

Mehrstufige Diagnose hydrostatisch mechatronischer Systeme

Ralf Lemmen

Forschungsbericht 11/94

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Übersicht: Frei konfigurierbare elektrohydraulische Anlagen, können rein heuristischen Diagnoseverfahren unlösbare Probleme bereiten. Die Anwendung der bekannten signalgestützten Diagnoseverfahren ist in der Designphase nicht sinnvoll. Der Bericht beschreibt eine zweistufige Diagnose, die auf der lokalen Ebene heuristische Methoden und auf der globalen Ebene qualitative modellbasierte Verfahren verwendet, um Diagnosekandidaten für die lokale Ebene zu generieren.

Gerhard-Mercator-Universität - GH Duisburg

Meß-, Steuer- und Regelungstechnik

Prof. Dr.-Ing. H. Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	II
1 Einleitende Übersicht	1
2 Zweistufiges Diagnosekonzept	2
2.1 Qualitativ funktionale Klassifikation	3
2.2 Heuristische Klassifikation	4
3 Globale Diagnose	5
3.1 Qualitative Algebra	5
3.2 Qualitative lokale Komponentenbeschreibung	5
3.3 Diagnosebeispiel	8
4 Lokale Diagnose	11
5 Zusammenfassung	12
6 Literaturverzeichnis	13
A Definitionen und Begriffserklärungen	14
B Auswahl durch Regeln beschriebener Fehler	20

Formelzeichen und Bezeichnungen

Skalare Größen

F	[N]	äußere an den Zylinder angreifende Kraft
I	[A]	Strom
i_a	[mA]	Ventilansteuerstrom
j	[-]	Konklusionszustand
k	[-]	Anzahl der Statusvariablen einer Komponente
m	[-]	Anzahl der Komponenten
M	[Nm]	Drehmoment
n	[min ⁻¹]	Drehzahl
p	[bar (10 ⁵ Pa)]	Druck
p_A	[bar (10 ⁵ Pa)]	Druck am Arbeitsanschluß A
p_B	[bar (10 ⁵ Pa)]	Druck am Arbeitsanschluß B
p_T	[bar (10 ⁵ Pa)]	Tankdruck
Q	[l/min]	Volumenstrom
R_h	[$\frac{\text{bar min}^2}{\text{l}^2}$]	hydraulischer Widerstand
t	[s]	Zeit
U	[V]	Spannung
v	[m/s]	Geschwindigkeit des Zylinderkolbens
x	[-]	Variable

Griechische Buchstaben

β	Konstante
γ	Anzahl der Variationen der Statusvariablen
θ	Konfidenzfaktor der Fehlermöglichkeit
ζ	Anzahl der Fehlermöglichkeiten

Akronyme

BC	Schnittstelle (Bi-Connection)
$Comp$	Komponente
IR	Informationswurzel
QA	qualitative Algebra
QE	qualitative Exergie
TC	Schnittstelle (Tri-Connection)

Vektorielle Größen

\mathbf{u}	[-]	Vektor der Eingangsgrößen
\mathbf{x}	[-]	Vektor der inneren Systemzustände
\mathbf{y}	[-]	Vektor der Ausgangsgrößen
\mathbf{z}	[-]	Vektor der statischen Statusvariablen eines Systems
$\mathbf{z}(t)$	[-]	Vektor der dynamischen Statusvariablen eines Systems

Mengen

$.blocked.$	Menge der nicht verbundenen Elemente
$.connected.$	Menge der verbundenen Elemente
\mathbb{C}	Menge der ausführbaren Konklusionen (Prämissen erfüllt)
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{QE}	Menge der Qualitativen Exergien
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\mathbb{Z}	Menge der statischen Statusvariablen
$\mathbb{Z}(t)$	Menge der dynamischen Statusvariablen

Indizierung

<i>bek</i>	bekannt
<i>C</i>	Komponente
<i>gate</i>	Wert am Anschluß
<i>j</i>	Laufindex
<i>Q</i>	qualitativ
<i>real</i> [-]	realer Wert
<i>u</i>	unbekannt

Funktionen und Operatoren

$f(\cdot)$	Vektorfeld der statischen Beschreibung
$T(\cdot)$	lokale Komponentenbeschreibung
$\vec{T}(\cdot)$	Vektorfeld der lokalen Komponentenbeschreibung
$\max(\cdot)$	Maximum
$\min(\cdot)$	Minimum
$\in \cdot$	Element von
$ \cdot $	Betrag einer Menge (Anzahl der Elemente)
$\forall \cdot$	für alle
\wedge	und
\vee	oder
\cup	Vereinigung

1 Einleitende Übersicht

Diagnose-Expertensysteme sollen je nach Zielsetzung Laien oder Fachpersonal bei der Fehler suche und -ursachenbestimmung unterstützen. Die größten Erfolge hatten derartige Systeme zunächst in der Medizin und später bei technischen Geräten, die baugleich oder nahezu baugleich in großen Stückzahlen produziert werden (PKW, Fotokopierer). Diesen Anwendungen ist gemeinsam, daß sie eine feste Struktur (sogar die Gesamtfunktionalität ist gleich) des untersuchten Objektes aufweisen. Mit regelbasierten Modellbeschreibungen sind hier sehr gute Ergebnisse zu erzielen (Puppe 1988, 1990).

Bei veränderlicher Struktur der zu untersuchenden Systeme wächst die Anzahl der zur Systembeschreibung notwendigen Regeln explosionsartig. So kann im Extremfall für jede Strukturänderung ein vollständig neuer Regelsatz notwendig sein. Bei frei konfigurierbaren Systemen wäre die Regelmenge sogar unendlich groß. Einen Forschungsschwerpunkt bei wissensbasierten Systemen, die Strukturinformation von Verhaltensinformation trennen, bilden die komponentenorientierten Beschreibungen (z.B. Struß 1992).

Eine mehrstufige Diagnose (Abschnitt 2), wie sie in diesem Bericht erläutert wird, versucht, die Vorteile der verschiedenen Wissensdarstellungsformen und Wissensverarbeitungsverfahren zu kombinieren. Hier lassen sich grob schon zwei Stufen unterscheiden. Die globale Diagnose (Abschnitt 3) wendet ein qualitativ komponentenorientiertes Verfahren an, um Diagnosekandidaten zu generieren. An dieser Stelle ist eine sinnvolle Auswahl der möglichen Strukturkombinationen vorzunehmen. Die ausgewählten Strukturen bilden gemeinsam mit den zugehörigen Symptomen und Randbedingungen die Diagnosekandidaten. Diese werden dann bei der lokalen Diagnose (Abschnitt 4) mittels Methoden der heuristischen Klassifikation weiter untersucht. Aufgrund der nun festen Struktur läßt sich mit diesen effizienten Methoden die Diagnose erstellen.

Eine Begriffsdefinition der verwendeten Bezeichnungen (Anhang A) sowie eine Zusammenfassung mit Ausblick (Abschnitt 5) runden diesen Bericht ab.

2 Zweistufiges Diagnosekonzept

In Puppe (1990) wird die Diagnostik als Klassifikation bezeichnet und nach den zugrundeliegenden Wissensarten in die Bereiche der

- sicheren,
- heuristischen,
- modellbasierten,
- statistischen und
- fallvergleichenden

Klassifikation untergliedert.

Die *sichere Klassifikation* benutzt Entscheidungsbäume und -tabellen zur Wissensdarstellung. Hierbei wird die Vollständigkeit des Wissens über Fehlermöglichkeiten vorausgesetzt, was für das Anwendungsgebiet der Hydraulik nicht gültig ist.

Bei der *heuristischen Klassifikation* wird direkt von den Symptomen auf die Ursache geschlossen. Bei Systemen mit einer hohen Komponentenzahl und vielen Fehlermöglichkeiten explodiert der Lösungsraum. Dennoch ist aufgrund der einfachen Grundstruktur und ihrer flexiblen Erörterbarkeit die heuristische Klassifikation die bisher am erfolgreichsten eingesetzte Methode für Expertensysteme.

Die *modellbasierte Klassifikation* (Frank 1994) unterteilt sich noch einmal in die überdeckende und die funktionale Klassifikation. Die überdeckende Klassifikation für die statische und dynamische Fehlersuche wird auch als Klassifikation mit Fehlermodellen bezeichnet (Patton, Frank und Clark 1989). Die funktionale Klassifikation basiert auf einem Modell, das die normale Funktion des Systems beschreibt.

Bei der *statistischen* und der *fallvergleichenden Klassifikation* werden mittels Wahrscheinlichkeiten bzw. Ähnlichkeitsmaßen Falldatenbanken ausgewertet. Diese Methoden befinden sich noch am Beginn der Entwicklung.

Im System ^{art}*deco* findet eine zweistufige modellbasiert–heuristische Klassifikation Anwendung.

In der ersten modellbasierten Stufe, der globalen Diagnose, werden unter Zuhilfenahme der funktionalen Klassifikation über eine qualitative Exergiebeschreibung Kandidaten für die zweite, heuristische Stufe, die lokale Diagnose, generiert. Der Lösungsraum wird damit minimiert.

2.1 Qualitativ funktionale Klassifikation

Die qualitative funktionale Klassifikation orientiert sich an der Vorgehensweise eines menschlichen Experten, der bei der Untersuchung großer und komplexer Systeme vereinfachende qualitative Modelle benutzt. Die Informationsreduktion findet mittels einer qualitativen Betrachtung der Energie- und Signalflüsse statt. Das Problem hierbei ist, eine handhabbar kleine, aber immer noch sinnvoll große Informationsmenge zu erhalten. Die hierzu verwendete qualitative Exergie QE (Definition A.4) repräsentiert dabei die realen statischen, auf die von art^{deco} berechneten statischen, bezogenen Werte der Statusvariablen des Systems.

Der Algorithmus für die qualitativ funktionale Klassifikation wird durch die folgenden Arbeitspunkte charakterisiert:

1. Belege alle qualitativen Exergien (QE), die bekannt sind

(z. B. Tank = 0, mechanischer Anschluß der Pumpe = 3, ...).

Die qualitativen Exergien bestimmen sich dabei gemäß Gl. A.3.

2. Finde alle konsistenten (widerspruchslose) Variationen der Statusvariablen mittels Propagierung.

Diese Systemanteile sind funktionstüchtig und können in der weiteren Behandlung unberücksichtigt bleiben. Das Verarbeitungsverfahren der Propagierung (Lemmen 1992) läßt sich hier auf Grund des kleinen diskreten Wertebereiches noch weiter in seiner Effizienz steigern.

3. Für alle Variationen der Statusvariablen, die nicht vollständig propagiert werden können, ist die Informationswurzel IR (Definition A.11) zu finden und die zugehörige Komponente, Schnittstelle sowie die Statusvariable als Meßkandidat auszugeben.

Hierbei sind Randbedingungen, wie z. B., daß der Volumenstrom in hydraulischen Systemen häufig nicht direkt meßbar ist oder aber Druckmeßstellen zu bestimmten Komponenten, zu beachten (siehe auch Feicht 1988).

4. Alle konsistenten Neu–Variationen der Statusvariablen mit noch unbekanntem Komponentenverhalten sind Fehlerkandidaten.

Das hydraulische System kann hierbei konsistent mit Statusvariablen belegt werden, wobei aber die Schnittstellenbelegungen von einzelnen Komponenten nicht denen des korrekten Verhaltens entsprechen. Diese Komponenten werden dann mit Blackbox–Modellen beschrieben, die noch unbekannt sind und die Schnittstellenbelegung liefern.

5. Übergabe aller als konsistent propagierten Neu–Variationen der Statusvariablen an die heuristische Klassifikation.

Es werden sowohl die Statusvariablen als auch die beteiligten Komponenten der heuristischen Klassifikation zur Verfügung gestellt.

2.2 Heuristische Klassifikation

Die einfache Grundstruktur und flexible Erweiterbarkeit bezüglich neuen Wissens macht die heuristische Klassifikation zur bislang meistverwandten Methode in Klassifikations-Expertensystemen (Puppe 1990). Bei der heuristischen Klassifikation wird direkt von den Merkmalen auf die Lösungen geschlossen. Ausgewählt wird die Lösung, die durch die höchsten Wahrscheinlichkeitswerte charakterisiert ist. Hierbei sind natürlich die Ergebnisse aller bei der qualitativ funktionalen Klassifikation genannten Variationen der Statusvariablen zu berücksichtigen (Bild 2.1). Für jeden Diagnosekandidaten (1, 2, 3, ...), welcher durch die als konsistent propagierte Statusvariablenvariation gegeben ist, werden die Konfidenzfaktoren der einzelnen Fehlermodelle bestimmt.

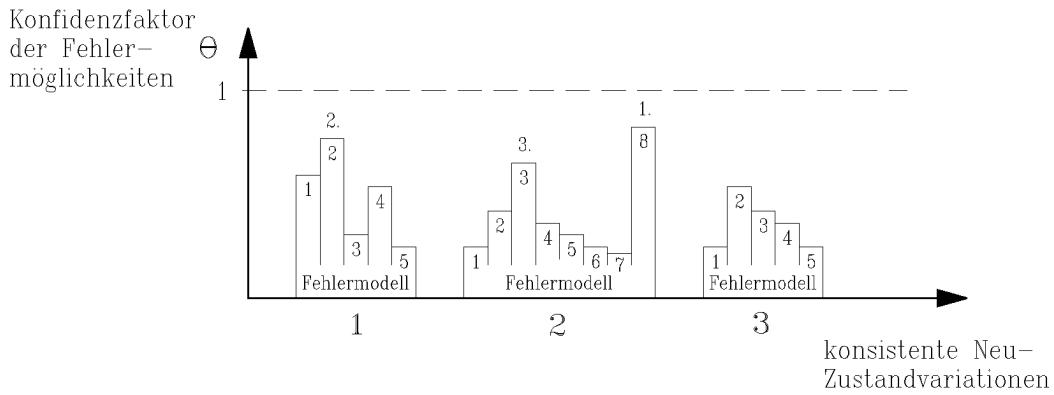


Bild 2.1: Fehlerzuordnung

Bei der Schlußfolgerung vom Merkmal zur Lösung muß nicht nur untersucht werden, wie stark die Anwesenheit eines Merkmals eine Lösung impliziert, sondern auch, wie stark das Fehlen eines Merkmals eine Lösung ausschließt. Die typischen Wissensverarbeitungsverfahren hierbei sind Vorwärtsverkettung, Rückwärtsverkettung, Establish-Refine und Hypothesize-and-Test. Erläuterungen dieser Standardverfahren liefern Puppe (1988, 1990) und Freyermuth (1993).

3 Globale Diagnose

Die globale Diagnose bedient sich der qualitativen funktionalen Klassifikation zur Kandidaten-generierung. Der Lösungsraum für die lokale Diagnose (Abschnitt 4) ist sinnvoll einzugrenzen. Für die Lösung dieser Aufgabe wird die qualitative Exergie (Definition A.7) sowie eine qualitati-ve Algebra (Definition A.8) und qualitative lokale Komponentenbeschreibung (Definition A.9) verwendet, auf die im folgenden auch anhand des Beispiels einer parallelen Differentialzylinder-schaltung genauer eingegangen wird.

3.1 Qualitative Algebra

Die Grundmenge der qualitativen Algebra QA wird durch die Vereinigung der reellen Zahlen \mathbb{R} und der qualitativen Exergien QE gebildet. Bei den auf dieser Grundmenge ausführbaren Operationen werden Komponenten (Operationen (A.5) bis (A.15)) und Schnittstellen (Opera-tion A.16) unterschieden. Während bei den Komponenten aufgrund der qualitativen lokalen Komponentenbeschreibungen T_Q (Definition A.9) die Elementaroperationen der Multiplikati-on und Addition definiert werden müssen, ist bei den Schnittstellen die Potentialbedingung (Operation (A.10)) ausreichend. Die Aufgabe der qualitativen Algebra besteht darin, die loka-le Propagierung (Defintion A.10) auch auf die qualitativen Exergien QE und die qualitativen lokalen Komponentenbeschreibungen T_Q anwendbar zu machen. Auf dieses Problem wird in Unterabschnitt 3.3 anhand des Beispiels von zwei parallel geschalteten Differentialzylindern genauer eingegangen. Insbesondere durch die Minimum- (Gl. A.15) und Maximumoperation (Gl. A.16) folgt, daß die Operationen der qualitativen Algebra nicht mehr umkehrbar eindeutig sind. Für die Versorgungs- und Steuerelemente einer hydraulischen Anlage ist dieses üblicher-weise unproblematisch, wobei die Verarbeitung der qualitativen Exergien dann dem Prinzip der Vorwärtsverkettung entsprechen. Bei Arbeitselementen werden zur Vermeidung der beschrei-bungsbedingten Zuordnungsprobleme (in Analogie zur Thermodynamik: Arbeitselemente geben Leistung ab) die abgegebenen Exergien an den mechanischen Schnittstellen negativ bewertet. Sollten dennoch Umkehroperationen notwendig sein, so ergibt sich dadurch eine begrenzte An-zahl von Alternativen (maximal 4). Derartiges tritt in der Praxis nur in geringem Maße auf, weshalb die damit verbundene Erweiterung des Diagnosesuchraumes akzeptiert werden kann.

3.2 Qualitative lokale Komponentenbeschreibung

Die qualitativ lokalen Komponentenbeschreibungen T_Q verknüpfen die qualitativen Exergie-informationen der Schnittstellen einer Komponente gemäß den Beziehungen (A.11) und (A.12) miteinander. Bezogen auf die Bilanzgrenze des untersuchten mechatronischen Gesamtsystems werden abgegebene qualitative Exergien negativ, aufgenommene positiv bewertet. Diese Vorge-hensweise ist insbesondere bei der Beschreibung der Arbeitselemente von Bedeutung. Insgesamt werden die Komponenten in Versorgungs-, Steuer- und Arbeitselemente untergliedert (Lemmen 1992). Für diese Bereiche wird nachfolgend jeweils beispielhaft die Beschreibungsform erläutert.

Versorgungselemente

Versorgungselemente besitzen die Aufgabe, dem Hydrauliksystem eine ausreichende Menge des Druckmediums mit benötigtem Druck, Reinheit und Temperatur zur Verfügung zu stellen. Auf diese Kernaussagen soll die Komponentenbeschreibung mit Hilfe der qualitativen Exergie QE reduziert werden. Das bedeutendste Versorgungselement ist die Pumpe (Bild 3.1).

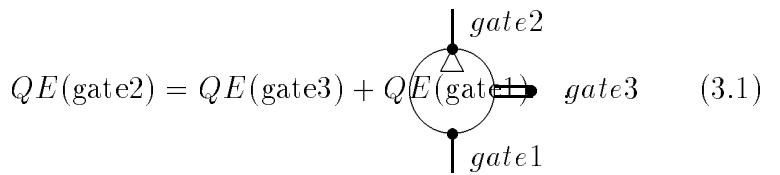


Bild 3.1: Konstantpumpe

Die Schlußfolgerung, daß sich für eine Verbindung vom gate1 der (Konstant-)Pumpe zum Tank ($\Rightarrow QE(\text{gate}1) = 0$) und für eine korrekte Aufnahme von mechanischer Leistung ($QE(\text{gate}3) = 3$) am gate2 eine qualitative Exergie von $QE = 3$ ergibt, ist trivial. Die im Unterabschnitt 3.1 angesprochene Uneindeutigkeit der für die Beschreibung (Gl. (3.1)) verwendeten Operation (2.7) läßt sich aber an Hand des folgenden einfachen Beispiels anschaulich darstellen. Kehrt man die Beschreibung (3.1) um, ergeben sich folgende konsistente Variationen:

$$\begin{array}{lllll}
 QE(\text{gate}1) & = & QE(\text{gate}2) & - & QE(\text{gate}3) & \vee \\
 QE(\text{gate}3) & = & QE(\text{gate}2) & - & QE(\text{gate}1) & \\
 \\
 3 & \wedge & 3 & \wedge & 0 \vee 1 \vee 2 \vee 3 & \\
 0 \vee 1 \vee 2 \vee 3 & \wedge & 3 & \wedge & 3 & \\
 \\
 2 & \wedge & 2 & \wedge & 0 \vee 1 \vee 2 & \\
 0 \vee 1 \vee 2 & \wedge & 2 & \wedge & 2 & \\
 \\
 1 & \wedge & 1 & \wedge & 0 \vee 1 & \\
 0 \vee 1 & \wedge & 1 & \wedge & 1 & \\
 \\
 0 & \wedge & 0 & \wedge & 0 &
 \end{array}$$

Die vier Doppelzeilen geben hier die möglichen Werte für die einzelnen Exergien an. Bis auf die Belegung der Exergien zu Null ist die Uneindeutigkeit der Umkehrung sowie die Beschränktheit der Suchraumerweiterung offensichtlich.

Steuerelemente

Steuerelemente übertragen hydraulische Energie von geforderter Größe und Richtung an die Arbeitselemente.

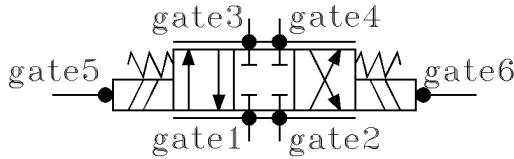


Bild 3.2: 4/3–Wege–Proportionalventil

Für das Beispiel eines Proportionalventils (Bild 3.2) ergibt sich die folgende Beschreibung:

IF $QE(\text{gate}5) = QE(\text{gate}6)$ THEN $T_Q \in .blocked.$

$$\begin{aligned} QE(\text{gate}1) &= QE(\text{gate}1) \quad \wedge \quad QE(\text{gate}2) = QE(\text{gate}2) \quad \wedge \\ QE(\text{gate}3) &= QE(\text{gate}3) \quad \wedge \quad QE(\text{gate}4) = QE(\text{gate}4) \end{aligned}$$

IF $QE(\text{gate}5) > QE(\text{gate}6)$ THEN (3.2)

$$\begin{aligned} QE(\text{gate}1) &= [QE(\text{gate}5) - QE(\text{gate}6)] * QE(\text{gate}3) \quad \vee \\ QE(\text{gate}3) &= [QE(\text{gate}5) - QE(\text{gate}6)] * QE(\text{gate}1) \\ \wedge \quad QE(\text{gate}4) &= [QE(\text{gate}5) - QE(\text{gate}6)] * QE(\text{gate}2) \quad \vee \\ QE(\text{gate}2) &= [QE(\text{gate}5) - QE(\text{gate}6)] * QE(\text{gate}4) \quad . \end{aligned}$$

Die Beschreibung für $QE(\text{gate}6) > QE(\text{gate}5)$ unterscheidet sich lediglich auf Grund der durch die Schaltstellung bedingte Vertauschung der Nummern der Schnittstellen (gates).

Für den Fall, daß wie in Bild 3.2 das Ventil zwei elektrische Anschlüsse besitzt, kommt es prinzipiell zu der bei dem Beispiel der Pumpe angesprochenen Suchraumerweiterung. Da in der Praxis aber üblicherweise nur eine Seite des Ventils angesteuert wird (d.h. $QE(\text{gate}6) = 0$), erhöht sich die Anzahl der Variationsmöglichkeiten nicht. Der Umfang der Verhaltensbeschreibung über die qualitativen Exergien ist verglichen mit der qualitativen lokalen Beschreibung (Suermann 1994) deutlich geringer. Dies tritt besonders bei der Ventilbeschreibung zu Tage.

Arbeitselemente

Die Arbeitselemente eines hydraulischen Systems geben hydraulische Energie in Form von Arbeit an die Umgebung, hier an den Prozeß, ab. Bei den Arbeitselementen ist diese Abgabe beobachtbar. Daraus folgt, daß, obwohl dem System qualitative Exergie entnommen wird, die Information darüber in das System hinein propagiert werden muß. Hierfür findet – gerade auch zur Verhinderung von Uneindeutigkeiten – das negative Vorzeichen der qualitativen Exergie Verwendung.

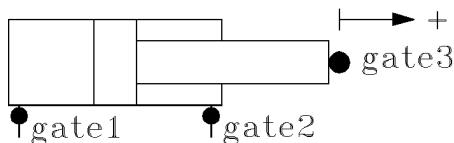


Bild 3.3: Differentialzylinder

Der Differentialzylinder (Bild 3.3) beispielsweise wird mittels folgender Beschreibung dargestellt:

$$\begin{aligned} QE(\text{gate2}) &= \text{sign}[V(\text{gate3})] * \text{sign}[-F(\text{gate3})] * QE(\text{gate3}) + QE(\text{gate1}) \wedge \\ QE(\text{gate1}) &= QE(\text{gate2}) - \text{sign}[V(\text{gate3})] * \text{sign}[-F(\text{gate3})] * QE(\text{gate3}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Die aus dieser Beschreibung resultierenden Variationsmöglichkeiten entsprechen denen der Pumpe.

3.3 Diagnosebeispiel

Zur Demonstration der globalen Diagnose soll die Generierung von Diagnosekandidaten an Hand des in Bild 3.4 dargestellten Beispielkreislaufs aufgezeigt werden¹.

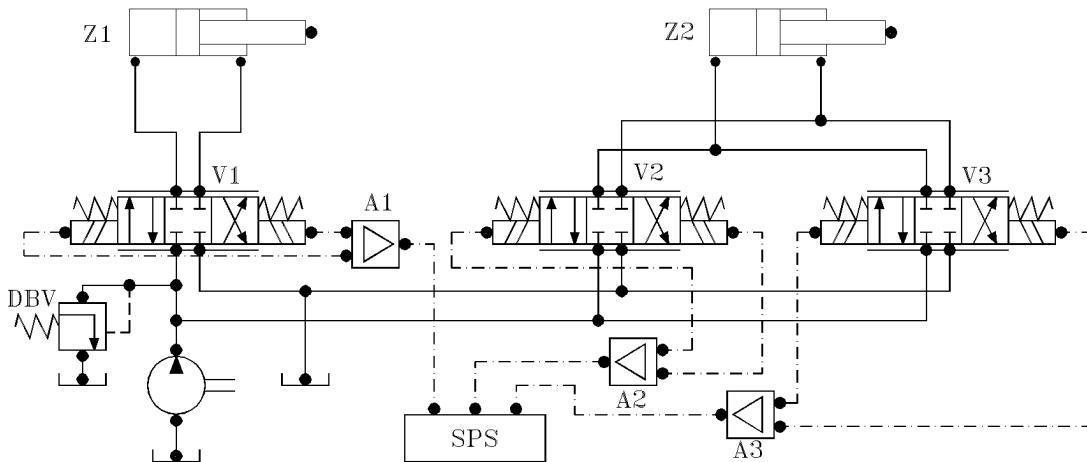


Bild 3.4: Beispieldiagramm

Der Diagnosevorgang beginnt damit, daß dem Diagnosesystem das Symptom zugänglich gemacht wird. Bei diesem Beispiel

*fährt der Zylinder Z2 nicht aus, obwohl die Pumpe fördert und die SPS Signale liefert.
Der Zylinder Z1 fährt aus.*

Dieses Szenario wird mittels der qualitativen Exergien als Startbelegung für die Propagierung wie in Bild 3.5 dargestellt. Bei einem ersten Propagierungsablauf wird versucht, Anlagenteile, deren korrekte Funktion durch eine konsistente qualitative Exergiebelegung dokumentiert ist, zu extrahieren, da diese nicht weiter untersucht werden müssen.

¹Hydraulische Systeme in der Praxis sind üblicherweise größer und komplexer.

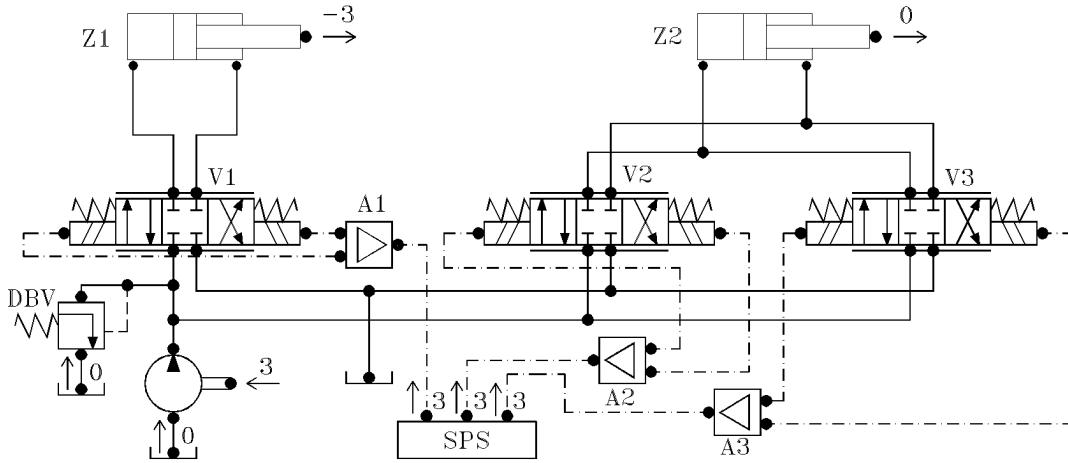


Bild 3.5: Startbelegung mit qualitativen Exergien

Es wird von der Startbelegung in Bild 3.5 ausgehend, gemäß der in den Unterabschnitten 3.1 und 3.2 aufgestellten Bedingungen und Beschreibungen die Propagierung der qualitativen Exergien vorgenommen. Dabei läßt sich die hydraulische Achse des Zylinders Z1 derart konsistent belegen, daß diese als funktionstüchtig erkannt und für die weitere Untersuchung nicht betrachtet werden muß. Prinzipiell lassen sich unter Vernachlässigung der Leitungen für die gegebenen Startbedingungen Parameterbelegungen finden, die an den einzelnen Komponenten in den folgenden Bildern (3.6 bis 3.8) dargestellt werden.

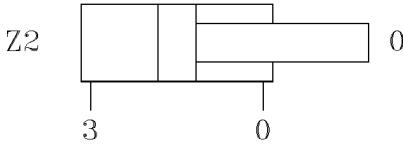


Bild 3.6: Kandidat: Zylinder Z2 (mit Belegung)

Für das in Bild 3.6 dargestellte Szenario sind die Verstärker A2 und A3 sowie die Ventile V2 und V3 funktionstüchtig. Der Zylinder Z2 ist funktionstüchtig, wenn an dessen hydraulischen Schnittstellen die qualitativen Energiebelegungen mit $(3 \wedge 3) \vee (2 \wedge 2) \vee (1 \wedge 1) \vee (0 \wedge 0)$ vorliegen. Für die Ventile V2 und V3 bedeutet dies, daß beide die in Bild 3.7 dargestellte Schnittstellenbelegung haben müssen.

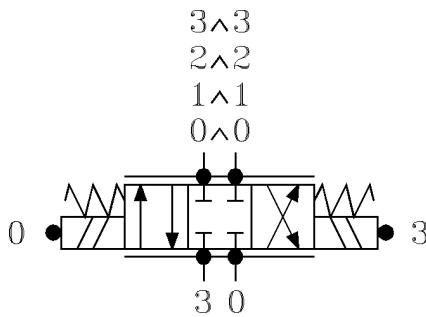


Bild 3.7: Kandidaten: Ventile V2 und V3 (mit Belegung)

Alternativ ergeben sich bei funktionstüchtigen Ventilen die in Bild 3.8 dargestellten Schnittstellenbelegungen für die Verstärker A2 und A3.

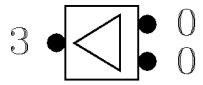


Bild 3.8: Kandidaten: Ventilverstärker A_2 und A_3 (mit Belegung)

Als interessanter Aspekt tritt hierbei zu Tage, daß auf Grund des korrekten Verhaltens der Ventile die vom Zylinder hervorgerufene Suchraumerweiterung von vier Alternativen durch die Konsistenzbedingungen im Ventil wieder reduziert wird.

Die in den Bildern 3.6 bis 3.8 dargestellten Komponenten und ihre Schnittstellenbelegungen werden als Diagnosekandidaten an die lokale Diagnose übergeben.

4 Lokale Diagnose

Die lokale Diagnose baut auf der durch die globale Diagnose erzeugten Menge der Diagnosekandidaten sowie deren Schnittstellenbelegungen auf.

In der Praxis existiert viel heuristisches Wissen darüber, welche Fehler in den einzelnen Bauteilen am häufigsten auftreten. Informationen hierzu finden sich bei Feicht (1988), Lemmen (1991) und in Anhang B. Anhang B gibt Beispiel relevanter Fehler, die mit Hilfe von Regeln dargestellt werden. So ist beispielsweise bei Zylindern ein häufiger Fehler, daß die Dichtungen stark verschlissen sind, weshalb aufgrund der deutlich erhöhten Leckage ein Kraft- und/oder Geschwindigkeitsabfall zu beobachten ist. Für die Belegung der qualitativen Exergien in Form einer Black–Box stellt sich der Zusammenhang mit den Bild 3.3 dargestellten Anschlußbezeichnungen wie folgt dar:

$$\begin{aligned} QE(\text{gate1}) = 3 \wedge QE(\text{gate2}) = 0 \wedge QE(\text{gate3}) = -2 & \vee \\ QE(\text{gate1}) = 3 \wedge QE(\text{gate2}) = 2 \wedge QE(\text{gate3}) = 3 & \vee \\ QE(\text{gate1}) = 2 \wedge QE(\text{gate2}) = 3 \wedge QE(\text{gate3}) = 3 & . \end{aligned} \quad (4.1)$$

Die Diagnosekandidatenuordnung geschieht auf Grund der Schnittstellenbelegung mit den qualitativen Exergien der Beschreibung der Komponenten in Form einer Black–Box. Hierfür findet die heuristische Klassifikation Anwendung, wobei

γ Neu–Variationen der Statusvariablen mit jeweils

ζ Fehlermodellen und

θ als deren Konfidenz gegeben sind.

Eine der γ Neu–Variationen der Statusvariablen, die eine Belegung einer Komponente an deren Schnittstellen wie eine Black–Box aufweist, welche durch kein Modell korrekten Verhaltens erklärt werden kann, liefert für diese Belegung ζ Fehlermodelle. Jedem der ζ Fehlermodelle ist wiederum jeweils ein Konfidenzfaktor θ , mit $\theta \in [0, 1] \subset \mathbb{R}$, zugeordnet (vgl. Bild 2.1). Die Fehlermodelle mit den höchsten Konfidenzfaktoren θ sind die wahrscheinlichsten Diagnosen und werden in dieser Reihenfolge ausgegeben.

Bei der Generierung der Konfidenzfaktoren wird zum einen berücksichtigt, daß die Ausfallwahrscheinlichkeiten der Komponenten untereinander verschieden sind, und zum anderen, daß das Fehlen einer Fehlervoraussetzung die Wahrscheinlichkeit des betreffenden Fehlers reduziert.

5 Zusammenfassung

Das wissensbasierte System ^{art}*deco* unterstützt und automatisiert die Konfigurationsprüfung mechatronischer, hier speziell hydraulischer bzw. elektrohydraulischer Systeme. Auf diesem Wissen und dessen Verarbeitungsmöglichkeiten baut die mehrstufige Diagnose auf, welche grob in die Bereiche der globalen und der lokalen Diagnose untergliedert wird.

Die globale Diagnose generiert die Diagnosekandidaten, die später in der lokalen Diagnose weiter untersucht und eingegrenzt werden. Ziel der globalen Diagnose ist es, die lokale Diagnose von Strukturuntersuchungen unabhängig zu machen und dieser eine geeignet kleine Zahl von Diagnosekandidaten sowie alle notwendigen Symptome und sonstigen Informationen zur Verfügung zu stellen. Hierzu werden qualitativ modellbasierte Methoden der Beschreibung und Verarbeitung von Wissen benutzt. Neu definierte qualitative Exergien werden mittels Komponentenmodellen korrekten Verhaltens durch den Schaltkreis propagierte. Informationsdefizite können auf diese Weise festgestellt werden und nach deren Beseitigung werden neue Zustandsvariationen bzw. qualitative Exergiebelegungen zu den Komponentenschnittstellen bestimmt, womit entsprechende Diagnosekandidaten gekennzeichnet sind.

Die auf den durch die globale Diagnose generierten Diagnosekandidaten operierende lokale Diagnose verwendet Methoden der heuristischen Klassifikation. Diese Standardmethoden aus dem Bereich der Forschung in der künstlichen Intelligenz, auf die hier nicht eingegangen sondern auf die Literatur verwiesen wird, werden mit der Erweiterung um Konfidenzfaktoren eingesetzt.

Mit diesem Ansatz soll nicht nur das grundlegende Ziel eines jeden Diagnosesystems, nämlich die praxisrelevanten Fehler detektieren zu können erreicht werden. Darüberhinaus soll diese für frei konfigurierbare hydraulische Systeme beliebiger Struktur, bei hoher Effizienz der Wissensrepräsentation, -wartung und -verarbeitung möglich sein.

6 Literaturverzeichnis

- Baehr, H. D.** 1992. *Thermodynamik*. Hannover: Springer.
- Bauer, M.** 1992. *Problemadäquate Diagnosestrategien*. Paderborn: Dissertation. Universität GH Paderborn.
- Feicht, F. X.** 1988. *Der Hydrauliktrainer Band 3*. Lohr a. Main: Mannesmann Rexroth GmbH.
- Frank, P. M.** 1994. Diagnoseverfahren in der Automatisierungstechnik. *Automatisierungs-technik at 2/94*. Übersichtsaufsatz.
- Freyermuth, B.** 1993. *Wissensbasierte Fehlerdiagnose am Beispiel eines Industrieroboters*. VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 8, Nr. 315. Düsseldorf: VDI–Verlag.
- Hoffmann, M.** 1993. *Algorithmen zur Verarbeitung von topologischen Informationen in Netzwerken*. Diplomarbeit. Fachbereich Methematik. Universität – GH – Duisburg.
- Isermann, R.** 1984. Process Fault Detection Based on Modeling and Estimation Methods – A Survey. *Automatica* 20. 387–404.
- Lemmen, M.** 1994b. *Konstruktive Änderung eines pneumatischen Fördersystems zur Erkennung und Beseitigung von Stopfern*. Studienarbeit. MSRT. Universität – GH – Duisburg.
- Lemmen, R.** 1991. *Akquisition und Analyse von Wissen für die Inbetriebnahme von hydraulischen translatorischen Antrieben*. Diplomarbeit. MSRT. Universität – GH – Duisburg
- Lemmen, R.** 1992. *Modellbasierte Prüfung hydraulischer Anlagen*. Forschungsbericht 7/92. MSRT. Universität – GH – Duisburg.
- Lemmen, R.** 1994a. *Dynamische Funktionsprüfung hydraulischer Anlagen mit artdeco*. Forschungsbericht 6/94. MSRT. Gerhard Mercator Universität Duisburg GH.
- Patton R. J., Frank P. M. and Clark R. N.** 1989. *Fault Diagnosis in Dynamik Systems*. Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall.
- Puppe, F.** 1988. *Einführung in Expertensysteme*. Berlin: Springer.
- Puppe, F.** 1990. *Problemlösungsmethoden in Expertensystemen*. Berlin: Springer.
- Schwarz, H.** 1991. *Nichtlineare Regelungssysteme: Systemtheoretische Grundlagen*. München: Oldenbourg.
- Struß, P.** 1992. *What's in SD? Towards the theory of modeling for diagnosis*. San Mateo: In Hamscher W., de Kleer J. and L. Console (eds), Readings in Modelbased Diagnosis.
- Suermann, M.** 1994. *Wissensbasierte Modellbildung und Simulation von hydraulischen Schaltkreisen*. Diplomarbeit. Fachgebiet Praktische Informatik. Universität – GH – Paderborn.

A Definitionen und Begriffserklärungen

Dieser Anhang erläutert die folgenden Begriffe, wie sie bei der mehrstufigen Diagnose Verwendung finden.

Definition A.1 Parameter und Statusvariablen

Parameter beschreiben ein System und sind in der von den Statusvariablen beliebig nichtlinear abhängigen Systembeschreibung immer konstant. Eine Änderung der Parameter bedeutet eine Systemänderung. Die Änderung der Statusvariablen überführt das System dagegen in einen anderen Systemstatus, ändert es aber nicht.

□

Definition A.2 Vektor der Statusvariablen \mathbf{z} bzw. $\mathbf{z}(t)$

Der Vektor der Statusvariablen \mathbf{z} bzw. $\mathbf{z}(t)$ enthält alle Statusvariablen des Gesamtsystems und setzt sich aus den Vektoren der Statusvariablen \mathbf{z}_C bzw. $\mathbf{z}_C(t)$ der einzelnen Komponenten zusammen. Die aus dem Bereich der Zustandsraumdarstellung bekannten Größen innere Systemzustände \mathbf{x} , Eingangsgrößen \mathbf{u} , Ausgangsgrößen \mathbf{y} sowie Störgrößen \mathbf{z} ² sind im Vektor der Statusvariablen \mathbf{z} bzw. $\mathbf{z}(t)$ enthalten. Man unterscheidet zwischen dem Vektor der statischen Statusvariablen \mathbf{z} (Definition A.4) und dem Vektor der dynamischen Statusvariablen $\mathbf{z}(t)$ (Definition A.5).

□

Definition A.3 Hebbare Unstetigkeit

Eine Funktion $g(r)$, $r \in \mathbb{R}$ ist nach (Bronstein und Semendjajew 1985) dann hebbare unstetig, wenn

$$\lim_{r \rightarrow r_0} = \beta, \quad \beta \in \mathbb{R} \quad (\text{A.1})$$

sowohl als linksseitiger und rechtseitiger Grenzwert existiert.

□

Definition A.4 Statisch

Ein System heißt im Sinne von ^{art}deco statisch, wenn das Zeitverhalten der statischen Statusvariablen \mathbf{z} durch i. allg. nichtlineare Gleichungen beschrieben wird. Dabei sind $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ stetige und/oder hebbare unstetige (A.3) Funktionen von $\sum_{j=1}^m k_j$ unabhängigen Statusvariablen

$$\mathbf{z} = \mathbf{f}(\mathbf{z}) \quad , \quad (\text{A.2})$$

wobei \mathbf{z} nicht notwendigerweise unabhängig von der Zeit t sein muß (ausführliche Erklärung s.u.). $\mathbf{f}(\mathbf{z})$ heißt Vektorfeld von \mathbf{z} (Schwarz 1991).

² \mathbf{z} wird im folgenden für den Vektor der Statusvariablen und nicht für die Störgröße, die in \mathbf{z} enthalten ist, verwendet.

□

Diese Definition schließt auch Statusänderungen, die von der Zeit abhängen mit ein. Als Beispiel sei hier der mit konstanter Geschwindigkeit ($\dot{x} = \text{const.}$) verfahrende Zylinder genannt, für den $x = \beta \cdot t$ gilt. Weiter beinhaltet diese Definition auch Statusverläufe, die hebbare unstetig und/oder nicht stetig differenzierbar sind, welche in der Praxis häufig vorkommen (Bild A.1) und somit nicht analytisch³ sind.

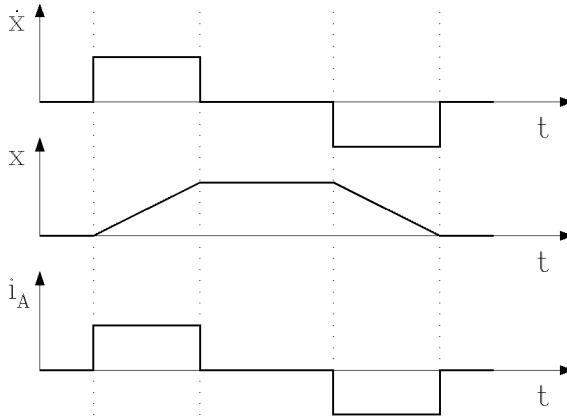


Bild A.1: Ausschnitt aus dem Funktionsdiagramm eines statischen Statusverlaufs

Eine strengere Definition in dem Sinne, daß alle zeitveränderlichen Größen konstant und deren Ableitungen nach der Zeit t somit Null sind (Föllinger 1992), ist hier nicht zulässig. Die Funktionen f repräsentieren sowohl das Verhalten der Einzelkomponenten als auch deren Kopplungen zum Gesamtsystem.

Definition A.5 Schnittstellen TC bzw. BC

Strukturen werden im System *ardecō* aus Komponenten (Def. A.6) und Schnittstellen aufgebaut. Es werden Tri-Connections TC (Bild A.2 a) und Bi-Connections BC (Bild A.2 b) unterschieden, die die Menge der Statusvariablen \mathbb{Z} an den Anschlüssen einander geeignet zuordnen.

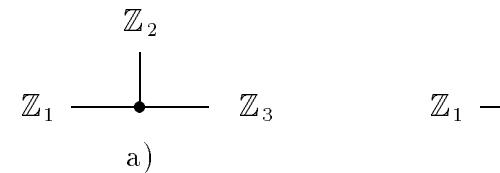


Bild A.2: Tri- und Bi-Connections (Schnittstellen)

Dabei müssen Potential- und Bilanzgleichungen erstellt werden.

□

³Es existiert keine Approximation durch eine konvergente Taylorreihe an der Unstetigkeitsstelle (Schwarz 1991)

Definition A.6 Komponenten

Das Verhalten eines Gesamtsystems wird in ^{art}*deco* durch lokale Verhaltensbeschreibungen T der im System enthaltenen Komponenten bestimmt. Die lokalen Verhaltensbeschreibungen T

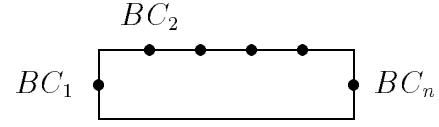


Bild A.3: Komponente und zugehörige Schnittstellen

bilden die Statusvariablen der Schnittstellen einer Komponente aufeinander ab. Es gilt

$$\vec{\mathbb{Z}}(BC) = \vec{T}(\vec{\mathbb{Z}}(BC)) , \quad (\text{A.3})$$

wobei anzumerken ist, daß eine Komponente nur Bi-connections aufweist. \square

Definition A.7 Qualitative Exergie

Das durch die Statusvariablen des Systems zur Verfügung stehende Maß an Arbeits- bzw. Informationsvermögen wird als qualitative Exergie bezeichnet. \square

Diese wird durch den Bezug der realen statischen (Def. A.4) auf die von ^{art}*deco* berechneten statischen Statusvariablen des Systems gebildet. Für bekannte (z.B. meßbare) reale statische Statusvariablen \mathbb{Z}_{real} der Schnittstelle einer Komponente (gate)⁴ gilt:

$$QE(\text{gate}) = \prod_{j=1}^{|\mathbb{Z}|} QE \left(\frac{\mathbb{Z}_{j,real}(\text{gate})}{\mathbb{Z}_j(\text{gate})} \right) . \quad (\text{A.4})$$

Die qualitative Exergie wird in die Stufen

$$\begin{aligned} QE = 3 &\approx 100 \% \quad (\text{Arbeits-/Informationsvermögen}) \\ QE = 2 &\approx 90 \% \quad (\text{Arbeits-/Informationsvermögen}) \\ QE = 1 &\approx 10 \% \quad (\text{Arbeits-/Informationsvermögen}) \\ QE = 0 &\approx 0 \% \quad (\text{Arbeits-/Informationsvermögen}) \end{aligned}$$

eingeteilt. Diese Definition ist im wesentlichen mit der in der Thermodynamik üblichen (Baehr 1992) konsistent.

⁴Hydraulische Statusvariablen \mathbb{Z} sind üblicherweise: p und Q ;
mechanische Statusvariablen \mathbb{Z} sind üblicherweise: F und v oder M und n ;
elektrische Statusvariablen \mathbb{Z} sind üblicherweise: U oder I bzw. U und I .

Definition A.8 Qualitative Algebra im Sinne von $\text{``art''} deco$

Die qualitative Algebra QA in $\text{``art''} deco$ bildet sich aus der qualitativen Exergie QE (Def. A.7), den Statusvariablen \mathbb{Z} und \mathbb{Z}_{real} sowie den lokalen Komponentenbeschreibungen T_Q (Def. A.9), wobei für Komponenten und Schnittstellen $TC \vee BC$ die folgenden Operationen gültig sind:

- Komponenten:

$$\beta + QE \implies QE \quad \text{mit } \beta \in \mathbb{R} \quad (\text{A.5})$$

$$\beta QE \implies QE \quad \text{mit } \beta \in \mathbb{R}; \beta \neq 0 \quad (\text{A.6})$$

$$0 QE \implies 0 \quad (\text{A.7})$$

$$QE_1 QE_2 \implies \min(QE_1 \cup QE_2) \quad (\text{A.8})$$

$$QE_1 + QE_2 \implies \max(QE_1 \cup QE_2) \quad (\text{A.9})$$

- Schnittstellen:

$$QE_1 = QE_2 = (QE_3)^5 \quad (\text{A.10})$$

Für Operationen von Größen $\in \mathbb{R}$ untereinander gelten die bekannten Rechenvorschriften der Größen $\in \mathbb{R}$.

□

Weiterführende Erläuterungen zur qualitativen Algebra finden sich in Unterabschnitt 3.1.

Definition A.9 Qualitative lokale Komponentenbeschreibung T_Q

Die qualitative lokale Komponentenbeschreibung T_Q bildet die qualitativen Exergien QE der Schnittstellen ($TC \vee BC$) einer Komponente aufeinander ab.

□

Es gelten die Zusammenhänge:

$$QE(TC_j \vee BC_j) = QE(TC_j \vee BC_j) \quad \forall \quad T_Q(TC_j \vee BC_j) \in .blocked. \quad (\text{A.11})$$

bzw.

$$\vec{QE}(TC_j \vee BC_j) = \vec{T}_Q(QE(TC_j \vee BC_j)) \quad \forall \quad \vec{T}_Q(TC_j \vee BC_j) \in .connected. \quad (\text{A.12})$$

Definition A.10 Lokale Propagierung

Die lokale Propagierung ist ein Constraint(Ebner 1992)–Verarbeitungsverfahren, das auf einer Ein–Schritt–Deduktion aufbauend, auch Abhängigkeiten und Alternativen verarbeiten kann.

⁵nur für Tri-Connections

□

Die lokale Propagierung lässt sich durch folgende Verarbeitungsfolge beschreiben:

Gegeben ist die Menge der globalen bekannten Statusvariablen $\mathbb{Z}_{k,j}$ und die Menge der globalen unbekannten Statusvariablen $\mathbb{Z}_{u,j}$ zum Konklusionszustand j mit $j \in \mathbb{N}$. Diese lassen sich untergliedern in die Mengen der lokalen bekannten Statusvariablen $\mathbb{Z}_{k,i}$ und der lokalen unbekannten Statusvariablen $\mathbb{Z}_{u,i}$ der Komponenten mit $i \in \mathbb{N}$, $i = 1, \dots, m$, $m = \text{Anzahl der Komponenten}$, wobei gilt:

$$\mathbb{Z}_{k,j} = \bigcup_{i=1}^m (\mathbb{Z}_{k,j})_i \quad (\text{A.13})$$

und

$$\mathbb{Z}_{u,j} = \bigcup_{i=1}^m (\mathbb{Z}_{u,j})_i \quad (\text{A.14})$$

mit $j \in \mathbb{N}$.

Für jede lokale Komponentenbeschreibung T_i existiert die Menge \mathbb{C}_i der ausführbaren Konklusionsmöglichkeiten (Prämissen erfüllt), mit

$$|\mathbb{C}_i| = |(\mathbb{Z}_{u,j})_i| \quad , \quad (\text{A.15})$$

die den Konklusionszustand von j nach $j + 1$ überführen. Dies wird solange durchgeführt, bis für ein $j = q$, $q \in \mathbb{N}$, gilt:

$$\mathbb{Z}_{uq} = \emptyset \quad \vee \quad \bigcup_{i=1}^m \mathbb{C}_i = \emptyset \quad . \quad (\text{A.16})$$

Für $Z_{uq} = \emptyset$ folgt die vollständige, für $Z_{uq} \neq \emptyset \wedge \bigcup_{i=1}^m \mathbb{C}_i = \emptyset$ folgt die partielle Lösung. Eine Reduzierung der Anzahl der global ausführbaren Konklusionen gegenüber der Summe der lokal ausführbaren Konklusionen ergibt sich aufgrund von strukturellen Abhängigkeiten, die sich mittels der lokalen Propagierung nicht untersuchen lassen. Eine detaillierte Beschreibung der in ^{art}*deco* verwendeten lokalen Propagierung zur statischen Funktionsprüfung liefert Hoffmann (1993).

Definition A.11 Informationswurzel IR

Die Information bzw. Informationen, deren Belegung in einem unterbestimmten Constraint-System zu einer vollständigen Bestimmtheit desselbigen führt, heißt, für ihren minimalen Informationsgehalt Informationswurzel.

□

Begriffserklärungen

Weitere Hinweise zu den Begriffen der Fehlerdiagnose finden sich u.a. in Lemmen (1994b).

Fehler: Unter einem Fehler versteht man die unerlaubte Abweichung von einer charakteristischen Eigenschaft, welche zu einer Unfähigkeit führt, die vorgesehene Aufgabe zu bewerkstelligen (Isermann 1984).

Fehleranalyse: ist die Bestimmung der Fehlerart und Fehlerursachen, so daß Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können (Frank 1994).

Fehlerdetektion: Eine Fehlermeldung soll ausgegeben werden, wenn bestimmte meßbare oder auch nicht meßbare abgeschätzte Variablen nicht mehr innerhalb ihrer Toleranzen liegen (Isermann 1984).

Fehlerdetektion ist die Entdeckung des Zeitpunktes des Auftretens von Unregelmäßigkeiten (Fehlern) in Funktionseinheiten der Anlage (Prozeß), die zu einem unerwünschten Verhalten der Gesamtanlage führen, trotz vorhandener unbekannter Eingänge (Frank 1994).

Fehlerisolation: ist die Lokalisierung der Fehler (Frank 1994).

Konsistente Diagnose: Eine Diagnose ist dann konsistent, wenn alle beobachteten Symptome aus ihr abgeleitet werden können.

Monitoring = Fehlerdetektion.

Residuum: Ein Residuum ist die Differenz zwischen der aktuellen (gemessenen) und der nominalen (Referenz-)Größe (Frank 1994).

Symptom: Unter einem Symptom versteht man die erkennbaren Auswirkungen eines Fehlers (Isermann 1984).

Schlußfolgerungsmechanismen (nach Bauer 1992):

Deduktion	$\forall x (P(x) \rightarrow Q(x)) \wedge P(a)$	\Rightarrow	$Q(a)$
Induktion	$P(a) \wedge Q(a)$	\Rightarrow	$\forall x (P(x) \rightarrow Q(x))$
Abduktion	$\forall x (P(x) \rightarrow Q(x)) \wedge Q(a)$	\Rightarrow	$P(a)$

B Auswahl durch Regeln beschriebener Fehler

Im folgenden wird eine Auswahl von durch Regeln beschriebenen Fehlern geliefert. Folgerungen werden dabei durch die Zeichen – (WENN) und \Rightarrow (DANN) abgekürzt. Die durch Befragung von Inbetriebnahmepersonal (Lemmen 1991) ermittelten Fehlerhäufigkeiten sind durch die Zeichen (++) , (+), (o), (–), (--) gekennzeichnet.

Für eine Kandidatenuordnung muß noch eine Beschreibung der Schnittstellenbelegungen in Form einer Black–Box mit qualitativen Exergien hinzukommen.

Pumpe

- Kavitation (+)
 - \Rightarrow Volumenstrom sinkt.
 - \Rightarrow Verschleiß und Beschädigung des Bauteils.
 - \Rightarrow Schmutzentstehung.
 - \Rightarrow örtliche Medienüberhitzung \rightarrow Medium altert \rightarrow Korrosion wird beschleunigt.
- Luft in der Pumpe (o)
 - \Rightarrow Förderung von Luft in andere Systemteile.
 - \Rightarrow Volumenstrom sinkt.
 - \Rightarrow Luftgehalt im Öl steigt \rightarrow Kavitationsneigung nimmt zu.

Öltemperaturregelung

- Kühler defekt (+)
 - \Rightarrow Wasser und Luft ins Druckmedium (Säuregehalt steigt) \rightarrow Korrosion und Kavitation nehmen zu.
- Heizer defekt (--)
 - \Rightarrow Medium zu zäh \rightarrow Reibung und Verschleiß (Dichtungen) steigen.
- Heizer zu stark (o)
 - \Rightarrow Medium altert, verharzt \rightarrow Korrosion, Schmutz (feste Ausflockungen) nehmen zu.

Ölfilter

- Filter verstoptf
 - $\Rightarrow R_h$ steigt (über $R_{h_{soll}}$) und Filterwirkung sinkt.
- Filter defekt (Riß, z. B. infolge der Verstopfung)
 - $\Rightarrow R_h$ sinkt unter $R_{h_{soll}}$ und Schmutz wird freigesetzt.

Ventil

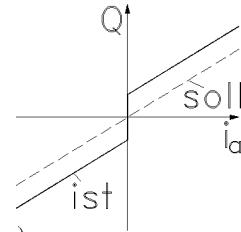
- Ventilfilter verschmutzt (++)
 - \Rightarrow hydraulischer Widerstand R_h wird größer.
 - \Rightarrow bei p_0 und p_T const.: $Q_{ist} < Q_{soll} \rightarrow V_{Zist} < V_{Zsoll}$
 - \Rightarrow bei Q_0 const.: $|p_A - p_B|_{ist} < |p_A - p_B|_{soll} \rightarrow F_{Zist} < F_{Zsoll}$
 - \Rightarrow Ventil wird träger.
- Ventil verstoptf (o) (z.B. Leitungen und Düsen bei mehrstufigen Ventilen)
 - \Rightarrow a) festes R_h für beliebiges i_a (weniger häufig).
 - b) $i_a = 0$ (.blocked.) für beliebiges i_a (häufiger).
- elektrische Ventilansteuerung (++) oder Ventilmagnet (–) defekt
 - \Rightarrow Verhalten wie bei $i_a = 0$ (.blocked.)
- Ventilfederbruch (+)
 - \Rightarrow Verhalten wie bei $i_{a_{ist}} = i_a \pm i_{zusatz}$.
- Ventilblockung (o) (durch lange Sillstandszeit \rightarrow hohe Reibung)
 - \Rightarrow Verhalten wie bei $i_a = 0$ für beliebiges i_a .
 - \Rightarrow Verhalten wie bei diskreten i_a für kontinuierliche i_a .
- Rückführung / Lageregelung des Ventilkolbens defekt (o)
 - \Rightarrow Verhalten von $\pm i_{a\ max}$ für beliebiges i_a .
- Meßwertaufnehmer (Druck) driften (+)
 - $\Rightarrow R_{h_{ist}} \neq R_{h_{soll}}$ für const. i_a .

- Dicht- und Steuerkantenverschleiß (+) (z. B. durch Kavitation und Schmutz)

⇒ Leckagen steigen,

Güte der Positionierbarkeit sinkt,

$R_h(i_a)_{ist} < R_h(i_a)_{soll}$: Volumenstromkennlinie wandelt sich in Richtung negativer Überdeckung.



- Ventilkorrosion (o) (durch aggressives (altes) Druckmedium)

⇒ Reibung nimmt zu (s. Ventilblockung).

⇒ Schmutz und Teilchen ins System (s. Ventilfilter verschmutzt Ventil verstopt Schmutz im Zylinder).

⇒ vgl. Dicht- und Steuerkantenverschleiß.

- Kavitation (+)

⇒ Volumenstrom sinkt.

⇒ Steuerkantenverschleiß und Schmutzentstehung steigen.

Leitung



- Leitung o. k.

⇒ $\begin{cases} Q(gate1) = -Q(gate2) \\ p(gate1) = -p(gate2) \end{cases}$ bzw. umgekehrt

- $|neg(Q(gate i))| < |pos(Q(gate j))|$ (+)

⇒ Leitung Leck mit Ölausfluß

$p(gate1) = p(gate2) =$ (klein)

- $|neg(Q(gate i))| > |pos(Q(gate j))|$ (--)

und $p(gate1) = p(gate2) = 0$

⇒ Leitung Leck mit Lufteinsaugung

Luft_im_Öl

Luft_im_System

Zylinder

- Luft im Zylinder (o)

Ursache: Wenn $p_A, p_B < p_{Umgeb.}$ → Lufteinsaugen

bzw. $p_A, p_B \approx p_{Umgeb.}$ → Freisetzen gelöster Luft.

⇒ Beschädigung der Dichtungen → (Leckage und Reibung nehmen zu).

- ⇒ Steifigkeit sinkt → keine genaue Positionierung; niederfrequente Schwingneigung.
- Schmutz im Zylinder (o) und Dichtungsverschleiß (++)
Ursache: Auch durch Kavitation lösen sich Teilchen ab und verbleiben im Zylinder.
 - ⇒ Erhöhung von Leckage und Reibung
 - Stick-Slip: Nur noch diskrete, keine kontinuierliche Positionierung.
- Beschädigung durch Überlast (–)
 - ⇒ Knickung der Kolbenstange.
 - ⇒ Riß des Zylinders, Platzen der Dichtungen.
- Kavitation (o)
 - ⇒ Volumenstrom sinkt.
 - ⇒ Verschleiß der Zylinderanschlüsse; Schmutzentstehung.
 - ⇒ Luftentstehung im Zylinder.