 1988] about data modelling. The seven major blocks are the following:

The **topology block** describes all the geometrical and geographical data of the **site** under inspection. The site includes one or more **buildings** each of which can be composed of one or more **floors** and **zones**. Some tables have a 1:N relationship, while floors and zones have an N:N relation. The building table is the largest in terms of parameters (ca 50).

In the **point list block**, all the information about points is stored. A point is generally a variable or a parameter inside the system. The BEMS knows **actual points** (inputs, outputs) and **virtual points** (control parameters, derived values). PAT adds its own **derived points** (e.g. gradients, integrals). BEMS-specific information is in a special table. All the addresses (technical, user) are in that table too.

The **input block** is used in order to load some specific information from data files to the point list block.

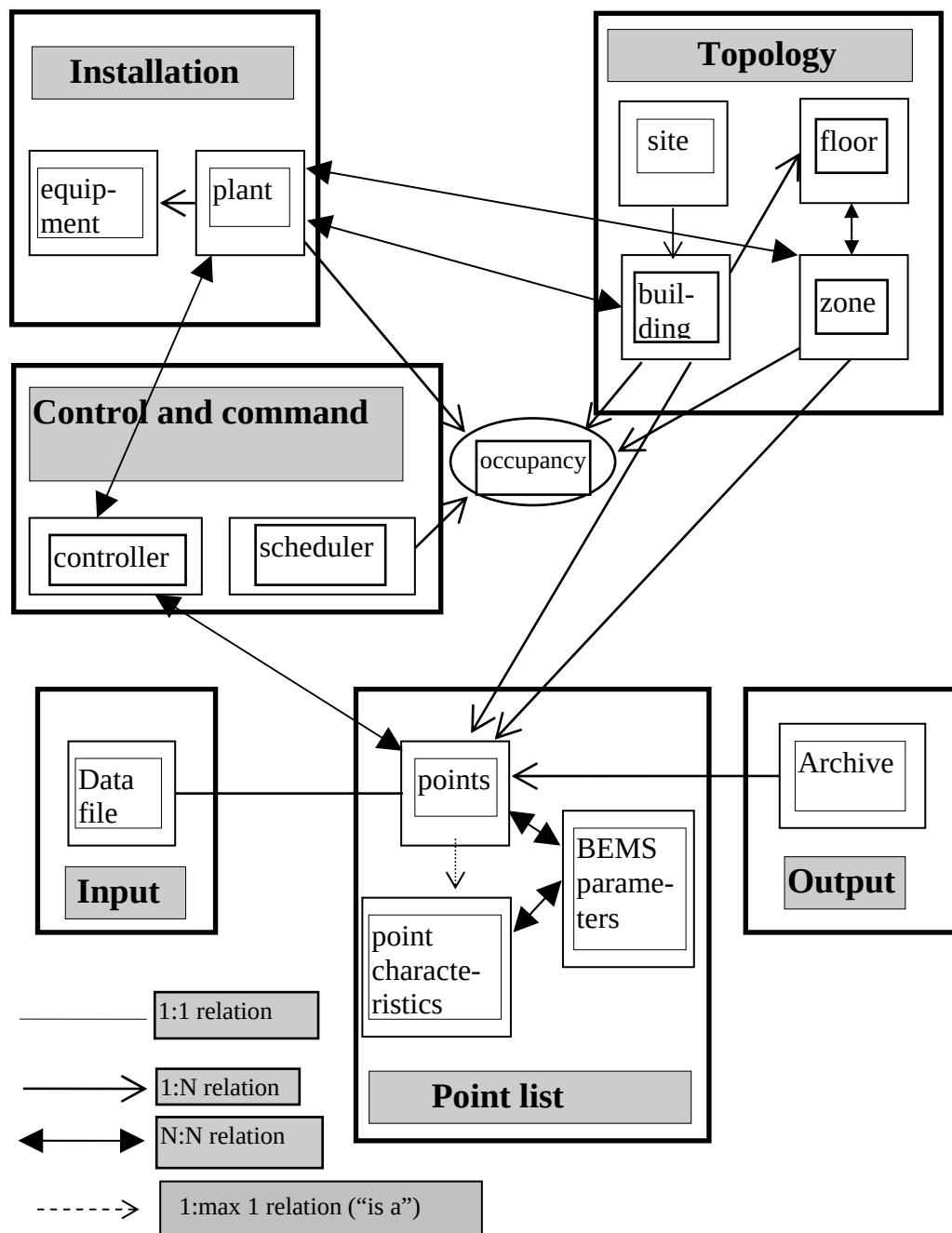
In the **output block**, an archive is built up which allows to generate reports for the operator.

The **occupancy block** is a special table in which—depending on the scheduler and the operation mode for each plant, building, zone and floor—an occupancy mode is established.

The **control and command block** contains the controller and the scheduler that is responsible for the operation mode of the building.

The **installation block** has the sub-blocks plant and equipment that consists of many parts. The equipment block is a library of components and equipment types. These are boiler, chiller, cooling tower, heat exchanger, air handling unit, exhaust fan, light system, pump, valve, sensor, etc. Each equipment type is characterized by a set of parameters such as model type, manufacturer and capacity.





**Fig. 2: Main structure of the configuration database**

## RULES FOR CONTROL APPLICATIONS UNDER CONSIDERATION

### Knowledge database

Knowledge databases for the detection and diagnosis of underperformance have been developed for control applications of zones, central air handling units, and chillers. The knowledge for each type of underperformance is captured in fault or decision trees. Twenty-eight such trees exist with approximately 250 diagnostic rules and

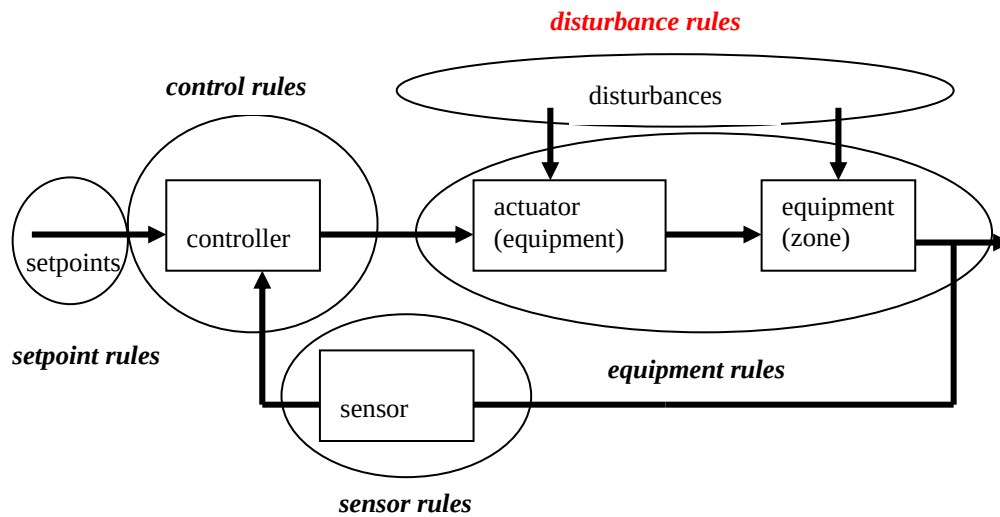
approximately 85 conclusions. The knowledge database has been obtained by interviewing experts from the field such as commissioning and service engineers. In the applications above, the control loops are important subsystems for maintaining correct operation of the overall system. Therefore, beside rules with conditions that contain knowledge about the configuration, a lot of knowledge expressed in rules is needed for the behavior of three main components of a general control loop:

- equipment, actuator and/or zone
- controller
- sensor.

The two main types of inputs to the control loop are:

- setpoints
- disturbances.

The rules can be assigned to classes as indicated in the classical control loop block diagram Fig. 3.



**Fig. 3: Rule classes for classical control loop for CAHU and zone**

The rules will also cross-reference between zones, central plant etc. The rules fall into the five main classes: those that describe the correct and wrong response of the various physical items of the plant *equipment*, i.e. dampers, valves etc., those that relate to the way in which the *control* system is set up to respond to various conditions, those that describe the correct and wrong response of the *sensors*, those that describe the *setpoints* and those that describe the *disturbances*:

- *Equipment rules* will describe what happens in faulty operation of an actuator followed by the reaction of the system. Equipment rules are parameterized by the description of the equipment and the relationship between the equipment held in the configuration database. This information is derived from the technical descriptions, plans etc. of the building and plant, and should change little over time.
- *Control rules* evaluate parameter settings against “common sense” or national standards. Control rules will need to be parameterized from the database and an ideal model of control behavior.
- *Sensor rules* check the validity of the measured physical quantities.
- *Setpoint rules* check the validity of setpoints.

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

Table 1: Overview of the control applications and its knowledge database

- *Disturbance* rules check the measured disturbances for limits and plausible behavior.

The expert rules describing the system in the above way can also be divided into classes describing how the rules are executed. These execution classes are:

- Preconditioning rules whose conclusions (THEN part) are simply the outcome of the IF part. They are used as checking conditions before other expert rules are activated in the different paths of a fault tree (Example: configuration information)
- Branching rules, where different actions (THEN-part) are possible depending on the outcome of the conditions (IF-part). These rules are always activated (Example: Is valve open or not open?)
- Standard rules whose conditions and conclusions both contain expert knowledge. These rules are only activated if the IF-part is true
- Detection rules that are a chain (AND/OR combinations) of precondition, branching and standard rules used for the detection of underperformance.
- Diagnostic rules that are a chain (AND/OR combinations) of precondition, branching and standard rules used for the localization and identification of possible causes of underperformance

The rules may also contain an uncertainty factor. In the programmed rules, this factor is only used as a binary information. This means that either the rule can be evaluated fully (certainty factor =1) or the rule cannot be evaluated due to lack of information (certainty factor =0).

In Table 1 the relevant information for the three control applications—CAHU, zone and chiller—are summarized. The first row contains the number of data points needed for the detection of all the implemented underperformances. If some of these data points are missing, the number of detectable underperformances is reduced. The data points needed for detection may also be needed for localization and diagnosis. The second row indicates the additional data points that are needed if a complete diagnosis is wanted. The total number of data points is the sum of the first two rows. The third row lists the number and type of parameters needed for the audit. Crucial parameters are the thresholds in the rules. The fourth row contains the number and type of underperformances for each of the control application that are checked by the rules. Some of the underperformances appear twice, e.g. supply air too hot/cold for zone and CAHU underperformance. The zone and the CAHU applications are pretty well developed in terms of number of underperformances that are checked, while the chiller application is only simply covered (only two underperformances that can be detected). The fifth row lists the number of decision trees and the sixth row the number of diagnostic rules for each application. The total number of ca. 250 diagnostic rules consists of ca. 100 rules for each of the first two applications and ca. 15 for the chiller application plus ca. 35 rules that are applied to both the zone and the CAHU application. Finally, the last row indicates the number of conclusions of identifiable fault causes.

### Rule Parameters

Many of the expert rules are formulated in such a way that *transient* behaviors of the various physical quantities and actuators within each zone and central plant area are checked. As mentioned before, the rules will also cross-reference between zones, central plant, etc. As is obvious, the rules need different kind of information and must also be parameterized. The information is required for objects, attributes and thresholds and is therefore of very different nature:

#### *Plant and building specific parameters:*

These parameters are derived from plans and should change little over time. Typical parameters of this type are:



- Design parameters (e.g. minimal cooling setpoint, maximal outdoor air temperature)
- Identifiers (e.g. point name)
- Configuration parameters (e.g. central/local cooling)

*Parameters related to time and value thresholds:*

The values of these parameters are captured by expert knowledge and are of a generic nature. Normally they are not changed for a specific application. Typical parameters of this type are:

- Thresholds for deviations and integrated deviations
- Thresholds for sensor offsets, setpoint changes, actuator positions etc.
- Thresholds for the number of missing or invalid data
- Time thresholds for persistency of faulty behavior

*Online results of BEMS functions and other rules:*

This information is normally a binary result. Typical are:

- alarms
- maintenance information
- sensor checks

*Online data:*

Two classes can be distinguished:

- *controller-related parameters* such as occupation mode, scheduler information, setpoints and other controller settings
- *controller outputs* like valve or fan command
- *measurements* like temperatures, pressures, flows, etc.

**Rule example**

The different types of information needed in a rule are explained now with an example. It is the rule that diagnoses a problem with the chilled water supply flow or the chilled water supply control loop.

If the problem is located in the central cooling/ distribution  
and if the zone is cooled by centrally chilled water  
and if the chilled water supply temperature is **too warm**

(the difference between the actual temperature and its setpoint is larger than the tolerance of [default: 1]K during a time period which lasts [default: 20] min after the zone temperature first exceeded its setpoint)

and if the primary chilled water is **not too warm**

(the difference between the actual temperature and its setpoint is smaller than the tolerance of [default: 1]K during a time period which lasts [default: 20] min after the zone temperature first exceeded its setpoint)

then there is a problem with the chilled water supply flow or chilled water supply control loop (local sensor, controller, actuator)

For the evaluation of this rule, the following information must be supplied:

*plant and building-specific parameters:* central chilled water system, identifiers

*parameters related to time and value thresholds:* tolerance of 1K, time interval of 20 min for underperformance persistence

*online results of BEMS functions and other rules:* underperformance detection

*online data: measurements:* chilled water supply temperature, primary chilled water temperature, zone temperature,  
*controller-related parameters:* setpoints for zone temperature, chilled water supply temperature and primary chilled water supply temperature

## SEARCH METHODS FOR DETECTION AND DIAGNOSIS

The expert knowledge is structured in trees. During an audit, each tree is worked through. In every tree, there is a part for detection and then a part for localization and diagnosis. The rules in the trees can therefore be divided in two types of rule groups:

- detection rules for each underperformance
- diagnostic rules for localization and identification of underperformance or fault cause.

The rules are written in a generic way, meaning that specific data points are not used for the knowledge presentation in the rules. If a rule is used during the audit, the corresponding identifiers of the needed data points and parameters are filled in to evaluate the rules for every item. Figure 4 shows an example of a rule tree consisting of the detection part and the localization and identification part. The upper part shows the **detection rule** that consists generally of a chain of preconditioning rules, branching rules, and standard rules. The middle part represents the localization layer for three problem locations. Again the paths consist of all kind of rules. The bottom part and all the other ending points of the tree are the diagnostic conclusions. For each such diagnosis, there exists a **diagnostic rule** and a conclusion with identified possible fault causes. Different diagnoses may have the same conclusion and one diagnosis may have several conclusions.

The flow control of the detection and the diagnosis part of the tree are different and are described in the following.

### Underperformance detection

The underperformance or fault detection component consists of three connected loops that are executed periodically. The loops are:

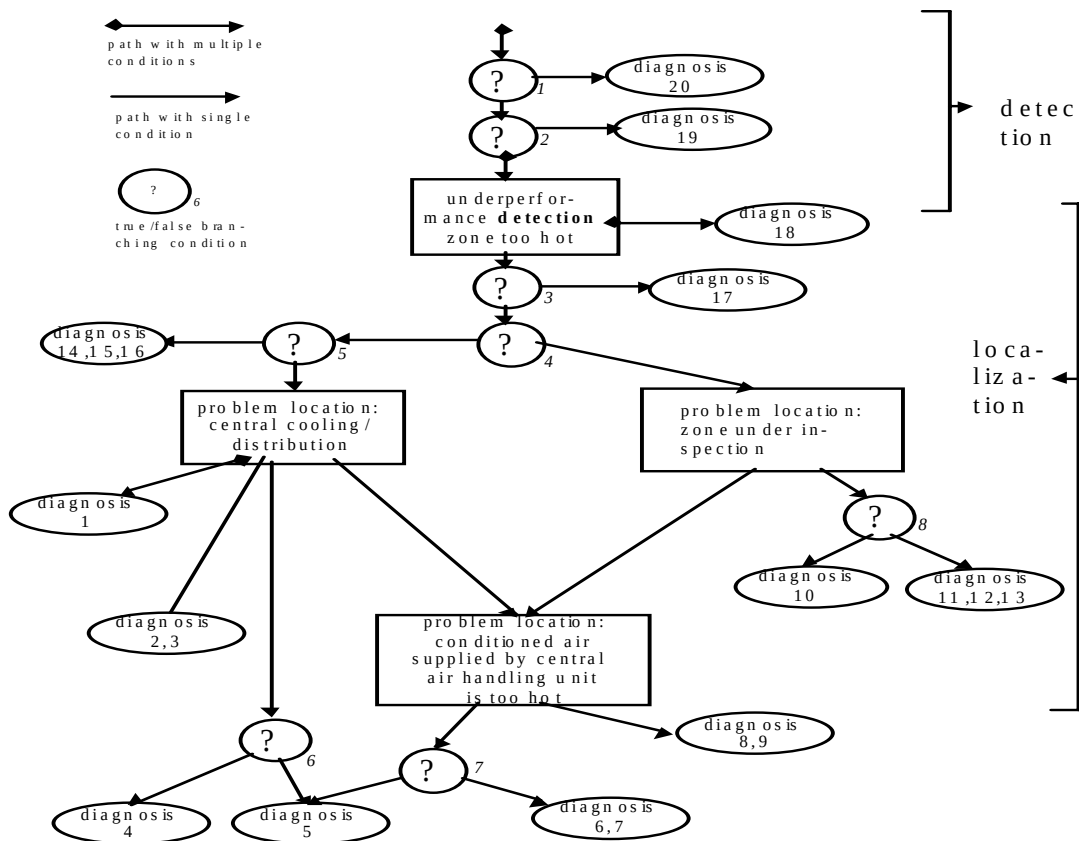
- a time loop activated at predefined intervals (e.g. 10 min)
- a loop covering all types of underperformance (all underperformances which apply to a specific item like zone, CAHU, sensor,..)
- a loop across all items (all zones and CAHU's, equipment,...)

For every type of underperformance, there exists a **detection rule** describing the conditions for this underperformance to be detected. These detection rules refer to a time X, the start time of the underperformance. The rules are executed for every item they can be applied to (zones, equipment etc.) and for every time interval. Some types of underperformance are checked just once a day. Whenever all conditions come true at the same time, an "underperformance" record is created and stored for diagnosis. The detection is done by **forward chaining**, starting from the data and facts and then proceeding along all rules until the underperformance is detected.

If the information needed to evaluate a condition is not available because of missing sensors, interruption of data transmission etc., rule execution is stopped.

### Underperformance diagnosis

For every type of underperformance, there exists a decision tree containing the areas where the cause might be located and the conditions necessary to blame an area. In order to better structure the diagnosis, the decision tree is divided into **localization** and **proper diagnosis** or **identification**. If the state “underperformance detection” has been reached, the search is continued by backward chaining. One starts from three possible “problem location” states (goals) and checks upward whether all conditions (rules) can be fulfilled by the given facts until one reaches the state “underperformance detection” by at least one path. If such a “problem location” has been found, then one starts from all diagnoses (goals) which can be reached via the found “problem location” and checks again in a **backward chaining** way if the found “problem location” state can be reached. If the information needed to evaluate a condition is not available because of missing sensors, interruption of data transmission etc., the corresponding cause cannot be excluded. Therefore, the condition is passed as if it were true, but the conclusion is marked to be less reliable.



**Figure 4: rule tree for “zone too hot” underperformance detection and diagnosis**

The example of the tree of figure 4 can now be explained. In the upper part, the detection is done by following a path with several preconditions and two branching rules 1 and 2. The two branching rules lead already to possible diagnoses 19 and 20 before the actual underperformance “zone too hot” is detected. After the detection diagnosis 18 is checked by a path with preconditions, diagnosis 17 checked via branching rule 3, diagnoses 14, 15, and 16 via the three branching rules 3., 4., and 5,

and all other diagnoses are checked via the intermediate localization part. Three locations are checked: central cooling/distribution, zone under inspection (local), and a combination of central and local problem location. Details about the tree and the rules can be found in [Kaldorf/Gruber 2000,2].

### 3 EXAMPLES

To test the tool in practice, it was set up at three different sites. Each site is an office building that is already controlled by a previous installed BEMS. Two sites were small office buildings where the setup was manageable. The third building, however, is a complex site and the setup proved to be very tedious.

No artificial faults were introduced in all test sites. The detected underperformances could all be verified and explained after manual inspection. The diagnostic part of the tool was not exploited to its full potential due to the lack of additional measurements and other required information.

#### **Central air handling unit control application**

First PAT was applied for a central air handling unit. Various faults could be detected and diagnosed for the heating and the cooling case

Example: In the building under inspection, the air is preconditioned in a central air handling unit. The plant diagram of this unit is shown in Fig.5. The plant consists basically of a temperature and humidity control of the supply air temperature with heat recovery. In a first analysis, we look at the temperatures only. The important signals for this case on a day in February are displayed in Fig.6 in 10 minutes intervals. These are: heating and cooling setpoint of the supply air temperature “Ts\_air\_hsp” and “Ts\_air\_csp”, the actual supply air temperature “Ts\_air”, the return air temperature “Tr\_air”, the outdoor air temperature “Toa\_air”, the command signals for the heating and cooling valve “Uh\_central” and “Uc\_central” and the heat recovery wheel “Per\_heat\_rec” (scaled from 0 to 10), and finally the operation mode of the plant “opmode” (scaled 0 or 1). PAT indicated the following fault:

During the whole occupied period (7:30-18:30), a possible fault in the command of the heat recovery wheel and the heating valve is diagnosed. The cause for the possible faulty behavior is not diagnosed in more detail. The following conditions were satisfied during the time period from 7:30 until 18:30:

opmode on

Tr\_air > Ts\_air for more than one hour

Toa < Ts\_air\_hsp for more than one hour

Per\_heat\_rec = maximal for more than 10 minutes

Uh\_central > 0 for more than 10 minutes

Uc\_central = 0 for more than 10 minutes

With the given temperature conditions (return air temperature higher than the supply air temperature), it could be possible that the supply air is only heated by the return air via the heat recovery wheel, if it has a sufficiently high efficiency. As no detailed information about this efficiency is known, a possible fault is indicated. This has to be understood as a warning and triggers the operator to check more closely the heat recovery. If the efficiency of the heat recovery could be determined by more measurements, a closer diagnosis could be obtained.

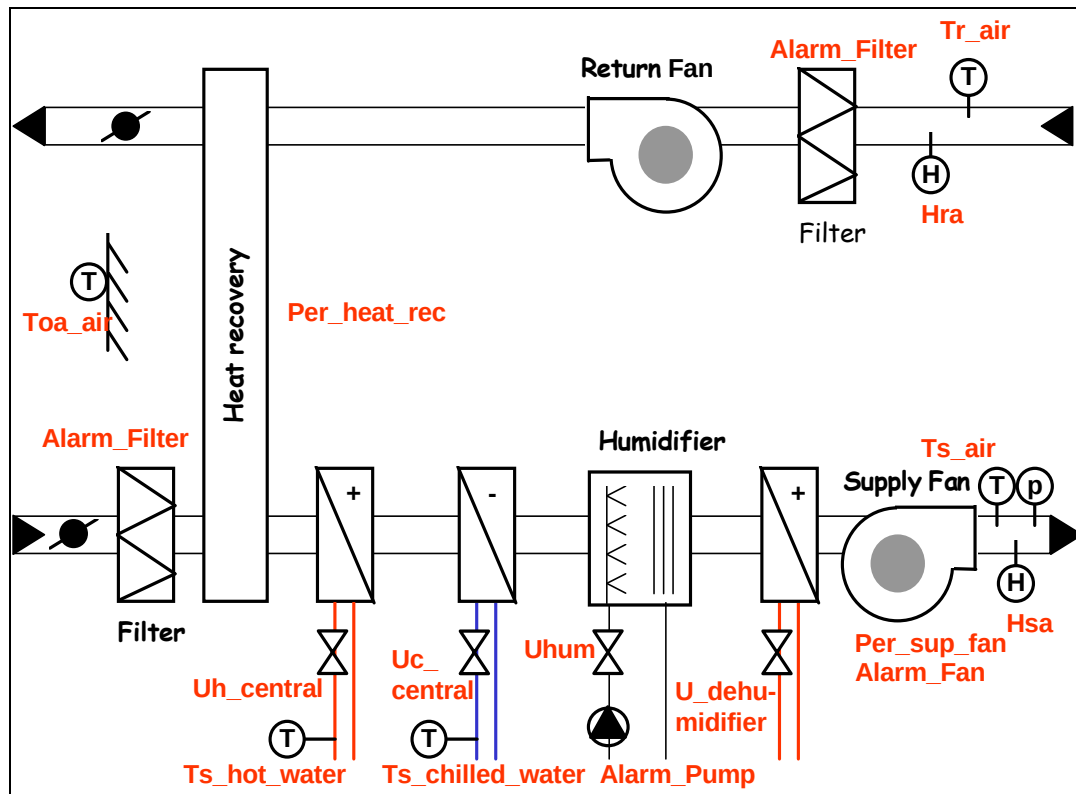


Fig.5: diagram of central air handling unit

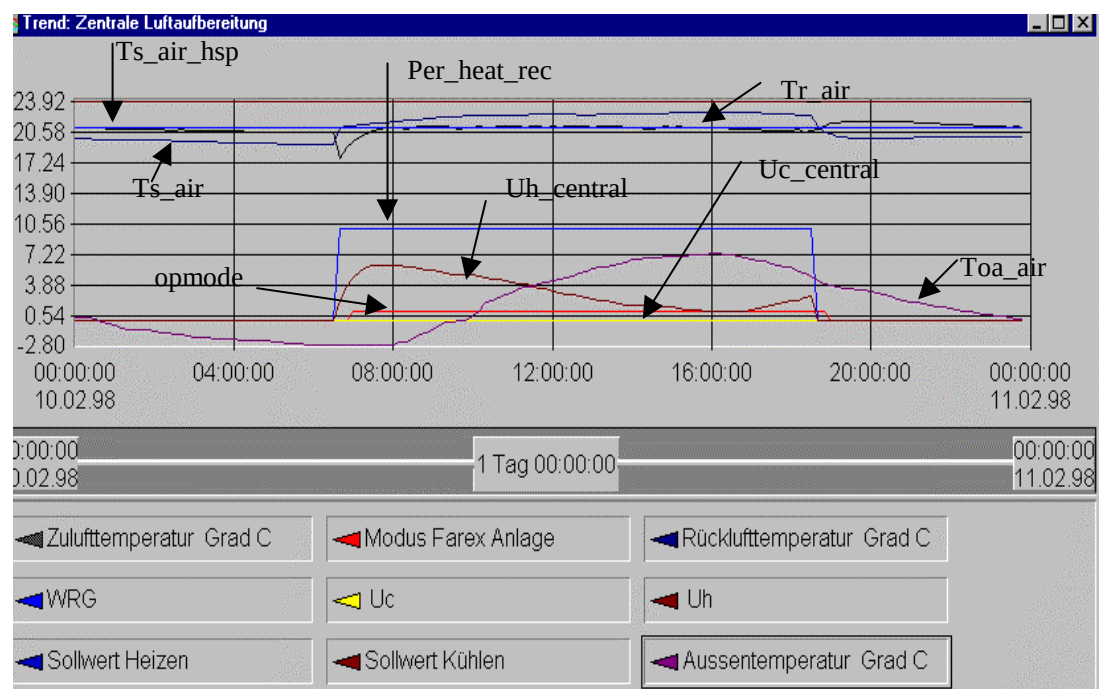
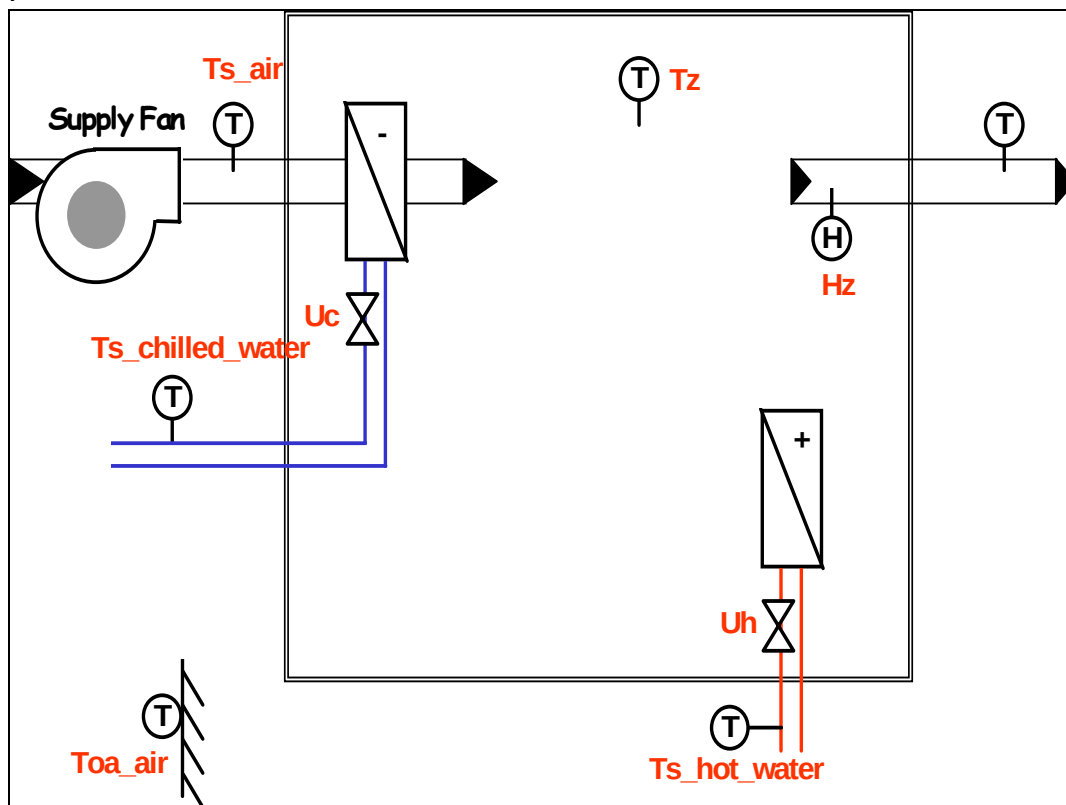
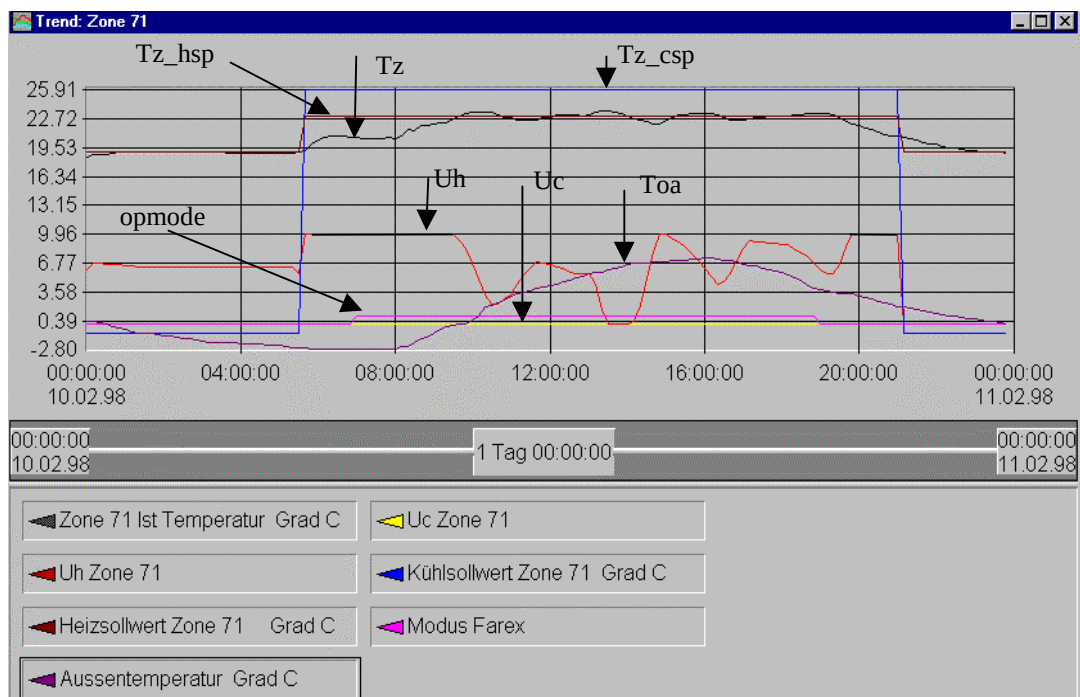


Fig.6: Signals during a day in February

### Conditioned zone control application



**Fig. 7: Diagram of the zone control application**



**Fig. 8: Signals of the supervised zone one day in February**

A second application is the supervision of three zones in the same office building where the central air handling unit of the first example is installed. Various faults or abnormal behavior was repeatedly discovered in these zones.

Example: The conditioned air is distributed to different zones which are equipped with terminal units. One of these zones is shown in Fig.7. The zone is supplied with a constant air volume flow and cooled by a chilled ceiling and heated by a radiator. The following signals are displayed in Fig.8 for the same time period as in the last example: heating and cooling setpoint “Tz\_hsp” and “Tz\_csp”, actual room temperature “Tz”, outdoor air temperature “Toa”, command signals for heating and cooling valve “Uh” and “Uc” as well as the operation mode “opmode”. PAT displayed the following abnormal situations:

- 1) The cooling setpoint is too low during the night setback (0-5:30 and 22-24). As the plant is not in operation during this time period, this fault is not important.
- 2) The heating setpoint is too high (23°C) compared to standard settings during the occupied period. The diagnosis indicates as possible causes excessive user comfort, room temperature sensor offset, air draft, or cold radiation. As it turned out, the individual user of this zone overrode the default setting of the setpoint.
- 3) The room is during the occupied period too cold during some time periods (8-9:40, 14:10-15:20). This situation is detected if the integrated difference between the actual room temperature and a tolerance band around the setpoint exceeds a certain limit. Due to limited knowledge, many (15) possible causes for such an underperformance are indicated. One plausible cause is that even if the heating valve is fully open, the setpoint could not be attained. This indicates that the hot water “Ts\_hot\_water” is too cold or the valve cannot open completely. As it turned out, the valve could not open completely.
- 4) Unnecessary heating is displayed during three short periods (10:40-10:50, 13:10-13:30, 16:20-16:30). This fault arises if the actual room temperature exceeds by more than 0.5 degrees Celsius the setpoint for at time period of at least 30 minutes. Again different causes are given for this underperformance.

All these situations could be found again during other days for this zone while other zones did not exhibit all of these situations. It is clear that especially the occurrence of fault situations 3) and 4) depend heavily on the chosen default thresholds. From the service people, these thresholds were considered useful in order to indicate underperformance. An increase of the thresholds in time and amplitude could of course suppress situations 3) and 4).

## DISCUSSION

It was shown that the expert system-based tool PAT fulfilled its basic functionality. Some underperformances were detected by the automated auditing of zones and central air handling units in real buildings that up to this point were not reported by the operator or users. However, in order to be successful as a service tool as formulated in the beginning, several shortcomings of the existing tool have to be eliminated. These shortcomings can be grouped into the following issues:

- configuration information
- expert system shell
- system boundary for the rules in the knowledge database
- data pre- and post-processing
- PC environment.

### Configuration information

A list of point names and parameters needed for fault detection and diagnosis for the specific audit has to be created. During the installation of PAT at the test sites, it was discovered that the cost of this setting up of the PAT is rather high. This is due to the fact that there is not enough HVAC equipment and control system configuration information available in the building energy management system that can be retrieved automatically. A service engineer has to provide the necessary information about the configuration. For each test installation, we spent more than a day extracting and entering the configuration information manually, thus making the setup process very time consuming and costly.

For instance, the measurement of “21.1°C” taken at 11 a.m. by the point “G'02K64'980\_BAVA” becomes meaningful only if you know that “G'02K64'980\_BAVA” is the internal name of “the actual zone temperature of zone 1”. Such information must therefore be kept in the “configuration database” which has to be filled once for each installation.

This information has to be generated additionally, if not yet needed for control in the BEMS, and is also stored and matched with the building topology in the configuration database.

The different information required by PAT is now treated more in detail.

#### *Point Name:*

A point name is used as a unique identifier in PAT for almost all tasks including data acquisition, downloading the measurements, detecting underperformance, and identifying operating faults.

#### *Point Type:*

A point type (i.e., AI, AO, DI, DO, etc.) is used for identifying a data type (i.e., binary, integer, floating point).

Presently, we can download both point name and point type directly from the BEMS database or via standard reports from the BEMS point definition table.

#### *Point Function:*

A point function identifies a role of a point in the system, e.g., “supply air temperature” or “return air temperature”. It may also contain information about the type of sensor or actuator used.

PAT uses the knowledge of the exact function of the point to analyze operating conditions, detect underperformance, and identify operating faults. In the PAT prototype, we have devised a point function naming scheme for identifying a specific function of a point. For example, all the supply air temperature sensor points will have their point functions defined as Ts\_air; all the return air temperature sensor points will have their point functions defined as Tr\_air; etc. The point function is among the most important pieces of configuration information required for the audit process.

In the existing BEMS point database and point definition table, a point function is typically described in the point description field (a free-formatted text field in the point database). Unfortunately, the way the point function is described varies from customer to customer, from branch to branch, and from person to person. This is not true for prepackaged standardized control. It is therefore important to distinguish between the two cases.

As a result, it is very hard to decipher the point function automatically from the text description field without any human intervention. To set up the PAT configuration



database, we have to manually enter the point function for all the points needed for the audit. This is a time-consuming and costly process.

If we had the point function information available in the system database, we could have imported this information electronically to the PAT configuration database the same way we import the point name and point type.

#### *Point Location:*

A point location identifies which specific equipment or system or zone the point is connected to. For example, to audit a zone, we need to know specifically the actual zone temperature, heating setpoint, heating valve supply air temperature etc. belonging to this zone.

Presently, the point location information is not available in BEMS databases. The information has to be extracted from the graphical user interface or from the programming code of the control logic, and then entered manually in the PAT configuration database. Again, this is a very time consuming and costly process. If prepackaged control blocks are used, a good portion of location information could be automatically extracted by inspection of the control blocks.

In certain BEMS, the situation is slightly better as the point location is often encoded in the point name and can therefore be derived semi-automatically.

#### *System and Equipment Configuration:*

To identify operating faults in the HVAC systems and equipment, it is necessary for PAT to know how the whole system is configured. For example, in order to find out what causes the “too hot” condition in a conditioned zone, PAT needs to know which VAV box supplies conditioned air to the zone; which air handling unit supplies conditioned air to the VAV boxes; which cooling plant supplies the chilled water to the cooling coil in the air handling unit; which chiller produces the chilled water, etc. This information makes possible the use of more general logic expressions in rules for detection and diagnosis. Such rules are for example:

“For every zone supplied by the same air handling unit, the zone temperature is too hot.”, or “There exist other zones having the same problem”.

In the PAT prototype, a unique identifier is assigned to every zone, equipment, and system. These unique IDs are used to specify the relationships between points and zones, points and equipment, points and system, equipment and zones, equipment and systems, and zones and systems. This relationship is described in the entity relationship model of the configuration database.

Again in some cases, part of this information is contained in the point naming scheme. Additionally, databases of planning tools cover a large portion of the configuration information.

#### *Technical Address (not used for PAT but also a possible source of information):*

This address is used as an identifier in the programming code of the control software. It can relieve information about the data point, but again there is no automatic matching possible.

#### Recommendations

An attempt was made during the PAT prototype development to create a Point Parser program to semi-automatically decipher the point function and point location from the point name and point description fields in the point database of the BEMS.

For some BEMS, the point parser used the information encoded in the point names. In well-structured buildings, both the location and system configuration could be assigned to a point with little manual input. The points' function however was encoded at too general a level. For instance, the character Y in a certain position would indicate a valve position whereas PAT needs to exactly know that the valve is a heating valve.

For other BEMS, the point parser evaluates point names and the description fields as well. It seems to work with systems with a well-structured point database using a strict point naming convention scheme. However, the outcome was not quite 100% accurate. We still had to spend a significant amount of time validating the results and manually entering the missing information. It must be emphasized that all of the point information PAT needs is well known during HVAC system planning and engineering. For well-structured and documented systems, the information is still available, but cannot be accessed automatically. For poorly structured and documented systems, much of the information might even be lost. The recommendation is therefore that PAT has to be integrated with the tool environment meaning that the same configuration database as the engineering tools is used and to ensure the database is complete. The configuration database should be filled during the engineering and commissioning process when the information is present.

#### Expert system shell

The expert system shell is crucial for the user friendliness of the tool for the developer and the user.

The points mentioned here are specific to the shell which was used for PAT. There are, however, important issues to every shell and therefore worthwhile to check. The used shell had the following capabilities and restrictions:

#### *Documentation of rule trees*

A serious drawback of the used shell was that a change in the rules in the program code was not automatically updated in the documentation of the rules. As the rules could not be entered graphically and thus no graphical representation was generated automatically by the shell, any change in the rules—which was done in the program code—was not automatically documented. This had to be done manually with another software program.

#### *Stability of development environment*

The debugging facilities were limited, because under the used platforms, the debugger was not reliable enough and often caused situations where one had to restart the software. The debugger had also some other unexpected features. One example was that code lines, that were changed to comment lines for debugging purposes, could not always straightforward be changed back to code lines.

#### *Object-oriented software:*

Care must be taken to know exactly the capabilities and limitation of the software. Points to look at are:

- Inheritance, message handling, encapsulation or information hiding
- Predefined classes
- Permanent and transient instances
- Pointers

### *Search methods and rule execution*

The way how rules are evaluated by the shell is important. Questions are:

- What is the order of rule execution ?
- What happens if a condition of a rule fails in the case of forward and in the case of backward chaining?
- When are procedural parts of the software such as methods related to an object attribute executed ? What control mechanisms exist for the execution of these procedural parts ?

### *Interfaces*

The shell provides ODBC access to relational databases. To set up an interface, a specific object had to be configured. The ODBC.INI file had to be changed, too. Unfortunately, the documentation is extremely poor.

There is one technical restriction: The number of data sources connected to the knowledge database at the same time is restricted to 2. After disconnecting a data source, the next ODBC connection can be established.

### *Conversion of knowledge base to text files*

The knowledge base is stored in some proprietary format that can be converted into ASCII format. The text file can then be changed using a text editor. If the syntax is still correct, the text file can be re-converted to a knowledge database.

### Recommendations

It is very useful to check carefully the different expert system shells in an evaluation phase [Canmet 1999]. The user friendliness is the most important issue which was addressed direct or indirectly in the previous points: documentation of rule trees, stability of development environment, interfaces.

Other main points in an evaluation must address the following issues:

- Knowledge representation (programming philosophy, rules, logic possibilities, representation of time, weighting factors)
- Search methods (forward, backward chaining, time-triggered rules)
- Developer interface (programming language, trees representation, debugging facilities)
- Support
- Development platforms supported (hardware, operating system, compiler)
- Integration (operating system, database, other programming languages)
- Price (development license, runtime license)

It is not worth it to save money by purchasing an inexpensive expert system shell by sacrificing certain user-friendly features.

### System boundary for the rules in the knowledge base

Underperformance detection and diagnosis of a building can be broken down into four main areas:

1. Whole building.
2. Building zones.
3. Central plants and equipment.
4. Control system (parameter setting and operation).

Underperformance could arise from problems in any or all of the four areas above. Hence, a diagnostic process will be required to examine each area, to cross-reference the diagnoses between these areas, and to confirm or deny the causes. To illustrate this, consider an example of a zone heating situation. The following symptoms have been recorded:

1. Zone is too cold.
2. Zone heating has been on during the last hour.
3. Zone supply air temp has been low during the last hour.
4. Other zones on this duct have same problem.
5. Central plant has been achieving supply set point temp during the last hour.
6. Building is using too much energy.

The conclusion here could be that there is a failure of heating air in the ducting system to get to the zone.

Symptoms 1-5 allow the diagnosis to determine where the problem is by cross-referencing between the different areas. Symptom 6 is different, as this could be thought of as merely confirming the existence of the initial problem.

In reality, the diagnosis is more complicated than might be implied from the above. Identifying the symptoms would involve looking at the variation of all these temperatures and energy losses over a daily cycle. Identifying symptom 6 would involve examining trend data or comparing energy consumption (i.e., electrical metering) to expected consumption for the given conditions (i.e., time of year, weather, occupation pattern, etc.). It also requires the setup of information in the configuration database to indicate various temperature setpoints and delay intervals.

Hence, as more detailed information on the building is added to the database, a more precise diagnosis can be made. The number and type of sensors can also help in refining the diagnosis; in this case, flow meters could help determine if there was a fan problem or a ducting leak or blockage. In the case of several sensors in a system, evaluation of their readings could show or eliminate the presence of sensor errors.

The general approach used is therefore to analyze the data to detect discrepancies from normal expected behavior, and to carry out this process utilizing the configuration database holding information describing the structure, operational parameters, and equipment in the building.

### Recommendations

It is recommended to break down the detection and diagnosis into local units for individual equipment.

If dedicated software for each equipment and zone is used, the local fault detection and diagnosis should be integrated at this level. Some kind of hierarchical scheme is then needed to proceed from this bottom-up approach to the top if this is wanted and/or needed. Small systems can even be implemented without using an expert system shell. They might be programmed for instance directly in C++.

On the other hand, underperformance detection on the whole building level can be done from the top.

### Data pre- and postprocessing

Databases containing measurements are becoming products. If PAT could have been seamlessly integrated with these products, time used for system setup and audit could be reduced as well. Additionally, there would be no more special PAT data loading modules to be maintained. It is absolutely essential to preprocess the incoming data.

This involves the quality attributes of each measurement and some expert rules about the time series like detection of abrupt changes, of outliers, etc...

No specialized report generator should be used. Instead, reporting could be integrated with future visualization tools.

### **PC environment and connection to BEMS**

The user friendliness depends also on how easy it is to set up the tool on the PC and on how to hook up the PC to the BEMS. The experience was that the involvement of different software packages under the existing operating systems required very strict handling especially of dll files in the system folder. For instance, if other applications run also on the same PC, special care must be given to ensure that no dll files are replaced unknowingly.

In the case of PAT, the following software had to be implemented correctly:

- Data communication from BEMS via modem
- Database for trending and advanced data processing
- PAT databases and report generator
- Visual Basic for preprocessing
- Expert system shell for the actual audit

### ***Recommendations***

The fewer software packages are needed for the tool, the better the chances that the proper setup and migration from one platform to another will be successful.

## **CONCLUSIONS**

If a rule-based approach for fault detection and diagnosis is chosen, the first decision that has to be taken is whether an expert system shell should be used or if the rules can be implemented in a standard program language. The number of rules and the complexity of the system are important factors influencing the decision. Main advantages of an expert system shell over a simple rule-based system are:

- rule-handling, i.e., editing, adding, and presentation of rules
- choice of search methods, i.e., the way the rules can be executed
- data handling of input and resulting data
- error handling capabilities during rule editing and execution
- user interface

If the system has a certain complexity and if an expert system shell is used, two main conditions must be fulfilled such that automated fault detection and diagnosis methods in whole buildings are successful. They are:

- a database with all the configuration information about the building, equipment and control
- an expert system shell that is user-friendly for the development, setup and support phase.

If these two main conditions are not fulfilled, the chances for both realization and acceptance of a general approach about the whole building will be slim. Both conditions were not fully fulfilled in our case. Due to these difficulties, PAT is not the success it could be. The prototype version will not be further developed to a full product. Setting up at several new sites was too costly. The lessons learned will be used to avoid similar difficulties with a new version. The core of PAT, the knowledge database, which was acquired during the development of PAT, however, will be of

high value and can easily be reused. In this case, local diagnosis realized in common programming languages might be more appropriate.

The main conclusions drawn from the design of this knowledge database are:

- write the rules in a generic way and use configuration and application-specific information only while executing the rules
- use forward and backward chaining for better structuring between detection, localization, and identification
- use shell-specific capabilities for structuring the rules and the sequence in which they are processed
- define rule classes adapted to the control applications
- use a shell that allows graphical editing of the fault trees

Furthermore, it is advisable to keep the rule database as modular as possible and break down the diagnosis to specific applications.

## ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to thank the Swiss Federal Government Institution BFE (Bundesamt für Energie) for their support of this project. Also, the work of Pornsak Songkakul and of the reviewers was appreciated much.

## REFERENCES

- [Harmon/King 19987]: P.Harmon, D.King: Expertensysteme in der Praxis, 2.Auflage, Oldenburg 1987
- [Ullmann 1988]: J. Ullmann: Principles of Database and knowledge-base systems, Vol 1 & 2, Computer Science Press 1988
- [Popovic/Bhaktar 1994]: D.Popovic,V.P.Bhaktar:: Methods and Tools for applied Artificial Intelligence, Marcel Dekker 1994
- [Kaldorf/Gruber 1997]: S.Kaldorf, P.Gruber: Performance Audit Tool PAT: An expert system based Tool for the Detection and Diagnosis of Building Underperformance, IEA Annex 34, Working paper 1997, Boulder USA
- [Gruber/Kaldorf 1998]: P.Gruber, S.Kaldorf: Performance Audit Tool PAT: ein Expertensystem zur Detektion und Diagnose von Fehlverhalten von HLK-Anlagen in realen Gebäuden, 10.Schweizerisches Status-Seminar 1998, Energieforschung im Hochbau, EMPA-KWH
- [Canmet 1999]: Evaluation of expert system shells for HVAC fault detection and diagnosis, CANMET Energy Diversification Research Laboratory, 99 [draft version]
- [Kaldorf/Gruber 2000,1]: S.Kaldorf, P.Gruber:Experience with an expert system for the detection and diagnosis of building underperformance, IEA Annex 34, Working paper 2000, Liège, Belgium
- [Gruber/Kaldorf 2000,2]: P.Gruber, S.Kaldorf: Structure of a knowledge base used in an expert system for the detection and diagnosis of building underperformance IEA Annex 34, Working paper 2000, Liège, Belgium
- [IEA 2000]: A.Dexter, J.Pakanen: IEA Annex 34, Final report, Draft Version November 2000