

Methoden der modellbasierten Fehlerdiagnose

Gerwald Lichtenberg

Lichtenberg@tuhh.de

TU Hamburg-Harburg
Institut für Regelungstechnik

ModQS Workshop
14.09.2011



Inhalt

- 1 Motivation
- 2 Fehlerdiagnose - Was ist das?
- 3 Modelle - Wie sehen die aus?
- 4 Diagnosemethoden - Welche gibt es?
- 5 Zusammenfassung & Ausblick

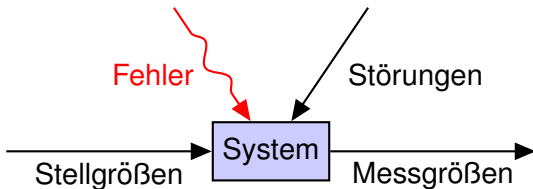
Warum Modelle für Heizungssysteme?

- **Übertragbarkeit:** Nichtwohngebäude sind "Einzelstücke"
- **Komplexität:** mehrere Energiequellen/Heizkreise/Speicher
- **Kopplung:** Hydraulik/Thermodynamik/Elektrik/Elektronik
- **Komponenten:** Systeme sind zerlegbar (Submodelle)
- **Systematik:** methodisches Vorgehen für alle Gebäude
- **Simulation:** Variation der Parameter und Signale
- **Einsatz:** Entwurf/Überwachung/Fehlerdiagnose
- **Technik:** automatische Codegenerierung
- **Forschung:** mathematische Optimierungsprobleme

Steuer- und Regelungstechnik / Systemtheorie

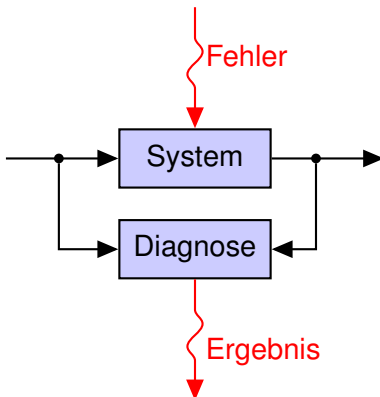
- Modelle: Grundlage systematischer Ansätze!
- dynamische / statische Modelle
- deterministische / stochastische Modelle
- Vielfältige Methoden & Tools
- Entwurf unterlagerter Steuerungen & Regelungen
- Prozessüberwachung & Fehlerdiagnose
- Hybride Systeme: binäre & kontinuierliche Signale
- Fault-tolerant Control & Reconfiguration
- SCADA: "Supervisory Control And Data Acquisition"

Fehlerdiagnose - Was ist das?



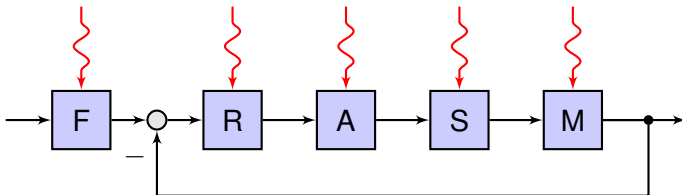
- System (dynamisch)
- Fehler
- Störung (z.B. Messrauschen, Nutzereinfluß)
- **Diagnoseproblem: finde Fehler unabhängig von Störungen**

Fehlerdiagnose



- System (fehlerhaft)
- Diagnoseeinrichtung
- Diagnoseergebnis

Komplexere Systeme



- System / Stellglied / Messglied
- Regelung / Steuerung
- Fehler können in jeder Komponente auftreten
- Fehler in Konfiguration, Kommunikation, Design

Klassifikation Diagnoseprobleme (FDII)

FDII: Fehler Detektion, Isolation und Identifikation

- **Fehlererkennung**: Ist ein Fehler aufgetreten?
- **Fehlerisolation**: Wo ist der Fehler aufgetreten?
- **Fehleridentifikation**: Welcher Fehler ist aufgetreten?

Dynamik des Fehlers

- **statisch**: stets fehlerhaft oder fehlerfrei
- **temporär**: zeitlich variierend

Klassifikation Diagnoseprobleme (FDII)

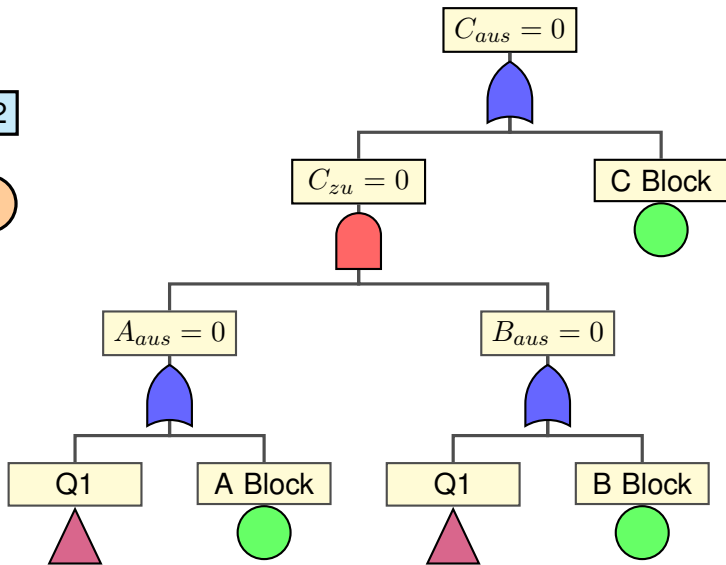
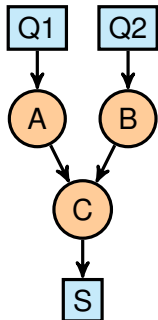
Notwendige Modelle

- **Fehlererkennung**: Gesamtmodell des Nominalverhaltens
- **Fehlerisolation**: Teilmodelle des Nominalverhaltens
- **Fehleridentifikation**: Teilmodelle des Fehlverhaltens

Modellierung des Fehlers

- **statisch**: Fehler sind Parameter
- **temporär**: Fehler sind Signale

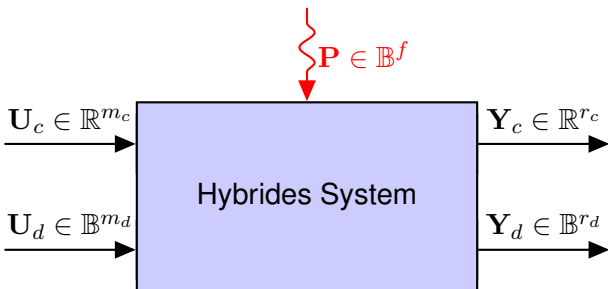
Fehlerbäume



Fehlerbäume

- altes Verfahren [Watson, 1961]
- verbreiteter Standard (DIN 25424)
- Schlussfolgerung entgegen der Wirkungsrichtung
- Fehlerbaumanalyse: Ausfallwahrscheinlichkeiten
- meist generiert aus Erfahrungswissen
- **oft sehr komplex**
- Wartung & Änderung schwierig
- **Blick zu modellbasierten Methoden ist lohnend!**

Dynamische Systeme



- Modellierungsaufgabe: Repräsentiere das Verhalten

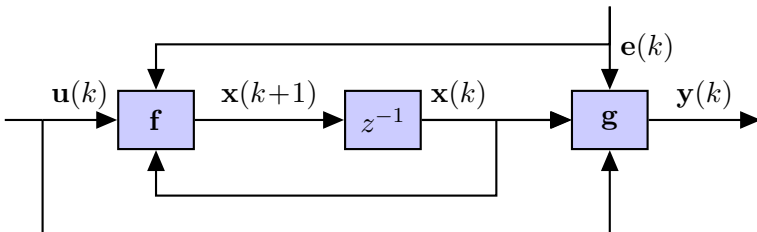
$$\mathcal{B} = \{Y, U \mid \text{alle dem System möglichen Signale}\}$$

- Fehlermodelle repräsentieren das fehlerhafte Verhalten

Zustandsraummodelle

- Steuerbarkeit & Beobachtbarkeit
- Entwurfsmethoden
 - Zustandsregler
 - Optimalregler
 - prädiktive Regler
 - Steuerungen (ILC, IMC, ...)
- Prozessüberwachung ("Supervisory Control", Diagnose)
- Parameteridentifikation (ARX, N4SID, ...)
- EINFACH zu implementieren und simulieren
- Modellklassen (linear, nichtlinear, ereignisdiskret)

Zustandsraummodelle: Blockdiagramm



- Übergangsfunktion

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{e}(k))$$

- Ausgangsfunktion

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k), \mathbf{e}(k))$$

Zustandsraummodelle: Klassen

- Nichtlinear stochastisch

$$\mathbf{f} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{e})$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{e})$$

- Linear deterministisch stochastisch

$$\mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{e}$$

$$\mathbf{g} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u} + \mathbf{F}\mathbf{e}$$

- Differential Algebraische Modelle (DAE)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{e})$$

$$\mathbf{0} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{e})$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{e})$$

Modellierungs- und Simulationswerkzeuge

- Modelica (DYMOLA)
- TRNSYS, ESP-R, Energy-Plus, IDA-ICE
- MATLAB / SIMULINK
- Scilab / XCos
- ...

Fehlerdiagnose: Methoden

Klassifikation

- modellbasiert / signalbasiert
- qualitativ / quantitativ
- offline / online

Probleme

- Fehllalarme / nicht erkannte Fehler (Trade-Off)
- Schlussfolgern entgegen der Wirkungsrichtung!
- Diagnostizierbarkeit

Quantitative modellbasierte Diagnose

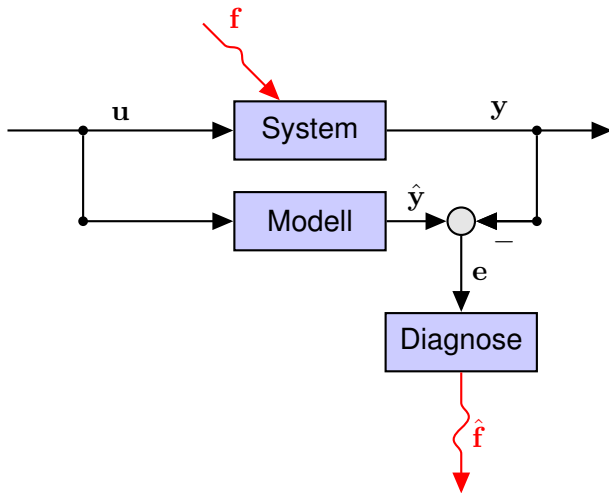
Residuengenerierung

- Vergleich Simulation - Messung
- Parameteridentifikation
- Zustandsbeobachtung
- Paritätsgleichungen, ...

Klassifikation des Residuums

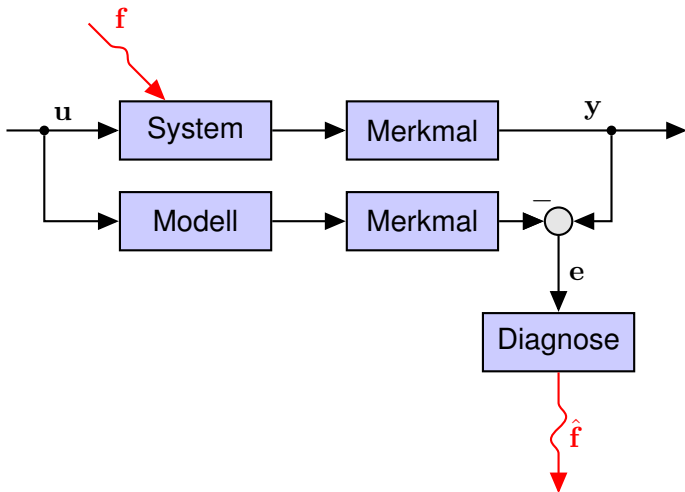
- Support Vector Machines (SVM) [SV00]
- Fuzzy-Logik
- Neuronale Netze, ...

Quantitative Fehlerdiagnose: Signal-Vergleich



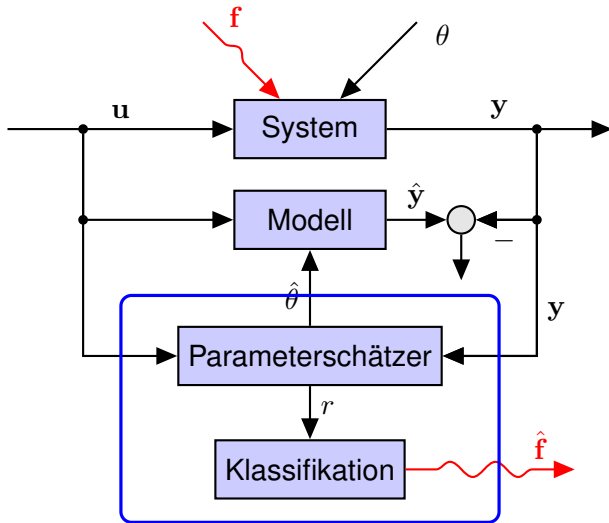
Problem: Diagnose hängt vom Anfangszustand des Modells ab

Quantitative Fehlerdiagnose: Merkmal-Vergleich

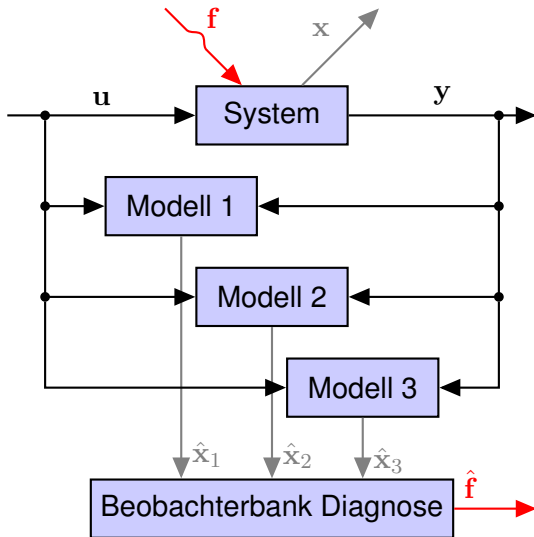


Merkmale (aus Sensorsignalen): z.B. Energieverbrauch

Fehlerdiagnose: Parameteridentifikation



Fehlerdiagnose: Zustandsbeobachter



Quantitative Diagnosemethoden: Übersicht

- Signal-Vergleich
 - üblich: Grenzwerte für Differenzsignal
 - unbekannter Anfangszustand des Modells
 - Parameter- und Modellunsicherheiten
- Merkmal-Vergleich
 - Anfangszustand irrelevant bei ausreichendem Zeithorizont
 - Nutzung des Modells zur Prädiktion durch Simulation
- Parameteridentifikation
 - Stell- und Messsignale
 - Modell gibt Struktur und Parametergebiete vor
 - kein Anfangswertproblem
 - weitere Verbesserungen (z.B. Paritätsgleichungen)
- Beobachterbänke
 - Stell- und Messsignale
 - Modelle zur Zustandsschätzung genutzt
 - Fehleridentifikation durch Modelle des Fehlverhaltens

Qualitative modellbasierte Diagnose

Modellformen

- Regelbasierte Modelle [Sch97]
- *Discrete Event Systems* (DES)
- Nichtdeterministische Automaten (stochastisch) [Sch02]
- Hybride Modelle, Petri-Netze, ...

Algorithmen

- Regelbasierte Wissensverarbeitung (KI) [Lun94]
- *Supervisory Control Theory* [RW87]
- Qualitative Modellierung [Lic98]
- Data Mining, ...

Qualitative Modelle mit Automaten (QUAMO)

- abstrahieren von unnötigen Details (beschreiben Mengen)
- nutzen Ein- und Ausgangssignale (und interne Zustände)
- sind systemtheoretisch eingebettet (zeitdiskret, multilinear)
- haben die Markov-Eigenschaft (einfache Implementierung)
- identifizierbar aus Messungen (relative Häufigkeiten)
- abstrahierbar aus quantitativen Modellen (Monte Carlo)
- direkt interpretierbar (Automatengraph)
- zeigen kombinatorische Explosion des Zustandsraums
- lassen sich zu Automatenetzen dekomponieren
- lösen Diagnoseaufgaben (Messung \subseteq Modell ?)
- geben Fehler-Wahrscheinlichkeit (Matrix-Multiplikation)
- nutzen qualitative Beobacher-Bänke

Fehlerdiagnose in ModQS: offene Fragen

- Welche Modellformen kommen in Frage?
- Wie können unterschiedliche Modelle kombiniert werden?
- Welche Methoden für Heizungskomponenten einsetzbar?
- Wie können übergeordnete Fehler erkannt werden?
 - Konfigurationsfehler (z.B. Sensorkalibrierung)
 - Kommunikationsfehler (z.B. Totzeiten bei Datenerfassung)
 - Designfehler (z.B. Steuer- und Regelprogramme)
- Sind die Fehlerklassen standardisierbar?

Forschungsrelevante Fragen durch Anwendung getriggert

Lösungen für Demogebäude ⇒ direkte Ingenieurs-Praxis

Zusammenfassung & Ausblick

- Fehlerdiagnose: Messung + Modell + Algorithmus
- Verschiedene Ansätze und Anwendungsgebiete
- Quantitativ: Residuen-Generator + Klassifikation
- Qualitativ: Automat + Beobachterbank
- Stochastische Modelle & Auswertungen (Jacob)
- Anwendungen & Fallbeispiele (Schmidt, Harmsen)

Literatur I



ISERMANN, R.:

Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance.

Springer, 2006



KATIPAMULA, S. ; BRAMBLEY, M.:

Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems - A Review, Part I.

In: *International Journal of HVAC&R Research* 11 (2005), Nr. 1



LICHTENBERG, G.:

Fortschrittberichte VDI. Bd. 8: Theorie und Anwendung der qualitativen Modellierung zeitdiskreter dynamischer Systeme durch nichtdeterministische Automaten.

VDI Verlag, Düsseldorf, 1998. –

ISBN 3-18-368608-2

Literatur II



LUNZE, J.:

Künstliche Intelligenz für Ingenieure, Band 1.

Oldenbourg-Verlag, München, 1994. –

ISBN 3-486-22287-2



RAMADGE, P. ; WONHAM, W.:

Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes.

In: *SIAM J. Control and Optimization* 25 (1987), S. 206-230





SCHILLER, F.:

Fortschritt-Berichte VDI. Bd. 8: Diagnose dynamischer Systeme auf der Grundlage einer qualitativen Prozeßbeschreibung.

VDI Verlag, Düsseldorf, 1997. –

ISBN 3-18-365308-7

Literatur III

-  **SCHRÖDER, J. ; M. THOMA, M. M. (Hrsg.):**
Modelling, State Observation and Diagnosis of Quantised Systems.
1.
Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 2002
(Lecture Notes in Control and Information Sciences). –
ISBN 3–540–44075–5
-  **SUYKENS, J. ; VANDERWALLE, J.:**
Recurrent Least Squares Support Vector Machines.
In: *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I* 47 (2000),
Nr. 7, S. 1109–1114