

# INDIA -Intelligente Diagnose in der industriellen Anwendung

*Roman Cunis, ServiceXpert GmbH Hamburg*

*Peter Struss - TU München, Institut für Informatik*

## 1 Überblick

Gegenstand des Projekts INDIA waren **modellbasierte Diagnosesysteme zur automatischen Diagnose und Überwachung technischer Systeme und Prozesse**. In diesem Bereich gab es bisher im wesentlichen nur einige Forschungsprototypen, die zeigten, daß bestimmte in der Forschung entwickelte Techniken „im Prinzip“ — aber oft unter Abstraktion von wesentlichen realen Zielen, und Bedingungen — funktionieren.

Die Ziele von INDIA waren

- der Transfer der Technologie in reale industrielle Anwendungen,
- die Fokussierung der Forschung auf die dabei auftretenden Probleme und
- die Entwicklung übertragbarer Verfahren.

Letztere sollten entstehen, indem verschiedene, sehr heterogene Anwendungen in drei sogenannten „Säulen“ bearbeitet werden und deren Anforderungen und Lösungsansätze im projektinternen Austausch abgeglichen werden.

Die drei Säulen bestanden jeweils aus

- einem Anwender für das konkrete Problem,
- einer Forschungsinstitution für die theoretischen Grundlagen und prinzipiellen Verfahren, und
- einem Systemhaus für den Brückenschlag zwischen Theorie und Praxis, sprich für die Umsetzung der Verfahren in industriell einsetzbare Systeme.

Die drei Säulen umfaßten jeweils die folgenden Anwendungen mit ihren Partnern:

- Flurförderzeuge:
  - STILL GmbH, Hamburg
  - ServiceXpert GmbH, Hamburg
  - LKI Labor für Künstliche Intelligenz, Universität Hamburg
- Anlagenbau:
  - THEN Maschinen- und Apparatebau, Schwäbisch Hall
  - R.O.S.E. Informatik GmbH, Heidenheim
  - Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB, Karlsruhe
- Mechatronische Kfz-Systeme:
  - Robert Bosch GmbH, Stuttgart
  - TU München, Model-Based Systems & Qualitative Reasoning Group

Die folgenden Probleme und Aufgaben standen bei der Projektarbeit im Vordergrund:

- Die **Reduktion der Kosten zur Entwicklung und Pflege** von Diagnosesystemen ist insbesondere dann unabdingbar, wenn technische Systeme in vielen verschiedenen Varianten produziert werden („**Variantenproblem**“). Dies tritt bei Serienprodukten (z.B. Kfz-Subsysteme) genauso auf wie bei komplexen Systemen, die als Unikate hergestellt werden (z.B. in der Anlagentechnik): In beiden Fällen gibt es viele ähnliche Komponenten, die hinsichtlich der Diagnose gleich oder vergleichbar behandelt werden sollen, aber immer wieder in unterschiedlichen Varianten und Kombinationen vorkommen.
- Die **Integration neuer Diagnosetechnologien in den Arbeitsablauf** ist neben der Entwicklung der eigentlichen Technologien ein wesentlicher Aspekt, da sich mit der Einführung computergestützter Diagnose herkömmliche

Diagnose- und Serviceabläufe deutlich ändern können. Hier ist frühzeitig ein Konzept für eine Integration zu vor- und nachgeschalteten Prozessen zu schaffen, damit bestehende Arbeitsabläufe so wenig wie möglich gestört werden.

- **Der Austausch zwischen Arbeitsprozessen** soll gefördert werden: Dies betrifft insbesondere die Wiederverwendung (Re-Use) von Wissen über das zu diagnostizierende technische System und Softwarekomponenten für deren Diagnose in verschiedenen Aspekten der Fehlersuche, wie z.B. Werkstattdiagnose, Fehler-Möglichkeiten- und Einfluß-Analysen (FMEA) und Testgenerierung.

Die computergestützte Diagnose stellt also Prüfsoftware, Fehlersuchanleitungen, FME-Analysen, Prozeßstatus-Anzeigen und Fehlermeldungen zu einem technischen System bereit, mit der auf einheitliche oder zumindest weitgehend ähnliche Weise Diagnose in verschiedenen Einsatzszenarien durchgeführt werden kann:

- bei der Bearbeitung von Kundenproblemen in Call-Centern,
- für die Ferndiagnose von einer Servicezentrale aus zu entfernt liegenden Einsatzorten,
- für die Kundenunterstützung via Internet,
- auf Servicekoffern, d.h. Notebooks mit integrierter Ansteuerung zum Gerät, für den Einsatz vor Ort,
- für die Bedienerunterstützung vor Ort.

Grundlage aller im Projekt untersuchter Lösungsansätze ist die sogenannte modellbasierte Diagnose: Ausgang des Verfahrens ist eine Modellbibliothek und eine Strukturbeschreibung des Systems. Die Modellbibliothek enthält Struktur- und/oder Verhaltensbeschreibungen der Komponenten eines Systems. Aus diesen beiden wird automatisch ein Struktur- und Verhaltensmodell des konkreten Systems generiert, das dann (weitgehend) automatisch analysiert werden kann, um die Daten für die Elemente der computergestützten Diagnose und Fehleranalyse zu generieren (vgl. Abbildung 1).

## 2 Anwendung „Mechatronische Kfz-Systeme“

BOSCH ist ein führender Entwickler und Zulieferer von mechatronischen Fahrzeugsystemen für den Automobilbau. Beispiele für mechatronische Subsysteme sind Motorsteuerungen für Diesel- und Benzinmotoren, Brems- und ABS-Systeme oder Klimaanlage. Dieses Arbeitsgebiet ist gekennzeichnet durch eine hohe Variantenvielfalt: Die Subsysteme variieren von Version zu Version und zusätzlich je nach Einbauumgebung in Abhängigkeit vom Fahrzeughersteller, Fahrzeugtypen, Jahrgängen usw. Während des Lebenszyklus eines Subsystems fallen eine Reihe ähnlicher Aufgaben an, zu deren Bearbeitung gemeinsames Wissen benötigt wird: Fehlermöglichkeits- und Einflußanalyse (FMEA), Erzeugung von Diagnoseanleitungen, Werkstattdiagnose und *On-board*-Diagnose sind Beispiele hierfür. Alle diese Aufgaben erfordern eine Verhaltensanalyse des betrachteten Subsystems. Für die FMEA der Motorsteuerung eines Turboladers ist beispielsweise zu klären, wie sich ein verklemmtes Ventil in der Turboregelung auswirkt. Für das Schreiben eines Prüfplans für die Werkstattdiagnose muß geklärt werden, welche mögliche Ursachen für beobachtete schwarze Abgase in Frage kommen. Wegen des oftmals sicherheitskritischen Charakters der Anwendungen (z.B. *On-board*-Diagnose des Bremssystems) ist oft zusätzlich Vollständigkeit der Verhaltensanalyse gefordert. In INDIA wurde hier folgender Ansatz verfolgt:

- Gemeinsame Modelle als Grundlage zur Bearbeitung verwandter Aufgaben
- Wiederverwendung von Software, z.B. zur Diagnose und zur Verhaltensanalyse

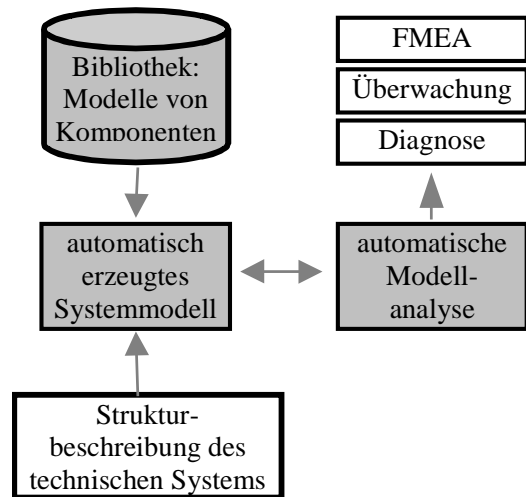
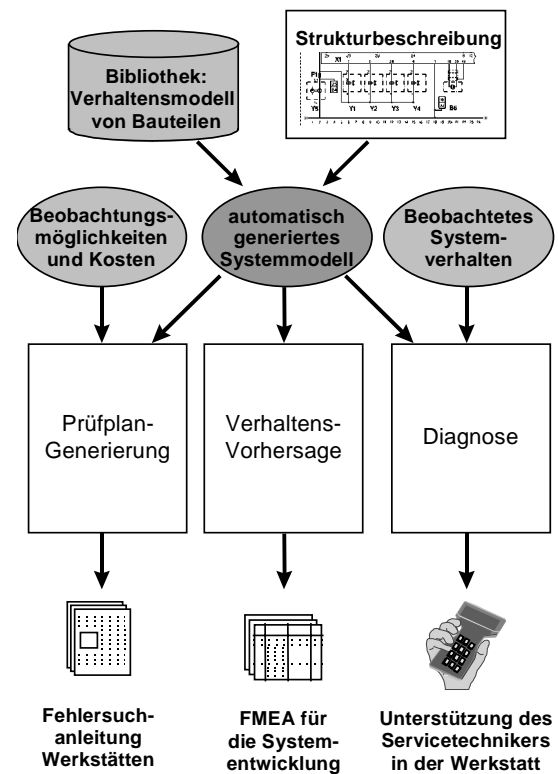


Abbildung 1: Prinzip der modellbasierten Diagnose

Im Rahmen von INDIA wurde von den Partnern BOSCH und der TU München die Realisierung dreier Zielsysteme bearbeitet (vgl. Abbildung 2):

- Ein System zur modellbasierten Verhaltensanalyse zur **Unterstützung der FMEA-Erstellung**. Basis der Verhaltensanalyse ist ein kompositionales Systemmodell. Dieses ist abgeleitet aus einer Beschreibung der Systemstruktur und einer wiederverwendbaren Modellbibliothek, die das Verhalten und mögliche Fehlverhalten von Komponenten (Bauteilen) beschreibt.
- Ein modellbasiertes **Autorensystem** zur Entwicklung von Fehlersuchanleitungen für Werkstätten. Basis ist wie für die FMEA ein kompositionales Systemmodell und (dieselbe) Software zur Verhaltensanalyse. Darüber hinaus wird dasselbe Modell zusammen mit zusätzlichem Kostenwissen für die Generierung von Tests (Meßvorschlägen, Prüfanweisungen) genutzt.
- Ein interaktives modellbasiertes **Diagnosesystem als Kern** für die geführte Diagnose und Reparatur in der Werkstatt. Zusätzlich zu den für FMEA und Autorensystem benötigten Methoden zur Verhaltensanalyse und Testgenerierung kommt hier ein Diagnosealgorithmus zum Einsatz, der dem Dialogcharakter der geführten Werkstattdiagnose Rechnung trägt.
- Ein **On-line-Diagnosesystem**, das Diagnose basierend auf zeitlichen Sequenzen von Beobachtungen durchführt, die im Steuergerät verfügbar sind. Diese Beobachtungen werden durch eine Komponente für qualitative Werteabstraktion aus den Steuergerätesignalen erzeugt und einem modellbasierten Runtime-System übergeben. Dieses System ist als Prototyp für die On-board-Diagnose und die Diagnose auf einem Werkstatt-Tester zu sehen.



**Abbildung 2: Modellbasierte Verfahren in der Kfz-Technik**

Folgende Punkte wurden realisiert und sind am Rechner demonstrierbar:

- Modellbibliotheken für elektrische, hydraulische, pneumatische Komponenten und Motor,
- Diagnose aufgrund von Kundenbeanstandungen (Werkstattdiagnose),
- Verhaltensvorhersage (für FMEA),
- Wissensrepräsentation für Fehlersuchanleitungen,
- Modellbasierter Test-Generator
- Modellbasiertes On-line-Diagnosesystem, das auf echten Steuergerätesignalen arbeitet.

Softwarebasis für die Realisierung war ein kommerzielles Tool (RAZ'R der Firma OCC'M Software), das Softwarekomponenten zur Erstellung kompositionaler Modelle, zur Verhaltensanalyse und zur Diagnose liefert.

Künftige Aufgaben umfassen

- die Entwicklung abstrakter Subsystem-Modelle
- die Integration der Methoden zur Verhaltensanalyse in ein praxistaugliches FMEA-Werkzeug
- die Umsetzung automatisch generierter Prüfpläne in textuelle Fehlersuchanleitungen,
- weiterer Aufbau der Modellbibliotheken für die Anwendungsfelder,
- Konzeption von Schnittstellen zum Austausch von Modellen.

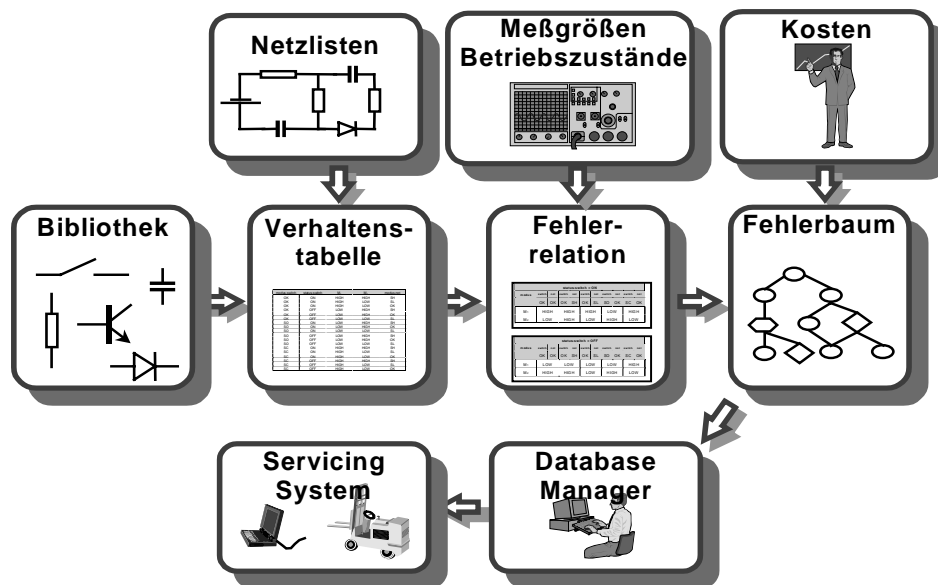


Abbildung 3: Verfahrenskonzept in der Anwendung „Flurförderzeuge“

### 3 Anwendung „Flurförderzeuge“

Die Firma STILL GmbH in Hamburg stellt Flurförderzeuge, allen voran Gabelstapler her. Aus Integrations-sicht ist hier der Einsatz der modellbasierten Diagnosestrategie besonders interessant. Denn bei Projektbeginn hatte STILL bereits ein computergestütztes Diagnosesystem im Einsatz, das auf der Basis von Fehlerbäumen einen Servicetechniker durch die Diagnose führt und ggf. Reparaturhinweise und –anleitungen gibt. Diese Fehlerbäume werden manuell mit einer grafischen Erfassungsumgebung erstellt. Diese manuelle Generierung ist allerdings sehr zeitaufwendig: ein Servicemitarbeiter bei STILL benötigt für die Erstellung eines Fehlerbaums für **einen** Staplertyp ca. 2–3 Personenmonate. Das System war zu der Zeit bereits für drei Staplertypen im Einsatz, weitere Typen wurden und werden nach und nach ergänzt.

Mit der modellbasierten Diagnose sollten in dieser Anwendung die Fehlerbäume für das Diagnosesystem automatisch generiert und hinsichtlich flexibler Kriterien (z.B. Meßkosten) optimiert werden. Ein CAD-ähnliches Werkzeug sollte für die Erstellung von Komponenten- und Strukturmodellen bereitgestellt werden. Aus diesen sollten Fehlerauswirkungen automatisch ermittelt werden. Die daraus generierten Fehlerbäume sollten in das vorhandene Diagnosesystem übernommen werden.

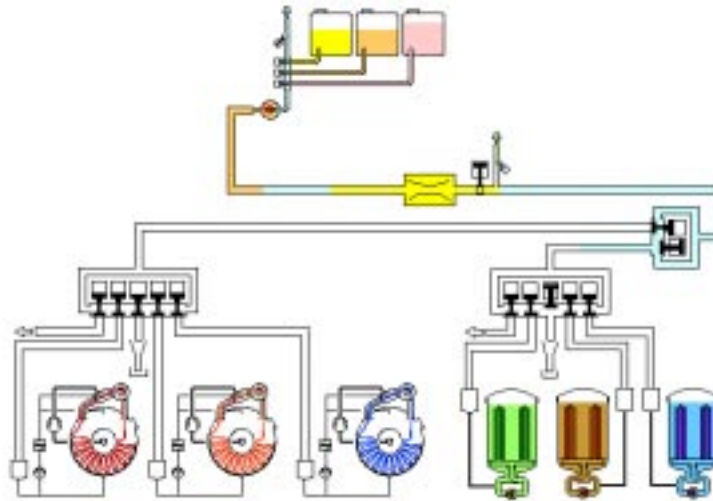
Der erwartete Nutzen für STILL bestand darin,

- daß die Generierungskosten erheblich reduziert werden können,
- daß die erzeugten Fehlerbäume weniger Fehler enthalten, da sie ja aus einer vollständigen Modellbeschreibung erzeugt wurden, und
- daß die Diagnose mit einem kostenoptimierten Fehlerbaum im Einsatz zu besseren und vor allem schnelleren Ergebnissen führt.

Besonders wichtig dabei war, daß das vorhandene Diagnosesystem und der zugehörige Arbeitsablauf unverändert bleiben.

Das Gesamtkonzept im Rahmen des INDIA-Projekts umfaßt die folgenden Schritte (vgl. Abbildung 3):

1. Aus einer Bibliothek von Komponenten, die hinsichtlich ihres qualitativen Ein-/Ausgangsverhaltens modelliert sind und einer Netzliste, die diese Komponenten instantiiert und in Relation setzt, entsteht ein Systemmodell (beispielhaft bisher an elektronischen Schaltungen durchgeführt).
2. Aus diesem Systemmodell wird durch vollständige Betrachtung aller möglichen Ein- und Ausgangsbelegungen eine Verhaltenstabelle erzeugt.



**Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Chemikaliendistributors**

3. Aus dieser Verhaltenstabelle werden unter Hinzunahme von Informationen über konkrete Meßgrößen und deren Grenzwerte sowie über Betriebszustände eine Fehlerrelation erzeugt, die alle möglichen Fehlerfälle widerspiegelt.
4. Unter Hinzunahme von Kosten oder anderen Optimierungsinformationen werden aus den Fehlerrelationen Fehlerbäume erzeugt.
5. Diese Fehlerbäume werden in das Erfassungswerkzeug des Diagnosesystems importiert und können dort manuell erweitert und mit bereits (auch manuell) erzeugten Fehlerbäumen kombiniert werden.
6. Die so entstandenen Fehlerbäume kommen dann im Feld auf einem Servicekoffer zum Einsatz.

Im Projekt konnten die folgenden Ziele realisiert werden:

- Es existiert ein Prototyp für die gesamte Strecke.
- Es wurde ein grafischer Modelleditor mit integrierter Analysekomponente (MAD) entwickelt.
- Die generierten Fehlerstrukturen können in das existierende Diagnosesystem (DiaMon) importiert werden.
- Für bessere Integration des Gesamtsystems in das organisatorische Umfeld wurde die Integration von Standardsystemen wie Kundendienst-Informations- und Steuerungssystemen (KISS) und elektronischem Daten- und Dokumentenmanagement (EDM) untersucht und Konzepte dazu entwickelt.

#### **4 Anwendung „Anlagenbau“**

Die Firma THEN Maschinen- und Anlagenbau in Schwäbisch Hall ist Systemlieferant für Färbereianlagen. Für das Projekt wurden sowohl Färbemaschinen als auch Anlagen zur Versorgung der Färbemaschinen mit Chemikalien (Chemikaliendistributoren) betrachtet (vgl. Abbildung 4).

Dabei handelt es sich jeweils um komplexe technische Anlagen mit elektrischen, hydraulischen und pneumatischen Baugruppen. Gefordert waren in beiden Fällen PC-basierte Systeme zur Überwachung und zur Unterstützung des Anlagenpersonals bei der Diagnose und Beseitigung von Störungen. Der Zugriff auf die Projektierungsdaten und die Daten des aktuellen Auftrags sollte möglich sein. (Vgl. Abbildung 5).

Durch den Einsatz solcher Systeme erwartete THEN folgende Vorteile:

- Vermeidung von Produktionsausfällen durch rechtzeitiges Erkennen von Störungen
- Reduzierung der Inbetriebnahmezeiten und Wartungsaufwendungen durch automatisierte vollständige Überwachung der Gesamtanlage

Gleichberechtigt neben der Realisierung solcher Diagnosesysteme stand die Suche nach Methoden, mit denen sich der Aufwand zur Entwicklung von Diagnosesystemen reduzieren läßt. Dies ist im Anlagenbau von essentieller Bedeutung, da die meisten Anlagen aufgrund unterschiedlicher Kundenanforderungen Unikate sind, die ein spezielles Diagnosesystem benötigen. THEN war dabei insbesondere daran interessiert, das für die Diagnose gesammelte Anlagenwissen schon in der Anlagenentwurfphase für FMEA-Untersuchungen zu verwenden.

In Hinsicht auf die genannten Ziele wurden im Projekt die folgenden Ergebnisse erarbeitet:

- Für beide Anlagenklassen wurden prototypische Diagnosesysteme entwickelt und *offline* anhand von Beispieldaten getestet. Die dazu benötigten Betriebsdaten wurden soweit möglich direkt an der Anlage erfaßt, andernfalls durch Simulation gewonnen.
- Für die typischen Komponenten von Rohrleitungssystemen (Ventile, Rohre, Pumpen usw.) wurde eine Bibliothek von Verhaltensmodellen entwickelt. Da solche Systeme im Anlagenbau weit verbreitet sind, können diese Modelle für eine große Klasse von Anwendungen wiederverwendet werden.
- Gerade das Verhalten ablaufgesteuerter Maschinen und Anlagen wird von Fachexperten immer häufiger durch Statecharts modelliert. Mit Hilfe eines neuen Ansatzes können solche Modelle im Hinblick auf die Diagnose ergänzt und in ein Diagnosesystem importiert werden. Dies erleichtert die Wissensakquisition durch Fachexperten wesentlich und senkt dadurch die Entwicklungskosten.
- Gerade in der Verfahrenstechnik wird das Verhalten einer Anlage häufig als Abfolge verschiedener Phasen beschrieben. Solche Beschreibungen können mit Hilfe eines neuen, auf Zustandsgraphen basierenden Verfahrens leichter für die modellbasierte Diagnose genutzt werden.
- Es wurde ein Ansatz zur modellbasierten Erzeugung von Fehlerbäumen entwickelt. Das Erstellen eines Fehlerbaums für eine neue Variante wird dadurch erheblich einfacher.
- Die vorhandenen Fehlermodelle können von einem neuen Modul zur FMEA wiederverwendet werden.

Entscheidend für die Reduktion der Kosten zur Entwicklung von Diagnosesystemen ist bei all diesen Ansätzen das modellbasierte Vorgehen. Zum einen werden die Modelle einer Anlage für verschiedene Zwecke wiederverwendet (z. B. FMEA und Diagnose), zum anderen besitzen verschiedene Varianten desselben Anlagentyps sehr viele gemeinsame Komponenten, deren Modelle somit ebenfalls wiederverwendet werden können.

## 5 Technische Grundlagen der Lösungen

Die Grundlage aller Teilprojekte in INDIA sind modellbasierte Techniken. Alle Problemlösungen basieren auf kompositionalen Modellen. Ein solches Modell kann automatisch oder halbautomatisch aus einer gebietsspezifischen Bibliothek von Komponentenmodellen und einer systemspezifischen Strukturbeschreibung, z.B. CAD-Daten, gewonnen werden. Da die Komponentenmodelle das Verhalten und oft auch das mögliche Fehlverhalten beschreiben, ermöglicht das resultierende Systemmodell Vorhersagen über das Systemverhalten im Normal- und ggf. auch im Fehlerfall.

Ein Vorzug der kompositionalen Modellierung ist die Wiederverwendbarkeit der Komponentenmodelle und das damit verbundenen Potential der Reduktion von Aufwand und Kosten für die Modellierung. Ein weiterer Vorteil ist die leichte (automatische) Anpaßbarkeit von Problemlösungen an Varianten. Dies ist sehr oft allein durch eine lokale Strukturänderung am Systemmodell implementierbar. Weder die Komponentenmodelle der Modellbibliothek noch die Software des Problemlösers sind von solchen Varianten betroffen.

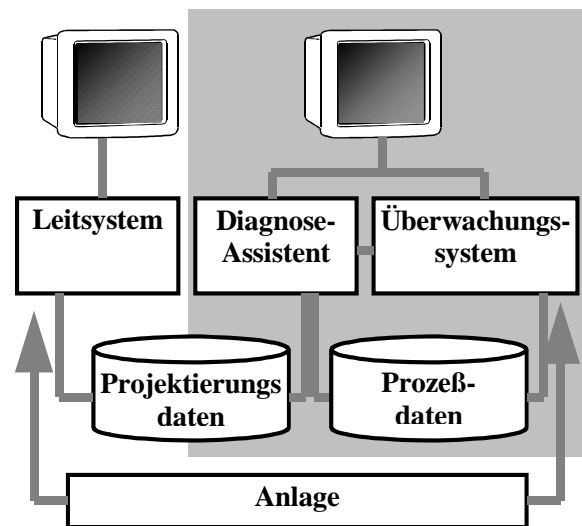


Abbildung 5: Schema eines PC-basierten Überwachungssystems

Eine zweite Grundlage aller Teilprojekte in INDIA ist die Verwendung generischer Problemlöser. Ziel ist es, aus einem Systemmodell, zusätzlichem aufgabenspezifischen Wissen und generischer Problemlösungssoftware einen maßgeschneiderten Problemlöser, z.B. für Diagnoseaufgaben, automatisch zu generieren. Die so erzielbare Wiederverwendung von Softwarekomponenten erhöht die Zuverlässigkeit der resultierenden Software und senkt deren Entwicklungskosten.

In den meisten INDIA-Teilprojekten wurden Verfahren der sog. konsistenzbasierten Diagnose angewendet. Eine Diagnose für ein Teilsystem bestehend aus Komponenten  $C_1, C_2 \dots C_n$  ist hier definiert als eine Zuordnung von je einem Verhaltensmodus (z.B. ok, verstopft, undicht) zu jeder Komponente des Teilsystems, so daß das aus diesen Zuweisungen und dem Modell ableitbare Gesamtverhalten des Systems zusammen mit allen vorliegenden Messungen und Beobachtungen OBS (wie *observations*) logisch konsistent ist. Formal:  $\text{Verh}(C_i)$  ist eine Diagnose genau dann, wenn die logische Theorie  $\text{MODEL} \cup \{\text{Verh}(C_i)\} \cup \text{OBS}$  konsistent ist. Der Diagnoseprozeß wird getrieben durch sog. Konflikte. Ein Konflikt ist ein logischer Widerspruch zwischen den Vorhersagen des Modells unter bestimmten Verhaltensannahmen für die Komponenten und den tatsächlichen Beobachtungen, den Elementen der Menge OBS. Ein solcher Konflikt liefert Information darüber, welche dieser Annahmen revidiert werden müssen, um den Widerspruch zu den Beobachtungen aufzuheben.

Vorteile konsistenzbasierter Diagnose sind

- **Generisches Diagnoseverfahren:** die entsprechende Software ist für viele Diagnoseaufgaben und unterschiedliche Anwendungsbereiche verwendbar.
- **Unabhängigkeit von Fehlermodellen:** der konsistenzbasierte Ansatz erzwingt nicht, neben dem Normalverhalten auch das mögliche Fehlverhalten von Komponenten zu modellieren. Bereits die Abweichung des beobachteten Verhaltens vom modellierten Normalverhalten reicht hier, um Fehler zu hypothetisieren. Dabei garantiert der Algorithmus, daß der tatsächlich vorliegende Fehler in der Menge der erzeugten Hypothesen enthalten ist (Korrektheit des Modells vorausgesetzt).
- **Mehrfachfehler-Diagnosen:** das Standardverfahren zur konsistenzbasierten Diagnose ermöglicht die Diagnose unabhängig auftretender Mehrfachfehler. Das auftretende kombinatorische Problem wird dabei wirkungsvoll durch Ausnutzung des lokalen Charakters von Komponentenverhalten gelöst: Lokalität bewirkt hier, daß Vorhersagen über die Auswirkungen des Verhaltens einer Komponente in kombinatorisch vielen Kontexten, d.h. unter vielen verschiedenen Annahmen über das Verhalten der übrigen Komponenten simultan gültig sind.

Eine weitere Grundlage für viele Arbeiten in INDIA ist die Verwendung qualitativer Modelle. Im Bereich wissenschaftlichen und ingenieurmäßigen Denkens ist ein konzeptuelles, qualitatives Verständnis von Systemzusammenhängen grundlegende Voraussetzung für das Problemlösen. Qualitative Modellierung zielt darauf, ein natürliches oder technisches System auf einer konzeptuellen Ebene zu beschreiben. Damit ist gemeint, daß nicht nur ein mathematisches Modell repräsentiert wird, sondern auch eine begriffliche Ebene der physikalischen Phänomene (z.B. in Form von Komponenten und Prozessen), auf der entsprechende Schlußfolgerungsprozesse ablaufen können. Dies ist gerade bei Diagnosefragestellungen von erheblicher Bedeutung, da abweichendes Verhalten zwar in der Modifikation des mathematischen Modells seinen Ausdruck findet, aber natürlich auf der physikalischen Ebene seine Ursachen und Bedeutung hat. Um diese konzeptuelle Sicht und das Schließen mit partieller Information mit effizienten Verfahren, arbeitet qualitative Modellierung mit einem mathematischen Verhaltensmodell auf geeigneter Abstraktionsebene, die möglichst nur die zur Problemlösung nötigen Begriffe und Unterscheidungen einführt. Ein Beispiel für einen solchen Abstraktionsschritt ist die Vorzeichenabstraktion: Eine reellwertige Variable  $x$  wird dabei nur durch ihr Vorzeichen repräsentiert:  $[x] := \text{sign}(x)$ . Eine andere nützliche Abstraktion ist das Vorzeichen der zeitlichen Ableitung einer Variable:  $\delta x := [dx/dt]$ . Dies drückt aus, ob eine Variable steigt, fällt oder momentan konstant ist. Die Unterscheidungen dieser drei qualitativen Fälle reicht für modellbasiertes Problemlösen, etwa die Unterscheidung von Verhaltensalternativen (Diagnosen), oft völlig aus. Eine dritte nützliche Abstraktion ist das Vorzeichen der Abweichung eines aktuellen Wertes  $x_{\text{act}}$  von seinem erwarteten Referenzwert  $x_{\text{ref}}$ :  $[\Delta x] := x_{\text{act}} - x_{\text{ref}}$ . Umgangssprachlich drückt diese Abstraktion aus, ob ein Wert normal, zu hoch, oder zu niedrig ist — auch dieser Begriff der Abweichung ist ein Konzept, das Ingenieure zur qualitativen Analyse technischer Systeme gerne verwenden. Qualitatives Schließen darf keinesfalls gleichgesetzt werden mit unscharfem oder heuristischem Schließen. Mit qualitativen Abweichungen läßt sich vielmehr für die Modellanalyse exakt und kalkülmäßig rechnen: zum Beispiel gilt für die qualitativen Abweichungen

$$\Delta(x * y) = x_{\text{act}} * \Delta y + y_{\text{act}} * \Delta x - \Delta x * \Delta y$$

Der Referenzwert  $x_{\text{ref}}$  bzw.  $y_{\text{ref}}$  kann dabei bemerkenswerterweise unspezifiziert bleiben, und auf einer qualitativen Ebene genügt die Kenntnis der Vorzeichen der aktuellen Werte, um die Folgen oder Ursachen von qualitativ charakterisierten Abweichungen gewisser Systemgrößen abzuleiten. Die Verwendung qualitativer Modelle erhöht die Mächtigkeit modellbasierter Methoden: Die damit erzielten Ergebnisse gelten für ganze Klassen von Systemen, unabhängig von den numerischen Ausprägungen ihrer Parameter. Qualitative Verhaltensmodelle decken unabhängig von spezifischen numerischen Ausprägungen ganze Klassen von Komponentenfehlern ab, z.B. eine verzögerte Ventilöffnung oder eine verstopfte Rohrleitung. Dies kann z.B. wirkungsvoll für die FMEA verwendet werden. Qualitative Modellierung führt zu kompakten Modellbibliotheken und einer natürlichen, nachvollziehbaren Repräsentation des Komponentenverhaltens. Alle Variablen haben endliche, oft sehr kleine Wertebereiche. Die Zahl der möglichen Systemzustände ist damit endlich. Dies ermöglicht effiziente und vollständige Analysen der Modelle.

Ein Anwendungsbeispiel hierfür ist die modellbasierte Testgenerierung. Die Aufgabe ist hier, Tests automatisch zu generieren, mit denen entschieden werden kann, welche von zwei Fehlerhypothesen zutrifft. Dazu wird das qualitative Modell unter beiden Annahmen analysiert. Wegen der endlichen Wertebereiche der Variablen liefert diese Analyse zwei endliche Mengen von Zuständen  $Z_1$  und  $Z_2$ . Die Schnittmenge  $Z_1 \cap Z_2$  enthält genau die Testmuster, für die das Verhalten des Systems unter beiden Hypothesen ununterscheidbar ist. Das Komplement  $Z_1 \cup Z_2 - Z_1 \cap Z_2$  enthält dagegen genau die Testmuster, für die sich das System unterschiedlich verhalten kann. Unterschiede in den Zustandsmengen können so zum Ableiten geeigneter Tests genutzt werden.

Eine weitere Leitlinie in **INDIA** ist die Wiederverwendung und der Austausch von Modellen. Ein Systemmodell kann während des gesamten Lebenszyklus eines Systems verwendet werden, um unterschiedliche Aufgaben zu bearbeiten. Diagnose, FMEA und Testgenerierung sind Beispiele hierfür. Modelle helfen so, die verschiedenen Arbeitsprozesse im Produktlebenszyklus zu integrieren und effizienter und redundanzfreier zu gestalten.

## 6 Lehren und Perspektiven

Fachlich haben die Arbeiten in INDIA bestätigt, daß die grundlegenden Formalismen und Algorithmen auf dem Gebiet der modellbasierten Diagnose ausreichen, um typische Aufgaben in der industriellen Diagnose erfolgreich zu bearbeiten. Die Herausforderung besteht in INDIA vor allem darin, die Brücke von der Prinzipienlösung zur praktischen Lösung zu schlagen. Hierbei rücken pragmatische Randbedingungen industrieller Diagnoseprozesse in den Vordergrund, wie zum Beispiel

- (Nicht-)Verfügbarkeit und Charakter von Beobachtungen,
- Aktionen und deren Kosten,
- aktuelle Arbeitsprozesse.

Organisatorisch gesehen hat sich die Struktur von INDIA als Verbundprojekt bewährt: 3 Säulen mit je drei Partnern aus Forschung, professioneller Softwareentwicklung und industrieller Anwendung. Vertikal ergibt sich so ein erfolgreicher Technologietransfer von der Forschung in die Anwendung. Horizontal stimuliert diese Projektstruktur einen fruchtbaren Austausch, naturgemäß am intensivsten zwischen den drei beteiligten Forschungseinrichtungen.

Die in INDIA bisher erzielten Resultate machen das Potential modellbasierter Lösungen deutlich:

- Es wurden erfolgreich Lösungen für relevante Problemstellungen aus der industriellen Praxis entwickelt und erprobt.
- Wiederverwendung von Wissen (Modellen), Information und Lösungen und deren Austausch zwischen Arbeitsprozessen wurden erfolgreich demonstriert.
- Es wurden Wege entwickelt, auf denen modellbasierte Verfahren in den bestehenden Arbeitsprozeß und deren Softwarelandschaft integriert werden können, und damit arbeitsorganisatorische Änderungen als Hemmnisse für die Umsetzung zu reduzieren.

In den INDIA-Teilprojekten wird somit deutlich, daß Modelle ein erhebliches Potential zur Integration industrieller Arbeitsprozesse haben. Ihnen wächst damit eine wichtige Rolle im Wissensmanagement einer Firma zu. Modelle könnten in Zukunft als Dreh- und Angelpunkt firmeninterner Arbeitsprozesse dienen — Modelle z.B. als Service im firmeninternen Intranet.



Modellbasierte Verfahren liefern eine Basis für zukünftige Serviceleistungen, z.B. in der verteilten, kooperativen Fern-diagnose von Fahrzeugflotten oder im Anlagenbau. Für die weitere Integration von Arbeitsprozessen wird der Import vorhandener Modelle, z.B. aus der Anlagenprojektierung oder aus numerischen Modellen eine wichtige Rolle spielen. Hier müssen Austauschformate, z.B. auf Basis von STEP oder SGML/XML entwickelt und genutzt werden. Ein verwandtes Thema ist die Entwicklung integrierter Lösungen, d.h. die modellbasierte Kopplung von Prozeßketten. Beispiele sind Diagnose/Leittechnik, Entwurf/FMEA/Diagnose oder Diagnose/Rekonfigurierung.