

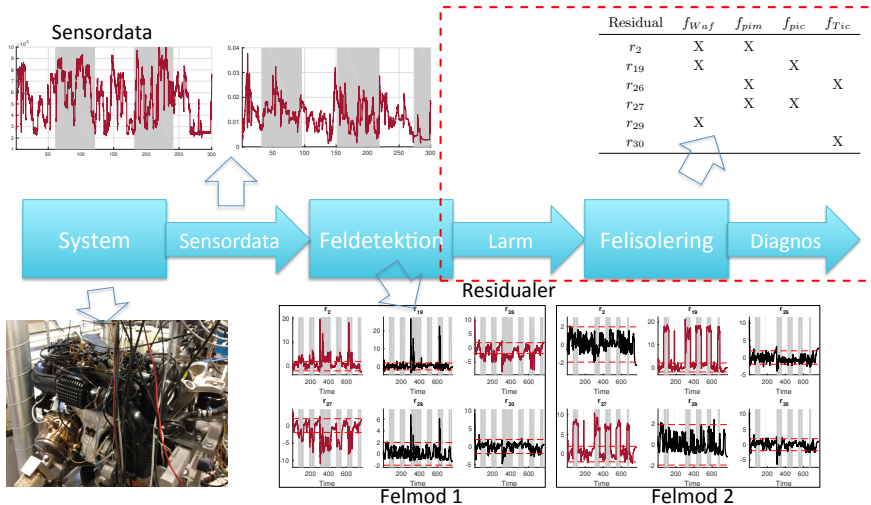
*TSFS06 Diagnos och övervakning*  
*Föreläsning 2 - Felisolering*

Erik Frisk

Institutionen för systemteknik  
Linköpings universitet  
erik.frisk@liu.se

2022-03-30

# Arkitektur för diagnossystem



Idag fokus på felisoleringen.

- 1 Formell definition av en diagnos
- 2 Isolerbarhetsegenskaper för en modell
- 3 Metod för enkelfelsisolering
- 4 Beslut i en osäker och brusig miljö
- 5 Isolerbarhetsegenskaper för en mängd av residualer
- 6 Vilka test/residualer ska vi konstruera?
- 7 Isolerbarhet och felmodellering
- 8 Snabbtitt på ett industriellt exempel

Här presenteras isolering utan att ta upp signalbehandlingen som krävs för att konstruera detektorer/residualgeneratorer. Det är ämnet för de kommande föreläsningarna.

## — Prolog —

## Litet exempel

---

Exempel från förra föreläsningen:

$$x = u + f_3$$

$$OK(A) \rightarrow f_3 = 0$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$OK(S_1) \rightarrow f_1 = 0$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

$$OK(S_2) \rightarrow f_2 = 0$$

$y_1$ ,  $y_2$  och  $u$  är kända. Vi konstruerade residualerna:

$$r_1 = y_1 - 2u = f_1 + 2f_3$$

$$\text{larm}_1 = |r_1| > 1$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1 = f_2 + 4f_3$$

$$\text{larm}_2 = |r_2| > 1$$

	NF	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

Tabellen ovan kallar vi för **beslutsstruktur**

## Isolationsexempel, forts.

---

$$r_1 = y_1 - 2u = f_1 + 2f_3$$

$$\text{larm}_1 = |r_1| > 1$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1 = f_2 + 4f_3$$

$$\text{larm}_2 = |r_2| > 1$$

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

Antag att  $f_3 = 1/3$  och  $f_1 = f_2 = 0$ .

$\Rightarrow$  Test 2 larmar.

$\Rightarrow$  Slutsatsen kan inte vara  $F_2$ ,  
det är ju fel.

### Slutsatser av test

Typiskt; vi drar bara slutsatser av larm. Dvs. här vet vi att det är  $F_2$  eller  $F_3$ , inget annat.

$$r_1 = y_1 - 2u = f_1 + 2f_3$$

$$\text{larm}_1 = |r_1| > 1$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1 = f_2 + 4f_3$$

$$\text{larm}_2 = |r_2| > 1$$

	NF	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

Antag att  $f_1 = 2$  och  $f_2 = f_3 = 0$ .

$\Rightarrow$  Test 1 larmar.

$\Rightarrow$   $F_1$  och  $F_3$  är de enda möjliga enkelfelen enligt testresultaten.

Diagnossystemet kan inte isolera felet unikt.

- Var felet  $f_1 = 2$  för litet för att diagnossystemet skulle kunna isolerade  $F_1$ , eller kan diagnossystemet inte isolera  $F_1$  för någon storlek på  $f_1$ ?
- Är det en inneboende egenskap för systemet att vi inte kan unikt isolera ett fel i givare 1 eller har vi använt för lite kunskap om systemet när vi designade diagnossystemet?
- Vilka analyser behövs göras för att besvara frågan?

—— Formell definition av diagnos ——



## Diagnos

Givet observationer, **en** diagnos är **en** systembeteendemod som är konsistent med observerat beteende.

## Diagnossystem

Givet observationer: Hitta **alla** diagnoser, dvs. alla systembeteendemoder som ej emotsäger observerat beteende.

En smula idealiserad bild som vi kommer hålla fast vid ett tag.

## Formellt, vad är en diagnos?

---

Låt  $\mathcal{M}$  vara modellen (tänk en mängd av ekvationer),  $\mathcal{O}$  är observationerna och  $\mathcal{D}$  en kandidat.

### Kandidat

En kandidat är en utsaga om hälsotillstånd hos systemets alla komponenter. Till exempel för ett system med tre komponenter  $C_1$ ,  $C_2$  och  $C_3$ , kan en kandidat vara

$$OK(C_1) \wedge OK(C_2) \wedge \neg OK(C_3)$$

### Diagnos

En kandidat  $\mathcal{D}$  är en diagnos om

$$\mathcal{M} \cup \mathcal{O} \cup \mathcal{D}$$

är en satisfierbar/konsistent mängd av ekvationer.

Exemplet har tre komponenter:

$$x = u + f_3$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

- $S_1$  sensor 1

- $S_2$  sensor 2

- $A$  aktuatorn

Komponenterna kan vara  $OK$  eller  $\neg OK$ .

Sambanden mellan komponenternas moder och felsignaler är implicita i ekvationerna. Genom utökning blir sambanden explicita:

$$x = u + f_3$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

$$OK(S_1) \rightarrow f_1 = 0$$

$$OK(S_2) \rightarrow f_2 = 0$$

$$OK(A) \rightarrow f_3 = 0$$

En kandidat är då uttryckt på formen:

$$OK(S_1) \wedge \neg OK(S_2) \wedge OK(A)$$

## Exempel, forts

---

Antag mod  $F_1$  med  $f_1 = 2, f_2 = f_3 = 0$ . Med  $u = 0$  blir observationerna

$$y_1 = 2, \quad y_2 = 1, \quad u = 0$$

Kandidat:  $\mathcal{D} = \neg OK(S_1) \wedge OK(S_2) \wedge OK(A)$

Konsistens av  $\mathcal{M} \cup \mathcal{O} \cup \mathcal{D}$  blir då ekvivalent med konsistens av

$$x = 0 + 0$$

$$2 = 2x + f_1$$

$$1 = 4x + 1 + 0$$

vilken är en konsistent mängd ekvationer ( $x = 0, f_1 = 2$ ).

Mod  $F_1$  är en diagnos

## Exempel, forts

---

Samma observationer, ny kandidat:  $\mathcal{D} = OK(S_1) \wedge OK(S_2) \wedge \neg OK(A)$

Konsistens av  $\mathcal{M} \cup \mathcal{O} \cup \mathcal{D}$  blir då ekvivalent med konsistens av

$$x = 0 + f_3$$

$$2 = 2x + 0$$

$$\Rightarrow x = 1$$

$$1 = 4x + 1 + 0$$

$$\Rightarrow x = 0$$

vilken är en inkonsistent mängd ekvationer

$F_3$  är ej en diagnos

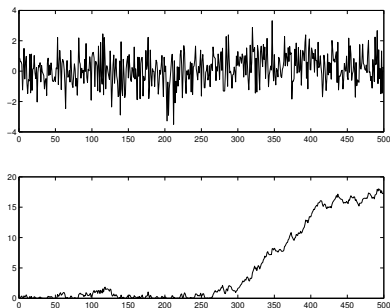
Jämför med diagnossystemets resultat:  $F_1$  eller  $F_3$ .

Det finns information i modellen som diagnossystemet inte använder! Vad är det som saknas?

## Komplicerade och osäkra modeller

- Att avgöra konsistens mellan ett antal ekvationer är tydligen centralt
- Med brusiga (och osäkra/inkorrekta) modeller så har man generellt aldrig konsistens

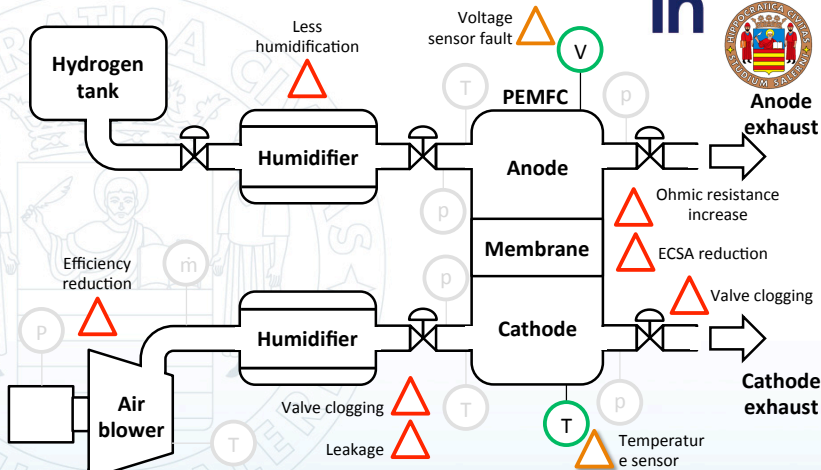
$$y_1 = x + \epsilon_1, \quad y_2 = x + \epsilon_2$$



- Vi vill avgöra "tillräckligt nära konsistens"
- Men vi ska fortsätta ett tag med de ideala definitionerna, de hjälper oss förstå de slutgiltiga algoritmerna

## —— Isolierbarhetsegenskaper för en modell ——

# PEM Fuel Cell System



2 sensors: stack voltage and temperature  
7 considered system faults (5 BOP, 2 stack)  
2 sensor faults

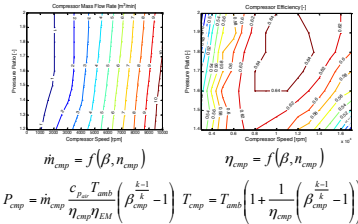
9 fault variables  
108 algebraic equations  
11 differential constraints



# PEMFC system model



## Air Blower



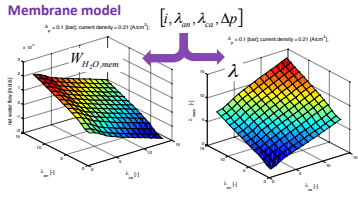
## Humidifiers

$$\dot{m}_{H_2O,j}^{inj} = \frac{\dot{m}_{H_2O,j}^{des}}{\tau_{inj}} \quad \dot{m}_{H_2O,j}^{des} = \frac{V_j M_{H_2O}}{RT_j} (RH_j^{des} - RH_j)$$

## Nozzles

$$W_{y,in/out} = \begin{cases} \frac{C_D A_N P_{y,exh}}{\sqrt{R_y T_{y,exh}}} \left( \frac{p_y}{p_{y,exh}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_y}{p_{y,exh}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} & \text{for } \frac{p_y}{p_{y,exh}} > \left( \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \\ \frac{C_D A_N P_{y,exh}}{\sqrt{R_y T_{y,exh}}} \sqrt{\gamma} \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} & \text{for } \frac{p_y}{p_{y,exh}} \leq \left( \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{cases}$$

## Membrane model



## Electrochemical model

$$E = -\frac{\Delta \bar{g}}{2F} \left[ T_{fc} \right] + RT_{fc} \ln \left( \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{p_{H_2O}} \right) \quad E_{act} = \frac{\bar{R} T_{fc}}{F} \ln \left( \frac{i}{i_0} \right) \quad i_0 = i_{P_1}^0 EC_{SA}$$

$$E_{ohm} = \frac{l_{mem}}{\sigma_{mem}} i \quad \sigma_{mem} = (0.005139\lambda - 0.00326) \exp \left( 350 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}} \right) \right)$$

$$E_{diff} = \tilde{\omega} T_{fc} i \ln \left( \frac{i_{lim}}{i_{lim} - i} \right) \quad i_{lim} = -\frac{2FD_{O_2N_2} \epsilon_{eff}^{1.5}}{V_m t_{ca}} \left( \frac{T_{fc}}{273} \right)^{0.823} \ln(1 - x_{O_2,ca})$$

3 states at cathode side  
2 states at anode side  
3 states at cathode s.m.  
2 states at anode s.m.

**Mass balance**  $i = [O_2, N_2, H_2, H_2O]$   
 $j = [ca, an, smca, sman]$

$$\frac{dm_{i,j}}{dt} = \dot{m}_{in,i,j} - \dot{m}_{out,i,j} \pm \dot{m}_{gen/con,i,j}$$

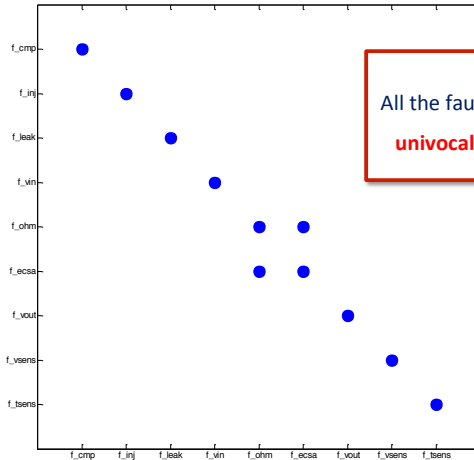
**Energy balance** 1 state (temperature)

$$K_{FC} \frac{dT_{FC}}{dt} = \dot{E}_{in}(T_{in}) - \dot{E}_{out}(T_{FC}) - VI - Q$$

# Isolability Analysis



Isolability matrix for 'PEM Fuel Cell, sensed'



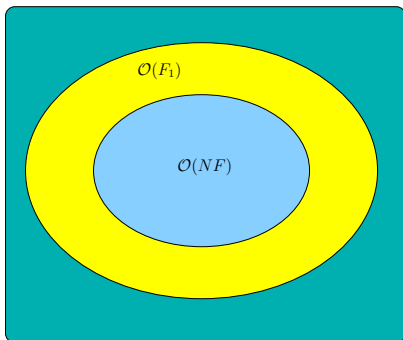
All the faults but the two of the stack can be  
**univocally isolated with Mixed Causality**

Låt

$$\mathcal{O}(NF) = \{\text{observationer konsistenta med felfritt beteende}\}$$

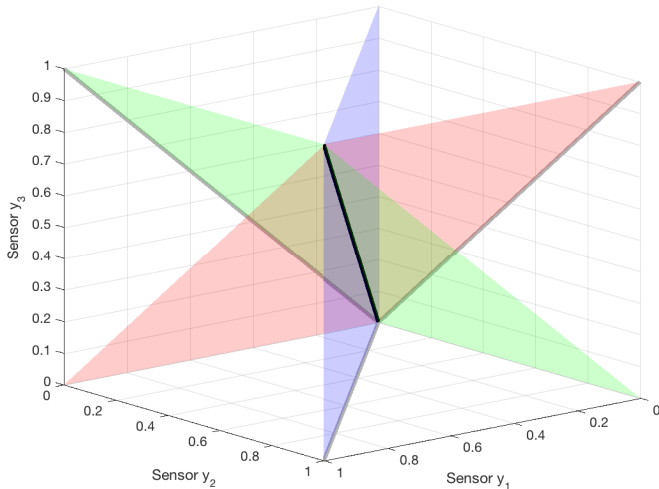
$$\mathcal{O}(F_1) = \{\text{observationer konsistenta felmod } F_1\}$$

dessa kallas observationsmängder för respektive beteendemod. Dessa är trevliga objekt att resonera med.



## Observationsmängder

Exempel, sensorredundans:  $y_1 = x_1 + f_1$ ,  $y_2 = x_2 + f_2$ ,  $y_3 = x_3 + f_3$



Vilken färg har respektive:  $\mathcal{O}(NF)$ ,  $\mathcal{O}(f_1)$ ,  $\mathcal{O}(f_2)$ ,  $\mathcal{O}(f_3)$ ?

## Observationsmängder i ett enkelt fall

$$x = u + f_3$$

$$y_1 = 2x + f_1$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2$$

$$OK(S_1) \rightarrow f_1 = 0$$

$$OK(S_2) \rightarrow f_2 = 0$$

$$OK(A) \rightarrow f_3 = 0$$

*Felfritt fall:*  $NF = OK(A) \wedge OK(S_1) \wedge OK(S_2)$

$$\begin{aligned}\mathcal{O}(NF) = \{(y_1, y_2, u) \mid \exists x : x = u, y_1 = 2x, y_2 = 4x + 1\} = \\ \{(y_1, y_2, u) \mid y_1 = 2u, y_2 = 2y_1 + 1\}\end{aligned}$$

*Endast fel i aktuator:*  $F_3 = \neg OK(A) \wedge OK(S_1) \wedge OK(S_2)$

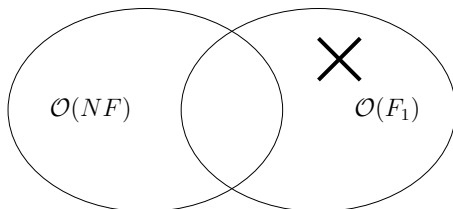
$$\begin{aligned}\mathcal{O}(F_3) = \{(y_1, y_2, u) \mid \exists x, f_3 : x = u + f_3, y_1 = 2x, y_2 = 4x + 1\} = \\ \{(y_1, y_2, u) \mid y_2 = 2y_1 + 1\}\end{aligned}$$

## Isolerbarhet för en modell

### Isolerbarhet

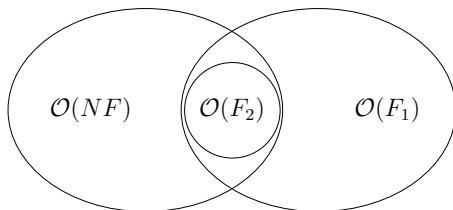
Mod  $F_i$  är isolerbar från mod  $F_j$  om

$$\mathcal{O}(F_i) \not\subseteq \mathcal{O}(F_j)$$



Här är fel  $F_1$  detekterbart (=  $F_1$  är isolerbart från  $NF$ )

I exemplet  $z = (y_1, y_2, u) = (4, 9, 0)$ :  $z \in \mathcal{O}(F_3)$ ,  $z \notin \mathcal{O}(NF)$



- $F_1$  detekterbart och isolerbart från  $F_2$ , men
- $F_2$  är varken detekterbart eller isolerbart från  $F_1$ .

Isolerbarhet är inte nödvändigtvis en symmetrisk relation.

## Isolerbarhetsmatris för en modell

Isolerbarheten för fallet på förra bilden kan sammanfattas i en matris

	$NF$	$F_1$	$F_2$
$F_1$		X	
$F_2$	X	X	X

$$I_{i,j} = \begin{cases} 0 & O(F_i) \not\subseteq O(F_j), \text{ dvs. moderna } F_i \text{ och } F_j \text{ isolerbara} \\ X & O(F_i) \subseteq O(F_j), \text{ dvs. moderna } F_i \text{ och } F_j \text{ EJ isolerbara} \end{cases}$$

Tolkning av rad 2: Om systemet är i  $F_2$  så kommer de X-markerade moderna  $F_1$  och  $F_2$  vara diagnoser.

Alla enkelfel är unikt isolerbara om endast diagonalen är nollskild.

### En huvudpoäng

Isolerbarhetsegenskaper för en modell, inte ett diagnossystem.



## Detekterbarhet och isolerbarhet - exempel

---

För exemplet kan enkelt visas (gör det!) att

$$\mathcal{O}(NF) = \{(y_1, y_2, u) | y_1 = 2u, y_2 = 2y_1 + 1\}$$

$$\mathcal{O}(F_1) = \{(y_1, y_2, u) | y_2 = 4u + 1\}$$

$$\mathcal{O}(F_2) = \{(y_1, y_2, u) | y_1 = 2u\}$$

$$\mathcal{O}(F_3) = \{(y_1, y_2, u) | y_2 = 2y_1 + 1\}$$

Följande detekterbarhet och isolerbarhet fås då

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	0	X	0	0
$F_2$	0	0	X	0
$F_3$	0	0	0	X

dvs alla fel är detekterbara och alla enkelfel är unikt isolerbara enligt modellen.

Vilken detekterbarhet och isolerbarhet ger diagnossystemet?

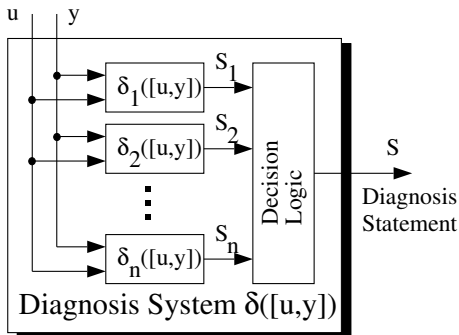
Vi återkommer till det senare.

## —— Metod för enkelfelsisolering ——

## *Dela upp i mindre enklare problem*

- Egentligen vill vi räkna direkt med dessa observationsmängder, men det är svårt i annat än enkla (till exempel linjära) fall.
- Modellerna idealiserade beskrivningar av verkligheten.
- Så hur gör man då? Den grundläggande definitionen är inte alltid direkt användbar

Dela upp i ett antal mindre och enklare delproblem



## *Två angreppssätt för att utforma isoleringslogiken*

---

- En lite enklare direkt baserad på beslutsstrukturen
- En mer avancerad metod, mer anpassad för multipelfel.

Det som utmärker den första metoden är att den resonerar om systemmoder medan den sista om komponentfelmoder.

Nu föreläser jag den första varianten. Den sista återkommer jag till senare i kursen.

## Radvis användning av beslutsstrukturen

---

Varje test svarar mot ett deltest för ett delproblem. Mängden av alla beteendemoder  $\Omega = \{NF, F_1, F_2, F_3\}$

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

$$\text{larm}_1 = |r_1| > 1$$

$$\text{larm}_2 = |r_2| > 1$$

Låt  $F_p$  beteckna den okända moden som processen är i. Om  $\text{larm}_1 = 1$ :

$$F_p \in \{F_1, F_3\} \quad , \text{ dvs } (F_p = F_1) \vee (F_p = F_3)$$

$$\begin{aligned} \text{Fall 1: } \text{larm}_1 = 1 &\Rightarrow F_p \in \{F_1, F_3\} && \Rightarrow S = \{F_1, F_3\} \cap \Omega = \\ \text{larm}_2 = 0 &\Rightarrow F_p \in \Omega && = \{F_1, F_3\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Fall 2: } \text{larm}_1 = 1 &\Rightarrow F_p \in \{F_1, F_3\} && \Rightarrow S = \{F_1, F_3\} \cap \{F_2, F_3\} = \\ \text{larm}_2 = 1 &\Rightarrow F_p \in \{F_2, F_3\} && = \{F_3\} \end{aligned}$$

Om  $S_i$  är delbeslutet taget av test  $i$  så är det sammanvägda beslutet snittet av alla delbeslut:

$$S = \bigcap_i S_i$$

Beror på att en och endast en av moderna kan vara den i systemet närvarande. Detta tack vare modelleringen av systemfelmoder (isf komponentfelmoder).

## *Tveksam hantering av multipelfel*

---

- Sammanvägningen av de olika testresultaten blir väldigt enkel.
- Detta är en vinst av en tveksam hantering av multipelfel; en systembeteendemod per felkombination, exempelvis:  $f1 \& f2 \& f3$
- 20 komponenter och två beteendemoder per komponent  $\Rightarrow 2^{20} \approx 10^6$  systembeteendemoder.
- För enkelfel fungerar det dock bra och effektivt.

—— Beslut i en osäker och brusig miljö ——

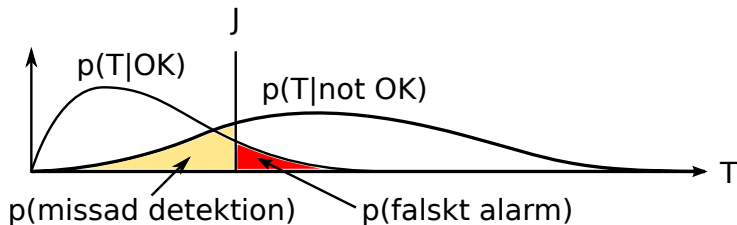


Antag ett test som ska övervaka ett fel.

Testet kan larma eller inte och systemet kan vara  $OK$  eller  $\neg OK$ , dvs fyra kombinationer:

	no larm	larm
OK		Falskalarm
not OK	Missad detektion	

Idealt ska rödmarkerade kombinationer aldrig inträffa, men i brusiga miljöer kan man som regel inte helt undvika falskalarm och missad detektion.



Ett alarm som sker när systemet är felfritt är ett falskalarm (FA).

$$p(FA) = p(T > J | OK)$$

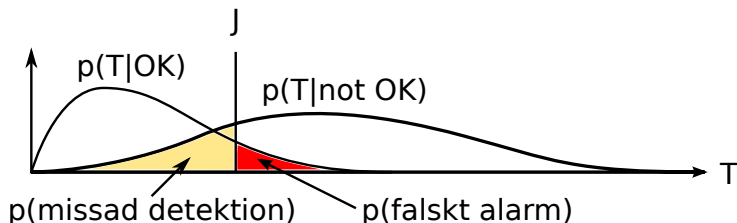
Idealt vill man att  $p(FA) = 0$ .

Händelsen att inte larma trots att det är fel kallas missad detektion (MD).

$$p(MD) = p(T < J | \neg OK)$$

Idealt vill man  $p(MD) = 0$ .

Tröskeln  $J$  styr kompromissen mellan falskalarm och missad detektion.

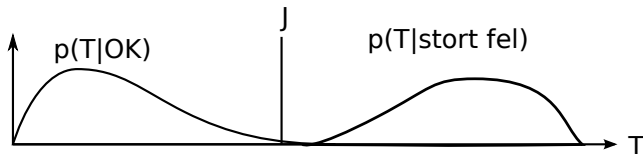


- Falskalarm är ofta helt oacceptabla
- Fel med signifikant storlek, dvs de utgör ett hot mot säkerhet, maskinskydd, eller överskrider lagkrav måste upptäckas.
- För små fel som endast ger gradvis försämring av prestanda kan det vara bättre att prioritera få falskalarm gentemot att få bra detektion.

Ofta specificeras ett krav på falskalarm:  $p(FA) < \alpha$ .

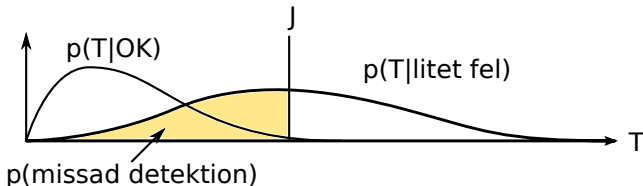
## Beslut i brusig och osäker miljö

### Stort fel:



Tydlig separation krävs för att uppfylla kraven. Om det inte är separerat så måste teststorheten förbättras, modellen utökas eller systemet byggas om.

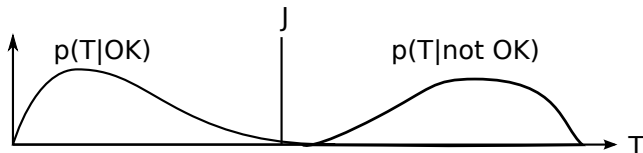
### Litet fel:



För att maximera sannolikheten för detektion, väljs den minsta tröskeln så att  $p(T > J|OK) < \epsilon$ . I detta fall är det alltså fördelningen för det felfria fallet som bestämmer tröskeln  $J$ .

## Slutsatser: Beslut i brusig och osäker miljö

Tydlig separation (för alla möjliga felstorlekar):

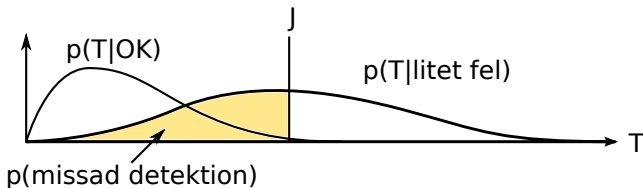


$$T \leq J \Rightarrow S = \{NF\}$$

$$T > J \Rightarrow S = \{F\}$$

	NF	F
T	0	1

Överlappande fördelningar (för någon möjlig felstorlek):



$$T \leq J \Rightarrow S = \{NF, F\}$$

$$T > J \Rightarrow S = \{F\}$$

	NF	F
T	0	X

Det senare fallet är typfallet i den här kursen.

—— Isolierbarhet för mängd av tester ——

- Isolerbarhetsmatrisen som tidigare togs fram var för en modell
- Inga tester togs fram. Man kan kalla det ideal prestanda.
- Nu ska vi diskutera isolerbarhetsegenskaper för en mängd av tester, dvs. prestanda för ett designat diagnosystem.

Återvänder till exemplet för att illustrera

$$r_1 = y_1 - 2u = f_1 + 2f_3$$

$$r_2 = y_2 - 4u - 1 = f_2 + 4f_3$$

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

### Detekterbart fel

Ett fel är **detekterbart** i en mängd av residualer om det existerar ett test som är känsligt för felet. Jmf.  $\mathcal{O}(F) \not\subseteq \mathcal{O}(NF)$

**Ex:** Alla fel är detekterbara i exemplet.



## Isolerbarhet

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_1$	0	X	0	X
$r_2$	0	0	X	X

### Isolerbarhet

En mod  $F_i$  är **isolerbar** från  $F_j$  med ett diagnosystem om det existerar ett test som är känsligt för  $F_i$  men inte för  $F_j$ . Jmf.  $\mathcal{O}(F_i) \not\subseteq \mathcal{O}(F_j)$

I exemplet har vi:

Modellen

	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	X	0	0
$F_2$	0	X	0
$F_3$	0	0	X

Residualerna  $\{r_1, r_2\}$

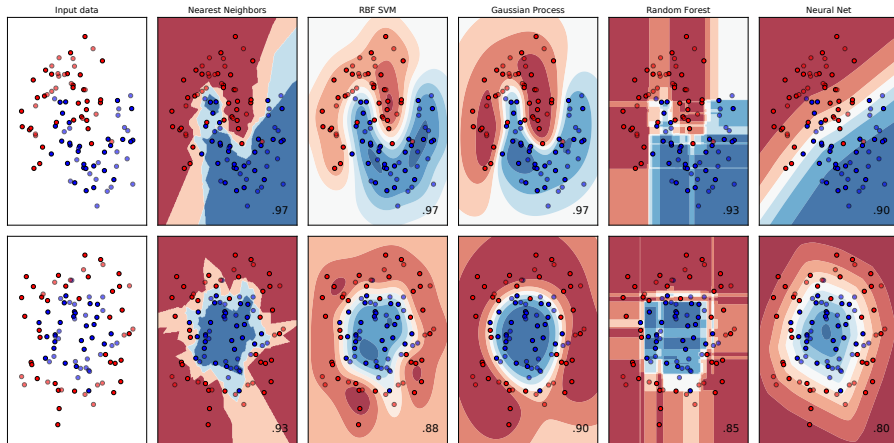
	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	X	0	X
$F_2$	0	X	X
$F_3$	0	0	X

Notera: Isolerbarhet ej en symmetrisk relation!

Hur får man så bra isolerbarhetsprestanda som möjligt och vilka test ska man konstruera för att nå dit?

—— Relation till datadrivna klassificerare ——

# Klassificerare från maskininlärning



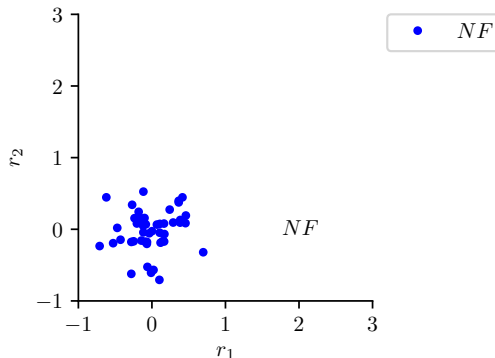
Varför är inte dessa metoder direkt användbara?

- Varför inte använda en maskininlärningsklassificerare direkt?
  - Baserat på mätdata
  - Baserat på residualerna
- Kräver mycket, representativ, data; svårt att få för diagnos.
- Betrakta exemplet:

	$f_1$	$f_2$
$r_1$	X	
$r_2$	X	X

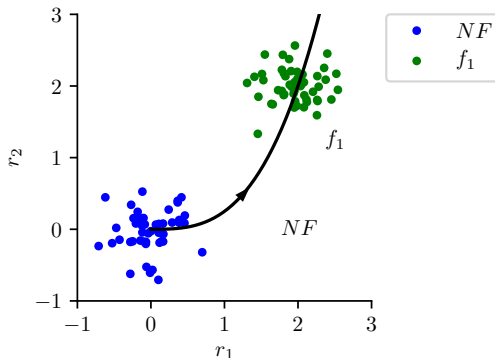
- Varför inte använda en maskininlärningsklassificerare direkt?
  - Baserat på mätdata
  - Baserat på residualerna
- Kräver mycket, representativ, data; svårt att få för diagnos.
- Betrakta exemplet:

	$f_1$	$f_2$
$r_1$	X	
$r_2$	X	X



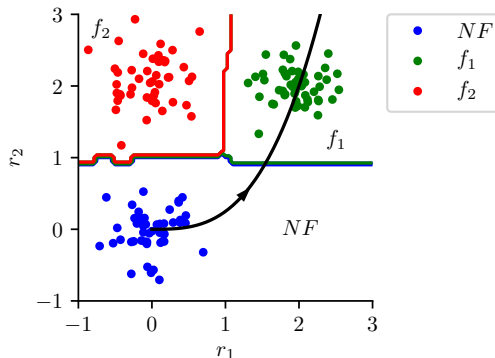
- Varför inte använda en maskininlärningsklassificerare direkt?
  - Baserat på mätdata
  - Baserat på residualerna
- Kräver mycket, representativ, data; svårt att få för diagnos.
- Betrakta exemplet:

	$f_1$	$f_2$
$r_1$	X	
$r_2$	X	X



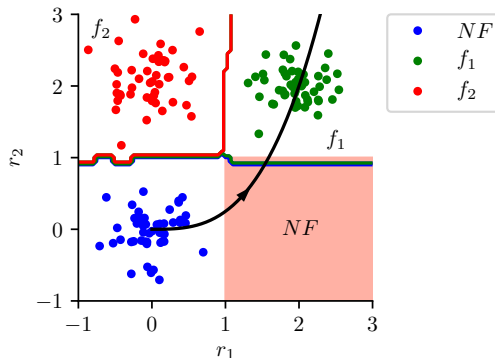
- Varför inte använda en maskininlärningsklassificerare direkt?
  - Baserat på mätdata
  - Baserat på residualerna
- Kräver mycket, representativ, data; svårt att få för diagnos.
- Betrakta exemplet:

	$f_1$	$f_2$
$r_1$	X	
$r_2$	X	X



- Varför inte använda en maskininlärningsklassificerare direkt?
  - Baserat på mätdata
  - Baserat på residualerna
- Kräver mycket, representativ, data; svårt att få för diagnos.
- Betrakta exemplet:

	$f_1$	$f_2$
$r_1$	X	
$r_2$	X	X





—— Vilka test/residualer ska vi konstruera? ——

## Vilka tester?

---

Vilka tester ska man konstruera?

Låt  $S$  vara mängden av de diagnoser som diagnossystemet levererar. Låt  $D$  beteckna mängden av de diagnoser som kan härledas ur mätdata.

Man brukar önska två egenskaper, att  $S$  (med stor signifikans) ska vara:

**Komplett**

Inga verkliga diagnoser ska utelämnas i  $S$ , dvs.

$$D \subseteq S$$

**Sund**

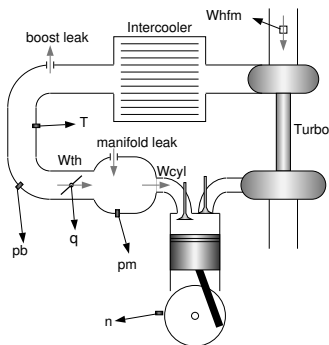
Alla uttalanden i  $S$  ska kunna förklara observerat beteende, dvs. inga "onödiga" uttalanden i  $S$ .

$$S \subseteq D$$

Detta är i mångt och mycket outredda frågor och de villkor som finns är invecklade och tekniska.

## Vilka test?

- Tyvärr (tack och lov?) kan detta vara onödigt många test, speciellt då vi börjar beakta multipelfel
- Är alla dessa möjliga?
- Går att analysera (dock med metoder utanför den här kursen).
- Motormodell: Dynamisk modell, 96 ekvationer, 6 sensorer, 115681 möjliga (minimala) testmängder! Välj vilka med omsorg.



## Tester för att uppnå maximal isolerbarhetsprestanda

I exemplet hade våra konstruerade residualer undermålig isolerbarhetsprestanda

Modellen

	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	X	0	0
$F_2$	0	X	0
$F_3$	0	0	X

Residualerna  $\{r_1, r_2\}$

	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	X	0	X
$F_2$	0	X	X
$F_3$	0	0	X

### *Nya residualer*

Vilka nya residualer ska vi konstruera för att uppnå maximal isolerbarhetsförmåga?

## Tester för att uppnå maximal isolerbarhetsprestanda

### Uppgift:

Utöka med test för att uppnå maximal enkelfelsisolerbarhet.

	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$	X	0	X
$F_2$	0	X	X
$F_3$	0	0	X

**Sökes:** Test som gör:

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$F_1$ isolerbart från $F_3$	?	X	?	0
$F_2$ isolerbart från $F_3$	?	?	X	0

**Begränsningar givna av modellen:**

$O(NF) \subseteq O(F_i) \Rightarrow 0$  i  $NF$ -kolonnen.

Max ett fel kan avkopplas, annars saknas redundans.

**Slutsats:** Det nya testet måste reagera enligt:

	$NF$	$F_1$	$F_2$	$F_3$
$r_3$	0	X	X	0

## Hitta ett test med given felkänslighet

---

### Uppgift:

Hitta ett test med känslighet enligt:

	NF	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
r <sub>3</sub>	0	X	X	0

Vilka ekvationer får användas för att avkoppla fel F<sub>3</sub>?

### Modell:

$$x = u + f_3 \quad (1)$$

$$y_1 = 2x + f_1 \quad (2)$$

$$y_2 = 4x + 1 + f_2 \quad (3)$$

$$OK(S_1) \rightarrow f_1 = 0 \quad (4)$$

$$OK(S_2) \rightarrow f_2 = 0 \quad (5)$$

$$OK(A) \rightarrow f_3 = 0 \quad (6)$$

### Alternativ baserat på felsignaler:

Oberoende av värdet på  $f_3$  skall testet inte larma. Vi måste anta att  $f_3$  är okänd (vi avkopplar  $f_3$ ), dvs ekvation (6) kan inte användas.

Elimination av  $x$  och  $f_3$  i ekv (1)-(5) ger residualen:

$$r_3 = y_2 - 2y_1 - 1 = f_2 - 2f_1$$

som har den sökta felkänsligheten.

## *Hitta ett test med given felkänslighet*

---

Modellegenskaper styr vilka kombinationer av fel som kan avkopplas.

Avkoppling av en mängd fel kan leda till att:

- andra fel faller bort.
- den resulterande modellen saknar redundans.

Vi återkommer till detta i nästa föreläsning.

Givet en specificerad felkänslighet (som tillåts av modellen):

- 1 Avkoppla de fel som residualen ska vara okänsligt för, alternativt ta fram den delmodell som är giltig under nollhypotesen.
- 2 Konstruera en residual från den utvalda delmodellen och se till/kontrollera att den blir känslig för alla fel som inte avkopplades i steg 1.

## —— Isolerbarhet och felmodellering ——



## *Generella eller speciella(restriktiva) felmodeller?*

---

$$y(t) = \theta_1 u_1(t) + \theta_2 u_2(t), \quad \text{där } u_i(t) > 0$$

Antag en restriktiv felmodell:

$$\theta_i = \begin{cases} 1 & \text{felfritt} \\ \neq 1 & \text{aktuator-fel} \end{cases}$$

Betrakta  $\{u_1(t), u_2(t)\}_{t=1, \dots, N}$  och låt  $U_i = [u_i(1) \ \dots \ u_i(N)]^T$ . Vi kan inte isolera felen ifrån varandra omm båda felen kan ge samma utsignal dvs

$$\begin{aligned} \theta_1 U_1 + U_2 &= U_1 + \theta_2 U_2 \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (\theta_1 - 1)U_1 &= (\theta_2 - 1)U_2 \end{aligned}$$

dvs då  $U_1$  och  $U_2$  är linjärt beroende.

**Slutsats:** Med denna, restriktiva felmodell så går det att isolera felen från varandra!

Vad händer om vi ansätter en generellare felmodell?

Antag en betydligt generellare felmodell där  $\theta_1(t)$  och  $\theta_2(t)$  nu är två signaler som varierar i tiden.

Denna felmodell kan modellera en mycket större klass av felbeteende hos aktuatorerna.

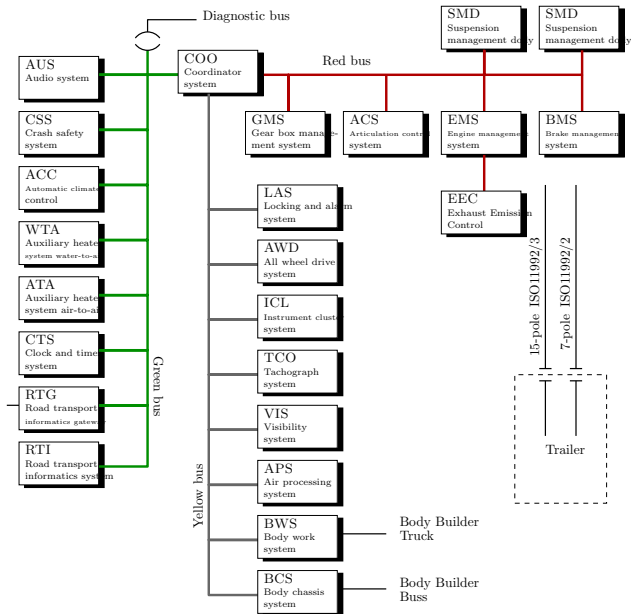
Vi får denna vinst till **priset av isolationsegenskaper!**

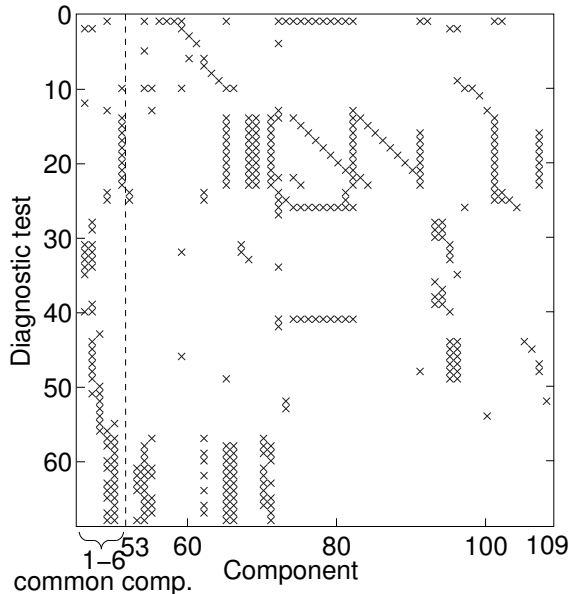
Alla fel i aktuator 1 genererar utsignaler som lika gärna kunde ha genererats vid ett fel i aktuator 2

$$(\theta_1(t) - 1)u_1(t) = (\theta_2(t) - 1)u_2(t), \quad \text{för alla } t \in \{1, \dots, N\}$$

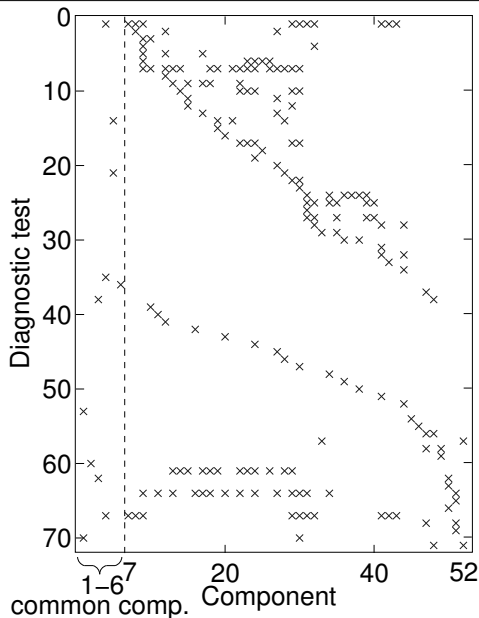
—— Snabbtitt på ett industriellt exempel ——

# Datorer i styrsystem, eksempel från Scania





## Beslutsstruktur i SCR -Selective Catalytic Reduction



- Systemanalys:
  - Formell definition av vad en diagnos är
  - Via observationsmängder definierat detekterbarhet och isolerbarhet som är en övre gräns för den prestanda ett diagnossystem kan uppnå.
  - Koppling mellan felmodeller och isolerbarhet.
- Diagnossystemsanalys:
  - Två sätt att hantera enkelfelsisoleringen.
  - Beslut i brusiga miljöer. (fa,md)
  - Detekterbarhets/isolerbarhetsprestanda för ett diagnosystem.
  - Hur man kan välja tester för att förbättra/maximera isolerbarheten.

*TSFS06 Diagnos och övervakning*  
*Föreläsning 2 - Felisolering*

Erik Frisk

Institutionen för systemteknik  
Linköpings universitet  
erik.frisk@liu.se

2022-03-30