

# Entwicklung eines Diagnosesystems für Schraubenkompressoren

T. Gellermann, St. Günther, Oberhausen

## **Zusammenfassung**

Für die Planung von zustandsabhängigen Instandhaltungsmaßnahmen müssen die zur Verfügung stehenden Meß- und Betriebsdaten einer Maschinenanlage herangezogen werden. Die notwendige Auswertung der Daten stellt jedoch ohne geeignete Hilfsmittel eine schwer zu bewältigende Aufgabe dar.

Das hier beschriebene computergestützte Diagnoseprogramm, 'Maintenance Support System', dient zur Unterstützung der Betreiber von Schraubenkompressor-Anlagen. Das System ist speziell auf den Einsatz bei zweistufigen trockenlaufenden Schraubenkompressor-Anlagen (der Baureihe SKT, MAN GHH) zur Erzeugung von Druckluft zugeschnitten.

Mit den Betriebs- und Meßdaten der Kompressoranlage führt das System eine Zustandsdiagnose durch. Falls ein Fehler erkannt wird, stellt das System Hinweise zur Störungsbehebung bereit. Als weitere Programmbestandteile bietet das System die Speicherung der Betriebsdaten und der Diagnoseergebnisse und die grafische Trenddarstellung.

## **Abstract**

For the planning of on-condition maintenance activities, available measuring and operating data from a machine set must be used. Necessary data evaluation however is a task difficult to realize without the assistance of appropriate aids.

The described computer-aided diagnostic program 'Maintenance Support System' is intended to assist the operators of screw compressor machinery sets. The system has been specially tailored to suit the requirements of two-stage dry screw compressor units, SKT range, for compressed-air production.

Using the operating and measuring data of the compressor unit, the system effects condition diagnosis. If a fault or failure is detected, the system provides references and

directions for fault correction. Further parts of the program are the storage of operating data and of diagnostic results as well as graphical trending.

## 1. Einleitung

In Abhängigkeit von den Verfügbarkeitsanforderungen an eine Anlage, sind unterschiedliche Instandhaltungsstrategien erforderlich. Aus wirtschaftlichen Gründen und zur Erzielung einer hohen Anlagenverfügbarkeit wird heute vermehrt die zustandsorientierte Instandhaltung angestrebt. Hierbei werden Instandhaltungsmaßnahmen möglichst gezielt entsprechend des Maschinenzustands vorgenommen, dadurch sollen Fehler frühzeitig vor einem Ausfall der Gesamtanlage behoben werden. Gleichzeitig wird angestrebt, die Verschleißvorräte der funktionsfähigen Bauteile möglichst weit auszuschöpfen /1/.

Um zum richtigen Zeitpunkt die geeigneten Instandhaltungsmaßnahmen ergreifen zu können, muß eine Verschlechterung des Maschinenzustands frühzeitig erkannt und lokalisiert werden. Informationen zum aktuellen Maschinenzustand bzw. zu Zustandsveränderungen sind in den Betriebsdaten enthalten. Zumeist sind diese Informationen jedoch nur durch eine sorgfältige Auswertung der Daten zu erkennen. Voraussetzung für eine erfolgreiche Auswertung ist, daß spezielles Wissen zur Technik und zum Betriebsverhalten der Anlage bereitsteht. Darüber hinaus besitzt eine geeignete Form der Datenaufbereitung große Bedeutung.

Die bei einer regelmäßigen Anlagenüberwachung anfallenden großen Datenmengen lassen sich in Form von reinen Zahlenlisten nur schwer überblicken und auswerten. Die grafische Auftragung stellt eine erste Unterstützung bei der Auswertung dar. Diese Möglichkeit der Datenaufbereitung wird bei Monitoring-Systemen genutzt. Zur Erschließung der in den Daten enthaltenen Informationen müssen jedoch Fachleute die Daten auswerten und beurteilen.

Diagnosesysteme ermöglichen eine weitergehende Unterstützung bei der Datenauswertung. Sie halten spezielles Wissen für die Datenauswertung bereit. Ihre Stärke liegt darin, schwer überschaubare- bzw. nur durch die Verknüpfung vieler Daten erkennbare Zusammenhänge aufdecken zu können /2/.

Das hier beschriebene 'Maintenance Support System' nutzt die Möglichkeiten von Diagnosesystemen zur Auswertung der bei Schraubenkompressoranlagen vorhandenen Meßdaten. Das System bietet den Anlagenbetreibern in weiten Bereichen der Instandhaltung Unterstützung.

## **2. Ansatzpunkt für den Aufbau des Diagnosesystems**

Bereits die bei Schraubenkompressoranlagen standardmäßig vorhandenen Meßinstrumente ermöglichen aussagefähige Schlußfolgerungen bezüglich des Zustands einzelner Anlagenkomponenten. Sie sind für die angestrebte Planbarkeit von zustandsorientierten Instandhaltungsarbeiten von großer Bedeutung.

Die meisten Anlagenbetreiber führen sogenannte Schichtbücher, in denen regelmäßig die aktuellen Meßdaten protokolliert werden. Die in diesen Daten enthaltenen Informationen zum Anlagenzustand sind aber nicht direkt zugänglich, so daß durch routinemäßige Überprüfungen ein eventuell vorhandener Handlungsbedarf zur Vermeidung von Anlagenausfällen nicht erkannt wird. Die Auswertung der Daten ist zum einen zeitaufwendig, zum anderen ist spezifisches Wissen zur Anlagentechnik erforderlich. Aufgrund dieser Umstände werden die protokollierten Daten oftmals erst nach Eintritt eines Ausfalls zur Klärung der Ausfallursache herangezogen. Dagegen könnten bei regelmäßiger Auswertung der Daten rechtzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um ein Teil der Ausfälle zu verhindern.

Das für die Interpretation der Betriebsdaten notwendige Spezialwissen besitzt der Anlagenhersteller. Dieses soll den Betreibern mit Hilfe des 'Maintenance Support Systems' zugänglich gemacht werden, um somit einen Instrument zur Verfügung zu stellen, das die alltägliche Auswertung der Betriebsdaten zuverlässig unterstützt.

Über die Erstellung der Maschinendiagnose hinaus, soll das System Hinweise für die Störungsbehebung und Betriebsweise bereitstellen und die Pflege der Betriebsdaten unterstützen.

## **3. Realisierung des Diagnosesystems**

Das System ist auf der Grundlage eines modell- und wissensbasierten Expertensystems aufgebaut. Im Gegensatz zur konventionellen Programmierung, bei der das Diagnosewissen unmittelbar im Programmcode eingebettet werden müßte, ist bei wissensbasierten Systemen das anwendungsbezogene Wissen von den allgemeinen Programmbestandteilen getrennt. Problemspezifisches Fachwissen ist in Form von Fakten und Regeln in der Wissensbasis abgelegt. In der Modellbasis sind die mathematisch beschreibbaren Zusammenhänge formelmäßig abgebildet. Bei der Erstellung der Wissensbasis wird der Diagnoseverlauf nicht vorgegeben. Dies übernimmt die Schlußfolgerungskomponente (Inferenzmaschine), die Problemlösungsalgorithmen für

die Abarbeitung der Regeln bereitstellt. Die Schlußfolgerungskomponente bildet den Zugang zu dem in der Wissensbasis abgelegten Diagnosewissen.

Realisiert wurde das System mit einer Expertensystem-Entwicklungsumgebung ('Aion® Development System' der Firma Trinzic). Durch die Verwendung einer Entwicklungsumgebung gegenüber einer gänzlich eigenständigen Programmierung reduziert sich der Entwicklungsaufwand wesentlich. Anwendungsunabhängige Elemente, wie z.B. die Schlußfolgerungskomponente, werden vom System bereitgestellt. Für die Implementierung des Problemlösungswissens in die Wissensbasis stehen sowohl regel- als auch objektorientierte Repräsentationsformen zur Verfügung. Desweiteren lassen sich extern ablaufende Programme, z.B. zur Schwingungsanalyse, einbinden. Das Programm selbst läuft auf Personalcomputer unter MS-Windows™, um für die Benutzerschnittstelle eine weitgehende grafische Unterstützung zu gewährleisten und gleichzeitig verbreitete Standards nutzen zu können.

Bei der Entwicklung des Systems stand das Ziel im Vordergrund, aus den vorliegenden Meßdaten einen möglichst großen Nutzen für den Anlagenbetreiber zu ziehen. Aus diesem Grund wird nicht von dem Ansatz ausgegangen, durch Sensorik weitere Meßwerte zu akquirieren, sondern die bereits verfügbaren Daten werden für die Diagnose herangezogen und über die Tastatur Off-Line in das System eingegeben. Dadurch entfällt zudem die kostenintensive Installation einer On-Line-Meßdatenerfassung.

Das System kann mit Hilfe eines tragbaren Personal Computers vor Ort an der Anlage eingesetzt werden, dadurch können direkt die Meßwerte vom Instrumentenpanel eingegeben und die eventuell für die interaktive Diagnose erforderlichen Prüfungen durchgeführt werden.



Abb. 1:  
Module des Systems /3/  
Modules of the system /3/

Das System umfaßt vier wesentliche Funktionen.

- Zustandsdiagnose:

Aufgrund der verfügbaren Betriebsdaten führt das System eine Zustandsdiagnose durch. Während des Diagnosevorgangs werden eventuell in Abhängigkeit von den für möglich befundenen Diagnosen zusätzliche Angaben angefragt, um die Diagnosen zu verfeinern.

- Hinweise zur Störungsbehebung:

Bei Lokalisierung von kleineren Problemen, werden Hinweise vom System bereitgestellt, mit denen der Betreiber die Probleme selbst abstellen kann. Bei komplexeren Problemen können erste Hinweise zur Eingrenzung und zur Lösung des Problems abgerufen werden. Zusätzlich nennt das System den Ansprechpartner bei MAN GHH. Ein telefonisches Beratungsgespräch kann direkt an die Diagnose des Systems anknüpfen. Aufgrund der Informationen wird die einleitende Problembeschreibung wesentlich erleichtert.

- Datenspeicherung:

Die eingegebenen Betriebsdaten und die vom System berechneten Diagnoseparameter lassen sich abspeichern. So kann auf frühere Daten jederzeit zugegriffen werden und die Pflege eines herkömmlichen Schichtbuchs kann entfallen. Die Historiedaten werden außerdem für die grafische Trenddarstellung genutzt.

- Grafische Trenddarstellung:

Für die grafische Trenddarstellung stehen verschiedene Parameter zur Verfügung, die über die Zeit dargestellt werden können. Aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Werte lassen sich erforderliche Instandhaltungsmaßnahmen abschätzen und planen.

#### **4. Diagnoseablauf**

Voraussetzung für den Einsatz des Systems ist die Konfiguration auf die speziellen Betriebsbedingungen und den Anlagentyp. Die Konfiguration, die technische und thermodynamische Daten erfordert, führt MAN GHH durch. Jedes Programm kann auf mehrere Maschinen unterschiedlicher Größe und Betriebsbedingungen eingerichtet werden, so daß der Betreiber das System für alle seine SKT-Anlagen einsetzen kann.

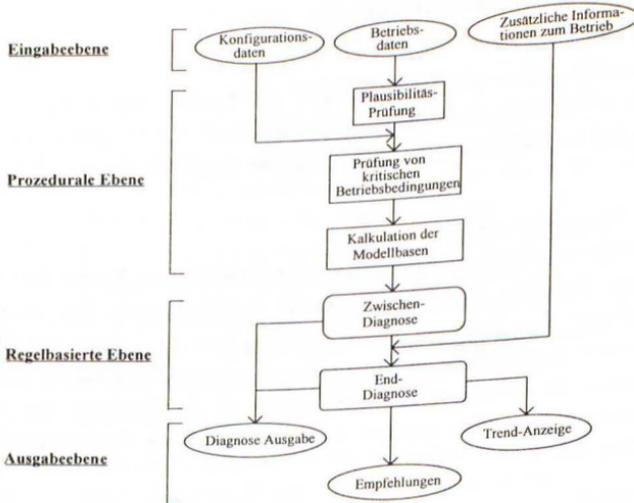


Abb. 2: Struktur des Systems /3/

/ Structure of the system /3/

Nach dem Programmstart aus Windows<sup>TM</sup>, erscheint das Haupt-Programmfenster (Abbildung 3). Die für die Diagnose notwendigen Betriebsdaten trägt der Benutzer in die Eingabemaske (Abbildung 4) ein. Zusätzlich können *optional* die Ergebnisse von weiteren Prüfungen (visueller oder meßtechnischer Art) eingegeben werden.

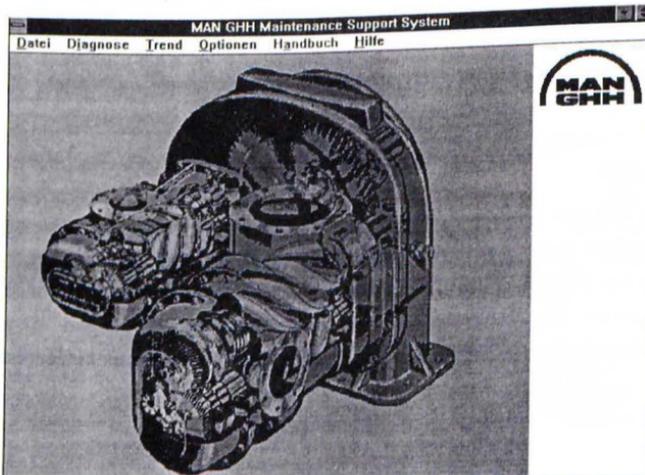


Abb. 3: Hauptprogramm-Fenster

/

window of the main program

Die Daten werden einer Plausibilitätskontrolle unterzogen. Nach der Überprüfung auf kritische Betriebsbedingungen, erfolgt gegebenenfalls ein Warnhinweis, daß die eingegebenen Betriebsdaten auf eine unzulässige Belastung der Anlage hindeuten. Anschließend findet der eigentliche Diagnoseprozeß statt. Aus den Eingabedaten werden entsprechend der Modellbasen verschiedene Parameter berechnet, die dann im Bedingungssteil der in der Wissensbasis enthaltenen Wenn-Dann-Regeln weiterverarbeitet werden.

Abb. 4: Eingabemaske für die Betriebsdaten / Input mask for operational data

Die Diagnose ist unterteilt in die Zwischen- und Enddiagnose. Bis zur Zwischendiagnose erfolgen die Berechnungen und Schlußfolgerungen selbständig aus den Eingabedaten. Bei der Diagnose von Störungen, werden diese entsprechend ihrer Wahrscheinlichkeit entweder als etablierte (hohe Wahrscheinlichkeit) oder als mögliche Diagnosen ausgegeben. Um die möglichen Diagnosen gegebenenfalls zu verwerfen oder in etablierte Diagnosen zu überführen, sind noch weitere Informationen notwendig. Zu diesem Zweck wird der Programmbenutzer gezielt aufgefordert zusätzliche Prüfungen durchzuführen. Für die Enddiagnose werden die Ergebnisse dieser Prüfungen verarbeitet und damit die Diagnosen verfeinert.



Abb. 5: Ausgabefenster der Zwischen-Diagnose / Preliminary Diagnosis output table

Die in Abbildung 4 beispielhaft enthaltenen Betriebsdaten führen zu den beiden unabhängigen Diagnosen 'Veränderter Diagnoseparameter HD-Stufe' und 'Taupunktunterschreitung im Zwischenkühler'. Der Diagnoseparameter spiegelt den Zustand der Kompressorstufe wider. Er resultiert aus einer thermodynamischen Betrachtung des Verdichtungs Vorgangs. In diesem Fall hat der Diagnosewert einen vorgegebenen Grenzwert unterschritten.

Die Wahrscheinlichkeit für das Vorliegen der Störung 'Taupunktunterschreitung im Zwischenkühler' wurde aufgrund der vorhandenen Daten bei der Zwischendiagnose als 'möglich' eingestuft. Für die Enddiagnose fordert das System den Anwender auf, den Kondensatableiter auf Wasseranfall zu kontrollieren. Das System stellt Erläuterungen zur Problematik der Taupunktunterschreitung und mögliche Abhilfemaßnahmen bereit.



Abb. 6: Handlungsempfehlungen des Systems/ Recommendation for activities given by the system

Mit der Trendanzeige kann die zeitliche Veränderung verschiedener Parameter grafisch dargestellt werden. Dadurch können allmähliche Zustandsverschlechterungen erkannt werden und die notwendigen Instandsetzungsarbeiten geplant werden.

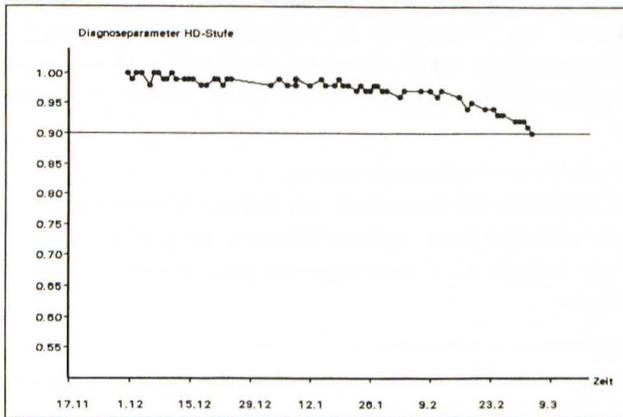


Abb. 7: Trend des Diagnose-Parameters / trending of the diagnosis parameter  
HD-Stufe / compressor HP-stage

## 5. Vorteile des 'Maintenance Support Systems'

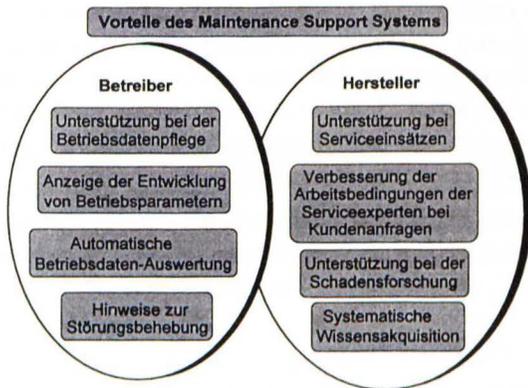


Abb. 8:  
Vorteile des / Advantages of the  
'Maintenance Support System'

#### Vorteile für den Betreiber:

- Unterstützung bei der Betriebsdatenpflege:

Durch die elektronische Speicherung und Verwaltung der eingegebenen Betriebsdaten bzw. der ermittelten Diagnoseparameter besteht ein schneller Zugriff auf frühere Zustandsdiagnosen. Die Daten können in tabellarischer Form auf dem Bildschirm dargestellt oder ausgedruckt werden. Sämtliche Daten sind in Dateien gespeichert, somit können einfach Kopien zur Sicherung oder zur Übermittlung an den Hersteller erstellt werden.

- Anzeige der Entwicklung von Betriebsparametern:

Die grafische Darstellung der Entwicklung von Betriebsparametern ermöglicht dem Betreiber einen eventuellen Handlungsbedarf frühzeitig zu erkennen. Damit bietet ihm das System ein Instrument zur vorhersagenden Instandhaltungsplanung und zur Schadensverhütung.

- Automatische Betriebsdatenauswertung

Die von vielen Betreibern bisher regelmäßig durchgeführte Ablesung und Protokollierung der Betriebsdaten (Schichtbuch) besitzt nur eingeschränkten Nutzen, da die für eine systematische Auswertung notwendige Zeit und das erforderliche Expertenwissen im allgemeinen beim Betreiber nicht verfügbar sind. Durch den Einsatz des Systems werden automatisch wichtige Informationen zum Maschinenzustand aus der Vielzahl der Betriebsdaten gewonnen und in geeigneter Form bereitgestellt.

- Hinweise zur Störungsbehebung

Der Betreiber erhält mit dem System Expertenwissen von dem Hersteller. Zum einen verbessern die enthaltenen Erläuterungen das allgemeine Verständnis des Betriebspersonals gegenüber der Anlage. Zum zweiten kann das Betriebspersonal mittels der Hinweise kleinere Probleme direkt beheben. Bei schwierigeren Problemen wird an das Servicepersonal des Herstellers verwiesen. Die Hinweise ermöglichen eine Zeitersparnis bei der Störungsbehebung.

Zusätzlich zu den oben genannten Vorteilen für den Betreiber werden durch den Einsatz des Systems geringere Anforderungen an den Erfahrungsschatz des Betriebspersonals gestellt.

#### Vorteile für den Hersteller:

- Unterstützung bei Serviceeinsätzen:

Das System schließt die zeitliche Lücke zwischen den Inspektionen des Herstellers. Damit bildet es einen interessanten Bestandteil von Serviceverträgen. Die in das System

vom Betreiber regelmäßig eingegebenen Betriebsdaten liefern wertvolle Zusatzinformationen für Diagnoseeinsätze durch den Hersteller.

- Verbesserung der Arbeitsbedingungen der Serviceexperten bei Kundenanfragen:

Mit Hilfe des Systems kann der Betreiber einfache Probleme selbst lösen, dadurch läßt sich die Inanspruchnahme von Serviceexperten durch Anfragen des Kunden verringern (Anrufervermeidung). Der Serviceexperte kann sich so auf schwerwiegende Probleme konzentrieren und produktiver arbeiten. Bei der Bearbeitung von Anfragen erleichtern die Informationen des Systems die einleitende Problembeschreibung, damit kann die Reaktionszeit des Herstellers verkürzt werden.

- Unterstützung bei der Schadensforschung:

Die vom System gespeicherten Betriebsdaten können für den Serviceexperten des Herstellers wichtige Informationen zur Ermittlung einer Schadensursache liefern. Zudem lassen sich die elektronisch gespeicherten Daten leicht zwischen Betreiber und Hersteller austauschen und beim Hersteller weiter auswerten.

- Systematische Wissensakquisition:

Das Diagnosemodul des Systems erfordert eine systematische Erfassung des beim Hersteller vorhandenen Expertenwissens, dadurch wird die Grundlage für eine Weitergabe des Wissens an andere Mitarbeiter und für eine Zusammenführung des nur bei einzelnen Experten vorhandenen Wissens (Synergieeffekt) geschaffen.

Mit dem 'Maintenance Support System' wird das Spektrum der Servicedienstleistungen des Herstellers sinnvoll ergänzt.

## **6. Schlußbemerkung**

Wissensbasierte Systeme werden für die Maschinendiagnose bereits vielfach eingesetzt. Insbesondere Systeme für spezielle Diagnosegebiete, wie z.B. Schwingungsanalyse oder Wälzlagerdiagnose, finden weite Verbreitung. Jedoch muß für diese Systeme häufig zusätzliche Meßtechnik installiert werden, um die erforderlichen Meßwerte zu erschließen. Gleichzeitig werden vorhandene Meßwerte für die Diagnose nicht herangezogen.

Bei dem hier beschriebenen 'Maintenance Support System' steht im Vordergrund, weitgehend die zur Verfügung stehenden Daten zu nutzen, um relevante Informationen für die Instandhaltung zu erhalten.

## **7. Literatur**

- /1/ A. Sturm, R. Förster: Maschinen und Anlagendiagnostik für die zustandsbezogene Instandhaltung, B. G. Teubner Stuttgart 1990.
- /2/ D. Bloemers, G. Dibelius: Online Maschinendiagnose mit Hilfe eines Expertensystems, VDI Berichte Nr. 868, Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.
- /3/ K. Schmitt, S. Günther: Maintenance support with knowledge based technology for screw compressors, Turbomachinery Maintenance Conference, Amsterdam Okt. 1993.