

## MASTER

### Een prototype expertsysteem voor analyse en diagnose van het functioneren van geïmplanteerde eenkamer pacemakers : een beslissingsondersteunend systeem

Bourgonje, R.W.M.

*Award date:*  
1994

[Link to publication](#)

#### **Disclaimer**

This document contains a student thesis (bachelor's or master's), as authored by a student at Eindhoven University of Technology. Student theses are made available in the TU/e repository upon obtaining the required degree. The grade received is not published on the document as presented in the repository. The required complexity or quality of research of student theses may vary by program, and the required minimum study period may vary in duration.

#### **General rights**

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain

7186

FACULTEIT DER ELEKTROTECHNIEK  
TECHNISCHE UNIVERSITEIT  
EINDHOVEN  
VAKGROEP MEDISCHE ELEKTROTECHNIEK

EEN PROTOTYPE EXPERTSYSTEEM  
VOOR ANALYSE EN DIAGNOSE VAN HET  
FUNCTIONEREN VAN GEIMPLANTEERDE  
EENKAMER PACEMAKERS  
Een beslissingsondersteunend systeem

door R.W.M. Bourgonje

Rapport van het afstudeerwerk  
uitgevoerd van 15-12-'93 tot 25-8-'94  
in opdracht van prof. dr. ir. J.E.W. Beneken  
onder leiding van dr. ir. J.A. Blom  
medebegeleid door L.M. van Gelder

DE FACULTEIT DER ELEKTROTECHNIEK VAN DE TECHNISCHE  
UNIVERSITEIT EINDHOVEN AANVAARDT GEEN AANSPRAKELIJK-  
HEID VOOR DE INHOUD VAN STAGE- EN AFSTUDEERVERSLAGEN.

## Voorwoord

De studie Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven wordt afgesloten met een afstudeerproject. In dit rapport wordt mijn afstudeerwerk beschreven dat ik in de periode van 15 december 1993 tot 25 augustus 1994 heb uitgevoerd bij de vakgroep Medische Elektrotechniek.

Langs deze weg wil ik allereerst prof. dr. ir. J.E.W. Beneken bedanken voor de gelegenheid om af te kunnen studeren, bij wat ongetwijfeld één van de meest interessante en één van de meest gezellige vakgroepen van de faculteit Elektrotechniek is.

Natuurlijk wil ik ook mijn directe begeleider dr. ir. J.A. Blom hartelijk bedanken voor zijn kundige, kritische en motiverende kijk op mijn projectaanpak.

Verder wil ik de heer L.M. van Gelder hartelijk bedanken voor het ter beschikking stellen van zijn tijd en kennis om de ontwikkeling van een expertsysteem mogelijk te maken, door mij onvermoeibaar te overstelpen met zeer interessante informatie.

Daarnaast wil ik mijn (ex-)collega-studenten bedanken voor de gezellige en motiverende sfeer in het afstudeerhok. Piet-Hein, Johan, André, Ahmet, Berry, Marlon, Raymond, Vincent en Alwin bedankt!

Tenslotte gaat mijn dank uit naar mijn ouders en vriendin Miranda, die mij de mogelijkheid hebben geboden om deze pittige studie met succes af te kunnen ronden.

*Rucphen, augustus 1994,*

*R.W.M. Bourgonje.*

## Samenvatting

Zelfs moderne pacemakers kunnen mankementen vertonen, wat een potentieel risico met zich meebrengt voor de patiënt. Pacemaker-patiënten dienen daarom regelmatig de werking van de pacemaker te laten controleren. De lastige controle is voor een belangrijk deel gebaseerd op een analyse van het elektrocardiogram van de patiënt.

In dit rapport wordt de ontwikkeling van een expertstelsel beschreven dat de diagnosticus ondersteuning biedt bij de evaluatie van het functioneren van de pacemaker. Wordt een toestand van dysfunctioneren geconstateerd, dan biedt het stelsel ook de helpende hand bij het daarop volgende diagnoseproces. De kennis die het ontwikkelde stelsel bevat is gebaseerd op de empirisch associatieve kennis (heuristieken) van een domeinexpert.

Bij de kennisacquisitie is gebruik gemaakt van algemene taakmodellen van de KADS methodologie. Deze taakmodellen zijn een nuttig hulpmiddel geweest om het lastige kennisacquisitieproces meer gericht te laten plaatsvinden en hierdoor enigszins te vergemakkelijken. Om tijdens de constructie van het expertstelsel, de stap van geformaliseerde kennis naar implementatie te vereenvoudigen en te kunnen controleren is een aparte 'tool' (GOODTREE) ontwikkeld die ook heel nuttig is gebleken.

Vanwege het nog niet compleet zijn en de beperkte mate van functionaliteit, is het stelsel op kleine schaal getest. De eindconclusies waren in het algemeen goed. Het stelsel bleek alleen nog niet in alle situaties optimaal gebruik te maken van de zoekruimte-beperkende heuristieken van de expert, dat wil zeggen er bleken nog een aantal belangrijke dieperliggende heuristieken te ontbreken.

Met dit expertstelsel is de basis gelegd voor een stelsel dat de elektrocardiogram-interpretator kan helpen maar ook voor de expert nuttig kan zijn om zijn gedachten en redeneerproces te evalueren.

## Summary

Even a modern pacemaker can malfunction, so there is always a potential risk for the patient. Therefore pacemaker function should be verified regularly. The difficult verification of pacemaker function is mainly based on the analysis of the electrocardiogram of the patient.

This report describes the development of a prototype expert system that offers support to the cardiologist in his evaluation of pacemaker function. When a state of malfunction has been established, it will also support the following process of diagnosis. The developed expert system contains knowledge, based on empirical associative knowledge (heuristics) from a domain expert.

During the process of knowledge acquisition, generic task models of the KADS methodology have been used. The task models have appeared to be useful tools to direct and to facilitate somewhat the process of knowledge acquisition. Also the tool GOODTREE has been developed to simplify the step in the construction of the expert system, from the stage of formalization to the stage of implementation and to verify correct implementation.

The system isn't complete yet and the functionality is limited. Therefore it has been tested on a small scale only. In general the final results were satisfying. However the system didn't always at best make use of the search space limiting heuristics from the expert, that is to say a number of important more hidden heuristics appeared to be still missing.

This expert system has laid the foundation for a system that can support the electrocardiogram interpreter and can also be useful for the expert to evaluate his thoughts and reasoning process.

## Inhoudsopgave

Voorwoord .....	3
Samenvatting .....	5
Summary .....	6
1 Inleiding .....	9
1.1 Identificatie van het probleemdomein .....	9
1.2 Opbouw van het rapport .....	10
2 Inleiding in expertsystemen .....	11
2.1 Geschiedenis .....	11
2.2 Onderscheid met conventionele programma's .....	12
2.3 Belangrijkste onderverdeling .....	13
2.4 Algemene methoden van kennisrepresentatie .....	16
2.5 Redeneermechanismen .....	18
2.6 Fasen in de ontwikkeling .....	19
3 Achtergrondkennis van het probleemdomein .....	23
3.1 Het hart .....	23
3.1.1 De anatomie .....	23
3.1.2 De elektrofysiologie .....	25
3.2 De pacemaker .....	27
3.2.1 Belangrijkste beweegredenen voor toepassing .....	27
3.2.2 De algemene opbouw .....	29
3.2.3 De verschillende methoden .....	30
3.2.4 Mogelijke problemen .....	32
3.3 De electrocardiografie .....	35
3.3.1 De verschillende afleidingen .....	36
3.3.2 Nomenclatuur .....	37
3.3.3 Onderscheid intrinsieke hartslagen en hartslagen geïnitieerd door de pacemaker .....	39
3.4 Eerder ontwikkelde expertsystemen voor analyse van het functioneren van pacemakers .....	40
4 Analyse van de expertkennis in het probleemdomein .....	44
4.1 Taakdecompositie en algemene strategie .....	45
4.2 Analyse van het functioneren van de pacemaker .....	48
4.2.1 Analyse van 'output function' .....	48

---

4.2.2	Analyse van 'capture function' .....	50
4.2.3	Analyse van 'sensing function' .....	54
4.3	Diagnose van probleemtoestanden .....	55
4.3.1	Diagnose van 'continuous no output' .....	56
4.3.2	Diagnose van 'intermittent no output' .....	57
4.3.3	Diagnose van 'continuous noncapture' .....	58
4.3.4	Diagnose van 'intermittent noncapture' .....	61
4.3.5	Diagnose van 'oversensing' .....	62
4.3.6	Diagnose van 'undersensing' .....	63
5	Formalisatie van de geanalyseerde expertkennis .....	64
6	Implementatie van de geformaliseerde expertkennis .....	66
6.1	De 'expert system building tool' SIMPLEXYS .....	66
6.2	Werkwijze .....	68
6.3	De 'tool' GOODTREE .....	69
6.4	De 'user-interface' .....	75
7	Test en evaluatie .....	77
8	Conclusies en aanbevelingen .....	79
	Literatuurlijst .....	82
	Aanbevolen literatuur .....	85

# 1 Inleiding

Het hart is een grotendeels uit spierweefsel opgebouwd hol orgaan, dat het bloed door ons lichaam pompt. De pompwerking van het hart ontstaat doordat de spiercellen waaruit het is opgebouwd door elektrische prikkeling contraheren. Mensen met stoornissen in het ontstaan en/of in de geleiding van de prikkel kunnen bij bepaalde symptomen in aanmerking komen voor implantatie van een pacemaker (PM).

Een PM bestaat uit een pulsgenerator met batterij en stroomgeleider(s) met elektrode(n). Moderne 'rate-modulated' PM's, ook wel sensor-gestuurde systemen genoemd, hebben daarnaast nog één of meerdere sensoren om de hartfrequentie aan te passen aan de metabolische vraag van het lichaam.

## 1.1 Identificatie van het probleemdomein

Vanwege mogelijke mankementen die zich voor kunnen doen en het hiermee in verband staande potentiële risico, dienen patiënten met een PM regelmatig de PM-werking te laten controleren. Dit gebeurt tijdens de zogenaamde patiënten 'follow-up'. Deze controle is voor een groot deel gebaseerd op een analyse van het elektrocardiogram (ECG) van de patiënt. Ondanks het feit dat veel fouten slechts sporadisch voorkomen, is het aantal faalmechanismen groot. Dit in combinatie met het vooral op empirie en patroonherkenning gebaseerd zijn van de elektrocardiografie als diagnostisch hulpmiddel, maakt de controle met name voor beginnende diagnostici tot een lastig proces.

De vakgroep Medische Elektrotechniek aan de Technische Universiteit Eindhoven heeft de helpende hand willen bieden voor de oplossing van dit probleem door over te gaan tot de ontwikkeling van een beslissingsondersteunend expertsysteem. Er is gekozen voor een aanpak van dit probleem met behulp van een expertsysteem omdat de oplossingsruimte groot is en een expertsysteem tevens de mogelijkheid biedt tot justificatie en uitleg van de oplossing en van het naar de oplossing toe leidende redeneringsproces.

Het expertsysteem dient de diagnosticus tijdens de reguliere 'follow-up' te ondersteunen, bij zijn analyse van het ECG (elektrocardiogram), om de toestand van functioneren van de PM te beoordelen. In het geval dat een toestand van dysfunctioneren wordt geconstateerd, dient eveneens assistentie te worden verleend bij de daarop volgende diagnose.

De diagnosticus, degene die tot de doelgroep van het expertsysteem behoort, kan een medisch electronicus of cardioloog zijn.

De PM's die in eerste instantie met ondersteuning van het expertsysteem gecontroleerd dienen te kunnen worden, zijn geïmplanteerde eenkamer systemen met endocardiale leads, dat wil zeggen PM's, die met een stimulatie-elektrode in het hart alleen de voorkamer of alleen de kamer kunnen stimuleren. Daarnaast is aangenomen dat de invloed van eventuele 'rate-modulated' functies verwaarloosd kan worden (eventueel is



een dergelijke functie tijdens de controle uit te schakelen). De PM dient geen PM te zijn die is uitgerust met functies voor beëindiging van een te snelle hartslag (anti-tachycardia functies).

De domeinexpert, wiens kennis gebruikt werd om het expertsysteem van informatie te voorzien, is de heer L.M. van Gelder (promovendus), werkzaam als hoofd Hartcatheterisatie in het Catharina ziekenhuis te Eindhoven.

Het taalgebruik dat tijdens een dialoog met de gebruiker door het expertsysteem gehanteerd kan worden is analoog aan dat gebruikt door de domeinexpert.

## 1.2 Opbouw van het rapport

In dit rapport wordt de ontwikkeling van een prototype van het expertsysteem beschreven.

Het rapport is zodanig opgebouwd dat het een duidelijk inzicht geeft in de verschillende fasen, zoals die in het algemeen te onderscheiden zijn in de constructie van een expertsysteem. Zoals in § 2.6 nog nader toegelicht zal worden, is het werkelijke ontwikkelproces vaak een proces met een sterk iteratief karakter. Daar een nadruk op het iteratieve karakter de duidelijkheid van het rapport niet ten goede zou komen, is in het rapport gekozen voor een strikte scheiding van de fasen, met indien noodzakelijk vermelding van de gevolgde iteratieve weg die heeft geleid tot het vermelde resultaat.

In dit hoofdstuk heeft in § 1.1 al een identificatie van het probleem plaatsgevonden.

In hoofdstuk 2 wordt vervolgens dieper ingegaan op expertsystemen in het algemeen en wordt een toelichting gegeven op de te onderscheiden fasen tijdens de constructie van een expertsysteem.

In hoofdstuk 3 is een samenvatting opgenomen van de kennis die het resultaat is van de eerste oriëntatie op het vakgebied van de domeinexpert.

Hoofdstuk 4 laat zien hoe de expertkennis in het probleemdomein geanalyseerd kan worden, resulterend in een globale strategie, de verschillende te onderscheiden taken met een eigen inferentiestructuur en bijbehorende concepten en conceptuele relaties.

In hoofdstuk 5 wordt dieper ingegaan op de formalisatie van het kennismodel van hoofdstuk 4, wat in de praktijk heeft geleid tot een ontwerpmodel.

In hoofdstuk 6 wordt allereerst een korte inleiding gegeven over de mogelijkheden en kenmerken van de 'expert system building tool' SIMPLEXYS. Daarna wordt dieper ingegaan op de gevolgde werkwijze tijdens de implementatie van de kennis, de ontwikkeling van een extra 'tool' en de 'user-interface'.

Hoofdstuk 7 geeft de methode van testen en de testresultaten weer van het expertsysteem.

In hoofdstuk 8 worden tenslotte een aantal conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan voor de verdere ontwikkeling van het expertsysteem.

## 2 Inleiding in expertsystemen

Een expertstelsysteem is een computerprogramma dat kennis op een bepaald specialistisch gebied representeert en daarmee redeneert met het oog op het oplossen van problemen of het geven van advies [Jackson, 1990]. De ontwikkeling van een expertstelsysteem kan de schaarste aan deskundigheid op een bepaald gebied opheffen en probleemoplossende expertkennis op brede schaal toegankelijk maken.

Expertsystemen zijn voortgekomen uit de onderzoeksactiviteiten op het gebied van de 'Artificial Intelligence' (AI), ook wel kunstmatige intelligentie genoemd. Onder het onderzoeksdiscipline AI wordt de tak van de informatica verstaan die zich bezig houdt met het ontwerpen en vervaardigen van programma's/systemen die in staat zijn menselijke cognitieve vaardigheden, zoals probleemoplossen, visuele perceptie en het begrijpen van natuurlijke taal, te simuleren.

### 2.1 Geschiedenis

Eén van de belangrijkste ontdekkingen uit de 'klassieke' periode van AI onderzoek, de periode van ca. midden jaren vijftig tot ca. midden jaren zestig, is dat problemen van welk type dan ook gereduceerd kunnen worden tot zoekproblemen. Een voorwaarde hierbij is wel dat ze te formaliseren zijn in termen van een starttoestand (probleem), een eindtoestand (oplossing) en een verzameling operatoren om de toestandsruimte van het probleem (de verzameling van probleem/oplossings-toestanden) te doorlopen. Een andere belangrijke ontdekking uit dezelfde periode is dat indien de toestandsruimte te groot wordt om in een redelijke tijd een oplossing te kunnen vinden, het zoeken naar een oplossing gestuurd dient te worden door een representatie van kennis over het probleem-domein.

In de 'romantische' periode van AI onderzoek, van ca. midden jaren zestig tot ca. midden jaren zeventig, lag de nadruk op representatie van kennis. Het doel hiervan was de kennis en de strategie zoals gebruikt door programma's zoveel mogelijk te laten lijken op die van een mens, betrekking hebbende op eenvoudige probleemoplossende taken. Een belangrijke conclusie die getrokken kan worden uit deze periode van AI onderzoek, zoals eveneens de Swaan Arons en van Lith [1984] aangeven, is dat het niet noodzakelijk is dat een systeem exact dezelfde redenatiestappen maakt of de domeinkennis organiseert als een mens dat doet, zolang het maar het gewenste gedrag vertoont.

In de 'moderne' periode, van ca. midden jaren zeventig tot heden, groeide de desillusie in het gebruik van algemeen probleemoplossende methoden. Gezond verstand en het domeinspecifieke vermogen dat een expert bezit, om onder andere fouten te vermijden, te identificeren en te corrigeren, worden ondergewaardeerd bij deze methoden. Hiermee groeide eveneens de overtuiging dat het probleemoplossende vermogen van een systeem samenhangt met de expliciete representatie van relevante kennis waarover het

systeem kan beschikken en niet met een bepaald gecompliceerd redeneermechanisme of een bepaalde gecompliceerde evaluatie functie (een dergelijke functie geeft enig inzicht in de mate waarin het probleemoplossingsproces vordert). Uit deze laatste overtuiging en op basis van eerdere onderzoeksresultaten zijn de expertsystemen voortgekomen. Deze systemen representeren en redeneren met kennis over een duidelijk afgebakend specialistisch gebied, om expertgedrag te simuleren.

## 2.2 Onderscheid met conventionele programma's

Een expertstelsysteem onderscheidt zich op een aantal manieren van conventionele programma's:

- Het **simuleert menselijk redeneren** over een klein duidelijk afgebakend probleem-domein, in plaats van het domein zelf te simuleren (zoals bij mathematisch modelleren). Hierbij ligt de nadruk op het simuleren van probleemoplossende vaardigheden van een expert.
- De redentatie die het systeem uitvoert heeft voornamelijk betrekking op het redeneren met representaties van menselijke kennis, dat wil zeggen **symbolische redeneerprocessen** in tegenstelling tot pure numerieke bewerkingen.
- Over het algemeen is het gedeelte van het systeem dat een representatie van de domeinkennis bevat, de '**knowledge base**' (kennisbank), gescheiden van het gedeelte dat het redeneren uitvoert, de '**inference engine**' (redeneermachine). Dit heeft onder andere als voordeel dat beide onderdelen afzonderlijk gewijzigd of aangevuld kunnen worden.
- Bij het probleemoplossen wordt gebruik gemaakt van **heuristische methoden**, dat wil zeggen er wordt gebruik gemaakt van vuistregels of simplificaties die een stukje kennis bevatten over het oplossen van een probleem in een bepaald domein. Dit kunnen 'slimme kortsluitingen' zijn van de toestandsruimte van het probleem, om het zoeken effectief te beperken. Heuristieken worden in het algemeen gebruikt indien een taak te tijdrovend wordt, dan wel indien de aard van de uit te voeren taak niet geschikt is voor een zuiver algoritmische aanpak. Een heuristische methode levert over het algemeen een acceptabele oplossing, algoritmiek daarentegen levert altijd een correcte en vaak een meest optimale oplossing.
- Een expertstelsysteem biedt vaak de **mogelijkheid tot justificatie en uitleg** van de oplossing en van het naar de oplossing toe leidende redentatieproces.

De algemenere term 'knowledge based system' (kennissysteem) wordt ook wel gehanteerd voor een expertstelsel. Onder een kennissysteem wordt echter in het algemeen elk systeem verstaan dat een taak uitvoert door het toepassen van vuistregels op een symbolische representatie van kennis en hiertoe zowel een 'knowledge base' als een 'inference engine' bezit. Er hoeft geen sprake te zijn van vuistregels gebaseerd op expertise van een domeinexpert. Is dit laatste wel het geval dan hanteert men in het algemeen de specifiekere term expertstelsel. Deze terminologie zal in dit rapport zoveel mogelijk aangehouden worden.

Het kennissysteem dat in dit rapport beschreven wordt, bevat een specifiek deel van de probleemoplossende kennis van een domeinexpert en wordt dan ook een expertstelsel genoemd.

## 2.3 Belangrijkste onderverdeling

Er kunnen diverse methoden gebruikt worden om een onderverdeling aan te brengen in expertsystemen.

Expertsystemen kunnen allereerst geïnclassificeerd worden door te kijken naar de algemene/generieke taken die ze verrichten.

Clancey (gerefereerd in Jackson [1990]) onderscheidt systemen die analyse- dan wel synthetetaken uitvoeren. Onder analysetaken worden operaties verstaan waarmee een bepaalde toestand of systeem (complexe rangschikking van elkaar beïnvloedende objecten in een bepaalde omgeving bezig met een bepaald proces, waarbij sprake is van energie of informatie uitwisseling met die omgeving) geïnterpreteerd kan worden. Het resultaat van een analysetaak is een oplossing (een interpretatie) die onderdeel is van een vaststaande verzameling van mogelijke oplossingen (mogelijke interpretaties). Onder synthetetaken worden operaties verstaan waarmee een toestand of systeem geconstrueerd kan worden. De oplossing moet in dit geval geconstrueerd worden. Onder deze algemene taken vallen nog een aantal meer specialistische taken. Voor een algemene beschrijving van deze taken kan men terecht in Jackson [1990] en voor een meer gedetailleerde in Tansley en Hayball [1993].

De twee basistaken die Jackson [1990] aangeeft zijn classificatie- en constructietaken. Bij classificatietaken ligt de nadruk op het vinden van een verband tussen data en oplossingen op een bepaald niveau van abstractie. De mogelijke oplossingen zijn van tevoren bekend. Bij constructietaken worden de oplossingen geconstrueerd in plaats van geselecteerd, waarbij voldaan moet worden aan bepaalde voorwaarden/beperkingen. Het aantal mogelijke oplossingen kan heel groot zijn. Bij de probleemoplossing wordt volstaan met het zoeken naar een oplossing die voldoet aan de voorwaarden in plaats van dat gezocht wordt naar de meest optimale oplossing.

Niet alle taken die expertsystemen kunnen verrichten, kunnen eenduidig worden geïdentificeerd als zijnde analyse- of synthesetaken dan wel classificatie- of constructietaken. Er zijn taken die kenmerken van beide algemene taken in zich herbergen.

Een ander onderscheid dat gemaakt kan worden bij expertsystemen, is gebaseerd op het soort kennis dat het systeem bevat. Zo kan er zogenaamde oppervlakkige kennis onderscheiden worden, ook wel 'surface knowledge' of 'shallow knowledge' genoemd, en zogenaamde diepe kennis, ook wel 'deep knowledge' of 'model-based knowledge' genoemd.

Onder de oppervlakkige kennis worden de heuristieken verstaan die een expert hanteert bij de associatie tussen data en oplossingen op een bepaald niveau van abstractie. Onder diepe kennis wordt de kennis verstaan die gebaseerd is op een expliciet model van het probleemdomen. Deze tweedeling wil niet zeggen dat er geen diepe kennis versluierd zit in een op heuristieken gebaseerd expertsysteem; dit is namelijk in het algemeen wel het geval. De probleemoplossing is dan echter gebaseerd op de heuristieken en niet op een expliciet model.

Systemen die gebaseerd zijn op oppervlakkige kennis zijn in staat tot zogenaamd heuristisch redeneren ('heuristic reasoning'). Systemen die diepe kennis bevatten zijn in staat tot modelgebaseerd redeneren ('model-based reasoning'). Deze laatste vorm van redeneren staat in geval van een probleemoplossende diagnosetaak (een specialisatie van de analysetaak) bekend als 'diagnosis from first principles'.

Indien bij de constructie van een systeem gekozen wordt voor een modelgebaseerde aanpak kan het lastige proces van de elicitering van de door de domeinexpert gehanteerde heuristieken, zoals benodigd bij een heuristische aanpak, omzeild worden. Tevens kunnen, doordat uitgegaan wordt van een modelbeschrijving van een goed functionerend systeem, fouten aan het licht komen die nog nooit hebben plaatsgevonden. Nadelen van een dergelijke aanpak zijn echter, het verkrijgen van een goede modelbeschrijving en de controle van een mogelijke combinatorische explosie van probleemtoestanden.

Naast systemen die alleen oppervlakkige dan wel alleen diepe kennis bevatten, komen ook systemen voor die beide soorten kennis combineren. Hierbij kan gedacht worden aan systemen die een eerste diagnose uitvoeren op basis van heuristieken. Mocht deze eerste diagnose niet succesvol zijn, dan wordt verder gegaan met een modelgebaseerde diagnose.

Een laatste belangrijk onderscheid dat gemaakt kan worden bij expertsystemen, heeft te maken met de toegestane responsietijd. Dient een systeem altijd binnen een bepaalde gestelde tijd met een antwoord/reactie te komen, dan spreekt men in het algemeen van een real-time expertsysteem. Is daarentegen de tijd waarbinnen een systeem met een antwoord/reactie komt niet van wezenlijk belang dan spreekt men van een off-

line expertstelsysteem (omdat de meeste systemen off-line systemen zijn, laat men in het algemeen de benaming off-line achterwege).

Het systeem dat in dit rapport wordt beschreven, dient onder andere door een analyse van het ECG de toestand van functioneren van de PM te beoordelen. Daarnaast dient bij eventuele constatering van dysfunctioneren een diagnose gesteld te worden van de probleemtoestand.

In termen van de algemene/generieke taken zoals Jackson [1990] die onderscheidt dient hier (eventueel tweemaal) een classificatieprobleem opgelost te worden. De nadruk ligt immers op het leggen van een verband tussen ECG kenmerken (en/of eventuele testresultaten) en een mogelijke toestand van functioneren van de PM en (eventueel) een mogelijke oorzaak van dysfunctioneren. In beide gevallen is een verzameling van mogelijke oplossingen aan te wijzen (mogelijke toestanden van functioneren en mogelijke oorzaken van dysfunctioneren). Een classificatie van het probleem in termen van de door het systeem te verrichten algemene taken zoals Clancey (gerefereerd in Jackson [1990]) onderscheidt, levert tweemaal de classificatie van analysetaak op.

Bij de ontwikkeling van dit expertstelsysteem is gekozen voor een heuristische aanpak. Hiervoor is gekozen omdat:

- gedetailleerde op schrift gestelde probleemoplossende expertkennis beschikbaar was, geschreven in het kader van een promotie [van Gelder];
- de domeinexpert goed in staat was om zijn kennis expliciet te maken;
- het uiteindelijk resulterend expertstelsysteem een afspiegeling zal zijn van het probleemoplossende gedrag van de domeinexpert, die zijn kwaliteiten allang bewezen heeft;
- er geen betere test is op de compleetheid en consistentie van de beschreven kennis dan een (correcte) implementatie ervan;
- het lastig is om bij een modelgebaseerde aanpak een goede modelbeschrijving te krijgen;
- het lastig is om bij een modelgebaseerde aanpak de mogelijke combinatorische explosie van hypothesen te controleren;
- bij een eventueel toekomstige modelgebaseerde aanpak, de heuristische afkomstig van een voorafgaande heuristische aanpak gebruikt kunnen worden om een combinatorische explosie te controleren/voorkomen.

Vanwege de beslissingsondersteunende rol die het expertstelsysteem zal gaan vervullen, waarbij in de huidige opzet een dialoog met de gebruiker aangegaan wordt, zijn geen bijzondere real-time aspecten vereist.

## 2.4 Algemene methoden van kennisrepresentatie

De representatievormen die in deze paragraaf beschreven worden hebben betrekking op de representatie van de kennis in de 'knowledge base' (KB) van het expertsysteem. Bij de keuze voor een bepaalde representatievorm of een combinatie van vormen dient men onder andere bij de volgende punten stil te staan:

- Is de representatievorm logisch adequaat, dat wil zeggen kan de representatievorm het gewenste onderscheid maken tussen de diverse soorten kennis?
- Heeft de representatievorm heuristische kracht, dat wil zeggen heeft de desbetreffende vorm de mogelijkheid om het inferentieproces efficiënt te sturen tijdens de probleemoplossing?
- Bezit de representatievorm een duidelijke, gemakkelijke notatievorm, zodat de resulterende expressies makkelijk te lezen en te schrijven zijn?
- Kan de gerepresenteerde kennis eenvoudig uitgebreid worden?

De algemeen te onderscheiden representatievormen zijn:

- regels;
- netwerken;
- frames.

Op regels gebaseerde representatievormen zijn naar alle waarschijnlijkheid de meest toegepaste vorm van kennisrepresentatie. De zogenaamde produktie-regels hebben de vorm '*IF condition...THEN conclusion...*' en lijken een natuurlijke manier om veel soorten kennis uit te drukken.

Het eenvoudige redeneermechanisme dat gebruikt kan worden bij het probleemoplossen lijkt in veel gevallen op dat wat mensen hanteren. Met een op regels gebaseerde representatievorm zijn in het algemeen met succes grote KB's te construeren. Een nadeel van op regels gebaseerde systemen is dat de controlekennis vaak vermengd is met de domeinkennis in de KB (dus voor een deel impliciet aanwezig).

Extra stuurmechanismen die vaak onderscheiden kunnen worden zijn de zogenaamde conflictresolutie-strategie en meta-regels. De conflictresolutie-strategie is de strategie, die bepaalt welke regel uitgevoerd zal worden, in geval dat meerdere regels tegelijk voor uitvoering in aanmerking komen (vaak 'hard-coded' in de 'rule interpreter'). Meta-regels zijn regels die redeneren over de uitvoering van regels, waarmee tevens een conflictresolutie-strategie uitgevoerd kan worden. Daarnaast is er bij op regels gebaseerde representatievormen vaak de mogelijkheid tot gebruik van een zogenaamde 'Certainty Factor' (CF), waarmee redeneren met onzekere data en domeinkennis mogelijk wordt.

Regels worden vaak gebruikt in combinatie met andere representatievormen als frames en netwerken.

Een andere vorm van kennisrepresentatie bieden netwerken. Een bekend voorbeeld hiervan zijn de associatieve of semantische netwerken. Deze netwerken bestaan uit een aantal concepten-representerende knooppunten met verbindingen daartussen, die de relaties tussen de concepten weergeven.

Dankzij het zogenaamde 'type-token' onderscheid tussen de knooppunten, kunnen knooppunten eigenschappen en procedures van elkaar overerven ('inheritance of properties'). Dit laatste is een belangrijk kenmerk van de op gestructureerde objecten gebaseerde representatievormen. Een nadeel van netwerken is, dat de betekenis van knooppunten soms voor meer dan één uitleg vatbaar is. Tevens sluit de gehanteerde zoekmethode, die niet kennisgebaseerd is, een combinatorische explosie van de te doorlopen zoekruimte niet uit. Deze nadelen maken semantische netwerken in principe tot een logisch inadequate en heuristisch inadequate representatievorm. Er is wel naar een oplossing gezocht voor deze nadelen. De resultaten hiervan leiden echter vaak tot systemen die de oorspronkelijke eenvoud, die netwerkrepresentaties aanvankelijk kunnen bieden, verliezen. Desalniettemin kunnen semantische netwerken in andere fasen van de ontwikkeling dan de feitelijke implementatie, goed gebruikt worden om de kennis in kaart te brengen.

Een andere vorm van gestructureerde kennisrepresentatie bieden de zogenaamde frames. Een frame kan gezien worden als een record-structuur, waarin in de vorm van 'slots' (als velden in een record-structuur) en 'fillers' (waarden opgeslagen in de velden) kennis wordt opgeslagen.

Elk frame heeft een zogenaamde type 'slot', een 'IS-A' of een 'A-KIND-OF' 'slot'. Via dit 'slot' kan een hiërarchische structuur opgebouwd worden via welke frames eigenschappen van elkaar kunnen overerven. Een frame kan dan ook gezien worden als een compleet knooppunt binnen een associatief netwerk.

Frames zijn efficiënter dan regels en zijn met name geschikt om hiërarchieën en algemene domeinkennis, als concepten en hun relaties, te representeren. Een nadeel van frames is dat het moeilijk kan zijn om een organisatie en structuur van de frames te selecteren waarmee het vereiste gedrag bereikt kan worden.

Voor een uitvoeriger beschrijving van de behandelde representatievormen en voor een beschrijving van de meer gecompliceerde vormen van kennisrepresentatie kan men terecht in de algemene literatuur op het gebied van expertsystemen, bijvoorbeeld Jackson [1990].

In hoofdstuk 6, 'Implementatie van de geformaliseerde expertkennis', wordt dieper ingegaan op de representatievorm die voor de ontwikkeling van het onderhavige expertstelsel is gebruikt.



## 2.5 Redeneermechanismen

De 'inference engine' (redeneermachine) van een expertstelsel bepaalt hoe de kennis, die zich in de KB bevindt, wordt aangewend bij het zoeken naar een oplossing van een probleem. Het inferentie/redeneermechanisme vormt dus de werkende kern van het expertstelsel.

Zoals AI onderzoeker Newell (gerefereerd in Jackson [1990]) aangeeft, dient bij de beschrijving van de werking van AI-programma's, goed in de gaten gehouden te worden over welk niveau van omschrijven men het heeft. Zo kan een onderscheid gemaakt worden tussen het redeneren op het kennisniveau en het redeneren op het symboolniveau. Het laatste wordt verricht door het door de 'inference engine' gehanteerde inferentie mechanisme en implementeert redentatie op het kennisniveau.

Bij op productieregels gebaseerde systemen zijn twee basisvormen van redeneren (op symboolniveau) te onderscheiden:

- 'Forward chaining'. Uitgaande van feiten, data in de KB, wordt gekeken van welke regels het IF-deel (conditiedeel) voldoet. Voldoet het IF-deel, dan wordt het THEN-deel (conclusie) van die regel uitgevoerd (de regel 'vuurt'). Het vuren van deze regel zorgt voor nieuwe feiten/data in de KB, waarmee weer andere regels zouden kunnen vuren. Dit kan leiden tot een mogelijke oplossing van een probleem.
- 'Backward chaining'. Nu wordt gestart met het THEN-deel van een regel dat voldoet. Vervolgens wordt gekeken of het IF-deel voldoet. Indien dit niet zo is, wordt gekeken of er regels zijn met een THEN-deel dat gelijk is aan een IF-deel in kwestie. Is dit zo, dan wordt weer gekeken of het IF-deel van de desbetreffende regel voldoet. Voldoet deze dan is de oplossing gevonden.

Hierbij moet nog opgemerkt worden dat er ook op regels gebaseerde systemen zijn die beide vormen van 'chaining' kunnen toepassen.

Bij associatieve netwerken wordt, voor het afleiden van feiten, het netwerk doorzocht op met elkaar samenhangende concepten. Dit zoeken staat bekend onder de naam 'intersection search'. Dit inferentiemechanisme is niet op kennis gebaseerd.

Bij frames zal het afleiden van feiten/kennis neerkomen op een combinatie van 'inheritance' (overerving) en 'default reasoning', dat wil zeggen het redeneren gebeurt op basis van in de 'slots' aanwezige informatie. Dit kan ook een zogenaamde 'demon' zijn, die op te vatten is als een 'IF-NEEDED' of 'IF-ADDED' procedure die bij een 'slot' hoort.

In Tansley en Hayball [1993] wordt een opsomming gegeven van een aantal algemene probleemoplossende methoden, zoals die feitelijk door de 'inference engine' ten toon gespreid zouden kunnen worden. Deze methoden, die elkaar niet uitsluiten, zijn:

- 'State-space searching' methoden. Problemen worden opgelost door het doorzoeken van toestandsruimten. Algoritmen die hierbij gebruikt kunnen worden zijn: 'depth-first', 'breadth first', 'hill climbing' etc.
- 'Rule-based' methoden. Problemen worden opgelost door het doorzoeken van verzamelingen met regels (bijvoorbeeld: 'forward chaining', 'backward chaining').
- 'Automatic deduction' methoden. Problemen worden opgelost door gebruik te maken van algemene inferentie algoritmen.
- 'Constraint satisfaction' methoden. Problemen worden opgelost door te voldoen aan een verzameling voorwaarden/beperkingen.
- 'Pattern matching' methoden. Problemen worden opgelost door herkenning van patronen.
- 'Parsing' methoden. Problemen worden opgelost door een grammaticale analyse.
- 'Model-based' methoden. Problemen worden opgelost door het doorzoeken van toestandsruimten van modellen.

In hoofdstuk 6, 'Implementatie van de geformaliseerde expertkennis', wordt een toelichting gegeven op de inferentiemechanismen waar het behandelde expertstelsel van gebruik maakt.

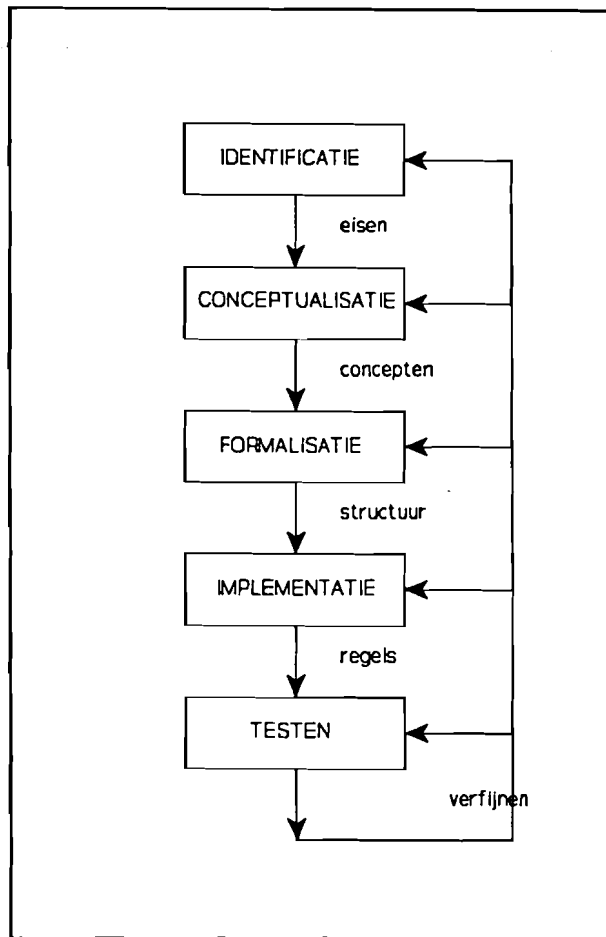
## 2.6 Fasen in de ontwikkeling

De ontwikkeling van een expertstelsel wordt ook wel aangeduid met het begrip 'knowledge acquisition' (kennisacquisitie) en valt onder het vakgebied van de 'knowledge engineer'.

Buchanan (geciteerd door Jackson [1990]) geeft de volgende definitie voor het begrip 'knowledge acquisition': "*Knowledge acquisition is the transfer and transformation of potential problem-solving expertise from some knowledge source to a program.*"

Naast deze definitie van het begrip 'knowledge acquisition' wordt hieronder ook wel het proces verstaan van het verzamelen en structureren van kennis met als doel de constructie van een expertstelsel of kennisstelsel. Onder deze laatste omschrijving valt niet de feitelijke constructie van het stelsel. Hierna zal echter de definitie van Buchanan aangehouden worden, die het hele ontwikkelproces tot en met de constructie overkoepelt.

Buchanan et al (Jackson [1990]) geven ook een analyse van het begrip 'knowledge acquisition' in de vorm van een ontwikkelmodel dat de verschillende fasen weergeeft in de constructie van een expertstelsel. Dit ontwikkelmodel is weergegeven in figuur 2.1.



Figuur 2.1. Fasen in het 'knowledge acquisition' proces (Buchanan et al).

- Identificatie:** In deze fase dient allereerst het probleemdomein geïdentificeerd te worden, dat wil zeggen wat is het probleem en aan welke eisen dient de oplossing te voldoen. Daarnaast dienen de beschikbare hulpmiddelen geïnventariseerd te worden.
- Conceptualisatie:** In deze fase worden de kernbegrippen en hun onderlinge relaties, die benodigd zijn voor de probleemoplossing, blootgelegd.
- Formalisatie:** Tijdens deze fase wordt getracht de onderliggende strategie bloot te leggen. De blootgelegde probleemoplossende kennis wordt vervolgens geformaliseerd, dat wil zeggen getransformeerd in een formele structuur, die gebruikt kan worden bij de implementatie van de kennis.
- Implementatie:** Tijdens de implementatiefase wordt de geformaliseerde probleemoplossende kennis omgezet in een programma. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van AI-programmeertalen (als LISP of PROLOG) of van zogenaamde 'expert system shells'.

Testen: In deze fase wordt het resulterende systeem getest en geëvalueerd. Dit kan in het algemeen het beste plaats vinden door het systeem een groot en representatief aantal probleemgevallen te laten oplossen. Voldoet het systeem nog niet aan de verwachtingen of heeft het nog niet de bedoelde functionaliteit, dan wordt het proces herhaald.

Tegenwoordig wordt tijdens de ontwikkeling van een expertstelsel meer aandacht besteed aan de analyse van de kennis dan voorheen gedaan werd. Dit resulteert over het algemeen in een expliciet kennismodel, dat om wordt gezet in een ontwerpmodel, waarna implementatie plaatsvindt. Er heeft een verschuiving plaatsgevonden van een meer computergerichte (implementatiegerichte) aanpak naar een meer kennisgerichte aanpak. Hierbij kan gebruik worden gemaakt van gestructureerde ontwikkelmethodieken, als onder andere KADS [Breuker en Wielinga, 1986; Tansley en Hayball, 1993]. De afkorting KADS betekend: 'Knowledge based systems Analysis and Design Support'.

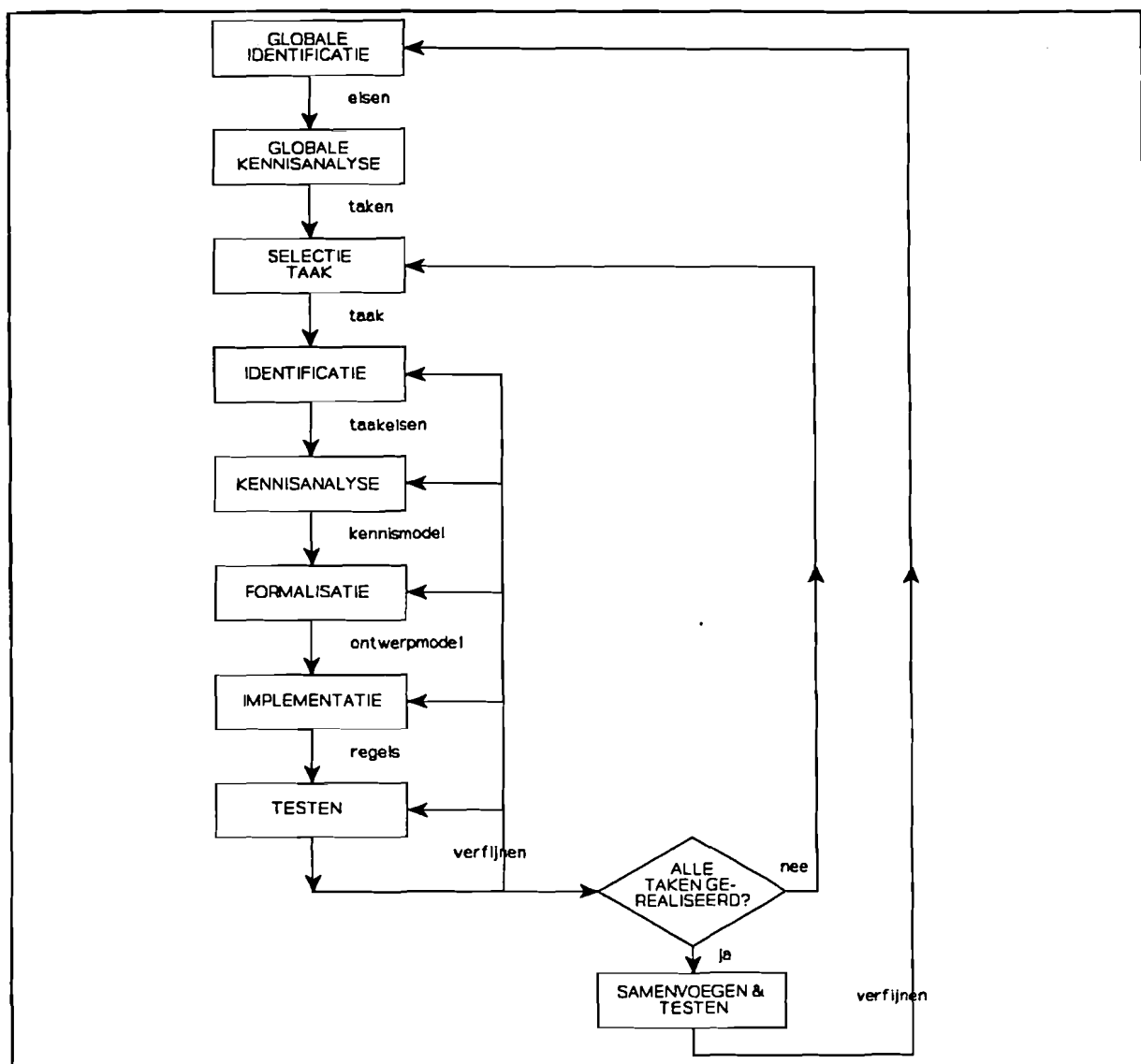
Bij de constructie van het in dit rapport beschreven expertstelsel is ook gebruik gemaakt van een meer kennisgerichte aanpak. De belangrijkste reden hiervoor is dat een beter inzicht wordt verkregen in de probleemoplossende expertkennis en het gedrag zoals het systeem dat behoort te vertonen. Het ontwikkelmodel dat een betere afspiegeling is van het gevolgde ontwikkeltraject is weergegeven in figuur 2.2.

Naast het gevolgde incrementele ontwikkeltraject is het belangrijkste onderscheid met het model van Buchanan et al te vinden in de fasen kennisanalyse en formalisatie.

In de gehanteerde kennisanalysefase vindt naast een conceptualisatie ook een verdere analyse van de probleemoplossende kennis plaats. Hierin worden een strategie, te onderscheiden taken en bijbehorende redentatie/inferentiestructuren geïdentificeerd. Deze fase resulteert in een kennismodel, dat een afspiegeling is van het probleemoplossende gedrag of 'expert'-gedrag zoals het systeem dat behoort te vertonen.

In de daaropvolgende formalisatiefase wordt het kennismodel omgezet in een formele structuur wat resulteert in een ontwerpmodel. Het belangrijkste doel van de formalisering is het omzetten van het kennismodel in een eenduidige structuur. In tegenstelling tot de formalisatiefase zoals die door Buchanan et al wordt geïdentificeerd, vindt in deze fase geen verdere kennisanalyse meer plaats maar 'slechts' een omzetting in een formele structuur.

Hoewel vanwege het incrementeel prototyping karakter van het ontwikkelproces geen strikte scheiding is aan te brengen in de fasen van ontwikkeling, wordt de ontwikkeling van het expertstelsel, voor de duidelijkheid van het rapport, aan de hand van de volgende fasen beschreven: identificatie, kennisanalyse, formalisatie en testen. Indien noodzakelijk zal daarbij de gevolgde iteratieve weg vermeld worden.



Figuur 2.2. Het gevolgde ontwikkeltraject ('incremental prototyping').

### 3 Achtergrondkennis van het probleemdomein

De eerste stap in de ontwikkeling van een expertstelsel is een korte maar grondige verdieping in het probleemdomein. Dit is noodzakelijk om een goede communicatie op het vakgebied van de expert mogelijk te maken. Tevens dient de verdieping om een globaal inzicht te krijgen in de aard van problemen die in dat domein voorkomen en door de expert opgelost dienen te worden.

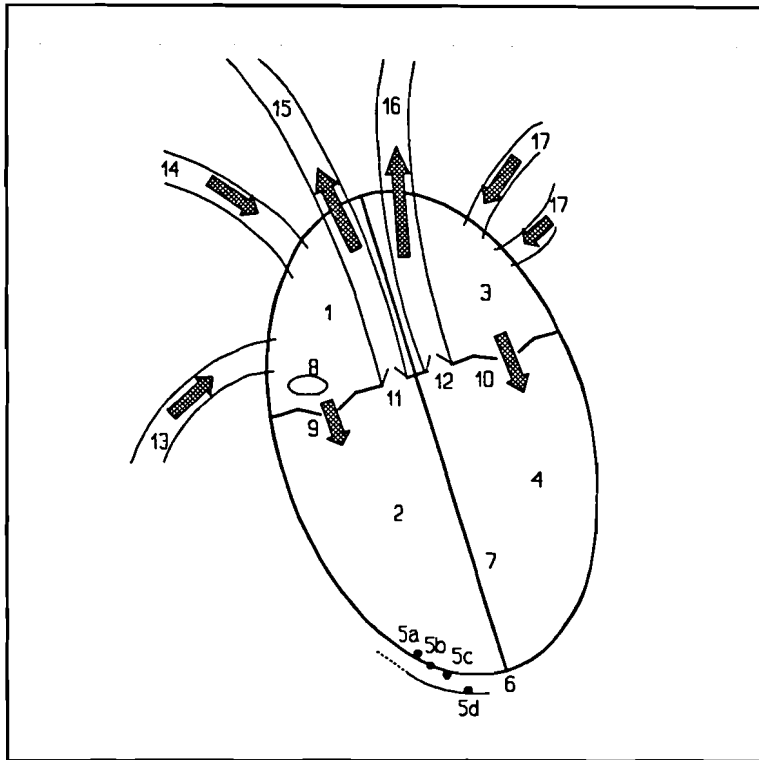
De analyse van de toestand van functioneren en eventuele diagnose van optredende problemen van de PM is voor een groot deel gebaseerd op een analyse van het ECG van de patiënt. Om een goede elicitering/acquisitie van de expertkennis mogelijk te maken, heeft een grondige inwerking op het gebied van het hart, de elektrocardiografie en PM's (en de invloed van PM's op beide) plaatsgevonden. Naast deze algemene informatie heeft een literatuuronderzoek naar eerder ontwikkelde expertsystemen voor analyse van PM-functioneren al meer specifieke informatie opgeleverd. Het resultaat van deze verdieping in de achtergrondkennis is samengevat in de drie navolgende paragrafen. Er moet wel benadrukt worden dat de informatie in dit hoofdstuk globaal blijft. Gedetailleerde feiten en probleemoplossende kennis komen in hoofdstuk 4 aan bod.

#### 3.1 Het hart

Het hart is een grotendeels uit spierweefsel opgebouwd hol orgaan, dat door middel van contractie en ontspanning het bloed door ons lichaam pompt. Het hart kan contraheren doordat het spierweefsel waaruit het is opgebouwd bestaat uit zogenaamde filamenten. Deze filamenten kunnen als gevolg van elektrische prikkeling langs elkaar schuiven, waardoor de spiervezel zich verkort.

##### 3.1.1 De anatomie

In figuur 3.1 is een schematisch overzicht weergegeven van de anatomie van het hart.



Figuur 3.1. Schematische weergave van de anatomie van het hart.

- |    |                   |     |  |
|----|-------------------|-----|--|
| 1. | Rechteratrium.    | 8.  | Coronaire sinus.                         |
| 2. | Rechterventrikel. | 9.  | Tricuspidalisklep.                       |
| 3. | Linkeratrium.     | 10. | Mitralisklep.                            |
| 4. | Linkerventrikel.  | 11. | Pulmonaaalklep.                          |
| 5. | a. Endocardium.   | 12. | Aortaklep.                               |
|    | b. Myocardium.    | 13. | Onderste holle ader, vena cava inferior. |
|    | c. Epicardium.    | 14. | Bovenste holle ader, vena cava superior. |
|    | d. Pericardium.   | 15. | Longslagader.                            |
| 6. | Apex.             | 16. | Aorta.                                   |
| 7. | Septum.           | 17. | Longslagaders.                           |

Het hart bestaat uit twee harthelften, een linker- en rechterhelft (benoemd vanuit de patiënt). De scheidingswand tussen deze helften wordt het septum genoemd. Elk harthelft is verdeeld in twee compartimenten: het atrium, ook wel boezem of voorkamer genoemd en het ventrikel, ook wel kamer genoemd. Atrium en ventrikel staan door middel van een klep met elkaar in verbinding. Voor de rechterharthelft is dit de zogenaamde tricuspidalisklep en voor de linkerharthelft de mitralisklep.

In het rechteratrium monden de bovenste en onderste holle ader uit (ook wel respectievelijk vena cava superior en vena cava inferior genoemd), die zuurstofarm bloed aanvoeren. Onderin het rechteratrium bevindt zich de opening van de coronaire sinus. De

coronaire sinus is het veneuze deel van de coronaire circulatie. Vanuit het rechterventrikel vertrekt de longslagader, die zorgt voor doorvoer van het zuurstofarme bloed naar de longen. Aan de ingang van de longslagader bevindt zich eveneens een klep, de pulmonaalklep.

In het linkeratrium monden longaders uit, met zuurstofrijk bloed. Vanuit het linkerventrikel vertrekt de lichaamsslagader of de aorta, die zorgt voor de doorvoer van het zuurstofrijke bloed. Aan de ingang van de aorta bevindt zich de aortaklep. De kleppen in het hart zorgen ervoor dat het bloed maar in één richting doorgelaten kan worden.

De binnenzijde van de myocardium wordt endocardium genoemd; de buitenzijde epicardium. Het hart is omsloten door een vlies, het pericardium.

### 3.1.2 De elektrofysiologie

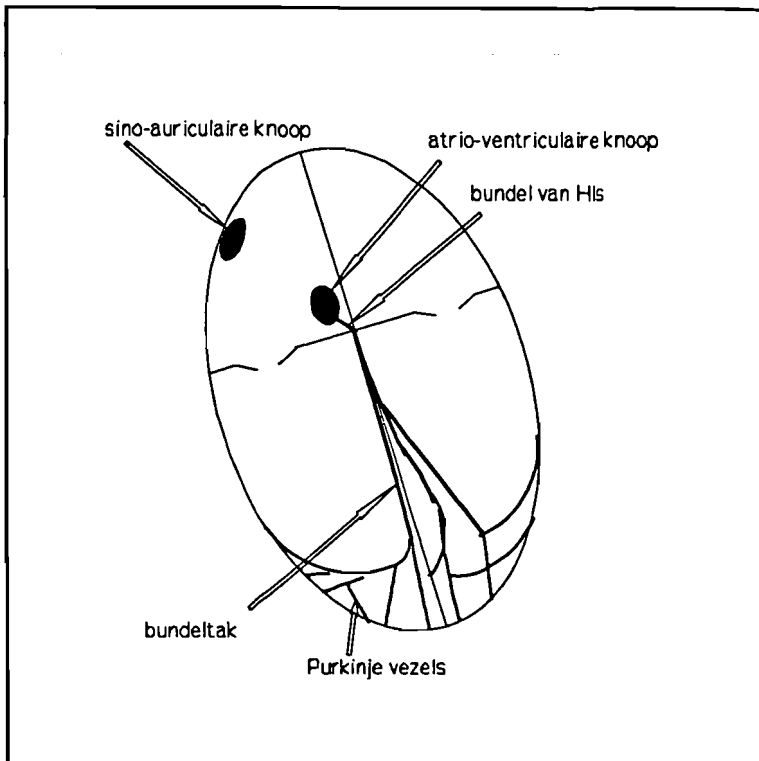
Spiervezels hebben een rustpotentiaal van ca.  $-90$  mV, dat wil zeggen de spanning die over het celmembraan staat (intracellulair ten opzichte van extracellulair) is ca.  $-90$  mV. Komt de membraanpotentiaal door elektrische prikkeling boven een drempelwaarde van ca.  $-55$  mV (bij een depolarisatie van ca.  $35$  mV), dan zal er een zogenaamde actiepotentiaal ontstaan. Deze kenmerkt zich door een lawine-achtige depolarisatie totdat de membraanpotentiaal een waarde van ca.  $+30$  mV bereikt heeft. Hierna treedt een repolarisatie op, die uiteindelijk leidt tot een membraanpotentiaal gelijk aan de oorspronkelijke rustpotentiaal.

Als gevolg van een proces, dat bekend staat onder de naam excitatie-contractiekoppeling, zal de actiepotentiaal bij een depolarisatie van ca.  $40$  mV een contractieproces inluiden. Tijdens dit proces zullen de spierfilamenten, waaruit de spiervezel is opgebouwd, langs elkaar schuiven, waardoor een verkorting van de spiervezel ontstaat (de contractie).

De hartspier is doorvlochten met zogenaamd nodaal weefsel. Nodaal weefsel bestaat uit cellen waarvan de membranen enigszins lekken en daardoor spontaan depolariseren, wat bij een overschrijding van de drempelwaarde leidt tot een actiepotentiaal. Doordat zich tussen de hartspiervezels zogenaamde 'intercalated discs' bevinden, zal een ergens ontstane actiepotentiaal zich drie-dimensionaal over de hartspiervezels verspreiden en een contractie teweeg brengen. De duur van de actiepotentiaal van de hartspiervezel, die een functie van de hartfrequentie is, ligt in de orde grootte van een paar honderd milliseconden.

In figuur 3.2. is een schematisch overzicht van het hart weergegeven, met de belangrijkste onderdelen die een rol spelen bij het ontstaan en de geleiding van de elektrische prikkeling.





*Figuur 3.2. Schematische weergave van het hart met de onderdelen die een rol spelen bij de prikkelgeleiding/ontstaan.*

De groep nodale cellen met de hoogste eigenfrequentie, dat wil zeggen met de hoogste frequentie qua genereren van actiepotentialen wordt de 'natuurlijke pacemaker' genoemd en is gelegen in de zogenaamde sino-auriculaire (SA) knoop ook kortweg sinusknop genoemd. Wordt hier een actiepotentiaal gegenereerd dan verspreidt de depolarisatiegolf zich van hieruit over beide atria en het atriumseptum en begint de atriumcontractie. Doordat zich in de overgang van atria naar ventrikels geen 'intercalated discs' bevinden, zal de depolarisatiegolf hier doodlopen. Na de atriumcontractie, wordt een extra hoeveelheid zuurstofarm bloed vanuit het rechteratrium via de tricuspidalisklep het rechterventrikel in gestuwd en wordt het zuurstofrijke bloed vanuit het linkeratrium via de mitralisklep het linkerventrikel in gestuwd.

Onderin het rechteratrium bevindt zich de atrio-ventriculaire (AV) knoop die wel elektrisch prikkelbaar is. Van hieruit wordt de depolarisatiegolf via de bundel van His, bundeltakken en Purkinje-vezels met enige vertraging naar het onderste deel van de ventrikels getransporteerd. Van hieruit verspreidt de depolarisatiegolf zich over de ventrikels, om vervolgens wederom dood te lopen op de scheidingswand tussen atria en ventrikels.

Na een korte vertraging zullen beide ventrikels, in dezelfde richting als waarin de verplaatsing van de depolarisatiegolf plaatsvond, contraheren. Hierdoor wordt het zuurstofarme bloed vanuit het rechterventrikel via de longklep de longslagader in

gestuwd en het zuurstofrijke bloed vanuit het linkerventrikel via de aortaklep de aorta in.

Bij de verplaatsing door het hart, verspreiden de depolarisatiegolven zich tevens vanuit het endocardium naar het epicardium.

Na de depolarisatie treedt repolarisatie van de gehele hartspier op. De repolarisatiegolven verspreiden zich waarschijnlijk vanuit het epicardium naar het endocardium. Hoe de repolarisatie van de hartspier zich precies volstrekt is nog steeds onderwerp van onderzoek.

## 3.2 De pacemaker

Mensen met problemen in het ontstaan en/of in de geleiding van de elektrische prikkel (de depolarisatiegolf) kunnen bij bepaalde symptomen in aanmerking komen voor implantatie van een (kunstmatige) PM. Dergelijke problemen worden samengevat met de term ritme- en geleidingsstoornissen. In de navolgende paragrafen wordt allereerst wat dieper ingegaan op de beweegredenen voor implantatie. Vervolgens worden de verschillende methoden van 'cardiac pacing' globaal beschreven. Als laatste komen mogelijke problemen en globale oorzaken hiervan aan bod.

### 3.2.1 Belangrijkste beweegredenen voor toepassing

Aanwezigheid van symptomen blijft de meest algemene indicatie voor PM-therapie [Weston Moses et al, 1991]. Hierbij gaat het om symptomen die samenhangen met een te lage 'cardiac output', dat wil zeggen een 'cardiac output' die niet kan voldoen aan de fysiologische behoefte. Symptomen die samenhangen met een onvoldoende 'cardiac output' zijn [Bos et al, 1990]:

- cerebrale symptomen:
  - geheugenverlies
  - duizeligheidsklachten
  - absences
  - pré-syncope (bijna flauwvallen)
  
- niet cerebrale symptomen:
  - vermoeidheid
  - zwakte
  - hartinsufficiëntie

Indien symptomen geconstateerd zijn zal een relatie tussen de symptomen en ritme- en/of geleidingsstoornissen vastgesteld moeten worden. Hierbij zou toepassing van

een PM immers uitkomst kunnen bieden. Om een relatie vast te stellen kan gebruik worden gemaakt van het ECG, Holtermonitoring (met behulp van een dagboek), telemetriebewaking en cardio-beeper (telefonisch verzenden van het ECG-signaal). Men kan ook een aantal 'provocatie' testen uitvoeren, te weten inspannings-ECG, sinus caroticus stimulatie, toedienen van medicamenten en elektro-fysiologisch onderzoek.

Onder ritme- en geleidingsstoornissen worden verstaan [Ruiter, 1992]:

- AV blok; geleidingsproblemen tussen atria en ventrikels, dat wil zeggen dan wel vertraagd aanwezig, dan wel gedeeltelijk of geheel afwezig (resp. eerste, tweede of derde graads AV blok).
- Sinusknoop dysfunctie; problemen met de automaticiteit of met de sino-atriale geleiding.
- Intraventriculaire geleidingsproblemen; problemen met de geleiding via de bundeltakken.
- Overgevoeligheid van de sinus caroticus. De sinus caroticus is een kleine verbreding van de binnenste halsslagader net boven het punt waar deze ontspringt uit de algemene halsslagader. In de wand van de sinus caroticus liggen drukreceptoren die in verbinding staan met het cardio-inhibitoire centrum van het parasympathisch zenuwstelsel. Overgevoeligheid van de sinus caroticus kan dan ook een asystolie veroorzaken.
- Tachyarrhythmia; verhoogde hartfrequentie.

Is een relatie aangetoond, dan dienen voor- en nadelen van een PM-implantatie zorgvuldig afgewogen te worden. Nadelen van een PM zijn onder andere [Bos et al, 1990]:

- de implantatie is een operatie met kans op infecties;
- bij een aantal sporten kan de PM een belemmering opleveren;
- de PM zorgt soms ook voor spierstimulatie, zoals diafragma stimulatie;
- de PM kan gaan dysfunctioneren;
- de patiënt kan een pacemakersyndroom krijgen:
  - a. asynchronie tussen atrium- en ventrikelcontractie;
  - b. retrograde geleiding (VA-geleiding in plaats van AV-geleiding);
- de PM kan ritmestoornissen induceren, zoals tachycardia.

In Weston Moses et al [1991], Bos et al [1990] en Ruiter [1992] is een gedetailleerde beschrijving te vinden van de 'Guidelines for permanent cardiac PM implantation' van 1984.

### 3.2.2 De algemene opbouw

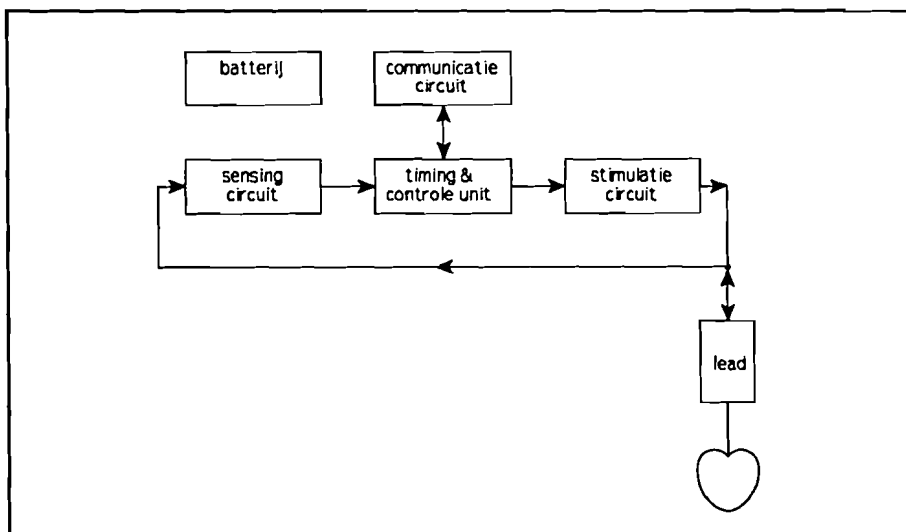
De belangrijkste taak van een PM is het nabootsen van de normale elektrische activatie van het hart, zodat een 'cardiac output' wordt verkregen die weer in de fysiologische behoefte kan voorzien.

*"The cardiac pacemaker is an electrical circuit in which a battery provides electricity that travels through a conducting wire to the myocardium, through the myocardium stimulating the heart to beat ("capturing" the heart), and back to the battery, thus completing the circuit."*  
[Weston Moses et al, 1991]

Een PM bestaat uit de volgende onderdelen:

- Een pulsgenerator (PG) met batterij.
- Eén of twee leads.

De globale opbouw van de PM en de functie(s) van de diverse onderdelen kunnen het beste toegelicht worden aan de hand van een schematische weergave van de opbouw van een eenkamer PM (figuur 3.3).



Figuur 3.3. Schematische weergave van de opbouw van een eenkamer PM.

Een lead bestaat uit een connector voor verbinding met de PG (pulsgenerator), geïsoleerde stroomgeleider(s) en elektrode(n). De lead zorgt voor een elektrische verbinding tussen PG en hart.

De PG bestaat in het algemeen uit een batterij, een stimulatiecircuit, een sensingcircuit, een timing- en controle-unit en een communicatiecircuit.

De batterij voorziet in de energiebehoefte van de elektronica van de PG en de energie benodigd om het myocardium te stimuleren.

Het stimulatiecircuit zorgt via de lead voor afgifte van voldoende energie om een depolarisatie van de hartspier te kunnen bewerkstelligen. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van 'constant-voltage' pacing of 'constant-current' pacing, waarvan 'constant-voltage' pacing de meest gebruikelijke is. Bij 'constant-voltage' pacing komt tussen de anode(+) en de kathode(-) een bepaalde spanning te staan. De spanning zal ter plaatse van de kathode een ontlading van de 'membraancapaciteit' van de spiervezel teweegbrengen. Zorgt de ontlading voor een transmembraanpotentiaal groter dan de drempelwaarde, dan zal er een actiepotentiaal ontstaan.

Het sensingcircuit zorgt voor de sensing van intrinsieke elektrische hartactiviteit, dat wil zeggen van de spontane depolarisaties van de hartspier. Dit is nodig om het mogelijk te maken dat op het goede moment een stimulus wordt afgegeven aan het hart en dat geen stimulus wordt afgegeven tijdens intrinsieke de- of repolarisatie.

De timing- en controle-unit van moderne PM's bestaat uit ROM, RAM, een microprocessor en andere voornamelijk digitale bouwstenen, om een goed moment van afgifte van de stimulus mogelijk te maken. De belangrijkste gegevens waar de unit gebruik van maakt zijn het signaal afkomstig van het sensingcircuit en de opgeslagen pacing parameters (pacing mode, pacing frequentie, pulsamplitude, pulsbreedte, gevoeligheid etc). Door toepassing van een microprocessor bieden moderne PM's ook de mogelijkheid tot het opvragen van gegevens over de batterijtoestand, impedantie van de lead, elektrogram (EGM; weergave van de elektrische activiteit van het hart, zoals die intracardiaal waargenomen wordt door de PM) etc.

Alle moderne PM's bevatten een communicatiecircuit. Het communicatiecircuit verzorgt, zoals de naam al doet vermoeden, de communicatie met de buitenwereld. Dit biedt de mogelijkheid tot programmeren van de PM en vaak ook tot opvragen van gegevens als batterijconditie etc.

### 3.2.3 De verschillende methoden

Het belangrijkste onderscheid dat gemaakt kan worden is dat tussen zogenaamde eenkamer PM's en tweekamer PM's. Eenkamer PM's hebben een lead in dan wel het atrium, dan wel het ventrikel. Afhankelijk van het type PM kan de lead naast een elektrische stimulatie van het hart ook een sensing van de eigen (intrinsieke) hartactiviteit mogelijk maken. Tweekamer PM's hebben een lead in zowel het atrium als in het ventrikel. Beide leads kunnen al naar gelang het type van de PM zowel een stimulatie- als sensingrol vervullen.

Naast een onderscheid tussen een- en tweekamer PM's kan ook nog een onderscheid gemaakt worden tussen zogenaamde unipolaire en bipolaire PM's.

Een unipolaire PM is een PM waarvan de behuizing van de PG (de zogenaamde 'can') de rol van anode vervult tijdens de stimulatie van het myocardium of tijdens de

sensing van de intrinsieke hartactiviteit. De lead(s) bevat(ten) in dit geval slechts één elektrode, de kathode.

In geval van een bipolaire PM is de behuizing van de PM geen onderdeel van de stroomkring tijdens stimulatie of sensing. De lead(s) bevat(ten) in dit geval twee stroomgeleiders en twee elektroden. De proximale elektrode vervult de rol van anode en de distale elektrode, de elektrode die het verst verwijderd is van de PG, is de kathode.

PM's kunnen ook nog onderscheiden worden in de mogelijkheid tot 'rate-modulated pacing', ook wel 'rate-adaptive pacing' of 'rate-responsive pacing' genoemd. Indien een PM deze mogelijkheid bezit, dan is hij in staat om met behulp van een sensor in de PG zelf en/of in de lead, de pacing frequentie te variëren, afhankelijk van de fysiologische inspanning (en dus de metabolische behoefte).

Eerder genoemde kenmerken van de PM hadden alle te maken met de werking van de PM. De locatie van de PM behoeft ook nog enige toelichting.

Er bestaan zogenaamde externe PM's (ook wel uitwendige PM's genoemd) en geïmplanteerde PM's. In het eerste geval bevindt de PG zich buiten het lichaam. Hier kiest men voor bij tijdelijke PM-therapie. Bij permanente PM-therapie wordt de PG geïmplanteerd. De plaats van de pocket, waar de PG in geplaatst wordt, kan zijn: subcutaan, intra- of submusculair. Algemene posities waar hierbij aan gedacht moet worden zijn: rechts in de borst, links in de borst of in de buik.

De positie van de lead kan zijn: endocardiaal (in het hart) of epicardiaal (aan de buitenkant op het hart). Endocardiale leads worden via een ader (transveneus) aangebracht. Epicardiale leads worden via de borstkas (transthoracaal) of met behulp van endoscopie aangebracht. In geval van tijdelijke PM-therapie kunnen ook elektroden op de huid (transcutane pacing) of in de slokdarm (esophagale pacing) aangebracht worden.

Bernstein et al [1987] hebben een algemene vijf-lettercode ontwikkeld die de eigenschappen/kenmerken van een PM weergeeft. Deze code, waar ook Weston Moses et al [1991], Bos et al [1990] en Ruiters [1992] op ingaan, komt op het volgende neer.

1e letter	:	Waar wordt gestimuleerd?
Mogelijkheid	:	A=Atrium, V=Ventrikel, D=Dubbel (A+V) of O=geen.
2e letter	:	Waar vindt sensing plaats?
Mogelijkheid	:	A, V, D of O.
3e letter	:	Wat is de reactie op de sensing?
Mogelijkheid	:	I=Inhibitie, T=Triggering, D=Dubbel (I+T) of O=geen.

- 4e letter : In welke mate programmeerbaar en/of is een 'rate-modulated' optie aanwezig?
- Mogelijkheid : P=enkel Programmeerbaar (dat wil zeggen één of twee programmeerbare parameters), M=Multiprogrammeerbaar (dat wil zeggen meer dan twee programmeerbare parameters), C=kan Communiceren, R='Rate-modulated' optie aanwezig of O=geen.
- 5e letter : Welke antitachyarrhythmia functies aanwezig?
- Mogelijkheid : P=antitachyarrhythmia door pacing, S=Shock, D=Dubbel (P+S) of O=geen.

In het algemeen worden hier slechts de eerste drie letters van gebruikt, met eventueel een R als vierde letter indien het een PM met een 'Rate-modulated' optie betreft.

Bijvoorbeeld: VVI

Dit is een PM met Ventriculaire pacing en Ventriculaire sensing. Vindt er sensing plaats van eigen hartactiviteit (QRS complex in dit geval), dan vindt er geen pacing plaats.

De PM's waar het in dit rapport om gaat zijn geïmplanteerde eenkamer PM's voor antibradycardia met endocardiale leads, waarbij het zowel unipolaire als bipolaire PM's kan betreffen, die tevens voorzien kunnen zijn van een 'rate-modulated' optie. Er wordt echter vanuit gegaan dat de invloed van de eventuele 'rate-modulated' optie, tijdens de controle van het functioneren van de PM, verwaarloosd kan worden. Eventueel is een dergelijke optie tijdens de controle uit te schakelen.

De betreffende type-aanduidingen zijn: AAI, AAIR, AAT, VVI, VVIR en VVT.

### 3.2.4 Mogelijke problemen

De problemen die in deze paragraaf aan bod komen hebben allemaal te maken met het functioneren van de PM en niet met lichamelijke problemen als gevolg van de implantatie van de PM (indien die het functioneren tenminste niet beïnvloeden).

Een goed functionerende PM geeft een stimulus af aan het myocardium ('output'), op het moment dat bepaald wordt door de pacing mode, pacing frequentie en de intrinsieke hartfrequentie ('normal sensing'), wat zal leiden tot een depolarisatie van het myocardium ('capture').

Dinicola [1987], Bos et al [1990], Weston Moses et al [1991], Ruiters [1992] en Greenhut [1991] identificeren allen een aantal probleemtoestanden met betrekking tot het functioneren van de PM. Deze probleemtoestanden kunnen als volgt worden omschreven:

- 'No output': afwezigheid van pacing spikes in het ECG, terwijl hier geen continue inhibitie van pacing aan ten grondslag ligt.
- 'Noncapture': de stimulus veroorzaakt geen depolarisatie van het myocardium, terwijl dit niet wordt veroorzaakt door het refractair zijn van het myocardium.
- 'Oversensing': er worden onbedoelde signalen gesensed, in plaats van alleen de bedoelde intrinsieke depolarisaties, waardoor inhibitie (in geval van een 'inhibited' PM), dan wel triggering (in geval van een 'triggered' PM) van de stimulus optreedt.
- 'Undersensing': bedoelde intrinsieke depolarisaties worden niet gesensed, waardoor geen inhibitie (in geval van een 'inhibited' PM), dan wel geen triggering (in geval van een 'triggered' PM) van de stimulus plaats vindt.

Eerder genoemde auteurs geven ook een opsomming van de mogelijke oorzaken van deze problemen. De oorzaken kunnen onderverdeeld worden in de navolgende hoofdgroepen. Problemen met:

- de PG;
- de verbinding tussen PG en lead;
- de lead:
  - connector;
  - geleider(s);
  - elektrode(n);
- de verbinding tussen lead en het myocardium;
- het myocardium.

In hoofdstuk 4, 'Analyse van de expertkennis in het probleem domein', zullen de toestanden van functioneren en de oorzaken van dysfunctioneren gedetailleerd behandeld worden.

Tijdige herkenning van de problemen en de oorzaken is van wezenlijk belang, omdat een niet goed functionerende PM de nodige risico's met zich mee kan brengen voor de patiënt. Sommige problemen zijn door eenvoudig herprogrammeren van de PM



te verhelpen. Voor de oplossing van andere problemen kan het noodzakelijk zijn om de lead of zelfs de PM in z'n totaliteit (PG en lead) te vervangen.

Een evaluatie van het functioneren van de PM, een evaluatie van de toestand van de patiënt en bijhouden van de boekhouding, vinden tijdens de zogenaamde patiënten 'follow-up' plaats. De eerste 'follow-up' is in het algemeen binnen 2 weken na implantatie. De volgende na 2 à 3 maanden, waarna volstaan wordt met een controle van één keer in de 6 maanden. Dankzij een goede boekhouding kunnen zelfs sommige op handen zijnde problemen geïdentificeerd worden, waarmee het risico voor de patiënt tot een minimum beperkt blijft.

Bij de evaluatie van het functioneren van de PM en de eventuele diagnose van het dysfunctioneren kan gebruik gemaakt worden van de volgende hulpmiddelen [Weston Moses et al, 1991]:

- **Voorgeschiedenis** van de patiënt. Zijn er symptomen die kunnen duiden op dysfunctioneren?
- Het ECG, dat de elektrische activiteit van het hart weergeeft, is het meest belangrijke hulpmiddel bij de evaluatie. Leidt de stimulus op het goede moment tot depolarisatie van het myocardium? De stimulus is in het ECG zichtbaar als een spike, dat wil zeggen als een 'scherpe' verticale uitwijking.
- **Lichamelijk onderzoek.** Hoe is de conditie? Hoe ziet de pocket er uit?
- **Afbeeldingstechnieken.** Met behulp van röntgentechnieken is een controle van de positie en een identificatie van breuken mogelijk.
- **Programmeren** van de PM. De pacing frequentie kan gevarieerd worden in geval van totale inhibitie door het intrinsieke ritme, zodat 'capture function' en 'sensing function' gecontroleerd kunnen worden.  
De pulsamplitude of de pulsbreedte kan gevarieerd worden voor het bepalen van de stimulatie-drempel en de gevoeligheid voor het bepalen van de sensing-drempel.
- **Magneetapplicatie.** Door een magneet tegen de huid boven de PG te drukken, schakelt een PM over op een asynchrone mode, ook wel 'fixed rate' mode genoemd, van pacing (VOO, AOO of DOO) met bijbehorende frequentie. Magneetapplicatie kan bij sommige PM's ook gebruikt worden om te testen of de batterij aan vervanging toe is.
- **Telemetrie.** Het merendeel van de moderne PM's heeft de mogelijkheid tot telemetrie (niet-invasieve transmissie van data via een radiofrequentie, van de PG

naar een externe ontvanger). Via telemetrie zijn gegevens als batterijconditie, leadimpedantie en zelfs EGM's (elektrogrammen) en een 'marker channel' (een signaal afkomstig van de PM waarmee de ontvanger onder het ECG kan laten zien wanneer sensing en wanneer pacing plaatsvond) op te vragen. Dit kunnen belangrijke diagnostische hulpmiddelen zijn.

- **Lichamelijke handelingen.** Lichamelijke inspanning en sinus caroticus massage kunnen een variatie in de hartfrequentie bewerkstelligen (door de programmeermogelijkheid van tegenwoordige PM's worden deze methoden echter nog nauwelijks gebruikt). Manipulatie van de PG kan ook tot de diagnose van een bepaald probleem leiden.
- **Pulsanalyse apparatuur en oscilloscoop.** Met behulp van dergelijke apparatuur is de stimulus die de PM afgeeft nauwkeurig te onderzoeken. Hieruit kan onder andere de leadimpedantie afgeleid worden (alternatief voor telemetrie van leadimpedantie).
- **Invasief onderzoek.** Indien geen van eerder genoemde methoden/hulpmiddelen uitsluitend biedt over de mogelijke oorzaak van dysfunctioneren, dan is vaak chirurgische exploratie noodzakelijk. De lead en de PG kunnen dan m.b.v. een 'pacing system analyzer' getest worden.

### 3.3 De electrocardiografie

Het ECG geeft de elektrische activiteit van het hart weer. Het depolarisatiefront, dat zich in en door het hart verplaatst, kan ontwikkeld worden in een multipoolreeks. Op grote afstand van het hart (extremiteten: linkerarm, rechterarm, linkerbeen en rechterbeen) is alleen de dipoolbijdrage significant en kan de elektrische activiteit worden benaderd door een stroomdipool. De aanwezigheid van een stroomdipool in ons lichaam geeft aanleiding tot het ontstaan van potentiaalverschillen tussen verschillende punten op ons lichaam.

De zogenaamde hartvector (resultante dipoolvector) representeert de richting en de grootte van het dipoolmoment van deze stroomdipool. De spanning die tussen twee meetpunten geregistreerd wordt, is evenredig met de projectie van de hartvector op de zogenaamde afleidingsvector tussen beide punten (de afleidingsvector is gericht van het als min fungerende meetpunt naar het als plus fungerende meetpunt). De geregistreerde spanning is dus een maat voor de elektrische activiteit van het hart in de richting van desbetreffende afleidingsvector. Dit is de relatie waar in de electrocardiografie gebruik van wordt gemaakt en die het ECG tot zo'n belangrijk evaluerend en diagnostisch hulpmiddel maakt.

### 3.3.1 De verschillende afleidingen

Voor een registratie van de elektrische activiteit van het hart kunnen de navolgende algemene afleidingen onderscheiden worden [Boutkan, 1969; Phillips en Feeney, 1973]. De standaardinstellingen van een ECG-recorder zijn hierbij:

- papiersnelheid: 25 mm/s
- gevoeligheid: 1 mV/cm

#### ■ De 3 standaardafleidingen volgens Einthoven:

$$\begin{aligned} I &= L - R \\ II &= F - R \\ III &= F - L \end{aligned}$$

Hierin is 'L' de potentiaal van de linkerarm, 'R' de potentiaal van de rechterarm en 'F' de potentiaal van het linkerbeen.

De afleidingen zijn bipolair, dat wil zeggen ze worden geregistreerd met een verschilversterker, waarbij het rechterbeen als referentie dient.

#### ■ De 3 versterkte ('augmented') unipolaire extremitetsafleidingen volgens Goldberger:

$$\begin{aligned} aVR &= R - (L + F)/2 \\ aVL &= L - (R + F)/2 \\ aVF &= F - (R + L)/2 \end{aligned}$$

De afleidingen zijn unipolair, waarbij respectievelijk  $(L+F)/2$ ,  $(R+F)/2$  of  $(R+L)/2$  als nulpunt dient (de gebruikte weerstand dient  $\geq 5k\Omega$  te zijn).

#### ■ De 6 unipolaire precordiale afleidingen volgens Wilson:

De afleidingen zijn unipolair en worden gemeten ten opzichte van de zogenaamde 'central terminal', die als virtueel aardpunt dient:

$$V_{CT} = (L + R + F)/3$$

Bij de gebruikelijke precordiale afleidingen hebben de 'V' elektroden de volgende plaats:

- V1 : 4<sup>e</sup> intercostaalruimte bij rechter sternumrand;
- V2 : 4<sup>e</sup> intercostaalruimte bij linker sternumrand;
- V3 : midden tussen V2 en V4;
- V4 : 5<sup>e</sup> intercostaalruimte in midclaviculaire lijn;

V5 en V6 : in hetzelfde horizontale vlak als V4 en resp. in de voorste en middelste axillaire lijn.

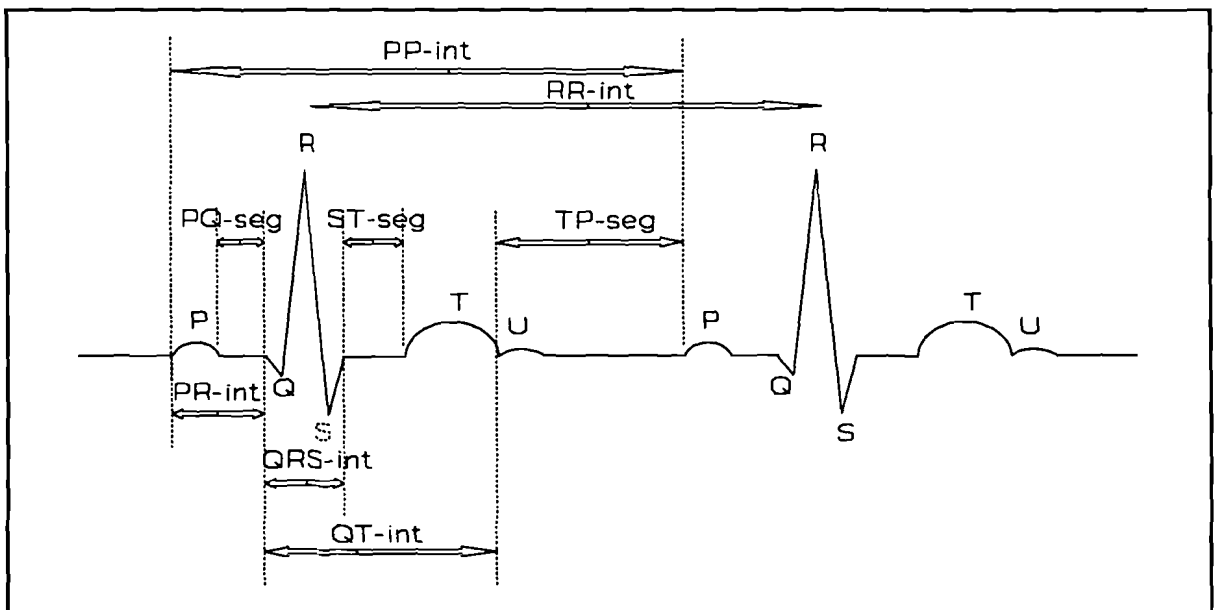
Deze groep kan met een aantal aanvullende locaties uitgebreid worden. De bij de PM-controle gebruikte extra locaties zijn niet vast definieerbaar en worden daarom in het algemeen aangeduid als 'nonstandard precordial leads'.

Tijdens de PM-controle wordt zondig in de volgende volgorde van de ECG afleidingen gebruik gemaakt, voor het vaststellen van een bepaald feit:

- 3 afleidingen ECG: I, II en III;
- 12 afleidingen ECG: I, II, III, aVR, aVL, aVF en V1 t/m V6;
- 12 afleidingen ECG met dubbele gevoeligheid: idem;
- 'nonstandard precordial leads';
- 'nonstandard precordial leads' met dubbele gevoeligheid.

### 3.3.2 Nomenclatuur

In figuur 3.4 is een ECG weergegeven dat kenmerkend is voor een normale voortplanting van de depolarisatie- en repolarisatiegolf in het hart [Boutkan, 1969].



Figuur 3.4. Nomenclatuur van het ECG.

De P golf is het resultaat van de depolarisatie van de atria. Hij duurt maximaal 110 ms en heeft een maximale amplitude van 0,25 mV.

Het daaropvolgende PQ segment (ook wel PR segment genoemd) is een gevolg van de voortplanting van de depolarisatiegolf van atria naar ventrikels, via de AV knoop, bundel van His, bundeltakken en Purkinje vezels. Vanwege de kleine hoeveelheid weefsel die betrokken is bij de voortgeleiding, is deze niet zichtbaar in het normale ECG. Het PQ segment ligt daarom op de basislijn (isoelektrische lijn).

Het QRS complex is een resultaat van de depolarisatie van de ventrikels (intraventriculair septum, rechter- en linkerventrikel). De initiële negatieve uitslag wordt Q golf genoemd. De eerste positieve uitslag staat bekend onder de naam R golf (al dan niet voorafgegaan door een Q golf). De negatieve uitslag na een R golf wordt S golf genoemd. Het QRS complex duurt normaal 50-100 ms en heeft een maximale hoogte van 2 mV (in standaard- en Goldberger-afleidingen).

Gedurende het daaropvolgende ST segment zijn de ventrikels in geactiveerde toestand, dat wil zeggen in een gedepolariseerde toestand. Normaal ligt dit segment op de basislijn.

De T golf geeft de repolarisatie van de ventrikels weer. Deze golf duurt normaal langer dan het QRS complex en zijn amplitude is meestal kleiner dan de R golf (met hetzelfde teken).

Direct daaropvolgend is soms nog een golf zichtbaar. Deze golf wordt de U golf genoemd en representeert de 'afterpotentials' die zich voordoen na repolarisatie van de ventrikels. Hij duurt korter dan de T golf en heeft een lagere amplitude.

De aanduidingen Q, R en S zijn gecorreleerd met een positief of negatief teken. De P en de T golf daarentegen kunnen zowel positief, negatief als bifasisch zijn. Indien een QRS complex meer dan één R of S golf heeft, wordt de tweede R of S golf aangeduid met R' of S'. Een QRS complex in de vorm van één enkele negatieve uitslag noemt men ook wel een QS complex.

Er kunnen ook nog een TP segment, een PR interval een QRS interval en een QT interval in het ECG onderscheiden worden.

Het TP segment is het segment dat begrensd wordt door het einde van de T golf en het begin van de volgende P golf.

Het PR interval (ook wel PQ interval genoemd) symboliseert de tijdsduur van de depolarisatie van de atria en de geleiding van de depolarisatiegolf naar de ventrikels. Een normale lengte voor dit interval is 100-200 ms.

Het QRS interval geeft de tijdsduur van het QRS complex weer (50-100 ms). Het QT interval is de tijdsduur van begin van de depolarisatie tot het einde van de repolarisatie van de ventrikels. Een normale lengte van dit interval ligt tussen de 300 en 400 ms.

### 3.3.3 Onderscheid intrinsieke hartslagen en hartslagen geïnitieerd door de pacemaker

Het onderscheid tussen intrinsieke hartslagen en hartslagen geïnitieerd door de PM is meer uitgesproken bij ventriculaire stimulatie dan bij atriale stimulatie.

Bij atriale stimulatie zal het onderscheid tussen een gestimuleerde en een intrinsieke depolarisatie in het algemeen klein zijn. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt doordat de intrinsieke depolarisatie van de atria, evenals bij stimulatie, vanuit één punt start (de SA knoop), de atria een kleinere spiermassa vertegenwoordigen en de stimulatieplaats in de buurt van de SA knoop kan liggen.

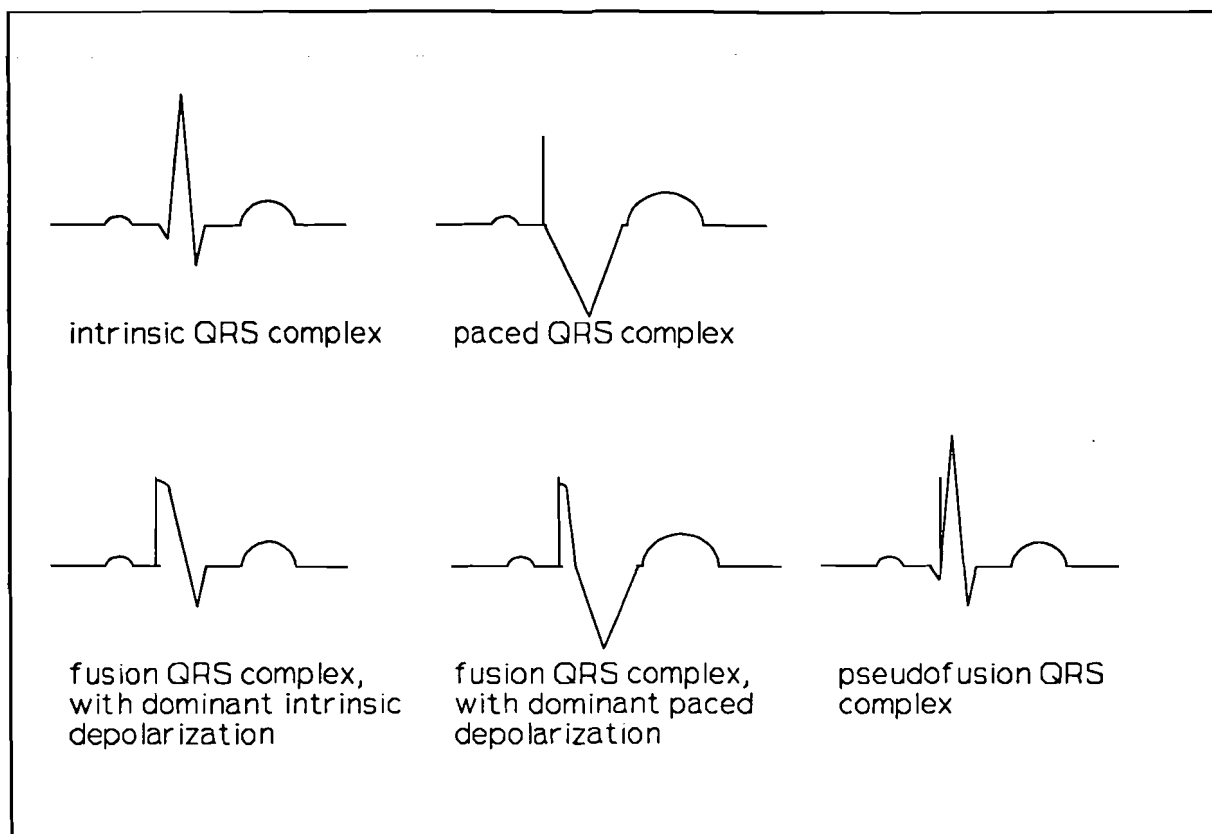
Bij ventriculaire PM's is het onderscheid het grootst. Dit wordt veroorzaakt doordat bij natuurlijke ventriculaire depolarisatie beide ventrikels, via de bundeltakken van het geleidingssysteem, nagenoeg simultaan geactiveerd worden. Bij stimulatie vanuit het rechterventrikel wordt eerst het rechterventrikel geactiveerd en in tweede instantie vindt via geleiding door het myocardium depolarisatie van het linkerventrikel plaats. Het ECG vertoont dan ook het patroon van een linker- bundeltakblok.

Naast een afwijkend ECG complex is een gestimuleerde depolarisatie ook nog herkenbaar in het ECG, doordat het voorafgegaan wordt door een pacing spike (een 'scherpe' verticale uitwijking).

Behalve ECG complexen als gevolg van intrinsieke depolarisaties en als gevolg van gestimuleerde depolarisaties kunnen ook nog ECG complexen voorkomen die het resultaat zijn van een gelijktijdige intrinsieke en gestimuleerde depolarisatie. De ECG complexen die aldus waargenomen zouden kunnen worden, zijn in geval van ventriculaire pacing weergegeven in figuur 3.5. De te onderscheiden golfvormen kunnen ook bij atriale pacing voorkomen. De verschillen zijn dan echter, zoals al eerder is aangegeven, veel minder duidelijk.

De Golfvormen kunnen als volgt gedefinieerd worden:

- 'Intrinsic beat' (intrinsieke slag):  
ECG complex (QRS complex of P golf) dat is ontstaan door de depolarisatie van het myocardium geïnitieerd door het hart zelf.
- 'Paced beat' (gestimuleerde slag):  
ECG complex (QRS complex of P golf) dat is ontstaan door de depolarisatie van het myocardium geïnitieerd door een PM-stimulus.
- 'Fusion beat' (fusieslag):  
ECG complex (QRS complex of P golf) dat is ontstaan door de depolarisatie van het myocardium geïnitieerd door zowel het hart zelf als door een PM-stimulus. De bijdrage van de intrinsieke depolarisatie en van de door de PM geïnitieerde depolarisatie kan bij fusieslagen wisselend zijn.



Figuur 3.5. Te onderscheiden ECG complexen bij ventriculaire pacing.

- 'Pseudofusion beat' (pseudofusieslag):  
ECG complex (QRS complex of P golf) dat is ontstaan door de depolarisatie van het myocardium geïnitieerd door het hart zelf. Er is echter een pacing spike (ECG gewaarwording van de PM-stimulus) aanwezig, die het complex vervormt.

### 3.4 Eerder ontwikkelde expertsystemen voor analyse van het functioneren van pacemakers

In de literatuur wordt alleen in de periode van 1985 tot 1988 melding gedaan van expertsystemen als hulpmiddel voor het beoordelen van de toestand van functioneren van PM's.

Olson et al [1985] waren de eersten die een expertstelsysteem ontwikkelden en daar melding van deden. Hun systeem is bedoeld om een 10 seconden ECG-strip van een patiënt met een Symbios tweekamer PM van fabrikant Medtronic te verduidelijken. Hiertoe worden allereerst via real-time telemetrie de timing parameters opgevraagd. Het expertstelsysteem is gebaseerd op causale regels afgeleid van specifieke PM-logica in plaats van op empirische associatieve kennis. Het interpreteert de gegevens en construeert

hieruit een verduidelijkend diagnostisch diagram, dat onder het ECG getekend wordt. Mocht een eventuele fout geconstateerd worden, dan wordt dit in het diagram aangegeven en verschijnt een foutmelding. Op deze manier worden PM 'output', 'capture' en 'sensing' (niet expliciet) beoordeeld.

Sasmor, Smith en Tarjan [1987], Smith, Sasmor en Tarjan [1987] en Smith [1987], omschrijven de ontwikkeling van een op regels gebaseerd expertsysteem, dat bestaat uit 3 modules.

De eerste module zorgt voor de digitale signaalbewerking. Continue ECG data, EGM data en PM 'marker channels' worden vertaald in discrete 'cardiac events'. Details van deze module worden niet vermeld.

De tweede module ('Event analysis') gebruikt een analytisch model, gebaseerd op specifieke PM-logica, om de functionele toestand bij ieder 'event' te verifiëren. De functies die geëvalueerd worden zijn 'sensing', 'pacing' en 'capturing'. Details van deze module worden eveneens niet vermeld.

De derde module ('Clinical expert') combineert en evalueert de 'events', detecteert normale en abnormale PM-werking en geeft een lijst met waarschijnlijke oorzaken en mogelijke klinische acties. De kennis, die in de vorm van regels wordt gerepresenteerd, is afkomstig van meerdere klinische experts. Alleen de details van één voorbeeldregel zijn weergegeven. De logische volgorde die ze hebben afgeleid in de analyse van het ECG, zoals volgens hen ook de door het expertsysteem gehanteerde redenering hoort te verlopen, is:

- Stel vast of er gestimuleerd wordt.
- Verifieer 'capture', dan 'sensing' en daarna eventuele speciale PM-functies.
- Markeer normale en abnormale PM of intrinsieke 'events'.
- Bepaal de mogelijke oorzaken van een probleem of combinatie van problemen, eerst voor het ventriculaire kanaal, dan voor het atriale kanaal en als laatste voor 'cross channel' problemen.
- Ontwikkel en implementeer een effectief verloop van acties naar aanleiding van de gevonden oorzaak/oorzaken.

Er is alleen een prototype van het systeem ontwikkeld in OPS5, waarvan de resultaten nooit zijn vermeld.

Dassen et al [1988] melden dat ze bezig zijn met de ontwikkeling van een expertsysteem voor de analyse van ECG's van PM-patiënten. Hierbij maken ze gebruik van de shell ACQUAINT (LITHP Systems BV, Nederland), wat een op regels gebaseerde shell is, geschreven in MULISP, die zowel 'forward' als 'backward chaining' als inferentiemechanisme biedt.



Een telefonisch onderhoud met de heer Dassen bracht aan het licht dat het systeem niet verder was ontwikkeld dan op kladblok. Oorzaken hiervoor waren de complexiteit van DDD PM's en de lage prioriteit van het project.

In de literatuur wordt ook nog melding gedaan van andere systemen voor een analyse van het functioneren van PM's.

Zo melden Malik en Camm [1988] de ontwikkeling van een systeem dat gebruik maakt van 'inverse computer modeling of PM actions'. Hierbij wordt gebruik gemaakt van een 'Heart Pacemaker Interaction' (HPI) model, dat gebaseerd is op ECG data.

Allereerst kan een toestandsdiagram, die het algoritme van het te onderzoeken apparaat representeert, in de vorm van speciale tabellen ingevoerd worden.

Hiermee zijn de PM-acties stap voor stap te modelleren en kunnen gebruikt worden om de 'events' in het gemeten ECG te controleren (door te vergelijken met de correcte werking, zoals het model weergeeft).

De ECG input data voor het systeem bestaat uit een met de hand geanalyseerde ECG passage, met uitspraken in de vorm van:

zeker of mogelijk: een pacing spike, een P golf 'event' en/of een QRS complex 'event'.

Het systeem meldt welke depolarisaties gestimuleerd zijn, welke gesensed zijn en de tijdsduur over welke EGM-sensing kan zijn opgetreden. PM-dysfunctioneren wordt niet expliciet gemeld. Wel wordt in een dergelijk geval gemeld dat geen acceptabele interpretatie is gevonden, dat wil zeggen een toestand die niet te identificeren is met een volgens het model mogelijke toestand.

Een ander systeem voor de analyse van het functioneren van DDD PM's wordt door Greenhut [1991], Greenhut en Jenkins [1990] en Greenhut, Jenkins en DiCarlo [1992] omschreven. Het systeem maakt gebruik van algoritmen, die gebaseerd zijn op algemene PM-logica, om 'output', 'capture' en 'sensing' van een PM te analyseren en is geïmplementeerd in TURBOC in een op regels gebaseerde structuur.

Het systeem maakt gebruik van met de hand geanalyseerde input data afkomstig van ECG afleiding II en van een esophagale afleiding. De volgende gegevens dienen ingevoerd te worden:

- Start van elke pacing spike.
- Start van elke atriale en ventriculaire depolarisatie.
- Identificatie van elke depolarisatie als : normaal, abnormaal of gestimuleerd.
- Interval tussen elke 'event'.
- Tijd en morfologie van elke 'event'.

De analyse vindt 'cycle-by-cycle' plaats en de resultaten worden expliciet in deze vorm, samen met een samenvatting, aan de gebruiker gepresenteerd. Een algemene conclusie over het functioneren wordt niet gegeven.

Bij de validatie van het systeem is gebruik gemaakt van ECG's die gegenereerd zijn m.b.v. een stochastisch model van de HPI ('Heart Pacemaker Interaction').

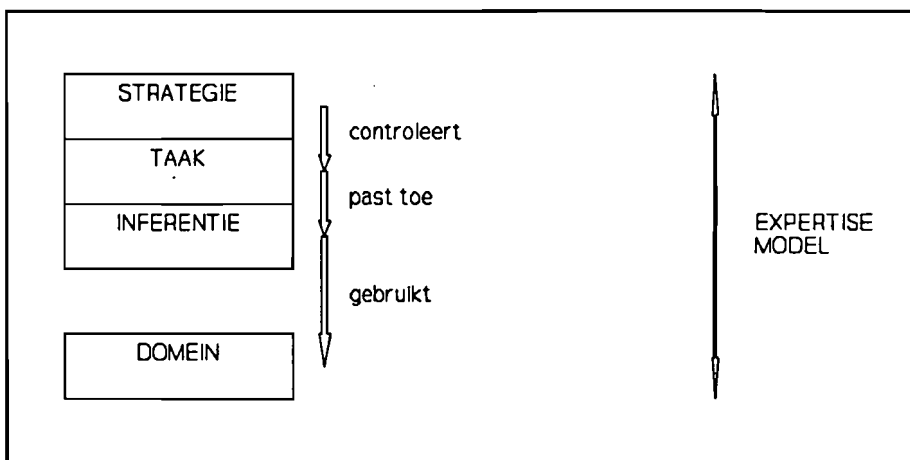
Het systeem is getest door bij 5 patiënten met DDD PM's, fouten te simuleren. Resultaten van het systeem zijn vergeleken met die van een expert. Indien het systeem bij één van de geanalyseerde cycles dezelfde conclusie gaf als de 'overall' conclusie van de expert, dan werd gezegd dat ze in overeenstemming waren. Op deze manier is een successcore bereikt van 99% op een totaal van 33 15-seconden durende ECG's.

## 4 Analyse van de expertkennis in het probleemdomein

Bij de ontwikkeling van het expertsysteem is gebruik gemaakt van een aantal technieken die afkomstig zijn van de KADS ('Knowledge based systems Analysis and Design Support') methodologie. De KADS methodologie volgt een kennisgerichte benadering, waarin allereerst de structuur van de kennis centraal staat en niet direct de representatie van de kennis in een Knowledge Base van een kennissysteem. Tot de grondleggers van KADS behoren Breuker en Wielinga [1986].

De fase die betrekking heeft op de kennisanalyse wordt binnen KADS de 'expertise analyse' genoemd. De bedoeling van deze fase is het verkrijgen van een expertisemodel, ook wel conceptueel model of kennismodel genoemd. Het resulterend kennismodel behoort een afspiegeling te zijn van het probleemoplossende of 'expert' gedrag zoals het systeem dat hoort te vertonen. Dit kennismodel geeft een beschrijving van de kennis op het kennisniveau en niet op het symbool/implementatie-niveau.

KADS biedt een raamwerk om de kennis te analyseren en te modelleren. Tijdens de kennisacquisitie kan het raamwerk 'ingevuld' worden, waardoor het kennismodel ontstaat. In het raamwerk kunnen vier soorten kennis onderscheiden worden. Deze vormen vier lagen in het kennismodel. In figuur 4.1 zijn de vier lagen en hun onderlinge relaties weergegeven.



Figuur 4.1. De vier lagen van het KADS expertise model.

### Strategielaag:

Het oplossen van een probleem bestaat uit het uitvoeren van een globale taak, die via een decompositie vaak omgezet kan worden in een aantal kleine taken en subtaken (een taak beschrijft welke acties uitgevoerd moeten worden om een bepaald doel te bereiken). De kennis over de volgorde waarin taken en subtaken moeten worden uitgevoerd om een probleem op te kunnen lossen, bevindt zich in de strategielaag.

Taaklaag:	In deze laag bevindt zich de kennis waarmee bepaald wordt wanneer de verschillende redeneerstappen (inferenties) binnen een taak dienen te worden uitgevoerd, om een bepaald doel te bereiken.
Inferentia laag:	De kennis over de redeneerstappen (inferenties) die mogelijk zijn in een bepaald domein en de rol die de domeinkennis daarin speelt, bevindt zich in deze laag.
Domeinlaag:	In deze laag bevindt zich de kennis betreffende domeinconcepten en hun onderlinge relaties.

Elk soort van kennis maakt gebruik van de kennis van een niveau lager. De diverse lagen kunnen geconstrueerd worden middels een proces van iteratieve verfijning waarin de domeinexpert een belangrijke rol speelt.

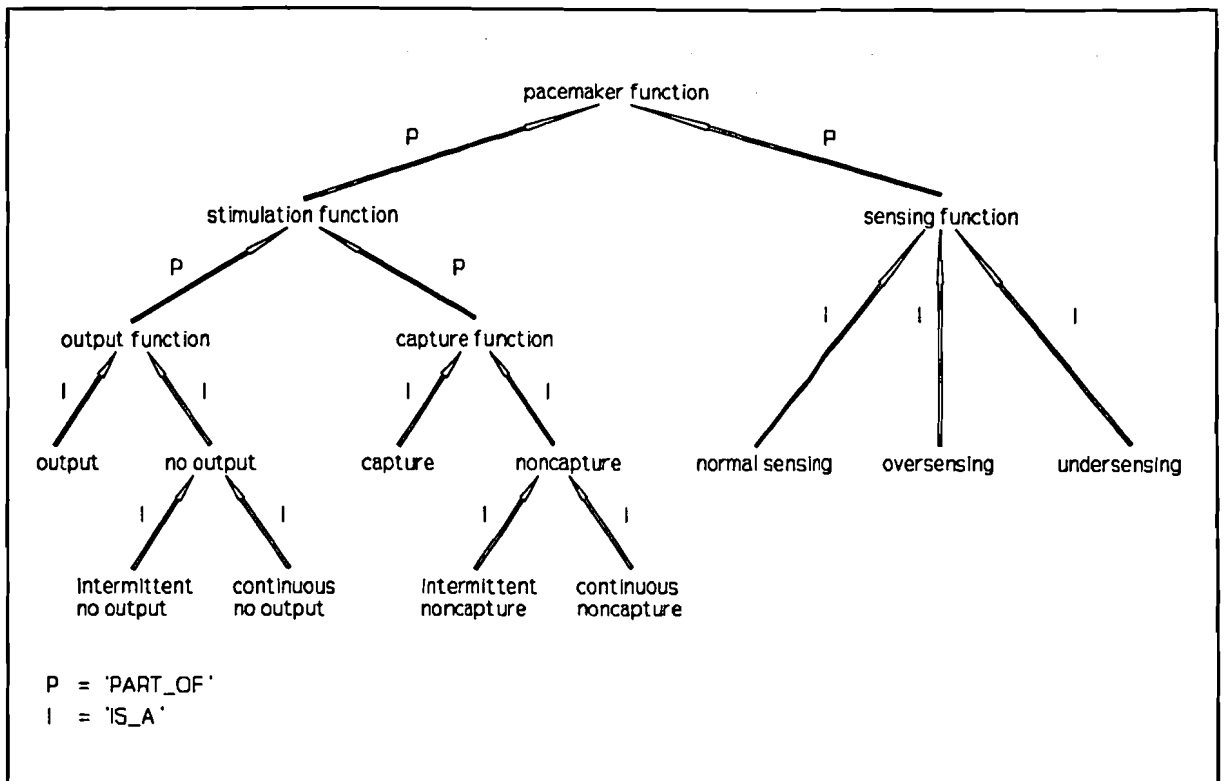
Het verkrijgen van een kennismodel was ook min of meer het doel van de kennisanalysefase van het in dit rapport beschreven expertsysteem. Een dergelijke op kennisanalyse gerichte aanpak levert een beter inzicht op in de probleemoplossende kennis en het gedrag zoals het systeem dat behoort te vertonen. Tevens kan het moeilijke 'knowledge acquisition'-proces hier enigszins mee gestuurd worden. Een dergelijke aanpak kan ook leiden tot een duidelijke, gestructureerde KB.

Een belangrijk hulpmiddel, waar ook bij de constructie van dit expertsysteem van gebruik gemaakt is, is de identificatie van algemene taakmodellen (interpretatiemodellen) van KADS, die van toepassing kunnen zijn op het probleemoplossende proces. Deze modellen omvatten een domeinonafhankelijke beschrijving van de kennis die nodig is om een klasse van overeenkomstige taken te realiseren. Dankzij de identificatie van dergelijke modellen, die als het ware een matrijs of een schema bieden van de strategische kennis, taakkennis en inferentiekennis, kan de kenniselicitering meer gericht en meer gestructureerd plaats vinden.

#### 4.1 Taakdecompositie en algemene strategie

Het expertsysteem dient tijdens de 'follow-up' de diagnosticus te ondersteunen bij de beoordeling van het functioneren van de PM, waarin met name de analyse van het ECG een belangrijke rol speelt. Bij eventuele constatering van dysfunctioneren dient eveneens ondersteuning verleend te worden bij de daarop volgende diagnose.

Met behulp van algemene literatuur, literatuur geschreven in het kader van het promotieonderzoek van de domeinexpert [van Gelder], interviews en door het bijwonen van een PM-controle, heeft een identificatie plaats kunnen vinden van de functies waar het PM-functioneren op beoordeeld dient te worden en wat de probleemtoestanden zijn waar eventueel een diagnose van benodigd is. Deze functies met de mogelijke correcte toestanden en probleemtoestanden van functioneren zijn weergegeven in figuur 4.2.



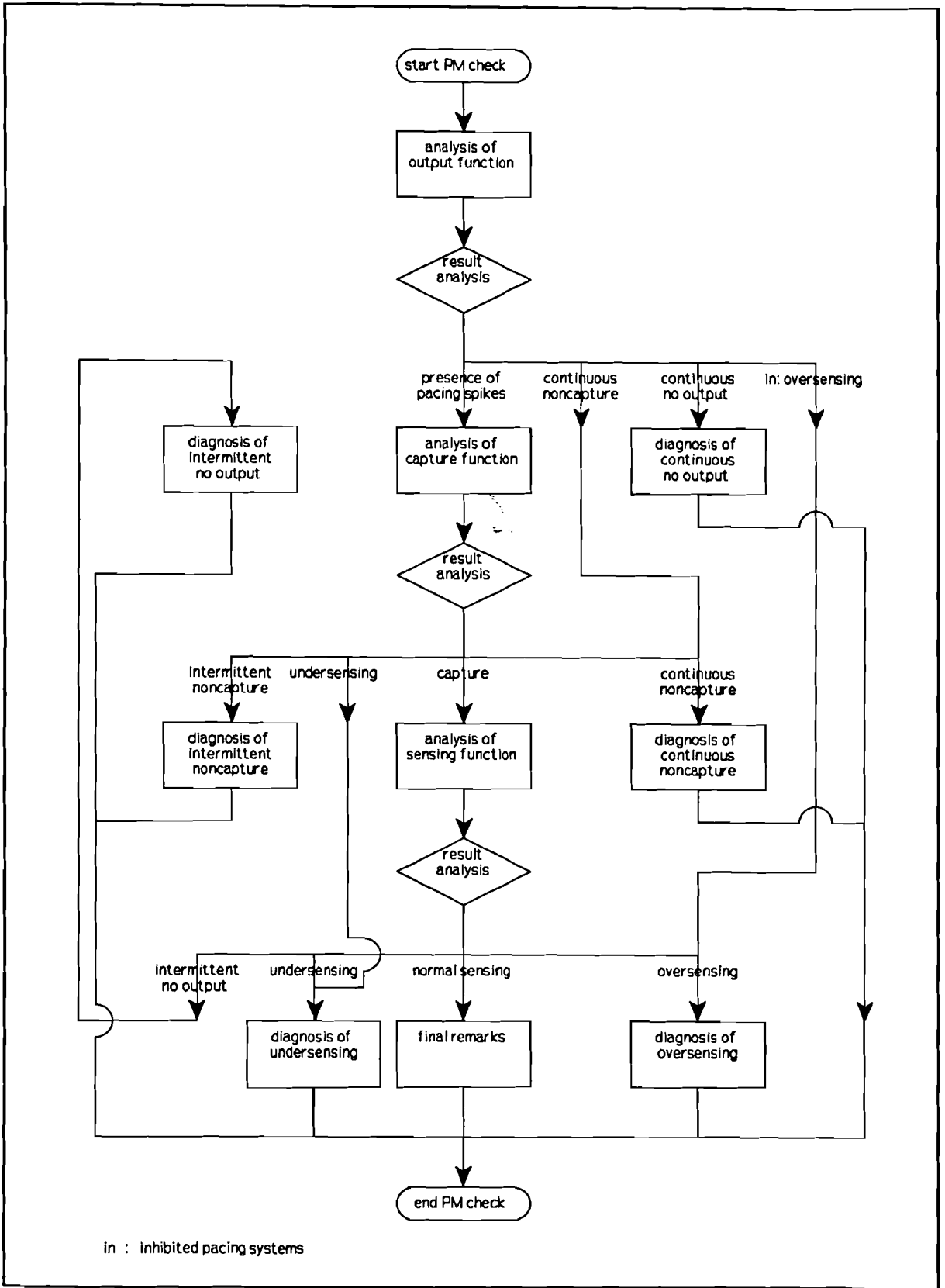
Figuur 4.2. Te beoordelen PM functies met mogelijke correcte toestanden en probleemtoestanden van functioneren.

De expert beoordeelt het PM-functioneren in de volgende hoofdstappen:

- 'output function';
- 'capture function';
- 'sensing function'.

Wordt tijdens één van deze analyses van de PM-functies een probleemtoestand vastgesteld, dan wordt het analyseproces vervolgd met een diagnoseproces. Zoals in figuur 4.2 te zien, kan de diagnose betrekking hebben op de probleemtoestanden 'no output' ('continuous' of 'intermittent'), 'noncapture' ('continuous' of 'intermittent'), 'oversensing' en 'undersensing'. De betekenis van deze begrippen is al nader toegelicht in § 3.2.4. Deze analyse- en diagnoseprocessen lijken als nagenoeg losstaande taken beschouwd te kunnen worden, binnen de probleemoplossende kennis van de expert en dus in het gedrag zoals het systeem dat behoort te vertonen.

In figuur 4.3. is de algemene strategie, de volgorde van de te onderscheiden taken, weergegeven. De taken zijn afgebeeld als rechthoeken. Inzicht in de strategie in deze mate van detail is feitelijk pas ontstaan nadat een beter inzicht was verkregen in de afzonderlijke probleemoplossende taken en tot welke resultaten deze konden leiden. Het uitgangspunt was de eenvoudige opsomming van de hoofdstappen, waarin de expert het functioneren van de PM beoordeelt.



Figuur 4.3. Geïdentificeerde algemene strategie.

Het onderscheid met de algemene strategie van een diagnosticus tijdens de controle is, dat de diagnosticus na de diagnose van een probleemtoestand de fout zal verhelpen en gelijk de goede werking van de andere functies zal verifiëren. Het systeem is zo opgezet dat na een diagnose de feitelijke consultatie stopt. Hierna kan echter met dezelfde statische PM-data (o.a. type PM, geprogrammeerde stimulatie-frequentie etc.) via een nieuwe consultatie (nadat een bij de hand genomen beginnend diagnosticus de door het expertsysteem aangegeven fout heeft hersteld) het PM-functioneren opnieuw beoordeeld worden. Dit is gerealiseerd door de gebruiker na een door het systeem gestelde diagnose te vragen of een nieuwe evaluatie van het PM-functioneren gestart moet worden. Wordt hier door de gebruiker bevestigend op geantwoord, dan heeft deze de keuze om al dan niet gebruik te maken van dezelfde statische PM-data als tijdens voorgaande consultatie.

## 4.2 Analyse van het functioneren van de pacemaker

Het functioneren van de PM wordt beoordeeld door een analyse van de 'output function', 'capture function' en 'sensing function'. Specifieke kennis op dit gebied is verkregen met behulp van literatuur geschreven in het kader van het promotieonderzoek van de expert, door interviews met de expert en door het bijwonen van een PM-controle.

Bij de analyse van de expertkennis die betrekking heeft op deze taken, is gebruik gemaakt van het algemene taakmodel 'heuristic classification', als eerste identificatie van het door de expert gehanteerde redeneringsproces. Het belangrijkste kenmerk van heuristische classificatie is de heuristische 'match'/associatie tussen data-abstracties en oplossings-abstracties. In Tansley en Hayball [1993] kan men terecht voor een uitvoerige omschrijving van dit taakmodel.

In de navolgende paragrafen wordt de geëliciteerde en geanalyseerde kennis die betrekking heeft op de analysetaken beschreven. Indien gesproken wordt over het ECG, zonder expliciet genoemde afleidingen, dan gaat het om de afleidingen I,II en III.

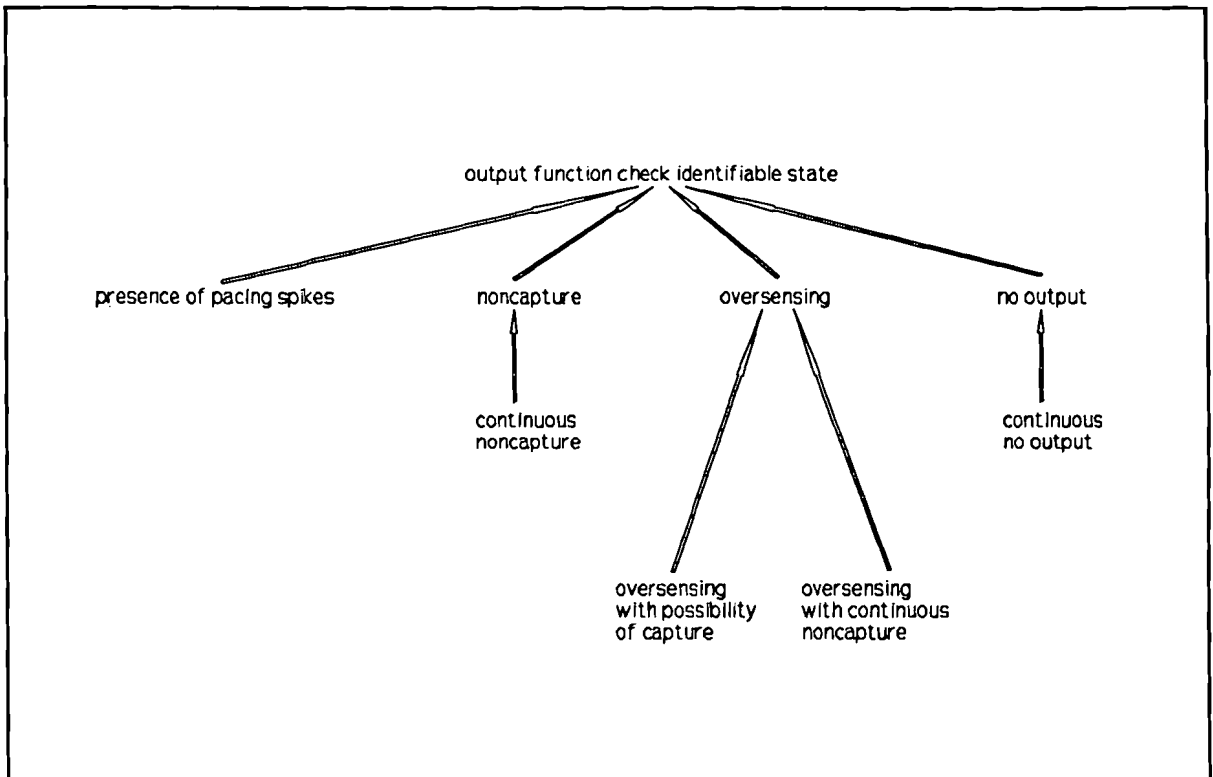
### 4.2.1 Analyse van 'output function'

Tijdens de analyse van de 'output function' wordt de PM beoordeeld op zijn mogelijkheid tot afgifte van stimuli aan het myocardium. Een centrale rol bij deze beoordeling speelt de zichtbaarheid van pacing spikes in het ECG. Kan geen directe aanwezigheid van stimulatie worden vastgesteld, dan wordt geprobeerd de hiervoor verantwoordelijke probleemtoestand vast te stellen.

Bij de beoordeling van de 'output function' dient onderscheid gemaakt te worden tussen 'inhibited' en 'triggered' PM's. Bij 'inhibited' PM's zou een te lage pacing frequen-

tie namelijk onterecht kunnen leiden tot de conclusie 'no output', terwijl hier bij 'triggered' PM's geen sprake van kan zijn.

In figuur 4.4 en 4.5 zijn de toestanden weergegeven die door de expert geïdentificeerd zouden kunnen worden tijdens de controle van de 'output function' voor respectievelijk 'inhibited' en 'triggered' PM's.



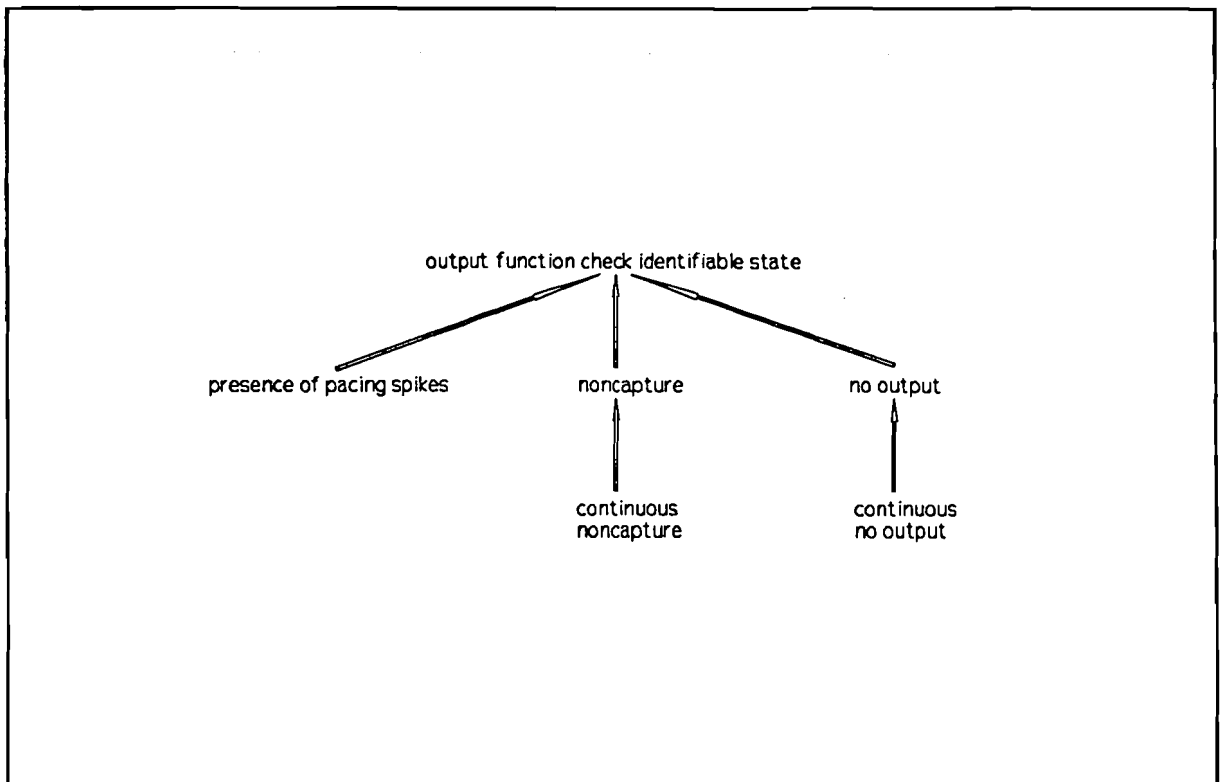
Figuur 4.4. Hiërarchie van mogelijke resultaten van de 'analysis of output function', in geval van 'inhibited' PM's.

De bladeren van de weergegeven geïnverteerde boomstructuren zijn de hypothesen die langs heuristische weg bewezen kunnen worden tijdens de controle. Is een blad (een te bevestigen toestand van functioneren) niet expliciet weergegeven in de flowchart van figuur 4.3, dan dient de in de hiërarchie hoger gelegen hypothese (indirect te bevestigen toestand) aangehouden te worden bij het doorlopen van het flowchart.

In de tekst die volgt worden de symptomen en/of testresultaten beschreven die kunnen leiden tot bevestiging van een hypothese en dus duiden op een bepaalde toestand van functioneren van de PM.

Directe zichtbaarheid van de pacing spikes in het ECG leidt tot de conclusie 'presence of pacing spikes' (feitelijk synoniem voor 'output'; echter pas na de 'sensing check' kan deze zo expliciet geuit worden). In geval van een 'inhibited' PM kan deze conclusie ook nog bereikt worden indien een te lage pacing frequentie ten grondslag lag aan het niet zichtbaar zijn van de pacing spikes. Het andere uiterste dat geïdentificeerd kan worden is de conclusie 'no output'.





Figuur 4.5. Hiërarchie van mogelijke resultaten van de 'analysis of output function', in geval van 'triggered' PM's.

Zijn niet direct pacing spikes zichtbaar dan wordt door een proces van uitsluiten van andere probleemtoestanden naar dit 'negatieve' uiterste toe geredeneerd, net zo lang tot een verklarende probleemtoestand wordt gevonden. Zo wordt de conclusie 'continuous noncapture' getrokken indien alleen pacing spikes zichtbaar zijn in een 12 afleidingen ECG of in een niet standaard precordiale afleidingen ECG (beide eventueel met dubbele gevoeligheid).

Indien een niet zichtbaar zijn van pacing spikes in geval van een 'inhibited' PM opgeheven kan worden door magneet-applicatie (gedurende welke de PM verandert in een asynchrone PM) en de pacing frequentie in principe al hoog genoeg was, dan kan men concluderen dat er sprake geweest moet zijn van 'oversensing'. Vindt deze constatering plaats in een 12 afleidingen ECG of in een niet standaard precordiale afleidingen ECG, dan kan daarbij eveneens de conclusie 'continuous noncapture' getrokken worden.

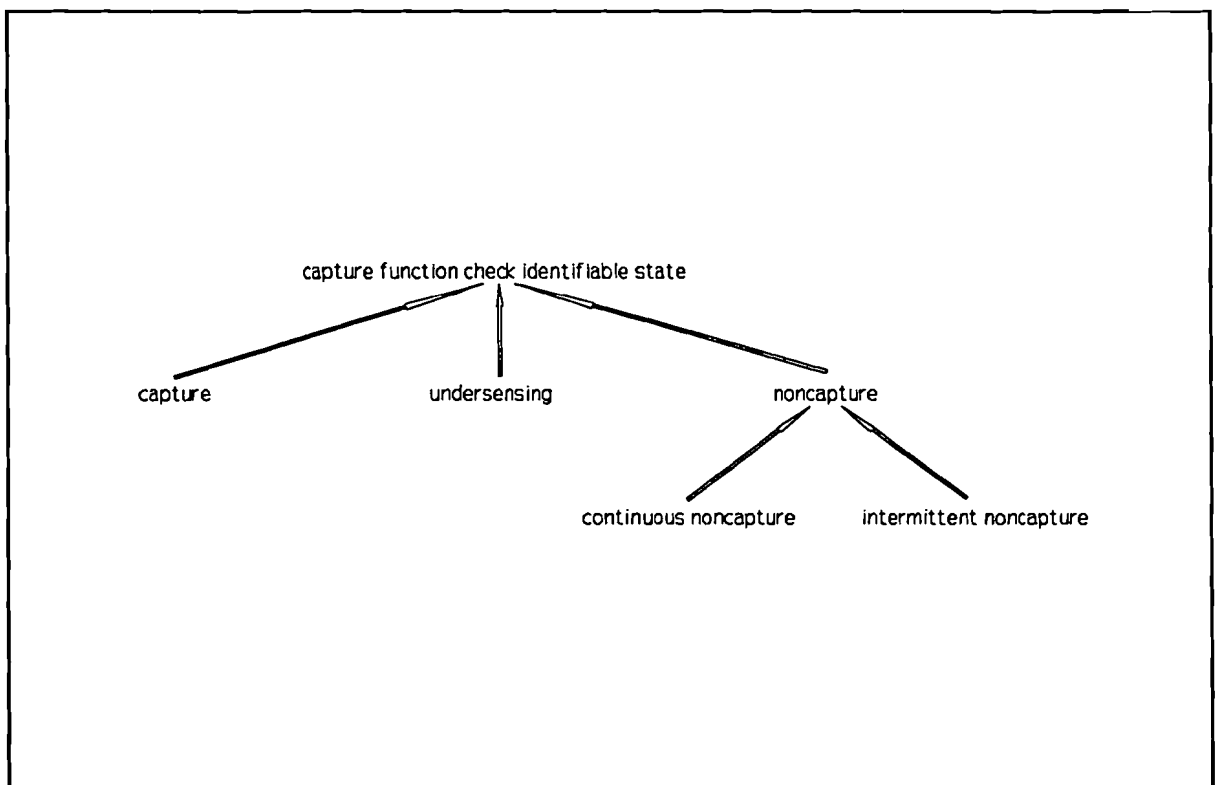
#### 4.2.2 Analyse van 'capture function'

Tijdens de analyse van de 'capture function' wordt de PM beoordeeld op de effectiviteit van de stimulatie, dat wil zeggen er wordt beoordeeld of de stimulus leidt tot een depolarisatie van het myocardium. Is dit het geval dan spreekt men van 'capture'.

Een centrale rol bij de beoordeling spelen de herkenbaarheid van de pacing spikes in het ECG en de morfologie van de ECG complexen. Om deze beoordeling goed plaats te kunnen laten vinden, dient in geval van 'triggered' PM's de pacing frequentie (of eventueel de hysteresis frequentie) groter te zijn dan de intrinsieke frequentie van de patiënt (voor 'inhibited' PM's diende al aan deze voorwaarde voldaan te zijn om de 'ouput function' te kunnen controleren).

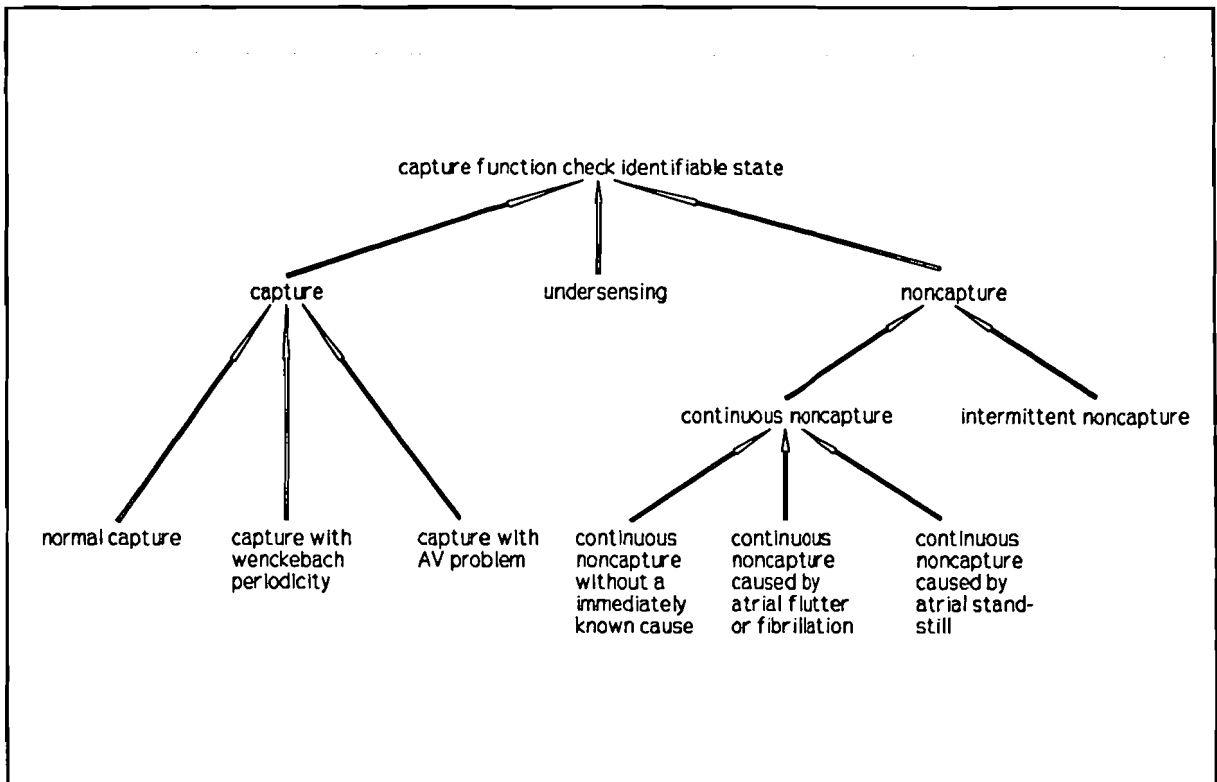
Bij de beoordeling van de 'capture function' dient onderscheidt gemaakt te worden tussen atriale en ventriculaire PM's. De belangrijkste reden hiervoor is dat de gestimuleerde depolarisaties bij atriale PM's vaak slecht herkenbaar zijn in het ECG en ook vaak nauwelijks afwijken van intrinsieke depolarisaties.

In figuur 4.6 en 4.7 zijn de toestanden weergegeven die door de expert geïdentificeerd kunnen worden tijdens de controle van de 'capture function'.



Figuur 4.6. Hiërarchie van mogelijke resultaten van de 'analysis of capture function', in geval van ventriculaire PM's.

De bladeren van de in de figuren weergegeven geïnverteerde boomstructuren symboliseren de hypotheses die langs heuristische weg bewezen kunnen worden tijdens de controle. Zoals te zien is in de figuren kunnen wederom (net als in figuur 4.4 en 4.5) een aantal heuristische zijsprongen worden gemaakt naar andere probleemtoestanden.



Figuur 4.7. Hiërarchie van mogelijke resultaten van de 'analysis of capture function', in geval van atriale PM's.

### Ventriculaire PM's:

Bij ventriculaire PM's is sprake van 'capture' indien de spikes steeds gevolgd worden door een gestimuleerd QRS complex. Naast deze waarneming kunnen in dezelfde registratie fusie- en pseudofusieslagen gezien worden, die verder geen invloed hebben op de eerder getrokken conclusie 'capture'.

Zijn er echter wel gestimuleerde QRS complexen aanwezig (en eventueel ook enkele fusie en pseudofusie complexen), maar worden niet alle spikes gevolgd als gevolg van het refractair zijn van het myocardium op die momenten, dan is er sprake van 'undersensing'.

Is het myocardium niet refractair op desbetreffende momenten dan is er sprake van 'intermittent noncapture'.

Indien geen enkele pacing spike zichtbaar gevolgd wordt in het ECG, kan de conclusie 'continuous noncapture' getrokken worden.

### Atriale PM's:

Zoals in § 3.3.3 al is aangegeven, is het verschil tussen de verscheidene slagen die op kunnen treden bij patiënten met atriale PM's lang niet zo duidelijk aanwezig als bij

patiënten met ventriculaire PM's. Aldus is een gestimuleerde slag, op de pacing spike na die de P golf voorafgaat, nauwelijks herkenbaar aan zijn morfologie. Het komt ook voor dat de vervorming, die de spike teweegbrengt in het ECG, de P golf helemaal overschaduwet (voornamelijk bij unipolaire PM's). De heuristieken van de expert bieden in deze situaties een aantal 'mooie' mogelijkheden om alsnog vast te kunnen stellen of of er sprake is van 'capture'.

Allereerst wordt dezelfde weg bewandeld als omschreven is bij de ventriculaire PM's, echter voor QRS complex dient dan steeds P golf gelezen te worden. In het laatste geval dat vermeld is bij de ventriculaire PM's, waar de conclusie 'continuous noncapture' wordt getrokken, kan bij atriale PM's nog een zijweg ingeslagen worden. In dit geval kan het immers gaan om het niet zichtbaar zijn van gestimuleerde atriale volgcomplexen in het ECG, wat onder andere veroorzaakt kan zijn doordat de spanningsval van de spike de P golf maskeert. Via de zijweg die ingeslagen wordt, wordt als eerste gekeken of de pacing spikes na een tijdvertraging ongeveer gelijk aan de AV vertraging gevolgd worden door intrinsieke QRS complexen (over een interval van ca. 10 seconden om toeval uit te sluiten). Is dit het geval dan kan alsnog de conclusie 'capture' getrokken worden.

Is dit niet het geval dan dient bekeken te worden of het dan zichtbare ECG soms een zogenaamde Wenckebach periodiciteit in de AV geleiding vertoont. Dit leidt namelijk tot de conclusie 'capture with Wenckbach periodicity', dat wil zeggen er is sprake van 'capture' maar de geleiding tussen atrium en ventrikel is niet helemaal normaal (vertraging loopt op waarna een geleiding overgeslagen wordt en het proces weer opnieuw begint). Hier moet de gebruiker op gewezen worden.

Een tussenstap die de expert hanteert om 'continuous noncapture' vast te stellen, is de zichtbaarheid van intrinsieke P golven met regelmatige tussenpozen. Na een gestimuleerde depolarisatie duurt het namelijk enige tijd voordat de SA knoop zijn normale ritme weer oppikt. Intrinsieke P golven met regelmatige intervallen duiden dus op het niet resetten van de SA knoop en het niet effectief zijn van de afgegeven stimuli.

Indien ook deze controlestap geen resultaat heeft opgeleverd, worden een 12 afleidingen ECG of niet standaard precordiale afleidingen ECG gebruikt (eventueel met dubbele gevoeligheid). Met deze ECG configuratie worden weer dezelfde stappen als die van ventriculaire PM's herhaald. Wordt nu 'capture' geconstateerd, dan dient hierbij wel in de gaten gehouden te worden dat er dan sprake moet zijn van een AV-geleidingsprobleem. De pacing spikes werden na enige AV vertraging immers niet gevolgd door intrinsieke QRS complexen. Dit vrij ernstige probleem in de natuurlijke prikkelgeleiding van het hart dient aan de gebruiker gemeld te worden.

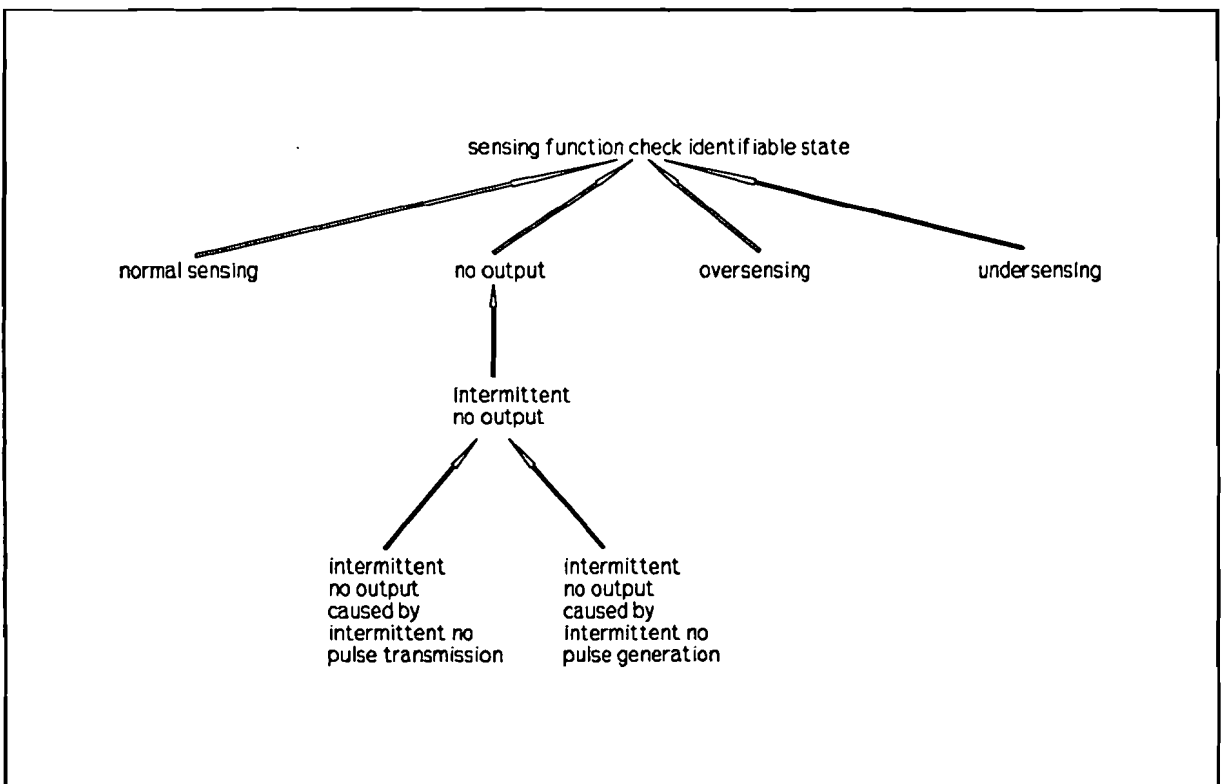
Is eenmaal 'noncapture' vastgesteld, dan dient nog bekeken te worden of dit niet het gevolg was van atriale flutter, fibrillatie of stilstand. De eerste twee zijn vaak door F golven en een onregelmatige basislijn herkenbaar in het ECG. Om atriale stilstand vast te stellen is een elektrofysiologisch onderzoek noodzakelijk.

### 4.2.3 Analyse van 'sensing function'

Tijdens de analyse van de 'sensing function' wordt de PM beoordeeld op de timing van de stimulatie, dat wil zeggen er wordt beoordeeld of de stimulus op het goede moment komt. Is dit niet het geval, dan wordt getracht de hiervoor verantwoordelijke probleemtoestand vast te stellen.

Een centrale rol bij de beoordeling spelen de intervallen in het ECG. Hierbij gaat het om de intervallen tussen twee opeenvolgende spikes, tussen twee opeenvolgende intrinsieke 'events' (P golven of QRS complexen) en tussen een intrinsiek 'event' en de daarop volgende spike. Om een goede 'sensing function'-analyse mogelijk te maken dienen zowel intrinsieke (of pseudofusie in geval van triggered PM's) als gestimuleerde depolarisaties zichtbaar te zijn in het ECG.

In figuur 4.8 zijn de toestanden weergegeven die een resultaat kunnen zijn van de analyse van de 'sensing function'.



Figuur 4.8. Hiërarchie van mogelijke resultaten van de 'analysis of sensing function'.

De bladeren in de boomstructuur symboliseren weer de hypothesen die langs heuristische weg bewezen kunnen worden. Zoals in de figuur te zien is, kan tijdens de 'sensing function' analyse alsnog blijken dat ook al zijn er pacing spikes zichtbaar in het ECG er toch sprake is van 'intermittent no output'.

Bij de beoordeling van de 'sensing' dient onderscheid gemaakt te worden tussen 'inhibited' en 'triggered' PM's en tussen atriale en ventriculaire PM's. Het eerste kenmerk van een PM bepaalt namelijk de reactie op een gesensed signaal en daarmee hoe een bepaald interval beoordeeld dient te worden. Het tweede kenmerk bepaalt welke intrinsieke 'events' gesensed worden (R golven in geval van ventriculaire PM's en P golven in geval van atriale PM's).

De analyse van de kennis die betrekking heeft op de controle van de 'sensing function', heeft nog niet in die mate plaats gevonden dat een verdere gedetailleerde toelichting gegeven kan worden.

### 4.3 Diagnose van probleemtoestanden

Probleemtoestanden die geïdentificeerd kunnen worden met betrekking tot de PM-werking zijn 'no output' ('continuous' of 'intermittent'), 'noncapture' ('continuous' of 'intermittent'), 'oversensing' en 'undersensing'. Deze probleemtoestanden worden opgelost, dat wil zeggen de oorzaak wordt vastgesteld, door diagnosetaken. De voor het uitvoeren van deze taken benodigde kennis is vergaard met behulp van literatuur geschreven in het kader van het promotieonderzoek van de expert, door interviews met de expert en door het bijwonen van een PM-controle.

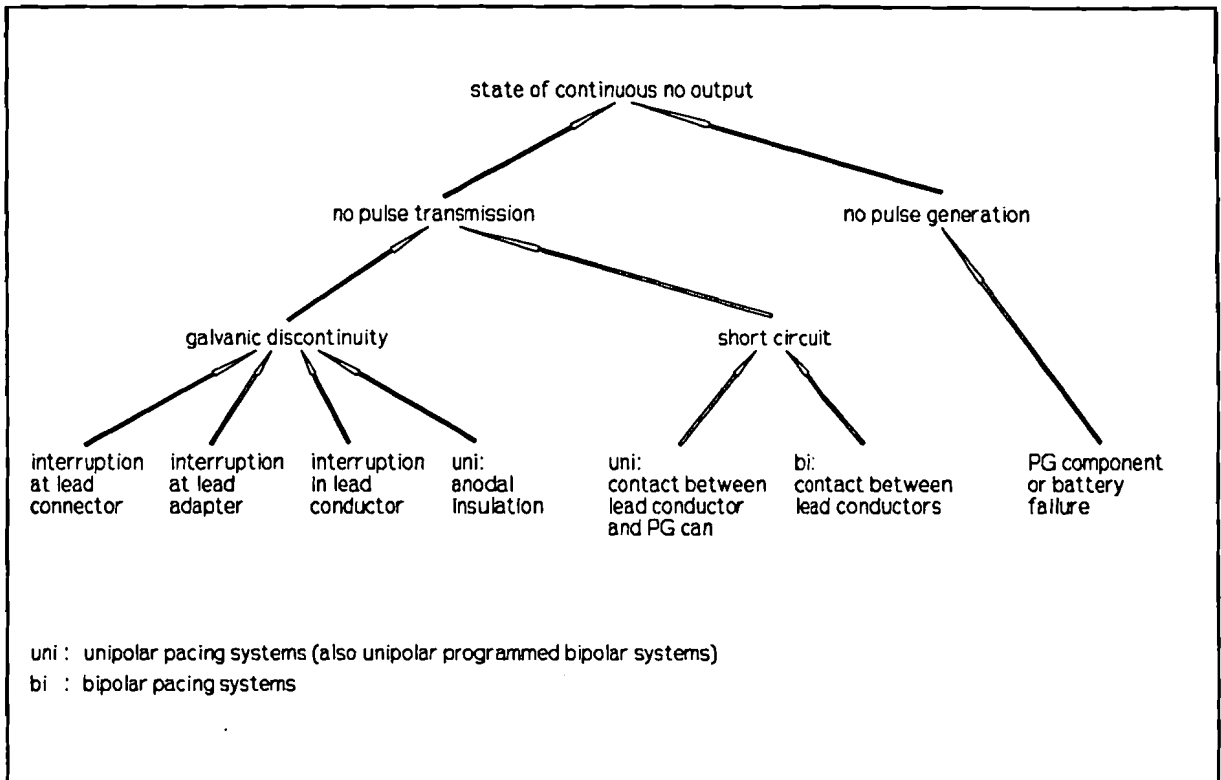
Het algemeen taakmodel dat van toepassing is op de door de expert gehanteerde diagnosetaken, is voornamelijk de zogenaamde 'causal tracing', variant van 'systematic diagnosis'. Af en toe zijn in de redentie van de expert ook onderdelen van het taakmodel 'systematic refinement' terug te vinden. Bij 'causal tracing' wordt een causaal netwerk doorlopen van oorzaken die ten grondslag kunnen liggen aan een probleemtoestand. Bij 'systematic refinement' wordt een 'is\_a'-hiërarchie doorlopen. De gehanteerde inferentie-structuur die de mogelijke redeneerstappen aangeeft, is in geval van 'causal tracing' dezelfde als die van 'systematic refinement'. Het enige verschil is feitelijk de structuur die doorlopen wordt op zoek naar een oplossing.

Het causale netwerk dat de hypothesen representeert, verbonden door 'causes'-verbindingen, kan eenvoudig uitgebreid worden met hypothesen verbonden via 'is\_a'-verbindingen indien de expert tijdens de probleemoplossing van een taak gebruik maakt van beide algemene taakmodellen. In Tansley en Hayball [1993] is een uitgebreide toelichting te vinden op beide taakmodellen.

In de navolgende paragrafen wordt de geëliciteerde en geanalyseerde kennis die betrekking heeft op de diagnosetaken beschreven.

### 4.3.1 Diagnose van 'continuous no output'

Tijdens de diagnose van 'continuous no output', wordt gezocht naar een mogelijke oorzaak voor deze probleemtoestand. Hierbij hanteert de expert de oplossingsmethode 'causal tracing'. Het causale netwerk dat hierbij doorlopen wordt is afgebeeld in figuur 4.9.



Figuur 4.9. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken van de probleemtoestand 'continuous no output'.

Bovenaan in het netwerk is de probleemtoestand weergegeven. Daaronder zijn van boven naar beneden de hypothesen (mogelijke oorzaken) weergegeven in toenemende mate van detail.

Waar 'causal tracing' ongeveer op neer komt, wordt hierna beschreven. Indien de probleemoplossing start, wordt vanuit de probleemtoestand één niveau afgedaald in het causale netwerk. Op dit niveau wordt één van de hypothesen gekozen. Hierna wordt gezocht naar mogelijke symptomen en/of testen die de hypothese kunnen bevestigen of afwijzen. Kan de hypothese niet bevestigd worden, dan wordt getracht een andere hypothese op hetzelfde niveau te bevestigen. Kan deze bevestigd worden, dan wordt via de 'causes'-verbindingen een niveau afgedaald in het netwerk. Dit proces herhaalt zich totdat een bevestigde hypothese is gevonden, die correspondeert met het laagste niveau van decompositie. De desbetreffende hypothese is dan de oorzaak van de probleemtoestand. Indien geen bevestigde hypothese is gevonden, heeft de taak formeel gefaald. De

expert hanteert vanaf het moment dat op een niveau geen bevestigde hypothese is gevonden een 'exhaustive search' aanpak ten opzichte van de lager liggende nog niet afgewezen hypotheses.

Met de term 'no pulse transmission' in figuur 4.9 wordt bedoeld dat wel een puls gegenereerd wordt door de PG, maar dat deze het myocardium niet bereikt. De andere termen in het figuur spreken feitelijk voor zich.

Om 'no pulse transmission' te bewijzen worden de testen manipulatie en communicatie gebruikt. Resulteert manipulatie van de PG in een pacing spike of is communicatie mogelijk, dan is er sprake van 'no pulse transmission'. Leidt manipulatie niet tot een pacing spike in het ECG en is er ook geen communicatie mogelijk met de PM dan kan de conclusie 'no pulse generation' getrokken worden. In dit geval is meteen bekend dat een fout in de PG of een uitgeputte batterij hieraan ten grondslag ligt.

Indien 'no pulse transmission' bewezen is, dient gedifferentieerd te worden tussen 'galvanic discontinuity' (een galvanische onderbreking in het stroomcircuit dat stimulatie van het hart mogelijk maakt) en 'short circuit'. Hiertoe kan meting van de leadimpedantie als test gebruikt worden. Een hoge leadimpedantie (vaak niet meetbaar met de beschikbare apparatuur) duidt op 'galvanic discontinuity'. Een lage leadimpedantie (eveneens vaak niet meetbaar vanwege het bereik van de meetapparatuur) duidt op 'short circuit'.

Is 'galvanic discontinuity' bewezen dan is de enige hypothese die nog zonder afbeeldingstechnieken bewezen kan worden 'anodal insulation'. Hier kan echter alleen sprake van zijn bij een unipolaire PM, waarvan de anode van het stimulatiecircuit van het hart gevormd wordt door PG behuizing. Deze anode kan door luchtophoping, ter plekke van de PG, geïsoleerd worden van lichaamsweefsel. Om dit vast te stellen wordt een lichte pressietest uitgevoerd. Indien een lichte druk op de huid boven de PG leidt tot een pacing spike in het ECG gevolgd door een depolarisatie van het myocardium, dan is deze hypothese bewezen. De overige onderbrekingen en verbindingen die onder 'galvanic discontinuity' en 'short circuit' zijn vermeld dienen door middel van afbeeldingstechnieken (röntgentechnieken) aangetoond te worden.

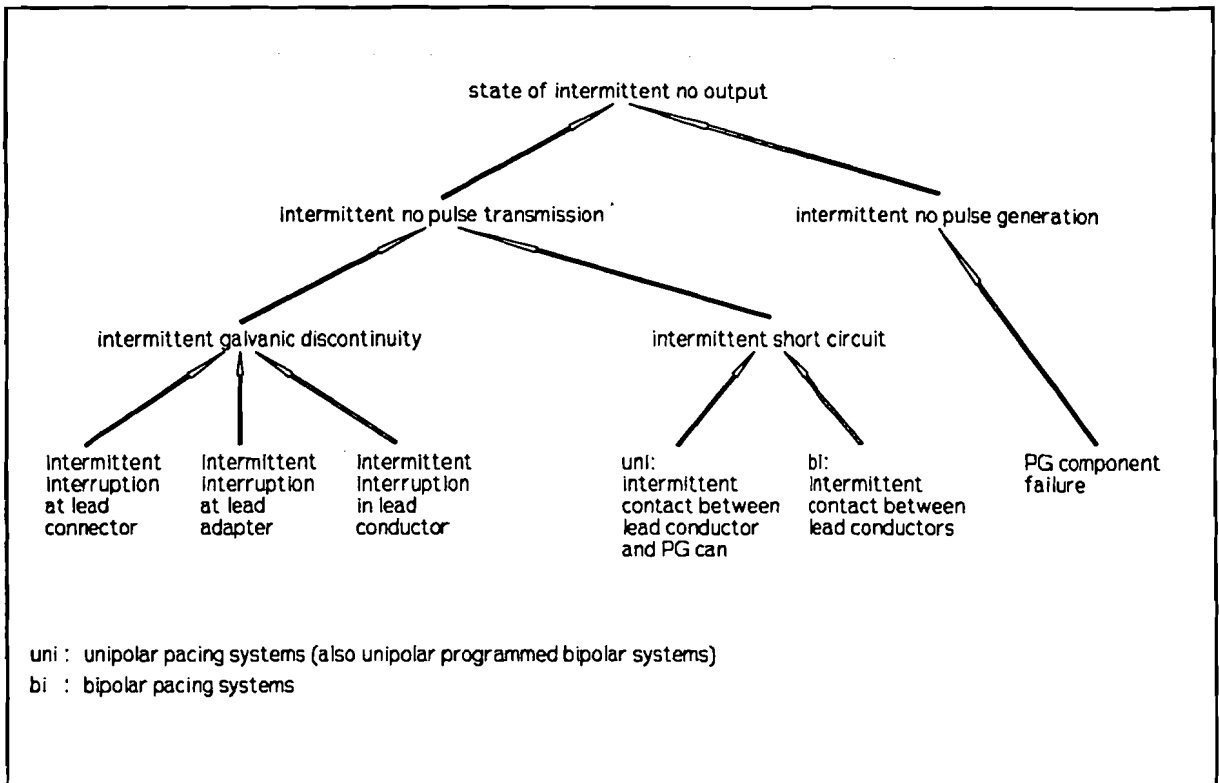
### 4.3.2 Diagnose van 'intermittent no output'

De probleemtoestand 'intermittent no output' komt pas aan het licht tijdens een controle van de 'sensing function'. De kennis die betrekking heeft op een diagnose van deze probleemtoestand is nog niet in voldoende mate geëliciteerd en geanalyseerd om hier een gedetailleerde toelichting op te kunnen geven.

In figuur 4.10 is al wel het causale netwerk weergegeven dat waarschijnlijk doorlopen wordt tijdens de probleemoplossing.

Het netwerk vertoont grote overeenkomst met het netwerk van figuur 4.9. Nu zijn de mogelijke oorzaken echter intermitterend van aard, waardoor de problemen 'anodal





Figuur 4.10. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken van de probleemtoestand 'intermittent no output'.

insulation' en 'battery failure' uitgesloten kunnen worden. De probleemoplossende methode die de expert hanteert is waarschijnlijk grotendeels dezelfde als beschreven in § 4.3.1.

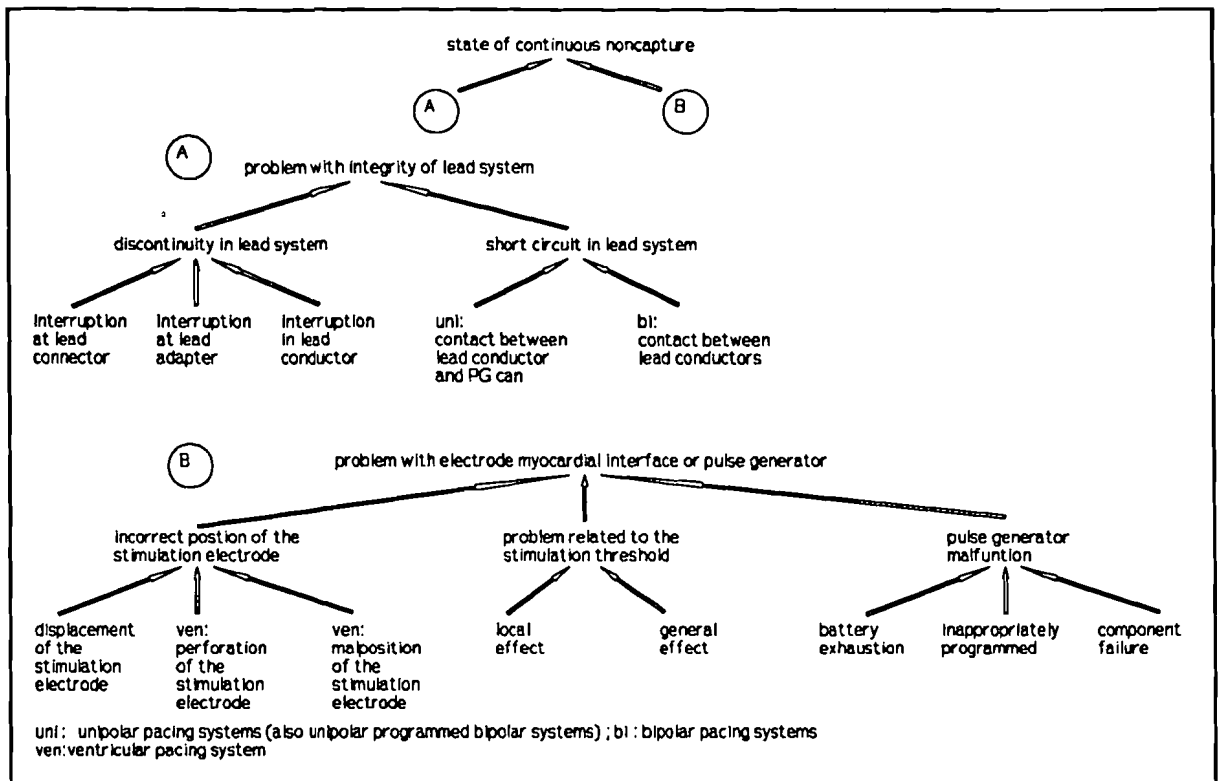
### 4.3.3 Diagnose van 'continuous noncapture'

Tijdens de diagnose van 'continuous noncapture' gaat de expert eveneens te werk volgens de methode van 'causal tracing'.

Het causale netwerk dat hierbij doorlopen wordt is weergegeven in figuur 4.11.

Deel A van het netwerk vertoont grote overeenkomsten met de linker hoofdtak van figuur 4.9, nu heeft echter de uitdrukking 'no pulse transmission' plaatsgemaakt voor de uitdrukking 'problem with integrity of lead system' en 'anodal insulation' is vervallen als mogelijke oorzaak. De vervanging van eerstgenoemde uitdrukking heeft betrekking op het nu wel zichtbaar zijn van pacing spikes (er is nu wel transmissie), anders had immers nooit de conclusie 'continuous noncapture' getrokken kunnen worden.

Deel B bevat behalve problemen met de PG ook problemen met de verbinding tussen stimulatie-elektrode en het myocardium.



Figuur 4.11. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken van de probleemtoestand 'continuous noncapture'.

Een differentiatie tussen deel A en deel B kan plaats vinden door vast te stellen of de leadimpedantie normaal is. Is deze niet normaal dan bevat deel A de mogelijke oorzaken. Is deze wel normaal dan dienen mogelijke oorzaken gezocht te worden in deel B.

Is op deze manier bewezen dat we te maken hebben met een 'problem with integrity of lead system', dan dient op het niveau lager onderscheid gemaakt te worden tussen 'discontinuity' en 'short circuit'. Hierbij kan een meting van de leadimpedantie uitkomst bieden. Een hoge leadimpedantie duidt op een 'discontinuity', een lage leadimpedantie op 'short circuit'. De aanduidingen hoge en lage leadimpedantie dienen wel steeds gedacht te worden in de context van het probleem (een hoge leadimpedantie die de probleemtoestand 'no output' veroorzaakt zal een stuk hoger liggen dan een hoge leadimpedantie die oorzaak is van de probleemtoestand 'continuous noncapture'). De lager gelegen hypothesen kunnen alle slechts bewezen worden met behulp van afbeeldingstechnieken.

In geval dat bewezen is dat we te maken hebben met een 'problem with electrode myocardial interface or pulse generator', dient gedifferentieerd te worden tussen de hypothesen van een niveau lager. Er zijn echter geen eenduidige symptomen of testen die hiervoor gebruikt kunnen worden. De hypothesen van het onderste niveau worden dan ook stuk voor stuk onderzocht.

Er is sprake van 'major displacement' indien tijdens de eerste controle blijkt, dat een atriale pacing spike gevolgd wordt door een abnormaal QRS complex (abnormale morfologie) en een ventriculaire pacing spike door een abnormale P golf. 'Major displacement' kan ook blijken indien op een analoge ECG recorder een verandering in de amplitude en richting van de pacing spike wordt waargenomen.

In geval van een atriale PM met een lead in de rechter atriale appendix kan 'major displacement' ook geconcludeerd worden indien de patiënt symptomen van diafragma-stimulatie vertoont.

'Perforation' en 'malposition' van de stimulatie-elektrode komen in de praktijk alleen bij ventriculaire PM's voor. Perforatie is dan te herkennen aan diafragma-stimulatie. Perforatie kan tevens aangetoond worden door van een bipolaire PM, die eveneens in unipolaire mode geprogrammeerd kan worden, de stimulatierempel in zowel de unipolaire als de bipolaire mode te meten. Indien in de unipolaire mode een hogere stimulatierempel wordt gemeten dan in de bipolaire mode, dan duidt dit op perforatie. Op dezelfde manier kan ook een verschil in het EGM van de PM in unipolaire mode, in vergelijking met de bipolaire mode, op perforatie duiden.

Mispositionering is niet zichtbaar in het ECG, als mogelijke oorzaak van de probleemtoestand 'continuous noncapture'. Onder mispositionering wordt in het merendeel van de gevallen verstaan dat de stimulatie-elektrode per vergissing geïmplanteerd is in de coronaire sinus of in één van diens vertakkingen.

Een verandering van pacing parameters in het ECG (bijvoorbeeld pacing frequentie) of een indicatie van lage batterijspanning via telemetrie wijzen op 'battery exhaustion' van de PM. Daarnaast kan telemetrie ook een verkeerde programmering aan het licht brengen ('inappropriately programmed'). Heeft de patiënt externe defibrillatie of bestraling ondergaan, dan kan ook een 'component failure' de oorzaak zijn.

Mocht nog geen van de hypothesen bewezen zijn, dan wordt getracht om met afbeeldingstechnieken de oorzaak te achterhalen. Indien deze een instabiele lead laten zien, dat wil zeggen een lead die zich bijvoorbeeld bij inademing lijkt te verplaatsen, dan is 'minor displacement' hoogstwaarschijnlijk de oorzaak.

Indien een grote verplaatsing ('major displacement') heeft plaatsgevonden, zal deze ook zeker zichtbaar zijn.

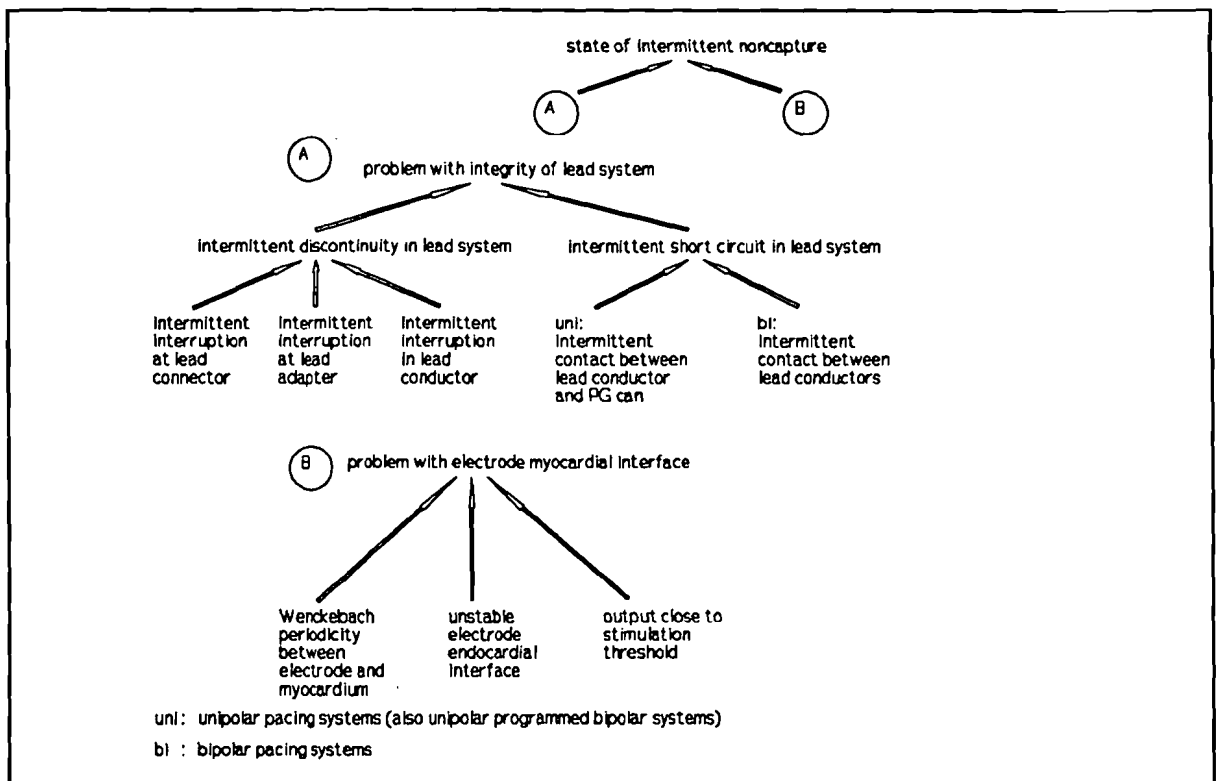
Een 'diepe' positie kan duiden op 'perforation' en een naar achteren gerichte positie op 'malposition' van de ventriculaire lead.

Wordt een normale positie geconstateerd, is de stimulatie drempelverhogend en is de controle tevens de eerste na implantatie, dan is er waarschijnlijk sprake van een 'local effect' dat de probleemtoestand veroorzaakt (bijvoorbeeld fibrose).

Wordt een normale positie geconstateerd, een verhoogde stimulatierempel gemeten en slijkt de patiënt antiarrhythmische medicijnen of is er sprake van een elektrolytverstoring, dan is dit een 'general effect' dat oorzaak is van de probleemtoestand.

#### 4.3.4 Diagnose van 'intermittent noncapture'

De gevolgde werkwijze bij deze diagnosetaak is wederom die van 'causal tracing'. Het causale netwerk dat bij deze taak hoort is weergegeven in figuur 4.12.



Figuur 4.12. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken van de probleemtoestand 'intermittent noncapture'.

Zoals in de figuur te zien is, vertoont het A-deel grote overeenkomst met dat van 'continuous noncapture'. Het gaat hier echter om een 'noncapture' probleem met een intermitterend karakter.

De hypothese 'problem with integrity of lead system' kan nu niet alleen bewezen worden met een niet-normale leadimpedantie tijdens 'noncapture', maar ook door een verzwakking van de pacing spike in het ECG tijdens 'noncapture'. Om dit laatste te constateren dient wel gebruik gemaakt te worden van een analoge ECG recorder. Is er geen sprake van verzwakking van de pacing spike in het ECG van een analoge recorder of wordt een normale leadimpedantie gemeten, dan is de hypothese 'problem with electrode myocardial interface' bewezen. De lager liggende hypothesen van deel A worden op dezelfde manier getest als omschreven in § 4.3.3, echter nu rekening houdend met het intermitterende karakter van de probleemtoestand.

Van deel B kan 'Wenckebach periodicity between electrode and myocardium' bewezen worden, indien de atriale (ventriculaire) pacing spike in het ECG na een steeds

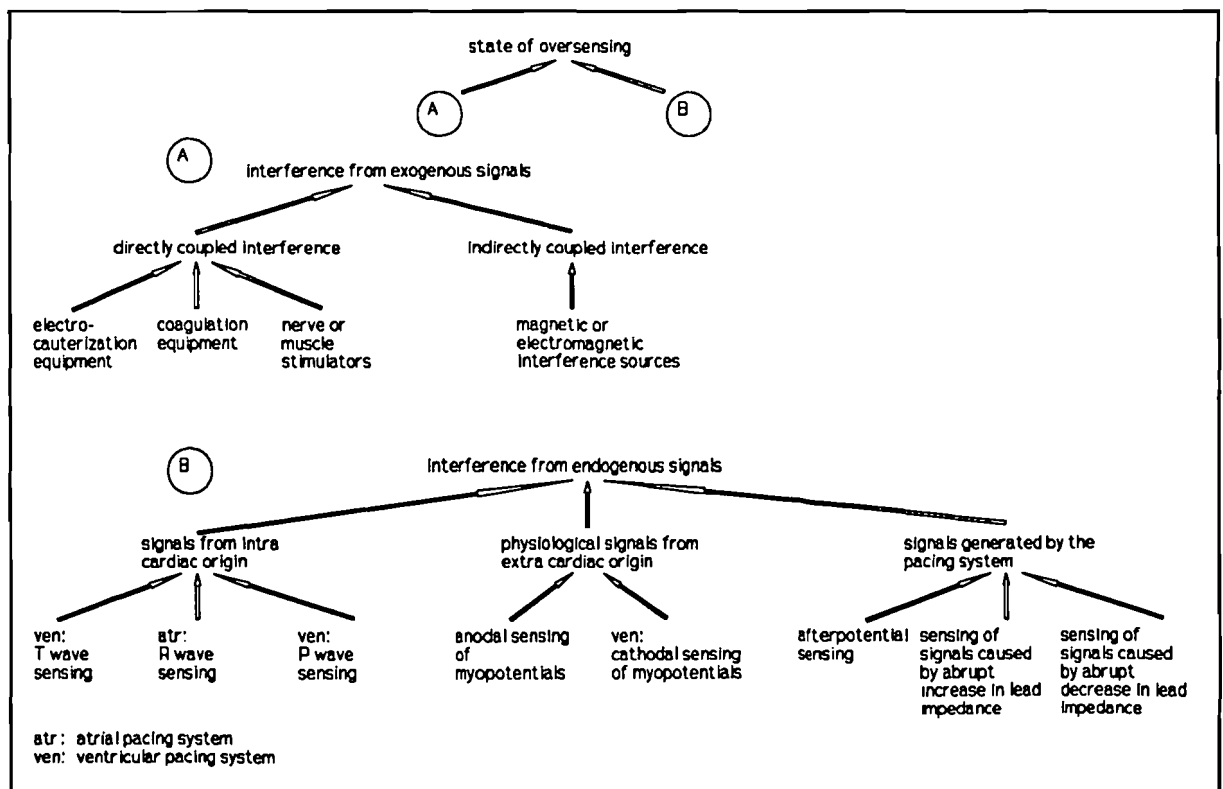
grotere vertraging gevolgd wordt door een gestimuleerde P golf (QRS complex), om uiteindelijk niet gevolgd te worden. Dit proces herhaalt zich.

Is er alleen sprake van capture in de supernormale fase van exciteerbaarheid van het myocardium, dan is waarschijnlijk 'output close to stimulation threshold' de oorzaak van de probleemtoestand. Kan geen van deze beide hypothesen bewezen worden en is de controle de eerste na implantatie van de PM, dan is er waarschijnlijk sprake van een 'unstable electrode endocardial interface'.

#### 4.3.5 Diagnose van 'oversensing'

De kennis die betrekking heeft op deze diagnosetaak is nog niet in voldoende mate geëliciteerd en geanalyseerd om uitvoerig behandeld te worden.

In figuur 4.13 is wel de combinatie van causaal netwerk en 'is\_a'-hiërarchie weergegeven waar waarschijnlijk tijdens de probleemoplossing van gebruik gemaakt wordt.

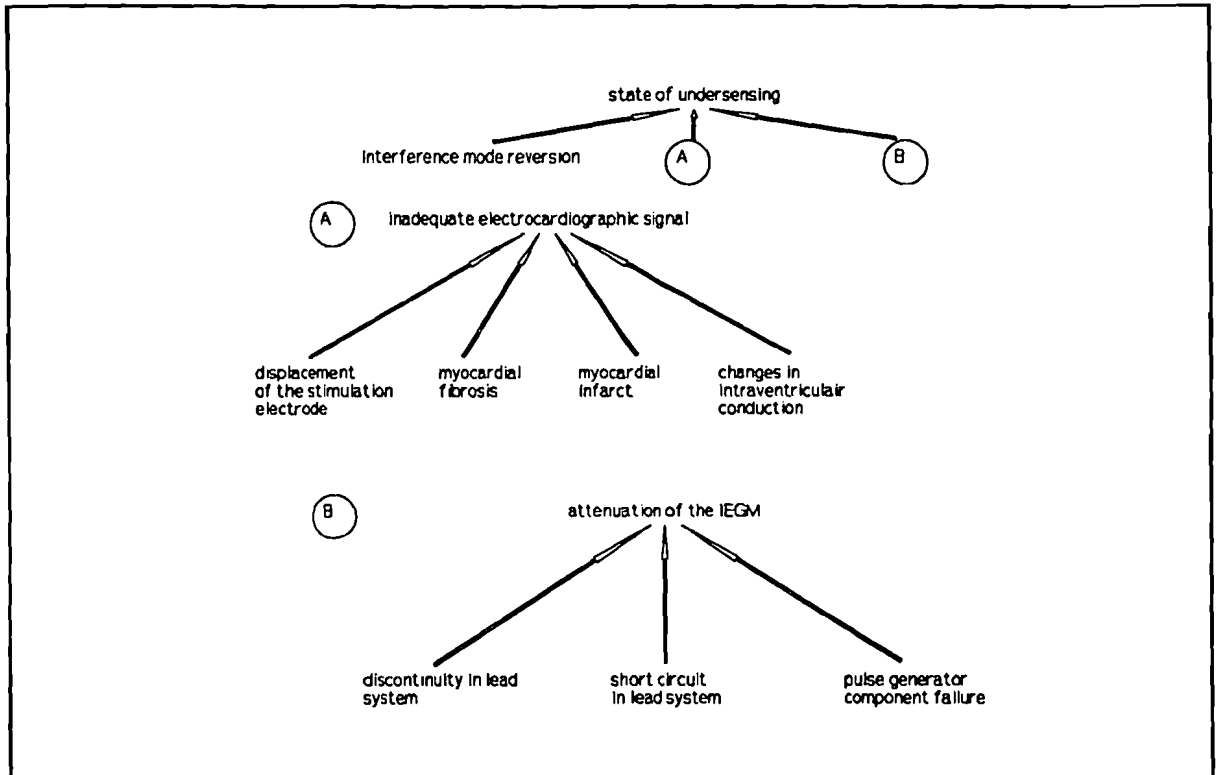


Figuur 4.13. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken (in combinatie met 'is\_a'-hiërarchie) van de probleemtoestand 'oversensing'.

### 4.3.6 Diagnose van 'undersensing'

De kennis die betrekking heeft op deze diagnosetaak is eveneens nog niet in voldoende mate geëliciteerd en geanalyseerd.

In figuur 4.14 is wel het causale netwerk weergegeven dat waarschijnlijk doorlopen wordt tijdens de probleemoplossing.



Figuur 4.14. Causaal netwerk van mogelijke oorzaken van de probleemtoestand 'undersensing'.

## 5 Formalisatie van de geanalyseerde expertkennis

Tijdens deze fase in de ontwikkeling van een expertstelsel wordt de in de voorgaande fase geanalyseerde kennis omgezet in een formele structuur.

De kennis uit de voorgaande fase is voornamelijk mens-georiënteerd, dat wil zeggen zodanig gerepresenteerd dat de 'knowledge engineer' en de domeinexpert goed over het onderwerp kunnen communiceren. De representatievormen zijn natuurlijke taal en diagrammen, waarvan met name de representatie in de vorm van natuurlijke taal dubbelzinnigheden kan bevatten.

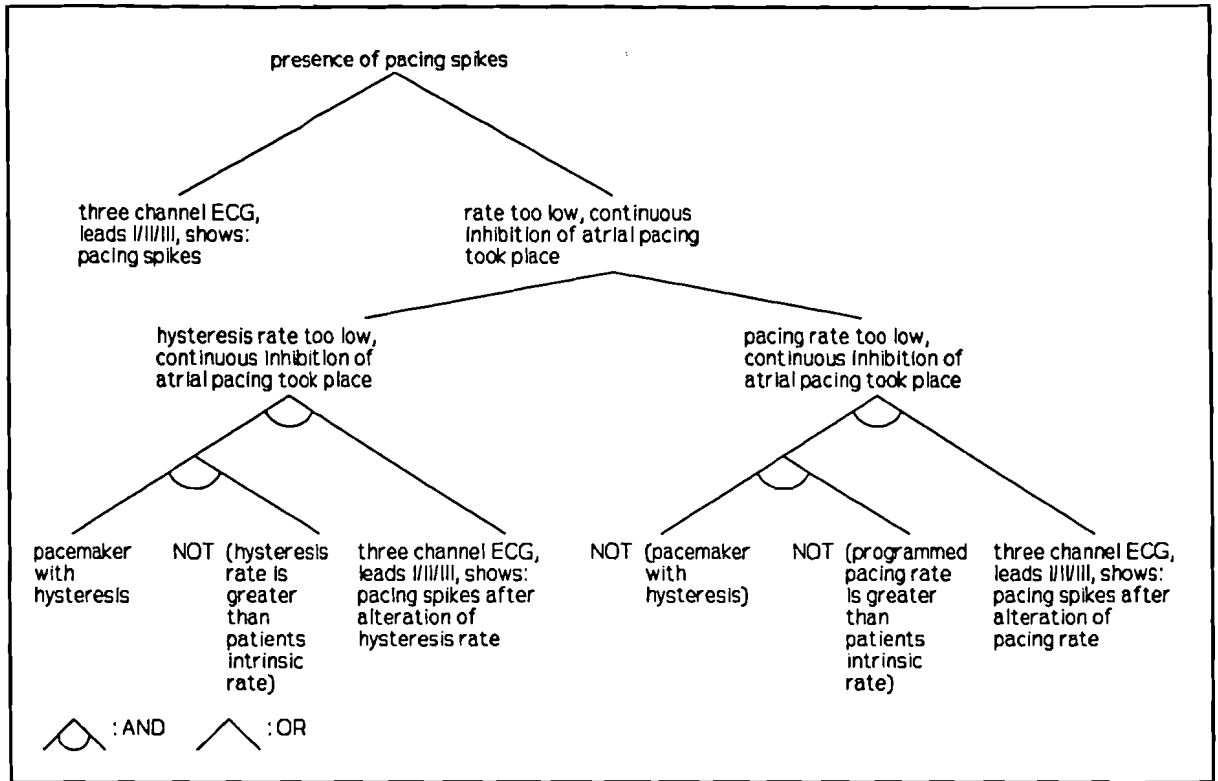
Het belangrijkste doel van de formalisatie is dan ook het verkrijgen van een eenduidige representatie van de kennis, die gebruikt kan worden bij de implementatie. Als representatieformalismen kunnen bijvoorbeeld regels in pseudocode of netwerkstructuren gebruikt worden.

Het representatieformalisme dat gebruikt is bij de ontwikkeling van dit expertstelsel is de AND/OR TREE, met als extra aanvulling THEN overgangen om 'forward chaining' aan te geven. De AND/OR TREE bestaat uit een geïnverteerde boomstructuur met knooppunten en verbindingen daartussen. De eindknooppunten worden ook wel blad-knooppunten genoemd. Het bovenste knooppunt symboliseert in het algemeen een doel of een te bewijzen hypothese. De hieronder gelegen knooppunten, die hiermee verbonden zijn, symboliseren subdoelen of condities waaraan voldaan moet worden om het hoger gelegen knooppunt na te streven of te bewijzen. Bevindt zich tussen de verbindingen vanuit een knooppunt een boog of het woord 'AND', dan is de AND-operator van toepassing op de subdoelen of condities aan het einde van de verbinding. Bevindt zich daarentegen geen boog of het woord 'OR' tussen de verbindingen, dan is de OR-operator van toepassing. In figuur 5.1 is een stukje kennis, afkomstig uit § 4.2.1, geformaliseerd weergegeven.

De AND/OR TREE is gekozen als formalisme, omdat deze:

- een beter overzicht biedt dan bijvoorbeeld regels in pseudocode;
- voor de domeinexpert ook duidelijk en snel te doorzien is;
- al enigszins aan ligt tegen de representatievorm van een 'expert system building tool' die naar aanleiding van de kennisanalyse een geschikte keuze leek (het is inefficiënt om hier dan nog geen rekening mee te houden).

Een nadeel van de AND/OR TREE is dat hieruit niet duidelijk de volgorde van de evaluatie volgt van het doel of de hypothese in de top (feitelijk de 'root') van de boom. Dit is op te lossen door informeel een evaluatievolgorde vast te leggen, waar bij de implementatie rekening mee gehouden kan worden. Om achteraf, dat wil zeggen na de implementatie, toch eenvoudig te kunnen controleren of de gewenste volgorde ook daadwerkelijk is geïmplementeerd is het programma GOODTREE ontwikkeld (een nadere



Figuur 5.1. AND/OR representatie van de probleemruimte van 'presence of pacing spikes'.

toelichting hierop wordt in § 6.3 gegeven).

De volgorde is in dit geval van belang omdat het expertsysteem in de huidige vorm een dialoog aangaat met de gebruiker. Een voor de gebruiker onlogische volgorde in de vraagstelling, hoe correct dan ook qua formele logica, kan hem zijn vertrouwen in het systeem doen verliezen. Dit kan leiden tot een ongebruikt 'on the shelf' expertsysteem.



## 6 Implementatie van de geformaliseerde expertkennis

Nadat de geanalyseerde kennis geformaliseerd is, kan deze geïmplementeerd worden, dat wil zeggen omgezet in een werkbaar programma. Hiertoe zal een keuze gemaakt moeten worden betreffende de te gebruiken software 'tool'.

Er kan gekozen worden voor gebruik van een bepaalde programmeertaal (bijvoorbeeld: LISP, PROLOG, PASCAL, C etc) of voor een bepaalde shell, ook wel kennissysteem-ontwikkelomgeving genoemd.

De programmeertalen zijn op te vatten als 'general purpose' gereedschappen. De shells zijn op te vatten als meer 'dedicated' gereedschappen (meer toegesneden op een specifieke taak) en bieden in de regel extra 'tools' (debugging- en testmogelijkheden).

Bij de ontwikkeling van dit expertstelsel is gebruik gemaakt van de 'expert system building tool' SIMPLEXYS.

In dit hoofdstuk zal allereerst een beknopte toelichting op de kenmerken van SIMPLEXYS worden gegeven en de motivatie voor de keuze voor SIMPLEXYS (voor een uitvoerige beschrijving van SIMPLEXYS kan men terecht in Blom [1990]). Daarna wordt dieper ingegaan op de implementatie, de 'tool' GOODTREE en de 'user-interface'.

### 6.1 De 'expert system building tool' SIMPLEXYS

SIMPLEXYS is op de Technische Universiteit Eindhoven ontwikkeld, naar aanleiding van een behoefte om intelligente alarmeringssystemen in de anesthesie te kunnen ontwerpen. De kennis die dergelijke systemen dienen te bevatten bleek te complex voor een algoritmische aanpak, waardoor de aandacht werd gericht op AI technieken.

Bestaande expertstelsel-ontwikkelomgevingen voldeden niet, wat met name werd veroorzaakt doordat ze niet gericht waren op real-time applicaties, zoals bewakingstaken. Om deze reden en omdat men ervaring op wilde doen met de ontwikkeling van een expertstelsel, zodat een zo snel mogelijk systeem zou kunnen resulteren, is men overgegaan tot de ontwikkeling van SIMPLEXYS.

SIMPLEXYS, in zijn huidige hoedanigheid, is een verzameling gereedschappen om real-time expertsystemen te ontwerpen en te ontwikkelen. SIMPLEXYS is in het bijzonder bedoeld om problemen op het gebied van patiëntbewaking en klinische regelsystemen te formuleren en op te lossen.

In SIMPLEXYS kunnen 'goals' (doelstellingen) en 'protocols' geïmplementeerd worden. De 'goals' beschrijven wat er gedaan moet worden en de 'protocols' wanneer iets gedaan moet worden. Op deze manier kan het probleem op een hoog niveau uitgedrukt worden.

De basisrepresentatie-eenheid is de regel. Deze heeft meer de vorm van een definitie, '.. is gedefinieerd als ...', dan de vorm van 'als...dan...' van productiesystemen.

De meeste op regels gebaseerde expertsystemen bezitten een 'rule interpreter', die bepaalt hoe en wanneer bepaalde regels dienen te worden uitgevoerd (tevens de 'inference-engine' van het systeem). Het doorzoeken van de KB is dan meestal gebaseerd op patroonherkenning. SIMPLEXYS bezit een 'rule compiler', waarmee de kennis intern in een netwerk wordt vertaald. Dankzij deze interne netwerkrepresentatie hoeft er geen KB doorzocht te worden, indien een regel geëvalueerd wordt.

Bij de evaluatie van expressies hanteert SIMPLEXYS een logica die vergelijkbaar is met booleaanse logica. De logica is echter driewaardig en kent naast de waarden 'TRue' en 'FAlse', ook de waarde 'POssible', dat wil zeggen de waarde van de variabele is onbekend (hij kan zowel 'TRue' als 'FAlse' zijn). Behalve extra operatoren die van toepassing zijn op één argument en extra operatoren die van toepassing zijn op twee argumenten, kent SIMPLEXYS ook nog zogenaamde 'history' operatoren. Hiermee zijn numerieke vergelijkingen uit te voeren in plaats van logische operaties (bijvoorbeeld hoe lang is x al waar?).

De 'inference engine' kan zowel 'backward chaining' als 'forward chaining' als inferentiemechanisme toepassen.

De 'rule compiler' van SIMPLEXYS controleert de KB op syntactische fouten, dat wil zeggen fouten in taalgebruik. Tot de 'tools' van SIMPLEXYS behoort ook een 'semantics checker', waarmee de KB op semantische fouten (fouten in betekenis) kan worden onderzocht. Met de 'protocol checker' is het in de KB gedefinieerde 'protocol' te controleren. Met de 'TRACER/DEBUGGER' kan het redeneerproces, zoals dat plaats vond tijdens het in bedrijf zijn van het expertsysteem, geanalyseerd worden.

Er is gekozen voor gebruik van SIMPLEXYS om de volgende redenen:

- eenvoudig en overzichtelijk door regels;
- 'high level' representatie van probleem mogelijk door 'goals' en 'protocols';
- zowel 'backward chaining' als 'forward chaining' mogelijk;
- 'inference engine' geïmplementeerd in PASCAL, daardoor efficiënt in vergelijking met LISP en PROLOG;
- door koppeling met PASCAL, goede mogelijkheid tot vervaardiging van 'user-interface' en verbinding met onder andere databases;
- direct beschikbaar, zonder extra kosten;
- veel kennis aanwezig over SIMPLEXYS;
- wijzigingen in 'source code' van 'inference engine' en andere onderdelen van SIMPLEXYS mogelijk;
- standaard veel 'tools' en testmogelijkheden beschikbaar.

Een aan te geven nadeel is:

- waarschijnlijk zal niet alle controle-kennis expliciet uit te drukken zijn. Indien gekozen wordt voor een duidelijke opzet van KB, door regels zoveel mogelijk te groeperen, hoeft dit geen belangrijk nadeel te zijn.

SIMPLEXYS kent niet de mogelijkheid om te redeneren met onzekere data of domeinkennis door middel van possibilistische of probabilistische logica. Voor dit systeem is dit echter niet van wezenlijk belang, omdat de domeinexpert een differentiërende strategie volgt tijdens de probleemoplossing, gedurende welke hij een 'hard' onderscheid probeert te maken tussen de diverse hypothesen.

## 6.2 Werkwijze

Tijdens de implementatie is getracht om de verschillende soorten kennis duidelijk in de KB tot uiting te laten komen.

De algemene strategie is geïmplementeerd met behulp van de zogenaamde 'goals' die gebruikt kunnen worden in SIMPLEXYS. Dit is gedaan door globaal een opeenvolging van 'goals' aan te geven die nagestreefd zullen worden indien een consultatie van het expertsysteem aanvangt. De 'goals' symboliseren ieder een bepaalde taak. Afhankelijk van het resultaat van een taak worden één of meerdere 'goals' uit de opeenvolging van de waarde FALSE voorzien, waarmee kenbaar wordt gemaakt dat ze niet meer nagestreefd behoeven te worden. Van de mogelijkheid om door middel van toestandsovergangen een 'protocol' te implementeren is nog geen gebruik gemaakt. De belangrijkste reden hiervoor is dat door een toestandsovergang de uitkomst van de evaluatie van regels weer teniet wordt gedaan. Tijdens de ontwikkeling was nog niet duidelijk in hoeverre dit bezwaarlijk kon zijn en daarom is hier voorlopig nog vanaf gezien.

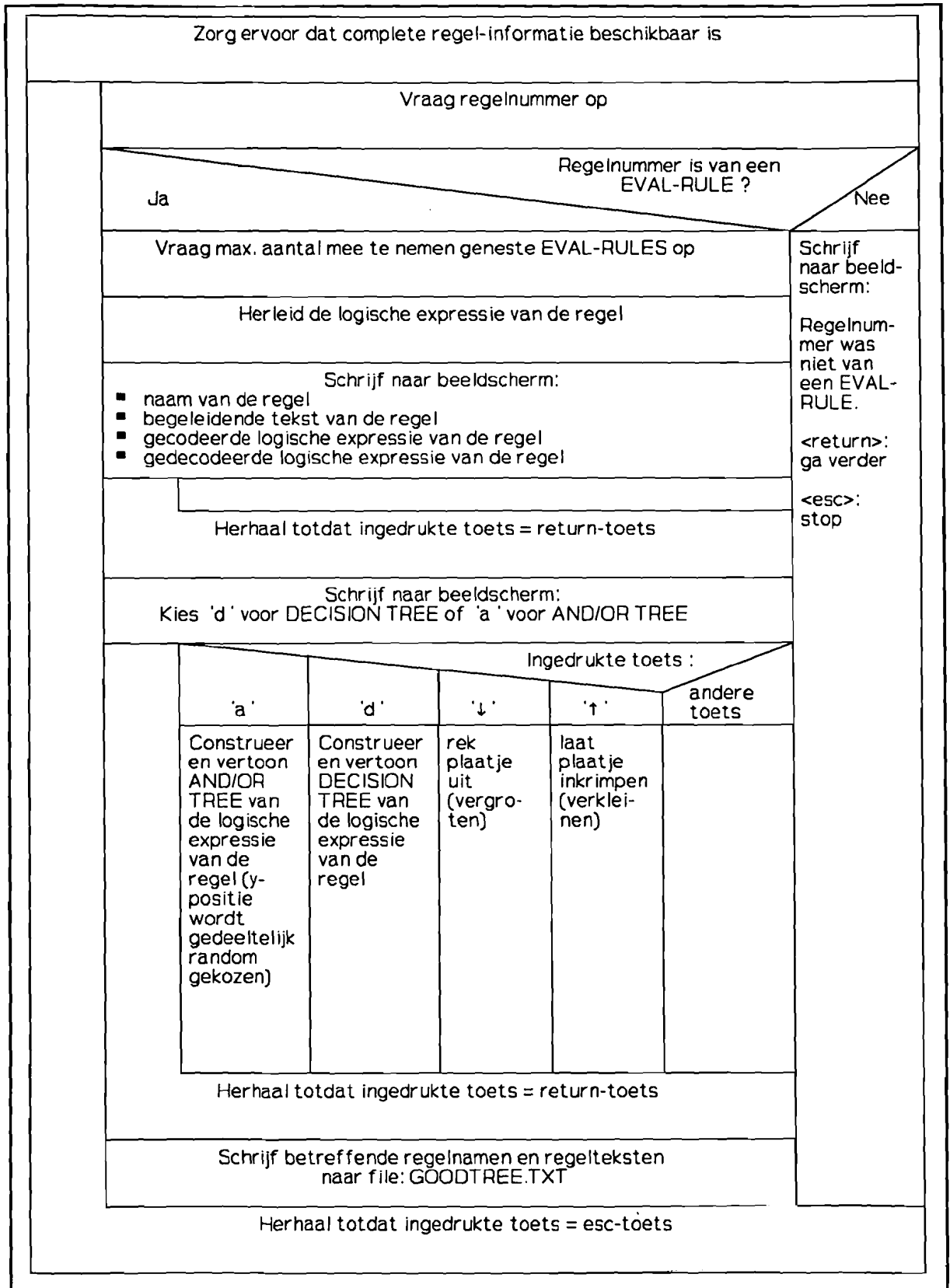
Via nastreving van een als globaal gedefinieerde 'goal' wordt een taak uitgevoerd. Bij de aanvang van een taak vindt eventueel een opsplitsing plaats in PM-type specifieke subtaken. Welke opsplitsing benodigd is bij de beoordeling van een bepaalde PM-functie of bij de diagnose van een bepaalde probleemtoestand is vermeld in hoofdstuk 4. Bij de analysetaken is de redentatie die gehanteerd wordt tijdens het heuristische classificatieproces geïmplementeerd door gebruik te maken van het 'backward chaining' inferentiemechanisme. Hiermee is 'backward reasoning', ofwel 'solution driven reasoning' op het kennisniveau geïmplementeerd. De redentatie die gevolgd wordt tijdens de diagnosetaken (het proces dat bekend staat onder de naam 'causal tracing') is geïmplementeerd door gebruik te maken van zowel 'forward chaining' als 'backward chaining'. Een beschrijving van het 'causal tracing' proces is al in § 4.3.1 weergegeven. Bij het bewijzen of afwijzen van de hypothesen van een overeenkomstig niveau van het causale netwerk, wordt gebruik gemaakt van het 'backward chaining' inferentiemechanisme. De stap naar een



Zoals in hoofdstuk 5 reeds is aangegeven, is de volgorde van de vraagstelling aan de gebruiker en daarmee de volgorde van de evaluatie van de expressie van belang, om het vertrouwen van de gebruiker in het systeem te behouden.

De ontwikkelde 'tool' GOODTREE biedt de mogelijkheid om na implementatie eenvoudig te kunnen beoordelen of ook daadwerkelijk de gewenste AND/OR structuur geïmplementeerd is en of de evaluatie hiervan in de gewenste volgorde zal gaan verlopen. GOODTREE maakt hiertoe gebruik van de gecompileerde KB. Dankzij de netwerkrepresentatie van de kennis in de gecompileerde KB, is eenvoudig de oorspronkelijke logische expressie van een bepaalde EVAL-RULE te herleiden. Uitgaande van deze expressie kan GOODTREE naar behoeven grafisch een AND/OR TREE of een DECISION TREE weergeven. De weergegeven AND/OR TREE hoort een weerspiegeling te zijn van de AND/OR TREE, gebruikt als de formele representatie van een bepaald stukje kennis. Op deze manier is snel te controleren of bijvoorbeeld geen haakjes vergeten zijn bij de implementatie. De weergegeven DECISION TREE laat goed zien hoe de feitelijke redentatie aan de hand van de logische expressie zal verlopen. Een onlogische volgorde komt middels het eenmaal doorlopen van de DECISION TREE snel tot uiting.

In figuur 6.1 is een programmastructuur-diagram (PSD) van GOODTREE weergegeven, die een overzicht biedt in de werking/opbouw van het programma.



Figuur 6.1. PSD van GOODTREE.

De logische expressie die in figuur 5.1 geformaliseerd is weergegeven, is als volgt geïmplementeerd in SIMPLEXYS:

- ```

(1)  aS_atr_in:'Presence of pacing spikes'
     aS_OR_RATE_LOW_atr
     THEN DO
         write_window(3,'Pacing spikes present');
         write_dialogue('Pacing spikes present. ');
         write_dialogue('Proceeding with capture check ..... ');
         write_dialogue("");
         context:=c_check;
     ENDDO
     THEN FA:DIAGNOSE_NOOUTPUT

(2)  RATE_LOW_atr:'Rate too low, continuous inhibition of atrial pacing took place'
     HYST_RATE_LOW_atr OR PACE_RATE_LOW_atr

(3)  HYST_RATE_LOW_atr:'Hysteresis rate too low, continuous inhibition of atrial pacing took place'
     pace_hyst AND NOT hyst_great_intrin AND aS_retryh
     THEN DO
         write_dialogue('Hysteresis rate was too low. Continuous inhibition of pacing by the intrinsic');
         write_dialogue('rate took place. ');
         write_dialogue("");
     ENDDO

(4)  PACE_RATE_LOW_atr:'Pacing rate too low, continuous inhibition of atrial pacing took place'
     NOT pace_hyst AND NOT pace_great_intrin AND aS_retryp
     THEN DO
         write_dialogue('Pacing rate was too low. Continuous inhibition of pacing by the intrinsic');
         write_dialogue('rate took place. ');
         write_dialogue("");
     ENDDO

(5)  aS:'Three channel ECG,leads I/II/III, shows: Pacing spikes'
     ASK

(6)  pace_hyst:'Pacemaker with hysteresis'
     BTEST paceinfo.hyster=true

(7)  hyst_great_intrin:'Hysteresis rate is greater than patients intrinsic rate'
     ASK
     ELSE DO
         write_dialogue('Please enlarge hysteresis rate so the above condition is satisfied, ');
         write_dialogue('otherwise no valid conclusions can be drawn !');
         write_dialogue("");
         pause_hide_cursor;
     ENDDO

(8)  aS_retryh:'Three channel ECG,leads I/II/III, shows: Pacing spikes after alteration of hysteresis rate'
     ASK

(9)  pace_great_intrin:'Programmed pacing rate is greater than patients intrinsic rate'
     ASK
     ELSE DO
         write_dialogue('Please enlarge programmed pacing rate so the above condition is satisfied, ');
         write_dialogue('otherwise no valid conclusions can be drawn !');
         write_dialogue("");
         pause_hide_cursor;
     ENDDO

(10) aS_retryp:'Three channel ECG,leads I/II/III, shows: Pacing spikes after alteration of pacing rate'
     ASK

```

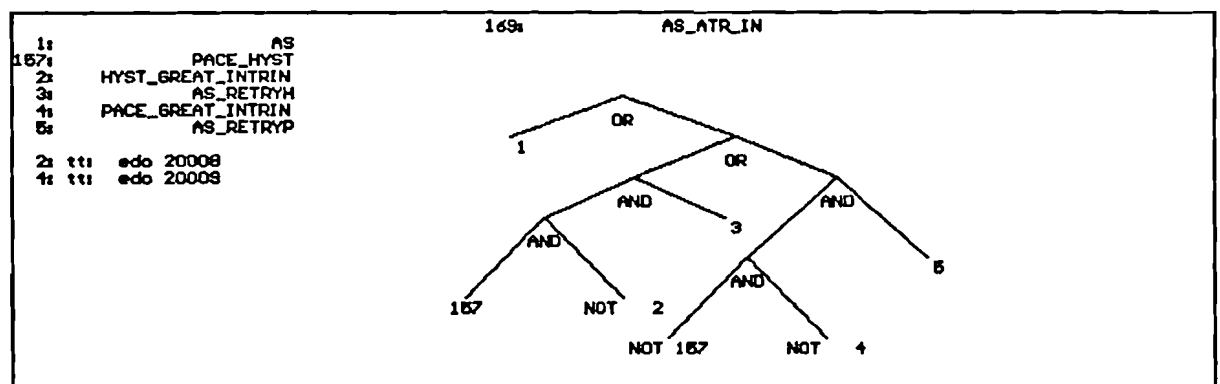
Regels 1, 2, 3 en 4 zijn EVAL-RULES (de waarde van de regel wordt bepaald door het resultaat van de evaluatie van zijn logische expressie). Regels 5, 7, 8, 9 en 10 zijn ASK-RULES, dat wil zeggen de waarde van de regel wordt bepaald door het antwoord van de gebruiker op de in de vorm van een vraag gestelde tekst-string van desbetreffende regel. Regel 6 is een BTEST-RULE. Na de term BTEST komt een booleaanse PASCAL expressie, die indien waar, de waarde TRue aan de regel toekent en indien niet waar de waarde False.

Regels 1, 3, 4, 7 en 9 bevatten zogenaamde THELSES. Door toepassing van THELSES kan een enkele evaluatie van een regel meerdere consequenties hebben. Een THELSE begint met THEN (de THELSE wordt uitgevoerd indien de evaluatie van de regel TRue oplevert), ELSE (de THELSE wordt uitgevoerd indien de evaluatie van de regel False oplevert) of IFPO (de THELSE wordt uitgevoerd indien de evaluatie van de regel POSSible oplevert).

Indien een THELSE gevolgd wordt door TR, FA of PO, wordt aan de daaropvolgende regel(s) respectievelijk de waarde TRue, FALSE of POSSible toegekend. Een THELSE gevolgd door DO voorziet in een koppeling met PASCAL. Wordt een THELSE gevolgd door GOAL, dan wordt de daaropvolgende regel (of meerdere regels) als doel nagestreefd. Hiermee is een vorm van 'forward chaining' te implementeren.

Voor een uitvoerige beschrijving van de verschillende soorten regels, de THELSES en andere kenmerken van SIMPLEXYS kan men terecht in Blom [1990].

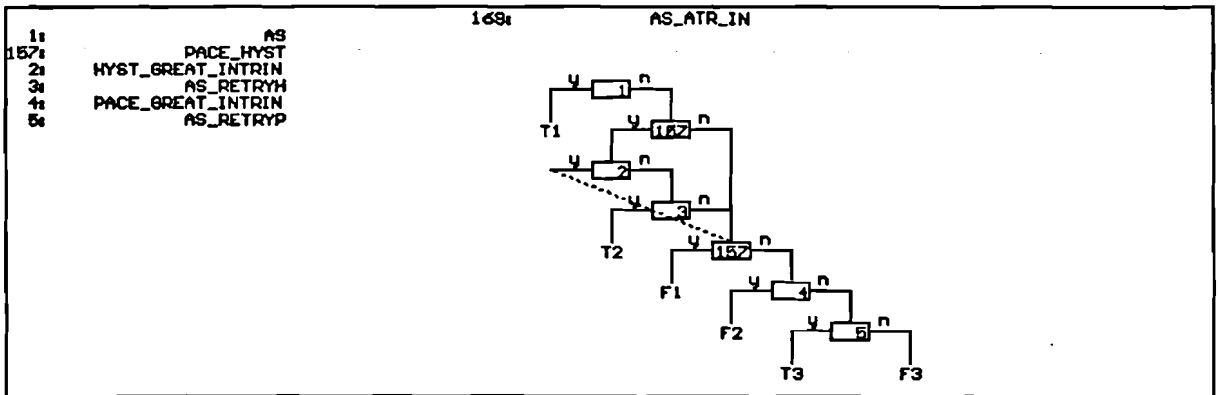
In figuur 6.2 en 6.3 zijn respectievelijk een AND/OR TREE en een DECISION TREE afgebeeld, die geconstrueerd zijn door GOODTREE aan de hand van de eerder vermelde regels na compilatie van de KB.



Figuur 6.2. Door GOODTREE geconstrueerde AND/OR TREE van de logische expressie van de regel: 'as\_atr\_in'.

De knooppunten in de AND/OR TREE van figuur 6.2 representeren dezelfde regels als de knooppunten in figuur 5.1. In figuur 6.2 zijn echter alleen de namen en nummers van desbetreffende regels weergegeven. De nummers komen overeen met de nummers van de regels in de gecompileerde KB.





Figuur 6.3. Door GOODTREE geconstrueerde DECISION TREE van de logische expressie van de regel: 'aS\_atr\_in'.

Linksboven in het figuur van de AND/OR TREE zijn behalve de regelnummers en namen ook de THELSES van de regels weergegeven met de regelnummers of verwijfsnummers (in geval van een stukje PASCAL-code) waar ze betrekking op hebben. Zo heeft de term 'edo' betrekking op ELSE DO. De nummers die hierop volgen (20008 en 20009), verwijzen naar stukjes PASCAL-code.

Door vergelijking van figuur 5.1 met figuur 6.2 is eenvoudig in te zien dat de eerder vermelde SIMPLEXYS-code een correcte implementatie is van de geformaliseerde kennis.

De rechthoekjes in de DECISION TREE van figuur 6.3 stellen regels voor. De nummers komen overeen met de nummers van de regels in de gecompileerde KB. Linksboven in het figuur zijn de bij de regelnummers behorende regelnamen weergegeven. THELSES worden niet weergegeven bij de DECISION TREE.

De letter 'y' aan de linkerkant van de rechthoekjes geeft de weg aan die ingeslagen moet worden, indien met 'Yes' wordt geantwoord op een vraag en/of de regel de waarde TRue krijgt. De letter 'n' aan de rechterkant van de rechthoekjes geeft de weg aan die ingeslagen moet worden, indien met 'No' wordt geantwoord op een vraag en/of de regel de waarde FALSE krijgt. Op deze manier is de DECISION TREE afhankelijk van de antwoorden en/of evaluaties eenvoudig te doorlopen. De eindpunten die voorafgegaan worden door de letter T, zijn eindpunten die resulteren in de waarde TRue van de EVAL-RULE waar het om gaat (hier: aS\_atr\_in). Eindpunten voorafgegaan door de letter F resulteren in de waarde FALSE van de EVAL-RULE.

Komt een regel meerdere keren voor in de logische expressie van een EVAL-RULE, dan wordt hij (om een implementatie-technische reden) even zo vaak weergegeven in de DECISION TREE. Het antwoord dat werd gegeven toen desbetreffende regel voor de eerste keer werd tegengekomen bij het doorlopen van de DECISION TREE, dient men consequent aan te houden om de evaluatie-volgorde van de EVAL-RULE correct te kunnen beoordelen. De stippellijn in het figuur representeert eenzelfde verbinding als de

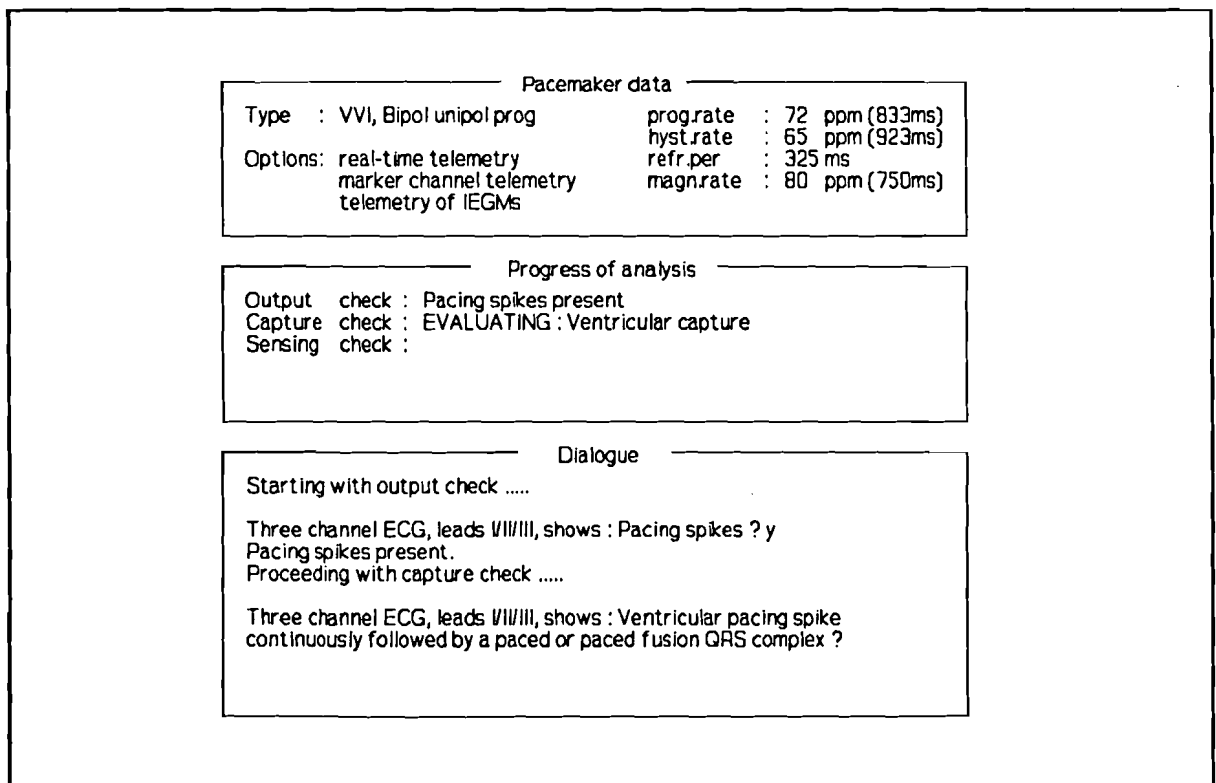
getrokken lijnen. De diagonale lijn is slechts gestippeld weergegeven om het overzicht in het figuur niet te verliezen.

Door het doorlopen van de DECISION TREE van figuur 6.3 is duidelijk geworden dat de evaluatie van de logische expressie van de EVAL-RULE (zoals geïmplementeerd) ook in de gewenste volgorde zal gaan verlopen.

## 6.4 De 'user-interface'

Bij de implementatie dient ook aandacht uit te gaan naar de constructie van een 'user-interface'. De 'user-interface' handelt de communicatie tussen gebruiker en expert-systeem af en kan de gebruiker controleren op gemaakte invoerfouten. Daarnaast kan hij het bedieningsgemak en de behulpzaamheid van het systeem vergroten.

De voor dit expertsysteem ontwikkelde 'user-interface' communiceert via het beeldscherm met de gebruiker, in het taalgebruik zoals dat ook in de literatuur van de domeinexpert gebezigd wordt. De beeldscherm-layout tijdens een consultatie van het expertsysteem is weergegeven in figuur 6.4.



Figuur 6.4. Beeldscherm-layout tijdens een consultatie van het expertsysteem.

Analoog aan veel andere expertsystemen, is gekozen voor een window-structuur. Deze biedt de gebruiker een duidelijk overzicht. Het bovenste window, het 'pacemaker

data' window, presenteert de eerder opgevraagde PM-gegevens. Het middelste window, het 'progress of analysis' window, bevat een soort continue 'WHY' faciliteit. Het laat zien met welk onderdeel van de controle het expertsysteem bezig is (output check, capture check of sensing check) en welke hypothese van desbetreffende controle op het moment geëvalueerd wordt. De weergave van de hypothese onder evaluatie geeft de gebruiker inzicht in het waarom van een in het 'dialogue' window gestelde vraag.

In het 'dialogue' window zelf vindt zoals de naam al suggereert het vraag- en antwoordspel tussen gebruiker en expertsysteem plaats. De antwoorden van de gebruiker worden door SIMPLEXYS getest op hun juistheid (in het algemeen zijn 'y', 'n' of '?' correcte/toegestane antwoorden).

Bij aanvang van een consultatie van het expertsysteem worden allereerst PM-gegevens opgevraagd bij de gebruiker. Het gaat hierbij om het type PM (bijvoorbeeld VVI), het soort systeem (bijvoorbeeld unipolair), geprogrammeerde stimulatie-frequenties, refractaire periode, magneetfrequentie en telemetrie en programmeerbare opties. De gebruiker wordt gecontroleerd op correcte invoer van de gegevens. Deze 'statische' PM-data wordt opgeslagen in een aparte variabele van het record-type (paceinfo genaamd). De PM-gegevens worden op een apart deel van het beeldscherm weergegeven. Hierna start de feitelijke consultatie.

Om de in het algemeen lange vragen aan de gebruiker te kunnen stellen was het noodzakelijk om de bij SIMPLEXYS toegestane tekst-string bij een regel, te verlengen van 80 karakters naar 160 karakters. Deze wijziging diende zowel in de 'rule-compiler' als in de 'inference engine' doorgevoerd te worden.

Om de continue 'WHY' faciliteit mogelijk te maken is een interrupt-routine geschreven, die aangeroepen wordt door een software-interrupt gegenereerd door de 'inference engine' van SIMPLEXYS. Deze software-interrupt is aan de functies 'ASKyn' en 'ASKval' van de 'inference engine' toegevoegd. Wordt een vraag aan de gebruiker gesteld, dan zal de interrupt-routine aangeroepen worden. Op dat moment gaat de routine op zoek naar de EVAL-RULE waar desbetreffende ASK-RULE direct onderdeel vanuit maakt. De tekst-string van de gevonden EVAL-RULE wordt vertoond aan de gebruiker (voorafgegaan door het woord: 'EVALUATING') als zijnde de hypothese onder evaluatie.

## 7 Test en evaluatie

Een test en evaluatie van het uiteindelijke systeem kan het beste plaatsvinden door het systeem een groot en representatief aantal probleemgevallen te laten oplossen. Op deze manier kan het systeem onder andere beoordeeld worden op consistentie en volledigheid van de kennis in de KB. Het systeem in de huidige vorm is echter nog niet compleet genoeg en waarschijnlijk ook nog niet functioneel genoeg, om een dergelijke omvangrijke test in deze fase reeds als erg zinvol te kunnen bestempelen.

Het testen van het systeem heeft tot hier aan toe voornamelijk bestaan uit het, in samenwerking met de expert, beoordelen en iteratief verfijnen van de diagrammen die de kennis representeerden. Het expertstelsel is ook zonder tussenkomst van de expert getest op een aantal van de probleemgevallen die vermeld zijn in diens proefschrift in het hoofdstuk over effectiviteit van stimulatie. Hierbij is voornamelijk gebruik gemaakt van de probleemgevallen die ook eenkamer PM's betroffen. Zover het mogelijk was, zijn ook problemen met tweekamer PM's beoordeeld (indien het aan eenkamer PM's overeenkomstige problemen betrof). De resultaten waren goed. Op basis van de afgebeelde ECG's, röntgenfoto's en commentaar in de tekst, kwam het expertstelsel met conclusies identiek aan de vermelde oorzaken. Alleen qua volgorde van het naar de oplossing toe leidende redeneringsproces, in vergelijking met dat van de expert, was het systeem vanwege de opzet van de literatuur niet te beoordelen.

Om de volgorde van het in het expertstelsel vastgelegde redeneringsproces ook in de praktijk te kunnen vergelijken met die van de expert, is besloten om het systeem te testen op een tweetal goed gedocumenteerde probleemgevallen. Deze zouden in het bijzijn van de expert door het systeem geanalyseerd en gediagnostiseerd worden, waarbij de expert de volgorde van de redenering van het systeem zou vergelijken met zijn eigen redenering.

De probleemgevallen waar het zich om handelde zijn beschreven door Cardio Holland B.V. in CARDIO-gram (probleemgeval II.2.1 en probleemgeval II.2.2). Beide betroffen een PM die 'continuous noncapture' vertoonde. In het eerste geval werd dit veroorzaakt door een 'interruption in the lead conductor' en in het tweede geval door 'local tissue reaction around electrode'. Beide gevallen werden goed herkend door het expertstelsel als zijnde 'continuous noncapture' probleemtoestanden. De uiteindelijke diagnose van het expertstelsel was ook in beide gevallen correct.

Tijdens de probleemoplossing van geval twee werd een vraag gesteld aan de gebruiker die niet terecht was. Het betrof hier de vraag: "ECG shows: Ventricular pacing spike is followed by a right bundle branch block (RBBB) pattern instead of a left bundle branch block (LBBB) pattern?"

Deze vraag impliceert geen 'noncapture', maar 'capture'. Indien dit patroon gezien zou worden is er namelijk sprake van 'capture' en niet van 'continuous noncapture'. Deze vraag had in het kader van de diagnose van 'continuous noncapture' dus helemaal niet gesteld mogen worden. Toch is het stellen van de vraag wel te verklaren. Het desbetref-

fende ECG-kenmerk hangt namelijk samen met een 'malposition of the stimulation electrode'. Deze kan op zijn beurt wel de oorzaak zijn van 'noncapture', alleen is dat in dit geval dan niet herkenbaar aan het desbetreffende ECG-kenmerk.

De door het expertsysteem gehanteerde volgorde in de probleemoplossing bleek niet altijd het redeneringsproces van de expert te volgen. Om de probleemruimte te verkleinen bleek de expert onder andere nog uit te gaan van een gegeven als de tijdsduur na PM-implantatie. Dit gegeven is wel verwerkt in de KB, maar niet expliciet op de manier om de zoekruimte te verkleinen. Deze wijziging dient dan ook alsnog aangebracht te worden. Daarnaast werd een vaststelling van al dan niet 'normal sensing' gebruikt om te kunnen concluderen of de desbetreffende lead in dit geval nog in het ventrikel aanwezig was. Hiermee is 'major dislocation' uit te sluiten en dus eveneens de zoekruimte te verkleinen. Beide zaken waren niet eerder expliciet naar voren gekomen tijdens de kenniselicitering.

De constatering dat een controle op 'normal sensing' gebruikt wordt tijdens het diagnoseproces, brengt met zich mee dat de taken die geïdentificeerd zijn toch minder op zichzelf staan dan aanvankelijk het geval leek te zijn. Het gebruik maken van een controle van de 'sensing' bij de diagnose bleek onbewust door de expert gehanteerd te worden.

Ondanks het feit dat het systeem nog niet altijd optimaal gebruik maakt van de zoekruimte-bepalende heuristieken van de expert, dat wil zeggen dat er nog een aantal belangrijke dieperliggende heuristieken ontbreken, waren de prestaties niet slecht. Het is echter nog te vroeg om hier vergaande conclusies aan te verbinden. Het systeem dient eerst gecompleteerd te worden. Hierbij is bijzondere aandacht benodigd voor de extra heuristieken die geïmplementeerd kunnen worden om tijdens de diagnostiek de zoekruimte te verkleinen.

In de huidige mate van functionaliteit en volledigheid is het systeem qua 'user-interface' alleen beoordeeld door de expert. De globale indruk die het systeem maakte, was dat van een 'mooi' systeem. Daarnaast werd de continue 'WHY' faciliteit als een handige en belangrijke uitlegmogelijkheid gezien. De expert was de mening toegedaan dat met dit systeem een basis is gelegd voor een 'mooi' systeem, dat de ECG-interpretator kan helpen, maar ook voor de expert nuttig kan zijn om zijn gedachten en redeneringsproces te evalueren. Daarnaast kan het de expert op het idee brengen om testen of controles te gebruiken die hij hoort te gebruiken, maar vanwege ervaring feitelijk nalaat.

## 8 Conclusies en aanbevelingen

Het in dit rapport beschreven onderzoek is gericht geweest op de ontwikkeling van een expertsysteem voor analyse en diagnose van het functioneren van geïmplanteerde eenkamer pacemakers.

Bij de kenniselicitering en -acquisitie is gebruik gemaakt van taakmodellen van de KADS methodologie. Deze taakmodellen omvatten een domeinonafhankelijke beschrijving van de kennis die nodig is om een klasse van overeenkomstige taken te realiseren. De identificatie van deze modellen met het probleemoplossende proces zoals de expert dat hanteert, heeft er toe geleid dat het kennisacquisitieproces meer gericht kon plaatsvinden. Tevens is hierdoor een beter inzicht in de expertkennis ontstaan en een duidelijke overzichtelijke 'knowledge base'. In geval van de diagnosetaken hebben ze ook een redenering op meerdere niveaus van abstractie mogelijk gemaakt.

Het is wel belangrijk om in de gaten te houden dat de expert niet teveel gestuurd wordt in zijn redenering, dat wil zeggen dat hij de in de taakmodellen aangegeven strategie overneemt, terwijl deze geen exacte afspiegeling is van de door hem gehanteerde strategie. Hierdoor kunnen waardevolle zoekruimte beperkende heuristieken over het hoofd gezien worden.

De tijdens dit onderzoek ontwikkelde 'tool' GOODTREE is een handig hulpmiddel gebleken bij de stap formalisatie-implementatie en de controle hierop.

Een na de implementatie door GOODTREE geconstrueerde AND/OR TREE biedt de mogelijkheid om eenvoudig te kunnen controleren of daadwerkelijk de geformaliseerde expertkennis geïmplementeerd is. Een door GOODTREE geconstrueerde DECISION TREE biedt de mogelijkheid om de gewenste volgorde van de evaluatie van de logische expressie van een regel te kunnen controleren.

SIMPLEXYS is een prettige 'expert system building tool' gebleken. Het omgaan met SIMPLEXYS is snel onder de knie te krijgen. Doordat regels de basisrepresentatie-eenheid zijn, is de resulterende 'knowledge base' goed leesbaar en was deze ook overzichtelijk in te delen. De verbinding met PASCAL via de zogenaamde THELSES biedt veel mogelijkheden. Zo kan de gebruiker hiermee bijvoorbeeld van extra toelichtende informatie worden voorzien.

Doordat 'goals' en 'protocols' gespecificeerd kunnen worden is het goed mogelijk gebleken om een globale strategie te implementeren. Dit in combinatie met de inferentiemechanismen 'forward chaining' en 'backward chaining' maken SIMPLEXYS tot een krachtig ontwikkelgereedschap.

Bij het testen van het systeem op een tweetal goed gedocumenteerde probleemgevallen, waarbij het gehanteerde redeneringsproces van het systeem werd vergeleken met dat

van de domeinexpert, kwam aan het licht dat het expertsysteem nog niet in alle situaties optimaal gebruik maakt van de zoekruimte-beperkende heuristieken van de expert. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat bij de elicitering en acquisitie van de kennis teveel aandacht is gericht op de taakmodellen en er daardoor te veel sturing van het 'knowledge acquisition'-proces heeft plaatsgevonden.

Tijdens het testen bleek de ontwikkelde 'user-interface' door de gekozen window-structuur een duidelijk overzicht te bieden. De aanwezigheid van de continue 'WHY' faciliteit werd door de expert als een handige en belangrijke uitlegmogelijkheid gezien, die een duidelijk inzicht gaf over het waarom van de tijdens de consultatie gestelde vragen.

Aangezien het systeem in de huidige mate van volledigheid en functionaliteit nog niet alle analyserende en diagnostiserende taken in zich herbergt, verdient het aanbeveling het systeem in dit opzicht allereerst te completeren.

Daarna kan door grootschaliger testen, in aanwezigheid van de domeinexpert, meer aandacht besteed worden aan de elicitering van dieperliggende expertkennis. Hierbij moet gedacht worden aan de kennis die de expert met name tijdens diagnostetaken hanteert om te bepalen welke oorzaken in bepaalde gevallen aannemelijker zijn dan andere. Deze kennis bepaalt de volgorde waarin de diverse hypothesen onderzocht worden. Doordat de expert deze kennis onbewust hanteerde, zoals bleek naar aanleiding van het testen, is deze kennis nog niet geïmplementeerd.

In de toekomst zou meer aandacht besteed kunnen worden aan de morfologie van de ECG-complexen, zodat in het geval dat een goed functioneren van de pacemaker geconstateerd wordt, de gebruiker toch gewezen kan worden op een eventuele dislocatie van de stimulatie-elektrode.

Naast het aandragen van de oorzaak van een probleem kan het systeem ook zodanig ontworpen worden dat het mogelijke corrigerende acties adviseert.

Er zou ook nog nuttiger gebruik gemaakt kunnen worden van de driewaardige logica van SIMPLEXYS. Dit biedt onder andere de mogelijkheid om het systeem dat een dialoog aangaat met de gebruiker niet alleen tijdens de 'follow-up' te gebruiken, maar ook als een op zichzelf staand systeem. Zo zou een cardioloog vanachter zijn bureau, tijdens een consultatie van het expertsysteem, met het antwoord '?' door kunnen geven dat hij gewoonweg niet over bepaalde gegevens beschikt, waarna de consultatie met de wel beschikbare gegevens gewoon voortgezet kan worden.



Cartoon van Stefan Verwey.  
In: Jacobs en Verwey [1986]. © 1986 Stefan Verwey.



## Literatuurlijst

Bernstein AD, Camm AJ, Fletcher RD, Gold RD, Rickards AF, Smyth NPD, Spielman SR, Sutton R.

THE NASPE/BPEG GENERIC PACEMAKER CODE FOR ANTIBRADYARRHYTHMIA AND ADAPTIVE-RATE PACING AND ANTITACHYARRHYTHMIA DEVICES.

Pace, Vol. 10(1987) Part I, p. 794-799.

Blom, JA.

THE SIMPLEXYS EXPERIMENT. REAL TIME EXPERT SYSTEMS IN PATIENT MONITORING.

PhD thesis, Eindhoven University of Technology, 1990.

Bos A van den, Mijnders N, Jong M de, Jong R de, Lindsen F.

DE PACEMAKER. VAN TECHNIEK NAAR ZORG. DERDE DRUK.

Eindhoven: Medtronic, 1990.

Boutkan J.

ABC VAN HET ECG. INLEIDING TOT DE ELECTROCARDIOGRAFIE.

Gorinchem: J. Noorduijn en Zoon, 1969.

Breuker J, Wielinga B.

ANALYSE VAN EXPERTISE VOOR EXPERTSYSTEMEN.

In: Nijholt en Steels [1986], p. 5.1-5.28.

Dassen WRM, Dulk K den, Wellens HJJ.

MODERN PACEMAKERS: IMPLANTABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE?

Pace, Vol. 11(1988) Part II, p. 2114-2120.

Dinicola D.

MEDTRONIC'S GUIDE TO ECG INTERPRETATION.

Minneapolis: Medtronic, 1987.

Gelder LM van.

THE ECG IN THE DIAGNOSIS OF PACEMAKER FUNCTION AND MALFUNCTION.

Preliminary PhD thesis, Eindhoven University of Technology.

Greenhut SE.

COMPUTER MODELLING AND INTERPRETATION OF PACED

ELECTROCARDIOGRAMS FOR ANALYSIS OF PACEMAKER FUNCTION.

PhD thesis, University of Michigan, 1991.

Greenhut SE, Jenkins JM.

USE OF COMPUTER SIMULATION IN THE DEVELOPMENT OF AN ALGORITHM FOR ANALYSIS OF PACED ELECTROCARDIOGRAMS.

In: Proc. Computers in Cardiology, Chicago, ILL., USA, 23-26 Sept. 1990.

Los Alamitos, CA, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1991.

P. 369-372.

Greenhut SE, Jenkins JM, DiCarlo LA.

COMPUTERIZED INTERPRETATION OF THE PACED ECG.

Journal of Electrocardiology, Vol. 24(1992) Supplement,

p. 146-152.

Jackson P.

INTRODUCTION TO EXPERT SYSTEMS. SECOND EDITION.

Wokingham: Addison-Wesley, 1990.

Malik M, Camm AJ.

DIAGNOSIS OF PACED ELECTROCARDIOGRAMS BY INVERSE COMPUTER MODELING OF PACEMAKER ACTIONS.

Pace, Vol. 11(1988) Part II, p. 2093-2100.

Nijholt A, Steels L.

ONTWIKKELINGEN IN EXPERTSYTEMEN.

Den Haag: Academic Service, 1986.

Olson WH, McConnell MV, Sah RL, Hong PI.

EXPERT SYSTEM AND DIAGRAM FOR TROUBLESHOOTING DUAL CHAMBER PACEMAKERS.

In: Proc. Computers in Cardiology, Linkoping, Sweden, 8-11 Sept. 1985.

Washington, DC, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1985.

P. 73-78.

Phillips RE, Feeney MK.

THE CARDIAC RHYTHMS. A SYSTEMATIC APPROACH TO INTERPRETATION.

Philadelphia: W.B. Saunders, 1973.

Ruiter JH.

CLINICAL ASPECTS OF CARDIAC PACING FOR BRADYARRHYTHMIAS.

PhD thesis, Erasmus University Rotterdam, 1992.

Sasmor L, Smith ED, Tarjan PP.

THE USE OF RULE-LIKE MODELS FOR EVALUATING IMPLANTED PACEMAKER EVENTS.

In: Proc. Computers in Cardiology, Boston, MA, USA, 7-10 Oct. 1986.  
Washington, DC, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1987. P. 287-290.

Smith ED.

EXPERT SYSTEMS FOR IMPLANTED PACEMAKER ANALYSIS.

Journal of Electrocardiology, Vol. 20(1987) Supplement,  
p. 26-28.

Smith ED, Sasmor L, Tarjan PP.

THE ROLE OF EXPERT SYSTEM TECHNOLOGY IN THE EVALUATION OF IMPLANTED PACEMAKERS.

In: Proc. Computers in Cardiology, Boston, MA, USA, 7-10 Oct. 1986.  
Washington, DC, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1987.  
P. 291-294.

Swaan Arons H de, Lith P van.

EXPERT SYSTEMEN.

Den Haag: Academic Service, 1984.

Tansley DSW, Hayball CC.

KNOWLEDGE-BASED SYSTEMS ANALYSIS AND DESIGN. A KADS DEVELOPER'S HANDBOOK.

New York: Prentice Hall, 1993.

Weston Moses H, Schneider JA, Miller BD, Taylor GJ.

A PRACTICAL GUIDE TO CARDIAC PACING. THIRD EDITION.

Boston: Little, Brown, 1991.

## Aanbevolen literatuur

Baars C, Braspenning P, Spek R van der.

KENNISSYSTEMEN. TOEPASSINGEN VAN KUNSTMATIGE INTELLIGENTIE.

Utrecht: Stichting Teleac, 1991.

Connell JL, Shafer L.

STRUCTURED RAPID PROTOTYPING. AN EVOLUTIONARY APPROACH TO SOFTWARE DEVELOPMENT.

Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.

Haan HRM de, Dekker WAL.

GROOT WOORDENBOEK DER GENEESKUNDE. IV DELEN.

Nijmegen: G.J. Thieme, 1956/57.

Jacobs J, Verwey S.

DE KENNISMACHINE. KUNSTMATIGE INTELLIGENTIE EN GEZOND VERSTAND.

Utrecht: Veen, 1986.

Jongkees LBW van, Vandenbroucke J, Eyskens E.

CODEX MEDICUS.

Amsterdam: Elsevier, 1985.

McGraw KL, Harbinson-Briggs K.

KNOWLEDGE ACQUISITION: PRINCIPLES AND GUIDELINES.

Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989.

Mechelen R van.

SINGLE AND DUAL CHAMBER PACING IN PATIENTS WITH CONDUCTION DISORDERS.

PhD thesis, University of Limburg, 1986.

METINGEN IN DE GENEESKUNDE I.

Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1991.

Dictaatnr. 5006

Schaldach M, Furman S, Hein F, Thull R.

ADVANCES IN PACEMAKER TECHNOLOGY.

Berlin: Springer-Verlag, 1975.

Tortora GJ, Anagnostakos NP.

PRINCIPLES OF ANATOMY AND PHYSIOLOGY. THIRD EDITION.

New York: Harper & Row, 1981.

Vries AA de.

TOEPASBAARHEID EN UITBREIDINGEN VAN HET REAL-TIME EXPERTSYSTEEM  
SIMPLEXYS.

Afstudeerverslag, Technische Universiteit Eindhoven, 1993.