

Erklärungsfähigkeit kooperierender regelbasierter Expertensysteme zum diagnostischen Problemlösen

vorgelegt von
Diplom-Informatiker
Stefan Wollny
aus Berlin

Von der Fakultät IV – Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss :

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dieter Filbert
Berichter: Prof. Dr.-Ing. Erhard Konrad
Berichter: Prof. Dr.sc.nat. Fritz Wysotzki

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 16.7.2003

Berlin 2003

D83

Vorwort

In meinem Studium an der Technischen Universität Berlin lernte ich bei Prof. Konrad die Künstliche Intelligenz und insbesondere Expertensysteme kennen. Dies wurde zu meinem Studienschwerpunkt, zum Thema meiner Diplomarbeit und zum Thema der Lehre und Forschung im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Ich bin froh, dass ich dann auch die Gelegenheit bekommen habe, die vorliegende Arbeit in diesem Gebiet unter Berücksichtigung neuerer Fragestellungen und Möglichkeiten aber auch bewährter Erkenntnisse zu schreiben. Denn beim Durcharbeiten aktueller Artikel stellte ich teilweise fest, dass etablierte Erkenntnisse aus dem Bereich der Expertensysteme ignoriert wurden und die Qualität mancher neuerer Arbeiten daher unter die älterer zurückfällt.

Ich danke Prof. Konrad, der mir trotz der hohen Lehrbelastung des Fachgebietes Wissensbasierte Systeme nicht nur den nötigen Freiraum für die Erstellung einer Dissertation ließ, sondern diese durch die vorbildliche Betreuung erst ermöglichte. Flankiert wurde diese von unzähligen Ratschlägen und Hilfen von Frau Dr. Reiner vor allem in den ersten Jahren meiner Tätigkeit an der TU, wofür ich Ihr ebenfalls herzlich danken möchte.

Herrn Prof. Wysotzki gebührt mein Dank dafür, dass er die Aufgabe eines zweiten Betreuers übernommen hat und durch zahlreiche Vorschläge die Arbeit verbesserte.

Schließlich möchte ich meiner Frau Agnes Wollny danken, die mich neben der liebevollen Unterstützung als Ehefrau auch als Ärztin inhaltlich bei den medizinischen Beispielen beriet. Ganz zum Schluss möchte ich meinem Sohn Christian Frederik danken; dafür dass er da ist.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die Frage der Erklärung der Gesamtlösung eines durch Kooperation von Expertensystemen gelösten Problems untersucht. Es wird eine Einführung in Expertensysteme und Verteiltes Problemlösen gegeben und Lösungsfindung und Erklärung werden mit Hilfe der Prädikatenlogik der 1. Stufe formalisiert. Die existierenden Definitionen von Erklärungen innerhalb der Prädikatenlogik werden in Hinblick auf kooperatives Problemlösen erweitert. Dabei wird eine klar definierte Struktur, der sog. *Erklärungskommentar*, angegeben, in dem alle zur Erklärung nötigen Informationen zusammengefasst werden. Wird das Verteilte Problemlösen dahingehend erweitert, dass neben den Teillösungen dazugehörige Erklärungskommentare übergeben werden, sollen Systeme in die Lage versetzt werden, dem Benutzer Gesamtlösungen erklären zu können. Im Anschluss an den theoretischen Aufbau eines medizinischen Diagnosesystems, wird eine praktische Umsetzung dargestellt, in der drei Systeme prototypisch in Prolog implementiert und anschließend in ein Multiagentensystem integriert worden sind. Abschließend werden Grenzen und Erweiterungsmöglichkeiten des vorgestellten Ansatzes diskutiert und es erfolgt eine Bewertung unter Einbeziehung der in der Literatur für Erklärungen erhobenen Forderungen.

Abstract

This work examines the problem of explaining the solution found by cooperating expert systems. An introduction to expert systems and distributed problem solving is given. Finding the solution and the explanation is formalized using first order logic, and existing definitions of explanations in the field of logic are extended to meet the requirements of cooperative problem solving. A clearly defined structure called *Erklärungskommentar* (*explanation-comment*) is presented that capsulates all the information that is necessary for explanation. If distributed problem solving is enriched by submitting a *Erklärungskommentar* for each partial solution the system that interacts with the user should be able to give an explanation for the whole solution. Following the theoretical thoughts, a practical realization is presented, that incorporates three systems prototypically implemented in Prolog and integrated in a multiagent-system. The work finishes by discussing the boundaries and potential extensions of the presented ideas and by giving a valuation using known expectations in standard literature.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Grundlagen	8
2.1. Einführung in Expertensysteme	8
2.1.1. Systemarchitektur und -komponenten	9
2.1.2. Erfolge konventioneller Expertensysteme	11
2.1.3. Grenzen konventioneller Expertensysteme	12
2.2. Verteilte Künstliche Intelligenz	14
2.2.1. Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz	14
2.2.2. Potentielle Vorteile kooperierender Expertensysteme	21
2.2.3. Konfliktlösung bei sich widersprechenden Teillösungen	23
2.2.4. Kompetenzproblem	25
2.3. Prädikatenlogik der 1. Stufe	28
2.3.1. Sprache der Prädikatenlogik	28
2.3.2. Resolutionskalkül	30
2.3.3. Zusammenhang zwischen Prädikatenlogik und Prolog	35
3. Erklärungsfähigkeit	37
3.1. Einführung in Erklärungen	37
3.1.1. Erklärungen innerhalb der Prädikatenlogik der ersten Stufe	37
3.1.2. Erklärungsfähigkeit konventioneller Expertensysteme	39
3.2. Ansätze für die Erklärung einer kooperativ gefundenen Gesamtlösung	48
3.2.1. Erklärung durch das für die jeweilige Teillösung zuständige System	49
3.2.2. Einführung eines speziellen „intelligenten Erklärungsagenten“	49
3.2.3. Verbindung von Teillösung und Erklärung auf allen Hierarchiestufen des kooperativen Problemlösens	50
3.3. Erklärungskommentare als Ansatz zur Erklärung kooperativen Problemlösens	52
3.3.1. Herleitung der Definition der Erklärungskommentare	53
3.3.2. Synthese der Gesamterklärung aus übergebenen Erklärungskommentaren	55
4. Entwicklung eines Demonstrationsprototypen	58
4.1. Vorgehensweise und Zielsetzung	58
4.2. Identifikationsphase	59
4.3. Konzeptualisierungsphase	61
4.4. Formalisierungsphase	65
4.4.1. Herleitung der Lösung	65
4.4.2. Erklärung der Lösung durch Erklärungskommentare	74
4.5. Implementierungsphase	85
4.5.1. Hard- und Softwareumgebung	85
4.5.1.1. Überblick	85
4.5.1.2. Das Multiagensystem-Framework OAA	86
4.5.2. Expertenerklärungen und Erklärungskommentare in Prolog	88
4.5.3. Aufbau der Regelbasen	91
4.5.4. Fähigkeit zur Generierung von Erklärungskommentaren	93
4.5.4.1. Erklärungskommentare erstellen und übergeben	93
4.5.4.2. Synthese der Gesamterklärung	94
4.5.5. Visualisierung von Erklärungskommentaren in der Implementierung	94
4.5.5.1. Textuelle Ausgabe des Erklärungskommentares	94

4.5.5.2. Verbesserung der Lesbarkeit der Erklärung durch textuelle Substitutionen.....	95
4.5.6. Systemoberflächen.....	97
4.5.7. Kooperation der Systeme innerhalb des Multiagentensystems OAA	99
4.6. Testphase.....	99
5. Bewertung	111
6. Ausblick und Erweiterungsmöglichkeiten	114
7. Literatur	119

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eigenschaften von Expertensystemen [Waterman 86]	8
Abbildung 2: Komponenten eines Expertensystems nach [Konrad 90]	9
Abbildung 3: 5-Stufen-Modell nach Dreyfus	13
Abbildung 4: 8 Dimensionen der Verteilten Künstlichen Intelligenz [v.Martial 92]	15
Abbildung 5: Aufbau eines Knoten in einer Vertragsnetz-Architektur aus [Davis 80]	17
Abbildung 6: Föderatives Expertensystem FRESCO [Kirn & Schlageter 91a]	17
Abbildung 7: Daten- und Kontrollfluß in einem Multiagentensystem mit einer „Supervisoreinheit“ [Klett 89].....	19
Abbildung 8: Blackboard Basisarchitektur	19
Abbildung 9: Abstrakte Architektur von HECODES [Zhang & Bell 91].....	20
Abbildung 10: Computersystemebenen nach [Newell 82]	25
Abbildung 11: Nutzung der Wissensebene [Newell 82]	26
Abbildung 12: Herleitung der leeren Klausel aus einer unerfüllbaren Menge	33
Abbildung 13: Folgerung in der Prädikatenlogik der ersten Stufe	34
Abbildung 14: Typische Fragen an eine Erklärungskomponente	40
Abbildung 15: Lisp-Regel und pseudoenglische Übersetzung in MYCIN.....	41
Abbildung 16: Erklärungen aus MYCIN	42
Abbildung 17: System XPLAIN [Swartout 83]	44
Abbildung 18: Ausschnitt einer mit XPLAIN generierten Erklärung aus [Swartout 83]	45
Abbildung 19: Erklärung der Schlussfolgerungen in Abhängigkeit der Expertise des Benutzers in MYCIN	47
Abbildung 20: Direkte Regeln für die Verbesserung des Benutzermodells aus [Cawsey 93].....	48
Abbildung 21: Einführung eines speziellen Erklärungsagenten	50
Abbildung 22: Erklärungen für alle Teillösungen im Verteilten Problemlösen	51
Abbildung 23: Ablehnung einer delegierten Teillösung.....	52
Abbildung 24: Entwicklungsphasen bei der Expertensystementwicklung aus [Waterman 86]... 58	
Abbildung 25: Expertensystemverbund zur Diagnose akuten abdominalen Schmerzes	60
Abbildung 26: Rechnerverbund für die Prototypentwicklung	61
Abbildung 27: Teilmengen des Individuenbereiches.....	65
Abbildung 28: Herleitung eines Verdachtes aus $F_{\text{Abdanam}} \cup F_{\text{Befunde}}$	68
Abbildung 29: Herleitung des Verdachtes Verdacht(Gallenkolik)aus $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$	69
Abbildung 30: Herleitung von auszuschliessenden Diagnosen aus $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$	69
Abbildung 31: Herleitung der auszuschl. Diagnose \neg Diagnose(Pankreatitis) aus $F_{\text{AbdSon}} \cup F_{\text{Sono}}$	70
Abbildung 32: Prototypischer Expertensystemverbund.....	86
Abbildung 33: Facilitator und Agenten im OAA-System.....	87

Abbildung 34: Implementierung in SWI-Prolog (von OAA nicht unterstützter Sprache)	88
Abbildung 35: An eine Variable gebundener Erklärungskommentar, mit e/2 erstellt.....	91
Abbildung 36: Visualisierung eines Erklärungskommentares	95
Abbildung 37: Visualisierung eines Erklärungskommentares einschl. textueller Substitution ...	96
Abbildung 38: Ausschnitt der Oberfläche des Systems AbdAnam	97
Abbildung 39: Ausschnitt der Oberfläche des Systems Abdlab	98
Abbildung 40: Ausschnitt der Oberfläche des Systems AbdSon.....	98
Abbildung 41: Sicht auf die Agentengemeinschaft durch die Visualisierung des Agenten „oaa_monitor“	99
Abbildung 42: Ausgabe gefundener Diagnosen, Verdachte und auszuschließender Diagnosen	100
Abbildung 43: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (1. Abschnitt).....	101
Abbildung 44: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (2. Abschnitt).....	101
Abbildung 45: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (3. Abschnitt).....	102
Abbildung 46: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (4. Abschnitt).....	102
Abbildung 47: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (5. Abschnitt).....	103
Abbildung 48: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (6. Abschnitt).....	103
Abbildung 49: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (7. Abschnitt).....	104
Abbildung 50: Erklärung des Verdachtes auf Nierenkolik	104

1. Einleitung

Seit Ende der 60er Jahre existieren Expertensysteme, d.h. Computerprogramme, die Problemlösungsfähigkeiten in einem bestimmten, im allgemeinen eng begrenzten Bereich haben, die ähnlich denen eines menschlichen Experten, z.B. eines promovierten Arztes oder anderen für einen bestimmten Bereich hochgradig qualifizierten Experten sind. Frühe Erfolge lösten unangemessen hohe Erwartungen an die Leistungsfähigkeit und Einsatzmöglichkeiten von Expertensystemen, sowie übertriebene Ängste in Bezug auf die potentielle Verdrängung menschlicher Fachleute bzw. Arbeitsplätze aus. Die Frage, ob es sich bei der Expertensystemtechnologie um einen zukunftsweisenden Ansatz handelt, dessen weitverbreitete Anwendung und allgemeine Akzeptanz noch bevorsteht, so wie es der als Begründer der Expertensystemtechnologie geltende Edward A. Feigenbaum darstellt [Feigenbaum 93], oder ob es sich um eine Technologie handelt, die sich nur in bestimmten Anwendungsgebieten bewähren kann, ist noch offen. Einige Autoren in der Fachliteratur sehen einen möglichen nächsten Schritt im Einsatz mehrerer Expertensysteme zur kooperativen Lösung eines Problems. Es werden seit den 80er Jahren zunehmend Fachartikel und Projektberichte dazu veröffentlicht. Diese Ansätze werden in der Literatur uneinheitlich als „*verteilte Expertensysteme (distributed expert systems)*“ [Zhang & Zhang 91], „*föderative Expertensysteme (federative expert systems)*“ [Kirm 90], „*kooperierende Expertenagenten (cooperating expert agents)*“ [Lander et al. 90], „*Multiexpertensysteme (multi-expert systems)*“ [Levine et al. 85] oder auch „*Expertensysteme der zweiten Generation¹ (second generation expert systems)*“ [Wooldridge et al. 91] bezeichnet. Ausgehend vom Vorbild des menschlichen Experten bei konventionellen Expertensystemen, wird bei diesen kooperierenden Systemen auf das Vorbild einer Expertenkommission oder -runde verwiesen und herausgestellt, dass in der menschlichen Gesellschaft viele Aufgaben nur durch Zusammenarbeit mehrerer Experten lösbar sind (es wäre z.B. keinem einzelnen Menschen möglich, ein Hochhaus zu bauen; dies ist nur durch eine Zusammenarbeit vieler Experten möglich: Architekt, Statiker, Bauingenieure usw.). Der Einsatz mehrerer Expertensysteme zur gemeinsamen Lösung eines Problems kann dabei sowohl durch die Kopplung bestehender Systeme, als auch durch eine Neuentwicklung einzelner Systeme, die dann zu einer Gesamtarchitektur verbunden werden, erfolgen. Es ist auch eine Kombination von beidem möglich, d.h. es werden existierende Systeme verwendet und neue dazu entwickelt. Für die Organisationsstruktur des Gesamtsystems sind ebenfalls viele verschiedene Formen möglich: von einer strengen Hierarchie, in der ein übergeordnetes System kleinere Teilaufgaben delegiert oder Wissen anfordert, über Mischformen bis hin zu einem Netz gleichberechtigter Systeme, die über bestimmte Mechanismen, z.B. über „Verhandlungen“, gemeinsam eine Entscheidung finden. Als Vorteil erhofft man sich vom kooperativen Einsatz von Expertensystemen vor allem eine Erweiterung Ihrer Einsetzbarkeit, bessere Wiederverwendbarkeit und erhöhte Zuverlässigkeit. Für zukünftige Anwendungen kooperierender Expertensysteme sprechen vor allem die technischen Entwicklungen (die Voraussetzung der physikalischen Vernetzung ist vielfach durch das Internet gegeben, Hardware ist billig verfügbar), der Wunsch nach Wiederverwendung / Einbettung bestehender Systeme und eine wachsende Nachfrage wissensbasierter Systeme zur Kostenreduktion bei Firmen oder Behörden. Zu den Nachteilen, die der kooperative Einsatz der

¹ Der Begriff „Expertensysteme der zweiten Generation“ wird in der Literatur sehr unterschiedlich für neue Ansätze in der Expertensystemtechnologie verwendet, z.B. auch für die Entwicklung von Systemen aus wiederverwendbaren Bausteinen. Die gemeinsame Aussage liegt in einem erweiterten bzw. veränderten Entwicklungsansatz im Vergleich zu klassischen Expertensystemen wie z.B. MYCIN[Buchanan & Shortliffe 84] .

Systeme mit sich bringt, gehört neben dem erhöhten Aufwand für Entwicklung und Wartung auch eine Erschwerung der Erklärung der Gesamtlösung, da diese nicht mehr „in einer Hand“ liegt. Die Erklärung der Gesamtlösung ist dabei aber ein noch offenes Problem, welches entscheidenden Einfluss auf die Akzeptanz solcher Ansätze hat.

Selbst wenn alle an einem kooperativen Lösungsprozess beteiligten Systeme über eine Erklärungskomponente verfügen, die in der Lage ist, die gefundene (Teil-)Lösung zu erklären - und auch hier gibt es noch ungelöste Probleme - existiert trotzdem keine Instanz, die in der Lage ist, die Gesamtlösung zu erklären.

In vielen bisher in der neueren Literatur vorgestellten Ansätzen über kooperierende Expertensysteme wird die Erklärung der gefundenen Lösung nicht vorgesehen. Dies liegt zum einen daran, dass im Bereich der Synthese der Lösung noch viele offene Fragen bestehen, die zur Zeit untersucht werden (s. z.B. [Zhang & Zhang 99]) und offensichtlich als bedeutender als die Erklärungssynthese eingeschätzt werden.

Zum anderen konzentrieren sich viele Arbeiten eher auf die technische Seite der Kooperation, d.h. den Datenaustausch verschiedener Systeme über Intra-/Internet mittels gegenwärtig intensiv untersuchter Techniken/Standards wie z.B. XML oder CORBA (s. z.B. [Flor et al. 95]).

Andere Systeme haben zwar eine Erklärungsmöglichkeit der kooperativ gefundenen Lösung (z.B. [da Silva & Dawson 97]); diese ist aber nur für diesen speziellen Fall entwickelt worden und kann nicht ohne weiteres als Vorbild bei der Entwicklung anderer Systeme betrachtet werden.

Diesem bisher ungelösten Problem versucht sich die vorliegende Arbeit zu nähern, indem untersucht wird, welche Informationen für eine adäquate Erklärung einer Lösung nötig sind und wie diese zusammengefasst werden können. Grundidee dieser Arbeit ist, dass diese Informationen zusammen mit den Teillösungen im Verteilten Problemlösen übergeben werden können und dass analog zur Synthese der Gesamtlösung auch eine Synthese der Gesamterklärung möglich ist. Diese Idee wird theoretisch präzisiert, indem ein Testszenario entwickelt wird, welches in einer prototypischen Implementierung eines über das Internet verbundenen Multiagentensystems realisiert wird.

Die Arbeit ist dabei folgendermaßen gegliedert: Im ersten Teil erfolgt eine Einführung in die relevanten theoretischen Grundlagen der Expertensysteme, des Verteilten Problemlösens und der Prädikatenlogik der 1. Stufe (Kapitel 2). Der Stand der Technik in Bezug auf Erklärungen wird dargestellt und ein neuer Ansatz für die Generierung der Erklärung präsentiert (Kap. 3). Im zweiten Teil der Arbeit wird ein verteiltes medizinisches Diagnosesystems prototypisch entwickelt, in dem der theoretisch konzipierte Erklärungsansatz praktisch umgesetzt wird (Kap. 4). Diese Umsetzung wird bewertet und ein Ausblick auf Verbesserungsmöglichkeiten gegeben (Kap. 5 und Kap. 6).

2. Grundlagen

2.1. Einführung in Expertensysteme

Einen Überblick über Expertensysteme geben z.B. [Feigenbaum 93], [Konrad 90], [Puppe 91], [Waterman 86]. Expertensysteme werden meistens über den Vergleich mit einem menschlichen Experten definiert.

„Expertensysteme sind Programme, die mit so viel Wissen und Fähigkeiten ausgestattet sind, dass sie auf der Stufe eines Experten tätig werden können.“

Feigenbaum, 1983

Neben der Fähigkeit, ein Problem lösen zu können, ist zusätzlich die Fähigkeit, diese Lösung vollständig erklären zu können, für Expertensysteme essentiell². Dies ist eine der Charakteristiken, die Expertensysteme von anderen Softwaresystemen unterscheidet.

Charakteristiken, die ein Expertensystem von konventionellen Programmen unterscheiden:

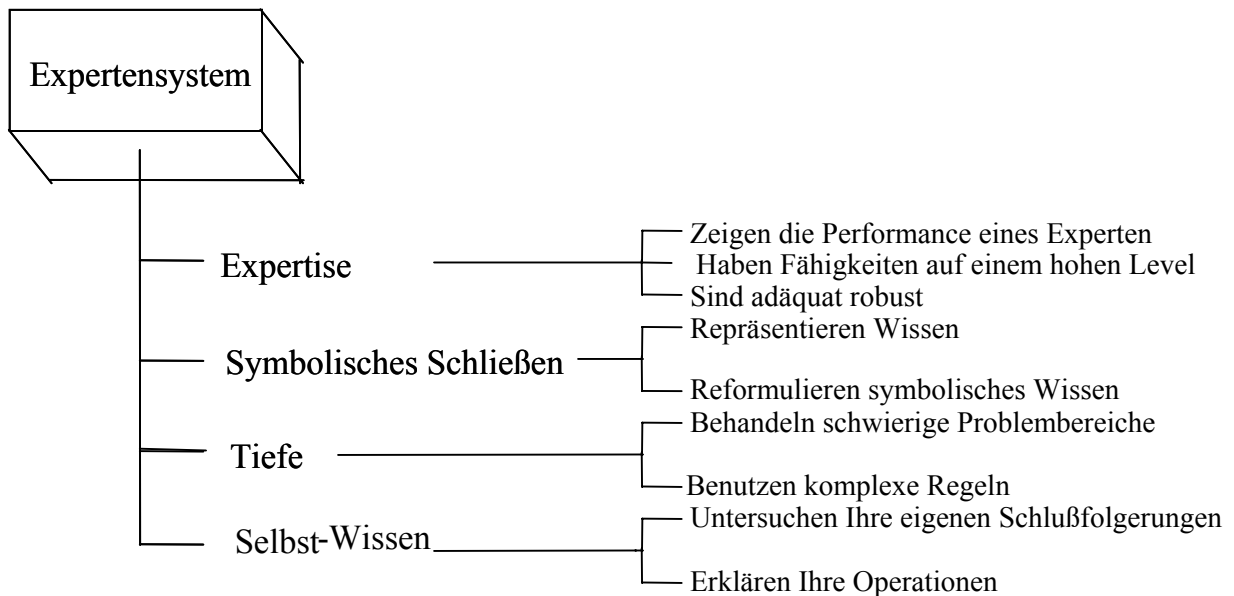


Abbildung 1: Eigenschaften von Expertensystemen [Waterman 86]

Typisch für die Expertensystemtechnologie ist weiterhin der Umgang mit vagem Wissen sowie das Schließen unter Unsicherheit bzw. unvollständiger Information, da es um den Einsatz in realen Anwendungsgebieten geht.

² Dies ist eine Anforderung, die in der Literatur bei neueren Ansätzen kooperierender Expertensysteme oft ignoriert wird. Daher wird in der vorliegenden Arbeit versucht, zur Lösung dieses Problems beizutragen.

Der Ansatz bei der Lösungsfindung in verschiedenen Expertensystemen kann sehr unterschiedlich sein. Drei große Klassen von Expertensystemen sind

- heuristische regelbasierte Systeme, die die Schlussweise eines menschlichen Experten an Hand von Fakten und Regeln simulieren,
- fallbasierte Systeme, in denen versucht wird, ein Problem durch Adaption der Lösung eines ähnlichen gespeicherten Falles zu lösen und
- modellbasierte Systeme, bei denen ausgehend von einem Modell (z.B. eines technischen Gerätes) die Lösung eines Problems, in diesem Kontext meistens die Bestimmung eines technischen Defektes, hergeleitet werden soll.

Einführungen und Bewertungen des Standes der Technik in diesen Teildisziplinen und Prognosen für die künftigen Weiterentwicklungen wurden auf der fünften deutschen Konferenz über Wissensbasierte Systeme XPS-99 gegeben [Puppe 99].

2.1.1. Systemarchitektur und -komponenten

Trotz unterschiedlicher Ansätze zur Lösungsfindung lassen sich folgende Komponenten bei Expertensystemen identifizieren:

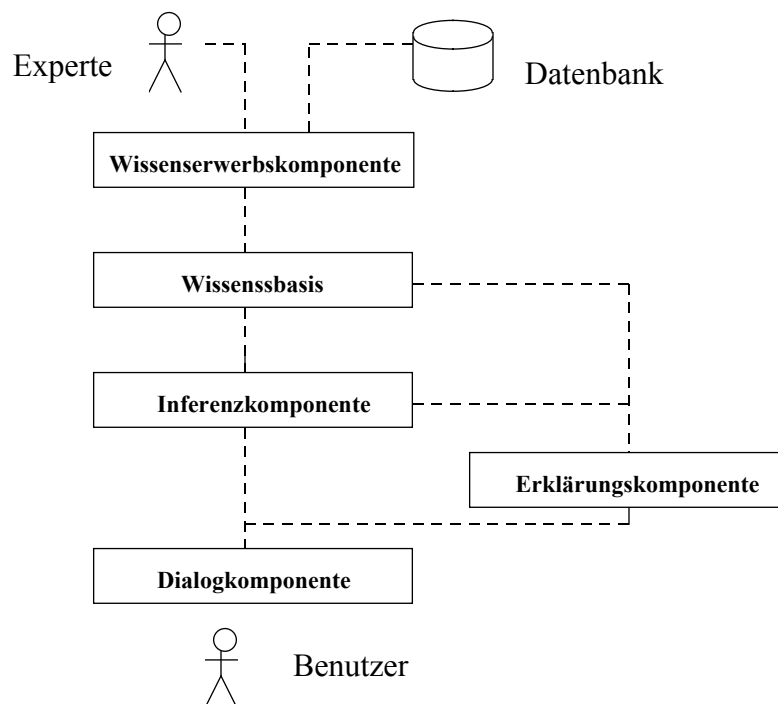


Abbildung 2: Komponenten eines Expertensystems nach [Konrad 90]

Die **Wissenserwerbskomponente** (knowledge acquisition component) soll den Transfer des Wissens des menschlichen Experten, u.U. auch aus Datenbanken oder direkt von Messgeräten, in die Wissensbasis möglichst weitgehend unterstützen. Sie sollte auch den Wissenserwerb durch mehrere Experten unterstützen, d.h. z.B. Möglichkeiten der Überprüfung der Konsistenz der Wissensbasis zur Verfügung stellen.

Das Fernziel, dass der fachliche Experte direkt sein Wissen vollständig einem System zur Verfügung stellen kann, ist bisher nicht erreicht und möglicherweise ist es unerreichbar.

In der **Wissensbasis** (knowledge base) muss das gesamte für das System zur Problemlösung nötige Wissen, typischerweise auch vages, unsicheres oder unvollständiges Wissen, in geeigneter Form gespeichert sein. Teilweise wird diese Komponente noch weiter unterteilt (z.B. bei [Puppe 91] in „fallspezifisches Wissen“, „bereichsbezogenes Expertenwissen“ und „Zwischenergebnisse und Problemlösungen“).

Die **Inferenzkomponente** (inference engine) stellt den für den Problemlösungsprozess zuständigen Teil eines Expertensystems dar und versetzt das System in die Lage - im Unterschied z.B. zu einer konventionellen Datenbank - selbstständig gespeichertes Wissen auf eine konkrete Aufgabenstellung anzuwenden. Es werden nicht nur *Daten*, sondern *Wissen* verarbeitet, das nicht erst durch die Interpretation des Benutzers entsteht, wie z.B. bei Textverarbeitungssystemen oder (einfachen) Datenbank-, Informations- oder Dokumentenretrievalsystemen.

Das Wissen kann im System z.B. in Form von Regeln enthalten sein.

Beispiel : Regel 040 aus MYCIN [Buchanan & Shortlife 84]

IF 1) The stain of the organism is gram positive, and
2) The morphology of the organism is coccus, and
3) The growth conformation of the organism is chains

THEN : There is suggestive evidence (.7) that the
identity of the organism is streptococcus

In dieser Regel ist festgehalten, dass *Streptococcus* eine bestimmte Art eines Organismus ist, die bestimmt werden soll. Weiterhin ist festgelegt, dass dieser Bestimmung des Organismus bei gegebenen Voraussetzungen 1 bis 3 ein Sicherheitsfaktor von 0.7 zuzuordnen ist. Das System kann selbstständig nach Eingabe von Ausgangsdaten durch den Benutzer verschiedene passende Regeln finden, kombinieren und an Hand der resultierenden Wahrscheinlichkeit, welche nach bestimmten Regeln berechnet wird (s. [Buchanan & Shortlife 84]), eine Diagnose ausgeben. Diese Ausgabe kann dem Benutzer auch erklärt werden .

Die **Erklärungskomponente** (explanation component) muss Mechanismen zur Verfügung stellen, die die Lösungsfindung des Systems vollständig transparent machen, da vom Nutzer vielfach nur nachvollziehbare Lösungen akzeptiert werden.

Neben der Beschreibung der Lösungsfindung können bei manchen Systemen auch weitere Erklärungen und Informationen angeboten werden, z.B. warum eine bestimmte Frage

beantwortet werden muss oder was ein bestimmter Fachbegriff bedeutet (s. Kap. 3 für eine ausführliche Beschreibung verschiedener Techniken zur Erklärung).

2.1.2. Erfolge konventioneller Expertensysteme

Von der Definition des Begriffs des Expertensystems ausgehend, ist ein *erfolgreich entwickeltes Expertensystem* ein Computersystem, dass *tatsächlich* die Leistungsfähigkeit eines entsprechenden menschlichen Experten bezogen auf das betreffende eng eingegrenzte Gebiet besitzt. Dies wird einigen Systemen in der Literatur zugeschrieben und teilweise durch objektive Testmethoden belegt. Für das berühmt gewordene Expertensystem MYCIN [Buchanan & Shortliffe 84], welches zum Standardmodell für regelbasierte Expertensysteme geworden ist, wurden Doppelblindtest-Versuche zur Kontrolle der Leistungsfähigkeit durchgeführt. Diese Tests ergaben, dass MYCINs Fähigkeit, den Erreger gegebener Meningitisfälle zu diagnostizieren sowie Medikamente zur Therapie zusammenzustellen, nicht nur der Leistung menschlicher Spezialisten entsprach, sondern bei bestimmten Fragestellungen diese sogar übertroffen hat [Harmon & King 86].

Heutzutage sind Expertensysteme im täglichen Routineeinsatz u.a. im medizinischen Bereich, im biologisch- und chemischen Umfeld, im Bankwesen, in der Raumfahrt und im militärischen Bereich. Einen Überblick über aktuelle medizinische Expertensysteme im internationalen Einsatz gibt [Federhofer 02]. Für Deutschland bezeichnet die Deutsche Gesellschaft für Medizinische Informatik, Biometrie und Epidemiologie e.V. in ihrem Jahresbericht 2001 [gmds 01] den Stand von einigen eingesetzten wissensbasierten Systemen als „technisch reif“ und „nachweislich in realen Anwendungsumgebungen nutzbringend“.

Z.B. wird das System *VIE-PNN* [Horn et al. 02] zur Kalkulation der parenteralen Ernährung Neugeborener als Erfolg bezeichnet, weil es beträchtliche Zeitersparnis für den Experten bringt. Weitgehende Einigkeit in der internationalen Literatur findet sich darin, dass Expertensysteme im klinischen Einsatz die Versorgung der Patienten verbessern und effektiver machen können, jedoch substanzielle Arbeit zu leisten bleibt, um die Verbesserungen umzusetzen ([Teich & Wrinn 00], [Sim et al. 01], [Bohanec et al. 00], [Tatara & Cinar 02]).

Auch im Bereich der chemischen Analyse wird die Zeitersparnis bei Untersuchungen mittels intelligenter Analysesysteme als Hauptvorteil angesehen. Sie ermöglicht heute Untersuchungen – und dies wird zukünftig noch verstärkt gelten – die ansonsten aus zeitlichen Gründen nicht möglich wären [Gillespie 97]. Im Bankwesen ist beispielsweise die Unterstützung bei der Kreditentscheidung ein erfolgreiches Einsatzgebiet, auch wenn der Einsatz von Expertensystemen in [Shao et al. 95] insgesamt als „nicht so weitreichend wie erwartet“ gewertet wird.

Die Expertensystemtechnologie tritt mit anderen Gebieten in eine Wechselwirkung, die zu einer beidseitigen Beflügelung führen kann. Im Bereich der Bioinformatik wird für das *Human Genome Project* in [Mjolsness & Tavormina 00] ein wachsender Bedarf an intelligenten Systemen für die Handhabung genomischer Daten, die Analyse, die Entwicklung von Hypothesen und das Testen festgestellt.

Als erfolgreich eingesetztes Expertensystem im militärischen Bereich kann TED (turbine engine diagnostic) genannt werden, das zur Fehlerdiagnose beim von der US-Armee hauptsächlich benutzten Panzer eingesetzt wird und erhebliche Kosten- und Zeiteinsparungen bringt [Hanratty et al. 99]. In der Raumfahrt ist die Möglichkeit der autonomen Steuerung und Reparatur von Bedeutung und unerlässlich für die „Deep space“-Missionen der NASA [Knight et al. 01].

Auch wenn man den kommerziellen Erfolg, d.h. den „Return on Investment“ tatsächlich eingesetzter Expertensysteme als Maßstab nimmt, lassen sich einige beachtliche Erfolge vorweisen. So wurden z.B. die Einsparungen der Firma „Digital Electronics“ durch den Einsatz des Expertensystems „R1/Xcon“³ in den 80er Jahren auf 40 Millionen Dollar pro Jahr geschätzt (s. [Barker et al. 89]).

Andere Beispiele aus amerikanischen Militär- und Raumfahrtanwendungen belegen ebenfalls den kommerziellen Nutzen von Expertensystemen:

- Das „Ground Processing Scheduling System“ zur Planung und Steuerung der notwendigen Arbeitsschritte zwischen zwei Space-Shuttle-Flügen erspart der NASA Kosten von ca. ½ - 1 Million Dollar pro Flug bei Entwicklungskosten von ca. 1.5 Millionen Dollar.
- Das System DART für militärische Logistik hat Einsparungen erbracht, die die gesamten Investitionskosten der Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)⁴ in die Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz ausgeglichen haben. (Beide Angaben nach [Feigenbaum 93]).

Trotz vieler erfolgreicher Beispiele muss festgestellt werden, dass im Vergleich zu Datenbanksystemen die Anzahl der entwickelten und genutzten Expertensysteme bisher relativ gering ist und weitere Fortschritte nötig sind, um das vielversprechende Potential der Expertensysteme weiter auszunutzen.

2.1.3. Grenzen konventioneller Expertensysteme

Der Vorgang des menschlichen Problemlösens wird seit Jahrtausenden untersucht. Trotzdem ist er bis heute nicht vollständig verstanden. Ob menschliches intelligentes Verhalten nur eine komplexe Form des Rechnens ist, oder etwas, das weit darüber hinausgeht, ist umstritten. Diese Frage hat für die Leistungsfähigkeit von Expertensystemen eine entscheidende Bedeutung, da die mögliche Antwort, dass Expertenwissen mehr als Rechnen sein könnte, die Wissensakquisition und damit die potentielle Leistung eines wissensbasierten Systems begrenzt. Hubert und Stuart Dreyfus haben bei ihrer Untersuchung, wie ein Mensch zu einem Experten auf einem bestimmten Gebiet wird, ein 5-Stufen-Modell erstellt [Dreyfus & Dreyfus 87]. Nach dieser Einteilung handelt ein Mensch, der zum Experten geworden ist (Stufe 5) dann überwiegend intuitiv, d.h. „er macht einfach das, was normalerweise funktioniert“, statt bewusste Entscheidungen zu treffen. Überzeugende Beispiele, die gegeben werden, sind u.a. Fahrrad fahren, Laufen und Sprechen. Wenn jemand dies gelernt hat, ist er in der Lage, es zu tun, nicht unbedingt aber in der Lage, es durch Regeln zu beschreiben oder anderen zu erklären.

³ Für dieses System sind viele Publikationen über Aufbau und Verfahrensweise vorhanden, was bei kommerziell genutzten Systemen eher die Ausnahme ist.

⁴ Forschungs- und Entwicklungsorganisation des amerikanischen Verteidigungsministeriums

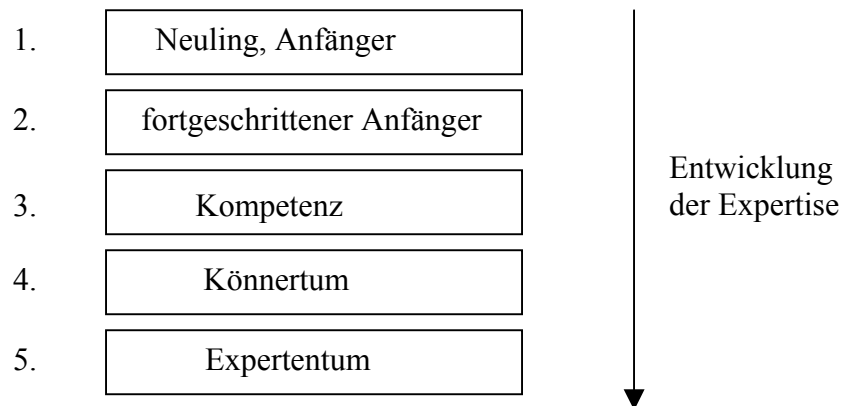


Abbildung 3: 5-Stufen-Modell nach Dreyfus

Bei der typischen Entwicklung von Expertensystemen (sog. „Transfer-Paradigma“) soll das Wissen des menschlichen Experten direkt in ein System transferiert (codiert) werden. Hierbei tritt dann ein Problem auf, wenn das Wissen des Experten nicht vollständig z.B. durch Interviews erfasst werden kann. Das entwickelte Expertensystem kann dann nur die Leistungsfähigkeit erreichen, die das erfasste Teilwissen zulässt.

Es gibt Versuche, diese Beschränkung, die der mangelhaften Wissenserhebung angelastet wird, durch andere Techniken zu durchbrechen, z.B. der indirekten Wissenserhebung, wo versucht wird, das Wissen des Experten zu akquirieren, ohne dass er es verbal ausdrücken muss [Karbach et al. 90]. Ein anderer Ansatz ist, statt der direkten „Codierung des Wissens“ zunächst Modelle des Problembereiches zu entwickeln (sog. „Modellbasierter Ansatz“). Ein aktueller Ansatz an Hand von sog. „Ontologien“ (explizite und allgemein akzeptierte Formalisierungen) ist in [Benjamins et al. 98] beschrieben.

Robert Laddaga (MIT⁵), Mark Swinson (DARPA) und Paul Robertson (Oxford University) nennen den Bedarf an kontinuierlicher Weiterentwicklung u.a. der Expertensystemtechnologie „äußerst wichtig“. Sie sehen neben der Anpassungsfähigkeit auch die Fähigkeit, ihre Tätigkeiten zu erklären, für künftige Systeme als entscheidend an [Laddaga et al. 00]. Diese Forderung muss für kooperierende Expertensysteme in besonderem Maße gelten, da sie im allgemeinen komplexer und daher für den Menschen schwerer nachzuvollziehen sind.

Auch der relativ eingeschränkte Wissensbereich konventioneller Expertensysteme ist eine Einschränkung, insbesondere fehlen bisher hinreichende Mechanismen für die Repräsentation von zeitlichem, räumlichem, inkonsistentem und Allgemeinwissen. Ebenfalls ist es ein offenes Problem, wie die Systeme ihre eigenen Grenzen d.h. ihre Kompetenz erkennen können. Dies wird als eine der zentralen Fragestellungen in der Verteilten Künstlichen Intelligenz untersucht, da sich hier nicht nur die Frage stellt, *ob* und *wie* ein bestimmtes Problem gelöst werden kann, sondern auch die Frage hinzukommt, *welchem System* bestimmte (Teil-)Probleme *zugeordnet* werden.

⁵ Massachusetts Institute of Technology

2.2. Verteilte Künstliche Intelligenz

2.2.1. Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz

Der Versuch, mehrere Expertensysteme einzusetzen, wird meistens dem jungen Gebiet der „Verteilten Künstlichen Intelligenz“ (distributed artificial intelligence) zugeordnet, das seit den 80er Jahren wachsendes Interesse innerhalb der Künstlichen Intelligenz findet und auch Einfluss auf die Entwicklung von Expertensystemen hat (s. z.B. [Huhns 87]) . Der zentrale Begriff der Verteilten Künstlichen Intelligenz ist der des „Agenten“, oder - um Problemlösungsfähigkeiten hervorzuheben - des „intelligenten Agenten“ . Dieser Begriff geht auf das lateinische „agere“ (tun, handeln) zurück und wird in der Literatur uneinheitlich genutzt. Es werden teilweise sehr vage Definitionen gegeben, wie z.B. *“we will rely on a simple and intuitive notion of an agent as a computational process with a single locus of control and/or 'intention' ”* [Bond & Gasser 88] , oder *„agents may range from simple processing elements to complex entities exhibiting rational behavior “* [Huhns 87]. Vielfach werden Agenten als Hard- oder Softwaresysteme mit bestimmten Eigenschaften beschrieben (sog. Autonomie, „Überzeugungen“, „Wünsche“, „Intensionen“, Reaktivität, Aktivität) [Wooldridge & Jennings 95] . Oder sie werden nur über die Fähigkeit der Kommunikation definiert: *“An entity is an agent if and only if it communicates correctly in ACL⁶ “* [Genesereth et al. 94]. In Abgrenzung jedoch zu Neuronalen Netzen, deren Problemlösungsfähigkeit sich erst durch die Verbindung vieler Neuronen entwickelt, haben Agenten, als Einheiten des Gesamtsystems, jeweils ein gewisses eigenes Maß an „Intelligenz“ (diese Definition schließt also Expertensysteme ein). Häufig wird die Verteilte Künstliche Intelligenz in „Verteiltes Problemlösen“ (distributed problem solving) und Multiagentensysteme (multiagent systems) unterschieden (s. z.B. [Bond & Gasser 88]), je nachdem ob die Lösung des Problems durch Aufteilung in zu lösende Teilprobleme, oder die Koordination mehrerer, evtl. bereits existierender Agenten hervorgehoben wird. Diese Unterteilung wird allerdings nicht immer eingehalten. In [v. Martial 92] wird festgestellt, dass fast alle bestehenden Systeme eine Mischform darstellen⁷ . Um die gemeinsame Lösung eines Problems durch verschiedene Agenten zu betonen, ohne das System in die obige Unterscheidung einordnen zu müssen, wird daher vielfach von „kooperativem Problemlösen (cooperative problem solving)“ gesprochen oder vor allem in jüngerer Zeit manchmal auch der Begriff „Multiagentensystem“ benutzt, obwohl es sich von der obigen Einteilung her um „verteiltes Problemlösen“ handelt. Die uneinheitliche Nutzung von Begriffen, die Begriffsvielfalt, sowie die Übernahme von Begriffen aus anderen Bereichen (Sozialwissenschaften, andere Bereich der Informatik u.a.) ohne dass die genaue Bedeutung festgelegt wird, stellt ein Problem innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz dar⁸ .

⁶ Agent Communication Language

⁷ Eric Werner, Mitherausgeber der „Decentralized A.I.“ 1992, dem Europäischen Workshop über Verteilte Künstliche Intelligenz [Werner & Demazeau 92], vertritt z.B. den noch weitergehenden Standpunkt : „Distributed Problem Solving is part of MAS“, und sieht diese Unterscheidung hauptsächlich in verschiedener Schwerpunktsetzung in Amerika und Europa.

⁸ Z.B. in [Kirn 91] wird auf die Probleme der Nutzung von Begriffen, die durch ein bestimmtes Bild vom Menschen geprägt wurden, hingewiesen und eine sorgfältige Begriffsdiskussion gefordert, die aber bisher innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz nicht stattgefunden hat.

Eine andere Aufteilung zur Klassifizierung einzelner Systeme sind die „8 Dimensionen der Verteilten Künstlichen Intelligenz“, ([Sridharan 87],[Huhns 87],[Müller 93], [Hein & Tank 88], [Albayrak 92] u.a.), die auf dem „Workshop on Distributed AI“ 1986 definiert worden sind.

Dimension	Wertespektrum
Systemmodell	Individuum.....Team.....Gesellschaft
Granularität	feinkörnig.....mittel.....grobkörnig
Agentenzahl	klein.....mittel.....groß
Anpassungsfähigkeit	starr.....programmierbar.....lernfähig.....autodidaktisch
Verteilung der Kontrolle	kontrolliert.....abhängig.....unabhängig
Ressourcen	eingeschränkt.....reichlich
Interaktionsschema	einfach.....komplex
Problemlösungsstrategie	Synthese.....Zerlegung

Abbildung 4: 8 Dimensionen der Verteilten Künstlichen Intelligenz [v.Martial 92]

In dieser Aufteilung wurden Expertensysteme als Beispiele von Agenten in einem System mit kleiner bis mittlerer Agentenzahl und dem Systemmodell des Teams angegeben ([Sridharan 87], [Bond & Gasser 88] u.a.). Die Granularität, also der Grad der Feinheit der Problemzerlegung, wird im allgemeinen „grobkörnig“ sein. Kontrolle, Ressourcen und die Komplexität der Interaktionen können variieren. Ebenfalls ist beim Systemdesign sowohl die Entwicklung des Gesamtsystems durch Dekomposition des Problems (verteiltes Problemlösen), als auch die Entwicklung des Systems durch Synthese bestehender Agenten (Multiagentensystem) möglich. In [Hein & Tank 88] wird eine ausführlichere Diskussion aller acht Dimensionen in Bezug auf Expertensysteme vorgenommen.

Der Einsatz mehrerer Expertensysteme zur Systementwicklung durch inkrementelle Aggregation wurde vom „5. Runden Tisch“, der sich auf dem oben genannten Workshop mit der Evaluierung der Fortschritte innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz beschäftigte, ausdrücklich als vielversprechender Ansatz im Vergleich zur konventionellen Künstlichen Intelligenz genannt. In der Literatur über Verteilte Künstliche Intelligenz wird der Begriff des Expertensystems selten explizit genannt, der Begriff des „Agenten“ aber als Oberbegriff für verschiedene Systeme - auch Expertensysteme - verstanden, so dass die mit der Kooperation mehrerer Expertensysteme verbundenen Probleme einen größeren Bereich innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz einnehmen, als auf den ersten Blick ersichtlich ist.

V. Lesser und D. Corkill geben in der „Encyclopedia of Artificial Intelligence“ [Shapiro 87] das gemeinsame Lösen eines Problems durch mehrere Expertensysteme als eines der Hauptanwendungsgebiete des Verteilten Problemlösens an.

Nach [Smith 80] wird verteiltes Problemlösen allgemein in drei Phasen aufgeteilt:

- Zerlegung des Problems in Teilprobleme (Dekomposition),
- Lösung der einzelnen Teilprobleme und
- Synthese der Gesamtlösung

Einen Überblick gibt z.B. [Bond & Gasser 88],[Huhns 87],[Müller 93].

Die einzelnen Phasen müssen nicht gleich wichtig für die Gesamtproblemlösung sein oder können u.U. entfallen bzw. sich schon direkt aus der Aufgabenstellung ergeben. Als Beispiel hierfür werden vielfach Ampelsteuerungen oder Sensorennetze angegeben; dabei ist die Problemdekomposition durch die geographische Verteilung vorgegeben). Die automatische Problemdekomposition (sofern nicht schon durch die Aufgabe vorgegeben) für eine Gruppe von Expertensystemen wurde bisher z.B. syntaxbasiert mit Hilfe kontextfreier Grammatiken [Kirn 90], an Hand von „Wissenshierarchien“ (s. [Kitamura et al. 94]) oder an Hand von Metawissen (im Sinne von Wissen über die Fähigkeiten der einzelnen Expertensysteme) [Zhang & Zhang 91] untersucht. Die Zuteilung der Teilprobleme an die jeweiligen Problemlösungseinheiten (auch als „connection problem“ bezeichnet) kann zentral oder dezentral erfolgen. Bei einem zentralen Ansatz werden die Teilprobleme von einer bestimmten und festen Einheit vergeben (als „Scheduler“, Kooperationsmanager“ o.ä. bezeichnet). Bei einer dezentralen Vergabe kann jeder Problemlösungsknoten die Rolle eines Auftraggebers und die eines Auftragnehmers übernehmen. Auf jeden Fall muss in irgendeiner Weise die Kompetenz der einzelnen Agenten bezogen auf das zu lösende Problem eingeschätzt werden (s. Kap. 2.2.4. für eine genauere Beschreibung des Kompetenzproblems). Während der Lösung der Teilprobleme können sich die einzelnen Einheiten u.U. wiederum Teilaufgaben abnehmen („task sharing“) oder Teilergebnisse austauschen („result sharing“). Für die Synthese der Gesamtlösung in einem System aus verschiedenen einzelnen Expertensystemen stellt vor allem die *Konfliktlösung bei sich widersprechenden Teillösungen* ein Problem dar (S. Kap. 2.2.3.).

Für die Kommunikation einzelner Problemlösungseinheiten sind in erster Linie das „Vertragsnetz“ (Vertragsmetapher der Aufgabenausschreibungen und Bewerbungen, „contract net“ [Davis 80]) und der sog. fa/c-Ansatz („functional accurate/ cooperative“, [Lesser & Corkill 81], [Lesser 91]) untersucht worden. Lesser und Corkill sehen Agenten eher im Sinne von Prozessoren als im Sinne komplexerer Softwaresysteme. Beim fa/c - Ansatz werden Fehler und Unsicherheiten der einzelnen Einheiten akzeptiert, und es wird versucht, durch einen interaktiven Austausch der Teillösungen nach und nach ein korrektes Gesamtergebnis zu erzielen (z.B. auch bei Ausfall eines Prozessors). Dieser Ansatz hat sich mehr für die Realisierung *eines* Systems ggf. auf Parallelrechnern z.B. mit dem System HEARSAY II [Erman et al. 80] bewährt und wird daher in dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Beim Vertragsnetz wird von einer bestehenden physischen Vernetzung aller beteiligten Problemlösungsknoten ausgegangen, auf die dann folgende logische Struktur aufgebaut wird: alle Knoten beherrschen eine gemeinsame Sprache („common internode language“) und können mittels ihrer Kommunikationskomponente (communication processor) Nachrichten an bestimmte andere Knoten oder an alle Knoten senden („broadcast“). Kann ein Knoten ein Problem, mit dessen Lösung er vom Benutzer oder von einem anderen Knoten beauftragt wurde, nicht selbst lösen, so kann er diese Aufgabe ausschreiben („task announcement“).

Diese Ausschreibung enthält eine Beschreibung der zu lösenden Aufgabe („task abstraction“), eine Liste mit Anforderungen, die jeder Bewerber erfüllen muss („eligibility specification“, zur Vermeidung unnötiger Kommunikation), eine Beschreibung der gewünschten Form der Bewerbung („bid specification“) und den Zeitpunkt, bis zu dem Bewerbungen angenommen werden („expiration time“). Jeder Bewerber kann mit der Bewerbung Informationen angeben, die er für die Bearbeitung benötigen würde („require statements“). Wählt der Manager einen Bewerber aus, z.B. denjenigen, der am wenigsten weitere Informationen benötigt, wird über die Erfüllung der Aufgabe ein Vertrag geschlossen. Zu diesem Vertragsmodell von Smith sind zahlreiche Erweiterungen denkbar und in der Literatur vorgeschlagen worden.

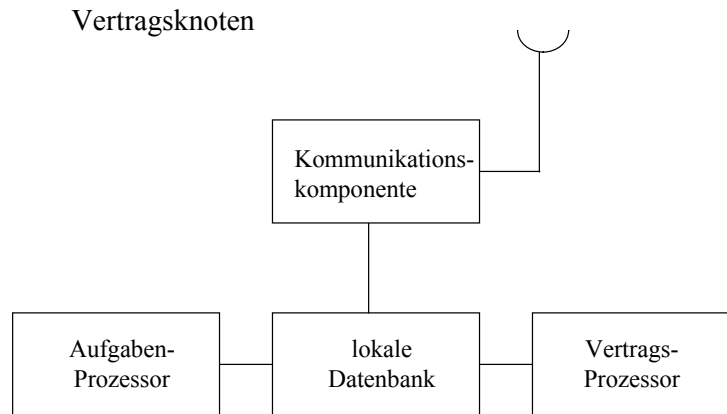


Abbildung 5: Aufbau eines Knotens in einer Vertragsnetz-Architektur aus [Davis 80]

Systeme, die als Problemlösungsknoten in einem Vertragsnetz eingesetzt werden sollen, müssen also um eine Kommunikationskomponente entsprechend oben beschriebener Gegebenheiten erweitert werden. Ein solches Vertragsnetz von Expertensystemen haben z.B. Kirn und Schlageter in ihrem System „Fresco“, einem föderativen Expertensystem für das Bankwesen vorgestellt. Es besteht aus einzelnen Expertensystemen zur Kreditvergabe, zur Anlageberatung, zur Unternehmensanalyse u.a., die sowohl eigenständig arbeiten, als auch kooperieren können (s. [Kirn & Schlageter 90], [Kirn 91], [Kirn & Schlageter 91a], [Kirn & Schlageter 91b], [Kirn et al. 92]).

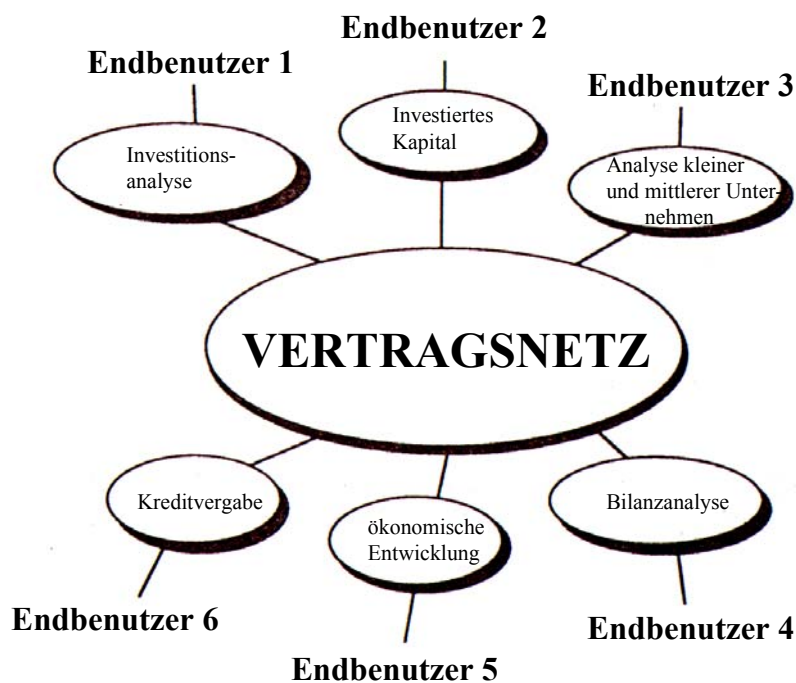


Abbildung 6: Föderatives Expertensystem FRESKO [Kirn & Schlageter 91a]

Es wurden jeweils zusätzlich zum sog. „Kern“-Expertensystem (konventionelles Expertensystem) eine „Universelle Dialogkomponente“, ein Modul zur „Dynamischen

Bearbeitungsplanung“ und ein „Kompetenzeinschätzungsmodul“ implementiert, die die Aufgaben der Kommunikation und der Verhandlungen übernehmen. In dem System sollen auch neue Expertensysteme mit „geringem Aufwand“ bei teilweise automatischer Konfiguration integriert werden können.

Das Vertragsnetz stellt das *logische* Netz dar, das wiederum eine physische Vernetzung voraussetzt (im vorliegenden Fall TCP/IP). „FRESCO“ ist als Prototyp zur weiteren Untersuchung von Fragen der Kooperation mehrerer Expertensysteme entwickelt worden und scheint die Einsetzbarkeit des Vertragsnetzes zur Kooperation von Expertensystemen zu belegen. Ob es eindeutige Vorteile gegenüber anderen Kooperationsmodellen hat, ist noch zu zeigen. Untersucht man, wie bei einer Gruppe von Agenten das einzelne Wissen, einzelne Ziele, Fähigkeiten und Pläne koordiniert werden können, um gemeinsam zu handeln oder Probleme zu lösen ([Bond & Gasser 88], [Müller 93]), wird zwischen einer „impliziten Organisationsstruktur der Agenten durch ihre Kommunikationsstruktur“ und einer „expliziten Organisation der Gesellschaft durch die Festlegung von Rollen“ unterschieden. Im Falle kooperierender Experten wird dort die Rollenstruktur durch die Spezialisierung der Agenten als vorgegeben angesehen. Lässt sich dieses (Meta-)Wissen über die Agenten in einer Wissensbasis zusammenfassen und zentral verwalten, kann ein System mit zentraler Kontrolle („Supervisor“) eingesetzt werden [Klett 89]⁹. Nachteil dieser Struktur ist, dass die „Supervisoreinheit“ die *Kompetenz der einzelnen Systeme* für jede konkrete Aufgabe bestimmen muss und das Gesamtsystem so in hohem Maße von dieser einen Einheit abhängig ist. Die einzelnen Systeme können untereinander keine Aufträge weitergeben oder Teilergebnisse von anderen Systemen benutzen (es sei denn, sie erhalten sie explizit von der Supervisoreinheit).

⁹ Diese Architektur wird auch in dem im Implementierungsteil benutzten Multiagentensystem-Framework OAA benutzt (dort wird der „Supervisor“ „Facilitator“ genannt).

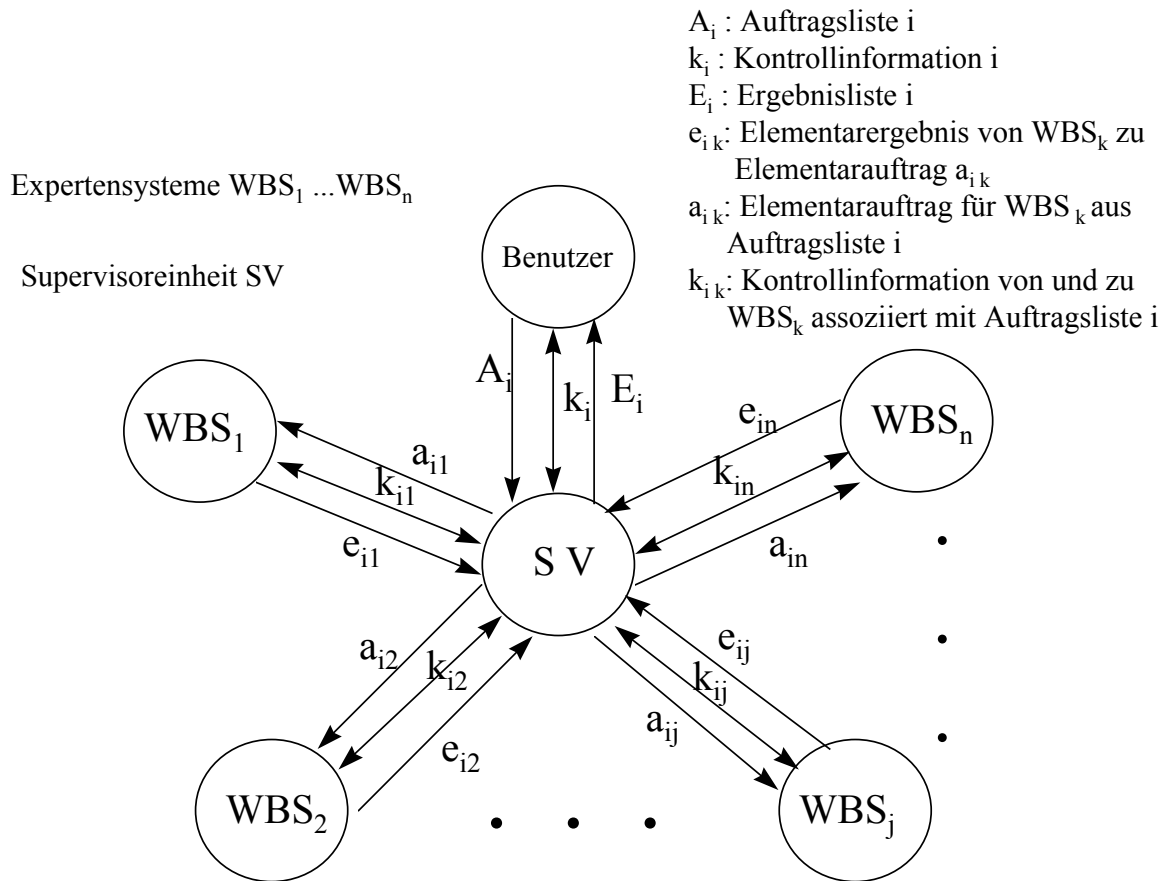


Abbildung 7: Daten- und Kontrollfluß in einem Multiagentensystem mit einer „Supervisoreinheit“ [Klett 89]

Anders verhält sich dies bei einem *Blackboard - System*. Ein Blackboard ist ein gemeinsamer Speicher, auf den alle Agenten Zugriff haben. Das Blackboard enthält initial Ausgangsdaten und Problemstellung und später schrittweise Teilergebnisse bis hin zur Gesamtlösung.

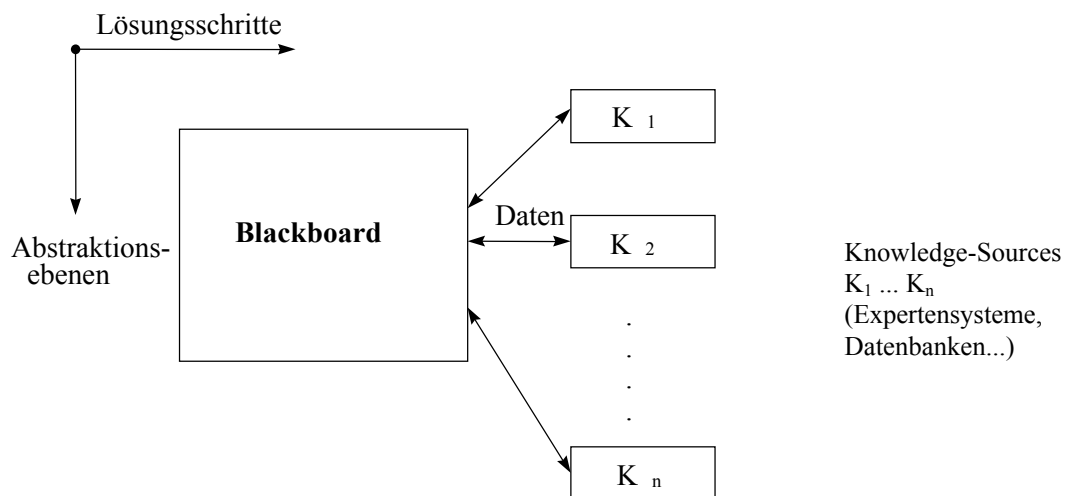


Abbildung 8: Blackboard Basisarchitektur

Eine Kopplung mehrerer Expertensysteme unter Verwendung eines Blackboards haben z.B. Zhang u. Bell in ihrem System HECODES [Zhang & Bell 91] vorgenommen.

Die Expertensysteme kommunizieren mit Hilfe von für jedes Expertensystem hinzugefügten „Front-end Prozessoren“ über ein Blackboard.

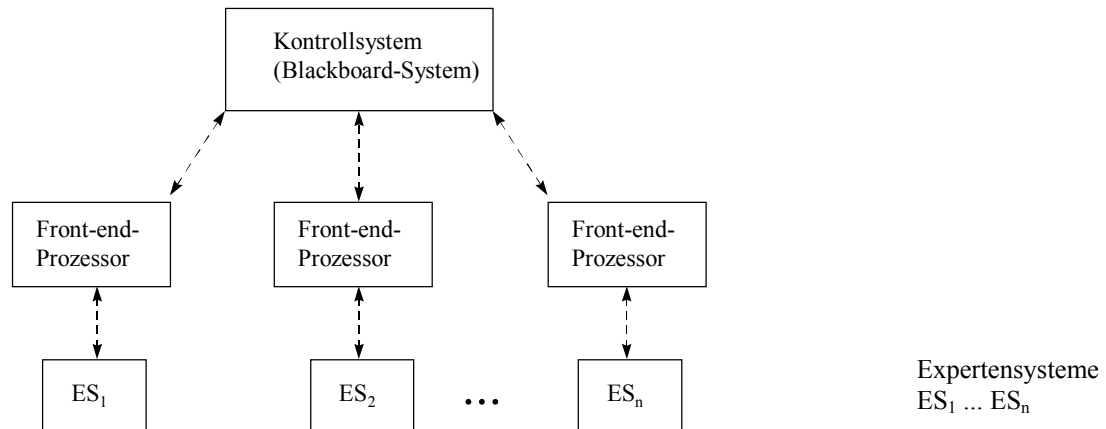


Abbildung 9: Abstrakte Architektur von HECODES [Zhang & Bell 91]

Die Expertensysteme sollen durch Hinzufügen einer neuen Systemkomponente kooperationsfähig gemacht werden. Ausgehend von einer zentralen Kontrolle werden Mechanismen für unterschiedliche Kooperationsformen, der Vermeidung von Deadlock-Situationen und zur Lösungssynthese aus den einzelnen Teilergebnissen bereitgestellt. Ebenso wie bei dem im vorigen Kapitel beschriebenen System „FRESCO“ sollen auch in „HECODES“ bereits bestehende Systeme in das Gesamtsystem integriert werden können¹⁰. Das Ausmaß der erforderlichen Anpassungen der existierenden Systeme oder die genaue Vorgehensweise wird jedoch nicht beschrieben. In [Kirn 91] wird behauptet, Kooperationsfähigkeit ließe sich unabhängig von bestimmten Agenten, d.h. unabhängig von ihrer Art (Expertensystem, Datenbank, ...), insbesondere auch unabhängig von ihrer Problemlösungsfähigkeit entwickeln und implementieren. Bestehende Systeme seien durch - zu entwickelnde - Tools kooperationsfähig zu machen. Den Nachweis, dass diese Forderung erfüllbar ist, bleibt der Autor allerdings schuldig.

Einen Ansatz, existierende Expertensysteme in ein Multiagentensystem zu transformieren, haben Jennings, Varga, Aarnts, Fuchs und Skarek [Jennings et al. 93] im Rahmen des ESPRIT-Projektes ARCHON¹¹ [Cockburn & Jennings 96] unternommen. Es sollten zwei existierende autonome Expertensysteme zur Diagnose von Fehlern in einem Partikelbeschleuniger der CERN

¹⁰ Dies entspricht der ursprünglichen („strengen“) Definition des Begriffes Multiagentensystem.

¹¹ ARCHON (Architecture for Cooperative Heterogenous ON-Line Systems) war 1992 ein großes europäisches Projekt im Bereich der Verteilten Künstlichen Intelligenz (ESPRIT-Projekt 2256) zur Entwicklung einer Methodologie und allgemeinen Architektur für die Kooperation verschiedener Systeme (u.a. Expertensysteme).

Laboratorien in eine Gruppe kooperierender Agenten transformiert werden. Dabei wurden die bestehenden Systeme analysiert und eine neue gemeinsame Kommunikationssprache entwickelt. Einzelne bestehende Systeme wurden dabei teilweise auf mehrere neue Agenten abgebildet, um „eine größtmögliche Effektivität und bessere logische Struktur“ zu erreichen und dann mit Hilfe einer „generellen Multiagenten-Umgebung“ (GRATE, [Jennings 92]) vereint. Mit diesem Ansatz sollte neben der konkreten Aufgabenstellung auch allgemein die Kopplung von Expertensystemen bzw. die Umwandlung existierender Expertensysteme in ein Multiagentensystem untersucht werden. Es muss allerdings berücksichtigt werden, dass in dem dort vorliegenden speziellen Fall ganz bestimmte Voraussetzungen gegeben waren, nämlich ein ähnlicher Aufgabenbereich der einzelnen Expertensysteme (Fehlerdiagnose des Partikelbeschleunigers), sowie der gleiche Ansatz zur Wissensrepräsentation (Frame-basiert, Hypothesen-Agenda). Es ist daher fraglich, inwieweit sich die Ergebnisse auf das allgemeine Problem der Kooperation (beliebiger) Expertensysteme übertragen lassen.

Einen weiteren Ansatz, ein Multiagentensystem aus bestehenden Expertensystemen zu bilden - ebenfalls teilweise im Rahmen des ARCHON Projektes - haben Oliveira, Mouta und Rocha vorgestellt [Oliveira et al. 93]. Hierbei werden für in das System zu integrierende Expertensysteme Modelle gebildet, in denen über bestimmte Prädikate deren Wissen und deren Fähigkeiten beschrieben werden. An Hand der Modelle aller relevanten Agenten wird für jeden Agenten dann ein Modell der „Bekanntschaft“, also der für ihn relevanten anderen Agenten gebildet („agent acquaintance model“). Über eine „Kooperationsschicht (cooperation layer)“, die jedem neuen Expertensystem zugefügt wird, kann dann mit den anderen Agenten kommuniziert werden. Ein besonderer Agent („user interface agent“) enthält ein Modell des Benutzers, welcher auf diese Weise in das System integriert ist.

Alle vorgestellten Ansätze gehen von der Wichtigkeit der Kooperationsfähigkeit von Expertensystemen sowie der Notwendigkeit der Wiederverwendbarkeit bestehender Systeme aus. Allerdings bleiben für konkrete Realisierungen Fragen unbeantwortet bzw. schwierige Probleme ungelöst:

1. Wie kann ein beliebiges Expertensystem in ein Gesamtsystem integriert werden ?
2. Wie kann eine beliebige lösbare Aufgabe mit Hilfe von Kooperation gelöst werden ?
3. Wie können widersprüchliche Teillösungen aufgelöst bzw. behandelt werden ?
4. Wie kann eine durch Kooperation gefundene Lösung erklärt werden ?

2.2.2. Potentielle Vorteile kooperierender Expertensysteme

Folgende Vorteile erhofft man sich von kooperierenden Expertensystemen (s. u.a. [Huhns 87], [v.Martial 92]) :

- Erweiterung der Einsetzbarkeit von Expertensystemen :

Durch den Einsatz mehrerer Expertensysteme erhofft man sich, komplexere Probleme als bisher zu lösen. Bisher haben sich Expertensysteme nur in eng umgrenzten, speziellen Aufgabenbereichen bewährt (vgl. [Konrad 90],[Puppe 91]).

Durch die Zusammenarbeit mehrerer Systeme könnte dieser Aufgabenbereich evtl. erweitert werden. Dabei sollte allerdings nicht vergessen werden, dass schon früher ähnliche Hoffnungen in der Geschichte der Künstlichen Intelligenz ausgedrückt wurden, die sich nicht erfüllt haben. Als Beispiel kann hier der Versuch der Ausdehnung der Erfolge des Sprachverstehens genannt werden. Winograts Erfolge innerhalb seiner „Blockwelten“ (kleinen, abgeschlossenen und festen Regeln unterworfenen Modellwelten) ließen sich nicht auf Erfolge in größeren „Welten“, bzw. der realen Welt ausdehnen (in der Literatur oft als „commonsense knowledge problem“ bezeichnet, s. [Dreyfus & Dreyfus 88]).

- Wiederverwendbarkeit bestehender (Wissensbasierter-)Systeme oder Systemkomponenten

Bei der Erstellung eines (Gesamt-)Systems aus mehreren einzelnen Expertensystemen könnte die Wiederverwendung bestehender Systeme oder Komponenten einfacher durchzuführen sein, als bei der Erstellung eines konventionellen großen einzelnen Systems.

Im Idealfall ließen sich bestehende Expertensysteme ohne größere Modifikationen integrieren. Das Spektrum möglicher Wiederverwendung ist von einem nur minimalen Anteil innerhalb einer Neuentwicklung bis hin zur Entwicklung durch Verbinden ausschließlich existierender Expertensysteme denkbar. Einige Autoren haben die Vision, existierende Expertensysteme ließen sich mit entsprechenden Werkzeugen (halb-)automatisch zu kooperationsfähigen Systemen erweitern [Kirn 91].

- Erhöhte Zuverlässigkeit

Die Zuverlässigkeit eines Komitees menschlicher Experten kann höher sein als die eines einzelnen (z.B. wird die Wahrscheinlichkeit einer Fehldiagnose einer Gruppe von Ärzten - sofern sich alle einig sind - geringer sein als die Wahrscheinlichkeit einer Fehldiagnose eines einzelnen dieser Gruppe). Analog könnten sich die Lösungen mehrerer Expertensysteme - sofern sich ihre Wissensgebiete überschneiden - bestätigen und damit das Vertrauen des Benutzers in die Lösung des Gesamtsystems erhöhen. Im Unterschied zur Lösung durch ein einzelnes System kann aber auch der Fall auftreten, dass sich (Teil-)Lösungen widersprechen (darauf wird in Kap. 2.2.3. eingegangen).

- Ausnutzung „problemhärer Verteiltheit“

Manche Autoren sprechen bei bestimmten Problemen von „problemhärer Verteiltheit“ [v.Martial 92] . Diese kann z.B. durch eine geographische Verteilung vorgegeben sein. Oft zitierte Beispiele sind Ampelsysteme, Sensorenetze oder verteilte Computernetzwerke. Bei Problemstellungen in solchen Anwendungsgebieten könnte ein verteiltes System geeigneter als ein konventionelles sein.

- Vorteile durch Modularität

Die Vorteile modularer Entwicklung sind im Software-Engineering seit langem bekannt. Im Bereich der Expertensysteme könnte die Entwicklung eines Gesamtsystems aus kleineren Teilsystemen die Erstellung, Testung und Wartung [Huhns 87] vereinfachen.

- Erleichterung der Wissensakquisition mehrerer Experten

Im Bereich der Expertensysteme gilt die Wissensakquisition als „Flaschenhals“. Ein besonderes Problem liegt vor, falls es sich um mehrere Experten handelt. Die Akquisition des Wissens von verschiedenen Experten - die natürlicherweise oft unterschiedliche Standpunkte und Ansichten haben - erhöht die Gefahr einer inkonsistenten Wissensbasis, die dann zu einem mangelhaften Inferenzprozeß führen kann. In einem System aus mehreren Expertensystemen könnte man sich vorstellen, dass das Wissen jedes einzelnen Experten die Grundlage eines (Teil-)Expertensystems darstellt und dass dann über bestimmte Mechanismen mögliche Konfliktfälle gelöst werden. Im Idealfall wären die Konflikte dann sogar eine Verbesserung der Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems, anstatt einer Schwächung (s. [Lander et al. 90], dort wird die positive Rolle von Konflikten betont, da sie „Kreativität freisetzen“).

- Geschwindigkeitszuwachs durch parallele Bearbeitung

Teilweise wird auch von „paralleler künstlicher Intelligenz (parallel artificial intelligence, s. u.a. [v.Martial 92])“ gesprochen, wenn Rechenvorgänge zur Verbesserung der Geschwindigkeit parallel erfolgen. In der vorliegenden Arbeit sollen jedoch die grundsätzlichen Entwicklungsansätze - und nicht die implementierungstechnischen Aspekte - untersucht werden. D.h. es werden nur Systeme betrachtet, die vom Ansatz her verteilt sind. Möglichkeiten einer Parallelisierung einzelner Prozesse zur Beschleunigung der Inferenz konventioneller Systeme werden hier nicht weiter untersucht.

2.2.3. Konfliktlösung bei sich widersprechenden Teillösungen

Sobald sich die Wissensgebiete der einzelnen Expertensysteme bzw. die ermittelten Teillösungen überschneiden, besteht in einem System aus mehreren einzelnen Expertensystemen die Möglichkeit, dass sich Teillösungen widersprechen und dieser Widerspruch im Verlauf der Lösungssynthese behandelt werden muss.

Bereits bei den konventionellen, einzelnen Expertensystemen existieren Ansätze, in denen innerhalb der Lösungsfindung verschiedene u.U. sich widersprechende Lösungen berücksichtigt werden (z.B. „Konfliktmenge“ beim „Hypothesize-And-Test“-Verfahren, vgl. [Puppe 87]). Eine weit verbreitete Technik in diesen Ansätzen ist die Zuordnung von Wahrscheinlichkeiten zu den verschiedenen möglichen Lösungen, sog. Sicherheits- bzw. Unsicherheitswerten (vgl. MYCIN [Buchanan & Shortliffe 84]). Es ist daher naheliegend, diesen Ansatz, der sich bei der Lösungsfindung einzelner Systeme bewährt hat, auf die Lösungssynthese von Teillösungen mehrerer Expertensysteme auszudehnen. Einen solchen Ansatz haben [Zhang & Bell 91] vorgeschlagen, indem sie verschiedene Lösungen einzelner Systeme als gleiche Lösungsmengen mit jeweils verschieden einzelnen Unsicherheitswerten betrachten. An Hand der Durchschnittswerte der Unsicherheitswerte der jeweiligen möglichen Lösungen kann dann die (Gesamt-)Entscheidung getroffen werden (s. auch [Zhang & Zhang 91]). Zur Synthese der Gesamtlösung ist auch der Einsatz neuronaler Netze untersucht worden¹² ([Zhang & Zhang 91], [Zhang & Zhang 96]).

¹² Sofern neuronale Netze zur Konfliktlösung eingesetzt werden, stellt sich allerdings die Frage, ob das Gesamtsystem dann noch eine ausreichende Erklärungsfähigkeit haben kann (vgl. Kap. 6).

In [Lander et al. 90] wird die „positive Rolle von Konflikten“ betont, da aus ihnen Kreativität resultieren könne. Dies sei allerdings in erster Linie auf Menschen bezogen und nicht vollständig auf Maschinen zu übertragen. Konfliktlösung wird als integraler Bestandteil der Problemlösung angesehen und es werden verschiedene Konfliktlösungsstrategien präsentiert, die jeweils für bestimmte Problemcharakteristiken als adäquat vorgeschlagen werden:

- Generierung zufälliger Alternativen, falls mehrere mögliche Lösungen existieren und ohne viel Aufwand erzeugt werden können („generate random alternatives“).
- Bildung von Kompromissen, falls ein Vorschlag generierbar ist, der innerhalb einer Akzeptanzspanne aller Systeme liegt („compromise“).
- Bildung alternativer Lösungen, ausgehend von gegebenen Einschränkungen („generate constrained alternatives“).
- Ändern der Aufgabenstellung, z.B. durch „Aufweichen“ der Problemanforderungen, falls auch Lösungen für alternative Probleme akzeptabel sind („generate goal alternatives“).
- Nutzung einer früheren Lösung, in der ein Konflikt mit den gleichen Parametern gelöst werden konnte („case-based parameter set retrieval“).
- Vergabe von Prioritäten für Ziele und Teilziele. Ggf. müssen unwichtigere Teilziele aufgegeben werden, um den Konflikt aufzulösen. Diese Form wird als die aufwendigste beschrieben, die nur dann angewandt werden soll, wenn keine der anderen erfolgversprechend ist („revise and merge goals“).

Die Autoren betonen, dass die Identifizierung der Konfliktart, sowie die Zuordnung der adäquaten Konfliktlösungsstrategie wiederum ein „wissensbasiertes Problem“ ist.

Zur Lösung werden Informationen benötigt über

- Problemlösungsressourcen,
- Aufwand und Einschätzung bereits ermittelter (Teil-)Lösungen,
- Einschätzung des Aufwandes neu zu generierender Lösungen,
- Abhängigkeitsstrukturen der entsprechenden Vorschläge,
- Bedeutung einzelner Lösungskomponenten für die Gesamtlösung,
- Art und Anzahl der für den Konflikt bedeutsamen Parameter,
- Schwere des Konfliktes sowie
- Flexibilität der beteiligten Agenten .

2.2.4. Kompetenzproblem

Im Hinblick auf Expertensysteme stellt sich das Problem, dass die Beurteilung ihrer Kompetenz - durch sich selbst oder durch andere Systeme - in konventionellen Ansätzen nicht vorgesehen ist und daher in der älteren Literatur kaum auftritt. Das Problem findet allerdings auch in der neueren Literatur zum kooperativen Problemlösen erstaunlich wenig Berücksichtigung und muss noch genauer untersucht werden, um weitergehende Erfolge zu erreichen.

Wie die meisten bisherigen Begriffe, die innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz verwendet werden, ist auch der Begriff der Kompetenz eines Expertensystems oder allgemein eines Agenten nicht einheitlich definiert und die Bedeutung darf nicht mit der im natürlichen/menschlichen Leben gleichgesetzt werden. Nach [Kirn 90] ist der Begriff der Kompetenz eines Expertensystems zwar *abstrakt definiert*, wird aber an Hand einer *konkreten Aufgabenstellung evaluiert*. D.h. für ein Expertensystem muss entweder durch das System selbst oder durch einen anderen Entscheidungsfinder entschieden werden, ob dieses System eine bestimmte Aufgabe lösen kann. Diese Entscheidung muss getroffen werden, ohne die entsprechende gesamte Inferenz zu durchlaufen, was die Fähigkeit voraussetzt, die Lösbarkeit eines Problems zu beurteilen, ohne es tatsächlich zu lösen. Insbesondere soll ein System nicht versuchen, ein Problem zu lösen, dass prinzipiell unlösbar ist (vgl. [Kirn 90], [Voss et.al.92]). Da die Lösbarkeit beliebiger Probleme nicht allgemein entscheidbar ist, wird schon aus logischen Gründen (ganz zu schweigen von technischen Problemen) eine Annäherung an diese Forderung genügen müssen. Als Maßstab könnte wieder der menschliche Experte, genauer also seine Fähigkeit der Einschätzung der eigenen Kompetenz, gewählt werden.

A. Newell hat mit seinem Vorschlag der „Wissensebene“ (*knowledge level*, [Newell 82]) als Computerebene, die sich in der Hierarchie der Systemebenen direkt über der Symbolverarbeitungsebene befindet, die theoretischen Grundlagen und Anforderungen für die Kompetenzbeschreibung gegeben. Er verweist darauf, dass die Wissensebene - wie alle Computerebenen - durch die darunter liegende Ebene, also die Symbolebene beschrieben werden kann.

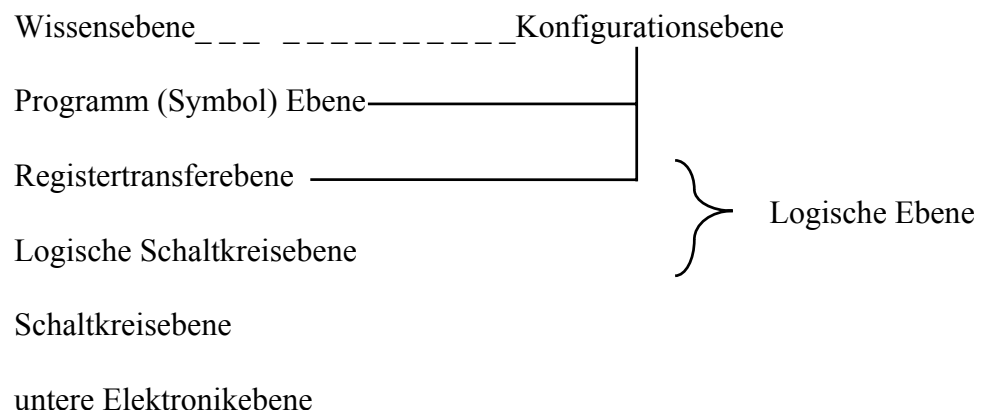
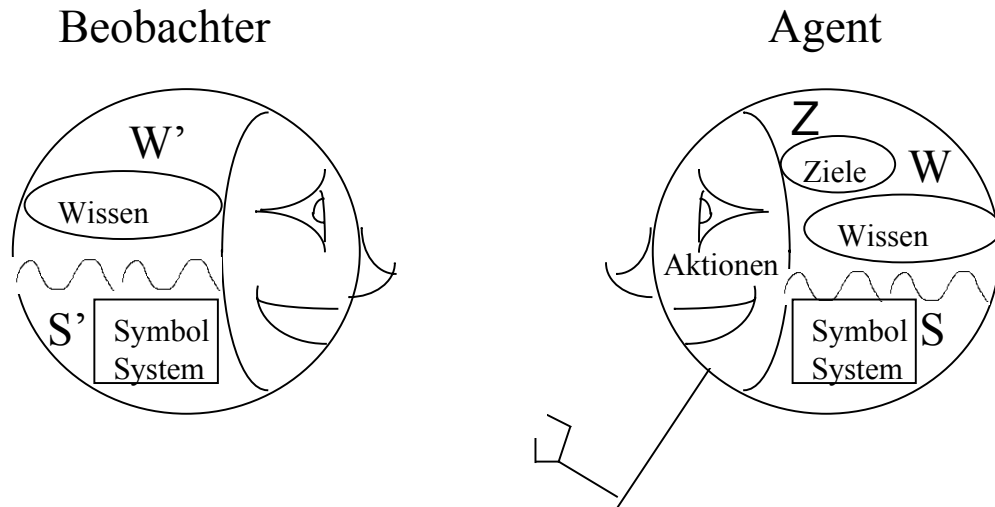


Abbildung 10: Computersystemebenen nach [Newell 82]

Es ist aber auch eine unabhängige Beschreibung auf der Wissensebene möglich.

Hierbei werden Agenten durch *Wissen, Ziele und Aktionen* beschrieben. Die Verhaltensgrundlage ist das „Prinzip der Rationalität“, d.h. es wird davon ausgegangen, dass ein Agent, sofern er „weiß“, dass eine seiner Aktionen zu einem seiner Ziele führen wird, diese auch ausführt. Diese Ebene reicht nicht aus, um intelligente Systeme zu beschreiben, sie ermöglicht aber eine Beschreibung der Kompetenz dieser Systeme. Mit Hilfe des Prinzips der Rationalität lassen sich teilweise Handlungen von Agenten vorhersagen. Dies ist allerdings nicht immer möglich, vor allem bei mehreren möglichen Aktionen und Zielen.



Ein Agent wird von einem anderen auf der Wissenssebene beobachtet. Der Beobachter kennt das Wissen und die Ziele sowie die möglichen Aktionen und die Umgebung des beobachteten Agenten. Er kann ihn dann nach dem Prinzip der Rationalität einschätzen, ohne dass die physikalische Struktur oder genaue Repräsentation des Wissens W in S bekannt sein muss (Z , W , Aktionen und Umfeld müssen hingegen in W' enthalten sein).

Abbildung 11: Nutzung der Wissenssebene [Newell 82]

Der Ansatz der Wissenssebene zur Vorhersage des Verhaltens von Agenten ist jedoch nur eine sehr grobe Annäherung, die sich in manchen Fällen gut eignet, in anderen wiederum nicht. Newell gibt als Beispiel für eine gute Anwendung die Annahme an, dass eine menschliche Person in der Lage sein wird, das Schlafzimmer der eigenen Wohnung zu finden. Ein zweites Beispiel, wo dieser Ansatz ungeeignet ist, ist der Fall, dass eine Person kurz eine Telefonnummer auf einem Zettel gesehen hat: es ist schlecht vorhersagbar, ob diese Person kurze Zeit später in der Lage sein wird, die Nummer anzurufen.

Obwohl die Wissenssebene von Newell selbst als „äußerst unvollständig (*radical incomplete*)“ bezeichnet wird, bildet sie die theoretische Grundlage dafür, zwischen dem Wissen, dass nötig ist, um ein Problem zu lösen und dem eigentlichen Vorgang der Problemlösung zu unterscheiden; dadurch wird eine Beurteilung der Kompetenz möglich.

Mehrere Autoren in der Literatur gehen davon aus, dass bestehenden Expertensystemen prinzipiell eine „Kompetenzkomponente“ hinzugefügt werden kann. Ein Ansatz, die Kompetenz durch Prolog-Prädikate zu beschreiben, mit deren Hilfe dann die Kompetenz für eine abstrakte

Aufgabenbeschreibungen berechnet werden kann, findet sich in [Kirn & Schlageter 91a] , [Kirn 91]. Dort wird die Kompetenz entweder direkt durch die Fähigkeit, eine bestimmte Aufgabe zu lösen ausgedrückt (Prädikat: solves_tasks(input,output, rating)), oder sie kann aus einer abstrakten Beschreibung ihrer Wissensbasis abgeleitet werden oder sie wird durch die allgemeine Zuordnung bestimmter Problemarten zu bestimmten Problemlösungsstrategien ausgedrückt. Bei dem letzten Ansatz, der die weitreichendste und allgemeinste Kompetenzeinschätzung dieser drei Ansätze darstellt, treten jedoch drei bisher nicht allgemein gelöste Fragen auf:

1. Wie können Probleme klassifiziert werden ?
2. Wie können Problemlösungstechniken klassifiziert werden ?
3. Wie können Probleme bestimmten Problemlösungstechniken zugeordnet werden ? (s. [Puppe 91] für einen groben Zuordnungsversuch)

In diesem Sinne ist ein System, in dem ein bestimmtes Problemlösungsverfahren implementiert ist, kompetent für Probleme, die zur Lösung diese Technik erfordern. Ein solches (allgemeines) Wissen ist sicher nützlich, wenn z.B. bei der Entwicklung eines neuen Expertensystems entschieden werden muss, welches Inferenzverfahren implementiert werden soll. Es ist jedoch fraglich, ob dieser Ansatz, der vom konkreten Wissensbereich abstrahiert, für die Einschätzung realer Aufgabenstellungen und bestehender Systeme geeignet ist. Geht man nicht davon aus, dass alle betrachteten Systeme für den gleichen Wissensbereich geschrieben worden sind, wären also zwei Expertensysteme, die die gleiche Problemlösungsstrategie verwenden (z.B. Hypothesize-And-Test-Verfahren), für jede Aufgabe gleichermaßen kompetent, auch wenn eines zur Fehlerdiagnose in Automotoren und das andere für die Diagnose von Herzkrankheiten entwickelt worden ist.

Ein anderer Ansatz der Beschreibung der Kompetenz wird z.B. in [Bamberger 97] vorgestellt. Dort kann die Kompetenz durch Schlüsselwörter ausgedrückt werden. Neue Schlüsselwörter können definiert und zusammen mit einer Beschreibung in einer (Meta-)Wissensbasis abgelegt werden, auf die alle Systeme Zugriff haben, so dass die Terminologie einheitlich ist. Zur Realisierung werden Erweiterungen der Expertensystemshell D3 [Puppe et al 94] vorgeschlagen. Zur Beschreibung des Wissens wird auf Ansätze wie KIF [Neches et al 91] oder das Cyc-Projekt [Lenat 95] verwiesen. Diese sind jedoch umstritten (s. [Ginsberg 91] für eine Kritik an KIF) und konnten bisher keine klaren Erfolge vorweisen, so dass es fraglich ist, ob damit eine (Meta-) Wissensbasis aufgebaut werden kann, die allen im Zusammenhang mit kooperativem Problemlösen auftretenden Anforderungen gerecht wird.

Der Kompetenzbegriff im weiteren Sinn schließt noch andere Anforderungen mit ein, z.B. fordern [Voss et.al.92] außerdem noch von „kompetenten Systemen“, dass sie

- alternative Lösungsansätze für sonst nicht zu lösende Probleme vorschlagen können;
- die Relevanz von Informationen erkennen können und ggf. Probleme vereinfachen, bevor sie mit dem Lösungsprozeß beginnen;
- die Komplexität eines Problems erkennen und es in Teilprobleme zerlegen können;

- fehlende oder unsichere Informationen verarbeiten können und ggf. eine Lösungsapproximation anbieten, falls eine vollständige Lösung nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand herleitbar ist und
- Erfahrungen aus früheren Fällen anwenden können.

Aufgrund des hohen Stellenwertes, den Sie dieser Fragestellung zuschreiben, schlagen sie in ihrem REFLECT¹³ - Projekt statt einer einzelnen Kompetenzkomponente für ein Expertensystem eine ganze Gruppe „generischer Kompetenzspezialisten“ vor, die jeweils einzelne Aspekte der Kompetenz realisieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass allen untersuchten Ansätzen gemeinsam die Ansicht ist, dass die Frage der Einschätzung der Kompetenz eines Expertensystems (im engeren oder weiteren Sinne) eine zentrale Rolle innerhalb des Problems der Kooperation von Expertensystemen einnimmt. Bisher ist jedoch weder eine Möglichkeit einer hinreichenden Beschreibung gefunden worden, noch eine Einigkeit über Eigenschaften oder Anforderungen einer solchen erzielt worden.

2.3. Prädikatenlogik der 1. Stufe

In dieser Arbeit wird die Prädikatenlogik der 1. Stufe benutzt, um formal exakte theoretische Untersuchungen vorzunehmen. Dafür werden nun die nötigen Grundlagen eingeführt (s. [Carnap 54] für eine detaillierte Einführung in die Logik, [Konrad 76] und [Reiner 91] für die Anwendung der Logik zur Untersuchung von Such-, Deduktions- und Erklärungsvorgängen). Die formale Sprache der Prädikatenlogik der 1. Stufe, in der die Syntax und Semantik der Ausdrücke eindeutig definiert ist, wird zur Beschreibung von Sachverhalten herangezogen und das logische Schließen in Form der Resolution als Grundlage der Inferenz von Expertensystemen dargestellt. Der Begriff der „logischen Folgerung“ wird eingeführt und darauf basierende Definitionen des Erklärungsbegriffs werden eingeführt.

2.3.1. Sprache der Prädikatenlogik

Zunächst wird die *Sprache der Prädikatenlogik der 1. Stufe* - wie in [Konrad 01] - dargestellt übernommen:

Grundsymbole:

- | | | |
|---|------------|------------|
| 1. Individuensymbole : | Variablen | w, x, y, z |
| | Konstanten | a, b, c |
| 2. Funktionssymbole jeder Stellenzahl: | | f, g, h, |
| 3. Prädikatensymbole jeder Stellenzahl: | | P, Q, R |
| (1.-3. evtl. mit Indizes) | | |

¹³ REFLECT, Esprit Basic Research Programm 3178 der Commission of European Communities

4. Logische Symbole: \neg (nicht), \wedge (und), \vee (oder), \rightarrow (wenn – so),
 \leftrightarrow (genau dann, wenn), \exists (es existiert), \forall (für alle),
 $=$ (gleich)

5. Klammern: $(,)$.

Mit Hilfe der Grundsymbole werden induktiv Terme und Formeln definiert:

Terme:

- (1) Jedes Grundsymbol ist ein Term.
- (2) Wenn f ein n -stelliges Funktionssymbol ist und t_1, t_2, \dots, t_n Terme sind, dann ist auch $f(t_1, t_2, \dots, t_n)$ ein Term.
- (3) Das sind alle Terme.

Formeln:

- (1) Wenn P ein n -stelliges Prädikatensymbol ist und t_1, t_2, \dots, t_n Terme sind, so ist $P(t_1, t_2, \dots, t_n)$ eine Formel.
 - (2) Wenn t_1 und t_2 Terme sind, so ist $t_1 = t_2$ eine Formel.
- Formeln, die nach (1) oder (2) gebildet sind, heißen *atomar*.
- (3) Wenn A eine Formel ist, so ist auch $\neg A$ eine Formel.
 - (4) Wenn A und B Formeln sind, so sind auch $(A \wedge B)$, $(A \vee B)$, $(A \rightarrow B)$ und $(A \leftrightarrow B)$ eine Formel.
 - (5) Wenn A eine Formel ist, so sind auch $\exists x A$ und $\forall x A$ Formeln.
 - (6) Das sind alle Formeln.

Durch diese Definition kann syntaktisch für jeden Ausdruck entschieden werden, ob er Element oder nicht Element der Sprache der Prädikatenlogik der 1. Stufe ist. So ist z.B. der Ausdruck $P(a, f(b)) \vee Q(c)$ ein Element der Sprache (vorausgesetzt P, Q sind Prädikatensymbole, a, b, c Konstanten und f eine Funktion). Kein Element der Sprache ist z.B. der Ausdruck $P(Q(f(a \vee b)))$, da es keine Möglichkeit der Bildung nach obiger Definition gibt.

Um die Sprache sinnvoll benutzen zu können, muss weiterhin definiert werden, wann eine Formel *wahr* ist (man sagt auch, dass die Formel *gilt*). Besondere Formeln sind Tautologien

(Formeln, die immer wahr sind) wie z.B. $A^{14} \vee \neg A$ und Kontradiktionen (Formeln, die immer falsch sind) wie z.B. $A \wedge \neg A$. Bei allen anderen Formeln ist der Wert nur im Zusammenhang mit einer *Interpretation über einem nichtleeren Individuenbereich* (auch Welt genannt) feststellbar. Es wird wiederum aus [Konrad 01] übernommen:

Eine Interpretation I über einem nichtleeren Individuenbereich D ist eine Abbildung, welche jedem Individuensymbol x bzw. a genau ein Element $I(x)$ bzw. $I(a)$ aus D , jedem n -stelligen Funktionssymbol f genau eine n -stellige Funktion $I(f)$ auf D , jedem n -stelligen Prädikatensymbol P genau eine n -stellige Relation $I(P)$ auf D zuordnet.

Damit kann jedem Term eindeutig ein Element des Individuenbereiches zugeordnet werden und definiert werden, wann eine Formel bei einer Interpretation I über D gilt:

Interpretation der Terme:

- (1) $I(x)$ bzw. $I(a)$ ist schon definiert
- (2) $I(f(t_1, t_2, \dots, t_n)) = I(f)(I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_n))$

Interpretation der Formeln:

- (1) $P(t_1, t_2, \dots, t_n)$ gilt bei I genau dann, wenn $I(P)$ auf $I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_n)$ zutrifft bzw. $\langle I(t_1), I(t_2), \dots, I(t_n) \rangle \in I(P)$
- (2) $t_1 = t_2$ gilt bei I genau, dann wenn $I(t_1)$ mit $I(t_2)$ übereinstimmt
- (3) $\neg A$ gilt bei I , genau dann, wenn A bei I nicht gilt.
- (4) $(A \wedge B)$ gilt bei I genau dann, wenn A und B bei I gelten.
- (5) $(A \vee B)$ gilt bei I genau dann, wenn A oder B bei I gelten.
- (6) $(A \rightarrow B)$ gilt bei I genau dann, wenn mit A auch B bei I gilt.
- (7) $(A \leftrightarrow B)$ gilt bei I genau dann, wenn (A gilt bei I genau, dann wenn B bei I gilt) .
- (8) $\exists x A$ gilt bei I genau dann, wenn A gilt bei I_x^d für wenigstens ein d aus D .
- (9) $\forall x A$ gilt bei I genau, dann wenn A bei I_x^d für alle d aus D gilt.

2.3.2. Resolutionskalkül

¹⁴ A ist eine Formel

Um das logische Schließen in Form der Resolution nach John Robinson [Robinson 65] zu benutzen, ist es nötig, dass die Formeln in einer bestimmten Form vorliegen, der sog. *Klauselform*. Einige Definitionen sind erforderlich:

Def.: *Literal*

Atomare Formeln sowie ihre Negate heißen *Literale*.

Def.: *Klausel*

Eine Disjunktion von Literalen heißt *Klausel*.

Def.: *äquivalent*

Zwei Formeln A und B heißen *äquivalent*, wenn bei jeder Interpretation entweder A und B gelten oder A und B nicht gelten.

Def.: *Modell*

Eine Interpretation, die eine Formel A wahr macht, heißt auch *Modell* von A .

Def.: *erfüllbar*

Eine Formel A heißt erfüllbar, wenn es ein Modell von A gibt.

Def.: *erfüllbarkeitsäquivalent*

Zwei Formeln A und B heißen *erfüllbarkeitsäquivalent*, wenn A genau dann erfüllbar ist, wenn B erfüllbar ist¹⁵.

Def.: *Folgerung*

Eine Formel A folgt aus einer Formelmenge M (geschrieben $M \models A$) wenn gilt:
Jedes Modell von M ist auch ein Modell von A.

Es ist möglich, jede beliebige prädikatenlogische Formel in eine erfüllbarkeitsäquivalente Klauselform zu überführen (s. [Nilsson 82], [Rich 88], [Konrad 01] für ausführliche Beschreibungen und Beispiele der Überführung von Formeln in klauselform) . Dabei werden verschiedene Äquivalenzumformungen zur Beseitigung von „ \rightarrow “ und „ \leftrightarrow “, zur Verschiebung der Negationszeichen direkt vor die Prädikatssymbole sowie zur Vermeidung von Namens- bzw. Bindungskonflikten angewendet. Zusätzlich müssen in der Formel evtl. vorkommende Existenzquantoren eliminiert werden. Dies wird durch die Bildung der erfüllbarkeitsäquivalenten *Skolem-Form* erreicht. Steht der Existenzquantor dabei im Bindungsbereich von Allquantoren, so

¹⁵ Hierbei ist es wichtig festzuhalten, dass es nicht nötig ist, dass es eine Interpretation gibt, die gleichzeitig A und B wahr macht (in diesem Fall wird auch von Erfüllbarkeitsverbundenheit gesprochen) . Es wird nur gefordert, dass es eine Interpretation gibt, die A wahr macht sowie eine (möglicherweise andere), die B wahr macht.

wird jedes Vorkommen der existenzquantifizierten Variable durch eine Funktion, die von den allquantifizierten Variablen abhängt, ersetzt. Im einfachsten Fall – wenn keine Allquantoren vorkommen – erfolgt die Ersetzung durch eine (Skolem-)Konstante.

Aus den einzelnen Teilen einer Formel in konjunktiver Normalform (Teilformeln durch „ \wedge “ verbunden) entsteht jeweils eine Klausel. In der Klauselform sind die Allquantoren per Konvention weggelassen, was bedeutet, dass alle Variablen allquantifiziert sind.

Für die Resolution weiterhin notwendig ist die *Substitution* von Variablen durch Terme und die *Unifikation* von Literalen:

Eine Substitution α ist eine Menge von geordneten Paaren der Form $(Term, Variable)$. Wird eine Substitution auf eine Menge von Klauseln angewendet, so wird für die Variablen der entsprechende Term eingesetzt. Sei z.B. $\alpha = \{ (a,x), (b,y) \}$ und $K = \{ P(x) \vee Q(b), Q(a) \vee Q(y), R(z) \}$,

so ist nach der Substitution $K_\alpha = \{ P(a) \vee Q(b), Q(a) \vee Q(b), R(z) \}$.

Ist die entstehende Menge nach der Substitution zu einer Einer-Menge zusammengefallen, so wird diese Substitution Unifikator genannt und man sagt, dass sich die Ausdrücke *unifizieren* lassen.

Z.B. lassen sich folgende drei Literale unifizieren:

$$\{ P(x, y, z), \quad P(a, f(w), z), \quad P(a, f(g(b)), h(a, b, c)) \} \quad \text{denn nach}$$

Anwendung der Substitution $\{ (a,x), (f(g(b)), y), (h(a,b,c),z), (g(b),w) \}$ auf alle drei Elemente entsteht die Menge

$$\{ P(a, f(g(b)), h(a, b, c)) \} .$$

Nicht unifizierbar sind z.B. $\{ P(a), P(b) \}$ sowie $\{ P(x), P(a), Q(x), Q(b) \}$ oder $\{ P(x), P(f(x)) \}$, da bei allen möglichen Substitutionen Mengen mit einer Kardinalität größer als eins entstehen. Mit den bisher eingeführten Begriffen lässt sich definieren, wann eine Klausel wahrheitserblich aus zwei (Eltern-)Klauseln resolviert werden kann.

Für diese Definition werden die Klauseln als Menge von Literalen geschrieben, d.h. eine Klausel $K = L_1 \vee L_2 \vee \dots \vee L_n$ als Menge $\{ L_1, L_2, \dots, L_n \}$.

Dann wird definiert:

Def.: *Resolution*

Seien $R = \{ R_1, R_2, \dots, R_n \}$ und $S = \{ S_1, S_2, \dots, S_n \}$ zwei Klauseln (Elternklauseln) und

$R' \subseteq R$ sowie $S' \subseteq S$ so dass eine Substitution α existiert, so dass R'_α aus nur einem Literal

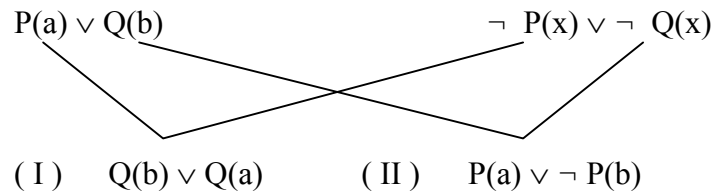
besteht und S'_α aus nur einem Literal besteht, welches die Negation des Literals in R'_α ist,

dann *resolvieren* R und S und die *Resolvente* (Kindklausel) ist

$K = (R - R')_\alpha \cup (S - S')_\alpha$. Der Vorgang der Resolventenbildung heißt *Resolution*.

Die Resolution wird anschaulich oft durch einen *Resolutionsgraphen* dargestellt, in dem die Resolventen über Kanten mit ihren Elternklauseln verbunden sind.

Beispiel:



In diesem Beispiel gibt es zwei Resolventen:

bei (I) ist $\{ P(a) \} \subseteq \{ P(a), Q(b) \}$ und $\{ \neg P(x) \} \subseteq \{ \neg P(x), \neg Q(x) \}$ und $\alpha = \{ (a,x) \}$ die Substitution, so dass $\{ P(a) \}_\alpha = P(a)$ die Negation von $\{ \neg P(x) \}_\alpha = \neg P(a)$ ist.

Bei (II) ist $\{ Q(b) \} \subseteq \{ P(a), Q(b) \}$ und $\{ \neg Q(x) \} \subseteq \{ \neg P(x), \neg Q(x) \}$ und $\alpha = \{ (b,x) \}$ die Substitution, so dass $\{ Q(b) \}_\alpha = Q(b)$ die Negation von $\{ \neg Q(x) \}_\alpha = \neg Q(b)$ ist.

Eine besondere Klausel ist die sog. leere Klausel „ \square “. Bei dieser Klausel ist die Menge der Literale, aus denen sie besteht, leer und sie hat immer den Wahrheitswert „falsch“. Bei einer unerfüllbaren Menge von Klauseln (d.h. einer Menge ohne Modell), lässt sich durch fortgesetzte Resolventenbildung unter Einbeziehung der Elemente der Menge sowie der bereits erzeugten Kindklauseln beliebiger Generationen die leere Klausel ableiten (generieren). Dies wird als Resolutionstheorem bezeichnet:

Resolutionstheorem [Konrad 01] :

Eine Klauselmenge M ist genau dann unerfüllbar, wenn sich die leere Klausel „ \square “ aus M ableiten lässt (Korrektheit und Vollständigkeit des Resolutionskalküls).

Beispiel :

Die Menge $\{ P(a), Q(b), R(b), \neg P(x) \vee \neg Q(y) \vee \neg R(z) \}$ ist unerfüllbar, denn

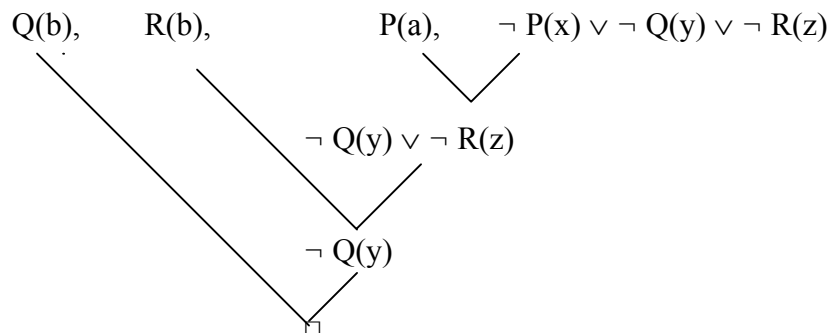


Abbildung 12: Herleitung der leeren Klausel aus einer unerfüllbaren Menge

Die Resolution ist eine für maschinelle Bearbeitung des logischen Schließens besonders geeignete Form, da nur eine einzige Ableitungsart (die Resolventenbildung) benutzt wird. Ob eine Formel aus einer Formelmenge *folgt*, lässt sich durch Resolution über folgenden Zusammenhang feststellen :

Sei A eine Formel und M eine Formelmenge, dann folgt A aus M (geschrieben $M \models A$), wenn gilt, dass die Menge $M \cup \{ \neg A \}$ unerfüllbar ist, d.h. sich daraus die leere Klausel ableiten lässt:

$$M \models A \text{ genau dann, wenn } (M \cup \{ \neg A \}) \models \square$$

Abbildung 13: Folgerung in der Prädikatenlogik der ersten Stufe

Über diesen Zusammenhang können automatisiert Fragen nach der Gültigkeit einer Formel (Anfrage A) beantwortet werden, indem aus den gegebenen Voraussetzungen (M) und der negierten Anfrage ($\neg A$) die leere Klausel resoliert wird. Dies ist die logische Grundlage der Inferenz vieler Expertensysteme und die Grundlage der Programmiersprache Prolog (diese Sprache wird zur Implementierung der Expertensysteme in dieser Arbeit verwendet).

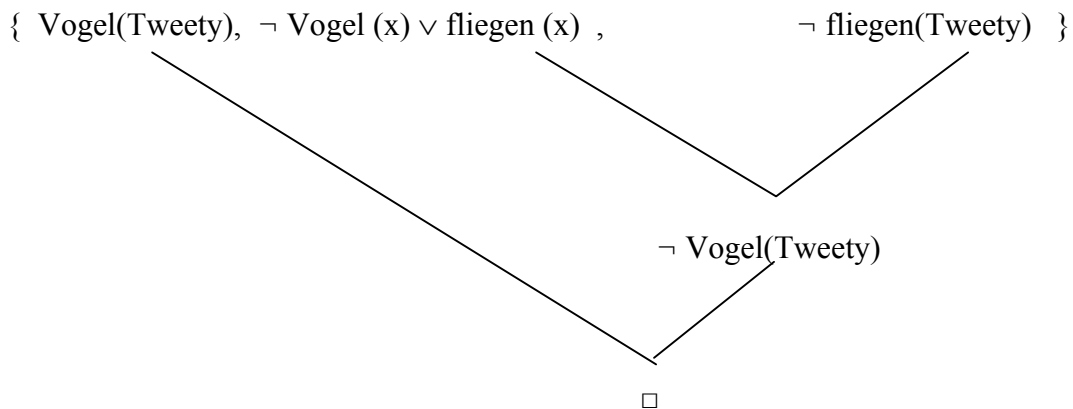
Beispiel:

Voraussetzungen M :

$\{ \forall x (\text{Vogel}(x) \rightarrow \text{fliegen}(x)), \text{Vogel}(\text{Tweety}) \}$ (Alle Vögel können fliegen und Tweety ist ein Vogel)

Anfrage: Kann Tweety fliegen ?

Herleitung der Antwort :



Antwort : Ja, Tweety kann fliegen.

Ja/Nein-Fragen können auf diese Weise beantwortet werden, sobald die leere Klausel abgeleitet ist; zur Beantwortung von „Wer“- bzw. „Was“-Fragen wird der bisher vorgestellte Kalkül um das sog. Greensche Antwortprädikat erweitert. In diesem Fall wird die negierte Anfrage disjunktiv um das Literal „ANS(X)“ erweitert, was bedeutet, dass alle Objekte der Welt, die die Bedingungen der Anfrage erfüllen, eine Lösung darstellen. Wird bei der Resolution eine Klausel resoliert, die nur aus dem Literal „ANS(...)“ besteht, entspricht dies der Herleitung der leeren Klausel ohne Greenschem Antwortprädikat, d.h. der positiven Beantwortung der Frage. Da die Variable im Argument von ANS bei der Resolution ebenfalls durch die passenden Terme

substituiert wird, kann das Ergebnis der „Wer“-Frage, also ein Objekt der Welt, welches die geforderte Bedingung erfüllt, abgelesen werden.

Beispiel :

Voraussetzungen M :

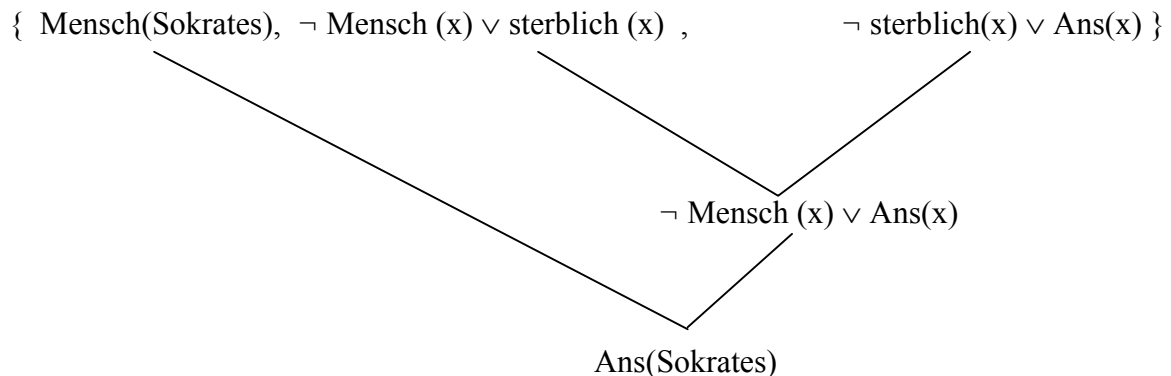
$\{ \forall x (\text{Mensch}(x) \rightarrow \text{sterblich}(x)), \text{Mensch}(\text{Sokrates}) \}$ (Alle Menschen sind sterblich und Sokrates ist ein Mensch)

Anfrage: WER ist sterblich ?

Negiert und mit Greenschem Antwortprädikat :

$\neg \text{sterblich}(x) \vee \text{Ans}(x)$

Herleitung der Antwort :



Antwort : Sokrates ist sterblich.

Diese Antwort muss so interpretiert werden, dass Sokrates *ein* Objekt ist, das die geforderten Bedingungen erfüllt. Ob es weitere Antworten gibt, kann aus dieser Lösung nicht abgelesen werden.

2.3.3. Zusammenhang zwischen Prädikatenlogik und Prolog

Die logische Programmiersprache Prolog (PROgramming in LOGic) ermöglicht es, konkrete Programme auf einem Computer zu schreiben und ablaufen zu lassen, die in der Programmierung und im Programmablauf auf der Formalisierung und der Resolution der Prädikatenlogik der 1. Stufe basieren. Die Grundidee von Prolog ist die *deskriptive* Programmierung, d.h. der Programmierer soll das *Problem beschreiben* (und nicht den Lösungsweg angeben). Dies ist mit Prolog aber nur näherungsweise erreicht, d.h. Kenntnisse über Art und Ablauf der Resolution sind nötig um z.B. Endlosschleifen zu vermeiden. Ein Prolog-Programm besteht aus der Angabe von Klauseln (Fakten und Regeln), wobei die Anordnung für die Programmabarbeitung relevant ist: die Benutzung möglicher Klauseln erfolgt in der Reihenfolge von oben nach unten und von links nach rechts. Die Abarbeitung eines Prolog-Programmes durch den Prolog-Interpreter entspricht dem Versuch durch Resolution

herzuleiten, dass die Startklausel aus der Menge der Voraussetzungen (dem Programm einschl. Build-In-Prädikaten) logisch folgt. Dieser Zusammenhang zwischen der Prädikatenlogik und Prolog soll hier nur kurz an folgendem Beispiel demonstriert werden, für eine ausführliche Beschreibung s. z.B. [Kleine-Büning et al. 86].

Beispiel:

Prolog-Programm:	Prädikatenlogik
<p>$p(a) :-$</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-left: 40px;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 100px; margin: 0 10px;"></div> <div style="display: flex; flex-direction: column; justify-content: space-around; align-items: center;"> <p>$q(b),$</p> <p>$r(c),$</p> <p>$s(d).$</p> </div> <p style="margin-left: 10px;">Regeln</p> </div>	<p>die Regel links entspricht der Formel:</p> $p(a) \leftarrow q(b) \wedge r(c) \wedge s(d) \quad .$ <p>in Klauselform: $p(a) \vee \neg q(b) \vee \neg r(c) \vee \neg s(d) \quad .$</p>
<p>$q(b).$</p> <p>$r(c).$</p> <p>$s(d).$</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-left: 40px;"> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; height: 100px; margin: 0 10px;"></div> <p style="margin-left: 10px;">Fakten</p> </div>	<p>Alle Voraussetzungen und die negierte Anfrage:</p> $\{ p(a) \vee \neg q(b) \vee \neg r(c) \vee \neg s(d), q(b), r(c), s(d), \neg p(a) \}$
<p>Anfrage:</p> <p>?- $p(a).$</p> <p>Da der Regelkopf $p(a)$ gefunden wird, werden als neue Teilziele $q(b), r(c), s(d)$, die den Regelrumpf darstellen, gesucht. Da diese alle als Fakten gefunden werden, kann die Anfrage positiv beantwortet werden.</p>	
<p>Antwort:</p> <p>Yes.</p>	<p>Also folgt $p(a)$ aus</p> $\{ p(a) \vee \neg q(b) \vee \neg r(c) \vee \neg s(d), q(b), r(c), s(d) \}$

3. Erklärungsfähigkeit

3.1. Einführung in Erklärungen

3.1.1. Erklärungen innerhalb der Prädikatenlogik der ersten Stufe

Zunächst wird definiert, was unter einer Erklärung verstanden werden soll.

Es wird die Definition von [Ginsberg 93, Kapitel 18, Seite 390] übernommen:

Definition Expertenerklärung :

Bei einer gegebenen Ausgangsmenge A ist eine Expertenerklärung einer Formel f eine minimale Menge E von Formeln, die die folgenden Eigenschaften besitzt:

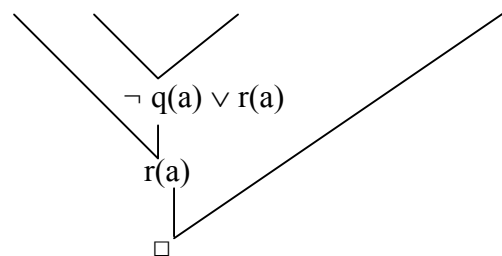
1. $E \models f$ (die Formel, die erklärt werden soll, folgt aus dieser Expertenerklärung)
2. $A \models E$ (die Expertenerklärung folgt aus der Ausgangsmenge)
3. Es gibt eine Teilmenge $A' \subseteq A$, so dass $A' \models f$, aber $A' - E \not\models f$.

Wegen der dritten Forderung muss E mindestens ein Element aus A enthalten, daher ist z.B. die Menge $\{f\}$, die nur die zu erklärende Formel enthält, keine Expertenerklärung für f .

Beispiel (s. auch ausführliche Beispiele in Kap. 4.4.2):

Gegeben sei die Menge $M = \{ p(a), q(a), \forall x (p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)) \}$.

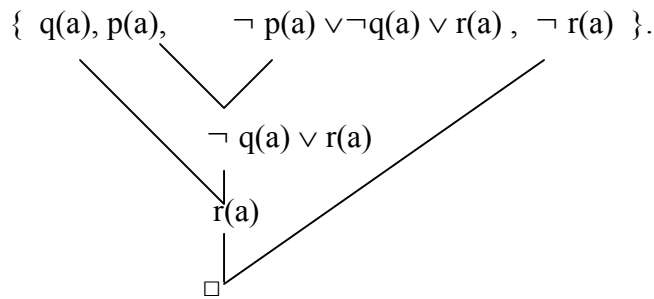
Es gilt $M \models r(a)$, denn $\{ q(a), p(a), \neg p(x) \vee \neg q(x) \vee r(x), \neg r(a) \}$.



Eine Expertenerklärung von $r(a)$ ist z.B. $E = \{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \}$, denn

1. $\{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \} \models r(a)$

Beweis:



$$2. M \models \{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \}$$

Beweis: $p(a), q(a) \in M$ und $(p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a))$ ist ein Spezialfall von $\forall x (p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x))$.

3. Es gibt eine Teilmenge $M' \subseteq M$, so dass $M' \models r(a)$, aber $M' - \{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \} \not\models r(a)$.

Beweis:

Sei $M' = M$, dann $M' \models r(a)$ (s. 1.), aber

$$M' - \{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \} = \{ \forall x (p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)) \} \not\models r(a).$$

Darüber hinaus ist die Menge $\{ p(a), q(a), p(a) \wedge q(a) \rightarrow r(a) \}$ minimal, da alle Elemente zur Resolvierung von $r(a)$ benutzt werden mussten.

Betrachtet man diese Expertenerklärung, so fällt auf, dass es sich nicht um eine Teilmenge von M handelt. Eine andere Expertenerklärung ist $E' = \{ p(a), q(a), \forall x (p(x) \wedge q(x) \rightarrow r(x)) \}$ (Beweis analog) mit der Eigenschaft, dass $E' \subseteq M$ ist (in diesem Fall sind beide Mengen identisch). Eine solche Expertenerklärung (die minimale Prämissenmenge der Wissensbasis, aus denen die zu erklärende Aussage folgt) wird in [Reiner 91] als „Grund“ bezeichnet, und es wird empfohlen, als Erklärung die kommentierte Folge von Ableitungsschritten auszugeben.

Wegen der Korrektheit des Prädikatenkalküls [Hermes 72] gilt, dass für jede korrekte Ableitung einer Konklusion K aus einer Menge von Voraussetzungen M ($M \vdash K$), gilt, dass diese Ableitung auch tatsächlich aus dieser Menge folgt ($M \models K$).

Daher kann für jeden beliebigen Ableitungsschritt (Modus Ponus, Modus Tollens,...) durch Angabe genau der benutzten Voraussetzungen eine Expertenerklärung für die Herleitung gegeben werden (da die Formelmenge, aus denen die Herleitung folgt eine Expertenerklärung ist, s.o.).

Wenn $M \vdash_R K$ (K wird gemäß Regel R aus M abgeleitet)

So ist $M_R \vdash_K$ (der Teil von M , der benutzt wurde, um K mittels R herzuleiten) eine Expertenerklärung von M .

Dies wird an einem zweiten Beispiel erläutert, in dem eine Ableitung unter Benutzung des Modus Tollens vollzogen wird:

Sei $M = \{ q(a) \rightarrow r(a), \neg r(a), s(b), t(c) \}$ gegeben, so kann mittels Modus Tollens auf $\neg q(a)$ geschlossen werden.

Die zur Herleitung benutzten Elemente von M sind $E = \{ q(a) \rightarrow r(a), \neg r(a) \}$, da diese die Voraussetzung der Anwendung des Modus Tollens (in allgemeiner Form $A \rightarrow B, \neg B \vdash \neg A$) ermöglichen.

Diese Menge E ist eine Expertenerklärung für die Herleitung $\neg q(a)$, da

1. $E \models \neg q(a)$ (da die Anwendung des Modus Tollens innerhalb der Prädikatenlogik korrekt ist)
2. $M \models E$ (E ist Teilmenge von M)
3. Es gibt eine Teilmenge $M' \subseteq M$, so dass $M' \models \neg q(a)$, aber $M' - E \not\models \neg q(a)$.
(Für $M' = M$ gilt $M' \models \neg q(a)$, aber $\{ s(b), t(c) \} \not\models \neg q(a)$.)

Für Ableitungsschritte nach beliebigen korrekten Regeln können einzelne Expertenerklärungen gegeben werden. Eine Ableitungsfolge kann dann als Folge dieser Expertenerklärungen beschrieben werden. Dadurch wird die Definition von [Ginsberg 93] mit der Forderung aus [Reiner 91] kombiniert (in Kap. 3.3. werden beide in die weitergehende Definition der Erklärungskommentare integriert).

3.1.2. Erklärungsfähigkeit konventioneller Expertensysteme

Die Fähigkeit von Expertensystemen, ihre Schlussfolgerungen erklären zu können, ist essentiell (vgl. [Buchanan & Shortlife 84], [Konrad 90]). Von ihr hängt ab, ob das System überhaupt verwendet werden wird [Buchanan & Shortlife 84, Kapitel 34, Seite 651] :

„Das System sollte in der Lage sein, seine Lösungen verständlich und überzeugend zu rechtfertigen¹⁶. (...) Ein System, das dogmatisch Ratschläge erteilt, wird im allgemeinen zurückgewiesen werden.“

¹⁶ Der Begriff „rechtfertigen“ ist hier nicht im Sinne des nichtmonotonen Schliessens (vgl. Kap. 6) zu verstehen.

Die Erklärungskomponente kann neben der Erklärung der Lösung allgemeine Erklärungen zu Fragen zum Problembereich, Fachbegriffen oder der Notwendigkeit, warum die eine oder andere Frage beantwortet werden muss, liefern, d.h. auf typische Fragen der Form

- "Wie" („Wie wurde die Lösung gefunden?“)
- "Warum" („Warum muss eine bestimmte Information eingegeben werden?“)
- "Warum nicht" („Warum ist etwas keine Lösung?“)
- "Was ist ... " („Was bedeutet ein bestimmter Fachbegriff?“)
- "Was wäre, wenn" („Welche Lösung würde gefunden werden, wenn statt der eingegebenen Information eine andere eingegeben werden würde?“).

Abbildung 14: Typische Fragen an eine Erklärungskomponente

Die Erklärung der Regeln (oder allgemeiner : der Inferenz), die zu der entsprechenden Lösung geführt haben, ist dabei im Allgemeinen von entscheidendem Interesse und in jeder Erklärungskomponente vorgesehen (die anderen Erklärungsfähigkeiten können vorhanden sein oder auch fehlen). Die Wichtigkeit, aber auch die Schwierigkeit, diese Erklärung zu geben, wurde von E. Feigenbaum bereits 1977 auf der International Joint Conference on Artificial Intelligence betont [Feigenbaum 77]¹⁷. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt muss festgestellt werden, dass immer noch unklar ist, wie Erklärungskomponenten zu entwickeln sind, die dem Benutzer tatsächlich in allen möglichen Fällen und bei allen denkbaren Fragen eine umfassende, verständliche und verlässliche Erklärung liefern. Alle nachfolgend vorgestellten Ansätze stellen Vorschläge, aber keine allgemein akzeptierte Methodologie dar.

Am weitesten verbreitet sind die folgenden zwei Ansätze:

1. die Ausgabe von vorbereitetem Text („canned text approach“) und
2. die Erklärung durch ein spezielles Übersetzungsmodul.

Bei der Ausgabe von vorbereitetem Text („canned text approach“) kann nicht sichergestellt werden, dass der ausgegebene Text *tatsächlich* die Vorgehensweise des Systems erklärt - z.B. könnte eines von beiden geändert worden sein, wodurch Inkonsistenzen möglich sind. Außerdem muss jede denkbare Frage zur Entwicklungszeit vorhergesehen werden, damit ein entsprechender Erklärungstext vorbereitet werden kann. Dieser Ansatz wird aber vermutlich immer mindestens in Kombination mit anderen Ansätzen sinnvoll sein, z.B. bei der Erklärung von Fachbegriffen

¹⁷ Diese Konferenz hat besondere Bedeutung erlangt als Zeitpunkt, in der sich das „knowledge principle“ durchgesetzt hat, also die Abkehr von der Entwicklung von allgemeinen Problemlösern und die Hervorhebung der Bedeutung des anwendungsspezifischen Wissens.

o.ä.. Es erscheint jedoch fraglich, ob eine hinreichende Erklärung ausschließlich dadurch realisierbar ist.

Bei der Erklärung durch ein spezielles Übersetzungsmodul, das die tatsächlich verwendeten Regeln bzw. den tatsächlich verwendeten Code in eine dem Nutzer verständliche Form übersetzt, können bei der Erklärung keine Inkonsistenzen zu den Systemregeln entstehen. So können in MYCIN Regeln in (Pseudo-)Englisch übersetzt werden:

Rule 009

```
Premise: ($AND(SAME CNTXT GRAM GRAMNEG)
              (SAME CNTXT MORH COCCUS))
Action: (CONCLUDE CNTXT IDENTITY NEISSERIA TALLY 800)

IF 1.) The gram stain of the organism is gramneg, and
    2.) The morphology of the organism is coccus

THEN: There is strongly suggestive evidence (.8) that the identity
      of the organism is Neisseria
```

Abbildung 15: Lisp-Regel und pseudoenglische Übersetzung in MYCIN¹⁸

Während der Erklärung kann sich der Benutzer von den Schlussfolgerungen ausgehend rückwärts bis zu den gegebenen Voraussetzungen die verketteten Regeln ausgeben lassen, wie das folgende Beispiel demonstriert (Eingaben des Benutzers sind fettgedruckt).

Der Dialog beginnt mit der Frage, ob der Patient Empfänger einer Organspende ist (*compromised host*), denn wenn er das nicht ist, ist er nicht immunsupprimiert (*immunosuppressed*) und hat keine Kortikosteroide (*corticosteroids*) erhalten. Bei Immunsupprimiertheit und Einnahme von Kortikosteroiden besteht die Gefahr von Infektionen z.B. durch die Bakterien *Echericha coli* (*e.coli*), *Klebsiella pneumoniae* (*klebsiella-pneumoniae*) oder *Pseudomonas aeruginosa* (*pseudomonas-aeruginosa*). Bemerkenswert ist zusätzlich, dass MYCIN die Eingaben wiederholt, so wie es sie verstanden hat, um Missverständnisse zu vermeiden ([Buchanan & Shortlife 84], Seite 533) :

¹⁸ Abbildungen, in denen die Fähigkeit eines Systems natürlichsprachlichen Text zu generieren eine Rolle spielen, werden nicht ins Deutsche übersetzt, um dem Leser die Möglichkeit zu geben, die Güte dieser Texte selbst einschätzen zu können.

23) Is J. Smith a compromised host ?
**** Why**
[i.e. Why is it important to determine whether J. Smith is a compromised host ?]
[3.0] This will aid in determining whether J. Smith is immunosuppressed.

If
[3.1.] J. Smith is not a compromised host
then
it is definite (1.0) that J. Smith is not immunosuppressed
[Rule 343]
[back to question 23...]
**** Why**
[i.e. Why is it important to determine whether J. Smith is immunosuppressed ?]
[4.0] ... in order to determine whether J. Smith has received corticosteroids.

If
[4.1] J. Smith is not immunosuppressed
then
it is definite (1.0) that J. Smith has not received corticosteroids.
[Rule 395]
[back to question 23...]
**** Why**
[i.e. Why is it important to determine whether J. Smith has received corticosteroids?]
[5.0] ... in order to determine the organism causing the infection.

It has already been established that
[5.1.] the infection which requires therapy is meningitis, and
[5.2.] only circumstantial evidence is available for this case, and
[5.3.] the type of meningitis is bacterial.
Therefore if
[5.4] J. Smith is receiving corticosteroids
then
there is evidence that the organism causing the infection are:
e.coli (.4), klebsiella-pneumoniae (.2) or pseudomonas-aeruginosa (.1)
[Rule 543]
[back to question 32...]
****No**

Abbildung 16: Erklärungen aus MYCIN

Bei der Übersetzung der tatsächlich verwendeten Regeln ist es fraglich, ob eine generierte Erklärung eine für den Nutzer hinreichende Qualität haben kann. Insbesondere, ob es immer möglich ist, automatisiert zwischen den für den Benutzer irrelevanten z.B. implementierungsspezifischen Details und den für die Erklärung entscheidenden Prinzipien zu unterscheiden. Außerdem handelt es sich bei Regeln oft um sog. „kompiliertes Wissen“, d.h. in einer Regel, die von einem menschlichen Experten formuliert wurde, ist Wissen festgehalten, aber das System hat nicht das Wissen, *warum* die Regel in dieser Form gilt bzw. welche tieferen Zusammenhänge hinter der Regel stehen.

Beispiel:

Ein System enthalte
folgende Regeln :

...
Regel 5: $A \rightarrow B$

...
Regel 9: $B \rightarrow C$

...
Regel 33: $C \rightarrow D$

...

Eingabe : Es wurde A beobachtet.
Gilt D ?

Ausgabe : Ja. Erklärung: A wurde beobachtet.
 Wegen Regel 5 $A \rightarrow B$ gilt B.
 Wegen Regel 9 $B \rightarrow C$ gilt C
 Wegen Regel 33 $C \rightarrow D$ gilt D.

Bei dieser Erklärung sind zwei Fälle zu unterscheiden:

1. der Benutzer kennt und akzeptiert die Regeln 5, 9 und 33.
In diesem Fall ist die Erklärung für ihn vollständig und akzeptabel.
2. der Benutzer ist nicht davon überzeugt, dass diese Regeln gelten. Für eine vollständige Erklärung würde nun die zusätzliche Erklärung fehlen, *warum* diese Regeln gelten. Dieses sog. „tiefe Wissen“¹⁹ besitzen Expertensysteme aber oft nicht, besonders, wenn heuristische Regeln an Hand von Schätzungen von menschlichen Experten erstellt wurden. Die Erklärung ist somit nicht vollständig.

Wenn ein Expertensystem zu Schulungszwecken verwendet werden soll, wird der Nachteil des „kompilierten Wissens“ besonders deutlich, wie das folgende Beispiel, das Clancey und Letsinger in [Clancey & Letsinger 81] darstellen :

Stellt das System MYCIN nacheinander folgende Fragen :

1. Gibt es eine Infektion ?
- (wenn ja) 2. Ist es Meningitis ?
- (wenn ja) 3. Ist es bakteriell ?
- (wenn ja) 4. Ist es diplococcus-pneumoniae ?

So handelt es sich um einen Diagnostik-Vorgang, der nach einer bestimmten, bewährten Strategie

¹⁹ Im Bereich der Verteilten Künstlichen Intelligenz wäre dieses „tiefe Wissen“ besonders wertvoll, da es auch zur Konfliktlösung bei sich widersprechenden Teillösungen verwendet werden könnte sowie die Zuordnung von Teilproblemen zu Systemen verbessern könnte.

(der *establish & refine* – Methode) verfährt. Diese Strategie ist zwar im System durch die Entwickler implementiert, das System hat aber kein Wissen darüber, dass es auf diese Art und Weise vorgeht (und kann es dadurch auch nicht z.B. einem Studenten als empfehlenswerte Vorgehensweise erklären). Es gibt Ansätze, dieses „tiefe Wissen“, das nicht zur Inferenz, aber zur Erklärung benötigt wird, im System zur Verfügung zu stellen. Obige Autoren haben das System MYCIN im Hinblick auf den Einsatz als Lehr-System weiterentwickelt (NEOMYCIN) und versucht, das nötige Wissen u.a. durch die explizite Einführung von Meta-Wissen bereitzustellen.

Sie geben aber zu, dass sie das Vorgehen des menschlichen diagnostischen Schließens nicht vollständig nachvollziehen konnten und sehen den Grund darin, dass es bisher nicht vollständig verstanden ist, wie ein Experte sein Wissen organisiert, wie er mit Kontextwissen umgeht, wie Dringlichkeit, menschliche Wertvorstellungen u.a. in den Diagnosevorgang eingehen usw. In dem ab Kapitel 3.3. vorgestellten Ansatz zur Erklärung mittels Erklärungskommentaren wird das tiefe Wissen zumindest in Form von zusätzlichen Kommentaren (Textkonstanten) zur Verfügung gestellt. Da diese Kommentare als Textbausteine modular leicht austauschbar sind, können sie auch gut auf spezielle Situationen (z.B. Lehre) zugeschnitten werden. Sie können auch Internetverweise oder den verantwortlichen menschlichen Ansprechpartner enthalten und damit das weitere Recherchieren von Hintergrundwissen außerhalb des Systemverbundes unterstützen. Ein Grund, weshalb eine adäquate Erklärung vielfach schwierig zu geben ist, liegt auch darin, dass Entscheidungen auf reel-zahlenwertigen Ausgangsdaten beruhen (z.B. Blutdruck, Temperatur u.ä.), die nur grob vereinfachend in ein nachvollziehbares Entscheidungsmuster eingepasst werden können.

Einen der am weitestgehenden Ansätze, was die Bedeutung der Erklärung und deren Einfluss auf System und Systementwicklung betrifft, wird mit dem XPLAIN-Ansatz in [Swartout 83] vorgestellt. Statt der Entwicklung eines Expertensystems (wobei durch die Implementierung Wissen verloren geht) sollen Modelle des behandelten Bereiches und benutzte Prinzipien entwickelt werden. Das eigentliche Expertensystem soll daraus automatisch generiert werden. Die Erklärungskomponente hat Zugriff auf die zugrundeliegenden Modelle und kann dadurch Erklärungen liefern, die das „tiefe Wissen“ beinhalten.

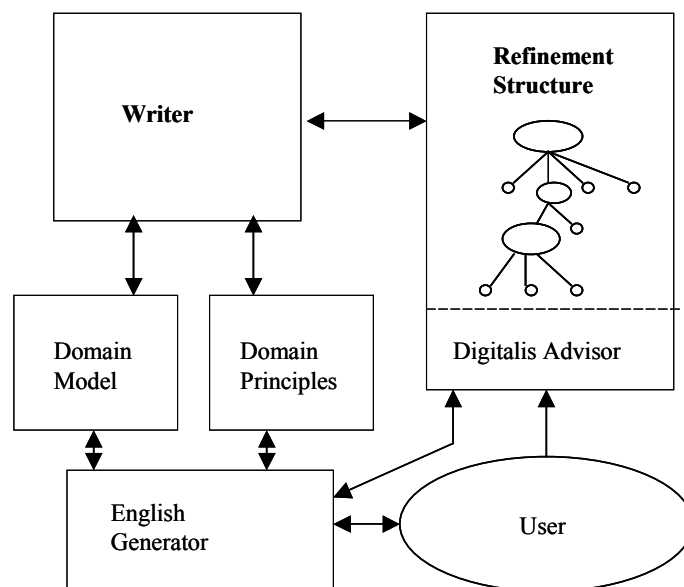


Abbildung 17: System XPLAIN [Swartout 83]

Der Autor hat diese Vorgehensweise an einem kleinen Beispiel demonstriert, in dem für die Beratung einer Digitalis-Therapie²⁰ überzeugende Erklärungen gegeben werden. Im folgenden Dialog geht es um die Digitalis-Toxizität. Ein verringerter Kaliumspiegel (*decreased serum potassium*) bewirkt eine erhöhte Automtizität (*increased automaticity*), d.h. Bereitschaft zu Herzrhythmusstörungen. Da ein zu hoher Digitalis-Spiegel ebenfalls die Automtizität erhöht, muss dann die Dosis gesenkt werden. Genauso muss bei einem erhöhten Kalziumspiegel (*increased serum calcium*) verfahren werden. Bemerkenswert ist, dass das System diese Analogie erkennt und in die Erklärung mit einbezieht.

Please enter the value of serum potassium: **why ?**

The system is anticipating digitalis toxicity. Decreased serum potassium causes increased automaticity, which may cause a change to ventricular fibrillation. Increased digitalis also causes increased automaticity. Thus, if the system observes decreased serum potassium, it reduces the dose of digitalis due to decreased serum potassium.

Please enter the value of serum potassium: **3.7**

Please enter the value of serum calcium : **why ?**

(The system produces a shortened explanation, reflecting the fact that it has already explained several of the causal relationships in the previous explanation. Also, since the system remembers that it has already told the user about serum potassium, it suggests the analogy between the two here).

The system is anticipating digitalis toxicity. Increased serum calcium also causes increased automaticity. Thus, (as with decreased serum potassium) if the system observes increased serum calcium, it reduces the dose of digitalis due to increased serum calcium.

Please enter the value of serum calcium: **9**

.

Abbildung 18: Ausschnitt einer mit XPLAIN generierten Erklärung aus [Swartout 83]

Ob sich ein Ansatz, der die automatische Generierung von Expertensystemen beinhaltet, allgemein als Entwicklungsmethode realisieren lässt, müsste von Swartout aber noch gezeigt werden.

Untersucht man die Effektivität menschlicher Erklärungen, stellt man fest, dass ein Bezug zu bereits gegebenen Erklärungen wesentlicher Bestandteil ist (Verweise, Hinweise auf Analogien etc.). Auch in maschinell generierten Erklärungen können dadurch in begrenztem Umfang Verbesserungen der Qualität von Erklärungen erzielt werden [Moore 93].

Besteht die Lösung eines Problems darin, dass sich mehrere Teilnehmer eines Prozesses einigen müssen, kann die Erklärung auch Teil des kooperativen Lösungsprozesses sein [Karsenty & Brezillon 94]. Teilergebnisse werden dann etabliert, wenn ihre Erklärung von allen Teilnehmern akzeptiert wird.

Übereinstimmend wird in der Literatur festgehalten, dass die Tatsache, für wen eine Erklärung bestimmt ist, Einfluss auf deren Gestaltung haben sollte. Stehen dem System Informationen über

²⁰ Medikamentierung gegen Herzinsuffizienz und Herzrhythmusstörungen

das (Vor-)Wissen des Benutzers zu Verfügung, so kann das Niveau der Erklärung dahingehend angepasst werden.

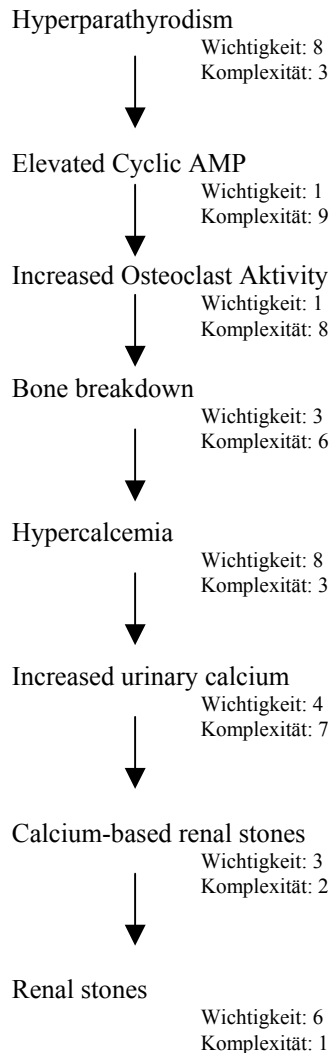
MYCIN bezieht die Fähigkeiten des Benutzers in die Generierung der Erklärung mit ein.

Je nach Fähigkeiten werden verschieden detaillierte Erklärungen einer Schlussfolgerungskette gegeben. Dazu sind die Knoten der Schlussfolgerungskette mit Faktoren für ihre Wichtigkeit und ihre Komplexität bewertet sowie der Benutzer durch einen Zahlenwert in seiner Kompetenz eingeschätzt (diesen Wert gibt er selbst ein). Die Ausgabe der Schlussfolgerungen wird an Hand dieser Werte dem Niveau des Benutzers angepasst²¹; ist dem Benutzer die Ausgabe zu unpräzise, kann er durch Eingabe von "More Detail" den Detailgrad bei der Ausgabe aber auch stufenweise erhöhen. Folgendes Beispiel demonstriert die Generierung der angepassten Erklärung:

Hyperparathyroidismus (*hyperparathyroidism*), eine Überfunktion der Polkörper der Schilddrüse, bewirkt eine zu hohe Ausschüttung des Parathormons. Dies führt an den knochenabbauenden Zellen (Osteoklast, *osteoclast*) zu einer Erhöhung des zyklischen AMP (Adenosinmonophosphat), was zu einer erhöhten Aktivität dieser Zellen mit einem erhöhten Knochenabbau führt (*bone breakdown*). Der erhöhte Knochenumsatz führt zu einem erhöhten Kalziumspiegel im Blut (Hypercalcämie, *hypercalcemia*). Dies kann zu Nierensteinen (*renal stones*) führen (verkürzt aus [Buchanan & Shortliffe 84], S. 379 ff.):

²¹ Die genaue Zuordnung ist recht komplex und wird daher hier nicht im Detail dargestellt. Die Tatsache, dass ausführlichere bzw. vereinfachte Erklärungen gegeben werden, soll zur Demonstration genügen.

Schlussfolgerungen:



Beispieldialoge:

1.)

** Expertise 3 [Benutzer schätzt sich auf einer Skala von 1-10 (10 Experte) ein]

** How does Hyperparathyroidism cause renal stones ?

Renal stones are caused by hypercalcemia
Hypercalcemia is caused by
Hyperparathyroidism

** More Detail

Renal stones are caused by increased urinary calcium
Increased urinary calcium is caused by
hypercalcemia
Hypercalcemia is caused by
increased bone breakdown
Increased bone breakdown is
caused by
hyperparathyroidism

2.)

** Expertise 6

** How does Hyperparathyroidism cause renal stones ?

Renal stones are caused by increased urinary calcium
Increased urinary calcium is caused by
hypercalcemia
Hypercalcemia is caused by
increased bone breakdown
Increased bone breakdown is
caused by increased osteoclast
activity
Increased osteoclast
activity is caused by
hyperparathyroidism

Abbildung 19: Erklärung der Schlussfolgerungen in Abhängigkeit der Expertise des Benutzers in MYCIN

Die Einschätzung des Wissen des Benutzers kann auch während der Benutzung des Systems erweitert werden. Direkte Schlussfolgerungen , die das System über das Wissen des Benutzers während des Dialoges ziehen kann, sind in [Cawsey 93] zusammengefasst :

Dialog	Herleitung
System gibt X aus, Benutzer bestätigt.	Benutzer weiß X vielleicht.
System fragt Benutzer X, Benutzer antwortet korrekt.	Benutzer weiß X
System fragt Benutzer X, Benutzer antwortet inkorrekt.	Benutzer weiß X nicht.
System fragt Benutzer, ob es X weiß.	Je nach Antwort.
Benutzer fragt X.	Benutzer weiß X nicht.

Abbildung 20: Direkte Regeln für die Verbesserung des Benutzermodells aus [Cawsey 93].

Für die Wartung der Wissensbasis durch den Wissensingenieur ist die Erklärung durch Ausgabe der verketteten Regeln eine wichtige Hilfe für die Überprüfung der Korrektheit der Inferenz. Hier ist es von Vorteil, wenn die Erklärung eng mit der Inferenz verflochten ist. Soll ein Benutzer jedoch von der Richtigkeit der gefundenen Lösung des konkreten Anwendungsfalles überzeugt werden, geht es nicht primär darum, den Prozess der Lösungsfindung transparent zu machen, sondern vor allem darum, den Benutzer von der Richtigkeit der Lösung durch Angabe von Gründen zu überzeugen. Dies kann losgelöst vom Inferenzprozess geschehen und ggf. Gründe, die die Richtigkeit der Lösung stützen, einbeziehen, die in der Inferenz gar nicht benutzt worden sind (in [Wick 92] wird dies „rekonstruktiv“ genannt, d.h. dass die Erklärung zur Erklärungszeit unabhängig von der Inferenz unter Einbeziehung aller aktuell zur Verfügung stehenden Informationen erzeugt wird).

3.2. Ansätze für die Erklärung einer kooperativ gefundenen Gesamtlösung

Die in Kap. 3.1.2. beschriebenen Probleme bestehen auch für Systeme aus kooperierenden Expertensystemen. Zusätzlich sind weitere Probleme vorhanden, da auch alle Vorgänge des kooperativen Problemlösens einbezogen werden müssen:

- Entscheidungen über die Problemzerlegung, d.h. Erklärung, warum sich das Problem in genau die weiter untersuchten Teilprobleme zerlegen lässt und ob an dieser Stelle auch Alternativen möglich sind, was vor allem wichtig ist für den Fall, dass kein Ergebnis gefunden wurde bzw. der Benutzer nicht mit dem Ergebnis zufrieden ist.
- Entscheidungen über die Zuordnung der Teilprobleme zu Teilsystemen (sog. „connection problem“), d.h. Rechtfertigung, warum welchem Agent welche Teilaufgaben zugeordnet werden (auch hier ist es wieder wichtig zu wissen, ob Alternativen bestehen).
- Lokale Problemlösungsprozesse (diese könnten durch die Erklärungskomponenten der einzelnen Expertensysteme erklärt werden).

- Ergebnissynthese, insbesondere evtl. vorgenommene Konfliktlösungen (z.B. ist es für den Benutzer wichtig, ob es sich um einen Kompromiss zwischen den Lösungen verschiedener Agenten handelt oder ob sich evtl. mehrere Agenten bestätigen) .

Erstaunlicherweise findet die Forderung nach umfassender Erklärung innerhalb der Verteilten Künstlichen Intelligenz kaum Berücksichtigung in der Literatur und es existieren keine hinreichend erklärungsfähigen Systeme (zumindest keine dem Autor bekannten).

Die Erklärung der (Gesamt-)Lösung eines kooperativ gelösten Problems kann im allgemeinen nicht ohne Erweiterung durch die einzelnen Systeme erfolgen, da durch die Kooperation gerade komplexere Lösungsfähigkeiten als durch einzelne Systeme möglich sind, angestrebt werden.

Eine einfache Kombination der einzelnen Erklärungskomponenten wird nicht ausreichen, da die Gesamtlösung nicht immer nur eine Zusammenführung von durch Problemzerlegung im Sinne von Und-Oder-Graphen [Nilsson 82],[Rich 88] entstandenen Teilproblemen sein wird.

D.h. die Erklärung der Gesamtlösung, und zwar in dem Sinne, dass sie ein menschlicher Benutzer akzeptiert, erzwingt im Fall von kooperierenden Expertensystemen die Entwicklung einer neuen (Gesamt-)Erklärungskomponente. Dies sollte als weiteres, eigenständiges Problem bei der Entwicklung solcher Systeme untersucht und gelöst werden, um einen Fortschritt zu erzielen, ohne bewährte und wichtige Errungenschaften konventioneller Systeme zu verlieren.

Drei verschiedene Ansätze für eine Gesamterklärung sind denkbar und werden im folgenden kurz charakterisiert.

3.2.1. Erklärung durch das für die jeweilige Teillösung zuständige System

Zusätzlich zu jedem Teilergebnis wird ein Verweis auf das System vermerkt, welches das entsprechende Teilergebnis zur Verfügung gestellt hat. Beim Vorgang der Erklärung könnte dann der Benutzer an das entsprechende System verwiesen werden.

Dies würde die umfassendste Erklärung ermöglichen, da sie nicht im Vorfeld generiert werden müsste, sondern im Dialog mit dem Benutzer interaktiv erfolgen würde. Der Benutzer könnte sich so den gesamten Problemlösungsprozess in umgekehrter Reihenfolge bis zu den Ausgangsdaten hin erklären lassen. Zur Erklärungszeit müssten allerdings alle bei der Lösungsfindung beteiligten Systeme weiterhin erreichbar sein, was z.B. im Internet ein Problem darstellen könnte. Außerdem stellt dieser Ansatz hohe Anforderungen an den Benutzer, da er für eine hinreichende Erklärung den gesamten Prozess des kooperativen Problemlösens nachvollziehen muss, anstatt auf einem angemessenen Abstraktionsniveau eine überzeugende Erklärung zu erhalten, warum die vorgeschlagene Lösung geeignet ist. Die Gesamterklärung müsste der Benutzer „im Kopf“ selbst erstellen, ohne eine Unterstützung zu erhalten. Daher wird dieser Ansatz in dieser Arbeit nicht weiter berücksichtigt.

3.2.2. Einführung eines speziellen „intelligenten Erklärungsagenten“

Für jedes Teilergebnis werden Informationen an einen speziellen „Erklärungsagenten“ geschickt, der so über den gesamten Lösungsprozess informiert wird.

Seine Aufgabe besteht dann darin, aus diesem Wissen die Gesamterklärung zu generieren .

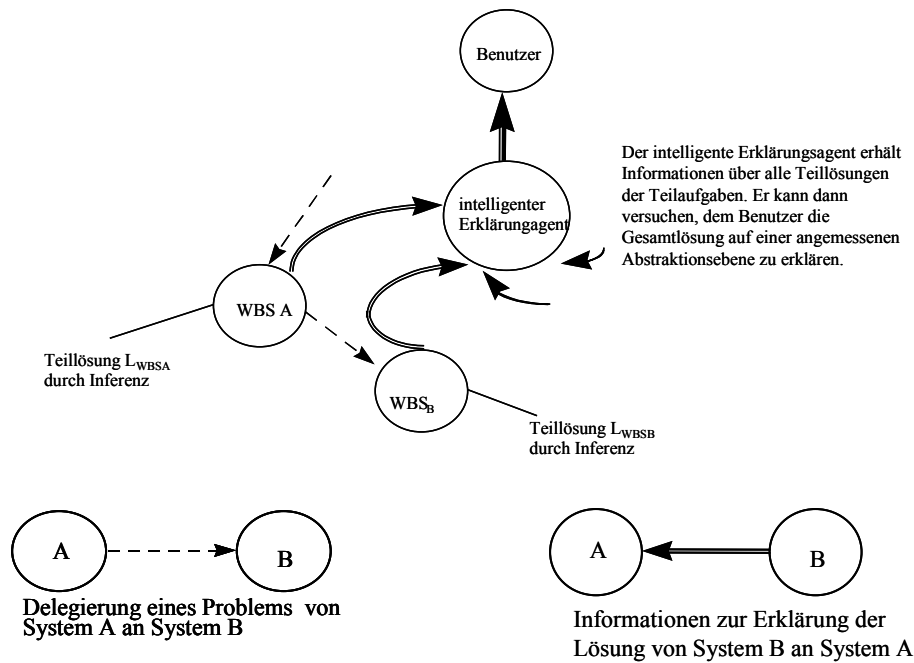


Abbildung 21: Einführung eines speziellen Erklärungsagenten

Bei diesem Ansatz wäre die gesamte Information über die Erklärung in einer Hand und könnte parallel zum eigentlichen Problemlösungsprozess verarbeitet werden.

Für den Erklärungsagenten treten allerdings wieder alle (ungelösten) Probleme der Erklärung auf, d.h. es ist nicht klar, wie dieser Agent die Erklärung der Gesamtlösung erstellen soll.

3.2.3. Verbindung von Teillösung und Erklärung auf allen Hierarchiestufen des kooperativen Problemlösens

Zusätzlich zu jedem Teilergebnis wird eine hinreichende Erklärung dieses Teilergebnisses mit zur Verfügung gestellt (z.B. mit auf das Blackboard geschrieben oder mit an das auftraggebende System geschickt). D.h. es wird bei diesem Ansatz davon ausgegangen, dass die Erklärung ohne gezielte Fragen des Benutzers im Vorfeld generiert werden kann - und zwar so, dass diese Erklärung die später beim Benutzer auftretenden Fragen tatsächlich hinreichend beantwortet²². Jedes System müsste seine Inferenz sowie die benutzten Teilergebnisse oder delegierten Teilaufgaben der übergeordneten Hierarchiestufe - oder dem Benutzer - erklären.

²² Dies ist natürlich eine starke Einschränkung, da die Erklärung üblicherweise interaktiv - im Idealfall in beliebiger Genauigkeit bzw. Abstraktion - durch den gesamten Problemlösungsprozess bzw. das gesamte System führen sollte.

Im Falle benutzter Teilergebnisse (result-sharing) würde die Erklärung dieses Teilergebnisses dazukommen; im Falle delegierter Teilaufgaben (task-sharing) würde evtl. noch die Erklärung, warum und an wen die Aufgabe delegiert wurde, hinzugefügt werden müssen. Schließlich muss jedes System für sein Teilproblem erklären können, wie aus lokaler Inferenz und Teillösungen anderer Systeme das Ergebnis gebildet wurde. Das System, das die ursprüngliche Aufgabe erhalten hat, müsste dann die Fähigkeit zur Gesamterklärung haben. Zwar können natürlich bereits auf jeder einzelnen Stufe alle Probleme des kooperierenden Problemlösens - mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Erklärungsfähigkeit – auftreten, vielleicht wäre aber die Generierung einer hinreichenden Erklärung, die auf jeder Stufe begleitend zur Problemlösung erfolgt, einfacher als z.B. eine Erklärung, die rückwärtsverkettet vom Gesamtergebnis ausgeht.

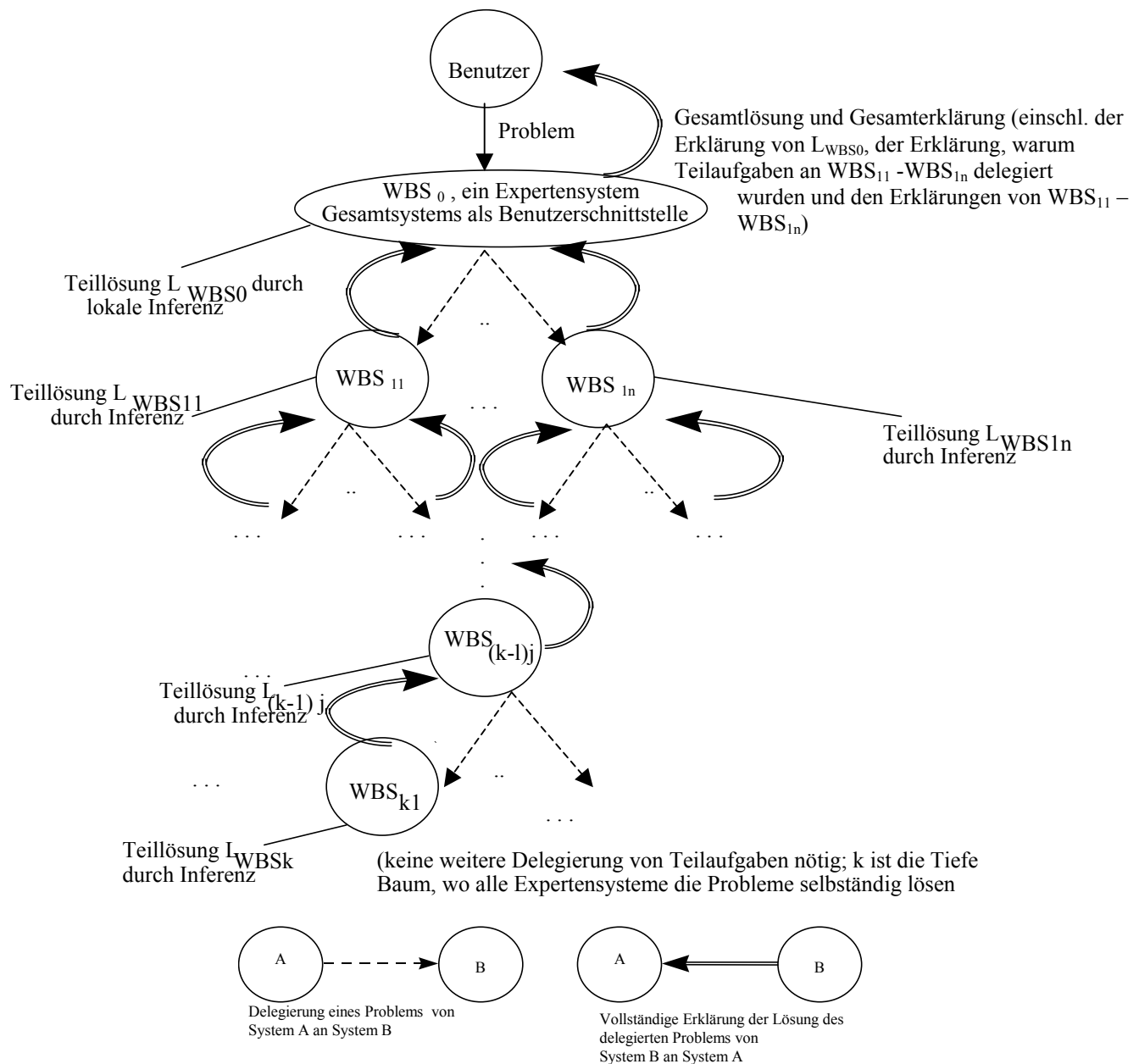


Abbildung 22: Erklärungen für alle Teillösungen im Verteilten Problemlösen

Gäbe es eine benutzerunabhängige Überprüfung der Erklärung einer Lösung, liessen sich so Systeme entwickeln, die ausschließlich erklärbare Lösungen liefern (oder keine).

3.3. Erklärungskommentare als Ansatz zur Erklärung kooperativen Problemlösens

Basierend auf den vorangegangenen Überlegungen wird im Folgenden ein Ansatz vorgestellt, der die in Kapitel 3.2.3. vorgestellte Vorgehensweise konkretisiert, d.h. festlegt, welche Art von Information als „vollständige Erklärung der Teillösungen“ übergeben werden muss. Dazu wird eine Struktur (der Erklärungskommentar) definiert, in der die in Kap. 3.1.1. vorgestellte Definition der Expertenerklärung im Hinblick auf die Anforderungen kooperativen Problemlösens erweitert wird. Die Idee eines vom Problemlöser unabhängigen „Erklärungsagenten“ aus Kapitel 3.2.2. wird nur insofern übernommen, als dass es vom Problembereich unabhängig möglich sein soll, die Visualisierung der Erklärungen für den Benutzer vorzunehmen (dies ist möglich, da es sich um festgelegte, definierte Strukturen handelt).

52

3.3.1. Herleitung der Definition der Erklärungskommentare

Der in Kap. 3.1.1. vorgestellte Vorschlag aus [Reiner 91], dass die Erklärung einer Lösung als kommentierte Ausgabe der Ableitungsschritte erfolgen soll, hat besondere Auswirkungen auf die Erklärung im *kooperativen* Problemlösen. Da die Gesamtlösung eines Problemlösungsprozesses von einem System erklärt werden soll, welches kein Wissen über die Wissensbereiche der anderen Systeme hat, müssen diese Kommentare mit übergeben werden. Dabei kann hinsichtlich des *Erklärungsbedarfs* zwischen Folgendem unterschieden werden :

1. Fallspezifische Voraussetzungen (z.B. Messungen, Befunde, Ausgangswerte)
2. Ableitungsregeln des Systems (der Wissensbasis)
3. Zwischenergebnisse (durch Inferenz aus 1 und 2 entstanden)
4. Die Lösung (durch Inferenz aus 1, 2 und 3 entstanden).

Sind Ausgangsdaten durch Messungen gegeben, besteht vermutlich - korrektes Funktionieren der Messgeräte vorausgesetzt²⁴ - nur geringer Erklärungsbedarf für ihr Zustandekommen. Ein hinweisender Satz z.B. auf das angewandte Verfahren oder die verantwortliche Stelle sollte gegeben werden (z.B. „Normale Leukozytenanzahl gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 mittels Neubauer-Zählkammer“). Solche fallspezifischen Voraussetzungen ($=_{\text{def}} \text{Menge } I$) mit nur geringem Erklärungsbedarf sollen im weiteren *initial* genannt werden. Für sie soll eine erklärende Textkonstante zur Verfügung stehen, d.h. für die Menge I muss eine Funktion $f_{\text{initial}} : I \rightarrow T^{\text{Initial}}$, wobei T^{Initial} eine Menge von Texten ist, mit übergeben werden.

Auch für die Menge der Regeln R müssen die Erklärungen mit übergeben werden. Daher wird eine zweite Funktion $f_{\text{Regeln}} : R \rightarrow T^{\text{Regeln}}$ definiert, die jeder Regel einen erklärenden Text zuordnet. Stimmt ein Teilnehmer des Erklärungsprozesses nicht damit überein, dass alle in der Menge I enthaltenen Elemente keinen weiteren Erklärungsbedarf haben oder akzeptiert er die Gültigkeit einer der Regeln nicht, so ist der Erklärungsvorgang gescheitert (evtl. durch weiteres Nachfragen ggf. auch außerhalb des Systemverbundes zu vervollständigen).

In einem Verbund von Systemen kann nicht sichergestellt werden, dass das System, welches schließlich dem Benutzer die Erklärung geben soll, in der Lage ist, die Folgen von Ableitungsschritten zu ermitteln. Daher erscheint es sinnvoll, dass nicht nur die Prämissenmenge übergeben wird, sondern auch explizit die Ableitungsfolge, die dann von einem Visualisierungswerkzeug geeignet dargestellt werden kann (s. Kap. 4.4.2., 4.5.5. und 4.6.).

Allgemein soll eine Folge F von Expertenerklärungen gegeben werden, die die einzelnen Schritte der Inferenz erklärt. $F = E_1, E_2, \dots, E_n$. Dabei muss E_1 die Expertenerklärung der zu erklärenden Lösung sein. E_n darf ausschließlich aus Elementen von I oder R bestehen.

Für alle Expertenerklärungen E_t gilt, dass alle Elemente *initial* sind oder eine Regel darstellen oder durch eine weitere Expertenerklärung erklärt werden ($1 \leq t \leq n$).

(Für alle $E_t = \{ k_{t1}, \dots, k_{tm} \}$ gilt $k_{ti} \in I$ oder $k_{ti} \in R$ oder es gibt eine Expertenerklärung E^* für k_{ti}).

²⁴ Natürlich kann man auch die Gültigkeit dieser Messungen in Frage stellen. In bestimmten Szenarien, z.B. einer Fehlerdiagnose des Messgerätes, könnten auch genau diese Werte einen hohen Erklärungsbedarf haben. Welche Fakten welchen Erklärungsbedarf haben, ist vom jeweiligen Szenario abhängig.

Auf die Ableitungsfolge bezogen, kann man auch sagen, dass E_1 die Expertenerklärung der zu erklärenden Lösung ist; E_2, \dots, E_{n-1} die Expertenerklärungen für die abgeleiteten Zwischenschritte sind und E_n nur aus Ausgangsfakten bzw. Regeln besteht.

Gibt es mehrere verschiedene Ableitungswege, sollten alle übergeben werden, um die gesamte Information, die das Ergebnis stützt, miteinzubeziehen (dies kann durch ein aufrufendes System allerdings nicht überprüft werden).

Des weiteren können auch Informationen hergeleitet werden, die zur Akzeptanz der Lösung beitragen, aber nicht in einem Ableitungspfad der Lösung enthalten sind. Ein Beispiel ist der Ausschluss möglicher Differentialdiagnosen.

Solche Informationen werden im weiteren Hinweise genannt, da sie nicht direkt zur Herleitung der Lösung gehören, für die Akzeptanz der Lösung aber relevant sind. Zu jedem Hinweis soll ein textueller Kommentar gehören, der den Zusammenhang mit der Lösung erläutert sowie eine Erklärung, wie der Hinweis hergeleitet wurde.

Basierend auf all diesen Betrachtungen soll nun die Information zusammengefasst werden, die für eine Schlussfolgerung übergeben werden muss, damit der Empfänger in die Lage versetzt wird, eine umfassende Erklärung zu geben. Die gesamte Information wird *Erklärungskommentar* genannt.

Um die Expertenerklärungen, die in der Prädikatenlogik definiert sind, einbeziehen zu können, bezieht sich die Definition ebenfalls auf die Prädikatenlogik, d.h. auf die Erklärung einer *Formel* (die Umsetzung in die Programmiersprache Prolog ist in Kap. 4.5.2. dargestellt).

Definition : Erklärungskommentar

Ein Erklärungskommentar ε einer Formel A bei zwei gegebenen Formelmengen I und R (initiale Formeln und Regeln) ist ein 6-Tupel

$$\varepsilon = (F, f_{\text{initial}}, f_{\text{Regeln}}, H, f_{\text{Hinweise}}, E_H)$$

wobei: F eine Menge von Folgen von Expertenerklärungen ist, für die gilt, dass die erste Expertenerklärung der Folge eine Expertenerklärung von A ist und für alle folgenden Expertenerklärungen gilt, dass alle in ihnen enthaltenen Formeln Elemente von I oder R sind, oder durch eine weitere Expertenerklärung erklärt werden.

f_{initial} eine Funktion, die jeder initialen Formel, die im Erklärungskommentar vorkommt, einen erklärenden Text zuordnet, $I \rightarrow T^{\text{Initial}}$

f_{Regeln} eine Funktion, die jeder Regel des Erklärungskommentars einen erklärenden Text zuordnet, $R \rightarrow T^{\text{Regeln}}$

H eine Menge von Hinweisen,

f_{Hinweise} eine Funktion, die jedem Hinweis einen Text zuordnet, der den Zusammenhang zur zu erklärenden Formel erklärt

E_H eine Menge von Mengen von Folgen von Expertenerklärungen für alle $h \in H$.

In einem Systemverbund verteilten Problemlösens soll ein System, das Teilaufgaben delegiert, aber nur solche Lösungen akzeptiert, für die Erklärungskommentare mit übergeben werden, in der Lage bleiben, die Gesamtlösung zu erklären.

3.3.2. Synthese der Gesamterklärung aus übergebenen Erklärungskommentaren

Da das Ziel der Definition der Erklärungskommentare ist, aufrufende Systeme in die Lage zu versetzen, dem Benutzer die Gesamterklärung ausgeben zu können, wird im folgenden auf die Synthese der Gesamterklärung eingegangen.

Grundlegend für diese Arbeit ist die Überzeugung, dass die Erklärungskommentare alle benötigten Informationen zur Erklärung beinhalten, daher entspricht die dem Benutzer zu gebende Gesamterklärung der Generierung eines Gesamterklärungskommentares zuzüglich der geeigneten Visualisierung (s. Kap. 4.4.2., 4.5.5. und 4.6.). Im Rahmen dieser Arbeit wird nicht auf sich widersprechende Teilergebnisse und nicht auf vages Wissen in Form von Wahrscheinlichkeiten oder Sicherheitsfaktoren eingegangen; dies könnte Bestandteil weiterführender Arbeiten sein. Auch die Frage, inwieweit nicht-regelbasierte Systeme integriert werden können, müsste durch weiterführende Forschung untersucht werden.

Bei der Synthese der Gesamterklärung werden im Rahmen dieser Arbeit daher nur drei verschiedene Fälle unterschieden:

- a) Integration verschiedener Herleitungsalternativen,
- b) Integration von Informationen als Hinweis,
- c) Synthese einer Herleitungsfolge aus verschiedenen Teilfolgen.

Durch die festgelegte Struktur der Erklärungskommentare lassen sich alle drei Fälle einfach – auch automatisiert – lösen.

Integration verschiedener Herleitungsalternativen:

Da bereits in jedem einzelnen Erklärungskommentar die verschiedenen Herleitungsmöglichkeiten einer Lösung als Menge F von Folgen von Expertenerklärungen definiert ist, beschränkt sich die Integration von weiteren alternativen Ableitungsmöglichkeiten dieser Lösung durch andere Erklärungskommentare auf die Vereinigung aller übergebenen und eigenen Alternativen.

Wird eine alternative Expertenerklärungsfolge für ein Teilergebnis übergeben (s. System C im unteren Beispiel), kann die Folge zur Expertenerklärung des Gesamtergebnisses ergänzt und dann als Alternative integriert werden.

Beispiel.:

Ein Gesamtsystem G (ohne eigene lokale Inferenz) erhält von zwei Subsystemen (A und B) Erklärungskommentare für eine Lösung P . Zusätzlich erhält es einen Erklärungskommentar für ein Zwischenergebnis R von einem dritten System C . Durch Vereinigung der alternativen Herleitungsmöglichkeiten sowie der entsprechenden Funktionen bzw. Mengen f_{initial} , f_{Regeln} , H ,

f_{Hinweise} und E_H kann vom System G der Gesamterklärungskommentar $\varepsilon_{\text{Gesamt}}(P)$ gebildet werden (hier ist aus Gründen der Übersichtlichkeit aus $\varepsilon_{\text{Gesamt}}(P)$ nur F angegeben; für ausführlichere Beispiele s. auch Kapitel 4.4.2)

System A : $\varepsilon(P) = (\{\{Q \rightarrow P, Q\}\}, f_{\text{initial}}, f_{\text{Regeln}}, H, f_{\text{Hinweise}}, E_H)$ mit $Q \rightarrow P$
Systemregel und Q initiales Fakt

System B : $\varepsilon(P) = (\{\{R \rightarrow P, R\}, \{S \rightarrow R, S\}\}, \dots)$ mit $R \rightarrow P, S \rightarrow R$ Systemregeln
und S initiales Fakt

System C : $\varepsilon(R) = (\{\{T \rightarrow R, T\}\}, \dots)$ mit $T \rightarrow R$ Systemregeln und
T ist initiales Fakt

System G : in $\varepsilon_{\text{Gesamt}}(P)$ ist dann das resultierende

$F_{\text{Gesamt}} = \{ \langle \{Q \rightarrow P, Q\} \rangle^{25}, \langle \{R \rightarrow P, R\}, \{S \rightarrow R, S\} \rangle, \langle \{R \rightarrow P, R\}, \{T \rightarrow R, T\} \rangle \}$
mit $Q \rightarrow P, R \rightarrow P, S \rightarrow R, T \rightarrow R$ Systemregeln und Q, S, T initiales Fakt.

Für die neuen $f_{\text{initial}}, f_{\text{Regeln}}$ in $\varepsilon_{\text{Gesamt}}(P)$ werden die Funktionswerte aus den übergebenen Erklärungskommentaren übernommen. Die Menge der Hinweise kann durch Vereinigung der übergebenen Hinweismengen gebildet werden (mit entsprechend erweitertem f_{Hinweise} und E_H). Ein noch zu lösendes Problem entsteht, falls für gleiche initiale Fakten verschiedene Funktionswerte übergeben worden sind. In der Beispielimplementierung in Kap. 4.5 wird in einem solchen Fall der zuerst gefundene Wert genommen. Hier bestehen noch Verbesserungsmöglichkeiten.

Integration von Informationen als Hinweis:

Der in den Erklärungskommentaren „Hinweise“ genannte Teil des Tupels, stellt die Möglichkeit dar, Informationen (z.B. Hintergrundwissen) zu berücksichtigen, die in keinem direkten logischen Zusammenhang mit der Lösung stehen, aber dennoch für die Akzeptanz der Lösung relevant sind. Die Integration von Informationen als Hinweis hängt daher vom konkreten Anwendungsfall und der dazugehörigen Implementierung ab. Im in dieser Arbeit vorgestellten medizinischen Szenario werden in den resultierenden Erklärungskommentar gefundener Diagnosen und Verdachte auszuschließende Diagnosen eingefügt. Die Herleitungen dieser Hinweise E_H sind in den entsprechenden Erklärungskommentaren mit übergebenen worden. In der Erläuterung, warum der Hinweis integriert wurde (f_{Hinweise}) wird der entsprechende Grund angegeben, in diesem Falle die Tatsache, dass der Ausschluss einer Differentialdiagnose den Verdacht auf eine Krankheit stützen kann.

²⁵ Die Zeichen „<“ und „>“ markieren Anfang bzw. Ende einer Folge, falls sonst Mehrdeutigkeiten entstehen

Synthese einer Herleitungsfolge aus verschiedenen Teilfolgen:

Da in den übergebenen Erklärungskommentaren die Herleitungen der einzelnen Teile enthalten sind, kann die Herleitungsfolge der resultierenden Lösung problemlos erstellt werden.

Bsp. (vgl. auch vorangegangenes Bsp.):

Ein System A enthalte die Regel $R \rightarrow P$

und erhält von System B einen Erklärungskommentar

$\varepsilon(R) = (\{\{Q \rightarrow R, Q\}\}, f_{\text{initial}}, f_{\text{Regeln}}, H, f_{\text{Hinweise}}, E_H)$ mit $Q \rightarrow R$
Systemregel und Q initiales Fakt

System A kann dann den resultierenden Erklärungskommentar für $\varepsilon_{\text{Gesamt}}(P)$ erstellen, in dem das resultierende

$F_{\text{Gesamt}} = \{ \{R \rightarrow P, R\}, \{Q \rightarrow R, Q\} \}$ mit $Q \rightarrow P, R \rightarrow P$ Systemregel und Q initiales Fakt ist
($f_{\text{initial}}, f_{\text{Regeln}}, H, f_{\text{Hinweise}}, E_H$ entsprechend).

4. Entwicklung eines Demonstrationsprototypen

4.1. Vorgehensweise und Zielsetzung

Um das Problem der Generierung einer Erklärung für die Gesamtlösung eines kooperativen Lösungsprozesses eingehender untersuchen zu können, wird im Folgenden die Entwicklung eines *Demonstrationsprototypen* für ein verteiltes Anwendungsszenario dargestellt.

Damit ist sowohl die *prinzipielle* Anwendbarkeit der Erklärungskommentare zur Erklärung in einem realen System nachgewiesen, als auch ein praktisch einsetzbares System, in der die Erklärung von entscheidender Bedeutung ist, bis zu einem prototypischen Stadium dokumentiert. Dieser *Demonstrationsprototyp* könnte zum *Feldprototypen* und schließlich zum *kommerziellen System* weiterentwickelt werden.

Es ist bei der Systementwicklung nach *Waterman* vorgegangen worden [Waterman 86], der die Expertensystementwicklung als „evolutionären Prozess“ sieht, der sich von einfach zu lösenden hin zu schwierig zu lösenden Problemen entwickelt. Bei dieser inkrementellen Entwicklung steigt die Anzahl der verwendeten Regeln, die Zahl der durch das System lösbaren Fälle und die Entwicklungszeit je nach Prototypstatus an. Der Demonstrationsprototyp mit wenigen Regeln und wenigen lösbaren Fällen ist nach Waterman geeignet, bei vergleichsweise kurzer Entwicklungszeit Ideen und Repräsentationen im Problembereich zu testen und in Bezug auf die effektive Anwendbarkeit auf das gegebene Problem zu überzeugen. Im Rahmen dieser Arbeit ist dieser Prototypstatus daher die adäquate Entwicklungsstufe. Die Entwicklung lässt sich allgemein in fünf Phasen unterteilen:

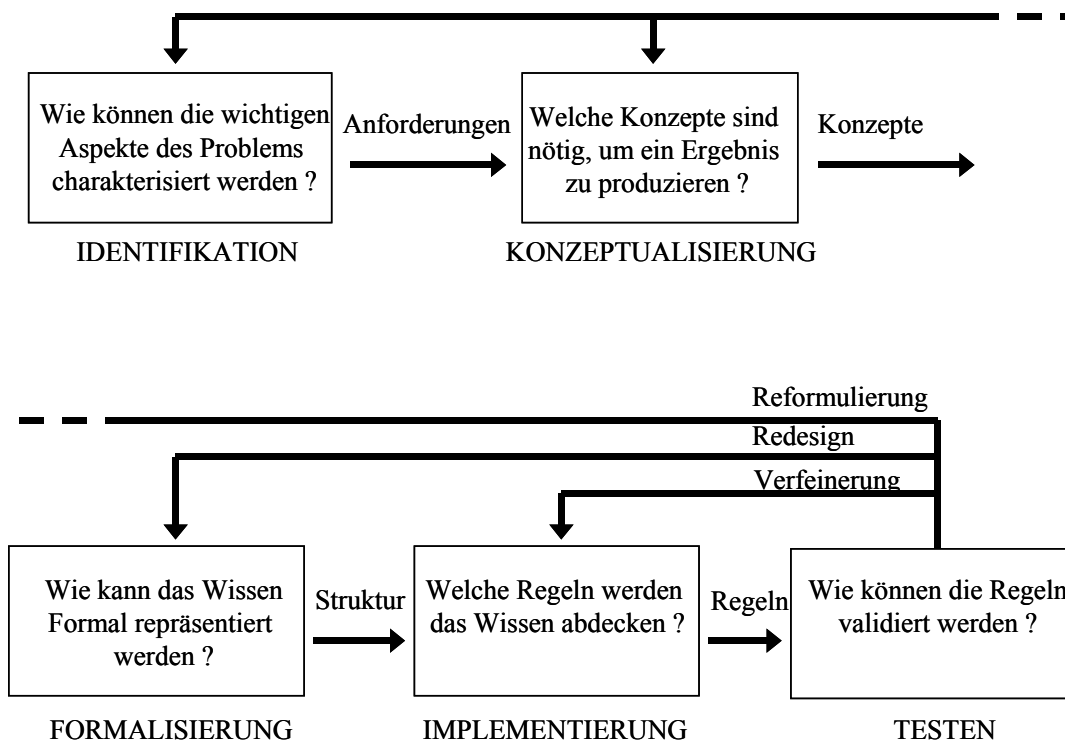


Abbildung 24: Entwicklungsphasen bei der Expertensystementwicklung aus [Waterman 86]

- Während der *Identifikationsphase* werden dabei die wichtigen Charakteristiken des Problems herausgearbeitet (u.a. Problemart und –größe, beteiligte Personen und Ressourcen, ggf. bei zu komplexen Problemen die Reduktion auf eine beherrschbare Größe).
- In der *Konzeptualisierungsphase* wird entschieden, welche Konzepte, Relationen und Kontrollmechanismen zur Beschreibung des Problemlösens im gegebenen Bereich nötig sind. Teilaufgaben, Strategien und Einschränkungen werden festgelegt und die Abstraktionsebene (Granularität) des Problems bestimmt.
- Während der *Formalisierung* werden die Schlüsselkonzepte und Relationen formal ausgedrückt und in der
- *Implementierungsphase* wird das lauffähige Computerprogramm erzeugt.
- In der *Testphase* wird die Nützlichkeit und Performance des Programms untersucht (in frühen Prototyp-Stufen in „Labortests“ und später in „Feldversuchen“).

Gemäß dieser Vorgehensweise wird im Folgenden die Entwicklung des Prototypen beschrieben.

4.2. Identifikationsphase

Folgendes Anwendungsszenario wird untersucht:

Es soll eine Differentialdiagnose bei akutem abdominalen Schmerz (akuter Bauchschmerz) gestellt werden. Dazu sollen unterschiedliche Informationsquellen aus unterschiedlichen Untersuchungen ausgewertet werden: die Anamnese, die typischerweise den Diagnosevorgang einleitet, die Sonographie und die Laborauswertung. Die einzelnen Instanzen, die die einzelnen Untersuchungsdaten auswerten, kooperieren für die Erstellung der Diagnose und deren vollständiger Erklärung. Für die Anamnese, die Sonographie und die Laborauswertung soll jeweils ein Expertensystem zur Unterstützung zur Verfügung stehen. Das erste System **AbdAnam** unterstützt einen Arzt bei der Schmerzanamnese,. Das zweite System **AbdLab** dient der Auswertung der Laborwerte des Patienten (Blut und Urin). Das dritte System **AbdSon** interpretiert die Ergebnisse der Sonographie (Ultraschalluntersuchung). Es soll möglich sein, weitere Expertensysteme zur Unterstützung des Diagnosevorganges mit geringem Aufwand zum Verbund hinzufügen zu können. Es soll der die Anamnese durchführende Arzt bei seiner Entscheidung unterstützt werden. Dieser Arzt kommuniziert nur mit dem ersten System **AbdAnam**, welches eigenständig mit den anderen Systemen kooperiert und für die Erklärung der Gesamtlösung zuständig ist (d.h. insbesondere auch für die Erklärung der durch die anderen Systeme erfolgten Teillösungen).

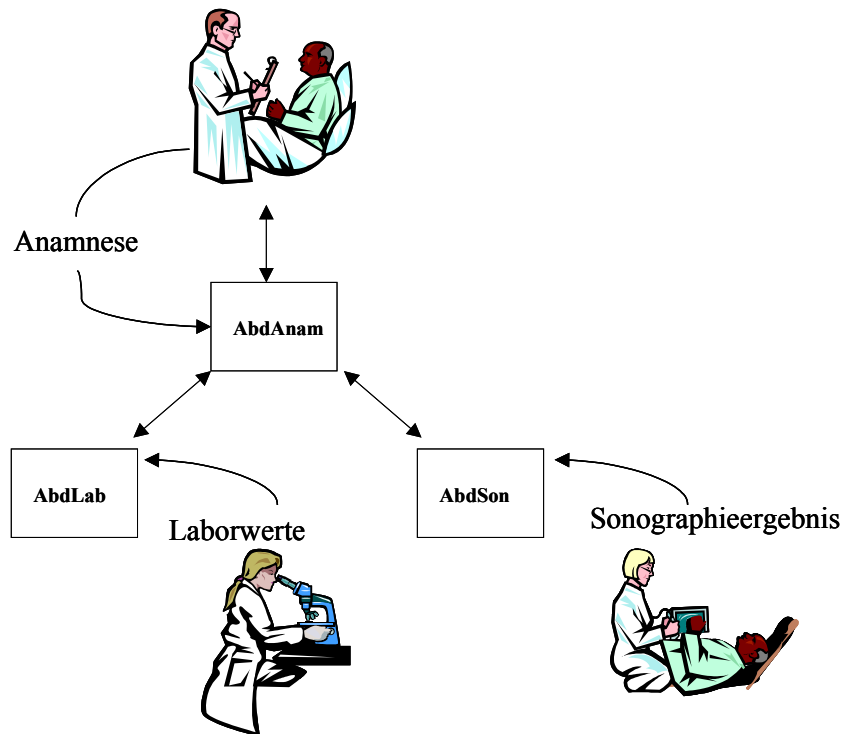


Abbildung 25: Expertensystemverbund zur Diagnose akuten abdominalen Schmerzes

Wegen der komplexen diagnostischen Thematik wird für den Demonstrationsprototyp nur eine Teilmenge der möglichen Krankheiten und Symptome bzw. Befunde berücksichtigt (auf Erweiterungsmöglichkeiten muss dabei geachtet werden). In diesem stark eingeschränkten Szenario werden folgende mögliche Diagnosen berücksichtigt:

{Gallenkolik, Appendizitis, Pankreatitis, Nierenkolik, Ileus²⁶ }.

Als Ergebnis soll für den vorliegenden Fall die zutreffende

- Diagnose (ggf. nur Verdacht) sowie
- auszuschließende Differentialdiagnosen

ermittelt werden (da der Ausschluss einer Differentialdiagnose das Vertrauen in die Richtigkeit einer Diagnose erhöhen kann).

Besonderer Schwerpunkt soll die

- vollständige Erklärung

der ermittelten Lösung sein.

²⁶ Störung der Darmpassage

Zur Simulation der klinischen Einsatzumgebung steht ein Verbund von zwei Unix-Workstations und einem PC zur Verfügung, die für die Anamnestische – und die Sonographische Abteilung sowie das Labor eines Krankenhauses stehen sollen und die prototypische Implementierung und das Testen erlauben („Labortests“ des Demonstrationsprototypen).

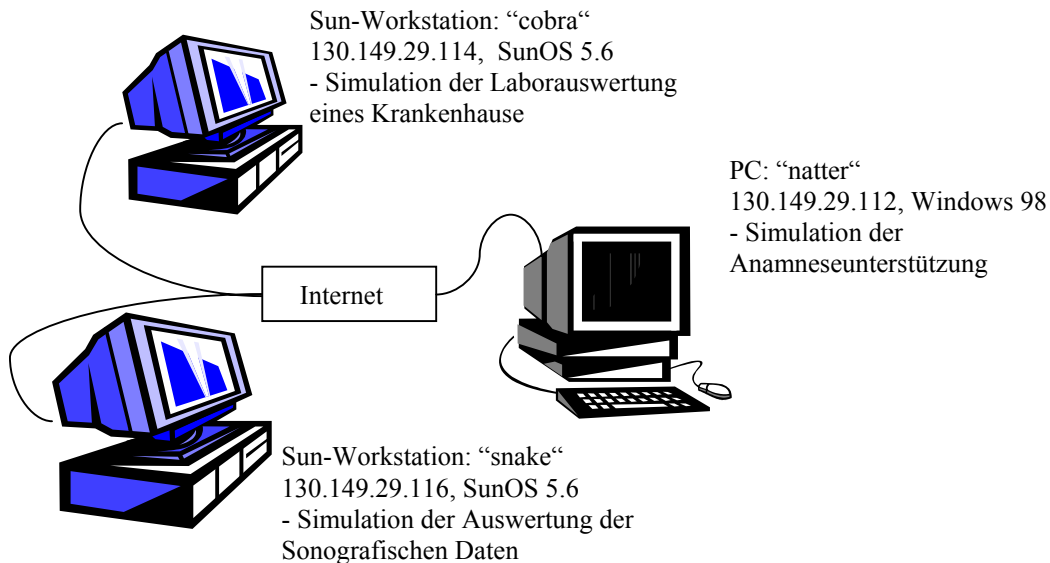


Abbildung 26: Rechnerverbund für die Prototypentwicklung

Für „Feldversuche“ mit einem Feldprototypen müsste das System in die reale Einsatzumgebung (Krankenhaus) verlegt werden. Daher wird bereits im Demonstrationsprototypen auf mögliche Anforderungen realer Einsatzgebiete geachtet und eine Lösung erstellt, die unter verschiedenen Betriebssystemen und Hardwarebedingungen realisiert werden kann.

- Für die Akquisition des Bereichswissens aus der Medizin steht eine Ärztin zur Verfügung.

4.3. Konzeptualisierungsphase

Das für die Diagnoseerhebung nötige Wissen lässt sich in Regeln darstellen.

Die verwendeten Regeln werden in der Form: $\langle A \rangle \rightarrow \langle B \rangle$ für „Wenn A gegeben ist, dann schließe B“ angegeben bzw. $\langle A \rangle \leftrightarrow \langle B \rangle$ als Kurzschreibweise für die zwei Regeln $\langle A \rangle \rightarrow \langle B \rangle$ und $\langle B \rangle \rightarrow \langle A \rangle$.

Anamnese :

1. < Schmerzintensität zu und abnehmend > → < starker Verdacht auf Kolik oder Ileus²⁷>
2. < Kolik > ↔ < Nierenkolik oder Gallenkolik >
3. < Körperhaltung unruhig > → < starker Verdacht auf Kolik >
4. < Schmerzen bei Bewegung des rechten Oberschenkels > → < starker Verdacht auf Appendizitis >
5. < heftige bewegungsabhängige Schmerzen > → < starker Verdacht auf Entzündung >
6. < Entzündung > ↔ < Pankreatitis oder Appendizitis oder Ileus²⁸>
7. < Erbrechen > → < starker Verdacht auf Appendizitis oder Ileus >

Auswertung von Laborwerten :

1. < Lipase- und Amylase²⁹-Werte erhöht > ↔ < Pankreatitis >
2. < Leukozytenanzahl³⁰ und CRP³¹ erhöht > ↔ < Entzündung >
3. < Entzündung > ↔ < Pankreatitis oder Appendizitis oder Ileus >
4. < γ GT³² und AP³³ erhöht > → < starker Verdacht auf Gallenkolik >
5. < Blut im Urin > → < starker Verdacht auf Nierenkolik oder Appendizitis >

²⁷ hier ist zu beachten, dass „Ileus“ bereits eine abschließende Diagnose darstellt, während der Begriff „Kolik“ für eine Klasse möglicher Diagnosen steht (s. Regel 2)

²⁸ In diesem einfachen Szenario sind keine Mehrfachdiagnosen vorgesehen, d.h. also z.B. nicht der Fall, dass die Veränderung der Blutwerte durch eine andere Entzündung (nicht abdominal) hervorgerufen wurde.

²⁹ Enzyme im Pankreas

³⁰ Anzahl der weißen Blutkörper im Blut

³¹ CRP steht für C-reaktives Protein

³² γ GT steht für γ Glutamyl-Transferase (ein Enzym)

³³ AP steht für alkalische Phosphatase (ein Enzym)

6. < K+Wert gering >

→ < Verdacht auf Ileus >

Auswertung der sonografischen Befunde:

1. < Appendix sichtbar verdickt >

→ < Appendizitis >

2. < Stein in der Niere sichtbar >

→ < Nierenkolik³⁴ >

3. < Stein in der Galle sichtbar >

→ < Gallenkolik >

4. < entzündliche Veränderung
des Pankreas sichtbar >

↔ < Pankreatitis >

5. < Stauung der Gallenblase >

→ < starker Verdacht auf Gallenkolik >

6. < Stauung der Niere >

→ < starker Verdacht auf Nierenkolik >

Folgendes Beispiel soll zunächst informell einen einfachen Fall der Erstellung einer Diagnose verdeutlichen:

Der benutzende Arzt stellt bei der **Anamnese** eines Patienten folgende Befunde (B_{Ai}) fest. Außerdem liegen Blut- und Urinproben zur Laboruntersuchung sowie die Bilder der Ultraschalluntersuchung vor³⁵:

- unruhige Körperhaltung, (B_{A1})
- gleichbleibende Schmerzen im Bauch, (B_{A2})
- kein Erbrechen (B_{A3})

Daraus können folgende Schlüsse gezogen werden ($S_{AbdAnam}$) :

starker Verdacht auf Kolik ($\text{wegen } B_{A1} \text{ und Regel 3}$) ($S_{AbdAnam 1}$)

starker Verdacht auf Nierenkolik
oder Gallenkolik ($\text{wegen } S_{AbdAnam 1} \text{ und Regel 2}$) ($S_{AbdAnam 2}$)

(Die Befunde B_{A2} und B_{A3} lassen keine Regelanwendung zu).

Um die Diagnose weiter präzisieren zu können, werden Ultraschalls bzw. der Laborwerte ausgewertet.

³⁴ Sog. „nicht Schatten gebende“ Steine sind nicht durch die Sonographie zu erkennen, daher kein Doppelpfeil

³⁵ Es wird in diesem vereinfachten Szenario nicht auf zeitliche Abläufe, Überweisungen u.ä. eingegangen.

Gefragt wird nach Hinweisen auf Krankheiten oder deren Ausschluss.
Die **Laboruntersuchung** ergibt folgende Befunde (B_{Li}) :

• Lipase-,	nicht erhöht	(B_{L1})
• Amylase-Werte,	nicht erhöht	(B_{L2})
• CRP,	nicht erhöht	(B_{L3})
• Leukozytenanzahl	nicht erhöht	(B_{L4})
• K+	nicht erniedrigt	(B_{L5})
• YGT	erhöht	(B_{L6})
• AP	erhöht	(B_{L7})
• Blut im Urin	nicht vorhanden	(B_{L8})

Das lässt folgende Schlüsse zu:

- Starker Verdacht auf Gallenkolik (wegen B_{L6} und B_{L7} und Regel 4) ($S_{AbdLab1}$)
- Keine Pankreatitis (wegen B_{L1} und B_{L2} und Regel 1) ($S_{AbdLab2}$)
- Keine Entzündung (wegen B_{L3} und B_{L4} und Regel 2) ($S_{AbdLab3}$)
- Keine Pankreatitis, keine Appendizitis, kein Ileus (wegen $S_{AbdLab3}$ und Regel 3) ($S_{AbdLab4}$)

(Die weiteren Befunde lassen keine anderen Regelanwendung zu).

Die **sonographische Untersuchung** ergibt folgende Befunde (B_{Si}) :

- Appendix nicht sichtbar verdickt (B_{S1})
- Keine entzündliche Veränderung des Pankreas sichtbar (B_{S2})
- Sonst keine Stauungen oder Steine sichtbar (B_{S3})

Schluss: Es liegt keine Pankreatitis vor (wegen B_{S2} und Regel 3) ($S_{AbdSon 1}$)

Insgesamt kann daraus der starke Verdacht auf eine Gallenkolik hergeleitet werden, gestützt durch die Körperhaltung und vor allem durch die γ GT- und AP-Werte.

Außerdem werden die Krankheiten Pankreatitis, Appendizitis und Ileus ausgeschlossen.

Werden diese Schlussfolgerungen durch Expertensysteme gezogen, könnte die Erklärung durch Ausgabe der Befunde, der verwendeten Regeln und erklärenden Texten erfolgen. Das Problem ist, welche Informationen Labor und Sonographie übermitteln müssen, und in welcher genauen Form dies zu geschehen hat, damit die Gesamtlösung erklärt werden kann.

Um diese Frage weiter zu untersuchen, wird das Szenario präzisiert und damit die nächste Stufe der Prototypentwicklung dargestellt.

4.4. Formalisierungsphase

4.4.1. Herleitung der Lösung

Im Folgenden soll das Diagnostik-Szenario in der Prädikatenlogik der 1. Stufe [Konrad 01] präzisiert und das Erreichen der Erklärungsfähigkeit untersucht werden :

Der **Individuenbereich** bestehe aus den möglichen Krankheiten und zu untersuchenden Parametern.

Individuenbereich $D = \{ \text{Gallenkolik, Appendizitis, Pankreatitis, Nierenkolik, Ileus, Schmerzintensität_im_Bauch, Körperhaltung, Bewegung_des_rechten_Oberschenkels, Körperbewegung, Lipasewert, Amylasewert, Leukozytenanzahl, CRP, \gamma\text{GT, AP, Urin, K+Wert, Appendix, Pankreas, Gallenblase, Niere, Magen} \}$

Folgende einstellige Prädikate seien gegeben:

$\{ \text{Diagnose, Verdacht}^{36}, \text{Kolik}^{37}, \text{Entzündung, zu_und_abnehmend, ruhig, schmerzhaft, erhöht, erniedrigt, blutig, erbrechen, gestaut, hat_stein, verdickt, entzündet} \}$

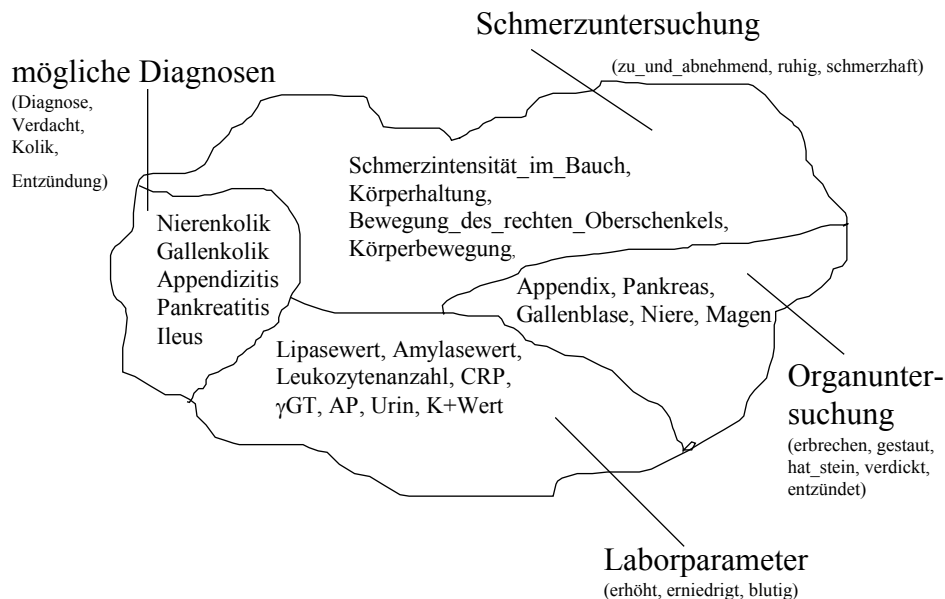


Abbildung 27: Teilmengen des Individuenbereiches

(in Klammern Prädikate, die auf Objekte der Teilmenge zutreffen können)

Die Regeln können dann durch folgende **Formeln** beschrieben werden :

³⁶ „Diagnose“ steht für die endgültige (als richtig angenommene) Diagnose, „Verdacht“ für einen starken Verdacht.

³⁷ „Kolik“ und „Entzündung“ stellen Krankheitsmengen und daher keine Objekte dar, in diesem Szenario Nierenkolik und Gallenkolik bzw. Pankreatitis, Appendizitis und Ileus.

$$F_{\text{AbdAnam}} = \{ \begin{array}{l} \text{zu_und_abnehmend (Schmerzintensität_im_Bauch) } \rightarrow \\ (\exists x (\text{ Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus})), \\ \\ \text{Kolik}(\text{Nierenkolik}), \text{Kolik}(\text{Gallenkolik}), \\ \\ \neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \rightarrow \exists x (\text{ Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)), \\ \\ \text{schmerzhaft}(\text{Bewegung_des_rechten_Oberschenkels}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}), \\ \\ \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \rightarrow \exists x (\text{ Verdacht}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \\ \\ \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{Entzündung}(\text{Ileus}), \\ \\ \text{erbrechen (Magen)} \rightarrow (\text{ Verdacht}(\text{ Appendizitis}) \vee \text{Verdacht}(\text{ Ileus})) \quad \} \end{array}$$

$$F_{\text{AbdLab}} : \{ \begin{array}{l} (\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose (Pankreatitis)} , \\ \\ (\text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP})) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \\ \\ \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{Entzündung}(\text{Ileus}), \\ (\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}), \\ \\ \text{blutig}(\text{Urin}) \rightarrow (\text{Verdacht}(\text{Nierenkolik}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis})), \\ \\ \text{erniedrigt}(\text{K+Wert}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Ileus}) \quad \} \end{array}$$

$$F_{\text{AbdSon}} : \{ \begin{array}{l} \text{verdickt}(\text{Appendix}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Appendizitis}), \\ \\ \text{hat_stein}(\text{Niere}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Nierenkolik}), \\ \\ \text{hat_stein}(\text{Gallenblase}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Gallenkolik}), \\ \\ \text{entzündet}(\text{Pankreas}) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}), \\ \\ \text{gestaut}(\text{Gallenblase}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}), \\ \\ \text{gestaut}(\text{Niere}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik}) \quad \} \end{array}$$

Diese Formeln lassen sich in die folgenden Klauselmengen überführen (für die einzelnen Schritte der Überführung s. Anhang am Ende des Kapitels)

Klauselmenge KM_{AbdAnam} aus den Formeln F_{AbdAnam} :

$$\{ \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Verdacht}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}), \\ \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Kolik}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}), \\ \text{Kolik}(\text{Nierenkolik}), \text{Kolik}(\text{Gallenkolik}), \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Verdacht}(b), \\ \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Kolik}(b), \\ \neg \text{schmerzhaft}(\text{Bewegung_des_rechten_Oberschenkels}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}), \\ \neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Verdacht}(c), \\ \neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Entzündung}(c), \\ \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{Entzündung}(\text{Ileus}), \\ \neg \text{erbrechen}(\text{Magen}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}) \}$$

Klauselmenge KM_{AbdLab} aus den Formeln F_{AbdLab} :

$$\{ \neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}), \\ \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{erhöht}(\text{Lipasewert}), \\ \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{erhöht}(\text{Amylasewert}), \\ \neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{CRP}) \vee \text{Diagnose}(d), \\ \neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{CRP}) \vee \text{Entzündung}(d), \\ \neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}), \\ \neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee \text{erhöht}(\text{CRP}), \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}), \\ \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{Entzündung}(\text{Ileus}), \\ \neg \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{AP}) \vee \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}), \\ \neg \text{blutig}(\text{Urin}) \vee \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}), \\ \neg \text{erniedrigt}(\text{K+Wert}) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}) \}$$

Klauselmenge KM_{AbdSon} aus den Formeln F_{AbdSon} :

$$\{ \neg \text{verdickt}(\text{Appendix}) \vee \text{Diagnose}(\text{Appendizitis}), \neg \text{hat_stein}(\text{Niere}) \vee \text{Diagnose}(\text{Nierenkolik}), \\ \neg \text{hat_stein}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Diagnose}(\text{Gallenkolik}), \neg \text{entzündet}(\text{Pankreas}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}), \\ \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{entzündet}(\text{Pankreas}), \neg \text{gestaut}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}), \\ \neg \text{gestaut}(\text{Niere}) \vee \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik}) \}$$

Die gegebenen Befunde aus dem Beispielfall lassen sich beschreiben durch die Formelmenge :

$$F_{\text{Befunde}} = \{ \neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}), \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität}), \neg \text{erbrechen}(\text{Magen}) \};$$

$$Klauselmenge \text{ } KM_{\text{Befunde}} = \{ \neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}), \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität}), \\ \neg \text{erbrechen}(\text{Magen}) \}$$

Die im Labor gemessenen Werte sind durch die Formelmenge:

$$F_{\text{Labor}} = \{ \neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}), \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}), \neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}), \neg \text{erhöht}(\text{CRP}), \\ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{blutig}(\text{Urin}), \neg \text{erniedrigt}(\text{K+Wert}) \} \text{ beschrieben.}$$

$$Klauselmenge \text{ } KM_{\text{Labor}} = \{ \neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}), \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}), \neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}),$$

$\neg \text{erhöht}(\text{CRP}), \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{blutig}(\text{Urin}), \neg \text{erniedrigt}(\text{K+Wert}) \}$

Die Ergebnisse der sonographischen Untersuchung schließlich durch die Formelmenge

$F_{\text{Sono}} = \{ \neg \text{verdickt}(\text{Appendix}), \neg \text{entzündet}(\text{Pankreas}), \neg \exists x \text{ gestaut}(x), \neg \exists y \text{ hat_stein}(y) \}$

Klauselmenge $KM_{\text{Sono}} = \{ \neg \text{verdickt}(\text{Appendix}), \neg \text{entzündet}(\text{Pankreas}), \neg \text{gestaut}(x), \neg \text{hat_stein}(y) \}$

Der behandelnde Arzt soll unterstützt werden, indem versucht wird, die folgenden drei Anfragen zu beantworten :

(negiert und in klauselform mit Greenschem Antwortprädikat)

1. Gibt es eine etablierte Diagnose ? $\exists x \text{ Diagnose}(x);$ $\neg \text{Diagnose}(x) \vee \text{Ans}(x)$
2. Gibt es Krankheiten, auf die ein starker Verdacht hindeutet ? $\exists x \text{ Verdacht}(x);$ $\neg \text{Verdacht}(x) \vee \text{Ans}(x)$
3. Gibt es Krankheiten, die ausgeschlossen werden können ? $\exists x \neg \text{Diagnose}(x);$ $\text{Diagnose}(X) \vee \text{Ans}(X)$

Aus den Regeln und anamnestischen Befunden $F_{\text{AbdAnam}} \cup F_{\text{Befunde}}$ können keine Antworten auf die Fragen 1 und 3 hergeleitet werden. Die zweite Frage kann zwar positiv beantwortet werden, allerdings kann nicht hergeleitet werden, auf welche Krankheit der Verdacht besteht:

Frage: $\neg \text{Verdacht}(x) \vee \text{Ans}(x)$ nach einem Verdacht aus $KM_{\text{AbdAnam}} \cup KM_{\text{Befunde}}$

$\{ \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Verdacht}(b), \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Kolik}(b), \text{Kolik}(\text{Nierenkolik}), \text{Kolik}(\text{Gallenkolik}), \dots$

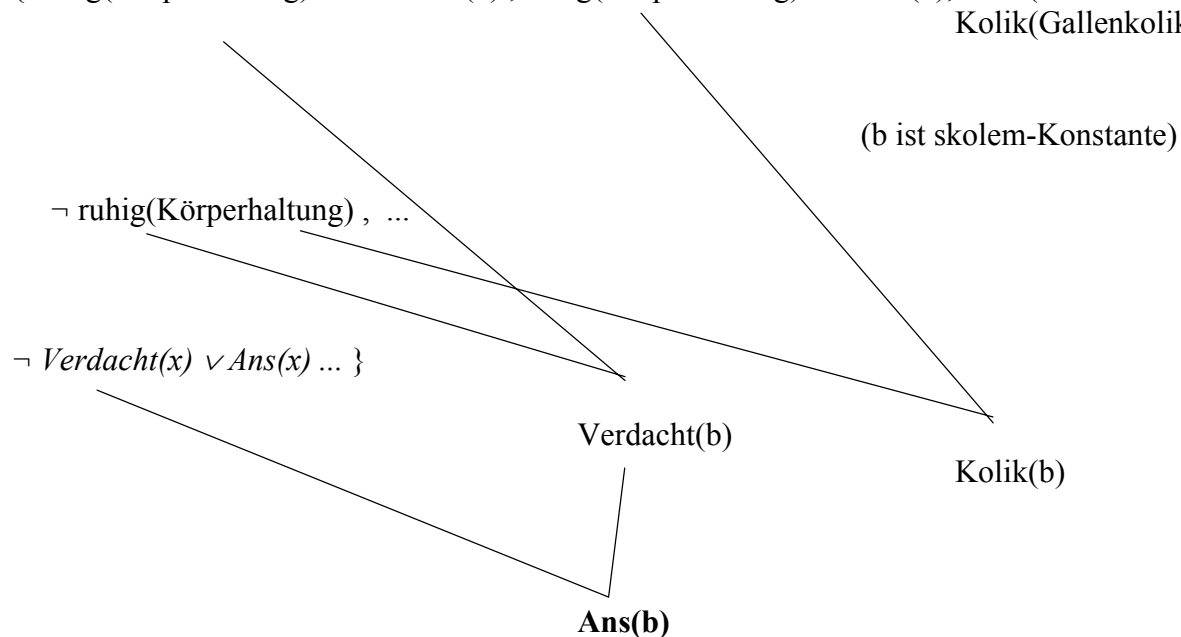


Abbildung 28: Herleitung eines Verdachtes aus $F_{\text{AbdAnam}} \cup F_{\text{Befunde}}$

Bezüglich des Laborbereiches kann aus den Regeln und Laborwerten $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$ die erste Frage nicht beantwortet werden. Auf die zweite Frage wird die Antwort : **Ans(Gallenkolik)** gefunden. Die dritte wird mit **Ans(Pankreatitis)**, **Ans(Appendizitis)** und **Ans(Ileus)** beantwortet. Es wird also ein starker Verdacht auf eine Gallenkolik hergeleitet, sowie die Krankheiten Pankreatitis, Appendizitis und Ileus ausgeschlossen.

Frage: $\neg \text{Verdacht}(x) \vee \text{Ans}(x)$ nach einem Verdacht aus $KM_{\text{AbdLab}} \cup KM_{\text{Labor}}$.

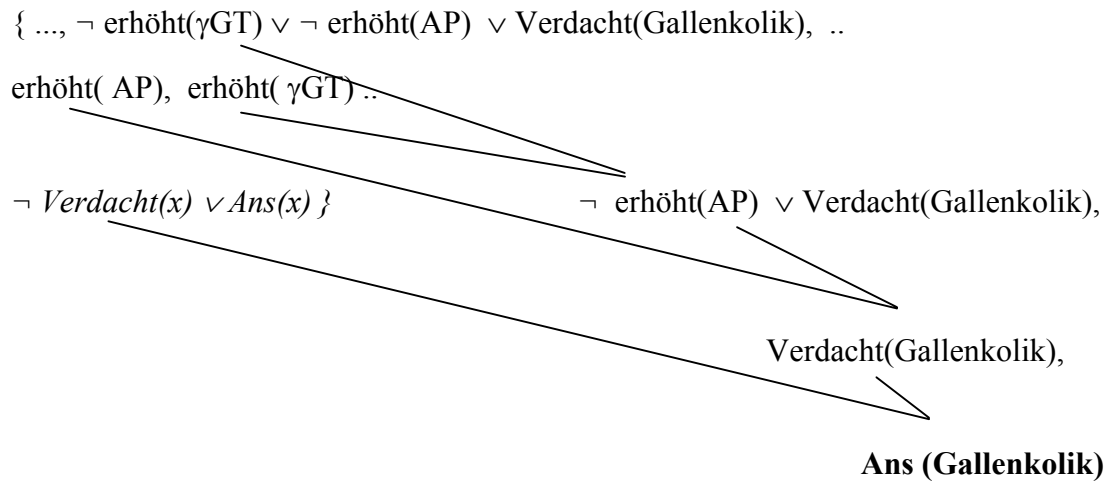


Abbildung 29: Herleitung des Verdachtes $\text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ aus $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$

Frage: $\text{Diagnose}(x) \vee \text{Ans}(x)$ nach auszuschließenden Diagnosen aus $KM_{\text{AbdLab}} \cup KM_{\text{Labor}}$

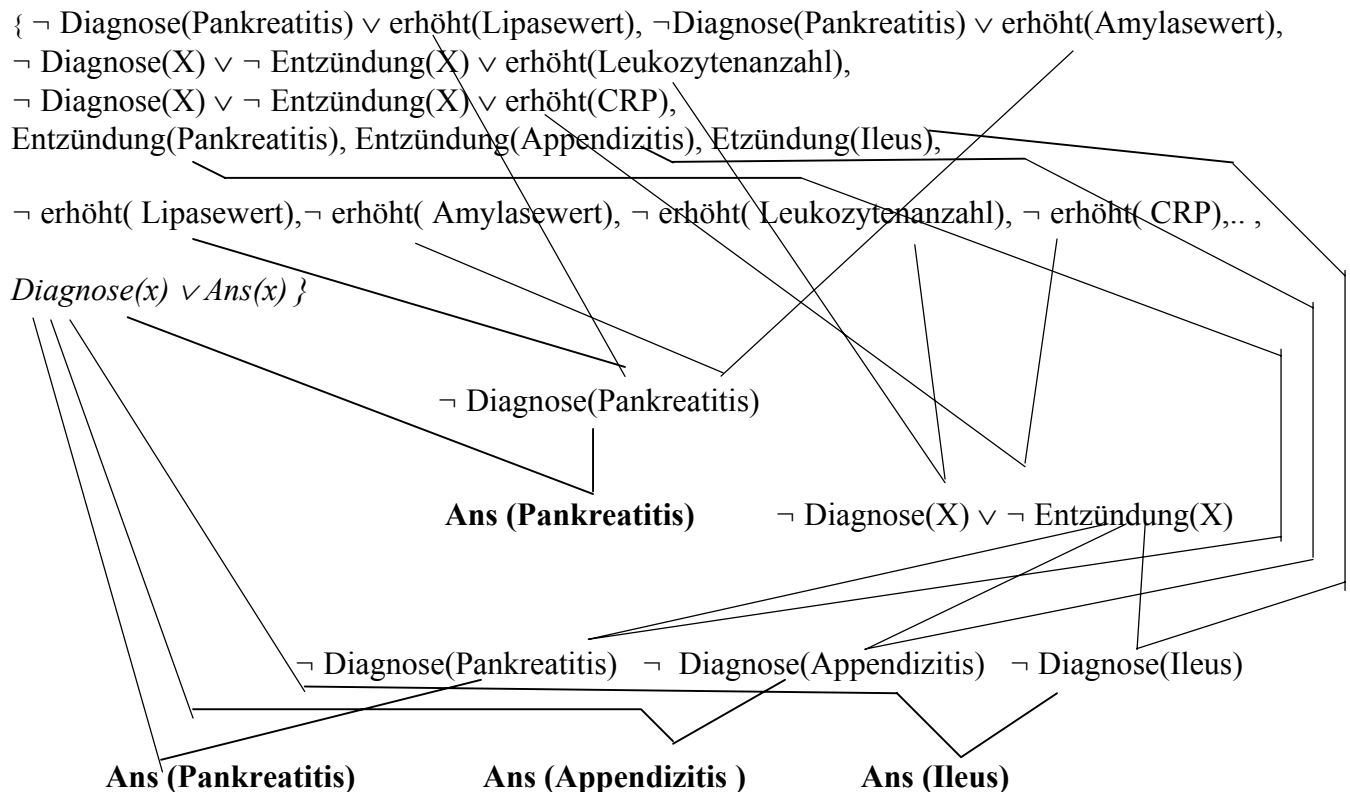


Abbildung 30: Herleitung von auszuschließenden Diagnosen aus $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$

Aus den Regeln und den sonographischen Befunden $F_{\text{AbdSon}} \cup F_{\text{Sono}}$ kann nur die dritte Frage mit **Ans(Pankreatitis)** beantwortet werden, d.h. die Krankheit Pankreatitis wird ausgeschlossen.

Frage: $\text{Diagnose}(x) \vee \text{Ans}(x)$ nach auszuschließenden Diagnosen aus $\text{KM}_{\text{AbdSon}} \cup \text{KM}_{\text{Sono}}$.

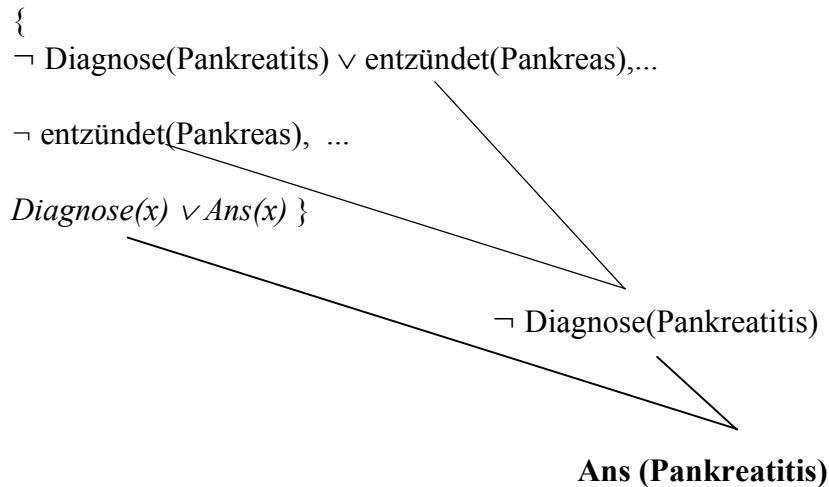


Abbildung 31: Herleitung der auszuschl. Diagnose $\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})$ aus $F_{\text{AbdSon}} \cup F_{\text{Sono}}$

Insgesamt wird der starke Verdacht auf eine Gallenkolik ($\text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$) und der Ausschluss der Diagnosen Pankreatitis, Appendizitis und Ileus gefunden ($\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \wedge \neg \text{Diagnose}(\text{Appendizitis}) \wedge \neg \text{Diagnose}(\text{Ileus})$).

Bei der Erklärung ist es wichtig, alle Verdachtsherleitungen einzubeziehen, d.h. mehr verschiedene Herleitungen für ein Ergebnis müssen jeweils in der Erklärung enthalten sein, da sie in der Realität einen Verdacht stützen können.

Überführung der Formeln in Klauseln:

(Anamnese)

$\text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \rightarrow \exists x ((\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}))$

$\neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \exists x ((\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}))$

$\neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \exists x ((\text{Verdacht}(x) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus})) \wedge (\text{Kolik}(x) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus})))$

$\text{skolem } (\neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Verdacht}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus})) \wedge \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Kolik}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}))$

$\{ \neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Verdacht}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}),$
 $\neg \text{zu_und_abnehmend}(\text{Schmerzintensität_im_Bauch}) \vee \text{Kolik}(a) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}) \}$

$\{ \text{Kolik}(\text{Nierenkolik}), \text{Kolik}(\text{Gallenkolik}) \}$ (bereits Klauselform)

$\neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \rightarrow \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x))$

\neg $\text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x))$
 skolem $\text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee (\text{Verdacht}(b) \wedge \text{Kolik}(b))$
 \neg $(\text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Verdacht}(b)) \wedge (\text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Kolik}(b))$

$\{ \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Verdacht}(b) , \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \vee \text{Kolik}(b) \}$

$\text{schmerzhaft}(\text{Bewegung_des_rechten_Oberschenkels}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Appendizitis})$

\neg $\text{schmerzhaft}(\text{Bewegung_des_rechten_Oberschenkels}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis})$

$\{ \neg \text{schmerzhaft}(\text{Bewegung_des_rechten_Oberschenkels}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}) \}$

$\text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \rightarrow \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Entzündung}(x))$

\neg $\text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Entzündung}(x))$

skolem $\neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee (\text{Verdacht}(c) \wedge \text{Entzündung}(c))$

\neg $(\neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Verdacht}(c)) \wedge (\neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Entzündung}(c))$

$\{ \neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Verdacht}(c), \neg \text{schmerzhaft}(\text{Körperbewegung}) \vee \text{Entzündung}(c) \}$

$\{ \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{Entzündung}(\text{Ileus}) \}$ (bereits Klauselform)

$\text{erbrechen}(\text{Magen}) \rightarrow (\text{Verdacht}(\text{Appendizitis}) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}))$

\neg $\text{erbrechen}(\text{Magen}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus})$

$\{ \neg \text{erbrechen}(\text{Magen}) \vee \text{Verdacht}(\text{Appendizitis}) \vee \text{Verdacht}(\text{Ileus}) \}$

(Labor)

$(\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})$

\neg $((\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \wedge$
 $(\text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \rightarrow (\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})))$

\neg $(\neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \wedge$
 $(\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee (\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})))$

\neg $(\neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \wedge$
 $(\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{erhöht}(\text{Lipasewert})) \wedge (\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{erhöht}(\text{Amylasewert}))$

$\{ \neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}), \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{erhöht}(\text{Lipasewert}),$

$\neg \text{Diagnose(Pankreatitis)} \vee \text{erhöht(Amylasewert)} \}$

$(\text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \wedge \text{erhöht(CRP)}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x))$

$\text{äq } (\text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \wedge \text{erhöht(CRP)}) \rightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)) \wedge$
 $(\exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)) \rightarrow (\text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \wedge \text{erhöht(CRP)}))$

$\text{äq } (\neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x))) \wedge$
 $(\forall x (\neg \text{Diagnose}(x) \vee \neg \text{Entzündung}(x)) \vee (\text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \wedge \text{erhöht(CRP)}))$
 skolem

$(\neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee (\text{Diagnose}(d) \wedge \text{Entzündung}(d))) \wedge$
 $(\forall x (\neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X)) \vee (\text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \wedge \text{erhöht(CRP)}))$

$\text{äq } \forall x (\neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee \text{Diagnose}(d)) \wedge$
 $(\neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee \text{Entzündung}(d)) \wedge$
 $(\neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee \text{erhöht(Leukozytenanzahl)}) \wedge$
 $(\neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee \text{erhöht(CRP)})$

$\{ \neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee \text{Diagnose}(d), \neg \text{erhöht(Leukozytenanzahl)} \vee \neg \text{erhöht(CRP)} \vee$
 $\text{Entzündung}(d), \neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee \text{erhöht(Leukozytenanzahl)}, \neg \text{Diagnose}(X) \vee \neg \text{Entzündung}(X) \vee$
 $\text{erhöht(CRP)} \}$

$\{ \text{Entzündung(Pankreatitis)}, \text{Entzündung(Appendizitis)}, \text{Entzündung(Ileus)} \}$ (bereits Klauselform)

$(\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht(AP)}) \rightarrow \text{Verdacht(Gallenkolik)}$

$\text{äq } \neg \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \vee \neg \text{erhöht(AP)} \vee \text{Verdacht(Gallenkolik)}$

$\{ \neg \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \vee \neg \text{erhöht(AP)} \vee \text{Verdacht(Gallenkolik)} \}$

$\text{blutig(Urin)} \rightarrow (\text{Verdacht(Nierenkolik)} \vee \text{Verdacht(Appendizitis)})$

$\text{äq } \neg \text{blutig(Urin)} \vee \text{Verdacht(Nierenkolik)} \vee \text{Verdacht(Appendizitis)}$

$\{ \neg \text{blutig(Urin)} \vee \text{Verdacht(Nierenkolik)} \vee \text{Verdacht(Appendizitis)} \}$

$\text{erniedrigt(K+Wert)} \rightarrow \text{Verdacht(Ileus)}$

$\text{äq } \neg \text{erniedrigt(K+Wert)} \vee \text{Verdacht(Ileus)}$

$\{ \neg \text{erniedrigt(K+Wert)} \vee \text{Verdacht(Ileus)} \}$

(Sonographie)

$\text{verdickt}(\text{Appendix}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Appendizitis})$

$\text{äq } \neg \text{verdickt}(\text{Appendix}) \vee \text{Diagnose}(\text{Appendizitis})$

$\{ \neg \text{verdickt}(\text{Appendix}) \vee \text{Diagnose}(\text{Appendizitis}) \}$

$\text{hat_stein}(\text{Niere}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Nierenkolik})$

$\text{äq } \neg \text{hat_stein}(\text{Niere}) \vee \text{Diagnose}(\text{Nierenkolik})$

$\{ \neg \text{hat_stein}(\text{Niere}) \vee \text{Diagnose}(\text{Nierenkolik}) \}$

$\text{hat_stein}(\text{Gallenblase}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Gallenkolik})$

$\text{äq } \neg \text{hat_stein}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Diagnose}(\text{Gallenkolik})$

$\{ \neg \text{hat_stein}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Diagnose}(\text{Gallenkolik}) \}$

$\text{entzündet}(\text{Pankreas}) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})$

$\text{äq } (\text{entzündet}(\text{Pankreas}) \rightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \wedge$
 $(\text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \rightarrow \text{entzündet}(\text{Pankreas}))$

$\text{äq } (\neg \text{entzündet}(\text{Pankreas}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \wedge$
 $(\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{entzündet}(\text{Pankreas}))$

$\{ \neg \text{entzündet}(\text{Pankreas}) \vee \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}), \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}) \vee \text{entzündet}(\text{Pankreas}) \}$

$\text{gestaut}(\text{Gallenblase}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$

$\text{äq } \neg \text{gestaut}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$

$\{ \neg \text{gestaut}(\text{Gallenblase}) \vee \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$

$\text{gestaut}(\text{Niere}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik})$

$\text{äq } \neg \text{gestaut}(\text{Niere}) \vee \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik})$

$\{ \neg \text{gestaut}(\text{Niere}) \vee \text{Verdacht}(\text{Nierenkolik}) \}$

4.4.2. Erklärung der Lösung durch Erklärungskommentare

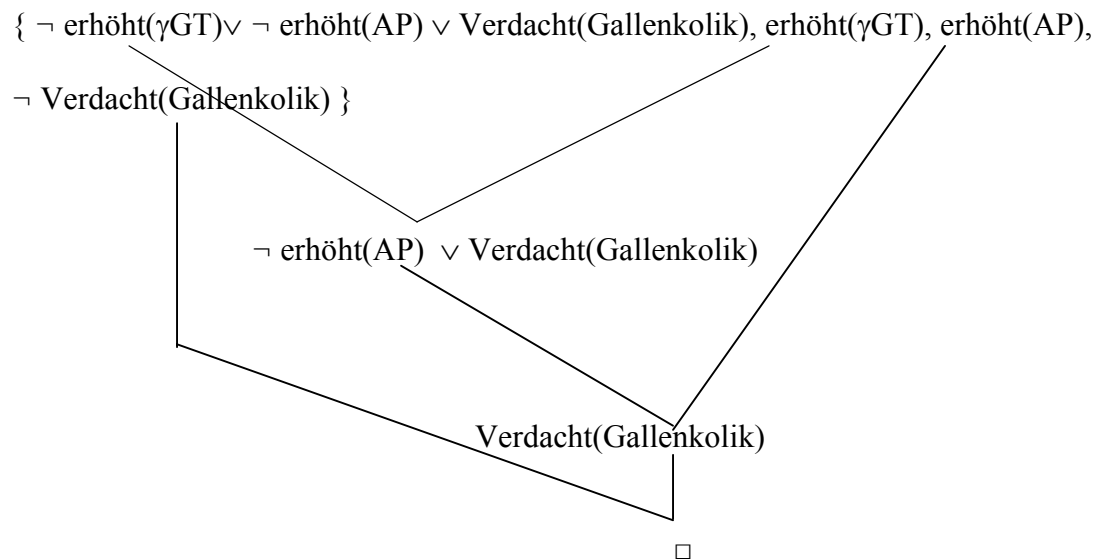
Zunächst soll eine Expertenerklärung untersucht werden, die im Rahmen der Schlussfolgerungen im Laborbereich für $Verdacht(Gallenkolik)$ gegeben werden könnte : $E_0 = \{erhöht(AP), erhöht(\gamma GT), erhöht(\gamma GT) \wedge erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)\}$ ist eine Expertenerklärung mit der Eigenschaft, dass alle Elemente der Menge auch Elemente der Ausgangsmenge ($F_{AbdLab} \cup F_{Labor}$) sind („Grund“).

Beweis:

$$1. E_0 \models Verdacht(Gallenkolik)$$

z.Zg. : aus der in Klauselform überführten Menge

$$E_0' = \{ erhöht(AP), erhöht(\gamma GT), \neg erhöht(\gamma GT) \vee \neg erhöht(AP) \vee Verdacht(Gallenkolik) \} \cup \{ \neg Verdacht(Gallenkolik) \} \quad \text{lasst sich die leere Klausel ableiten.}$$



$$2. F_{AbdLab} \cup F_{Labor} \models E_0$$

Beweis : trivial (alle Elemente in E_0 sind auch Elemente in $F_{AbdLab} \cup F_{Labor}$)

$$3. \text{ Es gibt eine Teilmenge } F' \text{ von } F_{AbdLab} \cup F_{Labor} \text{ ,so dass } F' \models Verdacht(Gallenkolik) \text{ aber } F' - E_0 \not\models Verdacht(Gallenkolik).$$

Sei $F' = \{erhöht(AP), erhöht(\gamma GT), erhöht(\gamma GT) \wedge erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)\} (= E_0)$

$$\text{dann } F' \models Verdacht(Gallenkolik) \text{ (s.o.)}$$

$$\text{aber } \{ \} \not\models Verdacht(Gallenkolik).$$

Die Menge ist minimal, weil alle Elemente in 1.) benötigt werden.

Es sind zwei Inferenzschritte nötig, um aus der Expertenerklärung die zu erklärende Formel abzuleiten. Statt der Expertenerklärung E_0 können auch zwei Expertenerklärungen E_1 und E_2 gegeben werden, die zusammen die Ableitungsfolge widerspiegeln³⁸. Auf den Herleitungsprozess der Lösung bezogen heißt das, dass E_1 , als Expertenerklärung der Lösung, ein Zwischenergebnis $erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)$ enthält, welches durch eine weitere Expertenerklärung erklärt werden muss, da es weder ein initiales Fakt (wie $erhöht(AP)$) ist, noch eine Systemregel darstellt. Diese weitere Expertenerklärung E_2 enthält nur noch initiale Fakten ($erhöht(\gamma GT)$) sowie Systemregeln ($(erhöht(\gamma GT) \wedge erhöht(AP)) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)$). Daher besteht kein weiterer Erklärungsbedarf und die Ableitungsfolge ist vollständig wiedergegeben.

E_1 ist eine Expertenerklärung von $Verdacht(Gallenkolik)$ und E_2 eine Expertenerklärung von $erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)$:

$$E_1 = \{erhöht(AP), erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)\}$$

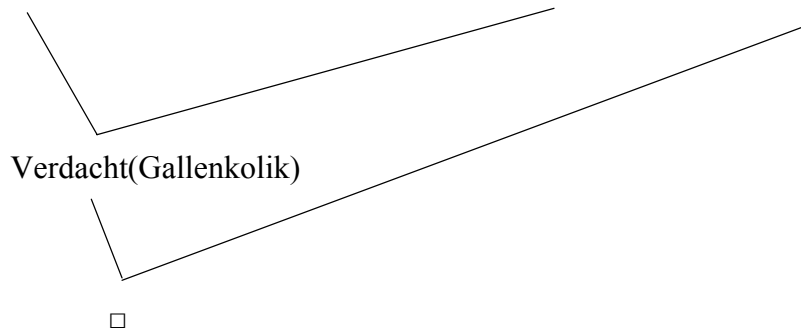
$$E_2 = \{erhöht(\gamma GT), (erhöht(\gamma GT) \wedge erhöht(AP)) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)\}$$

Beweis: $E_1 = \{erhöht(AP), erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)\}$ ist eine Expertenerklärung von $Verdacht(Gallenkolik)$

$$1. E_1 \models Verdacht(Gallenkolik)$$

z.Zg.: aus der in Klauselform überführten Menge $E_1' = \{erhöht(AP), \neg erhöht(AP) \vee Verdacht(Gallenkolik)\} \cup \{\neg Verdacht(Gallenkolik)\}$ lässt sich die leere Klausel ableiten.

$$\{\neg erhöht(AP) \vee Verdacht(Gallenkolik), erhöht(AP), \neg Verdacht(Gallenkolik)\}$$



$$2. F_{AbdLab} \cup F_{Labor} \models E_1$$

$$2.1 F_{AbdLab} \cup F_{Labor} \models erhöht(AP) \text{ trivial, } erhöht(AP) \in F_{Labor}$$

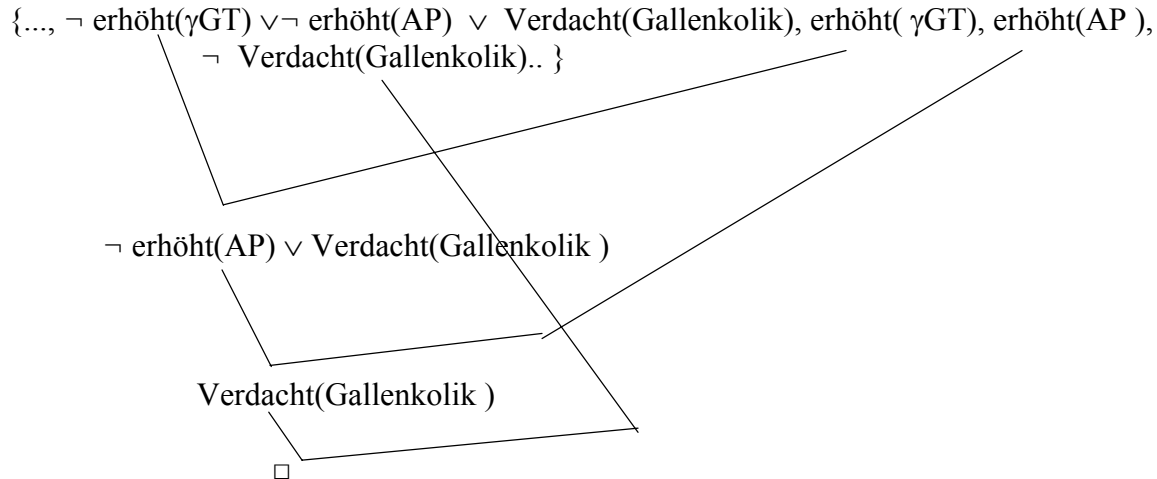
$$2.2. F_{AbdLab} \cup F_{Labor} \models erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)$$

Negation und Überführung in Klauselform von $erhöht(AP) \rightarrow Verdacht(Gallenkolik)$

³⁸ Statt der Betrachtung aller einzelnen Ableitungsschritte könnte es manchmal auch sinnvoll sein, mehrere Resolutionsschritte zu einem für den Menschen verständlicheren Schritt zusammenzufassen. Dies wird als Verbesserungsmöglichkeit festgehalten.

ergibt $\{ \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$

z.Zg. aus $\text{KM}_{\text{AbdLab}} \cup \text{KM}_{\text{Labor}} \cup \{ \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$ lässt sich die leere Klausel ableiten.



3. Es gibt eine Teilmenge F' von $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$, so dass $F' \models \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ aber $F' - E_1 \not\models \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$.

Sei $F' = \{ \text{erhöht}(\text{AP}), \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \} (= E_0)$

dann $F' \models \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ (s. Beweis 1)

aber $\{ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \} \not\models \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$.

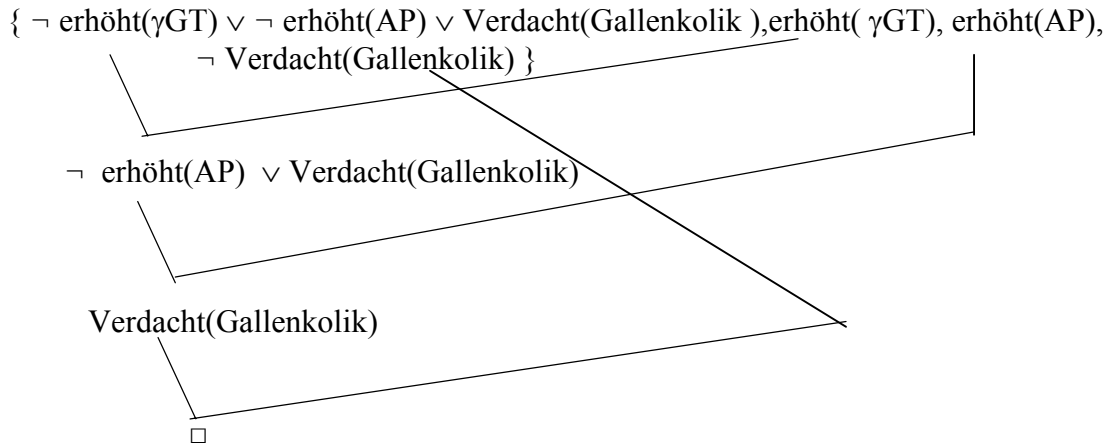
Die Menge ist minimal, weil alle Elemente in 1.) benötigt werden.

Beweis: $E_2 = \{ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), (\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$ ist eine Expertenerklärung von $\text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$.

1. $E_2 \models \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$.

Negation und Überführung in Klauselform von $\text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ ergibt $\{ \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$

z.Zg. : aus der in Klauselform überführten Menge $E_2' = \{ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \neg \text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \vee \neg \text{erhöht}(\text{AP}) \vee \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \} \cup \{ \text{erhöht}(\text{AP}), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$ lässt sich die leere Klausel ableiten.



$$2. F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}} \models E_2$$

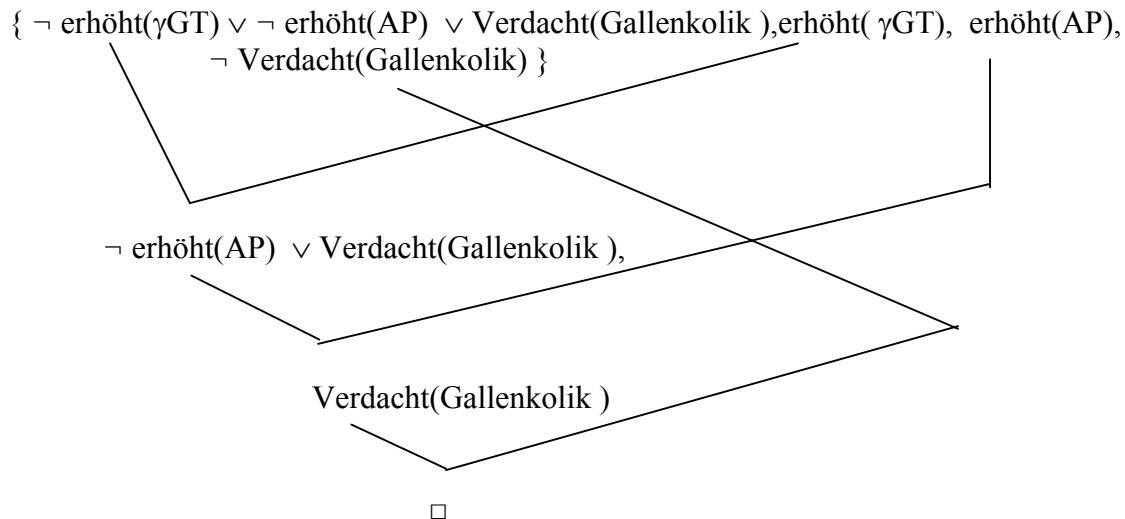
$$2.1 F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}} \models \text{erhöht}(\gamma GT) \text{ trivial, } \text{erhöht}(\gamma GT) \in F_{\text{Labor}}$$

$$2.2 F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}} \models (\text{erhöht}(\gamma GT) \wedge \text{erhöht}(AP)) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$$

Negation und Überführung in Klauselform von $(\text{erhöht}(\gamma GT) \wedge \text{erhöht}(AP)) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$

ergibt $\{\text{erhöht}(\gamma GT), \text{erhöht}(AP), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})\}$

z.Zg. : aus $KM_{\text{AbdLab}} \cup KM_{\text{Labor}} \cup \{\text{erhöht}(\gamma GT), \text{erhöht}(AP), \neg \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})\}$ lässt sich die leere Klausel ableiten.



3. Es gibt eine Teilmenge F' von $F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{Labor}}$, so dass $F' \models \text{erhöht}(AP) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ aber $F' - E_2 \not\models \text{erhöht}(AP) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$.

Sei $F' = \{ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), (\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \}$ (= E_2)

dann $F' \models \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ (s. dieser Beweis, 1.)

aber $\{\} \not\models \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$

Die Menge ist minimal, weil alle Elemente in 1.) benötigt werden.

Für die Folge $F = E_1, E_2$ gilt, dass E_1 die Expertenerklärung der zu erklärenden Formel ist und E_2 ausschließlich aus initialen oder den Systemregeln entsprechenden Formeln besteht. Diese Folge von Erklärungen ist so in der für die Erklärungskommentare nötigen Form.

Im Falle des Ausschlusses der Diagnose Pankreatitis durch das Labor z.B. gibt es mehrere Herleitungen, die alle auf Grund unterschiedlicher Fakten das Ergebnis produzieren. Dies wird durch die Folgen von Expertenerklärungen

$F1 = \{ \forall x (\text{Entzündung}(X) \rightarrow \neg \text{Diagnose}(X)), \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}) \},$
 $\{ \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)),$
 $\neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \}$

$F2 = \{ \forall x (\text{Entzündung}(X) \rightarrow \neg \text{Diagnose}(X)), \text{Entzündung}(\text{Pankreatitis}) \},$
 $\{ \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)),$
 $\neg \text{erhöht}(\text{CRP}) \}$

$F3 = \{ (\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}),$
 $\neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \}$

$F4 = \{ (\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}),$
 $\neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}) \}$

ausgedrückt.

Des weiteren können auch Informationen hergeleitet werden, die zur Akzeptanz der Lösung beitragen, aber nicht in einem Ableitungspfad der Lösung enthalten sind. Ein Beispiel ist die Herleitung in der Anamnese, dass es sich um eine Kolik handelt. Aus $F_{\text{AbdAnam}} \cup F_{\text{Befunde}}$ folgt $\exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x))$; daraus lässt sich aber nicht $\text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$ herleiten.

Es wird davon ausgegangen, dass die Befunde der Anamnese, die im Labor gemessenen Werte und die sonographischen Beobachtungen als *initial* gelten $I = \{ F_{\text{Befunde}} \cup F_{\text{Labor}} \cup F_{\text{Sono}} \}$ und die Gültigkeit der Systemregeln akzeptiert wird. $R = \{ F_{\text{AbdAnam}} \cup F_{\text{AbdLab}} \cup F_{\text{AbdSon}} \}$.

Dann kann vom Labor (AbdLab) bzgl. **Verdacht(Gallenkolik)** folgender *Erklärungskommentar* übermittelt werden :

$\varepsilon (\text{AbdLab}, \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})) =$

($F = \{ \{ \text{erhöht}(\text{AP}), \text{erhöht}(\text{AP}) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \},$
 $\{ \text{erhöht}(\gamma\text{GT}), (\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}) \} \},$

$f_{\text{initial}} = \{ (\text{erhöht}(\text{AP}), \text{'erhöhter AP-Wert von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.37 durch photometrischen Test ermittelt'}),$
 $(\text{erhöht}(\gamma\text{GT}), \text{'erhöhter } \gamma\text{GT -Wert von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.13 durch photometrischen Test ermittelt'}) \},$

$f_{\text{Regeln}} = \{ ((\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik}), \text{'Erhöhter } \gamma\text{GT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>'})) \},$

$H = \{ \}, f_{\text{Hinweise}} = \{ \}, E_H = \{ \} .$

Für \neg **Diagnose(Pankreatitis)** :

$\varepsilon (\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) =$

($F = \{ F1, F2, F3, F4 \},$ (s.o.)

$f_{\text{initial}} = \{ (\neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}), \text{'Normale Leukozytenanzahl gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 mittels Neubauer-Zählkammer'}),$
 $(\neg \text{erhöht}(\text{CRP}), \text{'CRP-Wert im Normalbereich von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.45 durch imunturbidimetrischen Test ermittelt'}),$

$(\neg \text{erhöht}(\text{Lipasewert}), \text{'Normaler Lipasewert gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.29 durch enzymatischen Test'}),$

$(\neg \text{erhöht}(\text{Amylasewert}), \text{'Normaler Amylasewert gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.39 durch photometrischen Test'}) \},$

$f_{\text{Regeln}} = \{ ((\text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP})) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \text{'Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhöhter Leukozytenanzahl und mit erhöhten CRP-Wert verbunden <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>'}),$
 $(\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis}),$

'Bei einer Pankreatitis ist immer ein erhöhter Lipasewert und ein erhöhter Amylasewert zu messen <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>'),
(Entzündung(Pankreatitis), 'Pankreatitis ist eine Entzündung (des Pankreas)') },

$$H = \{\}, f_{\text{Hinweise}} = \{\}, E_H = \{\}.$$

Für \neg **Diagnose(Appendizitis)** kann

$$\varepsilon (\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Appendizitis)}) =$$

$$(F = \{ F1 = \{ \neg \text{Diagnose}(X) \leftarrow \text{Entzündung}(X), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}) \}, \\ \{ \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \\ \neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \},$$

$$F2 = \{ \neg \text{Diagnose}(X) \leftarrow \text{Entzündung}(X), \text{Entzündung}(\text{Appendizitis}) \}, \\ \{ \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \\ \neg \text{erhöht}(\text{CRP}) \} \},$$

$$f_{\text{initial}} = \{ (\neg \text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}), \text{'Normale Leukozytenanzahl gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 mittels Neubauer-Zählkammer'})^{39}, \\ (\neg \text{erhöht}(\text{CRP}), \text{'CRP-Wert im Normalbereich von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.45 durch imunturbidimetrischen Test ermittelt'}) \},$$

$$f_{\text{Regeln}} = \{ (\text{erhöht}(\text{Leukozytenanzahl}) \wedge \text{erhöht}(\text{CRP}) \leftrightarrow \exists x (\text{Diagnose}(x) \wedge \text{Entzündung}(x)), \\ \text{'Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhöhter Leukozytenanzahl und mit erhöhten CRP-Wert verbunden <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>'},^{40} \\ (\text{Entzündung}(\text{Appendizitis}), \text{'Appendizitis ist eine Entzündung (des Blinddarms)'}) \}, \\ H = \{\}, f_{\text{Hinweise}} = \{\}, E_H = \{\}$$

³⁹ Ein aufrufendes System muss sicherstellen, dass in verschiedenen Erklärungskommentaren nicht für dieselbe initiale Formel verschiedene Texte übergeben werden bzw. muss bei Erstellung eines Gesamterklärungskommentars verhindert werden, dass es mehrere Texte zu einer Formel gibt (sonst wäre es keine Funktion mehr).

⁴⁰ Wie bei den initialen Formeln gilt, dass für gleiche Klauseln aus R nicht verschiedene Texte übergeben werden dürfen

$f_{\text{Regeln}} = \{ (\text{entzündet(Pankreas)} \leftrightarrow \text{Diagnose(Pankreatitis)}, ' \text{Eine Entzündung des Pankreas ist}$

durch die deutlichen entzündlichen Veränderungen sonographisch eindeutig zu erkennen <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>') \}

$H = \{ \}, f_{\text{Hinweise}} = \{ \}, E_H = \{ \} \} .$

Aus den übermittelten Erklärungskommentaren wird der Gesamterklärungskommentar für den Verdacht auf eine Gallenkolik generiert. Dabei wird die Herleitung, dass es sich um eine Kolik handelt, als Hinweis integriert.

Außerdem werden die ausgeschlossenen Diagnosen als Hinweis hinzugefügt, da sie im Rahmen der Differentialdiagnostik die Wahrscheinlichkeit der vermuteten Krankheit erhöhen.

$\varepsilon(\text{gesamt}, \text{Verdacht(Gallenkolik)}) =$

$(F = F \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \text{Verdacht(Gallenkolik)}) \text{ s.o.}$

$f_{\text{initial}} = f_{\text{initial}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \text{Verdacht(Gallenkolik)}) \cup$
 $\{ (\neg \text{ruhig(Körperhaltung)}, ' \text{Es wurde in der Anamnese durch Dr. Mann in der Notaufnahme des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 12.00 eine unruhige Körperhaltung ermittelt}') \} \cup$

$f_{\text{initial}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Appendizitis)}) \cup$

$f_{\text{initial}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Ileus)}) \cup$

$f_{\text{initial}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Pankreatitis)}) \cup$

$f_{\text{initial}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdSon}, \neg \text{Diagnose(Pankreatitis)})$

$f_{\text{Regeln}} = f_{\text{Regeln}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \text{Verdacht(Gallenkolik)}) \cup$
 $\{ (\neg \text{ruhig(Körperhaltung)} \rightarrow \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)), ' \text{Eine unruhige Körperhaltung deutet auf eine Kolik hin <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>}') \} \cup$
 $f_{\text{Regeln}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Appendizitis)}) \cup$
 $f_{\text{Regeln}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Ileus)}) \cup$
 $f_{\text{Regeln}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose(Pankreatitis)}) \cup$
 $f_{\text{Regeln}} \text{ aus } \varepsilon(\text{AbdSon}, \neg \text{Diagnose(Pankreatitis)})$,

$H = \{ \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)), \neg \text{Diagnose(Appendizitis)}, \neg \text{Diagnose(Ileus)}, \neg \text{Diagnose(Pankreatitis)} \} ,$

$f_{\text{Hinweise}} = \{ (\exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)), ' \text{Es gibt Hinweise, dass eine Kolik vorliegt (Nieren oder Gallenkolik)}'),$
 $(\neg \text{Diagnose(Appendizitis)}, ' \text{Die Differentialdiagnose } \textit{Appendizitis} \text{ kann ausgeschlossen werden}'),$
 $(\neg \text{Diagnose(Ileus)}, ' \text{Die Differentialdiagnose } \textit{Ileus} \text{ kann ausgeschlossen werden}'),$
 $(\neg \text{Diagnose(Pankreatitis)}, ' \text{Die Differentialdiagnose } \textit{Pankreatitis} \text{ kann ausgeschlossen werden}') \} ,$

$$E_H = \{ E_{\exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x))} = \{ \{ \neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \rightarrow \exists x (\text{Verdacht}(x) \wedge \text{Kolik}(x)), \neg \text{ruhig}(\text{Körperhaltung}) \} \},$$

$$E_{\neg \text{Diagnose}(\text{Appendizitis})} = F \text{ aus } \varepsilon (\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose}(\text{Appendizitis})) \text{ s.o. ,}$$

$$E_{\neg \text{Diagnose}(\text{Ileus})} = F \text{ aus } \varepsilon (\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose}(\text{Ileus})) \text{ s.o.,}$$

$$E_{\neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})} = F \text{ aus } \varepsilon (\text{AbdLab}, \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \cup$$

$$F \text{ aus } \varepsilon (\text{AbdSon}, \neg \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})) \quad \}.$$

Dem benutzenden Arzt gegenüber könnten die Erklärungskommentare dann ähnlich der Übersetzungen in Pseudo-Englisch im System MYCIN [Buchanan & Shortlife 84] textuell dargestellt werden. Eine automatische Ausgabe für den Erklärungskommentar ε (gesamt, Verdacht(Gallenkolik)) in der folgenden Form scheint implementierbar :

Es wurde

Verdacht Gallenkolik gefunden

weil **AP-Wert erhöht** vorliegt

(erhöhter AP-Wert von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.37 durch photometrischen Test ermittelt),

und daraus Verdacht auf Gallenkolik folgt, weil wir bereits wissen, dass

γ GT -Wert erhöht vorliegt

(erhöhter γ GT -Wert von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.13 durch photometrischen Test ermittelt)

und erhöhter γ GT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>

Außerdem wurde folgendes festgestellt:

- **Es gibt Hinweise, dass eine Kolik vorliegt (Nieren oder Gallenkolik)**

weil Körperhaltung unruhig vorliegt

(Es wurde in der Anamnese durch Dr. Mann in der Notaufnahme des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 12.00 eine unruhige Körperhaltung ermittelt)

und eine unruhige Körperhaltung deutet auf eine Kolik hin <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>

- **Die Differentialdiagnose *Appendizitis* kann ausgeschlossen werden**

Weil Appendizitis ist eine Entzündung (des Blinddarms)

und daraus folgt, dass **nicht** Appendizitis Diagnose,

weil Vorliegen einer Entzündung ist immer mit
erhöhter Leukozytenanzahl verbunden <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>

und es liegt Normale Leukozytenanzahl gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47
des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 mittels Neubauer-
Zählkammer vor

Dies folgt außerdem aus der Tatsache, dass

Vorliegen einer Entzündung ist immer verbunden mit erhöhten
CRP-Wert <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>

und es wurde CRP-Wert im Normalbereich von Herrn Mustermann im
Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.45
durch imunturbidimetrischen Test ermittelt

- **Die Differentialdiagnose *Ileus* kann ausgeschlossen werden**

Weil Ileus ist eine Entzündung (des Darmes durch Passagestörung)

und daraus folgt, dass **nicht** Ileus Diagnose (bereits erklärt <hier klicken, um Erklärung zu
wiederholen >)⁴¹

- **Die Differentialdiagnose *Pankreatitis* kann ausgeschlossen werden**

Weil Pankreatitis ist eine Entzündung (des Pankreas)

und daraus folgt, dass **nicht** Pankreatitis Diagnose (bereits erklärt <hier klicken, um Erklärung zu
wiederholen >

Dies folgt außerdem aus den Tatsachen, dass

Bei einer Pankreatitis ist immer ein erhöhter Lipasewert zu messen
<ggf. Link auf weitere Regelerklärung>')

und normaler Lipasewert gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des
Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.29 durch enzymatischen
Test

⁴¹ Eine bereits gegebene Erklärung sollte nicht unnötig wiederholt werden, um dem Benutzer nicht durch zu viele (wiederholte) Information den Blick auf das Wesentliche zu erschweren. Trotzdem sollte angeboten werden, diese Information auf Wunsch zu wiederholen..

- sowie bei einer Pankreatitis ist immer ein erhöhter Amylasewert zu messen
<ggf. Link auf weitere Regelerklärung>
- und normaler Amylasewert gemessen von Herrn Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.39 durch photometrischen Test
- sowie eine Entzündung des Pankreas ist durch die deutlichen entzündlichen Veränderungen sonographisch eindeutig zu erkennen <ggf. Link auf weitere Regelerklärung>
- und im Sonographiebild war keine Entzündung des Pankreas zu erkennen (Befund durch Dr. Musterfrau, sonograph. Abtlg. des Krankenhauses Musterstadt, 13.35, am 1.1.2001).

4.5. Implementierungsphase

4.5.1. Hard- und Softwareumgebung

4.5.1.1. Überblick

Im Folgenden wird die prototypische Programmierung der vorgenommenen Überlegungen und Schlussfolgerungen beschrieben. Die Expertensysteme für Anamnese, Labor und Sonographie AbdAnam, Abdlab und AbdSon sind in der Sprache SWI-Prolog [Wielemaker 02] auf jeweils einem an das Internet angeschlossenen Rechner implementiert worden. Dabei handelt es sich um einen PC (Windows 98) und zwei Sun-Workstations (Unix), um den Einsatz in einer heterogenen Umgebung zu demonstrieren. Zur einfacheren Benutzung und zum Testen wurde jedes System mit einer in XPCE entwickelten graphischen Oberfläche versehen. Die Kooperation wird durch Anbindung der Systeme an ein Multiagentensystem mit der OpenAgentArchitecture OAA [Martin et al. 99] realisiert. Da dieses System die Implementierung von Agenten in der Sprache SWI-Prolog nicht vorsieht, wurde zur Anbindung jeweils ein Perl-Skript erstellt. Die Definition der Erklärungskommentare wurde in Prolog übertragen. Ihre Nützlichkeit steht im Mittelpunkt der Untersuchung. Die Systeme sind so erstellt, dass sie für ihre Lösungen Erklärungskommentare generieren können, wobei das aufrufende System AbdAnam unter Einbeziehung der übergebenen Erklärungskommentare dem Benutzer den Erklärungskommentar für die Gesamtlösung geeignet visualisiert ausgeben kann (der Erklärungskommentar der Gesamtlösung könnte auch an ein weiteres in der Hierarchie des Verteilten Problemlösens weiter oben stehendes System als ganzes übergeben werden).

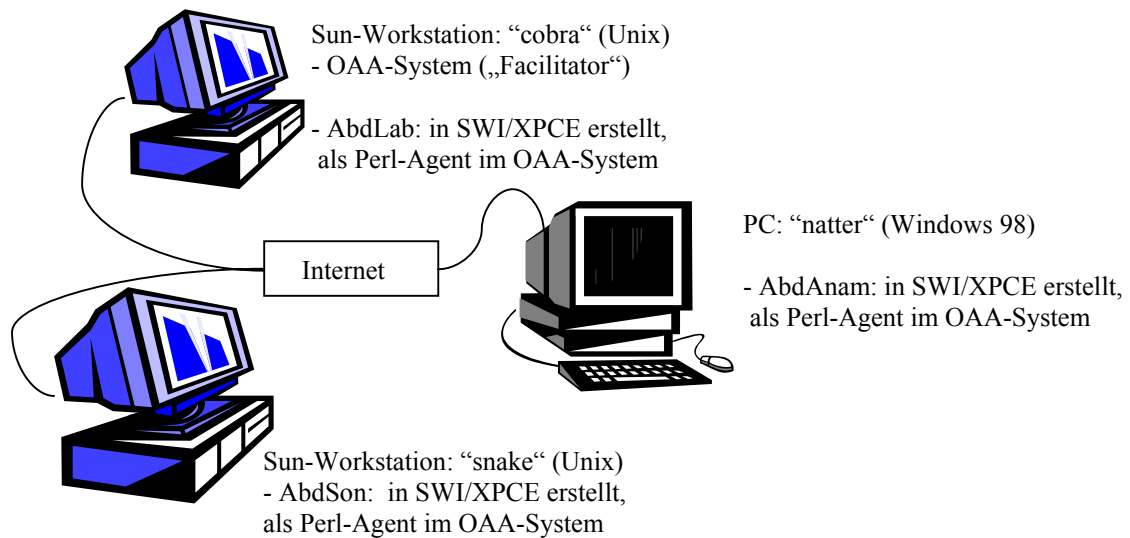


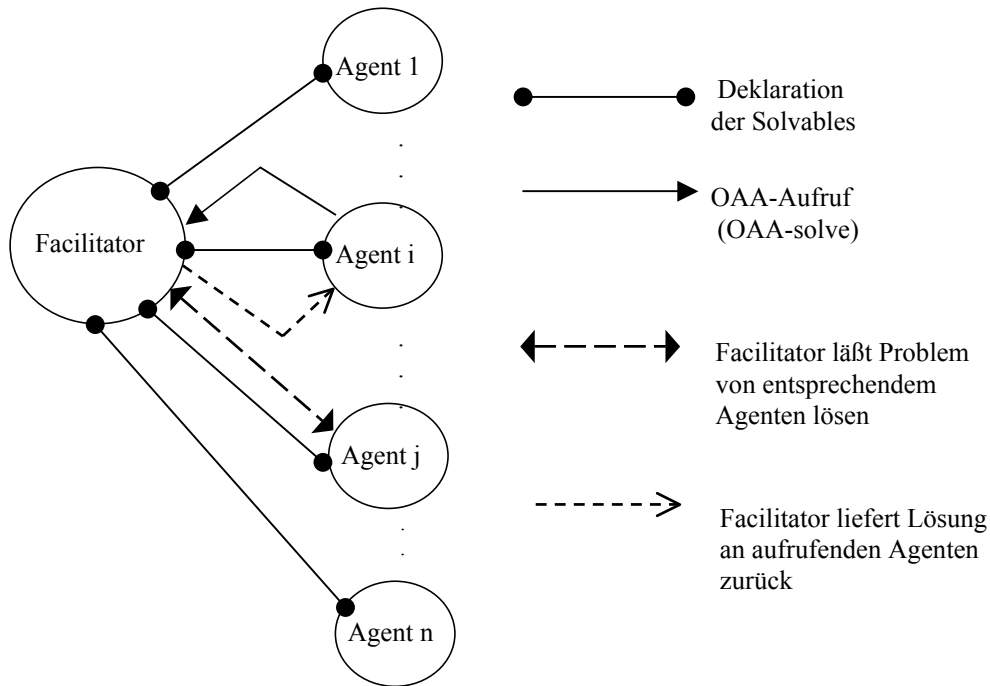
Abbildung 32: Prototypischer Expertensystemverbund

4.5.1.2. Das Multiagentensystem-Framework OAA

Für die Entwicklung eines Systemverbundes aus verschiedenen Systemen („Agenten“) existieren zahlreiche Entwicklungs- und Laufzeitumgebungen, sog. Frameworks (s. z.B. [Flores-Mendez 03] für einen Überblick). Diese Frameworks stellen Funktionalitäten für die von dem konkreten Problembereich unabhängigen Standardprobleme zur Verfügung (z.B. Verbindungsaufbau, Datenübertragung, Routinen für An- und Abmeldung eines Agenten im System, Routinen für diverse weitere Dienste). Die Kommunikation innerhalb dieser Systeme erfolgt i.Allg. in einer einzigen Sprache, der sog. Inter Agent Communication Language (ICL), die jeder Agent „verstehen“ muss. Das bedeutet aber nicht zwingend, dass auch die zur Lösung der konkreten Aufgabe nötigen Funktionalitäten in dieser Sprache geschrieben sind (teilweise werden in der Literatur dafür die Begriffe „Agentenkern“ und „Agentenhülle“ verwendet). Bei der Kommunikationssprache kann es sich um für diesen Zweck neu entwickelte Sprachen handeln (z.B. KIF [Neches et al.], KQML [Labrou et al. 97]) oder um Weiterentwicklungen bereits existierender wie z.B. JINI [Sun 99] als Weiterentwicklung von Java oder der im Framework „Open Agent Architecture“ OAA [Martin et. al. 99] des Stanford Research Institutes benutzten Sprache OAA-ICL, welche eine Erweiterung von Prolog darstellt. Da die drei Systeme AbdAnam, AbdLab und AbdSon wegen der Nähe von Prolog zur Prädikatenlogik der 1. Stufe in Prolog/XPCE implementiert worden sind, bietet sich die Nutzung dieses Frameworks OAA an, welches außerdem durch die Tatsache, dass es für Lehre und Forschung frei verfügbar ist und unter verschiedenen Betriebssystemen (u.a. Windows 95/98, Unix) installiert werden kann, geeignet ist.

Kernpunkt des OAA-Systems ist die deskriptive Beschreibung der zu lösenden Aufgaben, d.h. ein Agent beschreibt, welches Problem gelöst werden soll ohne anzugeben, wer es wie lösen soll (dieser Ansatz ist der Grund für die Auswahl der deskriptiven Programmiersprache Prolog als ICL). Jeder Agent deklariert beim Verbindungsaufbau, welche Probleme er lösen kann an eine zentrale Instanz (den „Facilitator“), die den gesamten Problemlösungsprozess verwaltet, den

Agenten Probleme zuordnet und den auftraggebenden Agenten die Lösungen zurückliefert. Falls mehrere Agenten die Aufgabe lösen können, wird eine Liste mit allen Lösungen zurückgeliefert. Im folgenden Bild haben die Agenten 1 bis n beim Verbindungsaufbau ihre „Solvables“ deklariert. Agent i ruft durch das ICL-Kommando OAA-solve mit den entsprechenden Parametern den Facilitator zum Lösen eines bestimmten Problems auf. Dieser lässt es durch den Agenten lösen, dessen Deklaration das Problem beinhaltet, und liefert die Lösung an den aufrufenden Agenten zurück ($1 \leq i \leq n$, $1 \leq j \leq n$).



Die Agenten kommunizieren nicht untereinander, sondern nur über den Facilitator.

Abbildung 33: Facilitator und Agenten im OAA-System

Für die Benutzung des Systems muss ein Agent Routinen aus einer zur Verfügung gestellten Bibliothek benutzen. Zur Zeit werden mit dem OAA – System Bibliotheken in den Sprachen C, Java, Perl, WebL, Visual Basic, Quintus- und Sixtus-Prolog zur Verfügung gestellt. Für die Nutzung anderer Programmiersprachen, wie z.B. der für die Implementierung der Systeme AbdAnam, AbdLab und AbdSon benutzten Sprache SWI-Prolog, muss eine zweigeteilte Programmierung erfolgen, indem ein Teil in der unterstützten Sprache z.B. Perl erfolgt („Agentenhülle“) und der andere Teil in der nicht-unterstützten Sprache damit verbunden wird. Da dies über die Standardnutzung des Frameworks hinausgeht, soll im Folgenden die Umsetzung kurz beschrieben werden:

Zur Nutzung des OAA-Systems muss eine Schleife (OAA-Loop) gestartet werden, die bis zur Terminierung des Agenten nicht beendet werden darf. Als Schnittstelle wird jedoch in der Perl-Bibliothek eine Routine „idle“ angeboten, die nach Ablauf eines Timers aufgerufen wird und zur

Verbindung benutzt werden kann. Nach Terminierung der Routine „idle“ wird die Schleife mit neu gesetztem Timer fortgesetzt. Eine Möglichkeit, auf diese Weise SWI-Prolog-Programme anzubinden, wird im folgenden Bild dargestellt (das Perl-Skript steht in Verbindung zum OAA-Facilitator und kommuniziert über Ein-/Ausgabeumleitungen mit dem SWI-Prolog-Programm).

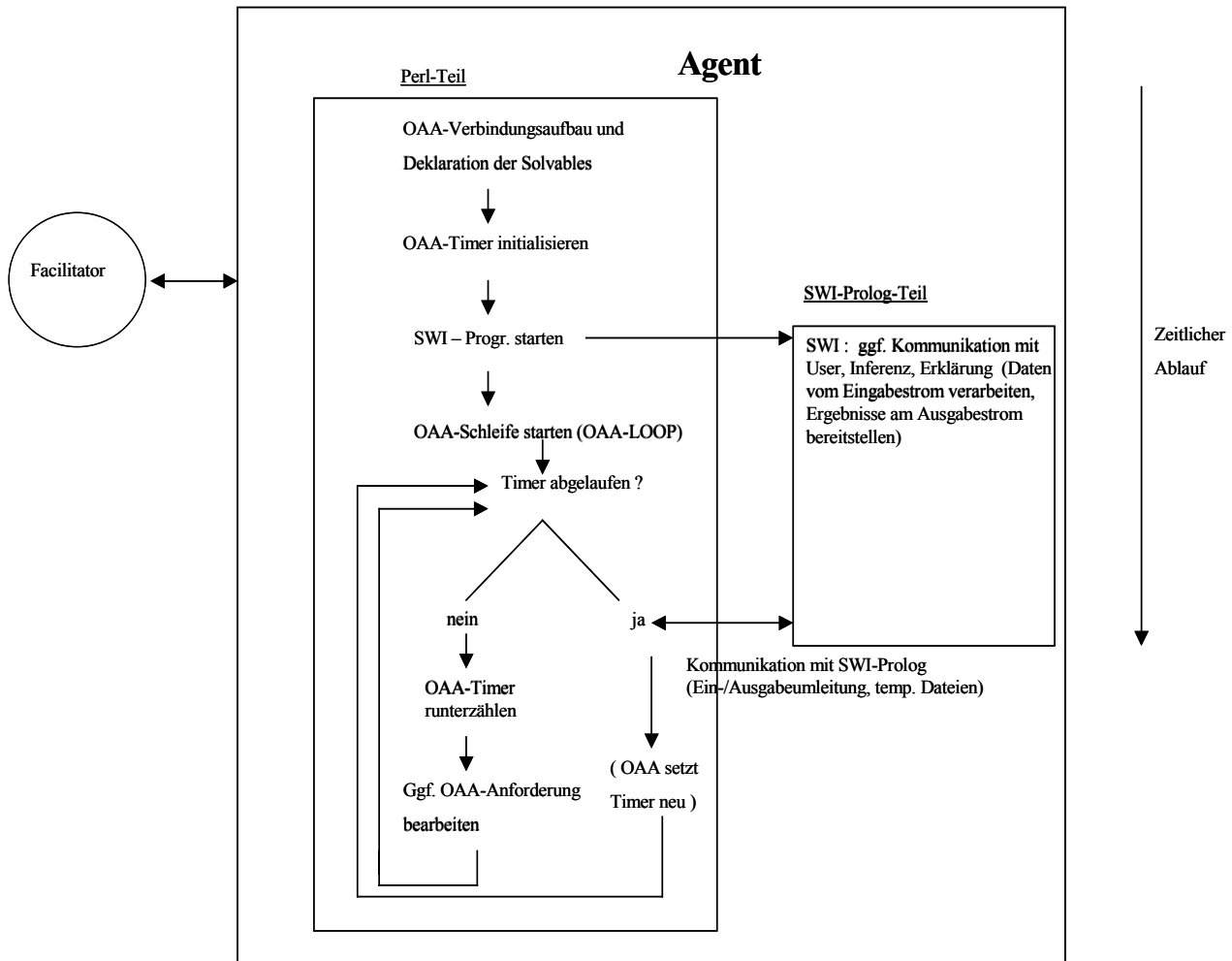


Abbildung 34: Implementierung in SWI-Prolog (von OAA nicht unterstützter Sprache)

4.5.2. Expertenerklärungen und Erklärungskommentare in Prolog

Eine Expertenerklärung kann in Prolog als n-elementige Liste dargestellt werden, wobei das erste Element der Liste der Regelkopf, die 2. bis n-1-ten Elemente der Regelkörper und das letzte

Element der Liste die Regelvoraussetzung⁴² (bzw. der Schnittpartner in der Resolution) ist. Die Expertenerklärung für *diagnose(appendizitis)* z.B. als Ergebnis der Prolog-Regel *diagnose(appendizitis):- verdickt(appendix)* bei gegebener Beobachtung *verdickt(appendix)* ist dann die Liste

[diagnose(appendizitis), verdickt(appendix), verdickt(appendix)]

(entspricht :

{ diagnose(appendizitis) ← verdickt(Appendix) , verdickt(Appendix) }).

Die Funktionen f_{Hinweise} , f_{initial} , f_{Regeln} können als Listen (ohne doppelte Elemente) realisiert werden, z.B.:

[init_fakt(verdickt(appendix), ' Verdickung des Appendix von Herrn Mustermann in der Sonographie IV des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 16.37 beobachtet', init_fakt(... , ...) ...].

Der gesamte Erklärungskommentar kann dann durch das folgende Prädikat dargestellt werden.

Definition : Erklärungskommentar in Prolog

e (+praedikat_zu_erklaeren, ?erklkomm) mit

erklkomm = (F, F_initial, F_regeln, H, F_Hinweise, E_H) wobei

F	
[Erklärungsfolge1, ...]	Liste alternativer Erklärungsfolgen
F_initial	
[init_fakt(I_Fakt, I_Erklärender_Text),...]	Liste initialer Fakten und entsprechendem Text
F_regeln	
[f_regel(Regel, R_Erklärender_Text),...]	Liste der Regelköpfe und entsprechendem Text
H	
[Hinweis1, ...]	Liste von Hinweisen

⁴² Dies ist eindeutig, sofern in einer Erklärung nur ein einziger Schritt erklärt wird (d.h. es nur einen Schnittpartner gibt).

F_Hinweise [f_Hinweis(Hinweis1, H_Erklärender_Text),...]	Liste von Hinweisen und Zusammenhang zu <i>praedikat_zu_erklaeren</i>
E_H [Herleitung_von_Hinweis1, ...]	Herleitung der Hinweise, falls Hinweise existieren
Erklärungsfolge_i [Erklärung1, ..]	Liste von Erklärungen
I_Fakt <prädikatname(objektname)>	Prolog-Fakt (initiales Fakt)
I_Erklärender_Text <Textkonstante>	String (Beschreibung des init. Fakt)
Regel [Regelkopf, Voraussetzung1,..., Voraussetzungen]	Prolog-Regel als Liste
R_Erklärender_Text <Textkonstante>	String (Beschreibung der Regel)
Hinweis1 <prädikatname(objektname)>	Prolog-Fakt (das im Zusammenhang mit <i>praedikat_zu_erklaeren</i> relevant ist)
H_Erklärender_Text <Textkonstante>	String (erläutert den Zusammenhang zu <i>praedikat_zu_erklaeren</i>)
Herleitung_von_Hinweis1	Erklärungsfolgen des Hinweises
Erklärung1 [Regelkopf, Voraussetzung1,..., Voraussetzungen, Gegebene_Bedingung]	Liste aus Regelliteralen und Schnittpartner
Regelkopf <prädikatname(objektname)>	Regelkopf
Voraussetzung_i <prädikatname(objektname)>	Prolog-Fakt (aus dem Regelrumpf)
Gegebene_Bedingung <prädikatname(objektname)>	Prolog-Fakt (Schnittpartner)

Soll z.B. ein Erklärungskommentar für den Ausschluss der Diagnose Pankreatitis des Systems AbdLab übergeben werden (die Diagnose lässt sich ausschließen, wenn alle Befunde „normal“ bzw. „unblutig“ sind), dann wäre folgende Klausel zu übergeben (bzw. wie unten an eine Variable X zu binden).

?- e(diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),X), nl, write_term(X,[max_depth(0)])⁴³.

```
[[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert), normal(amylasewert)]],
[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),
normal(cRP), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),
normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),
normal(leukozytenanzahl), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)]],
[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert), normal(lipasewert)]], [init_fakt(normal(aP),
Normaler AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch
photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im
Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt),
init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am
1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(gammaGT), Normaler
GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch
photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor
47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt),
init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des
Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt),
init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses
Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im
Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix
festgestellt)], [f_regel([diagnose(entzuendung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und
CRP erhoet sind, liegt eine Entzuendung vor), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert),
erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin),
f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G1812), normal(cRP), entzuendung(_G1812)], Vorliegen einer Entzuendung ist
immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G1836),
normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G1836)], Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehter
Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis
ist immer mit einem erhoehten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),
normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Lipasewert verbunden),
f_regel([entzuendung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzuendung (des Blinddarmes)),
f_regel([entzuendung(ileus)], Ileus ist eine Entzuendung (des Darmes durch Passagestoerung)),
f_regel([entzuendung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzuendung (des Pankreas)),
f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen),
f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine
Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin),
f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen)], [], [],[].
```

Abbildung 35: An eine Variable gebundener Erklärungskommentar, mit e/2 erstellt

4.5.3. Aufbau der Regelbasen

⁴³ Mit dem Ausdruck “write_term(X,[max_depth(0)]) “ wird der gesamte Term in beliebiger Verschachtelungstiefe ausgegeben (ansonsten erfolgt eine automatische Abschneidung).

Durch die Nähe der Sprache Prolog zur Prädikatenlogik der 1. Stufe ist die Implementierung zum Teil unmittelbar einsichtig, z.B. kann die Formel

$$(\text{erhöht}(\gamma\text{GT}) \wedge \text{erhöht}(\text{AP})) \rightarrow \text{Verdacht}(\text{Gallenkolik})$$

durch die Prolog-Regel

`verdacht(gallenkolik):-`

`erhoeht(gammaGT),
erhoeht(aP).`

ausgedrückt werden. An anderen Stellen muss aber doch auf Grund von Unterschieden zwischen Prolog und der Prädikatenlogik anders vorgegangen werden, als es auf den ersten Blick adäquat erscheint⁴⁴. Für die Formeln mit „ \leftrightarrow “ kann nur eine Richtung realisiert werden, da es sonst in Prolog zu unendlichen Rekursionsaufrufen käme, z.B. wird die Formel

$$(\text{erhöht}(\text{Lipasewert}) \wedge \text{erhöht}(\text{Amylasewert})) \leftrightarrow \text{Diagnose}(\text{Pankreatitis})$$

nur durch eine Regel, in diesem Fall

`diagnose(pankreatitis):-`

`erhoeht(lipasewert),
erhoeht(amylasewert).`

umgesetzt wobei

`erhoeht(amylasewert):-`

`diagnose(pankreatitis).`

und `erhoeht(lipasewert):-`

`diagnose(pankreatitis).` entfallen. (Für die Diagnosefindung auch nicht relevant).

Auch lassen sich ausgeschlossene Diagnosen ($\forall x \neg \text{Diagnose}(X)$) nicht adäquat durch *not(diagnose(X))* ausdrücken, da dies durch das Negation-As-Failure und der Closed-World-Assumption (s. z.B. [Kleine-Bühning et al. 86]) dazu führen würde, dass alle diejenigen Krankheiten gefunden werden würden, für die *diagnose(X)* scheitert. Dies sind aber nicht nur die sicher auszuschließenden Krankheiten, sondern auch alle anderen außer den etablierten Diagnosen.

⁴⁴ Dies folgt aus den Tatsachen, dass die Prolog-Regeln nur einer Teilmenge der Formeln der Prädikatenlogik der 1. Stufe entsprechen (den definiten Horn-Klauseln), aus der festgelegt Resolutionsstrategie (SLD) und anderen Einschränkungen einer auf realen Rechnern eingesetzten Sprache im Vergleich zur abstrakten Logik.

Daher werden Regeln angegeben, wann eine bestimmte Diagnose ausgeschlossen werden kann, z.B.

diagnose_auszuschliessen(pankreatitis):-

normal(lipasewert).

diagnose_auszuschliessen(pankreatitis):-

normal(amylasewert).

Mit den Prädikaten diagnose/1, verdacht/1 und diagnose_auszuschliessen/1 können so die Regelbasen aufgebaut werden.

4.5.4. Fähigkeit zur Generierung von Erklärungskommentaren

4.5.4.1. Erklärungskommentare erstellen und übergeben

Da gefordert wird, dass die Systeme für die von ihnen zur Verfügung gestellten Lösungen Erklärungskommentare mitübergeben können sollen, muss neben den Regeln und Fakten zur Inferenz weitere Funktionalität implementiert werden. In allen drei Beispielsystemen ist dies auf folgende Weise gelöst worden :

- Unter Zuhilfenahme der Zugriffsmöglichkeiten von Prolog auf den Programmtext (bzw. den in der Wissensbasis vorhandenen Fakten und Regeln) werden die Listen der alternativen Herleitungsmöglichkeiten F im wesentlichen mittels der build-in-Prädikate setof/3 und clause/2 erstellt.
- Die initialen Fakten werden nach Übergabe aus der graphischen Oberfläche unter Verwendung der dynamischen Klausel init_fakt/2 vermerkt, wobei Fakt und erläuternder Text vermerkt werden. Die Menge aller Klauseln init_fakt/2 stellt dann die Funktion f_{initial} dar.
- für die Erläuterungen der statischen Regeln der Wissensbasis wurde ein Modul mit zugeordneten Hinweistexten entwickelt, z.B.

.
. .
.

f_regel([verdacht(X), zu_und_abnehmend(schmerzintensitaet_im_Bauch), kolik(X)],
'Zu- und abnehmende Schmerzen im Bauch deuten auf eine evtl. Kolik hin').

f_regel([verdacht(ileus), zu_und_abnehmend(schmerzintensitaet_im_Bauch)],

'Zu- und abnehmende Schmerzen im Bauch deuten evtl. auf einen Ileus hin').

Die Menge der Klauseln $f_regel/2$ stellt die Funktion f_Regeln dar.

- evtl. Hinweise werden bei Bedarf zusammen mit dem entsprechenden Hinweistext temporär in der Wissensbasis eingetragen. Bei der Erstellung des Erklärungskommentars wird dann ggf. die Mengen der Hinweise H , die Funktion $f_Hinweise$ als Liste von Hinweis u. Text und die Herleitungen E_H analog zur Bildung von F (vgl. oben) erstellt.

4.5.4.2. Synthese der Gesamterklärung

Im vorgestellten Beispielszenario erhält das aufrufende System AbdAnam Erklärungskommentare für die von den Systemen AbdSon und AbdLab gefundenen Diagnosen, Verdachte und auszuschließenden Diagnosen. Diese Informationen werden zusammen mit den eigenen Schlussfolgerungen des Systems AbdAnam auf folgende Art in die Gesamterklärung (d.h. in den Erklärungskommentar) integriert :

- Die erhaltenen alternativen Herleitungsmöglichkeiten F aus den übergebenen Erklärungskommentaren werden mit Hilfe einer dynamischen Klausel $externe_schlussfolgerung/2$ in der Prolog-Wissensbasis vermerkt und die Routine $e/2$ zur Erstellung der Erklärungskommentare dahingehend modifiziert, dass bei den jeweils zu findenden Herleitungen überprüft wird, ob durch $externe_schlussfolgerung/2$ weitere Alternativen hinzugekommen sind.
- Die übergeben initialen Fakten aus den Erklärungskommentaren werden unter Verwendung der dynamischen Klausel $init_fakt/2$ vermerkt. Bei der Erstellung des neuen Erklärungskommentares sind sie automatisch zusammen mit den initialen Fakten des Systems AbdAnam mit enthalten.
- Auch die Erläuterungen $f_regel/2$ werden in die Prolog-Wissensbasis eingetragen und sind dann bei der Bildung des Erklärungskommentares mit enthalten.
- Als Hinweise werden bei der Erstellung eines Erklärungskommentares für einen Verdacht oder eine Diagnose auszuschließende Diagnosen integriert. Im vorgestellten Szenario wurden keine weiteren Hinweise von den Systemen AbdSon und AbdLab übergeben. Wäre dies vorgekommen, hätten sie jedoch einfach in die Menge der Hinweise mit aufgenommen werden können.

4.5.5. Visualisierung von Erklärungskommentaren in der Implementierung

4.5.5.1. Textuelle Ausgabe des Erklärungskommentares

In der vorliegenden Beispielimplementierung ist eine Routine zur Ausgabe eines

beliebigen Erklärungskommentares (gem. Def. in Kap. 4.4.2) enthalten. Dabei werden alle Herleitungsmöglichkeiten nacheinander ausgegeben und initiale Fakten sowie statische Regeln dabei durch die entsprechenden Texte (aus f_{initial} und f_{Regeln}) in hervorgehobener Position untermauert. Evtl. Hinweise mit deren Herleitungen werden ebenfalls ausgegeben. Die Ausgabe des in Abb.35 abgebildeten Erklärungskommentares zeigt folgende Abbildung (Ausschnitt) :

```

Es wurde diagnose_auszuschliessen(pankreatitis) festgestellt,

    weil    normal(amylasewert) vorliegt

                ( Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses M
                usterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt )

    und Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Amylasewert verbunden.

Außerdem läß sich diagnose_auszuschliessen(pankreatitis) auch feststellen,

    weil    normal(cRP) vorliegt

                ( Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Must
                erstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt )

    dies folgt, weil wir bereits wissen, daß

                entzuendung(pankreatitis)

    und Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden.

Außerdem läß sich diagnose_auszuschliessen(pankreatitis) auch feststellen,

    weil    normal(leukozytenanzahl) vorliegt

                ( Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhaus
                es Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt )

```

Abbildung 36: Visualisierung eines Erklärungskommentares

4.5.5.2. Verbesserung der Lesbarkeit der Erklärung durch textuelle Substitutionen

Um den Benutzer nicht mit prädikatenlogischen bzw. Prolog-Ausdrücken wie z.B. `normal(amylasewert)` zu verwirren, kann von den Systemen zusätzlich zum Erklärungskommentar eine Liste von Substitutionen übergeben werden. Dabei werden in der Liste jeweils eine Klausel, gefolgt von einer Textkonstanten, übergeben. Läßt sich eine bei der Ausgabe des Erklärungskommentares vorkommende Klausel mit einer in der Substitutionsliste enthaltenen Klausel unifizieren, so wird statt der Klausel die dazugehörige Textkonstante ausgegeben.

Übergibt z.B. das System AbdLab folgende Liste mit Substitutionen:

gib_subs([entzuendung, 'eine Entzuendung ist : ', verdacht, 'Verdacht auf', diagnose, 'die Diagnose',
diagnose_auszuschliessen, 'auszuschliessende Diagnose ', kolik, 'Eine Art von Kolik ist', erhoeht, 'erhoehter', aP,
'AP-Wert', gammaGT, 'Gamma - GT - Wert', blutig, 'blutiger', erniedrigt, 'erniedrigter', kpluswert, 'K+ -
Wert', normal, 'normaler']).

So erfolgt statt des Textes, der in der vorherigen Abbildung dargestellt ist, eine für den Menschen besser lesbare Ausgabe (dabei ist allerdings die Regelstruktur nicht mehr so gut zu erkennen, was für die Wartung der Regelbasis von Nachteil sein könnte, vgl. Kap 3.1.2):

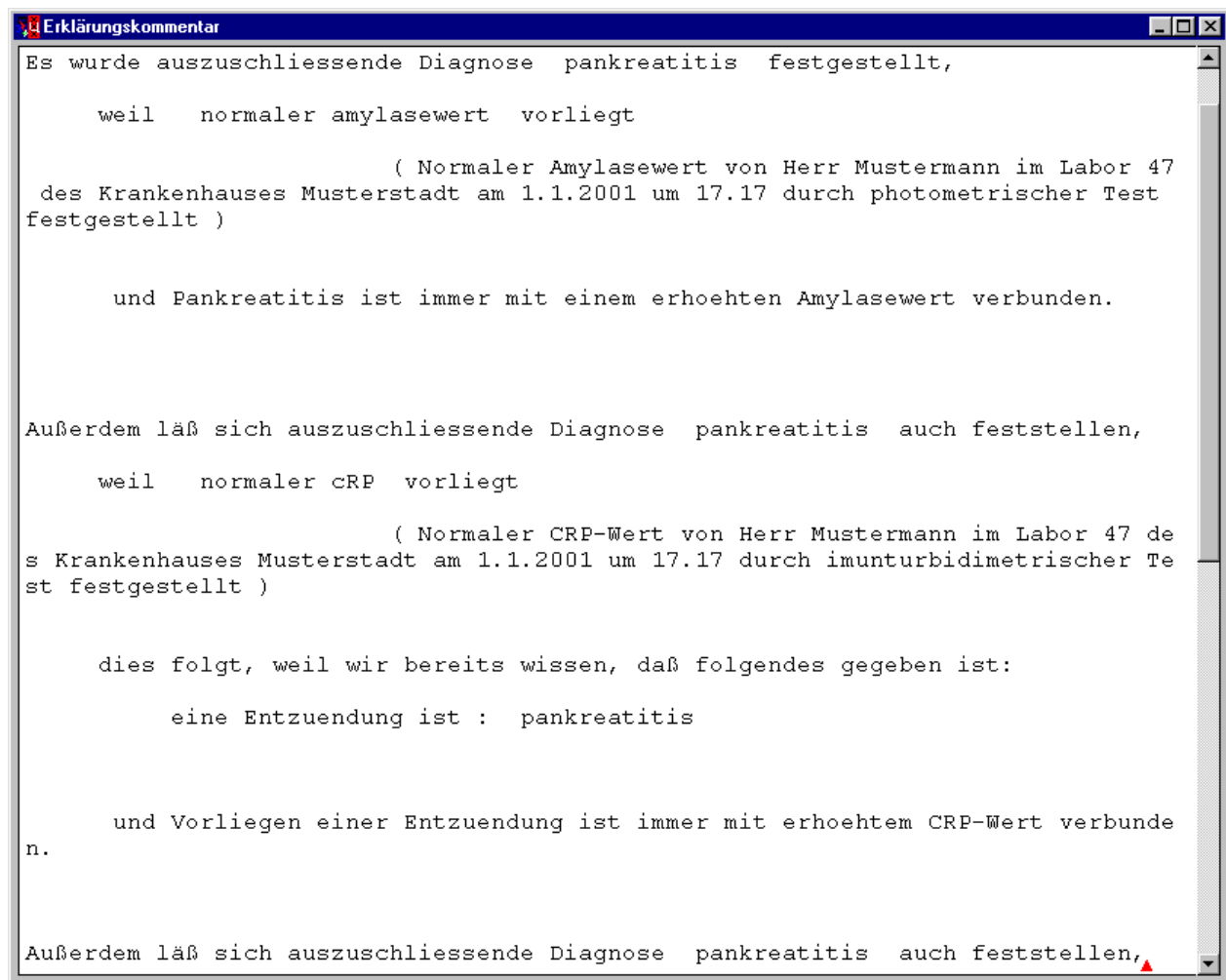


Abbildung 37: Visualisierung eines Erklärungskommentares einschl. textueller Substitution

Die Substitution einer Prolog-Klausel erfolgt dabei in drei Schritten :

1. Existiert die Klausel als Ganzes in der Substitutionsliste wird für die Klausel der entsprechende Ersetzungstext ausgegeben.
2. Wenn nicht, wird für Prädikatsname und Argumente getrennt gesucht und die gefundenen Objekte ersetzt und der Rest so ausgegeben wie er ist.

3. Werden überhaupt keine Ersetzungen in der Substitutionsliste gefunden, werden Prädikatsname und Argumente wie sie sind hintereinander geschrieben ausgegeben.

4.5.6. Systemoberflächen

Die Oberflächen der Systeme sind in XPCE entwickelt und bieten per „Button“ die Möglichkeit zum Starten der (lokalen) Inferenz zum Finden von Diagnose, Verdachten oder auszuschließenden Diagnosen und den entsprechenden Erklärungen. Diese „Buttons“ sind in XPCE definiert und starten bei Aktivierung eine entsprechende Prolog-Routine. Zur Eingabe der Symptome, Befunde und sonstigen Daten stehen Auswahlménüs und Textfelder zur Verfügung. Bei Aktivierung des „OK-Buttons“ werden die ausgewählten bzw. eingegebenen Daten als Parameter an entsprechende Prolog-Routinen übergeben. Das System AbdAnam läuft in SWI-Prolog unter Windows 98 und stellt eine Unterstützung der Anamnese dar. Darüber hinaus können die Teilergebnisse der Systeme AbdSon und AbdLab importiert werden, und das Gesamtergebnis kann ausgegeben und erklärt werden.

Abbildung 38: Ausschnitt der Oberfläche des Systems AbdAnam

Die Systeme AbdLab und AbdSon laufen in SWI-Prolog unter Unix und stellen eine Unterstützung der Laboruntersuchung bzw. der sonographischen Untersuchung dar.

Abdlab

photometrischer Test :

Ap Wert: Erhoeht ▾

GammaGT Wert: Erhoeht ▾

Amylasewert: Normal ▾

enzymatischer Test :

Lipasewert: Normal ▾

imunturbidimetrischer Test :

Crp Wert: Normal ▾

Neubauer-Zaehlkammer:

Leukozytenanzahl: Normal ▾

Flammenphotometrie:

K-Wert: Normal ▾

Urin Stix:

Blut im Urin: Nicht vorhanden ▾

sonstige Daten :

Untersuchung durch: Herr Mustermann im Labor

Am: 1.1.2001 um 17.17

Ok Neue Daten

Verarbeitung der Daten :

Diagnose suchen

Verdacht suchen

Diagnosen ausschliessen

Alle Informationen

Erklaerungskommentar

Abbildung 39: Ausschnitt der Oberfläche des Systems Abdlab

AbdSon

Sonographische Befunde :

Appendix: Keine sichtbare Verdickung ▾

Nierenstein: Nicht sichtbar ▾

Nierenstauung: Nicht sichtbar ▾

Gallenstein: Nicht sichtbar ▾

Stauung der Gallenblase: Nicht sichtbar ▾

Veraenderung des Pankreas: Nicht veraendert ▾

sonstige Daten :

Untersuchung durch: Herr Mustermann in der Sonogr

Am: 11.1.2001 um 12.12

Ok Neue Daten

Verarbeitung der Daten :

Diagnose suchen

Verdacht suchen

Diagnosen ausschliessen

Alle Informationen

Erklaerungskommentar

Abbildung 40: Ausschnitt der Oberfläche des Systems AbdSon

4.5.7. Kooperation der Systeme innerhalb des Multiagentensystems OAA

Die drei Systeme sind mit Hilfe jeweils eines Perl-Skriptes als Agenten in eine OAA-Multiagentenumgebung [Martin et. al. 99] eingebunden.

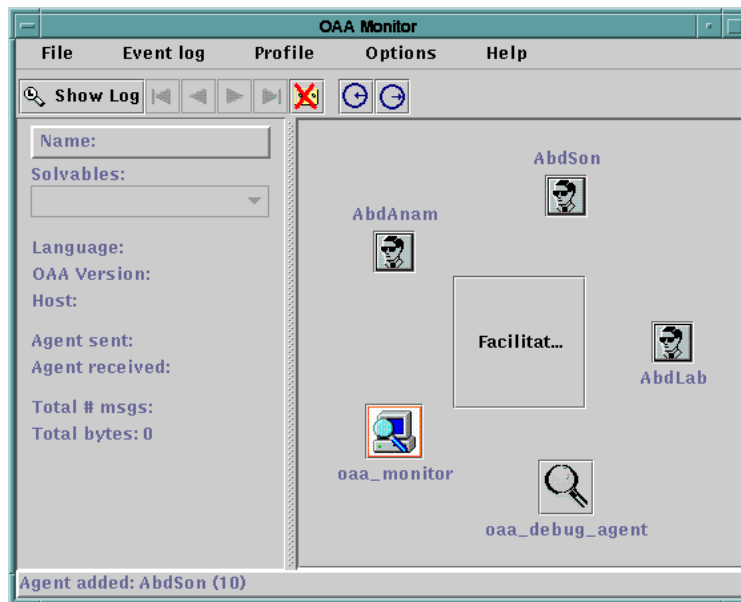


Abbildung 41: Sicht auf die Agentengemeinschaft durch die Visualisierung des Agenten „oaa_monitor“⁴⁵

Mit Hilfe von im OAA-Perl-Bibliotheksmodule zur Verfügung gestellten Routinen erfolgt die Anmeldung beim System, die Deklaration der „Solvables“, d.h. der Aufgaben, für die der Agent meint, eine Lösung liefern zu können sowie der Aufruf zur Berechnung bzw. die Übergabe der Lösung (im vorgestellten Beispiel die labortechnischen bzw. sonographischen Schlussfolgerungen).

4.6. Testphase

Da der Demonstrationsprototyp auf eine kleine Menge potentieller Krankheiten und möglicher Symptome, Laborwerte und sonographischer Befunde beschränkt ist, bleibt das Systemverhalten überschaubar und Testfälle können schnell erstellt werden.

Ein Beispielablauf wird im Folgenden wiedergegeben:

In der Anamnese werden „Unruhige Körperhaltung“ eingegeben und anschließend die „Labortechnischen –“ und die „Sonographischen Schlussfolgerungen“ importiert, wobei im Labor „AP-Wert erhöht“ und „Gamma-GT-Wert-erhöht“ und in der Sonographie „Stauung der Gallenblase“ eingegeben wurde.

⁴⁵ Dieser Agent im Installationsumfang des OAA-Systemes enthalten.

Es wird Verdacht auf Gallen- und auf Nierenkolik sowie der Ausschluss der Diagnosen Appendizitis, Ileus und Pankreatitis angezeigt:

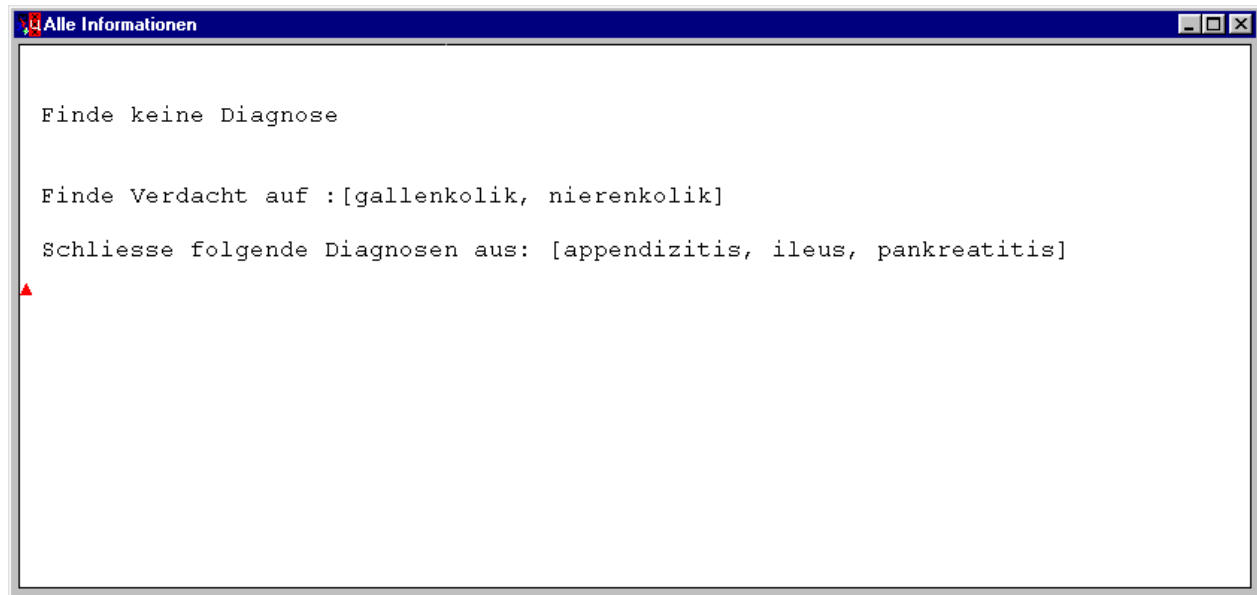


Abbildung 42: Ausgabe gefundener Diagnosen, Verdachte und auszuschließender Diagnosen

wobei bei der Ausgabe der Erklärungen deutlich wird, dass der Verdacht auf Gallenkolik stärker begründet ist, als der auf die Nierenkolik⁴⁶.

Das System AbdAnam hat unter Einbeziehung der übergebenen Erklärungskommentare einen Gesamterklärungskommentar erstellt (der so auch weiter an ein übergeordnetes System übergeben werden könnte). Die Erklärung für den Benutzer ist die Visualisierung dieses Gesamterklärungskommentares einschl. der Hinweise. Nachfolgend sind die Ausgaben des Systems und anschließend die übergebenen Erklärungskommentare und der erstellte Gesamterklärungskommentar für Verdacht auf Gallenkolik abgedruckt :

⁴⁶ In der vorliegenden Implementierungen werden alle durch Regeln ableitbaren Diagnosen, Verdachte und ausgeschlossenen Diagnosen unter dem Menüepunkt „Alle Infos“ ausgegeben.

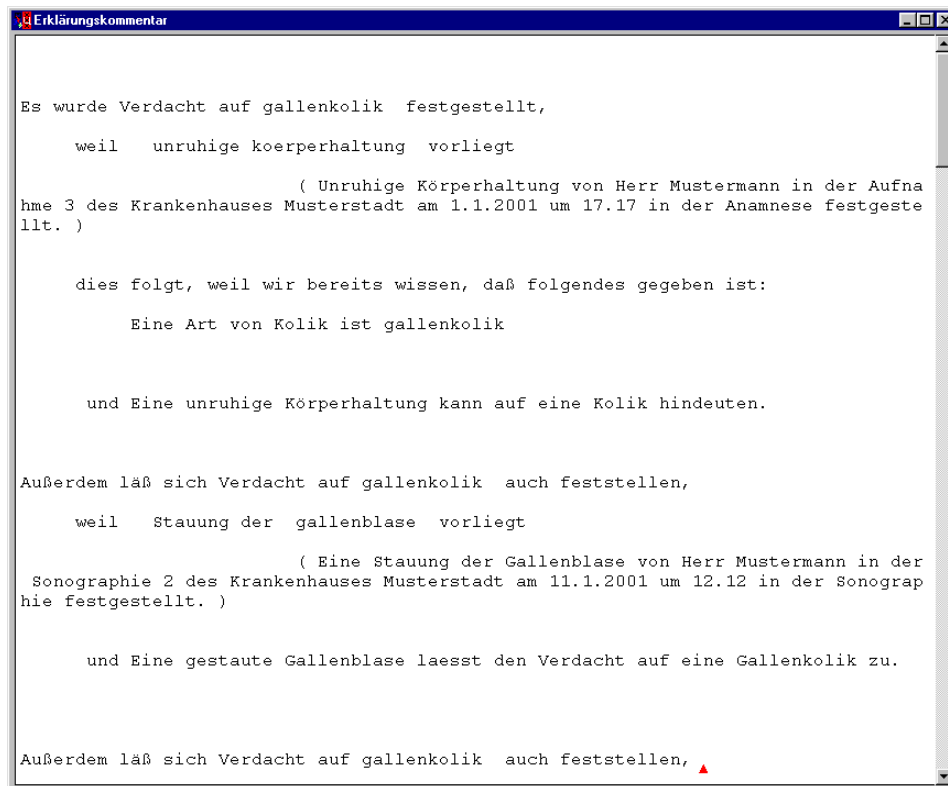


Abbildung 43: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (1. Abschnitt)

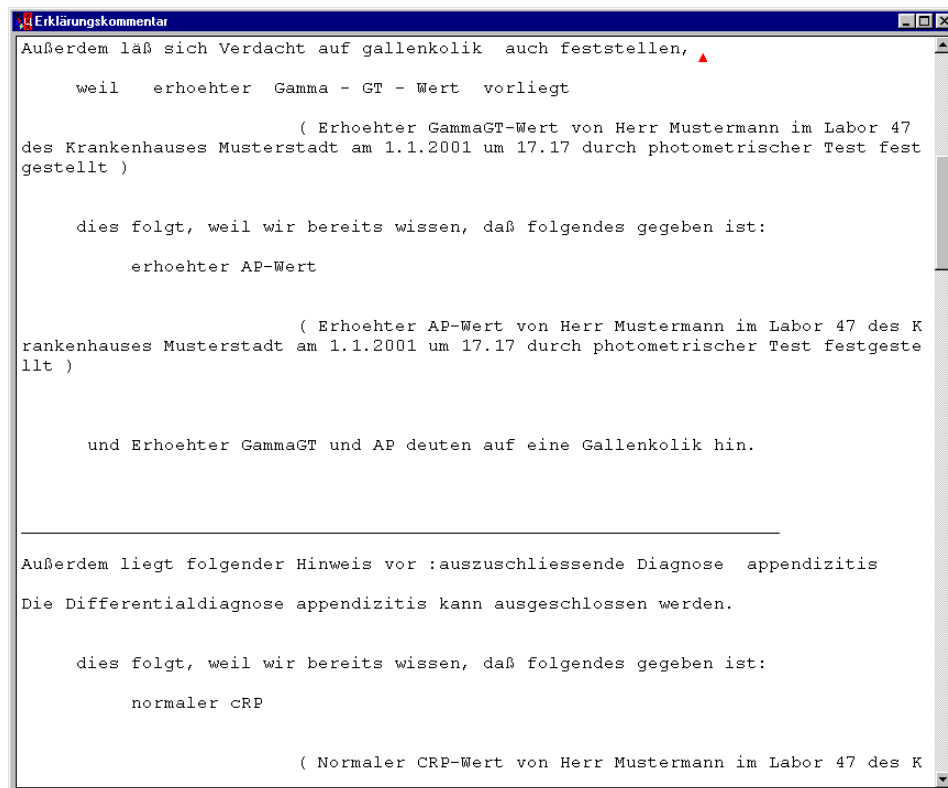


Abbildung 44: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (2. Abschnitt)

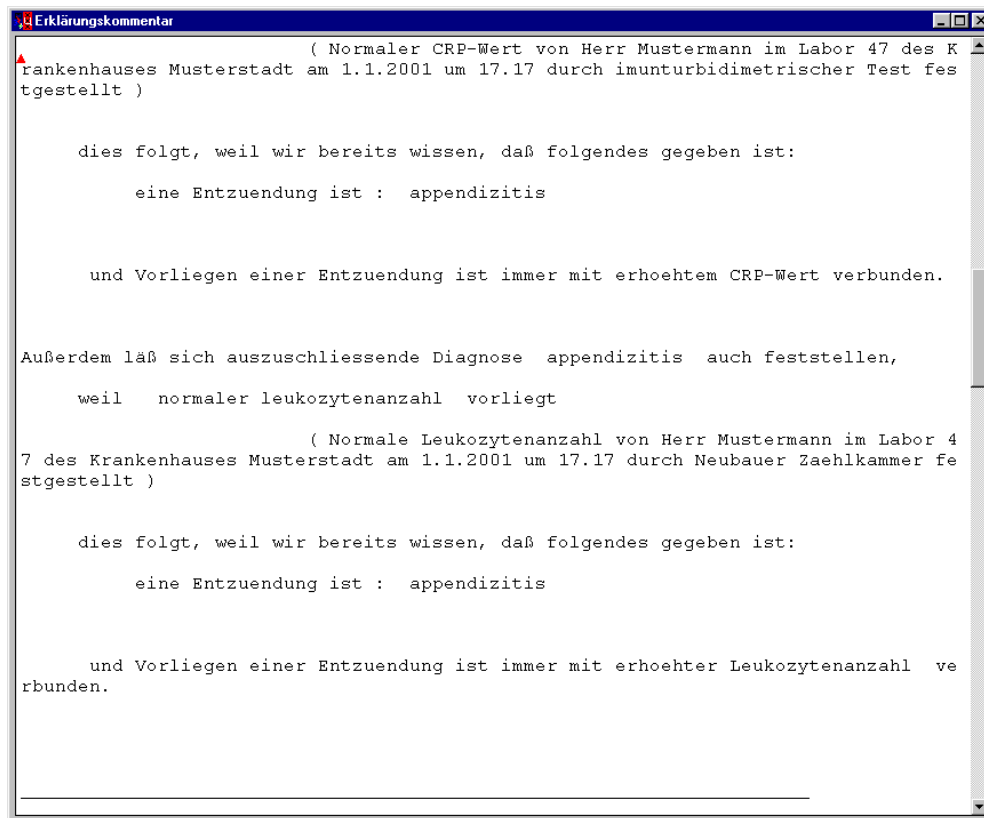


Abbildung 45: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (3. Abschnitt)

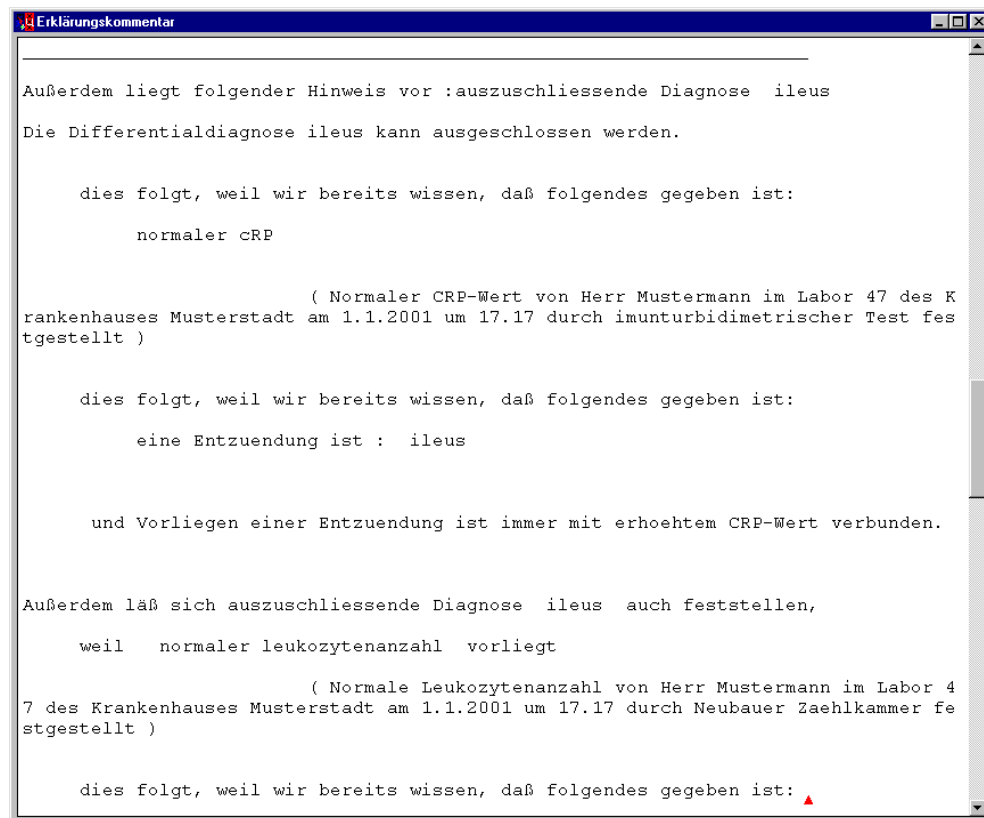


Abbildung 46: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (4. Abschnitt)

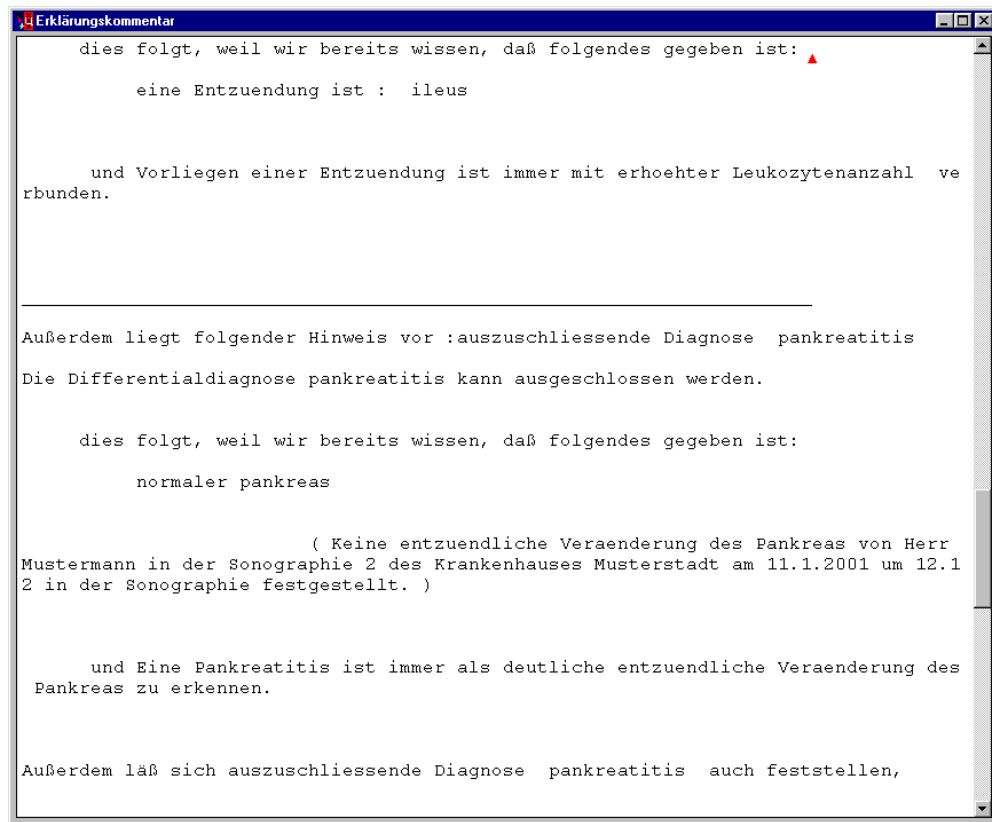


Abbildung 47: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (5. Abschnitt)

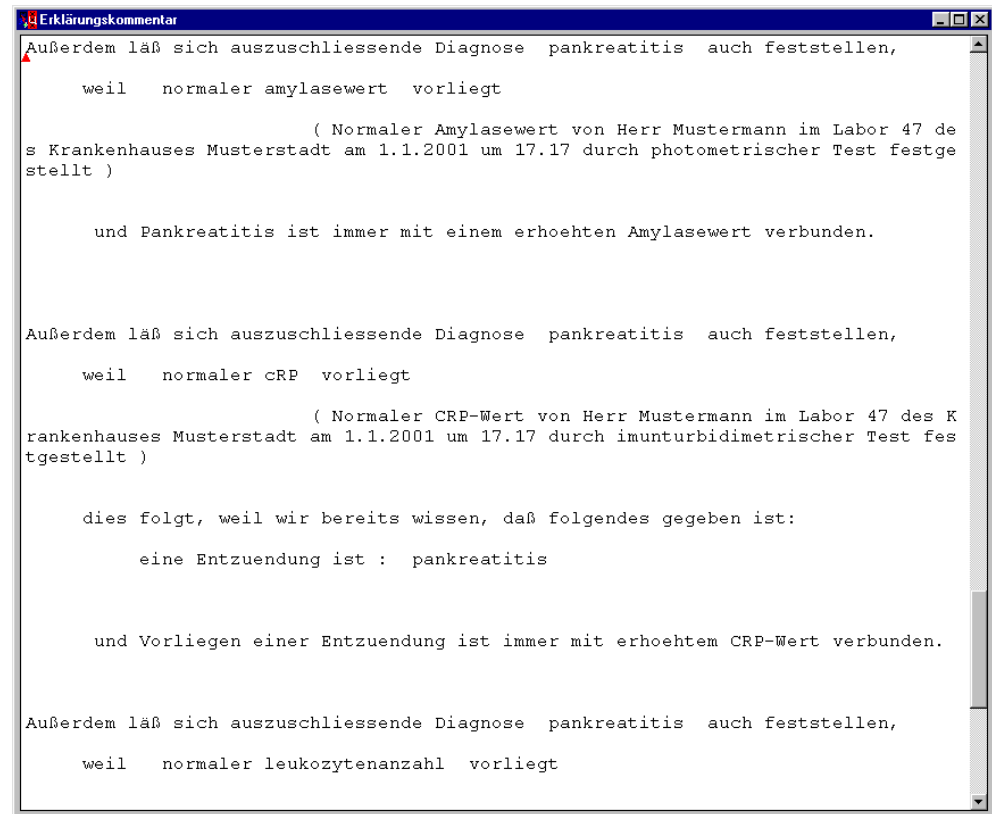


Abbildung 48: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (6. Abschnitt)

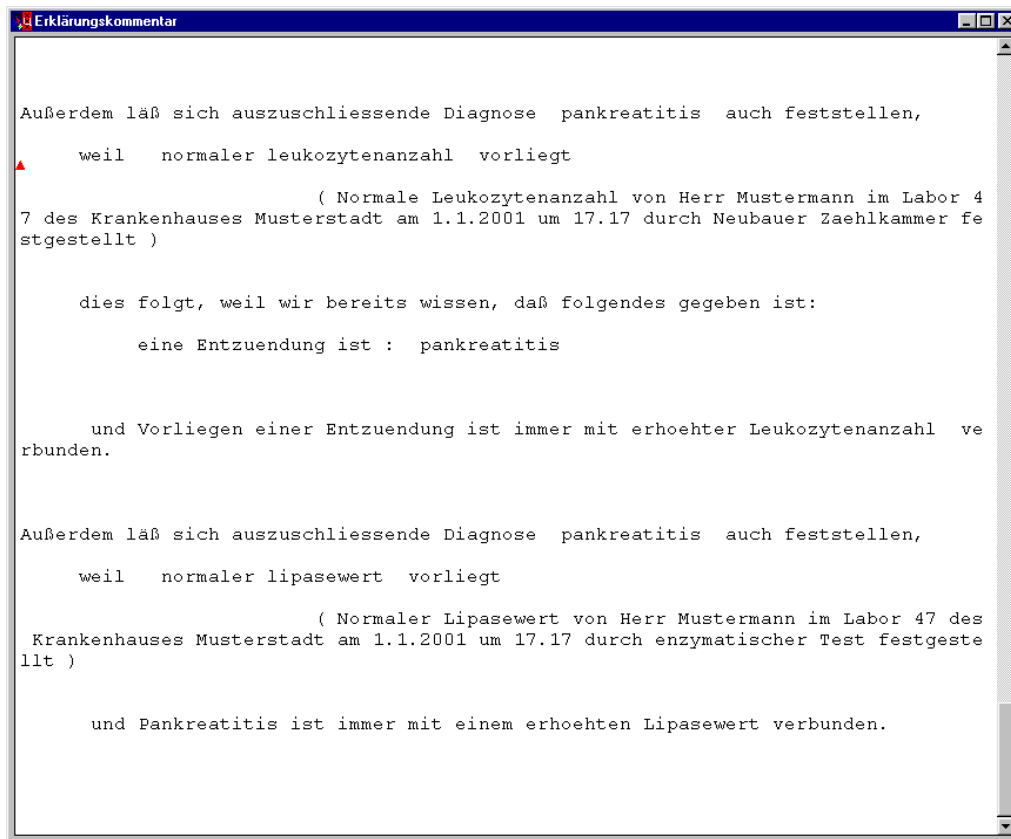


Abbildung 49: Erklärung Verdacht auf Gallenkolik (7. Abschnitt)

Die Erklärung des Verdachtes auf Nierenkolik macht hingegen deutlich, dass dieser nur durch die unruhige Körperhaltung gestützt wird.

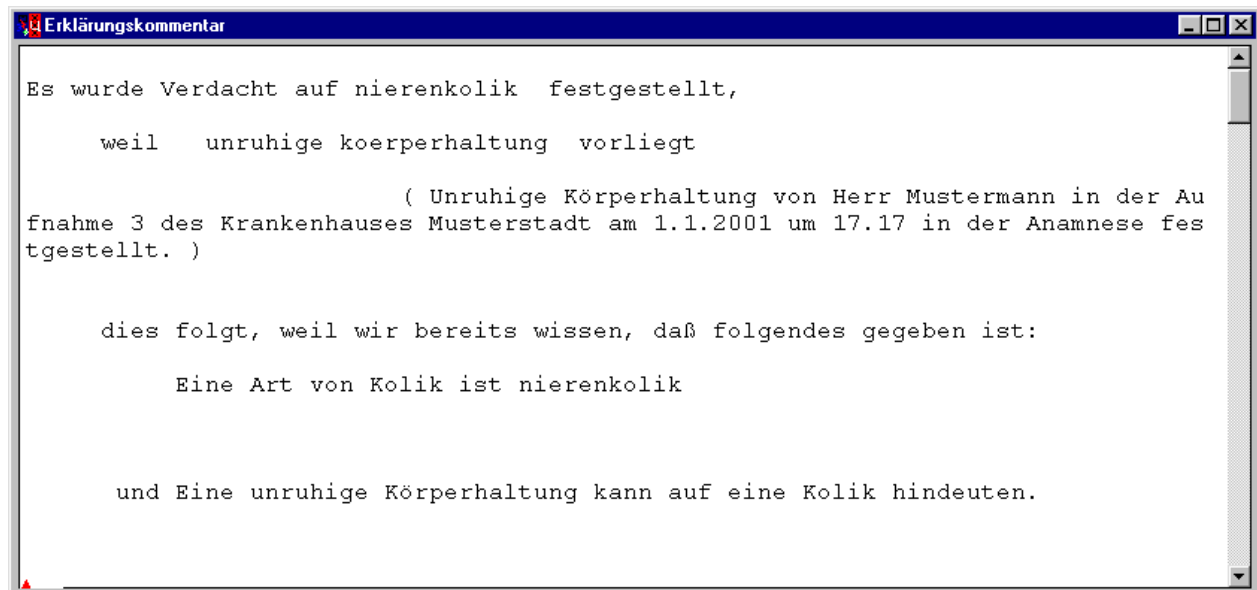


Abbildung 50: Erklärung des Verdachtes auf Nierenkolik

(im nicht sichtbaren Teil des Fensters folgen die Hinweise wie in den vorangegangenen Abbildungen)

Erklärungskommentar von verdacht(gallenkolik) vom System AbdSon:

[[[verdacht(gallenkolik), gestaut(gallenblase), gestaut(gallenblase)]], [init_fakt(gestaut(gallenblase), Eine Stauung der Gallenblase von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.), init_fakt(normal(pankreas), Keine entzündliche Veraenderung des Pankreas von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.)], [f_regel([diagnose(appendizitis), verdickt(appendix)], Eine Entzündung des Pankreas ist durch die deutlichen entzündlichen Veraenderungen sonographisch eindeutig zu erkennen), f_regel([diagnose(gallenkolik), hat_stein(galle)], Ein Stein in der Galle ist eine Gallenkolik), f_regel([diagnose(nierenkolik), hat_stein(niere)], Ein Stein in der Niere ist eine Nierenkolik), f_regel([diagnose(pankreatitis), entzündet(pankreas)], Eine Entzündung des Pankreas ist eine Pankreatitis), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(pankreas)], Eine Pankreatitis ist immer als deutliche entzündliche Veraenderung des Pankreas zu erkennen), f_regel([verdacht(gallenkolik), gestaut(gallenblase)], Eine gestaute Gallenblase laesst den Verdacht auf eine Gallenkolik zu), f_regel([verdacht(nierenkolik), gestaut(niere)], Eine gestaute Niere kann auf eine Nierenkolik hindeuten)], [], [], []]

Erklärungskommentar von diagnose_auszuschliessen(pankreatitis) vom System AbdSon:

[[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(pankreas), normal(pankreas)]], [init_fakt(gestaut(gallenblase), Eine Stauung der Gallenblase von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.), init_fakt(normal(pankreas), Keine entzündliche Veraenderung des Pankreas von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.)], [f_regel([diagnose(appendizitis), verdickt(appendix)], Eine Entzündung des Pankreas ist durch die deutlichen entzündlichen Veraenderungen sonographisch eindeutig zu erkennen), f_regel([diagnose(gallenkolik), hat_stein(galle)], Ein Stein in der Galle ist eine Gallenkolik), f_regel([diagnose(nierenkolik), hat_stein(niere)], Ein Stein in der Niere ist eine Nierenkolik), f_regel([diagnose(pankreatitis), entzündet(pankreas)], Eine Entzündung des Pankreas ist eine Pankreatitis), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(pankreas)], Eine Pankreatitis ist immer als deutliche entzündliche Veraenderung des Pankreas zu erkennen), f_regel([verdacht(gallenkolik), gestaut(gallenblase)], Eine gestaute Gallenblase laesst den Verdacht auf eine Gallenkolik zu), f_regel([verdacht(nierenkolik), gestaut(niere)], Eine gestaute Niere kann auf eine Nierenkolik hindeuten)], [], [], []]

Erklärungskommentar von verdacht(gallenkolik) vom System AbdLab:

[[[verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(gammaGT)], [verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP), erhoeht(aP)]], [init_fakt(erhoeht(aP), Erhoehter AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(erhoeht(gammaGT), Erhoehter GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt), init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zaehlkammer festgestellt), init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix festgestellt)], [f_regel([diagnose(entzündung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und CRP erhoeht sind, liegt eine Entzündung vor), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert), erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G2557), normal(cRP), entzündung(_G2557)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G2581), normal(leukozytenanzahl), entzündung(_G2581)], Vorliegen einer

Entzündung ist immer mit erhöhter Leukozytenanzahl verbunden),
 f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhöhten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhöhten Lipasewert verbunden), f_regel([entzündung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzündung (des Blinddarmes)), f_regel([entzündung(ileus)], Ileus ist eine Entzündung (des Darmes durch Passagestörung)), f_regel([entzündung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzündung (des Pankreas)),
 f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen),
 f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin),
 f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen), [], [], []

Erklärungskommentar von diagnose_auszuschliessen(appendizitis) vom System AbdLab:

[[[diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(cRP), entzündung(appendizitis), entzündung(appendizitis)], [[diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(leukozytenanzahl), entzündung(appendizitis), entzündung(appendizitis)]]], [init_fakt(erhoeht(aP), Erhoehter AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(erhoeht(gammaGT), Erhoehter GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch immunoturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt), init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt), init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix festgestellt)], [f_regel([diagnose(entzündung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und CRP erhöht sind, liegt eine Entzündung vor), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert), erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G3434), normal(cRP), entzündung(_G3434)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhöhtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G3458), normal(leukozytenanzahl), entzündung(_G3458)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhöhter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhöhten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhöhten Lipasewert verbunden), f_regel([entzündung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzündung (des Blinddarmes)), f_regel([entzündung(ileus)], Ileus ist eine Entzündung (des Darmes durch Passagestörung)), f_regel([entzündung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzündung (des Pankreas)), f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen), f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin), f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen), [], [], []

Erklärungskommentar von diagnose_auszuschliessen(ileus) vom System AbdLab:

[[[diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(cRP), entzuendung(ileus), entzuendung(ileus)], [[diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(ileus), entzuendung(ileus)]]], [init_fakt(erhoeht(aP), Erhoehter AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(erhoeht(gammaGT), Erhoehter GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt), init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt), init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix festgestellt)], [f_regel([diagnose(entzuendung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und CRP erhoeht sind, liegt eine Entzuendung vor), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert), erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G4622), normal(cRP), entzuendung(_G4622)], Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G4646), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G4646)], Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Lipasewert verbunden), f_regel([entzuendung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzuendung (des Blinddarmes)), f_regel([entzuendung(ileus)], Ileus ist eine Entzuendung (des Darmes durch Passagestoerung)), f_regel([entzuendung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzuendung (des Pankreas)), f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen), f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin), f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen)], [], [], []]

Erklärungskommentar von diagnose_auszuschliessen(pankreatitis) vom System AbdLab:

[[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert), normal(amylasewert)], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(cRP), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)]]], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)]]], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert), normal(lipasewert)]]], [init_fakt(erhoeht(aP), Erhoehter AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(erhoeht(gammaGT), Erhoehter GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt), init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt), init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses

Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix festgestellt), [f_regel([diagnose(entzuendung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und CRP erhoeht sind, liegt eine Entzuendung vor), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert), erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G5984), normal(cRP), entzuendung(_G5984)], Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G6008), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G6008)], Vorliegen einer Entzuendung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Lipasewert verbunden), f_regel([entzuendung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzuendung (des Blinddarmes)), f_regel([entzuendung(ileus)], Ileus ist eine Entzuendung (des Darmes durch Passagestoerung)), f_regel([entzuendung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzuendung (des Pankreas)), f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen), f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin), f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen)], [], [], []

Unter Einbeziehung der von den Systemen AbdSon und AbdLab übergebenen Erklärungskommentare generierter Gesamterklärungskommentar für Verdacht auf Gallenkolik (vgl. Ausgabe dieses Erklärungskommentares Abb. 43-49):

[[[verdacht(gallenkolik), unruhig(koerperhaltung), unruhig(koerperhaltung)], [verdacht(gallenkolik), unruhig(koerperhaltung), kolik(gallenkolik), kolik(gallenkolik)], [[verdacht(gallenkolik), gestaut(gallenblase), gestaut(gallenblase)], [[verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(gammaGT)], [verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP), erhoeht(aP)]], [init_fakt(erhoeht(aP), Erhoehter AP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(erhoeht(gammaGT), Erhoehter GammaGT-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(gestaut(gallenblase), Eine Stauung der Gallenblase von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.), init_fakt(gleichbleibend(schmerzintensitaet_im_Bauch), Gleichbleibende Schmerzintensität im Bauch von Herr Mustermann in der Aufnahme 3 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 in der Anamnese festgestellt.), init_fakt(normal(amylasewert), Normaler Amylasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch photometrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(cRP), Normaler CRP-Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch imunturbidimetrischer Test festgestellt), init_fakt(normal(kpluswert), Normaler K+ Wert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Flammenphotometrie festgestellt), init_fakt(normal(leukozytenanzahl), Normale Leukozytenanzahl von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Neubauer Zählkammer festgestellt), init_fakt(normal(lipasewert), Normaler Lipasewert von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch enzymatischer Test festgestellt), init_fakt(normal(pankreas), Keine entzuendliche Veraenderung des Pankreas von Herr Mustermann in der Sonographie 2 des Krankenhauses Musterstadt am 11.1.2001 um 12.12 in der Sonographie festgestellt.), init_fakt(unblutig(urin), Kein Blut im Urin von Herr Mustermann im Labor 47 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 durch Urin Stix festgestellt), init_fakt(unruhig(koerperhaltung), Unruhige Körperhaltung von Herr Mustermann in der Aufnahme 3 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 in der Anamnese festgestellt.), init_fakt(unschmerzhaft(bewegung_des_rechten_Oberschenkels), Keine Schmerzen beim Bewegen des rechten Oberschenkels von Herr Mustermann in der Aufnahme 3 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 in der Anamnese festgestellt.), init_fakt(unschmerzhaft(koerperbewegung), Keine Schmerzen bei Körperbewegung von Herr Mustermann in der Aufnahme 3 des Krankenhauses Musterstadt am 1.1.2001 um 17.17 in der Anamnese festgestellt.)], [f_regel([diagnose(appendizitis), verdickt(appendix)], Eine Entzuendung des Pankreas ist durch die deutlichen entzuendlichen Veraenderungen sonographisch eindeutig zu erkennen), f_regel([diagnose(entzuendung), erhoeht(leukozytenanzahl), erhoeht(cRP)], Wenn Leukozyten und CRP erhoeht sind, liegt eine Entzuendung vor), f_regel([diagnose(gallenkolik), hat_stein(galle)], Ein Stein in der Galle ist eine

Gallenkolik), f_regel([diagnose(nierenkolik), hat_stein(niere)], Ein Stein in der Niere ist eine Nierenkolik), f_regel([diagnose(pankreatitis), entzuendet(pankreas)], Eine Entzündung des Pankreas ist eine Pankreatitis), f_regel([diagnose(pankreatitis), erhoeht(lipasewert), erhoeht(amylasewert)], Erhoehte Lipasewerte und Amylasewerte deuten auf eine Pankreatitis hin), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82258), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G82258)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82282), normal(cRP), entzuendung(_G82282)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82515), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G82515)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82539), normal(cRP), entzuendung(_G82539)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82772), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G82772)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G82796), normal(cRP), entzuendung(_G82796)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G83029), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(_G83029)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehter Leukozytenanzahl verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(_G83053), normal(cRP), entzuendung(_G83053)], Vorliegen einer Entzündung ist immer mit erhoehtem CRP-Wert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Amylasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert)], Pankreatitis ist immer mit einem erhoehten Lipasewert verbunden), f_regel([diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(pankreas)], Eine Pankreatitis ist immer als deutliche entzuendliche Veraenderung des Pankreas zu erkennen), f_regel([entzuendung(appendizitis)], Appendizitis ist eine Entzündung (des Blinddarmes)), f_regel([entzuendung(ileus)], Ileus ist eine Entzündung (des Darmes durch Passagestoerung)), f_regel([entzuendung(pankreatitis)], Pankreatitis ist eine Entzündung (des Pankreas)), f_regel([kolik(gallenkolik)], Eine Gallenkolik ist eine Kolik), f_regel([kolik(nierenkolik)], Eine Nierenkolik ist eine Kolik), f_regel([verdacht(_G83233), schmerzhaft(koerperbewegung), entzuendung(_G83233)], Schmerzen allgemein bei jeder Bewegung deuten auf eine Entzündung hin), f_regel([verdacht(_G83276), unruhig(koerperhaltung), kolik(_G83276)], Eine unruhige Koerperhaltung kann auf eine Kolik hindeuten), f_regel([verdacht(_G83319), zu_und_abnehmend(schmerzintensitaet_im_Bauch), kolik(_G83319)], Zu- und abnehmende Schmerzen im Bauch deuten auf eine evtl. Kolik hin), f_regel([verdacht(appendizitis), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Appendizitis entstehen), f_regel([verdacht(appendizitis), erbrechen(magen)], Bei Erbrechen liegt ein Verdacht auf eine Appendizitis vor.), f_regel([verdacht(appendizitis), schmerzhaft(bewegung_des_rechten_Oberschenkels)], Schmerzen bei Bewegung des rechten Oberschenkels deuten auf eine Appendizitis hin), f_regel([verdacht(gallenkolik), erhoeht(gammaGT), erhoeht(aP)], Erhoehter GammaGT und AP deuten auf eine Gallenkolik hin), f_regel([verdacht(gallenkolik), gestaut(gallenblase)], Eine gestaute Gallenblase laesst den Verdacht auf eine Gallenkolik zu), f_regel([verdacht(ileus), erbrechen(magen)], Bei Erbrechen liegt ein Verdacht auf einen Ileus vor.), f_regel([verdacht(ileus), erniedrigt(kpluswert)], Ein niedriger K+Wert deutet auf einen Ileus hin), f_regel([verdacht(ileus), zu_und_abnehmend(schmerzintensitaet_im_Bauch)], Zu- und abnehmende Schmerzen im Bauch deuten evtl. auf einen Ileus hin), f_regel([verdacht(nierenkolik), blutig(urin)], Blut im Urin kann durch eine Nierenkolik entstehen), f_regel([verdacht(nierenkolik), gestaut(niere)], Eine gestaute Niere kann auf eine Nierenkolik hindeuten), [diagnose_auszuschliessen(appendizitis), diagnose_auszuschliessen(ileus), diagnose_auszuschliessen(pankreatitis)], [f_Hinweis(diagnose_auszuschliessen(appendizitis), Die Differentialdiagnose appendizitis kann ausgeschlossen werden.), f_Hinweis(diagnose_auszuschliessen(ileus), Die Differentialdiagnose ileus kann ausgeschlossen werden.), f_Hinweis(diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), Die Differentialdiagnose pankreatitis kann ausgeschlossen werden.)], [[diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(cRP), entzuendung(appendizitis), entzuendung(appendizitis)], [[diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(appendizitis), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(appendizitis), entzuendung(appendizitis)], [[diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(cRP), entzuendung(ileus), entzuendung(ileus)], [[diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(ileus), normal(leukozytenanzahl), entzuendung(ileus), entzuendung(ileus)]], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(pankreas), normal(pankreas)], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(amylasewert), normal(amylasewert)], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(cRP), normal(cRP)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(cRP), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)], [[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),

```
normal(leukozytenanzahl), normal(leukozytenanzahl)], [diagnose_auszuschliessen(pankreatitis),  
normal(leukozytenanzahl), entzuendung(pankreatitis), entzuendung(pankreatitis)],  
[[diagnose_auszuschliessen(pankreatitis), normal(lipasewert), normal(lipasewert)]]]]
```

5. Bewertung

Mit dieser Arbeit wird eine theoretisch fundierte, allgemeine Methodologie zur Entwicklung der Erklärung einer durch Kooperation von Expertensystemen gefundenen Lösung vorgestellt. Die prototypische Implementierung kann durch die konsequente Umsetzung dieser Methodologie zur Erklärungssynthese nicht nur als Nachweis der allgemeinen Einsetzbarkeit der Erklärungskommentare sondern bezüglich der Erklärung auch als Beispiel bzw. Vorbild für beliebige kooperierende regelbasierte Expertensysteme angesehen werden. Der bis zu einem prototypischen Stadium entwickelte Systemverbund könnte zu einem real einsetzbaren System weiterentwickelt werden (s. auch Kap. 6.). Nachfolgend soll die Idee der Erklärungskommentare noch einmal im Hinblick auf bestimmte Forderungen analysiert werden, die in der Literatur für qualitativ hochwertige Erklärungen gestellt worden sind.

- Umfassende und vollständige Erklärung der Schlussfolgerungen:

Da in den Erklärungskommentaren alle alternativen Ableitungsmöglichkeiten enthalten sind, ist die Erklärung, die dem Benutzer gegeben wird bzgl. der Herleitungsmöglichkeiten umfassend. Da die Ableitung durch textuelle Erläuterungen flankiert wird, soll dies für den Benutzer auf einer inhaltlichen Ebene verständlich bleiben. Die Frage, die noch gelöst werden müsste, ist, wie bei zunehmend komplexeren Herleitungen geeignete Darstellungen und Zusammenfassungen gefunden werden können, die eine Überforderung des Benutzers verhindern.

Mechanismen dazu sind in der vorliegenden prototypischen Umsetzung aus Zeitgründen zwar nicht implementiert worden, jedoch wurden Vorschläge unterbreitet, wie eine übermäßige Informationsflut beschränkt werden könnte (Weglassen von sich wiederholenden Teilerklärungen, Möglichkeiten graphischer und hypertextueller Darstellungen). Es scheint sich hierbei nicht um ein prinzipielles Problem zu handeln; jedoch besteht Bedarf in dieser Richtung Verbesserungen zu erreichen.

Ein grundsätzliches Problem tritt auf, wenn der Benutzer auf Informationen zugreifen möchte, die nicht in den Erklärungskommentaren enthalten sind. Dies ist z.B. der Fall, wenn er für ein initiales Fakt oder eine initiale Regel mehr Erklärungsbedarf hat, als durch die Textkonstanten, die die Funktionen f_{init} und f_{Regel} liefern, gedeckt wird. Die Qualität dieser Textkonstanten und die Definition der initialen Fakten und Regeln haben entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Gesamterklärung. Beides kann nicht maschinell überprüft werden, d.h. ein aufrufendes System kann die Güte textueller Erläuterungen, die von Subsystemen übernommen werden, nicht garantieren. Es ist jedoch fraglich, ob dies überhaupt maschinell möglich ist. Die Korrektheit der Herleitungen der Teillösungen von den Voraussetzungen bis zu den Schlussfolgerungen hingegen könnte überprüft werden, da die Ableitungen in der fest definierten Struktur der übergebenen Expertenerklärungen überprüfbar sind (eine solche Überprüfung ist in der Implementierung nicht vorgenommen worden, wäre aber relativ leicht umzusetzen). Dadurch wäre Kooperatives Problemlösen mit (bedingter) Kontrolle der Korrektheit der Teillösungen umsetzbar.

- Allgemeine Erklärungen zu Fragen zum Problembereich und zu Fachbegriffen:

Allgemeine Erklärungen zu Fragen zum Problembereich, Fachbegriffen usw. sind in der vorliegenden Arbeit nicht weiter berücksichtigt worden, da sie nicht die Hauptfunktion der Erklärung darstellen und bei diesen Aspekten einer Erklärungskomponente die Verteilung nicht von derartiger Bedeutung ist. Terminologische Wörterbücher, allgemeine Hilfstexte u.ä. könnten zusätzlich bzw. unabhängig von den Erklärungskommentaren erstellt werden, da diese üblicherweise statisch sind und keinen direkten Bezug zu einer bestimmten Problemlösung benötigen.

- Rechtfertigungen statt nur Erklärungen:

Swartout fordert, dass die Systeme die Lösung nicht nur erklären, sondern das Ergebnis „rechtfertigen“ können [Swartout 83], d.h. den Benutzer von dessen Richtigkeit überzeugen können (dabei ist die technische Herleitung der Lösung nicht wichtig).

Die Erklärungskommentare fassen neben den Informationen zur Herleitung der Lösung auch die textuellen Erläuterungen für Regeln und Ausgangsfakten zusammen. In diesen Erläuterungen kann beliebig viel Hintergrundwissen und z.B. durch Hyperlinks auf unbegrenzt viel Informationen verwiesen werden. Die Erklärungskommentare (Regelherleitungen u. textuelle Hintergrundinformationen) können als Kompromiss zwischen der Methode der Übersetzung der Regeln und einer von den Regeln gänzlich unabhängigen Erklärung gesehen werden.

- Erklärung aller Phasen des Verteilten Problemlösens :

In einem Verbund weniger, spezialisierter Systeme wird sich die Zuordnung von Teilproblemen zu Systemen vielfach selbstverständlich ergeben (wie im vorgestellten Beispiel die Auswertung der anamnestischen Befunde, der Laborwerte und der sonographischen Befunde durch die entsprechenden Systeme). Bedarf besteht unter Umständen eher darin, einen verantwortlichen menschlichen Ansprechpartner zu haben, d.h. Informationen, die über den kooperativen Lösungsprozess hinausgehen zu erhalten.

Die Gesamterklärung durch den Erklärungskommentar, der schließlich dem Benutzer ausgegeben wird, enthält die dazu relevanten Informationen. Im vorgestellten Beispielszenario wird deutlich, dass auch ohne eine explizite Erklärung der Problemdekomposition und Zuordnung die nötige Erklärung auf einer inhaltlichen Ebene möglich ist, z.B. der Verweis, wer einen bestimmten Laborwert gemessen hat.

In Anwendungsgebieten, in denen trotzdem Erklärungsbedarf dafür besteht, welchem System welches Teilproblem zugeordnet worden ist (d.h. in Gebieten wo es entweder mehrere Möglichkeiten der Problemdekomposition oder mehrere Möglichkeiten der Zuordnung von Teilproblemen zu Systemen gibt), müssten die Erklärungskommentare erweitert werden. Einfache Mechanismen wie die Vergabe von Identifikationsnummern sind vermutlich leicht einzuführen. Weiterführende, wie die ausführliche Erklärung der Gründe für die vorgenommene Dekomposition und Zuordnung, würden von der konkreten Vorgehensweise der Instanz abhängen, die dies durchführt (vgl. Kap. 2.2., Kompetenz- u. „connection“-Problem).

- "Rekonstruktivität":

Wick fordert, dass Erklärungen "rekonstruktiv" sein sollen [Wick 92], d.h. dass eine Erklärung nicht unbedingt an Hand der Fakten gegeben werden muss, die während der Inferenz zum Ergebnis führten, sondern auch durch andere, bei der Inferenz gar nicht benutzter Fakten erfolgen kann, sofern diese das Ergebnis überzeugender erklären (rekonstruieren).

Die Erklärungskommentare können in Wicks Sinn rekonstruktiv sein, wenn sie nicht (nur) die von der Inferenz zur Anfragezeit gefundene Lösung beinhalten, sondern alle zur Erklärungszeit (bzw. zum Zeitpunkt der Erstellung des Erklärungskommentares) gefundenen Ableitungswege einschließen.

- Anpassung der Erklärungen an Art und Wissen des Benutzers (tailored explanations)

Vier große Benutzergruppen für Expertensysteme, die alle unterschiedlichen Erklärungsbedarf für eine präsentierte Lösung haben, sind : Bereichsexperte, Wissensingenieur, Laie und Lernender (Schüler, Student usw. auf unterschiedlichem Niveau). In der vorliegenden Arbeit ist darauf kaum eingegangen worden, da vor allem die Probleme des kooperativen Problemlösungsprozesses untersucht werden sollten. Bei der Visualisierung der Erklärungskommentare ist aber eine Unterscheidung zwischen verschiedenen Benutzern möglich:

Visualisierung mit textueller Substitution generiert einen relativ gut lesbaren Text, der eher als Argumentation auf inhaltlicher Ebene überzeugen soll. Niveau und Ausführlichkeit der textuellen Erläuterungen können zwar zur Entwicklungszeit an den zu erwartenden Benutzer (Bereichsexperte, Laie, Lernender) angepasst werden, Möglichkeiten dies zur Laufzeit zu tun, sind in der Beispielimplementierung nicht explizit vorgesehen. Es könnten aber - auch zur Laufzeit - andere Textbausteine in die Prologwissensbasis geladen werden, die dann besser auf eine bestimmte Zielgruppe zugeschnitten sind. Der Anspruch, in den Erklärungskommentaren zunächst alle nötigen Informationen zur Erklärung zusammenzufassen, erscheint auf jeden Fall sinnvoll; eine auf den Benutzer zugeschnittene Verkürzung könnte bei der Ausgabe erfolgen (in der Implementierung nicht umgesetzt).

Visualisierung ohne textuelle Substitution ist für den Wissensingenieur geeignet, um die Regelbasis zu warten, da durch die Ausgabe der Regelköpfe so wie sie in der Regelbasis benannt sind die Inferenz gut nachvollzogen und überprüft werden kann.

6. Ausblick und Erweiterungsmöglichkeiten

In der vorliegenden Arbeit sind notwendigermaßen etliche Einschränkungen gemacht bzw. vorausgesetzt worden (z.B. keine Berücksichtigung nichtmonotonen Schließens, die Beschränkung auf regelbasierte Expertensysteme, Ausschluss sich widersprechender Teillösungen, Ausschluss von Sicherheitsfaktoren bzw. Wahrscheinlichkeitswerten u.a.). In diesem Kapitel sollen daher einige weiterführende Überlegungen beschrieben werden, mit denen die Arbeit fortgesetzt werden könnte.

- Einbeziehung nichtmonotonen Schließens

Eine vor allem für reale Anwendungen wichtige Teilklasse des automatischen Problemlösens nimmt das nichtmonotone Schließen ein (s. [Doyle 79], [Reiter 80], [Wysotzki 02]). In der vorliegenden Arbeit ist darauf nicht eingegangen worden, d.h. es wurde von einem monotonen Zuwachs des Wissens ausgegangen, in dem Erkenntnisse, die einmal hergeleitet worden sind, niemals wieder zurückgenommen werden⁴⁷.

Wenn Mechanismen, die nichtmonotones Schließen unterstützen, angewendet werden, müssen auch die Erklärungskommentare dementsprechend erweitert werden. Zur vollständigen Erklärung gehört dann auch die Erklärung der Voraussetzungen die gemacht worden sind bzw. evtl. Erkenntnisse, die die Gültigkeit von Herleitung revidieren würden oder neue, andere Schlussfolgerungen erlauben.

Ein verbreiteter Mechanismus zur Berücksichtigung nichtmonotonen Schließens sind „Truth - Maintenance“-Systeme (TMS, [Doyle 79]). Hierbei können Regeln definiert sein, die nur unter bestimmten Bedingungen gelten. Ein bekanntes Beispiel ist die Regel, dass Vögel (im allgemeinen) fliegen können. Diese Regel gilt aber z.B. nicht, wenn es sich um einen neugeborenen Vogel handelt. Dies kann durch folgende Regel angegeben werden:

$\langle \text{Vogel}(X) \rangle \rightarrow \langle \text{Kann_fliegen}(X) \rangle \text{ UNLESS } \langle \text{Baby_Vogel}(X) \rangle$

Ein TMS, dass über obige Regel sowie das Fakt *Vogel(Tweety)* verfügt und keine weiteren Angaben darüber hat, ob es sich bei diesem Vogel um ein Neugeborenes handelt, würde die Aussage *Kann_fliegen(Tweety)*, dass Tweety fliegen kann, herleiten.

Käme später das Fakt *Baby_Vogel(Tweety)* hinzu, würde diese Aussage *Kann_fliegen(Tweety)* verworfen werden (als nicht für wahr angenommen bzw. nicht gerechtfertigt markiert werden). Im Erklärungskommentar könnte ohne Veränderung der Definition die Bedingungen für die Regeln im Kommentar mit angegeben werden und bei der Visualisierung entsprechend darauf hingewiesen werden, z.B.

Es wurde

Tweety kann fliegen gefunden

⁴⁷ Eine Art Nichtmonotonie könnte im realen Einsatz natürlich trotzdem dadurch erreicht werden, dass erneute Konsultationen mit neuen Eingaben, neuer Inferenz und neuer Erklärung vollzogen werden. Hierbei läge die Nichtmonotonie dann aber auf einer Metaebene in den Händen des Benutzers, und würde nicht vom System unterstützt werden.

weil *Tweety ist ein Vogel* vorliegt

und ein Vogel kann fliegen (Achtung : dies gilt nicht, wenn es sich um einen neugeborenen Vogel handelt !).

Dabei würde aber die nichtmonotone Schlussweise nicht explizit unterstützt werden (vgl. Fußnote 47). Bei komplexeren Schlussfolgerungen würde dies sicherlich unübersichtlich werden. Für die verbesserte Erklärung von von TMS-gefundenen Lösungen, könnten die Erklärungskommentare um potentielle zukünftige Informationen (Pot_Infos), den dann erfolgenden Änderungen und den dazugehörigen Erklärungen (Pot_Erklkomms) erweitert werden. Die Änderungen könnten aus dann ungültig werdenden Herleitungen (Pot_ungültig) sowie dann gültig werdenden Herleitungen (Pot_gültig) bestehen.

Beispiel : Eine Krankheit A wird mit dem üblichen Medikament behandelt (Mittel der Wahl), es sei denn, es tritt eine allergische Reaktion auf. Dann muss auf ein alternatives Medikament umgestiegen werden.

< Diagnose(Krankheit_A) > →
< Behandlung(Mittel_der_Wahl) > UNLESS < Allergische_Reaktion(Mittel_der_Wahl)>

<Allergische_Reaktion(Mittel_der_Wahl)> → <Behandlung(Alternativ_Medikament)>

Auch wenn bisher keine allergische Reaktion aufgetreten ist, ist es sinnvoll dem Arzt bei der Erklärung diese Zusatzinformation in der Erklärung mitauszugeben.

ε (Behandlung(Mittel_der_Wahl)) =

(F = { < Diagnose(Krankheit_A) > → < Behandlung(Mittel_der_Wahl) >
UNLESS Allergische_Reaktion(Mittel_der_Wahl)>, < Diagnose(Krankheit_A) > },

f_{initial} = { (< Diagnose(Krankheit_A) >, 'Es wurde die Krankheit A diagnostiziert') }

f_{Regeln} = { (< Diagnose(Krankheit_A) > → < Behandlung(Mittel_der_Wahl) >
UNLESS Allergische_Reaktion(Mittel_der_Wahl)>,
'Die Diagnose A wird mit dem Medikament Mittel_der_Wahl behandelt'),

H = {}, f_{Hinweise} = {}, E_H = {})

Pot_Infos = { Allergische_Reaktion(Mittel_der_Wahl) }

Pot_ungültig = { Behandlung(Mittel_der_Wahl) }

Pot_gültig = { Behandlung(Alternativ_Medikament) }

Pot_Erklkomms =

$$\begin{aligned}
& \{ \varepsilon (\text{Behandlung}(\text{Alternativ_Medikament})) = \\
& (F = \langle \text{Allergische_Reaktion}(\text{Mittel_der_Wahl}) \rangle \rightarrow \langle \text{Behandlung}(\text{Alternativ_Medikament}) \rangle, \\
& \quad \langle \text{Allergische_Reaktion}(\text{Mittel_der_Wahl}) \rangle \}, \\
& f_{\text{initial}} = \{ (\langle \text{Allergische_Reaktion}(\text{Mittel_der_Wahl}) \rangle, \text{'Eine allergische Reaktion auf das} \\
& \quad \text{Medikament Mittel_der_Wahl wird festgestellt'}) \} \\
& f_{\text{Regeln}} = \{ (\langle \text{Allergische_Reaktion}(\text{Mittel_der_Wahl}) \rangle \rightarrow \\
& \quad \langle \text{Behandlung}(\text{Alternativ_Medikament}) \rangle, \text{'Bei einer allergischen Reaktion auf} \\
& \quad \text{das Mittel der Wahl Mittel_der_Wahl muss auf das alternative Medikament} \\
& \quad \text{Alternativ_Medikament umgestiegen werden.'}) \}, \\
& H = \{\}, f_{\text{Hinweise}} = \{\}, E_H = \{\} \\
& \} \\
&)
\end{aligned}$$

Mit der möglichen Ausgabe⁴⁸:

Es wurde

Behandlung Mittel_der_Wahl gefunden

weil es *wurde die Krankheit A diagnostiziert* vorliegt

und die Diagnose A wird mit dem Medikament Mittel_der_Wahl behandelt.

Achtung : Sollte folgendes neue Ereignis / folgende neue Information dazukommen, treten folgende Änderungen ein:

Falls

eine allergische Reaktion auf das Medikament Mittel_der_Wahl

eintritt,

so ist die Herleitung *Behandlung Mittel_der_Wahl* nicht mehr gültig !

Dann wäre

Behandlung Alternativ_Medikament herzuleiten, denn

⁴⁸ Der ausgegebene Text könnte dann auch wieder durch zusätzliche Substitutionslisten “flüssiger” gemacht werden (vgl. Kap. 4.5.5.2.).

bei einer allergischen Reaktion auf das Mittel der Wahl Mittel_der_Wahl muss auf das alternative Medikament Alternativ_Medikament umgestiegen werden.

- Berücksichtigung des Benutzerniveaus

Die Berücksichtigung des Benutzerniveaus könnte wie in Kapitel 3 dargestellt durch eine auf das Benutzerniveau zugeschnittene Verkürzung bei der Ausgabe von Schlussfolgerungsketten erfolgen. Um das in MYCIN vorgestellte Verfahren umzusetzen, müssten dazu die Erklärungskommentare um eine Einschätzung der Komplexität der Zwischenergebnisse in einer Ableitungsfolge erweitert werden. Das dem Benutzer die Erklärungskommentare ausgebende System müsste eine Einschätzung des Niveaus des Benutzers haben (z.B. wie in MYCIN durch seine Selbsteinschätzung). Im Vergleich mit dieser Einschätzung könnte dann bei der Ausgabe des Erklärungskommentares eine entsprechende Verkürzung erfolgen.

Zum anderen könnte auch die Definition der Erklärungskommentare so verändert werden, dass das Benutzerniveau einbezogen wird, indem die Funktionen f_{Init} und f_{Regeln} wie folgt verändert werden:

$f_{\text{initial}} : I \times B \rightarrow T^{\text{Initial}}$ und $f_{\text{Regeln}} : R \times B \rightarrow T^{\text{Regeln}}$ wobei B für eine noch festzulegende Beschreibung des Benutzerniveaus steht (z.B. ein Zahlenwert).

Je nach Benutzer könnten dann im Niveau unterschiedliche Erläuterungen (die natürlich alle erstellt und übergeben werden müssten) ausgegeben werden.

Dann wäre die Einbeziehung des Benutzerniveaus nicht nur auf die Ausgabe des Ableitungsweges beschränkt, sondern auch auf dessen Kommentierung. Auch zum Einsatz als Lehrsystem könnte dieser Ansatz günstig sein, da er verschiedene Kenntnisstufen unterstützen könnte.

Ob Aufwand und Nutzen hier in einem sinnvollen Verhältnis stünden, müsste noch eingehender untersucht werden.

- Einbeziehung Nicht-Regelbasierter Systeme

Nicht-Regelbasierte Systeme könnten evtl. in den Problemlösungsverband integriert werden, indem sie um die Fähigkeit, Erklärungskommentare zu erstellen, erweitert werden.

Zahlreiche neuere Artikel über Erklärungsfähigkeit Neuronaler Netze (s. [Diederich & Tickle 95],

[Machado & da Rocha 97], [Narazaki et al. 96]) beschreiben Ansätze zur Regelextraktion. Mit den vom neuronalen Netz extrahierten Regeln und entsprechenden Kommentaren könnten evtl. Erklärungskommentare aufgebaut werden. Auch für andere nicht-regelbasierte Systeme wäre eine Integration in den Systemverbund denkbar, indem für die (Teil-)Lösungen Erklärungskommentare bereitgestellt werden. Z.B. bei fallbasiertem Schließen als „Herleitungsfolge“, dass das Ergebnis geschlossen wurde, weil hinreichende Ähnlichkeit mit einem bekanntem Fall vorlag sowie dem Verweis auf die Ähnlichkeiten und den früheren Fall.

- Einbeziehung Regelbasierter Nicht-Prolog-Systeme

In der vorgestellten Implementierung in SWI-Prolog werden die Ableitungsfolgen, die durch den Erklärungskommentar übergeben werden, durch Zugriff auf die tatsächlich zur Inferenz verwendeten Regeln (d.h. das in die Wissensbasis geladene Prolog-Programm) ermittelt (im Wesentlichen unter Benutzung des Build-In-Prädikat *clause/2*).

Sind die Möglichkeiten der automatischen Generierung der Ableitungsfolge zur Laufzeit nicht gegeben, weil die Sprache/Laufzeitumgebung einen solchen Zugriff nicht anbietet, könnten die Ableitungsfolgen für jede mögliche Ableitung auch zur Entwicklungszeit durch den Programmierer angegeben werden. Dies hätte neben dem hohen Aufwand aber auch den Nachteil, dass Inkonsistenzen zwischen tatsächlicher Inferenz und Erklärung möglich wären (vgl. „canned text approach“ bzw. Übersetzung tatsächlich verwendeten Regeln in Kap. 3.1.2.).

- Verbesserte Visualisierung

Die Visualisierung von Erklärungskommentaren könnte sicherlich durch graphische oder Hypertext-Darstellungen verbessert werden. Vor allem bei längeren Ausgaben müssten Möglichkeiten einer geeigneteren Darstellung gefunden werden, z.B. Zusammenfassung von Ergebnissen, Vermeidung von Wiederholungen, Navigationsmöglichkeit durch die Erklärungsstruktur statt sequentieller Ausgabe u.ä.. Die Vermeidung von Wiederholungen könnte realisiert werden, indem bereits erklärte Schlussfolgerungen, d.h. Ableitungen, die bereits an anderer Stelle in der Kette von den initialen Fakten bis hin zur Schlussfolgerung ausgegeben worden sind, wie initiale Fakten behandelt werden. Dies würde bedeuten, dass die Erklärung an dieser Stelle nicht weiter in die Tiefe geht, z.B. mit der Bemerkung : „bereits erklärt“ (vgl. die mögliche Ausgabe eines Erklärungskommentares in Kap. 4.4.2) . Auf Wunsch des Benutzers sollte die Ausgabe aber auch wiederholt erfolgen können.

- Sicherheitsfaktoren und Wahrscheinlichkeitswerte

Sicherheitsfaktoren und Wahrscheinlichkeitswerte könnten zwar mit den einzelnen Schlussfolgerungen mit ausgegeben werden; sind diese jedoch durch komplizierte Verrechnungsmechanismen (z.B. Bayessche Netze, MYCIN-Modell o.ä.) entstanden, besteht für diese Verrechnung ebenfalls ein Erklärungsbedarf. Da das auftraggebende System die vollständige Erklärungsfähigkeit für alle Teillösungen und –ergebnisse haben soll, müssten die Informationen dafür ebenfalls übergeben werden. Hier müsste für die einzelnen Verrechnungsmodelle festgelegt werden, wie das genau aussehen müsste.

7. Literatur

[Albayrak 92] Albayrak, S.: Kooperative Lösung der Aufgabe Auftragsdurchsetzung in der Fertigung durch ein Mehr-Agenten-System auf Basis des Blackboard-Modells. Dissertation Technische Universität Berlin, 1992.

[Bamberger 97] Bamberger, S.: Cooperative expert systems to solve complex diagnosis tasks. In: KI-97: Advances in Artificial Intelligence, Springer Verlag, Berlin, 1997.

[Barker et al. 89] Barker, V.; O'Connor, D.; Bachant, J.; Soloway, E. : Expert systems for configuration at Digital : XCON and beyond. In Communications of the ACM, No. 32, Vol. 3, March, 1989.

[Barwise & Etchemendy 92] Barwise, J, Etchemendy, J.; The Language of First Order Logic. Including Tarski's world 4.0 (Windows version), 3. Auflage, CSLI-Series, Stanford, 1992

[Benjamins et al. 98] Benjamins, V.; Plaza, E.; Motta, E.; Fensel, D.; Struder, R.; Wielinga, B.; Schreiber, G.; Zdrahal, Z.; Decker, S.: IBROW3: an intelligent brokering service for knowledge -component reuse on the word-wide web. In: Proceedings of the 11th workshop on knowledge acquisition, modeling and management, Banff, Canada, April 1998.

[Bohanec et al.] Bohanec, M., Zupan, B., Rajković, V.: Applications of qualitative multi-attribute decision models in health care. In: International Journal of Medical Informatics 58-59, pp. 191-205, 2000

[Bond & Gasser 88] Bond, A.; Gasser, L. : Readings in distributed artificial intelligence. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, California, 1988.

[Buchanan & Shortliffe 84] Buchanan, B.; Shortliffe, E. : Rule-based expert systems. Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1984.

[Carnap 54] Carnap, Rudolf : Einführung in die symbolische Logik, Springer Verlag, Wien, 1954 .

[Cawsey 93] Cawsey, A.J. : User Modelling in Interactive Explanations. Journal of User Modelling and User Adapted Interaction, Vol. 3 No3, 1993

[Chandrasekaran & Swartout 91] Chandrasekaran, B., Swartout, W., Explanations in Knowledge Systems, IEEE Expert, June, 1991

[Clancey et al. 81] Clancey, W. : NEOMYCIN: Reconfiguring a rule-based expert system for application to teaching. In: Proceedings of the Seventh International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI81), Vancouver, B.C, 1981.

[Cockburn & Jennings 96] Cockburn, D.; Jennings, N. : ARCHON: a distributed artificial intelligence system for industrial applications.

In: O'Hare, G.; Jennings, N. : Foundations of distributed artificial intelligence.
John Willey and Sons, New York, 1996.

[Diederich & Tickle 95] Diederich, J.; Tickle, A. : Explanation and Collective Computation.
In: Complexity International, Volume 2, April 1995.

[Doyle 79] Doyle, J.: A truth maintenance system.
In Artificial Intelligence, Vol. 12, 1979.

[Dreyfus & Dreyfus 87] Dreyfus, H.; Dreyfus, S. : Künstliche Intelligenz.
Rowohlt Verlag, Rororo 8144, Reinbeck bei Hamburg, 1987.

[Dreyfus & Dreyfus 88] Dreyfus, H.; Dreyfus, S. : Making a mind versus modeling the brain : artificial intelligence back at a branchpoint.
In: Graubard, S. : Artificial intelligence debate.
MIT Press, Cambridge, 1988.

[Erman et al. 80] Erman, L.; Hayes-Roth, L.; Lesser, V.; Reddy, D. : The HEARSEY-II speech-understanding system.
In: ACM Computing Surveys, No.12, June, 1980.

[Federhofer 02] Federhofer, J. „Medical Expert Systems – Doctor's silent Partners”,
<http://www.computer.privatweb.at/judith/index.html> zugegriffen am 14.10.02.

[Feigenbaum 77] Feigenbaum, E. : The art of Artificial Intelligence : Themes and case studies of knowledge engineering, Proceedings of the 5th International Joint Conference on Artificial Intelligence, 1977

[Feigenbaum & McCorduck 83] Feigenbaum, E. ; McCorduck, P. : The Fifth Generation - Artificial Intelligence and Japan's Computer Challenge to the World.
Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1983.

[Feigenbaum 93] Feigenbaum, E.: A tiger in a cage: applications of knowledge-based systems.
University Video Communications, Stanford, 1993.

[Flor et al. 95] Flor, T.; Siembor, P.; Franczyk, B.: Meta-level-architecture for distributed second generation knowledge based systems using CORBA-standard.
In : Proceedings of the Second International Symposium on Autonomous Decentralized Systems ISADS 95, Phoenix, Arizona, USA, 1995

[Flores-Mendez 03] Flores-Mendez, R.: Towards a Standardization of Multi-Agent System Frameworks5,
<http://www.acm.org/crossroads/xrds5-4/multiagent.html> zugegriffen am 10.2.03.

- [Ginsberg 91] Ginsberg, M. : Knowledge interchange format : the KIF of death.
In: AI Magazine, Fall, 1991.
- [Ginsberg 93] Ginsberg, M. : Essentials of Artificial intelligence, Morgan Kaufmann,
San Francisco, 1993
- [Genesereth et al. 94] Genesereth, M.; Singh, N.; Syed, M. : A distributed and anonymous
knowledge sharing approach to software interoperation.
In Adam, N. et al. : Proceeding of the third international conference on information and
knowledge management (cikm '94), ACM Press, New York, 1994.
- [Gillespie 97] Gillespie, H. : Trends in Technology : The smart Lab of Tomorrowland.
In: Today's Chemist at Work, September 1997.
- [gmds 01] Jahresbericht der Deutschen Gesellschaft für Medizinische Informatik, Biometrie und
Epidemiologie e.V. , <http://www.gmds.de/download/jb2001.pdf> zugegriffen am 14.10.02.
- [Hanratty et al. 99] Hanratty, T.; Helfman, R.; Dumer, J.; Baur, E.; Ingham, H.: Soldier-centric
knowledge engineering: lessons from TED .
In: IEEE Intelligent Systems , Volume: 14 Issue: 1 , Jan.-Feb. 1999
- [Harmon & King 86] Harmon, P.; King, D. : Expertensysteme in der Praxis.
Oldenburg Verlag, München, Wien, 1986.
- [Hein & Tank 88] Hein, M.; Tank, W. : Kommunizierende Wissensbasierte Systeme.
In: Hein, M.; Tank, W.; Hertzberg, J. : Beiträge zum 3. Workshop Planen und Konfigurieren.
Arbeitspapiere der GMD, Nr. 388, Mai, 1989.
- [Hermes 72] Hermes, H.: Einführung in die mathematische Logik.
Teubner Verlag, Stuttgart, 1972.
- [Huhns 87] Huhns, M. : Distributed artificial intelligence.
Morgan Kaufmann Publishers, Los Altos, California, 1987.
- [Jennings 92] Jennings, N.: Using GRATE to build cooperating agents for industrial control.
In: Proceedings of the international symposium on artificial intelligence in real time control.
Delft, The Netherlands, 1992.
- [Jennings et al. 93] Jennings, N.; Varga, L.; Aarnts, R.; Fuchs, J.; Sharek, P. : Transforming
standalone expert systems into a community of cooperating agents.
In: International Journal of Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol.6, No.4, 1993.
- [Karbach et al. 90] Karbach, W.; Linster, M. : Wissensakquisition für Expertensysteme, Carl
Hanser Verlag, München, Wien, 1990.

[Karsenty & Brezillon 94] Karsenty, L.; Brezillon, P.J. : Cooperative problem solving and explanation, International Journal of Expert Systems with Applications, Vol. 8, No. 4, 1994

[Kirn 91] Kirn, S. : Kooperationsfähigkeit Intelligenter Agenten in Föderativen Wissensbasierten Systemen.
Dissertation Fernuniversität Hagen, 1991.

[Kirn et al. 92] Kirn, S.; Scherer, A.; Schlageter, G.: FRESCO: Föderative Kooperation in Verteilten Wissensbasierten Systemen.
In: Künstliche Intelligenz, Nummer 1, 1992.

[Kirn & Schlageter 90] Kirn, S.; Schlageter, G. : Intelligent agents in federative expert systems.
In: Deen, S.M. : Cooperating knowledge based systems.
Springer Verlag, Keele UK, 1990

[Kirn & Schlageter 91a] Kirn, S.; Schlageter, G. : Competence evaluation in federative problem solving : how to make expert systems cooperative.
In: Proceedings of the 11th conference on 2nd generation expert systems.
Avignon, France, 1991.

[Kirn & Schlageter 91b] Kirn, S.; Schlageter, G. : FRESCO: Eine Bankenapplikation als Testbed für die föderative Kooperation von Expertensystemen.
In: GWAI-91, 15. Fachtagung für Künstliche Intelligenz, Proceedings.
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.

[Kitamura et al. 94] Kitamura, Y.; Tatsumi, S.; Okumoto, T; Deen, S. :
A problem decomposition scheme for distributed problem solving.
In: Proceedings of the Japan/Korea Joint Conference on Expert Systems, 1994.

[Klett 89] Klett, G. : Kooperierende Expertensysteme mit Kontraktnetzarchitektur und ihr Einsatz in technischen Anlagen.
Dissertation Fernuniversität Hagen, 1989.

[Kleine-Büning et al. 86] Kleine-Büning, H.; Schmittgen, S. : PROLOG.
Teubner Verlag, Stuttgart, 1986.

[Knight et al. 01] Knight, R.; Rabideau, G.; Chien, S.; Engelhardt, B.; Sherwood, R.:
Casper: Space Exploration through Continuous Planning.
In : IEEE Intelligent Systems, September 2001

[Konrad 76] Konrad, E. : Formale Semantik von Datenbanksprachen, Dissertation am Fachbereich Informatik der TU-Berlin, 1976

[Konrad 90] Konrad, E. : Principles of expert systems.
In: International Journal of Applied Artificial Intelligence, Vol.6, No.2, 1990.

[Konrad 01] Konrad, E. : Skript zur Lehrveranstaltung Grundlagen der Künstlichen Intelligenz im Wintersemester 00/01, TU-Berlin, 20001

[Labrou et al. 97] Labrou, Y.; Finin, T. : A Proposal for a New KQML Specification. Technical Report CS-97-03, Computer Science and Electrical Engineering Department, University of Maryland Baltimore County, Baltimore, MD, 1997.
Auch unter <http://www.cs.umbc.edu/kqml>.

[Laddaga et al. 00] Laddaga, R.; Swinson, M.; Robertson, P. : Seeing clearly and moving forward.
In: IEE Intelligent Systems, November/December 2000.

[Lander et al. 90] Lander, S.; Lesser, V.; Connell, M. : Conflict resolution strategies for cooperating expert agents.
In: Deen, S. : Cooperating knowledge based systems.
Springer Verlag, Keele, UK, 1990.

[Lenat 95] Lenat, D. : CYC : a large-scale investment in knowledge infrastructure.
In: Communications of the ACM, Vol. 38, november, 1995.

[Lesser 91] Lesser, V. : A retrospective view of fa/c distributed problem solving.
In: IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, Vol.21, No.6,
november/december, 1991.

[Lesser & Corkill 81] Lesser, V.; Corkill, D. : Functionally accurate, cooperative distributed systems.
In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 11, No.1, january, 1981.

[Levine et al. 85] Levine, P.; Maillard, J.; Pomerol, J.: DECIDEX, a multi-expert system for strategic decisions.
In: Sol, H.; Takkenberg, C.; Robbe, P. : Expert systems and artificial intelligence in decision support systems.
D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Holland, 1987.

[Machado & da Rocha 97] Machado, R.; da Rocha, A. : Inference, Inquiry, Evidence Censorship, and Explanation in Connectionist Expert Systems.
In: IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.5, No.3, August 1997.

[v.Martial 92] v. Martial, F. : Einführung in die Verteilte Künstliche Intelligenz.
In: Künstliche Intelligenz, Nr. 1, 1992.

[Martin et. al. 99] Martin, D.; Cheyer, A.; Moran, D. : The Open Agent Architecture: A Framework for Building Distributed Software Systems.
In: Applied Artificial Intelligence, Volume 13, Number 1-2, January-March 1999, pp. 91-128.

[Mjolsness & Tavormina 00] Mjolsness, E; Tavormina, A. : The synergie of biology, intelligent systems, and space exploration.

In: IEE Intelegent Systems, March/April 2000.

[Moore 93] Moore, J.D. : What Makes Human Explanations Effective?, Proceedings of the Fifteenth Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, NJ, 1993

[Müller 93] Müller, J. : Verteilte Künstliche Intelligenz - Methoden und Anwendungen.
BI Wissenschaftsverlag Mannheim, 1993.

[Narazaki et al. 96] Narazaki, H.; Watanabe, T.; Yamamoto, M. : Reorganizing Knowledge in Neural Networks: An Explanatory Mechanism for Neural Networks in Data Classification Problems.

In: IEEE Transactions on Systems, Man, And Cybernetics, Vol. 26, No.1, February 1996.

[Neches et al 91] Neches, R.; Fikes, R.; Finin, T.; Gruber, T.; Patil, R.; Senator, T.; Swartout, W.: Enabling technology for knowledge sharing.

In: AI Magazine, fall, 1991.

[Newell 82] Newell, A.: The knowledge level.

In: Artificial Intelligence, No. 18, 1982.

[Nilsson 82] Nilsson, N. : Principles of artificial intelligence.

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1982.

[Oliveira et al. 93] Oliveira, E.; Mouta, F.; Rocha, A. : Cooperation in a multiagent community.

In: Proceedings of the 13th conference on 2nd generation expert systems.

Avignon, France, 1993.

[Puppe 87] Puppe, F. : Diagnostisches Problemlösen mit Expertensystemen.

Springer-Verlag, Berlin, 1987.

[Puppe 91] Puppe, F. : Einführung in Expertensysteme.

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.

[Puppe et al 94] Puppe, F; Poeck, K.; Gappa, U.; Bamberger, S.; Goos, K. : Wiederverwendbare Bausteine für eine konfigurierbare Diagnostik-Shell.

In: Künstliche Intelligenz, Nummer 8, 1994.

[Puppe 99] Puppe, F. (Hrsg.): Knowledge based Systems: survey and future directions;

Proceedings XPS-99 5th German Conference on Knowledge Based Systems.

Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1999.

[Reiner 88] Reiner, Ulrike: Semantik von Anfragesprachen für Dokumente-, Fakten- und Erklärungssysteme, Dissertation am Fachbereich Informatik der Technischen Universität Berlin, 1988

[Reiner 91] Reiner, Ulrike: Anfragesprachen für Informationssysteme, Reihe Informationswissenschaft der Deutschen Gesellschaft für Dokumentation (DGD), Hrsg: W. Neubauer, DGD, Frankfurt am Main, 1991.

[Reiter 80] Reiter, R. : A logic for default reasoning.
In Artificial Intelligence, Vol 13, 1980.

[Rich 88] Rich, E. : KI-Einführung und Anwendungen.
McGraw-Hill Book Company GmbH, Hamburg, 1988.

[Robinson 65] Robinson, J. : A Machine-Oriented Logic Based on the Resolution Principle.
In: Journal of the Association for Computing Machinery, Volume 12, No.1, 1965

[Shapiro 87] Shapiro, S. : Encyclopedia of Artificial Intelligence.
Wiley-Interscience Publication, New York, 1987.

[Shao et al. 95] Shao, Y. ; Wilson, A. ; Oppenheim, C. : Expert Systems in UK Banking.
In : Proceedings of the 11th Conference on Artificial Intelligence for Applications, 1995
Page(s): 18 -23

[da Silva & Dawson 97] da Silva, J. ; Dawson, D. : The development of an expert system for hydraulic systems design focusing on concurrent engineering aspects.
In : International Conference on engineering design, ICED 97, Tampere, Finland, 1997.

[Sim et al. 01] Sim, I. ; Gorman, P.; Greenes, R.; Haynes, B.; Kaplan, B.; Lehmann, H.; Tang, P.: Clinical Decision Support Systems for the Practice of Evidence-based Medicine.
In: Journal of the American Medical Informatics Association 8(6):527-534, 2001.

[Smith 80] Smith, R. : The contract net protocol: high-level communication and control in a distributed problem solver.
In: IEEE Transactions on Computers, Vol. 29, No.12, december, 1980.

[Smith & Davis 81] Smith, R.; Davis, R. : Frameworks for cooperation in distributed problem Solving.
In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol 11, No.1, january, 1981
und nachgedruckt in [Bond & Gasser 88].

[Sridharan 87] Sridharan, N. : Workshop report 1986 workshop on distributed ai.
In: AI Magazine, fall, 1987.

- [Sun 99] Sun Microsystems Inc.: Jini(TM) Technology Architectural Overview.
Sun Microsystems, 1999 auch unter
<http://www.sun.com/jini/whitepapers/architecture.html>.
- [Swartout 83] Swartout, W. : XPLAIN: a system for creating and explaining expert consulting programs.
In: Artificial Intelligence, No. 21, 1983.
- [Tatara & Cinar 02] Tatara, E.; Cinar, A. : Interpreting ECG Data by Integrating Statistical and Artificial Intelligence Tools, IEEE Engineering in Medicine and Biology
January/February 2002
- [Teich & Wrinn 00] Teich, J; Wrinn, M.: Clinical Decision Support Systems Come of Age.
In: MD Computing, January/February Vol.17 No1, 2000.
- [Voss et.al. 92] Voß, A.; Karbach, W.; Coulon, C.; Drouven, U.; Bartsch-Spoerl, B. :
Generic specialists in competent behaviour.
In: Neumann, B. : 10th European conference on artificial intelligence.
Wiley & Sons, 1992 .
- [Waterman 86] Waterman, D.: A guide to expert systems.
Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1986.
- [Werner & Demazeau 92] Werner, E. : The design of multiagent systems.
In: Werner, E.; Demazeau, Y. : Decentralised A.I-3.
Elsevier, Amsterdam, 1992.
- [Wick 92] Wick, M. : Expert system explanation in retrospect: a case study in the evolution of expert system explanation, International Journal of Systems and Software, 1992
- [Wielemaker 02] Wielemaker, J. : What is SWI-Prolog?
<http://www.swi-prolog.org> zugegriffen am 25.11.02.
- [Wooldridge & Jennings 95] Wooldridge, M.; Jennings, N. : Intelligent agents: theory and practice.
In: Knowledge Engineering Review, No. 10, Vol. 2, 1995.
- [Wooldridge et al. 91] Wooldridge, M.; O'Hare, G.; Elks, R. : FELINE - a case study in the design and implementation of a co-operating expert system.
In: Proceedings of the 11th conference on 2nd generation expert systems.
Avignon, France, 1991.
- [Wysotzki 02] Wysotzki, F. : Grundlagen der Künstlichen Intelligenz, Skript zur Vorlesung im Sommersemester 2002. Technische Universität Berlin, 2002.

[Zhang & Bell 91] Zhang, C.; Bell, D. : HECODES: a framework for heterogenous cooperative distributed expert systems.

In: Data & Knowledge Engineering, No.6, 1991.

[Zhang & Zhang 91] Zhang, M.; Zhang, C. : Methodologies of solution synthesis in distributed expert systems.

In: Zhang, C; Lukose, D. : Multiagent Systems.

Lecture Notes in Computer Science, Volume 1286, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1991.

[Zhang & Zhang 96] Zhang, M.; Zhang, C. : Neural network strategies for solving synthesis problems in non-conflict cases in distributed expert systems.

In: Zhang, C. ; Lukose, D. : Distributed artificial intelligence.

Springer-Verlag, Berlin, 1996.

[Zhang & Zhang 99] Zhang, M.; Zhang, C : Potential cases, methodologies, and strategies of synthesis of solutions in distributed expert systems.

In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Volume 11 Issue 3, 1999.

Curriculum Vitae

Dipl.-Inform. Stefan Wollny



Geburtstag und -ort: 2.4.1970 in Berlin-Wannsee

Familienstand: verheiratet mit Agnes Wollny,
Ärztin an der Charité Berlin

Ein Kind: Christian Frederik Wollny

1976-1989 Besuch der Conrad-Grundschule in Berlin-Wannsee und des
Werner-Von-Siemens-Gymnasiums in Berlin-Nikolassee

1. Oktober 1989 Immatrikulation an der Technischen Universität Berlin im Studiengang
Informatik
Studienschwerpunkte:

- Künstliche Intelligenz (Expertensysteme, Logische Programmierung, Maschinelles Lernen)
- Datenbanken (Informationsmodellierung, RDBMS)
- Softwareentwicklung

1. Oktober 1995 -

1. September 1997 Studentische Hilfskraft bei der Einheit *Rechnerorganisation und Kommunikation* an der HU-Berlin

1. September 1997 Erlangung des Informatik-Diploms
Diplomarbeit : Implementierung eines WWW-basierten Expertensystems zur naturheilkundlichen Selbstbehandlung von Bagatellerkrankungen (Prolog, C, Informix, SQL, HTML, CGI-Shellskripte).

1. Oktober 1997 - 30. September 2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Einheit *Wissensbasierte Systeme* an der TU-Berlin (5-Jahresstelle zur Promotion)

Tätigkeitsschwerpunkte:

- Eigenverantwortliche Forschung zur Anfertigung der Dissertation
- Lehrtätigkeit (Durchführung des Projekts „Expertensysteme“, Durchführung von Großübungen zur Basisveranstaltung „Grundlagen der Künstlichen Intelligenz“, Übungsaufgaben und Klausuren, Betreuung von Diplomarbeiten)
- Verwaltungstätigkeiten (Rechnerbeauftragter und Bibliotheksbeauftragter der Einheit WBS)

16. Juli 2003 Wissenschaftliche Aussprache