

Auteur Dr.ir. A.C. (Arie) Taal, De Haagse Hogeschool/Technische Universiteit Delft

Foutdetectie en diagnose met behulp van 4S3F-architectuur

Ondanks veel onderzoek naar foutdetectie en diagnose (FDD) methoden voor klimaatinstallaties, worden deze nog zelden toegepast. Dat heeft verscheidene redenen. In dit artikel wordt een FDD-architectuur, het zogenaamde 4S3F-framework, beschreven dat voor een groot gedeelte de tekortkomingen van bestaande FDD-methoden ondervangt. Methoden gebaseerd op de 4S3F-architectuur worden verder uitgewerkt in het Brains for Buildings (B4B) project [1], waaraan 39 partners deelnemen, waaronder onderwijs- en onderzoeksinstituten, installatiebedrijven, adviesbureaus en productontwikkelaars met ondersteuning uit het MOOI-subsidie programma van Rijksdienst voor Ondernemend Nederland (RVO).

Binnenklimaatinstallaties zijn voor een groot deel verantwoordelijk voor het totale wereldwijde energieverbruik, waarvan een aanzienlijk deel wordt veroorzaakt door onjuist onderhoud en incorrecte besturingen en regelingen. In de gebouwde omgeving is het binnenklimaat van het grootste belang. Een beter binnenklimaat resulteert in meer comfort, betere prestaties en minder klachten van gebruikers. Een goede regeling van de klimaatinstallatie gaat dus niet alleen over het beheersen van het energieverbruik voor verwarming, koeling en elektriciteit, maar ook over het behoud van thermisch comfort en een gezond binnenklimaat.

Door combinaties van meerdere opwekkers (bijvoorbeeld zonnepanelen die worden gecombineerd met een WKO-systeem, een warmtepomp en een ketel in één verwarmingssysteem van een gebouw) en intelligente regelingen en besturingen, bijvoorbeeld vanuit het oogpunt van energieflexibiliteit, worden de installaties steeds complexer. Daarom zijn systemen die energie gerelateerde prestaties diagnosticeren van het allergrrootste belang.

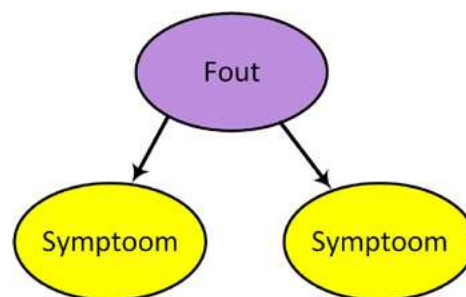
Algemeen geldt dat fouten in een installatie die kunnen leiden tot ongewenste prestaties, vastgesteld kunnen worden met behulp van een of meerdere symptomen. Zie Figuur 1. Een symptoom houdt in dat een gemeten waarde afwijkt van de te verwachten waarde. Bijvoorbeeld: een te hoog ingestelde aanvoertemperatuur in de aanvoerwatertemperatuurregelaar bij een warmtepomp leidt tot een onverwacht lage COP-waarde van de warmtepomp. In de onderzoeksliteratuur (journal- en conferentiepapers) wordt dit aangeduid als de FDD-(foutdetectie en diagnose) methode, waarbij eerst de symptomen worden vastgesteld (detectie) en daarmee de fouten (diagnose).

Huidige FDD-methoden

Er bestaande meerdere soorten FDD-methoden, die op verschillende manieren geassocieerd kunnen worden. Hier delen we die in op basis van de symptoom detectiemethode:

- Op expertkennis gebaseerde FDD-methoden.
- Data gedreven FDD-methoden.

De eerste groep maakt gebruik van kennisregels gebaseerd op ontwerpen en productinformatie of natuurkundige wetten, zoals te verwachten toestandswaarden (bijvoorbeeld temperaturen). Maar ook het gebruik van simulatiemodellen of energie-, massa- en drukbalansen valt hieronder. Voordeel is dat gebruik wordt gemaakt van fysieke kennis. Echter het opzetten voor een specifieke klimaatinstallatie, in het bijzonder bij simulatiemodellen, kan tijdrovend zijn.



Figuur 1: Een fout leidt tot een of meerdere symptomen.

De tweede groep maakt gebruik van historische meetdata, waarmee patronen voor een goed en (wellicht) incorrect werkende installatie in kaart worden gebracht. Methoden die hier onder vallen, zijn regressie-, ANN (Artificial Neural Networks)- en clustermethoden. Een dataset wordt dan verdeeld in correcte en incorrecte uitkomsten voor de installatie-werking. Maar ook de Blackbox-methode, waarbij de te verwachten fysieke output (bijv. energieverbruik) wordt gekalibreerd aan de hand van historische gegevens. Nadeel van deze methoden is dat er meetdata beschikbaar moet zijn voor een goed en wellicht ook een slecht functionerende installatie om een detectiemodel op te zetten. Bovendien kunnen veranderingen in de installatie leiden tot aanpassing van het detectiemodel. Ook is kennis van data-analyse methoden nodig. Deze kennis is meestal (nog) niet aanwezig bij de installatie ontwerper die ook het FDD-systeem zou moeten opzetten.

Verschillende methoden

Voor verschillende systeemonderdelen zien we verschillende methoden, in het bijzonder voor symptoomdetectie. Een FDD voor de hele installatie moet daardoor bestaan uit meerdere FDD-methoden voor verschillende installatieonderdelen. Meestal zijn ze niet aan elkaar te koppelen, terwijl fouten systeemoverschrijdend kunnen zijn. Ook zien we methoden voor een bepaald type component of installatie, waardoor deze aangepast moet worden bij een specifieke toepassing hetgeen programmeerinspanning vraagt. Een ander aspect is dat een aantal van de benodigde sensoren afwezig kan zijn, waardoor de methode moet worden aangepast. Het is opmerkelijk dat de meeste FDD-methoden zeer specifiek zijn ontwikkeld om het falen van HVAC-componenten aan te pakken en dat regelingen buiten beschouwing gelaten worden en er nauwelijks rekening wordt gehouden met effecten op energieprestaties.

FDD-methoden kennen de volgende 6 beperkingen:

Alleen enkelvoudige aanwezige fouten

De meeste FDD-methoden zijn getest op de aanwezigheid van een enkelvoudige fout. Wanneer FDD wordt toegepast op een bestaande installatie is de kans groot dat er meerdere fouten, in het bijzonder sensorfouten, aanwezig zijn.

Verschillende systeemniveaus

De meeste FDD-methoden beperken zich tot componenten of installatieonderdelen zoals sensoren, koelmachines, luchtbehandelingskasten en VAV-systemen. Fouten en symptomen worden daardoor vaak door elkaar gehaald.

Bijvoorbeeld bij een FDD-methode voor een koelmachine werd als fout vast gesteld dat de aanvoertemperatuur naar de verdamper te laag is. Echter de echte fout is aanwezig buiten de systeemgrenzen van de koelmachine, bijvoorbeeld door een verkeerde regeling (de fout) waardoor de gemeten aanvoertemperatuur te laag is (dit is dus een symptoom).

Beperkte automatisering

Alle FDD-methoden zijn nog niet volledig geautomatiseerd waardoor de tijd- en kosteninspanning groot is bij het opzetten voor een specifieke toepassing. De methoden wijken sterk af van ontwerpmethoden voor installaties. Bovendien zijn de meeste operationele FDD-methoden meer symptoomdetectie-methoden waarbij de diagnose nog door een installatie-expert moet worden uitgevoerd of nog aanvullende (vaak handmatige) diagnosemethoden moeten worden toegepast.

Het opzetten van FDD-modellen is arbeidsintensief omdat standaardisatie van FDD-methoden ontbreekt. De specifieke klimaatinstallatie is vaak uniek waardoor klimaattechniek-, programmeer-, data-analyse- of modelleringsexpertise is vereist. Programmeurs en data-analyse-experts hebben over het algemeen weinig expertise op het gebied van klimaattechniek en voor hen is het moeilijk om de fysieke betekenis van de gegevens die ze verwerken te begrijpen. Klimaattechnici en simulatiemodellende daarentegen hebben vaak geen kennis van data-analysemethoden.

Onbetrouwbaarheid van de uitkomsten

Bijna alle FDD-methoden geven een binaire uitkomst: een fout is wel of niet aanwezig. Door onnauwkeurigheden en aannames in de gehanteerde methoden is de uitkomst soms incorrect: een fout wordt onterecht vastgesteld als aanwezig of afwezig.

Geen aansluiting op beheerpraktijk

Vele FDD-methoden bepalen de fouten binnen een (handels)component. Echter, het is ongebruikelijk dat de installatiebeheerder de exacte fout moet weten binnen een component. Meestal volstaat het dat bekend is dat een component of regeling disfunctioneert. Bijvoorbeeld, dat een warmtepomp niet volgens zijn specificaties werkt en dit probleem opgelost moet worden door de leverancier.

Geen aansluiting op de ontwerppraktijk

De meeste FDD-methoden missen de systeemkundige benadering bij het ontwerp van klimaatinstallaties waardoor de opzet van FDD sterk verschilt met het ontwerp.

4S3F methode

Al met al zijn de meeste FDD-methoden nog steeds complex, moeten er tientallen verschillende methoden worden gebruikt op subsysteem- of componentniveau voor een specifiek (uniek) gebouw en is er geen integratie op systeemniveau.

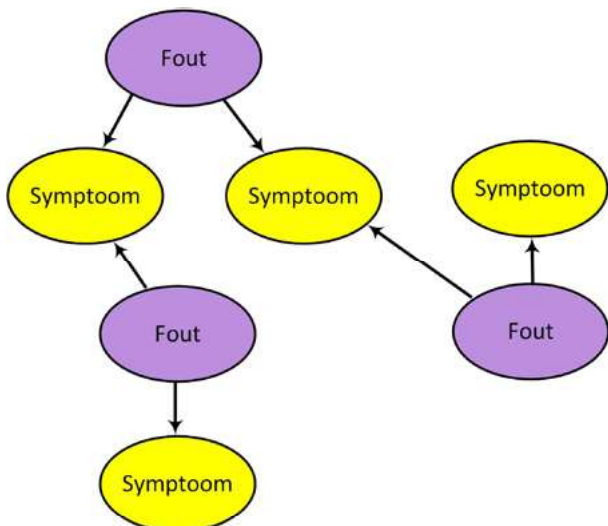
Uit de analyse van bestaande FDD-methoden blijkt dat er een FDD-architectuur ontbreekt, die de eerder beschreven problemen ondervangt. Promotieonderzoek [2] stelt voor om een diagnosemethode toe te passen, die:

- bruikbaar is voor alle soorten van installatiedelen. Daarbij wel de mogelijkheid om verschillende detectiemethoden toe te passen. Kan zowel gebaseerd zijn op kennis als op (historische) meetdata.
- meerdere gelijktijdige fouten kan vaststellen.
- systeemkundig van aard is, waarbij op verschillende systeemniveaus (hele installatie, installatiemodules en componenten) fouten kunnen worden bepaald.
- met onzekerheden in de detectie en diagnose kan omgaan, waardoor waarschijnlijkheidsuitkomsten voor fouten kunnen worden gemaakt in plaats van binaire uitkomsten van bestaande FDD's.
- tijdens het installatieontwerp kan worden opgezet doordat FDD-architectuur moet lijken op de structuur aanwezig in installatieontwerpen.
- de FDD-methode moet eenvoudig uit te breiden en aanpasbaar is.

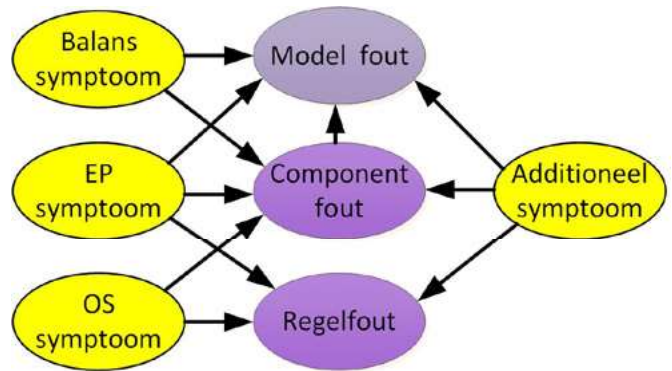
Uitwerking alternatieve methode: 4S3F-(netwerk) methode

Doordat fouten leiden tot een of meerdere symptomen, maar ook een symptoom veroorzaakt kan zijn door meerdere fouten, is in [2] voorgesteld om een FDD-methode op te zetten, bestaande uit een netwerk met fouten en symptomen. Zie Figuur 2.

Door deze opzet zijn ook de detectie- en diagnosefase gescheiden. In de detectiefase worden de aan- en afwezigheid van



Figuur 2: Voorbeeld van een netwerk van fouten en symptomen.



Figuur 3: De structuur van de 4S3F-methode.

symptomen bepaald, waarna de resultaten worden ingevoerd in de diagnosemethode. Het resultaat is een overzicht met de berekende foutkansen. De fouten met de hoogste foutkansen kunnen dan als eerste aangepakt worden. Dit komt overeen hoe een installatie-expert diagnosticeert wanneer er problemen zijn. Fouten kunnen onderverdeeld worden in fouten van componenten (bijvoorbeeld een warmtepomp) en regelfouten (bijvoorbeeld een te hoog ingestelde aanvoerwatertemperatuur).

Een symptoom wordt bepaald met behulp van metingen. Onderscheid wordt er gemaakt tussen operational state (OS), energy performance (EP) en balance symptoms. OS-symptomen hebben betrekking op de status van een component (bijvoorbeeld aan of uit en storing of bedrijf) of op een fysieke toestandsgraagtheid zoals een temperatuur en een volumestroom. De EP-symptomen omvatten rendementen en COP-waarden maar ook geleverde vermogens. Balance-symptomen maken gebruik van behoudswetten: energie-, massa- en drukbalansen. Er kunnen ook symptomen toegepast worden die niet-fysisch zijn zoals onderhoudsinformatie of klachten van gebouwgebruikers. Deze worden aangeduid als additional symptoms.

Vooraf bij bestaande installaties is er een beperkt aantal sensoren aanwezig om voldoende symptomen te kunnen bepalen. Door het gebruik van ontwerp- en fabrikant informatie is wellicht een ontbrekende fysieke grootte te bepalen. Bijvoorbeeld uit het gemeten toerental en de toevoerdruk van een ventilator zou het mogelijk zijn om de volumestroom te bepalen. In de bepaling is echter een onzekerheid aanwezig. Daarom dat ook het begrip modelfout geïntroduceerd.

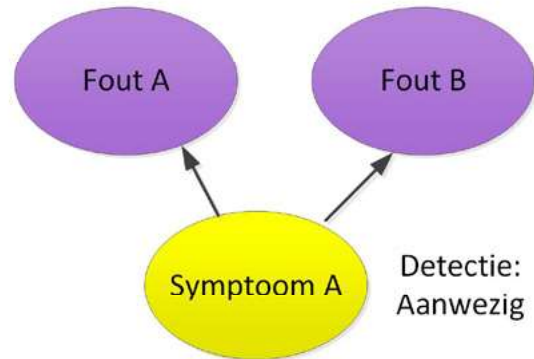
Het netwerk bestaat daardoor uit 4 typen van symptomen en 3 typen van fouten: de 4S3F architectuur. Zie Figuur 3.

Een van de netwerkmethoden is de Bayesiaanse netwerkmethode. Door deze in te zetten voor diagnose krijgen we de Diagnostic Bayesian Network (DBN)-methode, die de bij de huidige FDD-methoden genoemde beperkingen grotendeels kan overwinnen.

Dit omdat het kan omgaan met gelijktijdige diagnose op meerdere niveaus, modulair is, eenvoudig uit te breiden is met symptomen en fouten, kan omgaan met weinig meetpunten, kan omgaan met verschillende soorten symptomen en fouten, en zelfs kan omgaan met incorrect vastgestelde symptomen. Voor elke symptoomknoop in de 4S3F DBN is er een kanstabel (Conditional Probability Table: CPT) voor de twee toestanden Aanwezig en Afwezig. Samen met de kanstabellen voor de foutknooppunten (met zogenaamde prior probabilities) vormen deze tabellen de (kans)instellingen van het netwerk. De grafische structuur van het netwerk geeft aan hoe de kansen van een knooppunt afhangen van de ouders van dat knooppunt (de knopen die wijzen naar die knoop). Op basis van de aan- of afwezigheid van symptomen wordt de kans van de aanwezigheid van elke fout achterwaarts bepaald.

Diagnose:
Aanwezig: 35.7 %
Afwezig: 64.3 %

Diagnose:
Aanwezig: 71.4 %
Afwezig: 28.6 %



Figuur 4: Voorbeeld van diagnose resultaten.

Voorbeeld

Aan de hand van een zeer eenvoudig voorbeeld wordt de methode toegelicht. Gegeven zijn Fout A en Fout B, waarbij de foutkans van A 10% is en van B 20%. Zie tabellen 1 en 2.

In Tabel 3 zijn de zogenaamde conditionele kansen gegeven voor een Symptoom A. Aangenomen wordt dat Symptoom A aanwezig is als Fout A of B aanwezig is.

Figuur 4 toont de DBN met de fouten A en B en symptoom A. Wanneer Symptoom A aanwezig is zien we als resultaat dat de (posterieure) kans dat fout A aanwezig is, 35,7 % is en fout B 71,4%. Dus de kans dat Fout B aanwezig is, is twee keer zo groot. Dat is verklaarbaar omdat de prior foutkans van B twee keer zo groot is.

dat systemen kunnen worden onderverdeeld in subsystemen en aspectsystemen. Het is gebruikelijk bij het ontwerp om schema's toe te passen die van ruw naar detail groeien.

In de ontwerpfase bepalen installatie-ontwerpers de specificaties van de componenten, subsystemen en systemen en hun besturing en regeling. Ze leggen dat vast in principeschema's, ook wel aangeduid als P&ID's (proces- en instrumentatiediagrammen), waarin de belangrijkste installatie- en regelcomponenten worden weergegeven met al hun onderlinge verbindingen, evenals alle massa- (brandstof, water, lucht), elektrische energie en regelsignalen, waarmee thermische energiestromen gemakkelijk kunnen worden berekend.

Bepalen van de DBN-knooppunten voor fouten en symptomen

De meeste voorgestelde FDD-methoden werden ontworpen en geïmplementeerd zonder rekening te houden met het ontwerp van installaties. Het ontwerp van klimaatsystemen is gebaseerd op energie-, massa- en drukbalansen, en op de systeemtheorie

Figuur 5 toont een dergelijk principeschema op basis van ISSO 31 voor meetpunten [3] en ISSO 44 voor hydraulische schakelingen voor warm water [4]. Een principeschema bevat componenten (weergegeven als symbolen) die met elkaar verbonden zijn door leidingen, kanalen en kabels, en bevat sensoren (afgebeeld als zenders) en actuatoren (bijv. elektromotoren of kleppen) die via regelaars zijn gekoppeld. Verder wordt vaak het nominale vermogen van componenten weergegeven en de gecontroleerde en ontworpen temperaturen en debieten bij ontwerpomstandigheden. Samenvattend: principeschema's bevatten informatie over componenten, regelingen en te verwachte toestandswaarden die belangrijk zijn voor de bepaling van fouten en symptomen.

'Fout A' toestand	Ingestelde kans
Aanwezig	0.10
Afwezig	0.90

'Fout b' toestand	Ingestelde kans
Aanwezig	0.20
Afwezig	0.80

Tabel 1 en 2.

Toestand Fout A		Aanwezig		Afwezig	
Toestand Fout B		Aanwezig	Afwezig	Aanwezig	Afwezig
Toestand Symptoom A	Aanwezig	1	1	1	0
	Afwezig	0	0	0	1

Tabel 3: CPT-tabel voor Symptoom A.

Uit de principeschema's kunnen de foutknooppunten worden vastgesteld: componentfouten (zoals pompen, kleppen, ketels, sensoren) en regelfouten (instellingen in controllers, zoals TC). Dergelijke fouten kunnen leiden tot symptomen van energieprestaties (EP), zoals lage prestatiecoëfficiënten (COP's). Vanuit de principeschema's kunnen de sensoren worden vastgesteld die nodig zijn om de uitgewisselde energiehoeveelheden voor energieprestatie metingen te bepalen. Deze fouten leiden ook tot symptomen zoals ongewenste temperaturen (gemeten door de sensoren TT, PT in het gepresenteerde principeschema) of onverwachte toestanden van actuatoren (pompen, kleppen). Deze symptomen kunnen worden aangeduid als symptomen van de operationele toestand (OS). Ten slotte, om de diagnose te laten plaatsvinden met correcte metingen, is het de bedoeling om balanssymptomen van massa, energie en drukbalans te gebruiken om sensorfouten uit te sluiten.

De bovenstaande soorten symptomen en fouten zijn generiek, nuttig en beschikbaar voor elke klimaatinstallatie op meerdere niveaus en kunnen worden geëxtraheerd uit de principeschema's.

Onderzoekresultaten

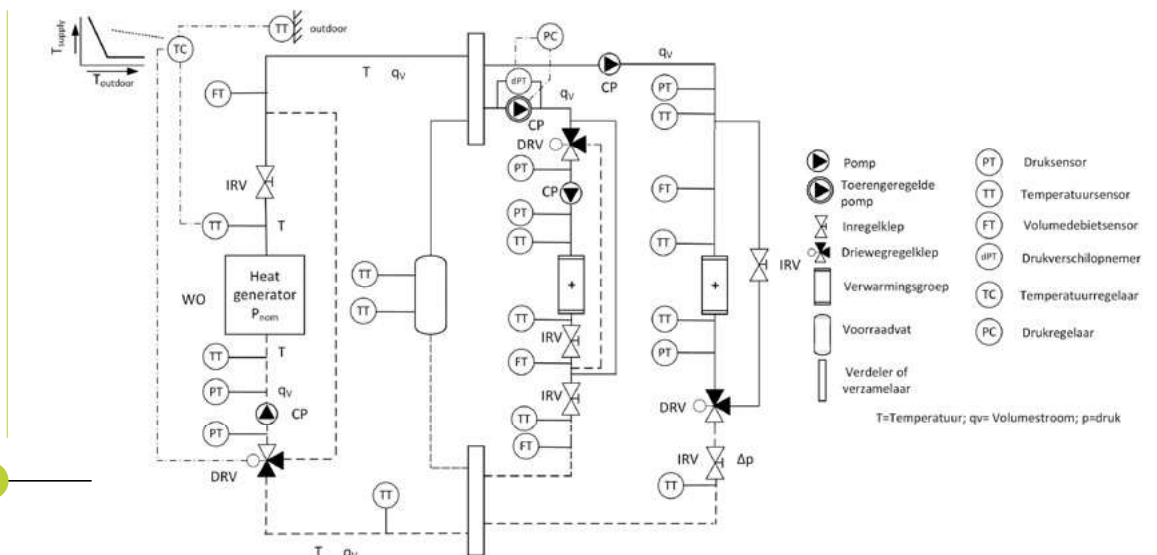
De 4S3F-methode is getoetst in het promotieonderzoek [2] met behulp van historische gebouwbeheersysteem (GBS)-data van het vraaggestuurd ventilatiesysteem en de thermische energiecentrale van het gebouw van De Haagse Hogeschool in Delft, bevattende een warmte koudeopslag (WKO)-systeem, een warmtepomp en een ketel. De gehanteerde detectiemodellen waren kennis-gebaseerd, waarbij onder andere balanssymptomen zijn gebruikt. Voordeel was dat daarmee ook energieverspilling kon worden bepaald. Als diagnoseperiode is een heel jaar genomen. Uit deelonderzoeken bleek dat de 4S3F-methode eenduidig de fouten vaststelde. Bovendien bleek dat de 4S3F-architectuur grotendeels de tekortkomingen oplost,

die aanwezig zijn bij bestaande FDD-methoden, die kunnen worden gerealiseerd door een strikte scheiding tussen oorzaken (fouten) en gevolgen (symptomen), waardoor meerdere detectiemethoden kunnen worden gebruikt. De diagnose door DBN's ondersteunt gelijktijdige diagnose op meerdere systeemniveaus van meerdere fouten en kan zelfs omgaan met onjuiste detectieresultaten als gevolg van meetonauwkeurigheden en onzekerheden in de FDD-methode.

In te stellen foutkansen

De in te stellen kansen in de kanstabellen voor de fout- en symptoomknooppunten had een probleem kunnen zijn. Echter, doordat er genoeg onderscheidende symptomen konden worden opgesteld, konden de fouten vastgesteld worden met arbitraire waarden in de fout- en symptoomtabellen. Bovendien is de exacte waarde van de posterieure foutkans, bijvoorbeeld 70 of 90%, minder van belang omdat het resultaat van de diagnose een ranglijst met foutkansen is waarbij bijvoorbeeld eerst de waarden boven 60% worden onderzocht. In elk deelonderzoek waren de ingestelde foutkansen gelijk. De eerste reden was dat andere waarden moeilijk vast te stellen zijn, omdat ze afhangen van het type van componenten en complexiteit van regelingen die zijn toegepast. De tweede, belangrijker reden is dat uitgevoerde gevoeligheidsanalyses van de ingestelde kansen aantoonde dat de absolute waarden ondergeschikt zijn aan de relatieve.

Wel zijn er soms afwijkende conditionele kansen voor de symptomen toegepast, in het bijzonder voor kleppen, omdat een defecte klep open of gesloten kan zijn, wat wel of niet tot een symptoom leidt. De kansmodellen hadden binaire toestanden: een fout of een symptoom is aanwezig of afwezig. Bijvoorbeeld een klep is defect of correct, waardoor er geen onderscheid wordt gemaakt tussen een open of gesloten defecte klep. Voor een symptoom is er geen onderscheid gemaakt tussen kleine of grote afwijkingen, waardoor daar ook de toestanden binair waren.



Figuur 5: Voorbeeld van een principeschema voor een verwarmingsinstallatie.

Ter toelichting zijn in Figuur 6 twee foutknooppunten (met dezelfde kansverdeling) en drie symptoomknooppunten (met dezelfde CPT's) gegeven. Twee symptomen zijn aanwezig. We zien dat de kans op Fout B groter is dan op Fout A, omdat de twee aanwezige symptomen verwijzen naar Fout B terwijl er maar één verwijst naar Fout A. De beheerter zou dan eerst moeten kijken naar Fout B. Het zou mogelijk kunnen zijn dat Symptoom A toch aanwezig behoort te zijn, maar niet gedetecteerd werd door onnauwkeurigheden in de meet- en detectiemethode. Desondanks is in dit voorbeeld de posterieure uitkomst toch nog 50%! Zoals eerder vermeld, wanneer er meer gekoppelde aanwezige symptomen zijn, zal de nauwkeurigheid hoger worden.

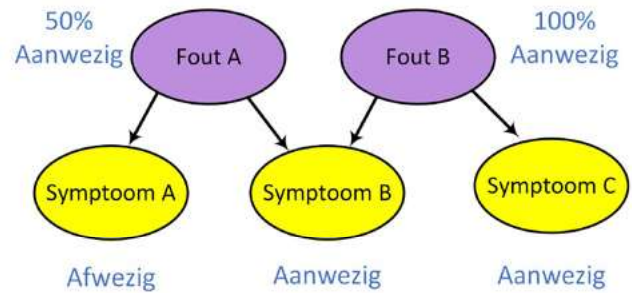
Samenvatting, conclusie en verder onderzoek

De bestaande FDD-methoden voor klimaatinstallaties zijn nog steeds te complex en is er behoefte aan een algemene FDD-architectuur en een modulaire FDD-aanpak voor klimaatinstallaties. Dit leidde tot een referentiearchitectuur voor FDD, genaamd 4S3F, waarin resultaten van meerdere symptoomdetectiemethoden kunnen worden ingevoerd in een DBN met fout- en symptoomknooppunten gebaseerd op principeschema's. De 4S3F FDD kan een integraal en geautomatiseerd onderdeel zijn aanvullend op het gebouwbeheersysteem. Dit kan tijd en geld besparen en ontwerpfouten in het energiebeheersysteem van gebouwen voorkomen. Bovendien kan de 4S3F methode ingezet worden voor commissioning om opleveringsfouten eruit te halen. Uiteindelijk zijn klimaat- en regeltechnici het best in staat om energieprestatiemetingen, alarmdrempels en benodigde sensoren te bepalen.

4S3F kan dus vanaf de ontwerpfase en oplevering worden gebruikt om op systematische wijze fouten te voorkomen in het ontwerpproces en in het gebruikname proces. Na deze installatie-specifieke fase kan 4S3F effectief fouten en foutrichtingen detecteren, die vervolgens door de

Highlights

- Maak onderscheid tussen detectie van symptomen en diagnose van fouten.
- Diagnose met diagnostische Bayesiaanse netwerken (DBNs).
- FDD voor klimaatinstallaties opzetten met behulp van de 4S3F-architectuur.
- Onderscheid drie typen van fouten en vier typen van symptomen.
- Een specifieke 4S3F FDD-methode opzetten gebaseerd op principeschema's.



Figuur 6: Fout B heeft een grotere foutkans dan Fout A.

technisch beheerder vertaald worden naar noodzakelijke acties om het disfunctioneren op te lossen en daarmee onnodig energieverbruik en/of comfortklachten op te lossen.

De 4S3F architectuur is getest voor installatiedelen van het gebouw van De Haagse Hogeschool in Delft. Echter, toepassing op een luchtbehandelingskast ontbreekt. Onderzoekers van TU Delft en TU Eindhoven werken de 4S3F architectuur en bijbehorende methoden daarvoor nader uit in werkpakket 1 van het B4B-project. De onderzoeken worden verricht op installaties in de gebouwen van de TU Delft en Kropman installatietechniek. Daarnaast toetst installatiebedrijf Spie de onderzoeksresultaten op hun projecten. TU Eindhoven richt zich vooral op gebouwgebruikers en op detectiemethoden gebaseerd op historische data, terwijl TU Delft de gehele klimaatinstallatie met luchtbehandeling onderzoekt en de op expertkennis gebaseerde detectiemethoden in sensorarme en -rijke omgevingen. Verder wordt gekeken naar de automatisering van de 4S3F methode en de opzet voor een 4S3F DBN bibliotheek. Beide universiteiten besteden ook aandacht aan de ingestelde fout- en symptoomkansen en of het nuttig is om meer dan twee toestanden te hanteren voor de fout- en symptoomknooppunten in de DBN's.

Bovendien wordt er onderzoek verricht naar bruikbare diagnoseperioden (de diagnose zal vermoedelijk vooral in een stationaire situatie het meest optimaal werken). In dat onderzoek worden alternatieven voor de detectieperiode beschouwd, bijvoorbeeld één- of meermalig per diagnoseperiode en de te hanteren bandbreedten waarbinnen symptomen als afwezig worden geacht.

Al met al belooft de 4S3F methode een flink stap voorwaarts te zijn voor het beheer van (ook) complexe installaties.

Referenties

1. Brains for Building (B4B) project. <https://brains4buildings.org>.
2. Arie Taal. A new approach to automated energy performance and fault detection and diagnosis of HVAC systems (2021). ISBN 978-90-386-5409-6. Bouwstenen 325. Eindhoven University of Technology.
3. Meetpunten en meetmethoden voor klimaatinstallaties (2014), ISSO-publicatie 31, Stichting ISSO, Rotterdam, The Netherlands.
4. Ontwerp van hydraulische schakelingen voor verwarmen (1998), ISSO-publicatie 44, Stichting ISSO, Rotterdam, The Netherlands.