

**5. Workshop
Automatisierungstechnische
Verfahren für die Medizin vom
15.-16. Oktober 2004 in
Saarbrücken**



**„Methoden zur modellgestützten Diagnose: von
technischen zu medizinischen Anwendungen“**

R. Isermann

Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Darmstadt, Deutschland

E-Mail: risermann@iat.tu-darmstadt.de

Band: „Tagungsband, Automed 2004“
Editors: W. I. Steudel
ISBN: 3-00-013509-X
Pages: 81-84

Methoden zur modellgestützten Diagnose: von technischen zu medizinischen Anwendungen

R. ISERMANN

Institut für Automatisierungstechnik, Technische Universität Darmstadt
Landgraf-Georg-Straße 4, 64283 Darmstadt

E-Mail: risermann@iat.tu-darmstadt.de

EINLEITUNG

Bei technischen Prozessen besteht die Aufgabe der Überwachung darin, den gegenwärtigen Zustand des Prozesses anzuzeigen, unerwünschte oder unerlaubte Zustände zu melden und entsprechende Maßnahmen einzuleiten, um den weiteren Betrieb zu erhalten und um Schaden oder Unfälle zu verhindern. Hierzu wurden in den letzten 15 Jahren mehrere neue Methoden zur Fehlererkennung und Fehlerdiagnose entwickelt [Isermann1996], [Gertler1998], [Patton, Frank, Clark 2000], [Isermann2005]. Dieser Beitrag gibt eine kurze Übersicht mit Bezug auf technische Prozesse und einige wenige medizinische Anwendungen und soll zu einer Diskussion zum Einsatz dieser Methoden in der Medizintechnik anregen.

METHODEN DER FEHLER- ERKENNUNG UND -DIAGNOSE FÜR TECHNISCHE PROZESSE

Abb. 1 zeigt ein allgemeines Schema einer wissensbasierten Fehlererkennung und -diagnose. Man unterscheidet die Fehlererkennung durch Erzeugung analytischer und heuristischer Symptome und die Fehlerdiagnose mit Klassifikation und Inferenzmethoden.

a) Analytische Symptomerzeugung

Das quantifizierbare Wissen über den Prozess wird verwendet, um analytische Informationen zu erzeugen. Hierzu wird auf der Grundlage gemessener Variablen eine Datenverarbeitung durchgeführt, um zunächst *Kennwerte* (charakteristische Größen) zu bilden durch:

- **Grenzwert-Überwachung** direkt messbarer Signale. Kennwerte sind überschrittene Signaltoleranzen.
- **Signalanalyse** direkt messbarer Signale durch Bildung von Signalmodellen, wie Korrelationsfunktionen, Frequenzspektren, ARMA (auto regressive moving average). Kennwerte sind z. B. Varianzen, Amplituden, Frequenzen.
- **Prozessanalyse** durch Verwendung mathematischer Prozessmodelle in Verbindung mit Para-

meterschätzmethoden, Zustandsschätzmethoden und Paritätsgleichungen. Kennwerte sind Parameter, Zustandsgrößen oder Residuen.

In manchen Fällen können dann aus diesen Kennwerten besondere *Merkmale* ermittelt werden, z. B. physikalisch definierte Prozess-Koeffizienten oder gefilterte oder transformierte Residuen. Diese Merkmale werden dann mit den normalen Merkmalen des fehlerlosen Prozesses verglichen. Hierzu werden Methoden zur Erkennung signifikanter Änderungen eingesetzt. Die resultierenden Änderungen der Merkmale bilden dann die *analytischen Symptome*.

b) Heuristische Symptome

Als Ergänzung zur analytischen Symptomerzeugung können dann aus der qualitativen Information, über die menschliche Bediener verfügen, heuristische Symptome gebildet werden. Beobachtung und Inspektion des Prozesses erlauben z. B. heuristische Angaben in Form von bestimmten Geräuschen, Schwingungen, Verschleißmarken usw. Die bisherige Prozessgeschichte in Form von Wartung, Reparaturen, früheren Fehlern, Standzeiten, Belastungsmaßen bildet eine weitere Quelle heuristischer Information, ebenso statistische Daten über denselben oder ähnliche Prozesse. Auf diese Weise lassen sich heuristische Symptome bilden, die als linguistische Variable (z. B. klein, mittel, groß) oder als unscharfe Zahlenwerte angebar sind.

c) Fehlerdiagnose

Die Aufgabe der Fehlerdiagnose besteht aus der Bestimmung des Typs, der Größe und des Ortes des Fehlers und des Zeitpunktes seiner Erkennung auf der Grundlage der analytischen und heuristischen Symptome. Eine erste Möglichkeit besteht in der Verwendung von Klassifikationsmethoden, bei denen die Änderungen in mehrdimensionalen Räumen bestimmt werden. Ein anderer Weg ist die Nutzung von in der Struktur bekannten Fehler-Symptom-Kausalitäten. Dann kann man diese heuristische Prozesskenntnis dazu verwenden, Methoden des diagnostischen Schließens anzuwenden. Schließlich erfolgt eine Fehlerentscheidung über den möglichen Fehler (Die hier verwendeten Begriffe lehnen sich weitgehend an die Richtlinien VDI/VDE 3342, DIN 25424 und DIN 40042 an).

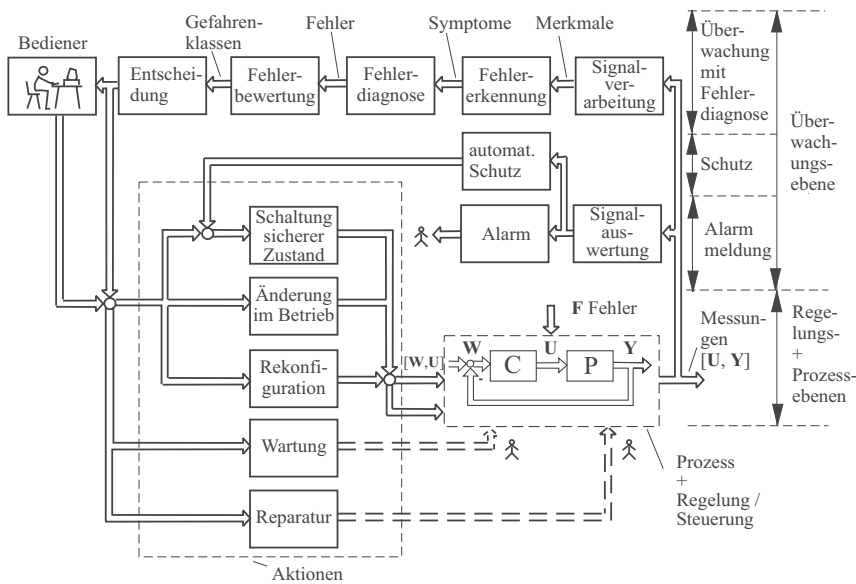


Abb. 1: Schema für die verschiedenen Überwachungsmethoden

MODELLGESTÜTZTE METHODEN DER FEHLERERKENNUNG

Um einen tieferen Einblick in den Prozess zu erhalten, werden die im statischen und dynamischen Prozessverhalten vorhandenen Abhängigkeiten verschiedener messbarer Signale durch Einsatz von mathematischen Prozessmodellen ausgenutzt. Dabei werden Methoden der Fehlererkennung aufgrund von Parameterschätzung, Paritätsgleichungen und Zustandsgrößenschätzung bzw. -beobachtern eingesetzt, Abb. 2. Der Gesamtprozess besteht aus Aktoren, dem eigentlichen physikalischen oder chemischen Prozess und den Sensoren. Als Messgrößen stehen in der Regel die Eingangsgrößen U und die Ausgangsgrößen Y (mit Störtermen N) zur Verfügung. Aufgrund dieser Messgrößen sollen Fehler in den Aktoren, im Prozess und den Sensoren erkannt werden. Eine modellgestützte Fehlererkennung vergleicht den Prozess mit einem Prozessmodell und erzeugt mit verschiedenen Methoden Merkmale. Weichen diese Merkmale vom normalen Verhalten ab, dann bilden sich Symptome aus, Abb. 2. Wichtig sind dabei die zur Verfügung stehenden Signale wie in Abb. 3 gezeigt.

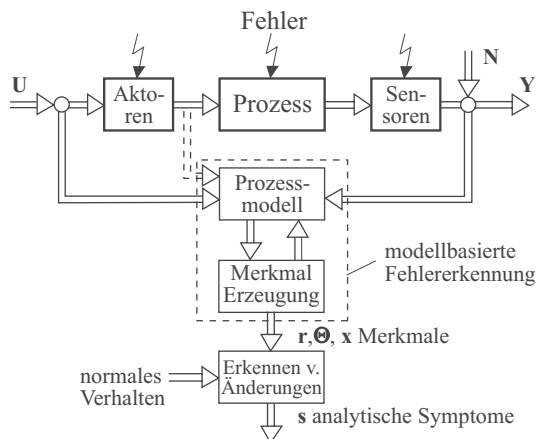


Abb. 2: Schema für die modellbasierte Fehlererkennung (Erzeugung analytischer Symptome)

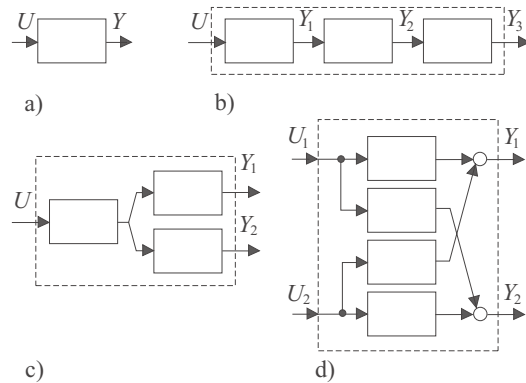


Abb. 3: Prozessstrukturen mit verschiedenen Wirkungszusammenhängen. a) Einkanaliger Prozess (SISO), b) einkanaliger Prozess mit Zwischengrößen, c) Mehrkanaliger Prozess mit einem Eingang (SIMO), d) Mehrkanaliger Prozess (MIMO)

Je mehr Signale zwischen Ein- und Ausgangsmessgrößen zur Verfügung stehen, desto detaillierter wird die Fehlererkennung und -diagnose. Bei der Modellbildung von Fehlern entscheidet man

- sprungförmige Fehler (abrupt),
- driftförmige Fehler (allmählich),
- intermittierende Fehler (sporadisch).

Diese Fehler können die gemessenen Variablen *additiv* ändern oder *multiplikativ* [Isermann1996]. *Prozessmodellgestützte* Methoden der Fehlererkennung sind z. B.

- Parameterschätzung mit statischen oder dynamischen Modellen,
- Paritätsgleichungen,
- Zustandsgrößenbeobachter und Kalman-Filter,

s. Tab. 1 und 2. Symptome sind dann Änderungen von Parametern, Residuen zwischen Prozessmodell und Prozess oder interne Zustandsgrößen. *Signalmodellgestützte* Methoden der Fehlererkennung werten die in einem einzelnen Messsignal enthaltenen harmonischen oder regel-

losen Anteile aus durch Fourier oder Korrelationsanalyse bei stationärem Verlauf oder z. B. Waveletanalyse bei impulsförmigem Verlauf. Symptome sind z. B. Änderungen von Amplituden oder charakteristischen Frequenzen.

Tab.1: Parameterschätzmethoden für dynamische Prozesse

Minimierung des Gleichungsfehlers	Minimierung des Ausgangsfehlers
Verlustfunktion: $V = \sum e^2(k)$ Methode: • nichtrekursiv, direkt $\hat{\Theta} = [\Psi^T \Psi]^{-1} \Psi^T y$ • Rekursiv $\hat{\Theta}(k+1) = \hat{\Theta}(k) + \gamma(k)e(k+1)$	$V = \sum e'^2(k)$ • nichtdirekte, iterative Parameteroptimierung $\hat{\Theta}(v+1) = \hat{\Theta}(v) + \Gamma(v) \frac{\partial V}{\partial \Theta}(v)$
Symptome: • Modellparameter $\Delta \hat{\Theta}(j) = \hat{\Theta}(j) - \Theta_0$ • Prozesskoeffizienten $\hat{p} = f^{-1}[\Theta]$ $\Delta p(j) = \hat{p}(j) - p_0$	

Tab.2: Paritätsgleichungen für dynamische Prozesse

Ein-/Ausgangsmodell	Zustandsgrößenmodell
Paritätsgleichungen: $r(s) = A_M(s)y(s) - B_M(s)u(s)$ $r(t) = \Psi_a^T(t) \Theta_{Ma} - \Psi_b^T(t) \Theta_{Mb}$	$Y_F(t) = T X(t) + Q U_F(t)$ $W Y_F(t) = W T x(t) + W Q U_F(t)$ $W T = 0$ $r(t) = W(Y_F(t) - Q U_F(t))$
$B_M(s) = b_0 + b_1 s + \dots + b_m s^m$ $A_M(s) = 1 + a_1 s + \dots + a_n s^n$ $\Theta_{Mb}^T = [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_m]$ $\Theta_{Ma}^T = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n]$ $\Psi_b^T = [u^{(1)} \ u^{(2)} \ \dots \ u^{(m)}]$ $\Psi_a^T = [y^{(1)} \ \dots \ y^{(m)}]$	$D'u = [u \ u^{(1)} \ \dots \ u^{(m)}]^T = U_F$ $D'y = [y \ y^{(1)} \ \dots \ y^{(n)}]^T = Y_F$ $T = [C \ CA \ CA^2 \ \dots]^T$ $Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots \\ CB & 0 & 0 \\ CAB & CB & 0 \\ M \end{bmatrix}$

METHODEN DER FEHLERDIAGNOSE

Die Aufgabe der Fehlerdiagnose ist die Ermittlung der Fehler mit möglichst detaillierten Angaben über ihren Ort und ihre Größe. Hierzu reicht die Kenntnis analytischer Symptome im Allgemeinen nicht aus, sondern es ist auch die Verarbeitung von heuristischem Wissen erforderlich. Deshalb ist der Einsatz von Online-Expertensystemen zweckmäßig. Zunächst sind die analytischen und heuristischen Symptome in einer einheitlichen Form darzustellen. Hierzu eignen sich besonders unscharfe Mengen als fuzzy sets mit Zugehörigkeitsfunktionen (Symptom z. B. groß, mittel, klein). Der Zusammenhang zwischen den

beobachteten Symptomen und den Fehlern kann durch *Klassifikationsmethoden* (oder Mustererkennungsmethoden) experimentell „erlernt“ oder „trainiert“ werden, s. Tab. 3. Wenn jedoch der prinzipielle Zusammenhang

Fehler F \rightarrow Zwischenereignisse E \rightarrow Symptome S

bekannt ist, z. B. als kausale Verknüpfung oder Wenn-Dann-Regeln, dann lassen sich *Inferenzmethoden* (Methoden des diagnostischen „Schließens“ oder „Schlussfolgerns“ einsetzen. Da die Symptome meistens unscharfe Größen sind, eignet sich besonders das approximative Schließen mit Fuzzy-Logik [Höfling1996].

Tab.3: Methoden der Fehlerdiagnose

Klassifikationsmethoden	Inferenzmethoden
Ohne Vorwissen über Fehler-Symptom-Kausalitäten Abbildung: 	Mit Vorwissen über Fehler-Symptom-Kausalitäten Kausales Netz:
$S^T = [S_1, S_2, \dots, S_n]$ $F^T = [F_1, F_2, \dots, F_m]$	Fehler-Symptom-Baum:
Klassifikation: - statistisch - geometrisch - Neuronale Netze - fuzzy Clusters	Regeln: Wenn $\langle S_1, S_2 \rangle$ Dann $\langle E_1 \rangle$ Diagnostisches Schließen - Boolean Logik: Fakten sind binär - Approximatives Schließen - Probabilistisches Fakten sind: Verteilungsdichten - Fuzzy-logische Fakten sind: Fuzzy Mengen

ANWENDUNGEN FÜR TECHNISCHE PROZESSE

Die Methoden zur modellgestützten Fehlerdiagnose wurden bei vielen technischen Prozessen erfolgreich eingesetzt und dabei laufend weiter entwickelt, siehe z. B. [Isermann 2004], [Höfling1996], [Füssel2002]. Die Anwendungen mit künstlich erzeugten Fehlern erfolgten z. B. bei Gleichstrom- und Drehstrommotoren, pneumatischen und hydraulischen Aktoren, Werkzeugmaschinen, Robotern, Pumpen, Verbrennungsmotoren und Kraftfahrzeugen.

BISHERIGE ANWENDUNGEN IN DER MEDIZINTECHNIK

Lungenfunktionsdiagnose bei Säuglingen durch Signalmodelle

Besonders bei Säuglingen lassen sich aufgrund der kleineren geometrischen Abmessungen mehrere Lungenerkrankungen bereits in der Ruheatmung erkennen

[Leonhardt1998]. Dabei wird der Luftstrom $\dot{Q}(t)$ über dem durch Integration gebildeten Atemzugvolumen $Q(t)$ aufgetragen, Abb. 4. Beispiele für die Ruheatmungsspirometrie zeigt Abb. 5 mit den jeweiligen Diagnosen. Man erkennt deutlich die Unterschiede zwischen normalem und erkranktem Verhalten, d.h. der Kurvenverlauf $\dot{Q} = f(Q)$ bildet bestimmte Merkmale aus. Aus diesen Kurvenverläufen können trennscharfe Symptome durch Approximation mit Polynomen 2. Ordnung und eine FFT (Fast-Fourier Transform) erzeugt werden. Diese Symptome werden durch ein neuronales Netz vom Typ MLP klassifiziert und lassen so automatisiert mehrere Lungenkrankheiten zu etwa 70 %, mit modifizierten Symptomen über 90 %, korrekt (vor-)diagnostizieren [Leonhardt2000].

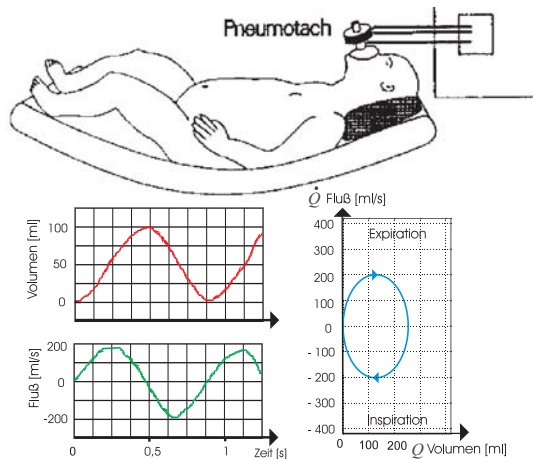


Abb. 4: Spirometrie bei Säuglingen. Signalverlauf und Kenngrößenverlauf $\dot{Q} = f(Q)$

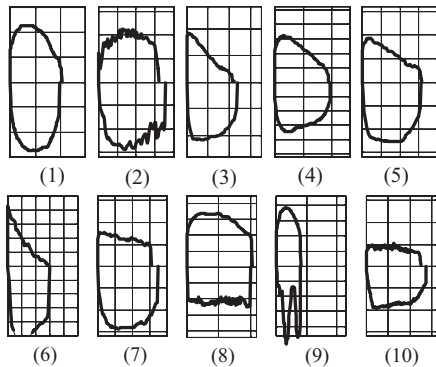


Abb. 5: Flussvolumen-Spirometrie-Kurvenverläufe zur Erzeugung von Merkmalen (Ruheatmungsspirometrie): (1) normal, (2) Schnupfen, (3) Asthma, (4) Bronchitis, (5) Reflux, (6) Tracheomalazie, (7) Tracheomalazie, (8) Laryngomalazie, (9) Laryngomalazie, (10) Trachealstenose.

Herzschlagvolumen-Diagnose mittels Impedanzkardiografie und Signalmodellen

Bestimmt man über Anlegung von Wechselstrom (z. B. 1 mA, 100 kHz) und 8 Elektroden an Hals und Hüfte die Impedanz des dazwischen liegenden Gewebes (komplexer Wechselstromwiderstand) $Z(t) = u(t)/i(t)$ im Verlauf eines Herzschlages, so zeigen sich Signalverläufe, die durch die Umverteilung des Blutvolumens im Thorax entstehen, siehe Abb. 6. Hieraus lässt sich über ein

Modell ein Maß für das Schlagvolumen bestimmen [Moissl2004]. Veränderungen des Schlagvolumens können dann als eines (von mehreren anderen) Symptomen dienen.

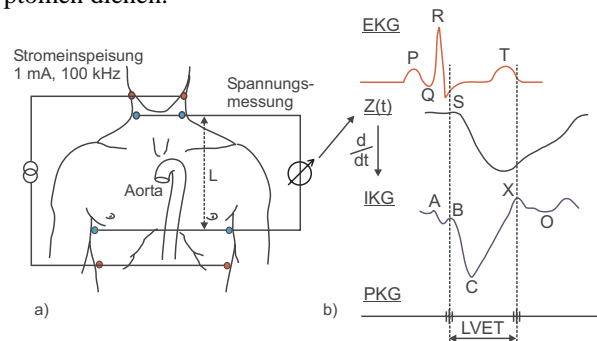


Abb. 6: a) Messung des Impedanzkardiogramms, b) Von oben nach unten: EKG, Impedanz-Messsignal $Z(t)$, Impedanzkardiogramm (IKG, Ableitung des Impedanzsignals) und Phonokardiogramm (PKG). Merkmale sind markante Kurvenpunkte im IKG: B-Öffnung der Aortenklappe, C-maximaler systolischer Fluss, X-Klappenschluss, LVET-left ventricular ejection time.

LITERATUR

- [Füssel2002]
D. Füssel, *Fault diagnosis with tree structured neuro-fuzzy systems*, VDI Verlag, Düsseldorf, 2002
- [Gertler1998]
J. Gertler, *Fault detection and diagnosis in engineering systems*, Marcel Dekker, New York u.a., 1998
- [Höfling1996]
T. Höfling, *Methoden zur Fehlererkennung mit Parameterschätzung und Paritätsgleichungen*, VDI Verlag, Düsseldorf, 1996
- [Isermann1996]
R. Isermann, "Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose technischer Systeme", *atp* Vol 38, No 5, 6, p 9-12, 48-52, 1996
- [Isermann2004]
R. Isermann, "Model-based fault detection and diagnosis", in *Proc. 16th Symp. on Autom. Control in Aerospace*, St. Petersburg, Russia, 2004
- [Isermann2005]
R. Isermann, *Supervision, diagnosis and fault-tolerance – an introduction*, Springer, Berlin, ersch. 2005
- [Moissl2004]
U. Moissl, P. Wabel, S. Leonhardt, R. Isermann, "Modellbasierte Analyse von Bioimpedanz-Verfahren", *at* Vol 52, No 6, p 270-279, 2004
- [Leonhardt1998]
S. Leonhardt, M. Walter, P. Ahrens, "Methoden zur automatischen Lungenfunktionsdiagnose bei Säuglingen", *at* Vol 46, No 9, p 444-451, 1998
- [Leonhardt2000]
S. Leonhardt, *Automatisierte Lungenfunktionsdiagnose bei spontanatmenden Säuglingen*, Shaker, Aachen, 2000
- [Patton2000]
R. J. Patton, P. M. Frank, R. N. Clark, eds: *Issues of fault diagnosis for dynamic systems*, Prentice Hall, London, 2000