

Ein fallbasiertes System für die Interpretation von Literatur zur Knochenheilung

- SILK -

Technischer Bericht

Ulm, den 16.12.1997

D. Damm, A. Seitz, F.W. von Henke, A.M. Uhrmacher

Abteilung Künstliche Intelligenz

&

L. Claes, S. Wolf

Abteilung Unfallchirurgische Forschung und Biomechanik

Universität Ulm

89069 Ulm

Zusammenfassung

Im Projekt SILK wurden fallbasierte Methoden konzipiert und implementiert, die es dem Wissenschaftler erlauben, den Stand der experimentellen Forschung systematisch zu analysieren, neue Ergebnisse im Kontext anderer einzuordnen und ausgewählte Fragestellungen der Wissenschaftler auf dieser Basis effizient zu beantworten. Als exemplarischer Anwendungsbereich diente das Gebiet der Knochenheilung.

Inhalt

1 Einleitung	1
1.1 Anwendungsgebiet Knochenheilung	1
1.2 Methoden der Wissensverarbeitung	1
1.3 Fallbasierte Methoden	2
1.4 Aufbau des Berichts	3
2 Erfassung und Verwaltung von Untersuchungen	4
2.1 Datenstruktur	5
2.2 Managementmodul	5
2.2.1 Eingabe, Verwaltung von Publikationen	6
2.2.2 Suche	6
2.2.3 Thesaurus	6
2.2.4 Plausibilitäts- und Konsistenzprüfungen	7
2.2.5 Transformation	7
2.3 Benutzungsschnittstelle	8
3 Ein fallbasierter Ansatz: OASES	10
3.1 Repräsentation von Fällen: Absolute und Vergleichende Fälle	10
3.2 Fallbasiertes Schließen	11
3.2.2 Ähnlichkeit zwischen vergleichenden Ergebnisse	16
3.2.3 Brauchbarkeit von Fällen	16
3.2.4 Anpassung	21
3.3 Erklärungskomponente	21
3.4 Hypothesen	22
3.5 Metaregeln	23
3.5.1 Minimale Angleichung	23
3.5.2 Maximale Rekursion	24
3.5.3 Spezialisierung	24
3.5.4 Allgemeine Anfrage	25
3.5.5 Umrechnung	25
3.5.6 Minimale Interpolationsspezifität	25
3.5.7 Bewertung von 'k. A.'	26
3.5.8 Minimum verwendeter Ergebnisse bei Mittelwertbildung	26
3.5.9 Höchstens ungleich	26
4 Evaluierung	27
4.1 Anfragerihe zur Literaturstelle „L.Claes, J.Reinmüller, und L. Dürselen, 1987“	27

4.2 Anfragereihe zur Literaturstelle „L.Claes, H.-J.Wilke, S. Rübenacker und H. Kie-fer, 1989“	30
4.3 Anfragen zur Literaturstelle „Kenwright und Goodship, 1989“	31
4.4 Anfragen zur Literaturstelle „Goodship et al., 1993“	32
4.5 Anfragen zur Kallusfläche und zur periostalen Kallusfläche	34
5 Rück- und Ausblick	35
6 Literatur	38

1 Einleitung

Eine umfassende Analyse und Synthese von experimentellen Untersuchungen ist aufgrund der Fülle vorliegender Untersuchungen und der Heterogenität der verwendeten Ansätze und Darstellungen in den meisten Gebieten mit extremen Aufwand verbunden. Der Versuch, eine solche Analyse und Synthese durch ein Softwaresystem geeignet zu unterstützen, erscheint daher längst überfällig. Ziel des Projektes ist es, diesem Defizit Rechnung zu tragen, indem entsprechende Methoden entwickelt und anhand von Anwendungen evaluiert werden.

1.1 Anwendungsgebiet Knochenheilung

Als experimentelles Anwendungsgebiet wurde die Knochenheilung gewählt. Der Ablauf der Knochenheilung ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Mehrere Parameter (Heilungszeit, Frakturspaltgröße, Interfragmentäre Bewegung usw.) bestimmen ihre Qualität. Nach wie vor ist sowohl über die Wichtigkeit der einzelnen Einflußfaktoren als auch über Kombinationen von Faktoren, die gute Heilungsergebnisse erwarten lassen, wenig bekannt (Claes et al., 1995). Die Vielzahl von Faktoren, welche die Knochenheilung beeinflussen, spiegelt sich in zahlreichen unterschiedlichen Versuchsansätzen wider, die zu unterschiedlichen Versuchsergebnissen führen. Ferner beschreiben viele Arbeiten ihre Ergebnisse nur qualitativ, indem sie die untersuchten Einflußfaktoren unter bestimmten Bedingungen gegeneinander abwägen. Die Folge ist, daß eine systematische Nutzung der in der Literatur dokumentierten Erkenntnisse sich extrem aufwendig gestaltet. Die Knochenheilung stellt damit eine Herausforderung für die Entwicklung eines solchen Softwaresystems dar.

1.2 Methoden der Wissensverarbeitung

Die Analyse bestehender Methoden zur Verarbeitung von Wissen zeigte, daß die meisten dieser Methoden auf modellhaftem Wissen beruhen. Dieses wird entweder vom Fachexperten direkt akquiriert oder aus bestehenden Datensätzen hergeleitet.

Neben den bekannten Problemen, welche die Akquisition von modellhaftem Wissen allgemein in sich birgt (Clancey & Sortliffe, 1984; Mars & Miller, 1988), ist in der Knochenheilung ein solches Modell aus Sicht der Experten kaum formulierbar. Daher erscheint eine direkte Akquirierung modellhaften Wissens wenig erfolgversprechend. Eine Alternative bieten induktive Verfahren, die dieses modellhafte Wissen aus Datensätzen, wie den vorliegenden experimentellen Studien, herleiten. Daher wurden verschiedene Methoden des maschinellen Lernens auf ihre Brauchbarkeit zur Lösung dieses Problems hin untersucht. Hierbei kristallisierten sich jedoch mehrere Schwierigkeiten heraus.

- Übernimmt man das in der Literatur dokumentierte Wissen als Regeln, so erhält man sehr spezifische, das heißt kontextabhängige Aussagen, die nicht zu Regelketten zusammengefaßt werden können. Ansätze wie "explanation based lear-

ning" (Mitchell et al., 1986) schlagen damit fehl. Generelle Regeln fehlen, die mit Hilfe von Beispielen verfeinert werden können.

- Von Publikation zu Publikation werden sehr unterschiedliche Einflußparameter untersucht. Daher scheint auch eine induktive Aufbereitung der Daten kaum erfolgversprechend. Die meisten induktiven Lernverfahren sind für nicht homogen strukturierte Daten nur beschränkt einsetzbar. So können ID3-basierte Ansätze (Quinlan, 1986; Quinlan, 1989) nur schwer mit unvollständigem Wissen umgehen. Neuere Varianten tolerieren zwar vereinzelte "Missing Values", z.B. C4.5 (Quinlan, 1993), jedoch ist die Güte induktiver Verfahren nach wie vor stark mit der Homogenität und Menge verfügbarer Fälle korreliert.
- Systeme, die Wissen aus Datenbanken extrahieren, seien es induktive Lernverfahren oder statistische Korrelationsverfahren, sind naturgemäß für umfangreiche Sammlungen homogener strukturierter Daten konzipiert (Frawley et al., 1992; Soo et al., 1994). Methoden des "Data Mining" sind daher für die Aufarbeitung einer Menge von Sonderfällen, wie sie die in der Literatur dokumentierten experimentellen Untersuchungen repräsentieren, wenig geeignet.
- Neben der heterogenen Struktur werden Untersuchungen der Knochenheilung häufig durch metrisch skalierte Einfluß- und Ergebnisparameter beschrieben. Diskretisierungen kontinuierlicher Werte können nur kontextabhängig durchgeführt werden. Schon aus diesem Grunde sind die meisten Verfahren des maschinellen Lernens nicht einsetzbar, da sie wenigstens ein qualitatives Skalenniveau des zu lernenden Konzeptes erfordern. Zu dieser Klasse gehören auch die Verfahren, die auf Relaxierungen beruhen, z.B. die AQ-basierten Verfahren (Michalski, 1990, 1983).

Alle diese Verfahren verallgemeinern Fälle und wenden dieses verallgemeinerte Wissen auf Problemstellungen an. Aufgrund der Heterogenität, die einerseits den Satz von Variablen wie auch deren Skalenniveau betrifft, scheint es grundsätzlich fragwürdig zu sein, die bestehende Ansammlung von Wissen a priori verallgemeinern zu wollen. Vielmehr sollte eine Verallgemeinerung, hier eine Anpassung geeigneten Wissens, erst bei der konkreten Lösung eines Problems kontextabhängig erfolgen. Diesen Weg beschreiten fallbasierte Methoden.

1.3 Fallbasierte Methoden

Fallbasierte Methoden bieten eine Alternative zu den oben erwähnten Methoden, da sie vor allem situationsbezogenes Wissen unterstreichen und von allgemeinen Modellen weitestgehend absehen (Riesbeck & Schank, 1989; Kolodner, 1993). Um zur Analyse neuer Situationen anwendbar zu sein, benutzen diese Methoden jedoch in der Regel schwächere Modelle, zum Beispiel in Form von Abstraktionshierarchien (Goel, 1991; Aamodt & Plaza, 1994, Puppe et al., 1996). Jedoch erwiesen sich im gegebenen Fall selbst schwache Modelle als kaum formulierbar. Es mußte daher versucht werden, das in fallbasierten Methoden explizit definierte, schwache Modellwissen durch Wissen zu ersetzen, welches aus den Fällen selbst hergeleitet werden kann. Die Durchführbarkeit dieses neuen Ansatzes ergab sich aus dem oft ver-

gleichenden Charakter experimenteller Studien im gegebenen Anwendungsbereich (Seitz & Uhrmacher, 1996).

1.4 Aufbau des Berichts

Um eine effektive Analyse von Literatur zu experimentellen Untersuchungen zu ermöglichen, wird einerseits die Erfassung und Verwaltung und andererseits die Verarbeitung des in der Literatur dokumentierten Wissens notwendig. Zunächst wird die Systemkomponente OAKES vorgestellt. Sie unterstützt die Akquisition des Wissens. Das in OAKES akquirierte Wissen wird in eine Menge von Fällen transformiert, die von der Systemkomponente OASES analysiert und synthetisiert werden. Die Beschreibung dieser Systemkomponente, insbesondere des in ihr realisierten fallbasierten Inferenzmechanismus steht im Zentrum dieses Berichtes, ebenso wie sie im Zentrum der Forschungstätigkeit stand. Der Bericht wird abgeschlossen durch die Evaluierung der durch OASES erzielten Ergebnisse, und einen Rück- und Ausblick.

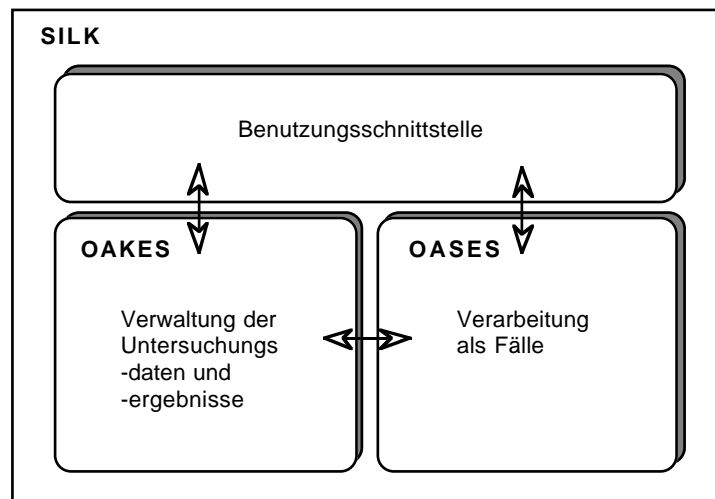


Abb. 1: Schematischer Überblick der Komponenten des Systems

2 Erfassung und Verwaltung von Untersuchungen

Um die umfangreiche Literatur, die zu experimentellen Untersuchungen existiert, zu analysieren, muß das Wissen zu den existierenden Publikationen eingegeben, akquiriert werden. Wie schon in der Einleitung erwähnt, werden in der Literatur oft unterschiedliche Heilungssituationen miteinander verglichen, um den Einfluß bestimmter Parameter auf den Heilungserfolg zu untersuchen. Eine Untersuchung besteht im allgemeinen aus mehreren Versuchsgruppen, die bezgl. eines oder mehrerer Versuchsparameter variieren. Der Heilungserfolg läßt sich wiederum anhand einzelner Ergebnisparameter beschreiben. Oft besitzen Ergebnisse vergleichenden Charakter: „... more proliferative callus formation was seen in the less rigidly-fixed groups, this difference becoming apparent three weeks postoperatively.“ (Kenwright & Goodship, 1985).

Datenbanken sind zur Verwaltung der Untersuchungen wenig geeignet, da sie für die Aufnahme von homogen strukturierten Massendaten konzeptioniert sind. Daher wurde die Komponente OAKES konzipiert und implementiert. Die Aufgabe von OAKES ist es, den Experten bei der Eingabe des erforderlichen Wissens „intelligent“ zu unterstützen und ihm eine effektivere Arbeit mit der Literatur zu ermöglichen. Aus diesem Grund umfaßt OAKES neben einer Art Datenbank, welche die Publikation und die darin enthaltenen Erkenntnisse aufnehmen und verwalten soll, einen Thesaurus, der automatisch aktualisiert wird und die Grundlage für verschiedene Plausibilitäts- und Konsistenztests bildet (Abb. 2).

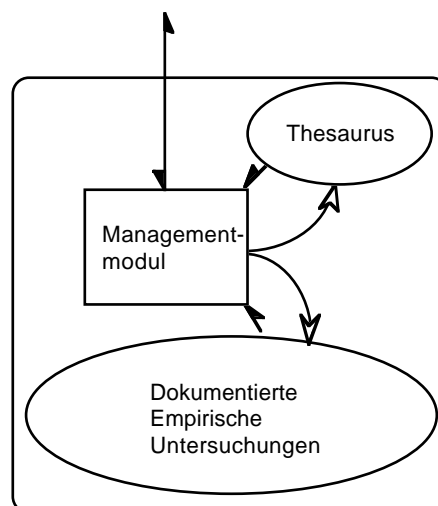


Abb. 2: Systemkomponenten von OAKES

2.1 Datenstruktur

Anforderungen, die bei der Entwicklung der Datenstruktur besonders berücksichtigt werden mußten, waren einerseits Effizienz und andererseits Ausdrucksstärke. Die Datenstruktur folgt einem hierarchischen, objekt-basierten Aufbau, in dem einer Literaturstelle mehrere Untersuchungen zugeordnet werden können. Dabei wird eine Untersuchung durch eine Anzahl von Versuchsparametern beschrieben. Jeder Untersuchung können wiederum Untersuchungen bzw. Untersuchungsgruppen zugeordnet werden, die bezüglich einem oder mehreren Versuchsparameter(n) variieren.

Die Ergebnisse der Untersuchung werden mit Hilfe von Ergebnisparametern dokumentiert, die, genau wie bibliographische Angaben, Untersuchungsgruppen oder Versuchsparameter, als First-Class Objekte repräsentiert werden. Wie schon erwähnt, können diese Bewertungen sowohl absoluten als auch vergleichenden Charakter haben. Ein Ergebnis enthält eine Referenz auf die Untersuchungsgruppe, bzw. für den Fall von vergleichenden Angaben, auf die beiden Untersuchungsgruppen, auf die sich die Bewertung bezieht. Die Resultate einzelner Gruppen werden durch Faktoren, Differenzen oder durch qualitative Vergleiche von Ergebnisparametern in Beziehung zueinander gesetzt.

Darüber hinaus wurde als Grundlage für verschiedene Plausibilitätsprüfungen, eine Thesaurus-Datenstruktur entwickelt, welche die notwendigen Informationen über die aktuelle Wissensbasis enthält. Der Thesaurus faßt Bibliotheken über bisher verwendete Ergebnis-, Versuchsparameter und gespeicherte Einheiten zusammen. Dabei wird jede Einheit einer Maßklasse zugeordnet, so gehören μm^2 , mm^2 , cm^2 ,... dem Maß Fläche an. Der Thesaurus wird von dem Managementmodul verwaltet (Kap. 2.2.3).

Die Daten der Wissensbasis müssen, um eine sinnvolle Bearbeitung zu ermöglichen, persistent gehalten werden. Hierzu wurden entsprechende planare Strukturen entwickelt, in denen die Hierarchie kodiert gespeichert werden kann. Neben den Bibliotheksdaten werden auch allgemeingültige Informationen aus dem Thesaurus persistent gehalten. Hierzu zählt vor allem die Information über die Einheiten.

2.2 Managementmodul

Das Managementmodul muß über geeignete Mechanismen verfügen, die den Experten bei der Eingabe und Wartung der Wissensbasis unterstützen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Datenbank-, und Suchfunktionalitäten implementiert. Da die Konsistenz der Wissensbasis eine wichtige Voraussetzung für die spätere Analyse darstellt, wurde ein Thesaurus entwickelt, der die Grundlage für unterschiedliche Plausibilitäts- und Konsistenztests bildet. Eine weitere wichtige Aufgabe des Managementmoduls ist daher, die automatische Verwaltung dieses Thesaurus. Im Folgenden sollen die einzelnen Funktionalitäten des Managementmoduls kurz vorgestellt werden.

2.2.1 Eingabe, Verwaltung von Publikationen

Zu den Aufgaben des Managementmodules gehören die üblichen Datenbankfunktionen. Sie dienen der Eingabe und Verwaltung der Publikationen. So stehen etwa für die Eingabe und die Bearbeitung von Literaturstellen, der dort beschriebenen Untersuchungen und Untersuchungsgruppen spezifische Funktionen zur Verfügung. Ebenso wird die Eingabe und Bearbeitung von Versuchs- bzw. Ergebnisparametern von OAKES unterstützt. Diese werden dem Benutzer über kontextspezifische Menüs angeboten.

2.2.2 Suche

Die gespeicherten Publikationen können nach bibliographischen Angaben oder nach Parameterangaben durchsucht werden. Die Suche nach Versuchs- bzw. Ergebnisparametern stellt dabei eine Neuerung gegenüber den bisher von üblichen Literaturdatenbanken angebotenen Optionen dar. Es ist sowohl möglich allgemein nach einem Parameter, wie auch nach einer bestimmten Belegung eines Parameters (z.B.: Spezies = Schaf) zu suchen. Drei Suchkriterien können dabei mit „und“, „oder“ und „nicht“ verknüpft werden. Die Abb. 3 zeigt ein Beispiel für die Suche nach Versuchsparametern.

Literaturstellen-Suche

Auswahl der Parameter:

1.Parameter: Spezies Wert: Schaf

und oder nicht

2. Parameter: Uerschiebung Wert:

und oder nicht

3. Parameter: Wert:

abbrechen suchen

Abb. 3: Eingabedialog „Suche nach Versuchsparametern“.

2.2.3 Thesaurus

Der Thesaurus bildet die Grundlage für verschiedene Plausibilitätsprüfungen. Die gespeicherten Daten werden zur Eingabeunterstützung verwendet; auf diese Weise können eine Vielzahl von Eingabe- bzw. Benutzungsfehlern und den daraus resultierende Inkonsistenzen in der Wissensbasis schon vorzeitig abgefangen werden. Die Inhalte des Thesaurus passen sich der Wissensbasis automatisch an. Dabei werden im Thesaurus Informationen über die bisher verwendeten Untersuchungsparameter, Ergebnisparameter, deren Wertebereiche - metrisch wie auch nominaler Art - und zugehörige Einheiten bzw. Maßklasse festgehalten.

Für jede neue Bibliothek wird von dem Managementmodul automatisch eine derartige Thesaurusstruktur angelegt und entsprechend den durchgeführten Änderungen aktualisiert.

2.2.4 Plausibilitäts- und Konsistenzprüfungen

Eine einheitliche Terminologie erleichtert die Verarbeitung der Untersuchungen und die Konsistenzerhaltung der Wissensbasis (Guise et al., 1993). Daher wurden Mechanismen entwickelt, die das Fachvokabular auf eine möglichst konzise Untermenge begrenzen. Die im Thesaurus gespeicherte Information wird für die Erstellung von Auswahllisten verwendet, die den Benutzer bei der Eingabe der Untersuchungen unterstützen und Eingabefehler weitgehend verhindern sollen. Dem Benutzer werden Listen von Untersuchungs- und Ergebnisparametern, mit entsprechenden Wertebereichen und Maßeinheiten zur Auswahl angeboten.

Ausgangspunkt für weiterreichende Konsistenztests ist die Annahme, daß Parameter nur durch Einheiten einer Klasse beschrieben werden können; so erfolgen Angaben bezgl. der Spaltbreite z.B. nur in Längenmaßen. Überprüft wird, inwieweit die Zuordnung einer Einheit zu einem bekannten Parameter mit bisherigen Einträgen konsistent ist. Falls ein neuer Parameter hinzugefügt und eine bekannte Einheit zugeordnet wird, erfolgt automatisch die Zuordnung des Parameters zu der entsprechenden Maßklasse. Die Zuordnung neuer Einheiten zu bestehenden Maßen erfolgt über bekannte Parameter. Wurde beispielsweise für den Parameter Kallusfläche die Einheit mm^2 verwendet, welche der Maßklasse Fläche zugeordnet ist, und wird nun die Einheit μm^2 bei der Beschreibung der Kallusfläche neu definiert, erfolgt die Zuordnung von μm^2 automatisch zur Maßklasse Fläche. Es ist auch möglich, neue Maßklassen zu definieren. Ein anderer Test basiert auf dynamisch angelegten Wertebereichen für einzelne Parameter. Falls der Wert eines Parameters um mehr als einen bestimmten Faktor von dem bisher beobachteten Mittelwert abweicht, wird der Benutzer darauf hingewiesen. Dabei werden unterschiedliche Maßeinheiten berücksichtigt.

Die Mechanismen, die mithilfe des Thesaurus realisiert sind, dienen der Konsistenzerhaltung der Wissensbasis und der Unterstützung des Benutzers. Die letztendliche Kontrolle darüber, welche Einträge gespeichert werden, ist jedoch dem Benutzer und der Benutzerin des Systems vorbehalten.

2.2.5 Transformation

Eine Aufgabe der Systemkomponente OAKES ist es, die Daten in geeigneter Form für OASES zur Verfügung zu stellen. Für die Analyse müssen die Daten in einheitlicher Form vorliegen, so müssen sich die Angaben zu einem Parameter auf dieselbe Einheit, die sogenannte Basiseinheit beziehen. OAKES und OASES kommunizieren über Dateien miteinander. OASES transformiert die von OAKES gelieferten bereinigten Datenstrukturen in die benötigten Fallstrukturen.

Transformationsfunktionen anderer Art werden bereitgestellt, um bibliographische Angaben von handelsüblichen Literaturdatenbanksystemen (z.B. EndNote) zu importieren. Die Kopplung zwischen Literaturdatenbank und SILK ist lose über Dateien realisiert. Die Literaturdatenbank exportiert bibliographische Angaben in einem vordefinierten Format, die dann von OAKES gelesen und in dem eigenen Datenformat gespeichert werden.

2.3 Benutzungsschnittstelle

Aufgabe der Benutzungsschnittstelle ist es, dem Benutzer das zugrunde liegende Wissensmodell zugänglich zu machen und ihn bei der Wartung und Inspektion der Wissensbasis zu unterstützen. Neben einer modernen Dialogtechnik wurden verschiedene grafische Techniken, wie etwa fokussierende Sichten oder ein kontextspezifisches Angebot der Funktionen miteinander kombiniert, um das notwendige Maß an Komfortabilität zu erreichen. Die Eingabe und Verwaltung der Publikationen wird durch speziell entwickelte Editoren erleichtert. Bei der Entwicklung der Editoren wurde auf die Einhaltung der Style Guidelines (Users Interface Guidelines, 1991), soweit als möglich, geachtet, um die Benutzungsschnittstelle für den Anwender transparent und seinen Erwartungen entsprechend zu gestalten. Die Oberfläche verfügt über die für Macintosh typischen Optionen und einen entsprechenden Aufbau. Zusätzlich ist eine Online-Hilfe implementiert.

Ebenso wie die Repräsentation der Untersuchungen ist die Interaktion des Benutzers mit dem System objekt-orientiert angelegt. Ausgehend von der Literaturstelle als Wurzel bildet sich eine Hierarchie von Gruppen und Untergruppen aus, welche die in dieser Literaturstelle dokumentierten Untersuchungen, Untersuchungsvarianten und die Bewertungen dieser Untersuchungen aufnehmen. Auf den einzelnen Objekten werden dem Experten spezielle Funktionen zur Verfügung gestellt (Abb. 4). Die Angaben zu den Versuchsparametern werden von Untersuchung zu Untersuchungsgruppen, und von Untersuchungsgruppen zu den untergeordneten Untersuchungsgruppen vererbt. Analog dazu ist auch die Benutzungsoberfläche von OASES aufgebaut, was dem Benutzer das Arbeiten mit beiden Systemen erleichtert.

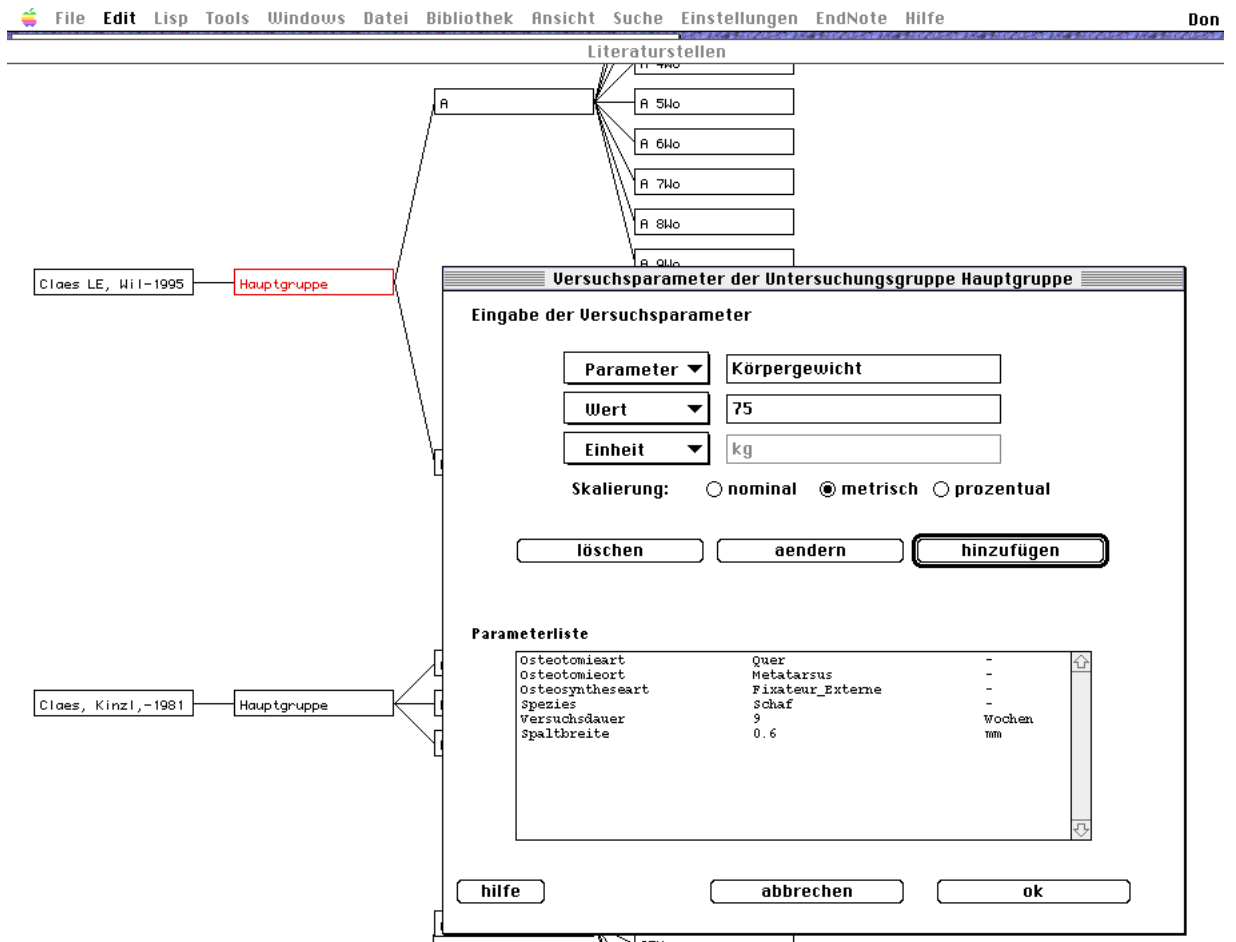


Abb. 4: Benutzungsschnittstelle von OAKES.

Aus der Literatur, die von den Experten zur Verfügung gestellt wurde, konnten ca. 50 experimentelle Untersuchungen extrahiert und mit Hilfe von OAKES eingegeben werden. Auf diese Weise entstand eine Bibliothek mit 650 Fällen, die bei der Evaluierung der Systemkomponente OASES als Fallbasis zugrunde gelegt wurde (s. Kap. 5).

3 Ein fallbasierter Ansatz: OASES

Das System OASES realisiert den in der Einführung genannten Ansatz des fallbasierten Schließens. Ähnlichkeitsberechnungen und Falladaptionen werden hier nicht mit Hilfe von schwachen Modellen wie in anderen fallbasierten Systemen durchgeführt. Statt dessen nutzt das System das in den Fällen inhärente Wissen, um Kriterien für die Ähnlichkeit und die Adaption anhand der konkreten Situation herzuleiten. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Module und Mechanismen von OASES näher beschrieben (Abb. 5).

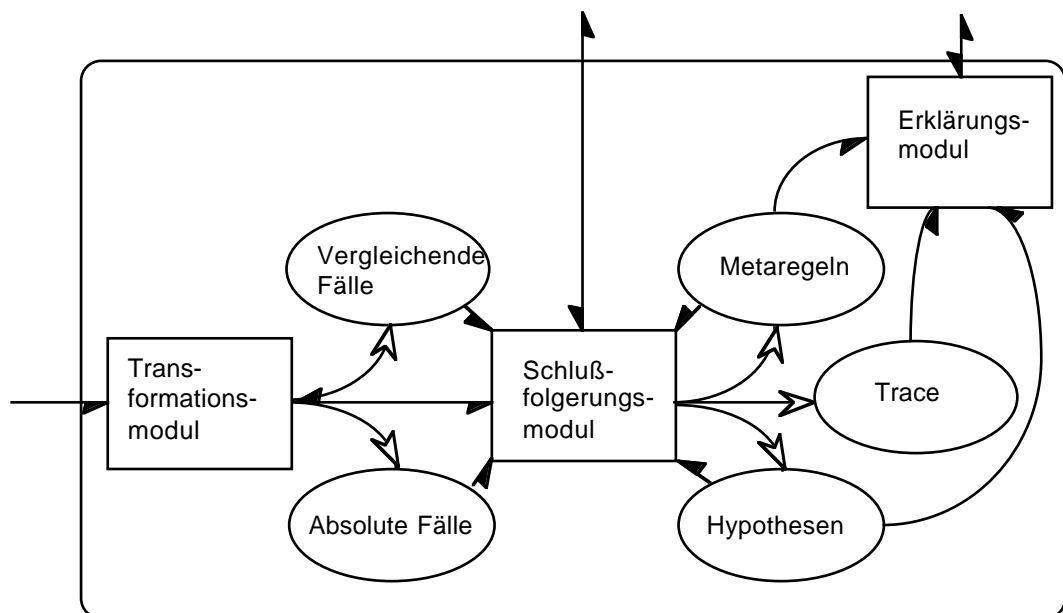


Abb. 5: Systemkomponente OASES

3.1 Repräsentation von Fällen: Absolute und Vergleichende Fälle

Die zum Thema der Knochenheilung publizierten Arbeiten dokumentieren im allgemeinen Experimente, welche die Auswirkung einer Menge von Einflußfaktoren und gegebenenfalls deren Änderung auf das Heilungsergebnis untersuchen. Die Beziehungen zwischen bestimmten Einflußparametern oder Einflußparameteränderungen und dem Heilungsergebnis, sprich Ergebnisparametern oder Ergebnisparameteränderungen stehen im Mittelpunkt der Arbeiten. Im Falle vergleichender Experimente sind Änderungen als Wertepaare der Einflußparameter darstellbar, der Einfluß auf den Ergebnisparameter läßt sich als Faktor, Differenz, oder qualitativen Vergleich ausdrücken (Abb. 6).

Literaturstelle: Aro et al., 1990	Literaturstelle: Aro et Chao, 1993
Einflußparameter:	Einflußparameter:
Spezies: Hund	Spezies: Hund
Osteotomieart: Quer	Osteotomieart: Quer
Osteotomieort: Tibia	Osteotomieort: Tibia
Körpergewicht: 26.5 kg	Körpergewicht: 25 kg
Osteosyntheseart: Fixateur externe	Osteosyntheseart: Fixateur externe
Spaltbreite: 0.8 mm	Spaltbreite: 1 mm
Stimulationsrichtung: Axial	Versuchsdauer: Messung 1: 42 Tage
Stimulationsbeginn: 15 Tage	Messung 2: 84 Tage
Versuchsdauer: 90 Tage	
Ergebnisparameter:	Ergebnisparameter:
Torsionssteifigkeit: 136,2 Nm / rad	Periostale Kallusfläche: Signifikante Reduktion zwischen Messung 1 und 2.

Abb. 6: Ergebnisse der Knochenheilkunde als Fälle

Wie schon in anderen fallbasierten Systemen (Kolodner, 1993), werden Fälle als flache Struktur von Attribut-Wertepaaren in OASES repräsentiert, da kein Modellwissen vorhanden ist, welches den Aufbau von Abstraktionshierarchien ermöglicht. Als Attribute fungieren die Einfluß- und Ergebnisparameter. Abb. 6 verdeutlicht die Interpretation von Untersuchungsgruppen und deren Ergebnisse als flach strukturierte Fälle in Form einem absoluten und einem vergleichenden Ergebnis. Absolute und vergleichende Fälle werden in zwei getrennten Fallbasen verwaltet (siehe Abb. 5).

3.2 Fallbasiertes Schließen

Abb. 7 verdeutlicht schematisch den Ablauf der fallbasierten Inferenzkomponente. Zunächst erfolgt durch den Benutzer die Spezifizierung der ihn interessierenden Fragestellung. Das System beantwortet Fragen nach dem zu erwartenden Heilungsverlauf, z. B.: "Welches Ergebnis ist zu erwarten, wenn eine Querosteotomie mit einem externen Fixateur fixiert und nach zwei Wochen mit einer Frequenz von zwei Hz stimuliert wird?" oder "Wie wirkt sich eine Spaltbreite von 3 mm gegenüber einer Spaltbreite von 1 mm in der gegebenen Situation auf die Kallusbildung aus?".

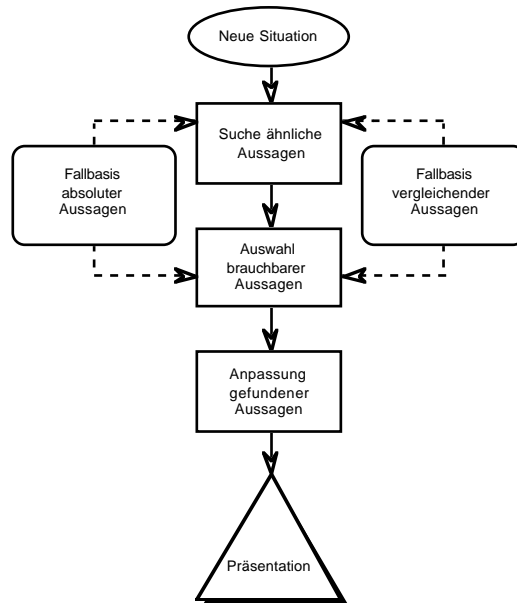


Abb. 7: Der fallbasierte Inferenzmechanismus

Die Anfrage erfolgt dadurch, daß der Benutzer eine Reihe von Einflußfaktoren gemeinsam mit ihren Werten und den ihn interessierenden Ergebnisparameter angibt (Abb. 8).

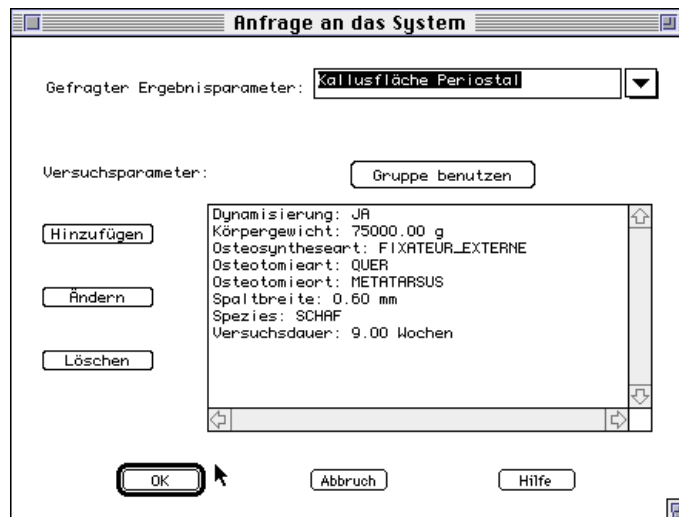


Abb. 8: Anfrage an das System

Alternativ kann eine vergleichende Anfrage gestellt werden, indem zwei Parametergruppen angegeben werden, die miteinander verglichen werden sollen. In Abb. 9 wird zum Beispiel untersucht, inwieweit die Dynamisierung einer Fraktur unter bestimmten anderen Bedingungen Einfluß auf die periostale Kallusfläche hat.

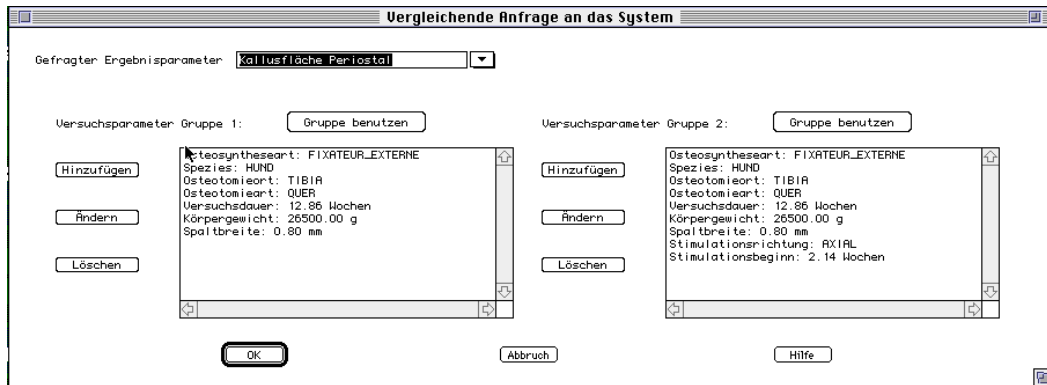


Abb. 9: Vergleichende Anfrage

Nach der Eingabe der Anfrage sucht das System nach ähnlichen Fällen, sprich Ergebnissen aus Publikationen, die möglichst gut auf die momentane Fragestellung passen. Die Ähnlichkeit der Publikationen zur Fragestellung ergibt sich dabei durch Untersuchung der Vereinbarkeit einzelner Parameterwerte. Nachdem eine Reihe von Publikationen gefunden wurden, werden diese anhand ihrer Brauchbarkeit für die Beantwortung bewertet, d. h. es wird festgestellt, wie gut die gefundenen Fälle an die gegebene Fragestellung angeglichen werden können. Dazu wird wiederum auf das Fallwissen zurückgegriffen. Nach einer weiteren Selektion werden die Fälle adaptiert. Auch zur Adaption wird Fallwissen hinzugezogen.

Zum Schluß präsentiert das System eine Reihe von Werten, die möglicherweise für den Ergebnisparameter unter der gegebenen Situation erwartet werden können (Abb. 10). Jeder Ergebnisparameter wird mit einer Sicherheit und einer Erklärung geliefert, die den oben genannten Prozeß und die in ihm involvierten Fälle aufschlüsseln.

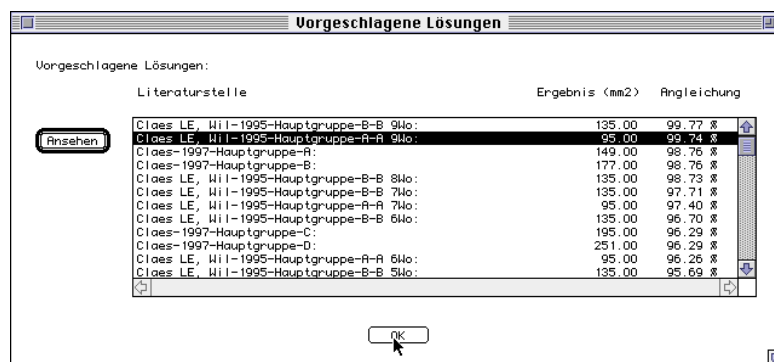


Abb. 10: Präsentation möglicher Ergebnisse einer Anfrage

Der erste Schritt im Prozeß des fallbasierten Schließens ist die Suche nach ähnlichen Fällen. Man möchte Kandidaten finden, die möglichst exakt die gegebene Fragestellung beschreiben, um hierfür eine Lösung zu bestimmen. Daher ist es notwendig, ein Ähnlichkeitsmaß zwischen Fällen zu definieren, um die am besten passenden Kandidaten selektieren zu können.

Fälle werden als Listen von Parameter-Wertepaaren dargestellt; letztere repräsentieren einzelne Merkmale. Parameter werden eindeutig durch ihren Namen identifiziert. Es existieren unterschiedliche Ansätze, um die Ähnlichkeit von Merkmalswerten zu bestimmen. Der einfachste Ansatz fordert gleiche Werte. Einen genaueren Hinweis auf die Vergleichbarkeit von ordinal und metrisch skalierten Merkmalswerten geben gewichtete euklidische Distanzen (Duda & Hart, 1973; Uhrmacher et al., 1997; Nebot et al., 1993). Sie setzen die explizite Gewichtung von Merkmalen voraus, die z.B. vom Benutzer vorgenommen oder induktiv hergeleitet werden. Kontextabhängige Gewichtungen sind in diesem Zusammenhang das schwer zu bewältigende Problem (Bento & Costa, 1993). Auch im vorliegenden Anwendungsbereich müssen Parameter kontextabhängig gewichtet werden.

In der Regel ist es sehr schwierig, Gewichtungen und Zusammenhänge automatisch aus den vorliegenden Daten zu generieren. In den Fällen finden sich im allgemeinen keine Ergebnisse darüber, wie Parameter(werte) funktional zusammenhängen, oder ob Unterschiede von Parameterwerten Auswirkungen auf das Ergebnis eines Falles haben. Die Generierung solcher Gewichtungen erfolgt häufig inkrementell und interaktiv, wie zum Beispiel im Fall von PROTOS (Bareiss et al., 1988). Eine andere Möglichkeit, dieses schwache Modellwissen aus Daten zu generieren, besteht in deren induktiven Bearbeitung. Sebag und Schoenauer (1993) bestimmen auf solche Weise ein regelbasiertes Ähnlichkeitsmaß. Die Mischung aus qualitativen und quantitativen Werten, sowie der variierende Satz von Einflußfaktoren, der die relativ kleine Fallbasis der Knochenheilung kennzeichnet, widersetzt sich einer induktiven Aufbereitung der Daten.

Eine weitere Vorgehensweise beim Vergleichen ("Matching") von Parameterwerten ist deren Klassifizierung aufgrund ihrer funktionalen Rolle im betrachteten Fall. Unterschiedliche Parameterwerte sind vereinbar, wenn sie dieselbe *funktionale Rolle* besitzen (Koton, 1989). Dazu ist allerdings, wie auch schon in den zuvor genannten Systemen zur Gewichtung von Parametern, Modellwissen notwendig, in dem explizit kontextunabhängig Zusammenhänge statuiert werden. Jedoch erscheinen selbst schwache Modelle im gegebenen Anwendungsbereich kaum formulierbar.

Jedoch bietet sich durch die Anwendung vergleichender Fälle die Möglichkeit, kontextabhängig den Einfluß einzelner Parameter auf das Ergebnis im allgemeinen und insbesondere die Signifikanz von Parameterwertunterschieden im speziellen zu bestimmen.

Auch die Fragestellung kann als ein Fall aufgefaßt werden, dessen Ergebnis allerdings noch nicht bekannt ist, so daß wir im weiteren von der Ähnlichkeit zwischen zwei Fällen sprechen werden. In einem ersten Selektionsprozeß wird nach Fällen gesucht, welche zur gegebenen Fragestellung *ähnlich* sind. Zwei Fälle sind *ähnlich*, wenn die Anzahl an *nicht austauschbaren* Parametern den vom Benutzer als Systemparameter eingestellten Schwellwert nicht überschreitet. Zwei Parameterwerte sind *nicht austauschbar*, wenn sie nicht im Rahmen von vorgegebenen Toleranzbereichen liegen und auch nicht durch ein vergleichendes Ergebnis in der Literatur kontextabhängig als gleich bewertet werden.

3.2.1.1 Gleichheit von Parameterwerten im Rahmen von Toleranzbereichen

Neben der de facto Gleichheit von Parameterwerten stimmen diese gegebenenfalls unter Berücksichtigung von Toleranzbereichen „praktisch“ überein. Hierzu werden für die Versuchstierspezies getrennt Wertebereichsspannen der einzelnen Einflußparameter protokolliert. Ein vom Benutzer vorgegebener Prozentsatz dieser Spanne wird dann als Toleranzbereich für Werteunterschiede verwendet. Beispielsweise liegen die Werte für den Einflußparameter Axiallast bei Schafen im Bereich zwischen 200 und 1000 N, woraus sich eine Spanne von 800 N ergibt. Liegt der Toleranzbereich für die Axiallast bei 5%, so werden Wertunterschiede von bis zu 40 N als gleich angesehen.

3.2.1.2 Gleichheit von Werten aufgrund eines vergleichenden Ergebnisses

Daß zwei Werte eines Parameters austauschbar sind, läßt sich gelegentlich auch durch eine vergleichende Untersuchung dokumentieren. Die Aussagekraft vergleichender Untersuchungen wird dabei durch ihre Ähnlichkeit ausgedrückt, die sie zu den Fällen besitzen, für die der Wertaustausch stattfinden soll. Eine vergleichende Aussage, die für die Austauschbarkeit spricht, muß den betreffenden Einflußparameter variieren und außerdem angeben, daß sich der gefragte Ergebnisparameter dabei nicht verändert (Abb. 11). Im vorliegenden Beispiel passen die Untersuchungsgruppen des vergleichenden Ergebnisses vollkommen (100%) zu den Gruppen mit den unterschiedlichen Werten für die Fixationssteifigkeit. Eine vergleichende Untersuchung spricht *gegen* eine Austauschbarkeit, falls sich eine Variation des Einflußparameters auf den Ergebnisparameter auswirkt. Die Werte werden dann als ungleich angenommen. Die ähnlichste, für oder gegen die Austauschbarkeit sprechende Untersuchung, wird angewandt. Im Falle einer Untersuchung, die gegen eine Austauschbarkeit der Werte spricht, kann diese gegebenenfalls später dazu genutzt werden, die Parameterwerte anzupassen (s. Abschnitt 3.2.4).

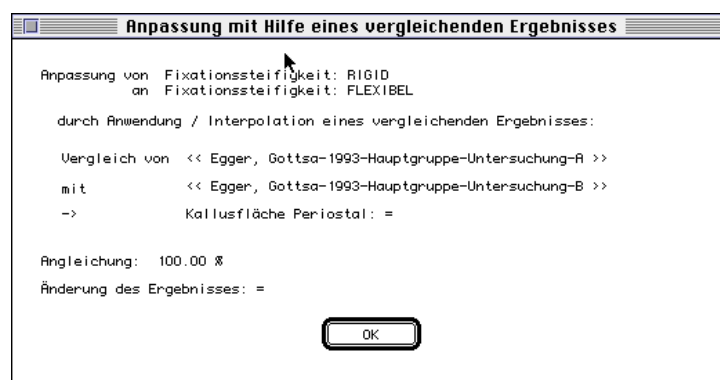


Abb. 11: Gleichheit aufgrund eines vergleichenden Ergebnisses

Außerdem unterscheidet man zwischen vergleichenden Ergebnissen, die für einen Parameterwertunterschied spezifisch oder unspezifisch sind. Vergleichende Ergebnisse, die exakt den gerade gegebenen Wertunterschied beschreiben, sind für diesen spezifisch. Der Begriff der Spezifität kann jedoch noch weiter gefaßt werden, was

an einem Beispiel verdeutlicht werden soll: Angenommen, man möchte das Ergebnis einer bestimmten Behandlung nach 28 Tagen wissen. Es wurde eine Studie gefunden, die ein Ergebnis nach 14 Tagen beschreibt. Weiterhin sei eine Studie gegeben, die den Verlauf der Torsionssteifigkeit von 7 bis 42 Tagen untersucht und dabei keine wesentliche Änderung dieses Parameters beschreibt. Dann ist aber auch zwischen 14 und 28 Tagen keine Änderung des Ergebnisses zu erwarten, und das vergleichende Ergebnis spricht spezifisch für eine Austauschbarkeit dieser beiden Werte. Spezifische vergleichende Ergebnisse haben immer Vorrang vor unspezifischen.

Wie schon oben erwähnt, wird bei der Suche nach möglichst ausdrucksstarken vergleichenden Ergebnissen auf den Ähnlichkeitsbegriff zurückgegriffen. Gegebenenfalls müssen wiederum Parameterwerte angeglichen werden und so weiter. Es liegt also eine rekursive Berechnung der Ähnlichkeit vor. Wieviele Stufen der Berechnung durchlaufen werden sollen, kann vom Benutzer festgelegt werden. Am Rekursionsende wird nur noch auf Identität von Parameterwerten überprüft.

Die obige Definition der Austauschbarkeit ermöglicht nicht nur eine kontextabhängige Abschätzung von Parameterwertunterschieden. Sie wird auch dazu genutzt, das Problem der "missing values" anzugehen, d.h. wenn Angaben zu einem Parameter fehlen. Unspezifische vergleichende Ergebnisse ermöglichen eine Abschätzung des grundsätzlichen Einflusses des betrachteten Parameters. Sie wird gleichzeitig als Maß für die Tolerierbarkeit von "missing values" interpretiert.

3.2.2 Ähnlichkeit zwischen vergleichenden Ergebnisse

Ist der Benutzer daran interessiert, den Einfluß einer bestimmten Parametervariation auf einen Ergebnisparameter zu ermitteln, so gilt es, zu einer vergleichenden Anfrage einen möglichst ähnlichen vergleichenden Fall zu finden. Möchte der Experte wissen, ob unter einer ganz bestimmten Heilungssituation eine Dynamisierung eine bessere Heilung bewirkt als keine, so sucht das System in der Fallbasis der vergleichenden Ergebnisse nach ähnlichen Fällen, die Situationen mit und ohne Dynamisierung vergleichen. Der Ähnlichkeitsbegriff für vergleichende Ergebnisse baut auf dem oben beschriebenen Begriff für absolute Ergebnisse auf. Vergleichende Ergebnisse sind Gegenüberstellungen zweier absoluter Versuchsgruppen, und Vergleiche zwischen vergleichenden Ergebnissen lassen sich damit auf den Vergleich ihrer Gruppen reduzieren: Nur wenn die Untersuchungsgruppen eines vergleichenden Falls zu denen eines anderen Falls ähnlich sind, kann man die Fälle insgesamt als ähnlich bezeichnen.

3.2.3 Brauchbarkeit von Fällen

Die zu einer Fragestellung ähnlichen Fälle sind nicht unbedingt als Grundlage für deren Beantwortung geeignet. Daher erfolgt in einem zweiten, komplizierteren Auswahlprozeß die Berechnung der Brauchbarkeit von Fällen. Hierzu wird für jeden Parameter durch eine Zahl zwischen 0 und 1 quantifiziert, wie gut die Parameterwerte der beiden Fälle passen, beziehungsweise angepaßt werden können. Dabei werden verschieden Stufen durchlaufen:

- Sind zwei Werte eines Parameters gleich, wird ihre Anpaßbarkeit (Adaptierbarkeit) mit 1 bewertet.
- Wurde die Austauschbarkeit der Werte durch ein vergleichendes Ergebnis hergeleitet, wird die Adaptierbarkeit durch die Aussagekraft des verwendeten Ergebnisses quantifiziert.
- Können die verschiedenen Parameterwerte durch eine Adaptionmethode angepaßt werden, ist die Adaptierbarkeit gleich der Sicherheit der Adaption. Die Adaptionmethoden werden weiter unten beschrieben.
- Sind zwei Werte metrisch skaliert und nicht anpassbar, wird ihre metrische Distanz ins Verhältnis zur speziesabhängigen Wertespanne des betrachteten Parameters gesetzt. Ist die Distanz gleich der Spanne, beträgt die Anpaßbarkeit 0. Mit geringer werdendem Abstand konvergiert die Anpaßbarkeit gegen ein vom Benutzer angegebenes Maximum, welches kleiner oder gleich 1 sein muß.
- Konnte bei unterschiedlichen Werten auch keine „metrische Anpassung“ durchgeführt werden, erhält die Anpaßbarkeit den Wert 0.
- Eine Sonderstellung bei der Adaptierbarkeit von Parameterwerten stellen „missing values“ dar. Per Default wird angenommen, daß der Wert eines Parameters, für den eine Angabe fehlt, gleich dem Vergleichswert ist. Der Benutzer kann jedoch angeben, daß die Adaptierbarkeit in diesem Fall nicht mit 1 sondern einem kleineren Wert quantifiziert wird. Stellt der Benutzer ein, daß „missing values“ als ungleich zu anderen Werten angesehen werden, ist die Adaptierbarkeit gleich 0. Wurde jedoch bei der Bestimmung der Ähnlichkeit ein vergleichendes Ergebnis gefunden, welches dokumentiert, daß bei einer Variation des betreffenden Einflußparameters das Ergebnis nicht verändert wird, nimmt die Adaptierbarkeit die Aussagekraft des vergleichenden Ergebnisses an.

Die Adaptierbarkeitswerte für die einzelnen Parameter werden in einem Mittelwert zusammengefaßt als die Brauchbarkeit eines Falls für die Beantwortung einer Fragestellung. Auch der Wert für die Brauchbarkeit bewegt sich damit in einem Zahlenbereich von 0 bis 1 und muß ein vom Benutzer vorgegebenes Minimum erreichen, damit der Fall als ein Kandidat für die Beantwortung der Fragestellung herangezogen wird.

3.2.3.1 Anpassungsmechanismen

Um unterschiedliche Parameterwerte anzupassen, werden verschiedene Adaptionenmechanismen verwendet, deren Anwendbarkeit in einem ersten Schritt geprüft wird. Die Aussagekraft der sich gegebenenfalls ergebenden Adaptionenregeln geht in die Berechnung der oben genannten Brauchbarkeit ein. In einem späteren Schritt werden dann die Adaptionenregeln tatsächlich angewendet und miteinander kombiniert, um zu einem Anpassungsergebnis zu gelangen.

Das Prinzip der *exakten Adaptierung* besteht darin, in der Fallbasis der vergleichenden Experimente nach Fällen zu suchen, welche exakt den gegebenen Unterschied zweier Parameterwerte beschreiben. In Abb. 12 soll beispielsweise die rigide Fixationssteifigkeit an die flexible angepaßt werden. Hierzu wurde ein vergleichendes Ergebnis gefunden, welches exakt diese Werte variiert und eine damit involvierte Änderung des Ergebnisses beschreibt. Diese Änderungsfunktion wird als Anpassungsfunktion verwendet.

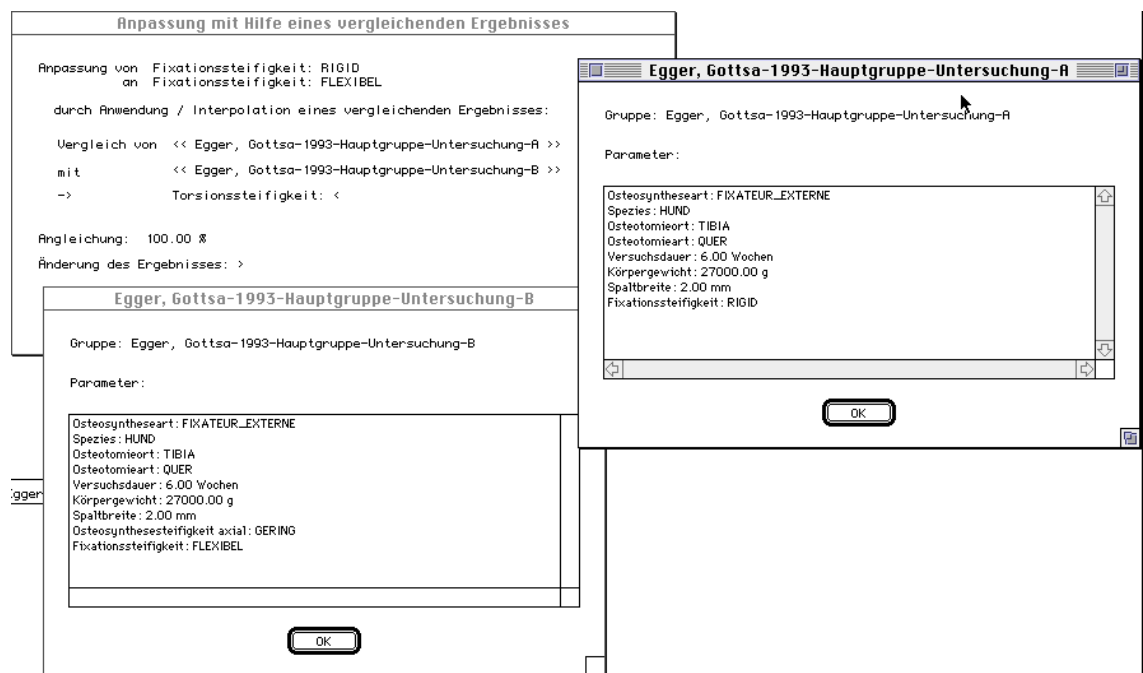


Abb. 12: Exakte Adaptierung

Bei der *Interpolation zwischen absoluten Ergebnissen* wird zur anzupassenden Untersuchungsgruppe eine weitere Gruppe hinzugezogen, so daß zwischen deren Parameterwert und dem anzupassenden Wert interpoliert werden kann. Die hinzugezogene Gruppe muß aber bezüglich aller anderen Versuchsparameter an die Gruppe angeglichen werden, an welche angepaßt werden soll. Sollen mehrere metrische Parameter angeglichen werden, wird geprüft, ob dies gemeinsam durch eine modifizierte Shepard-Interpolation (Shepard, 1968) geschehen kann. Die Modifikation besteht in der Verwendung von relativen statt absoluten Abständen zwischen Vektoren, womit der unterschiedlichen Wertebereichsspanne verschiedener Einflußparameter Rechnung getragen wird. In Abb. 13 wird beispielsweise gemeinsam über die Parameter Interfragmentäre Bewegung und die Axiale Osteosynthesesteifigkeit interpoliert. Der gefragte Vektor (0.4 mm, 600 N/mm) liegt dabei zwischen den in den beiden Literaturstellen gegebenen Vektoren (0.5 mm, 500 N/mm) und (0.35 mm, 700 N/mm). Das Ergebnis wird dementsprechend angepaßt.

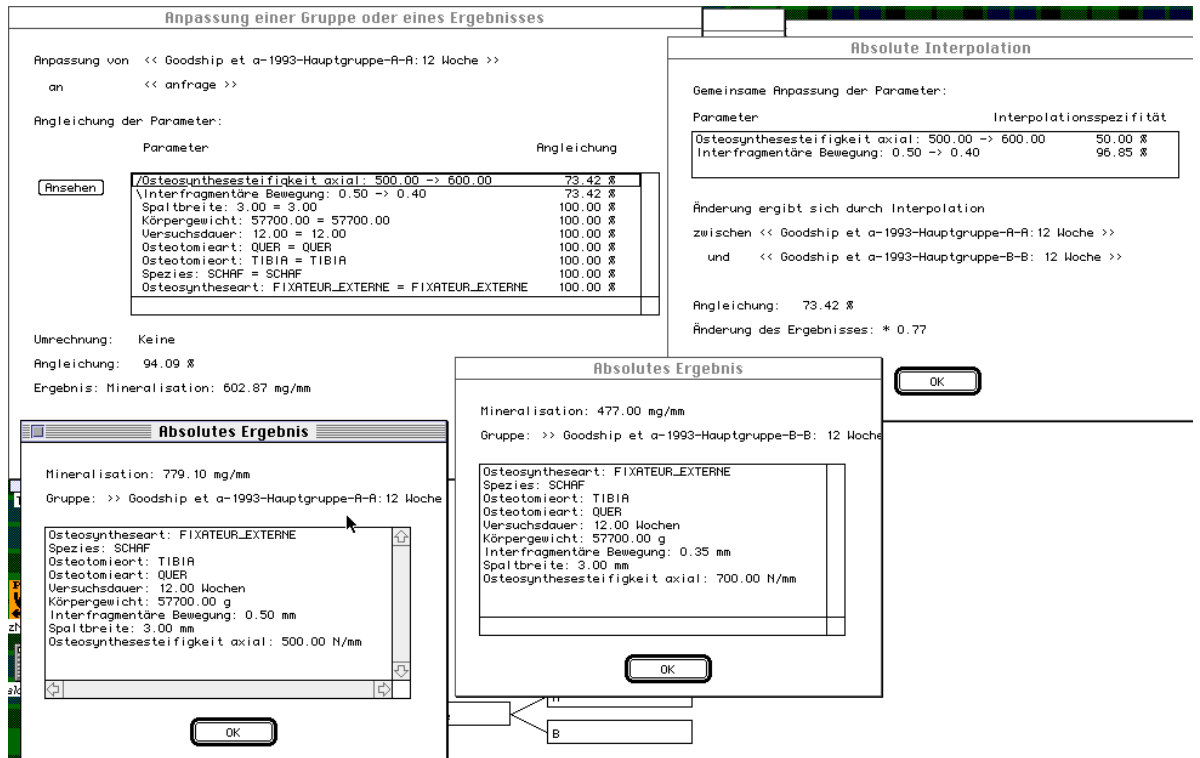


Abb. 13: Mehrparametrische Interpolation

Auch vergleichende Ergebnisse können zu einer Interpolation herangezogen werden. Voraussetzung ist, daß die Parameterwerte des vergleichenden Ergebnisses das zu überbrückende metrische Intervall umfassen. Entsprechend dem Verhältnis des Intervalls zur Spanne der variierten Werte wird die Änderungsfunktion des vergleichenden Ergebnisses „relativiert“. In Abb. 14 wird ein vergleichendes Ergebnis, welches zwischen einer interfragmentären Bewegung von 0.0 und 0.25 mm variiert, zur Interpolation herangezogen. Dazu wird der Änderungsfaktor von 1.5 auf das Intervall für die interfragmentären Bewegung zwischen 0.0 und 0.1 mm relativiert.

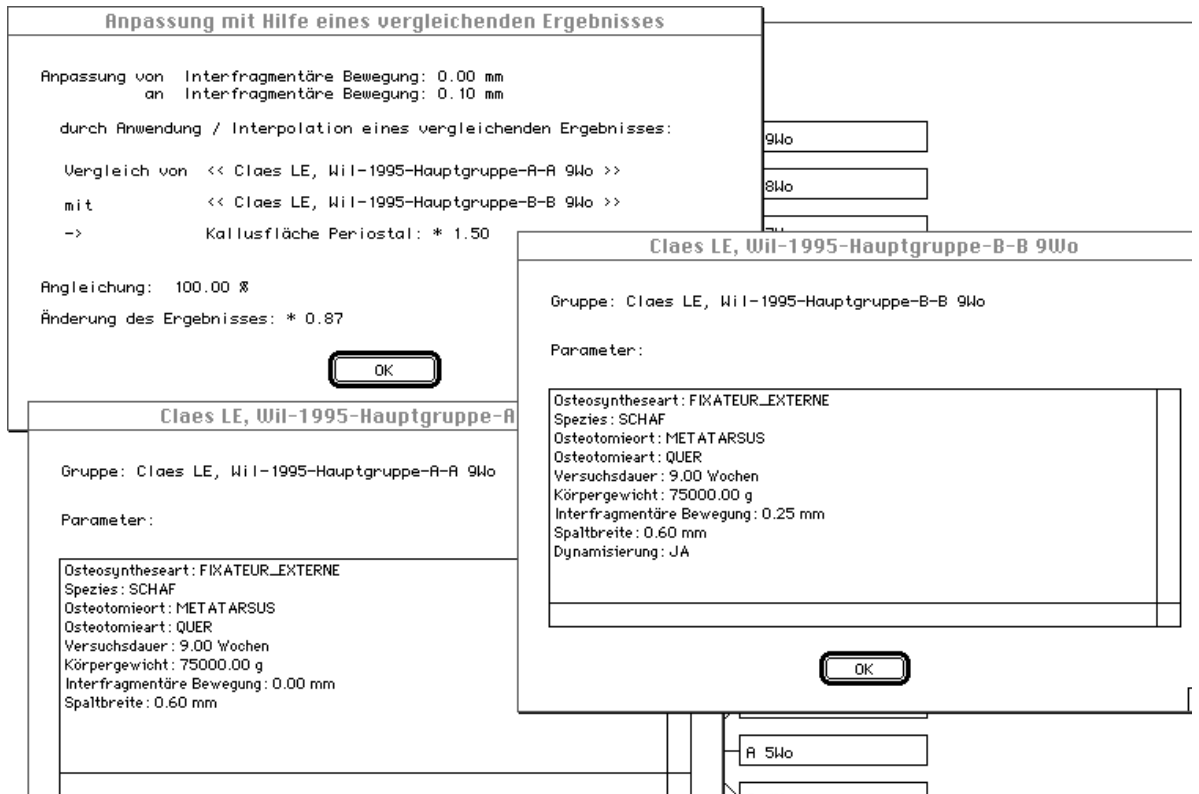


Abb. 14: Interpolation mit Hilfe eines vergleichenden Ergebnisses

Eine andere Möglichkeit der Parameteranpassung ist die *Mittelwertbildung*. Soll ein Wert w_1 eines Parameters an einen Wert w_2 angepaßt werden, so werden Ergebnisse mit zugehörigen Untersuchungsgruppen gesammelt, die w_1 beziehungsweise w_2 behandeln.

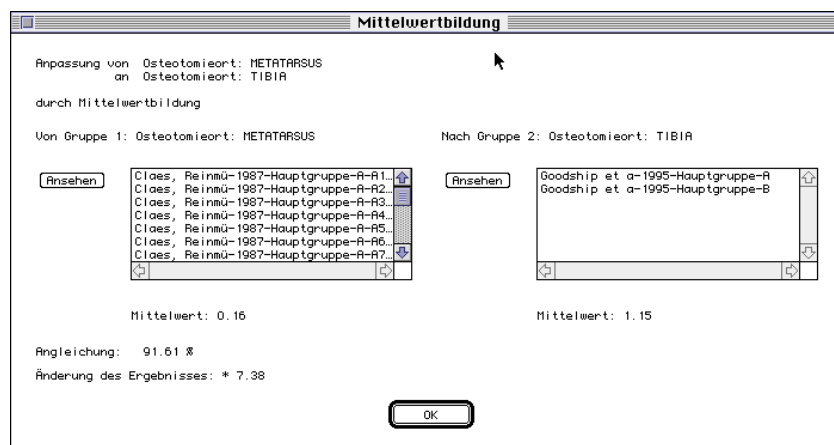


Abb. 15: Anpassung durch Mittelwertbildung

Hierdurch ergeben sich zwei Mengen von Ergebnissen. In jeder wird der Mittelwert der Ergebnisse bestimmt, und das Verhältnis der Mittelwerte bestimmt schließlich den Umrechnungsfaktor. Die zur Mittelwertbildung herangezogenen Gruppen müs-

sen an die Gruppe, die w_1 beziehungsweise w_2 behandelt, angeglichen werden, d.h. die einzelnen Untersuchungen werden mit ihrer Ähnlichkeit gewichtet. Abb. 15 zeigt ein Beispiel einer derartigen Mittelwertbildung. Es kommt vor, daß Untersuchungsgruppen zwar sehr gut auf eine Fragestellung passen, jedoch nicht den gefragten Ergebnisparameter behandeln. In diesem Fall ist es möglich, den behandelten anderen Ergebnisparameter auf den gesuchten Parameter *umzurechnen*. Hierzu wird zu dem Fall, der umgerechnet werden soll, ein möglichst ähnlicher Fall gesucht, welcher den gesuchten Parameter behandelt. Sind die Ergebnisse metrisch skaliert, wird über ihr Verhältnis ihr Umrechnungsfaktor bestimmt und als Anpassungsregel gespeichert.

Die vom System verwendeten Interpolationsverfahren sind linear. Um Interpolationsfehler gering zu halten, werden Interpolationen mit der Spannweite der Interpolation gewichtet. Je näher die Stützwerte an den gefragten Werten liegen, als desto sicherer gilt die Interpolation. Wie bei den Toleranzbereichen wird wiederum der speziesabhängige Wertebereich als Bezugspunkt verwendet.

Bei den verschiedenen Anpassungsverfahren spielt die Ähnlichkeit der darin involvierten Ergebnisse zu denen, an die eine Anpassung durchgeführt werden soll, eine entscheidende Rolle. Sie kann als **Grad der Sicherheit** interpretiert werden, in der eine Anpassung erfolgt (Richter & Wess, 1991). Dadurch wird gewährleistet, daß auch die Adaptierbarkeit einzelner Parameter kontextsensitiv abgeschätzt wird und die Adaptionsverfahren kontextsensitiv und damit möglichst spezifisch arbeiten.

3.2.4 Anpassung

Ergebnisse, deren Brauchbarkeit ein vom Benutzer definiertes Minimum erreichen, werden für den Adaptionsprozeß zugelassen und angepaßt. Sollen mehrere Parameter angepaßt werden, so müssen die einzelnen Anpassungsschritte kombiniert werden. Wertänderungen können als Faktoren, Differenzen oder qualitative Änderungen beschrieben werden. Qualitative Änderungen sind die Funktionen "wird größer" und "wird kleiner". Werden Funktionen mit unterschiedlichen Skalenniveaus kombiniert, dominiert das niedrigere Skalenniveau das höhere. Vergleichende Ergebnisse werden komponentenweise (im Sinne der verglichenen Untersuchungsgruppen) angepaßt. Da ein vergleichendes Ergebnis selbst schon eine Wertänderung beschreibt, muß diese Funktion mit den Wertänderungen der Komponentenanpassungen verknüpft werden, um schließlich die Gesamtänderung als Ergebnis zu erhalten. Das Ergebnis des fallbasierten Schließens präsentiert sich als Liste von Abschätzungen. Sie basieren auf der Identifikation der für die Fragestellung identifizierten brauchbaren Fälle und deren Anpassung an die konkrete Fragestellung. Die Brauchbarkeit des Ergebnisses wird als Maß gewertet, mit welcher Sicherheit der vorhergesagte Ergebniswert zu erwarten ist (Abb. 10).

3.3 Erklärungskomponente

Nach Miller und Maserie (1990) steht und fällt die Akzeptanz jedes medizinischen wissensbasierten Systems mit seiner Erklärungskomponente. OASES soll ein Experimentieren mit Wissen unterstützen, was nur möglich ist, wenn Schlüsse und Er-

gebnisse dem Anwender auf Wunsch nachvollziehbar gemacht werden. Dies ist die Aufgabe des *Erklärungsmoduls* von OASES. Über die in den vorherigen Abschnitten gezeigten Dialoge kann sich der Benutzer durch die einzelnen Facetten der Anpassung und Benutzung eines gefundenen Falls durchnavigieren. Es ist dabei möglich, mehrere Dialoge einer Erklärungshierarchie darzustellen. Beispielsweise können die einzelnen Erklärungen für die Parameteranpassungen gleichzeitig angezeigt werden, so daß eine Gesamtanpassung des Ergebnisses nachvollziehbar wird. Auch Vergleiche einzelner, in den Berechnungsprozeß involvierter Ergebnisse lassen sich damit durchführen.

3.4 Hypothesen

Hypothesen treten in OASES in zweierlei Form auf. Vom Benutzer eingegebene Hypothesen stellen Ergebnisse dar, die wie vergleichende Ergebnisse eingegeben und benutzt werden, aber allgemeingültigen Charakter besitzen. Ein Beispiel ist der allgemeine Einfluß der Fixationssteifigkeit auf die Kallusfläche bei der Heilung von Frakturen (Molster et al., 1982; Abb. 16).

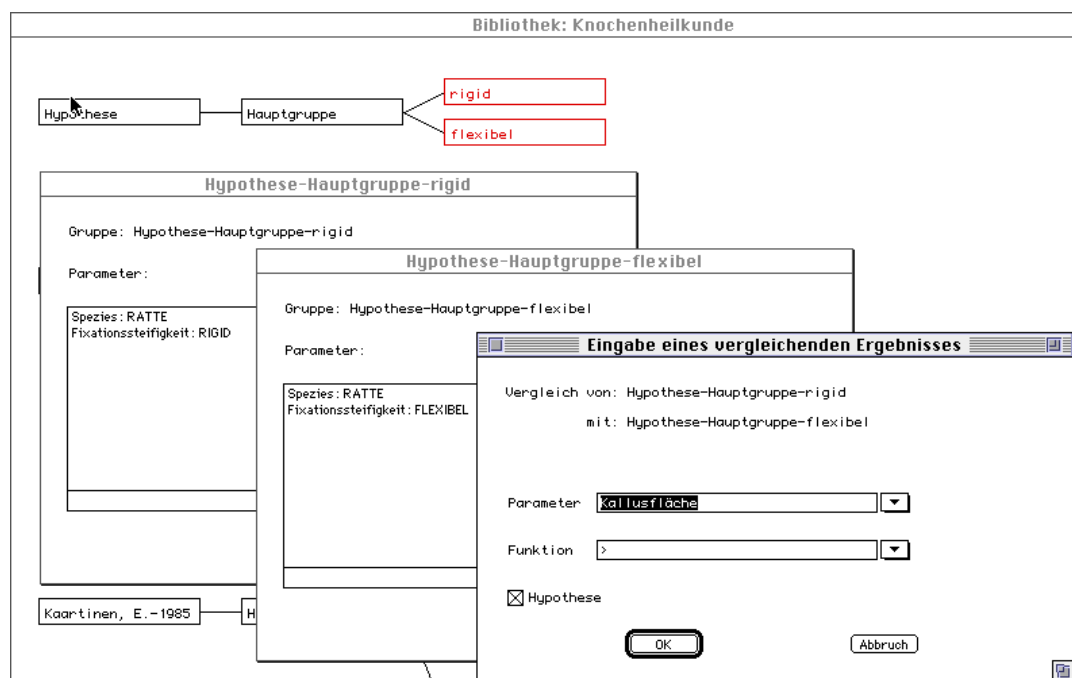


Abb. 16: Allgemeine Hypothese über den Einfluß der Fixationssteifigkeit auf die Kallusfläche

Die zweite Art von Hypothesen wird vom System fallbasiert abgeleitet, um zur Adaption genutzt zu werden. So wird bei der *Interpolation zwischen absoluten Komponenten* ein vergleichendes Ergebnis generiert, welches die zu erwartende Wertänderung des Ergebnisparameters, gegeben die Variation der Einflußparameter, exakt beschreibt und daher anschließend zur *exakten Adaptierung* genutzt werden kann. Ausgangspunkt ist ein vergleichendes Ergebnis, welches den gegebenen Parameter-

unterschied "umschreibt" und zu den zu adaptierenden Fällen möglichst ähnlich ist (vgl. Abschnitt 3.2.3.1).

3.5 Metaregeln

Die Auswertung der Fallbasis wird durch *Metaregeln* gesteuert, die vom Benutzer eingegeben werden können bzw. durch ihn überprüfbar sind. Sie kontrollieren den Schlußfolgerungsprozess und sind über Systemparameter vom Benutzer einstellbar. Diese werden in Abb. 17 dargestellt und sollen im folgenden aufgezählt und beschrieben werden.

Einstellungen	
Minimale Angleichung	Maximale Rekurston
- allgemein: <input type="text" value="80.00"/> %	- allgemein: <input type="text" value="2"/>
- bei Interpolation: <input type="text" value="80.00"/> %	- bei Verwendung vgl. Ergebnisse: <input type="text" value="1"/>
- bei Mittelwertbildung: <input type="text" value="80.00"/> %	
<input checked="" type="checkbox"/> Spezialisierung	Minimale Int.-Spezifität: <input type="text" value="50.00"/> %
<input checked="" type="checkbox"/> Allgemeine Anfrage	Bewertung von 'k.A.': <input type="text" value="90.00"/> %
<input checked="" type="checkbox"/> Umrechnung	Minimum verw. Ergebnisse bei Mittelwertbildung: <input type="text" value="2"/>
	Höchstens ungleich: <input type="text" value="2"/>
<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Abbruch"/>
<input type="button" value="Default"/>	<input type="button" value="Hilfe"/>

Abb. 17: Einstellungen von OASES

3.5.1 Minimale Angleichung

Um eine Fragestellung zu beantworten, werden Ergebnisse aus Literaturstellen herangezogen. Deren Untersuchungsgruppen müssen an die Parameter der Fragestellung angeglichen werden. Außerdem verwendet OASES bei der Angleichung einzelner Parameterwerte weitere absolute oder vergleichende Ergebnisse. Auch diese müssen gegebenenfalls an die Untersuchungsgruppen angepaßt werden, an denen die Parameterangleichung durchgeführt wird. Der Angleichungsprozeß wird von OASES durch eine Zahl zwischen 0 % und 100 % bewertet. Diese Zahl darf ein vom Benutzer vorgegebenes Minimum nicht unterschreiten, ansonsten wird das anzugleichende Ergebnis nicht verwendet. Für verschiedene Aspekte der Angleichung, die im folgenden aufgeführt werden, können unterschiedliche minimale Werte angegeben werden.

3.5.1.1 Minimale Angleichung allgemein

Hier wird die minimale Angleichung für Ergebnisse zur Beantwortung der Fragestellung und für vergleichende Ergebnisse zur Anpassung von Parameterwerten angegeben.

3.5.1.2 Minimale Angleichung bei Interpolation

Bei einer Interpolation zwischen absoluten Ergebnissen muß das zusätzliche absolute Ergebnis, welches für die Interpolation herangezogen wird, möglichst gut zu der Gruppe passen, an die angeglichen werden soll. Die *minimale Angleichung bei Interpolation* gibt das Minimum für diesen Angleichungsprozeß vor. Wird dieses Minimum unterschritten, wird ein anderes absolutes Ergebnis herangezogen, oder gegebenenfalls der Interpolationsprozess abgebrochen.

3.5.1.3 Minimale Angleichung bei Mittelwertbildung

Die zur Mittelwertbildung herangezogenen Untersuchungsgruppen müssen an die beiden Gruppen mit den anzupassenden Parametern angeglichen werden. Die *minimale Angleichung bei Mittelwertbildung* definiert ein Minimum für diesen Angleichungsprozeß. Unterschreitet ein absolutes Ergebnis dieses Minimum, wird es für die Mittelwertbildung nicht verwendet.

3.5.2 Maximale Rekursion

Angleichungsprozesse können über mehrere Stufen verlaufen. Ein Ergebnis soll an die Fragestellung angepaßt werden, hierbei muß ein Parameter angeglichen werden, wofür ein vergleichendes Ergebnis benutzt wird. Dessen Untersuchungsgruppen müssen an die Fragestellung und die anzupassende Gruppe angeglichen werden und so weiter. Am Ende der Rekursion werden Parameterwerte ohne Zuhilfenahme von weiteren Ergebnissen der Literatur auf einfache Identität miteinander verglichen. Die *maximale Rekursion* gibt an, nach wieviel Stufen dieses Rekursionsende erreicht ist.

3.5.2.1 Maximale Rekursion allgemein

Hier wird das Ende der Rekursion angegeben, welche sich durch eine Angleichung eines Ergebnisses an die Fragestellung, durch Angleichung bei Interpolation oder bei Mittelwertbildung ergibt.

3.5.2.2 Maximale Rekursion bei Verwendung vergleichender Ergebnisse

Hier wird das Ende der Rekursion angegeben, welche sich durch Verwendung von vergleichenden Ergebnissen bei der Anpassung von Parameterwerten ergibt. Dieser Wert wird im allgemeinen kleiner zu setzen sein, als der Wert, der die maximale Rekursion allgemein determiniert.

3.5.3 Spezialisierung

Wenn Untersuchungen zur Beantwortung einer Fragestellung herangezogen werden, kann es vorkommen, daß die Fragestellung Parameter spezifiziert, welche in der Untersuchung nicht angegeben sind. Wird die Einstellung *Spezialisierung* gewählt, so wird angenommen, daß in der Untersuchung der fehlende Parameter den gleichen Wert annimmt wie in der Fragestellung angegeben.

3.5.4 Allgemeine Anfrage

Wenn Untersuchungen zur Beantwortung einer Fragestellung herangezogen werden, kann es vorkommen, daß in der Untersuchung Parameter spezifiziert werden, welche in der Fragestellung nicht angegeben sind. Wird die Einstellung *Allgemeine Anfrage* gewählt, so wird angenommen, daß in der Fragestellung der fehlende Parameter den gleichen Wert annimmt wie in der Untersuchung angegeben.

3.5.5 Umrechnung

Fragestellungen beziehen sich auf einen bestimmten Ergebnisparameter. Mit dieser Einstellung wird angegeben, ob auch Ergebnisse, die andere Ergebnisparameter behandeln, zur Beantwortung der Fragestellung herangezogen werden. Sie werden hierzu auf den gefragten Parameter umgerechnet. Durch ein Setzen dieses Parameters werden auch alle Untersuchungsgruppen betrachtet, die andere Ergebnisparameter behandeln, die Antwortzeiten erhöhen sich entsprechend.

3.5.6 Minimale Interpolationsspezifität

Interpolationen werden ungenauer, je größer der Abstand zwischen den Werten ist, welche für die Interpolation herangezogen werden. Eine einfache Abschätzung für mögliche Interpolationsfehler ist daher das Verhältnis des Abstandes zwischen den Interpolationspartnern zum Gesamtwertebereich des betrachteten Parameters.

Zur Beantwortung einer Fragestellung wird unter anderem die Interpolation als Anpassungsmethode herangezogen. Hierbei läßt sich unter Verwendung des oben genannten Verhältnisses die Fehleranfälligkeit des Anpassungsvorgangs quantifizieren, indem die Interpolationsspezifität IS gebildet wird. Seien hierbei x_L und x_R die Interpolationsgrenzen, x_{MIN} und x_{MAX} die Wertebereichsgrenzen eines Parameters P . Es gelte dann:

$$IS = 1 - \frac{x_R - x_L}{x_{MAX} - x_{MIN}}$$

Entsprechend obiger Formel nimmt IS Werte von 0.0 bis 1.0 an und ist ein Brauchbarkeitsmaß für eine gegebene Interpolation. Bei $x_L = x_{MIN}$ und $x_R = x_{MAX}$ ergibt sich $IS = 0$ und geht als solche in die Berechnung der Adaptierbarkeit ein. Damit auch solche Interpolationen über dem gesamten Wertebereich als brauchbar ($IS > 0$) quantifiziert werden, kann man eine *minimale Interpolationsspezifität* IS_{MIN} festlegen, so daß sich IS im Bereich $[IS_{MIN}; 1.0]$ bewegt. Die Umrechnung von IS auf die neue Skalierung erfolgt dabei folgendermaßen:

$$IS' = IS_{MIN} + IS \cdot (1 - IS_{MIN})$$

Als Beispiel werde zwischen verschiedenen Werten der Stimulationsamplitude interpoliert. Der Wertebereich dieses Parameters sei das Intervall $[0.0; 2.4]$. Wird nun zwischen 0.0 und 2.4 interpoliert, so geht bei $IS_{MIN} = 0.5$ der Wert der *Interpolationsspezifität* mit 0.5 in die Berechnung der Brauchbarkeit des Anpassungsprozesses ein.

3.5.7 Bewertung von 'k. A.'

Diese Einstellung betrifft die Behandlung von „missing values“. Per Default wird angenommen, daß fehlende Werte gleich den Vergleichswerten sind. Soll eine derartige Anpassung jedoch nicht mit 100% bewertet werden, kann dies hier durch einen kleineren Wert angegeben werden. In der Evaluierung hat sich ein Wert von 90 % bewährt.

3.5.8 Minimum verwendeter Ergebnisse bei Mittelwertbildung

Soll Mittelwertbildung bei einer Parameteranpassung (siehe hierzu das Kapitel über Anpassungsmechanismen) durchgeführt werden, müssen beide Mengen mindestens eine minimale Anzahl an Untersuchungen enthalten. Diese Zahl ist abhängig von der Größe und Homogenität der Fallbasis, so führt ein Wert größer als 5 dazu, daß die Mittelwertbildung als Adaptionmethode in der vorliegenden Fallbasis kaum noch angewendet wird. Ein Wert von 1 führt andererseits zu einer drastischen Verschlechterung der von OASES erzielten Ergebnisse. Aber schon auf der Basis von 2 Untersuchungen werden erstaunlich valide Ergebnisse erzielt.

3.5.9 Höchstens ungleich

Wird eine Untersuchungsgruppe an die Fragestellung oder eine andere Gruppe angeglichen, so sollten höchstens eine vorgegebene Anzahl von Parametern angepaßt werden müssen, da ansonsten das Ergebnis durch die Vielzahl von Anpassungen zu sehr verfälscht wird. Müssen mehr Parameter angepaßt werden, wird das Ergebnis nicht zur Beantwortung der Fragestellung verwendet.

4 Evaluierung

Aus der Literatur konnten letztendlich etwa 650 Fälle extrahiert und mit Hilfe der Systemkomponente OAKES akquiriert werden. Die so entstandene Bibliothek diente bei der Evaluierung von OASES als Fallbasis. Abb. 17 zeigt die Systemeinstellung, die während der Evaluierung genutzt wurde.

Für die Versuchsparameter Spaltbreite, interfragmentäre Bewegung und Versuchsdauer wurde der Toleranzbereich auf 0.1% verkleinert. Bei den übrigen Parametern wurde der Defaultwert 2% verwendet. Auch für die maximale metrische Angleichung wurde für sämtliche Versuchsparameter die Defaulteinstellung beibehalten.

Aus der Fallbasis wurden willkürlich Literaturstellen ausgewählt, und die darin beschriebenen Fälle als Testmenge verwendet. Im ersten Schritt wird jeweils eine Literaturstelle aus der Fallbasis gelöscht, daraufhin werden die darin beschriebenen Fälle OASES als Anfrage präsentiert. Auf diese Weise wurden von dem System mehr als 90 Anfragen zu den in der Fallbasis am häufigsten dokumentierten Ergebnisparametern bearbeitet. Die Resultate werden im folgenden genauer dargestellt und erläutert.

4.1 Anfragereihe zur Literaturstelle „L.Claes, J.Reinmüller, und L. Dürselen, 1987“

Als Vorlage für die an dieser Stelle beschriebenen Anfragen diente die in (Claes L., Reinmüller J., Dürselen L., 1987) dokumentierte Untersuchung. Claes, Reinmüller und Dürselen hatten in ihrem Experiment die Auswirkung der Größe der Spaltbreite in Kombination mit verschiedenen interfragmentären Bewegungen auf das Heilungsergebnis analysiert. Im einzelnen wurden fünf verschiedene Kombinationen von Spaltbreite und interfragmentärer Bewegung untersucht:

Untersuchungsgruppe	Spaltbreite	Interfragmentäre Bewegung
A	2.0 mm	0.28 mm
B	1.0 mm	0.49 mm
C	0.5 mm	0.20 mm
D	0.2 mm	0.15 mm
F	1.5 mm	0.57 mm

Die Heilung wurde anhand der Veränderung der interfragmentären Bewegung während der Versuchsdauer gemessen. Nur für eine der Untersuchungsgruppen liegen Ergebnisse für die gesamte Versuchsdauer (8 Wochen) vor. Die Messungen für die anderen Gruppen wurden teilweise schon nach 4, 6 oder 7 Wochen eingestellt. Die

Heilungssituationen der einzelnen Untersuchungsgruppen wurden OASES als Anfrage präsentiert. Die nachfolgende Abbildung zeigt sowohl die tatsächlich gemessenen Ergebnisse, als auch den von OASES berechneten Verlauf. Meistens, außer für die Anfragen zu B und F, lieferte OASES mehr als ein Ergebnis.

Die interfragmentäre Bewegung wird in der Anfangsphase einer Untersuchung fast vollständig durch die zu Beginn eingesetzte Bewegung bestimmt. Zur Berechnung der einzelnen Ergebnisse müssen hier zum Teil von den Versuchsgruppen stark abweichende Versuchsparameter angepaßt werden. Während die Ergebnisse für die Untersuchungsgruppe A, mit einer Spaltbreite von 2 mm, den Erwartungen entsprechen (Abb. 18), zeigen die Berechnungen für B und F größere Schwankungen. Der Grund hierfür ist in der derzeitigen Fallbasis zu suchen, in der nur eine sehr geringe Anzahl von Untersuchungen gespeichert sind, die einen ähnlichen Versuchsaufbau oder zumindest die Heilung anhand dem Verlauf der interfragmentären Bewegung untersuchen, so daß momentan eine Anpassung für mehrere stark abweichende Parameter nicht vorgenommen werden kann.

Die y-Achsen der Abbildungen geben die Wertebereiche der Ergebnisparameter wieder, so wie sie in der aktuellen Fallbasis gespeichert sind.

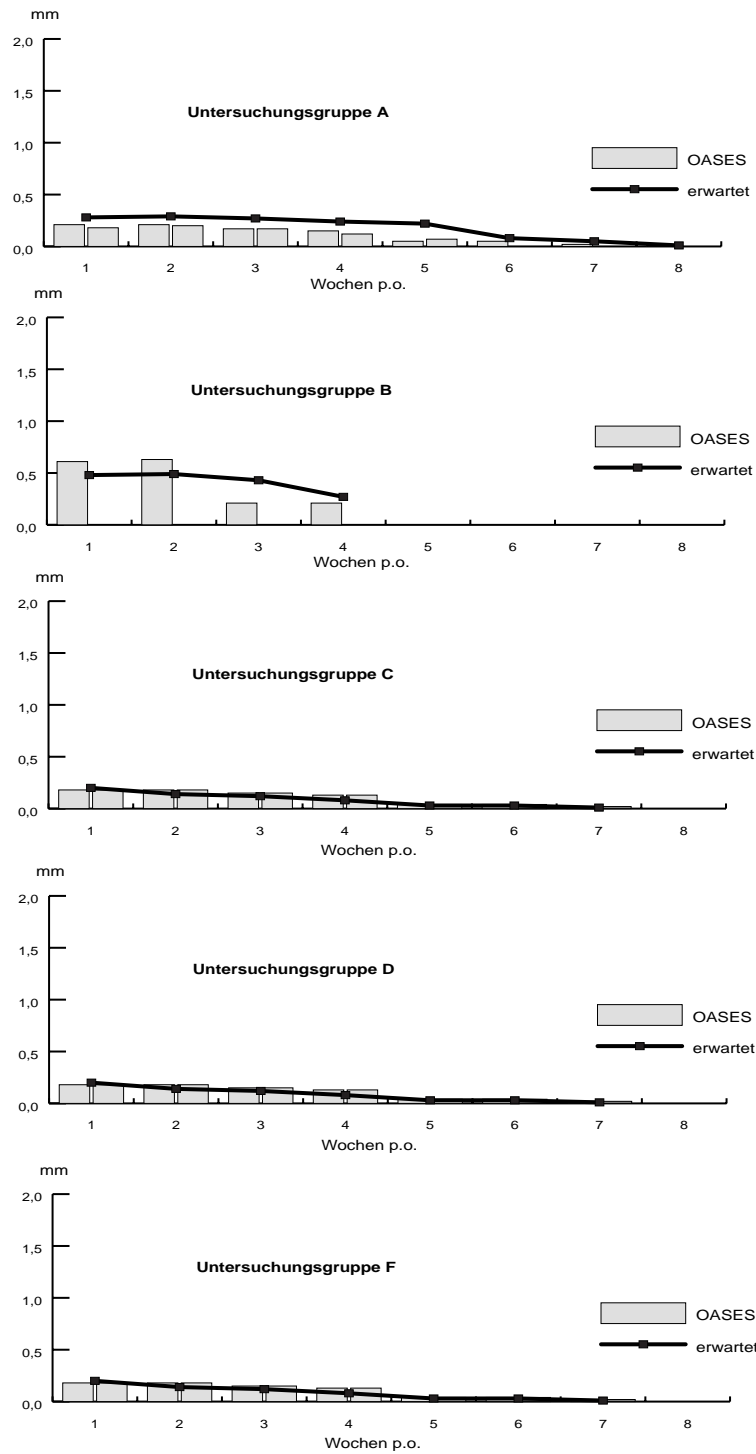


Abb. 18: Verlauf der interfragmentären Bewegung für die einzelnen Untersuchungsgruppen.

4.2 Anfragereihe zur Literaturstelle

„L.Claes, H.-J.Wilke, S. Rübenacker und H. Kiefer, 1989“

In der Untersuchung von L.Claes und H.-J.Wilke von 1989 (Claes L., Wilke H.-J., Rübenacker S., Kiefer H., 1989) wurde die Auswirkung der anfangs erlaubten interfragmentären Bewegung auf die Heilung beobachtet. Zu diesem Zweck wurde in einer Versuchsanordnung keine interfragmentäre Bewegung (Untersuchungsgruppe A), in der anderen eine interfragmentäre Bewegung von 0.25 mm (Untersuchungsgruppe B) eingesetzt. Auch hier diente als Maß für die Heilung die Veränderung der interfragmentären Bewegung während des Versuchszeitraums. Abb. 19 und Abb. 20 zeigen die vorhergesagten Ergebnisse im Vergleich zu den tatsächlich beobachteten für beide Untersuchungsgruppen.

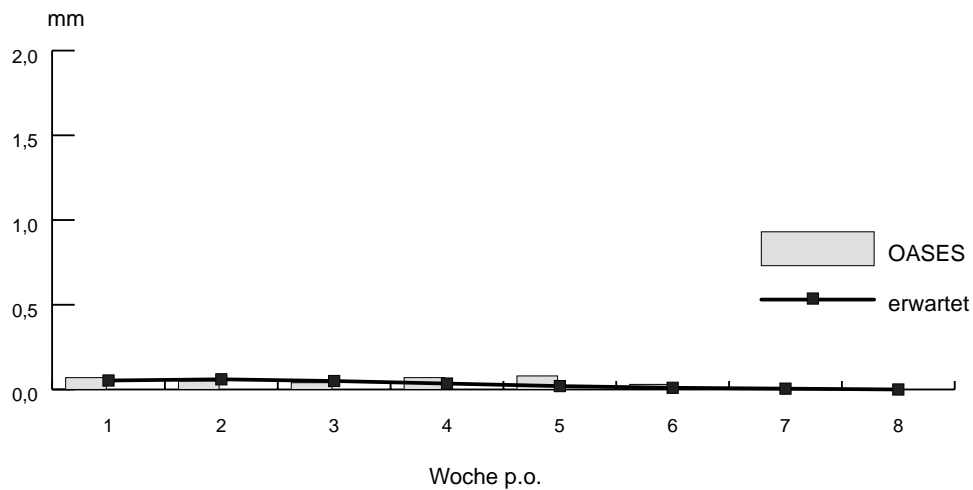


Abb. 19: Verlauf der interfragmentären Bewegung für die Untersuchungsgruppe A.

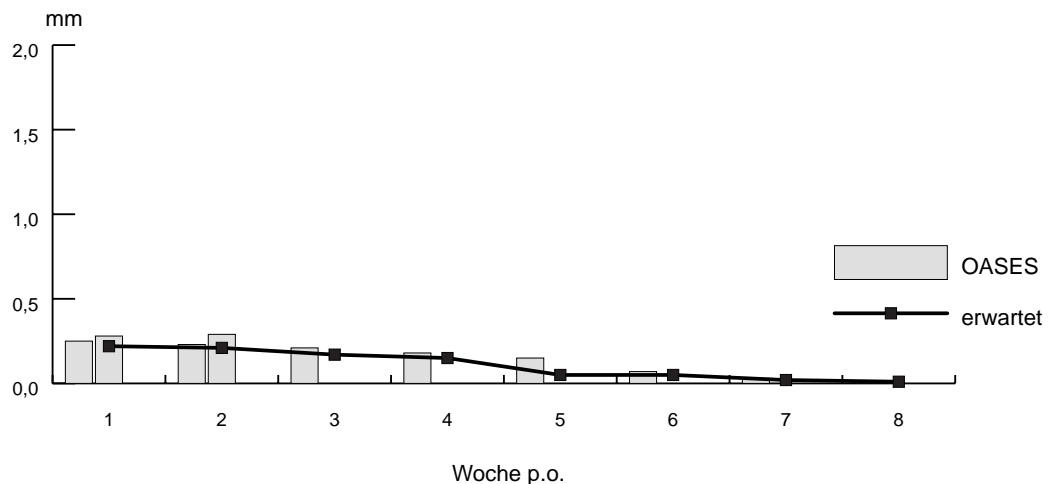


Abb. 20: Verlauf der interfragmentären Bewegung für die Untersuchungsgruppe B.

Auch bei diesem Anfragen, wie bei den Anfragen des vorherigen Abschnitts, ist erkennbar, daß OASES die zeitliche Veränderungen in diesem Fall der interfragmentären Bewegung für unterschiedliche Versuchsanordnungen nachzeichnet.

4.3 Anfragen zur Literaturstelle „Kenwright und Goodship, 1989“

OASES wurden hier die Fragestellungen aus der Untersuchung von Kenwright und Goodship aus dem Jahre 1989 (Kenwright J. & Goodship A.E., 1989) als Anfragen präsentiert. Kenwright und Goodship untersuchten in ihrer Arbeit unter anderem, inwieweit der Zeitpunkt, zu dem mit der Stimulation begonnen wird, und die Verschiebung die Heilung beeinflussen. Zwei verschiedene Versuchsaufbauten wurden untersucht. Bei der Untersuchungsgruppe F wurde vom ersten Tag an mit einer Verschiebungsrate von 400 mm/sec, bei Untersuchungsgruppe G dagegen erst in der 6ten Woche mit einer Verschiebung von 2 mm/sec stimuliert. Der Einfluß auf die Heilung wurde durch den Grad der Mineralisation des Knochens gemessen.

In der Fallbasis ist weder eine Literaturstelle vorhanden, welche die Auswirkungen der Spaltbreite, noch die der Verschiebungsrate auf die Mineralisation untersucht. Es werden unter anderem auch Untersuchungen angepaßt, die den Einfluß anderer Versuchsparameter auf die Mineralisation analysieren. In der Fragestellung liegen keine expliziten Angaben für diese Parameter vor, demzufolge kann das System auch keine Anpassung für diese Parameter vornehmen. OASES berechnet so für verschiedene angepaßte Untersuchungen die gleiche Sicherheit bzw. Anpassungsrate, obwohl deren Versuchsanordnung und damit auch das Ergebnis, je nach eingesetzten Versuchsparametern, mehr oder weniger von der tatsächlich präsentierten Fragestellung und so dem erwarteten Wert abweichen. Bei der in Abb. 21 dargestellten Testreihe, werden Untersuchungen für die Anpassung herangezogen, die weder Angaben über den Grad der Verschiebung noch über den Beginn der Stimulation, sondern über die eingesetzte Axiallast haben.

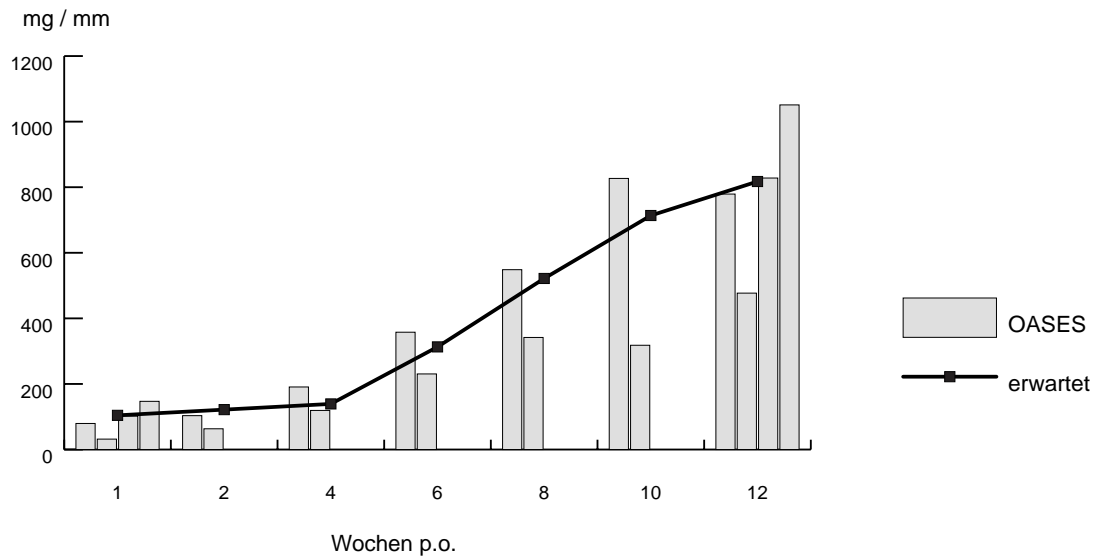


Abb. 21: Mineralisation für die Fragestellung der Untersuchungsgruppe F

Analog hierzu kommt es auch bei den Anfragen zur Untersuchungsgruppe F (Abb. 22) zu unterschiedlichen, zum Teil abweichenden Ergebnissen. Allerdings werden hier Untersuchungen angepaßt, welche eine andere Fixationssteifigkeit, andere Spaltbreiten, oder/und keine Stimulation untersuchen.

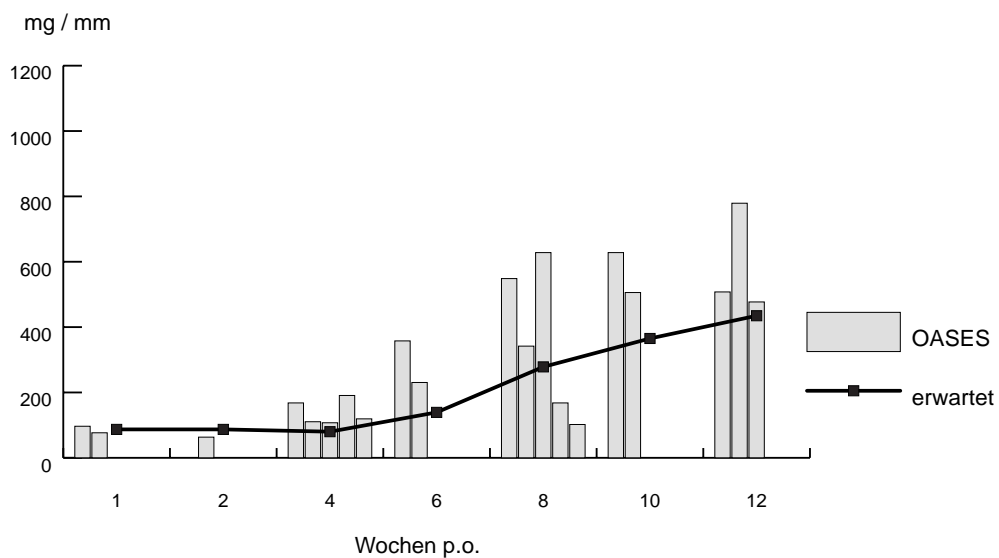


Abb. 22: Mineralisation für die Fragestellung der Untersuchungsgruppe G

4.4 Anfragen zur Literaturstelle „Goodship et al., 1993“

In der Arbeit von Goodship et al., 1993 wird untersucht, inwieweit die interfragmentäre Bewegung bzw. die eingesetzte Axiale Osteosynthesesteifigkeit den Knochenmineralgehalt beeinflussen. Für die erste Untersuchungsgruppe (Gruppe A)

wurde eine interfragmentäre Bewegung von 0.5 mm (Osteosynthesesteifigkeit: 500 N/mm), für die zweite (Gruppe B) eine Bewegung von 0.35 mm (Osteosynthesesteifigkeit: 700 N/mm) gewählt.

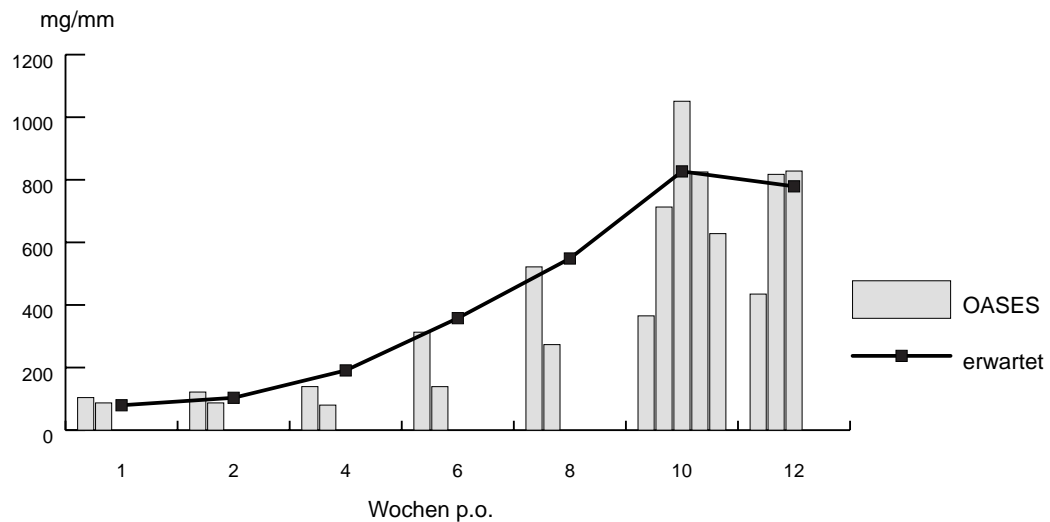


Abb. 23: Verlauf der Mineralisation für die Untersuchungsgruppe A.

Auch zu der an dieser Stelle untersuchten Fragestellung sind keine weiteren Untersuchungen in der Fallbasis gespeichert. Daher werden, ähnlich wie in der Anfragereihe zu der Literaturstelle „Kenwright/Goodship 1989“ (Abschnitt 0), auch hier Untersuchungen für die Anpassung verwendet, die zwar einen ähnlichen Versuchsaufbau vorweisen, aber darüber hinaus noch andere Versuchsparameter einsetzen. Konkret werden für die Berechnungen zu der Untersuchungsgruppe A (Abb. 23), Untersuchungen herangezogen, deren Anordnung Angaben zur Verschiebung, oder zur Stimulation enthalten. Die Ergebnisse der Untersuchungsgruppe B werden teilweise unter Verwendung von Untersuchungen berechnet, die darüberhinaus noch durch Angaben über Axiallast oder Fixationssteifigkeit charakterisiert werden.

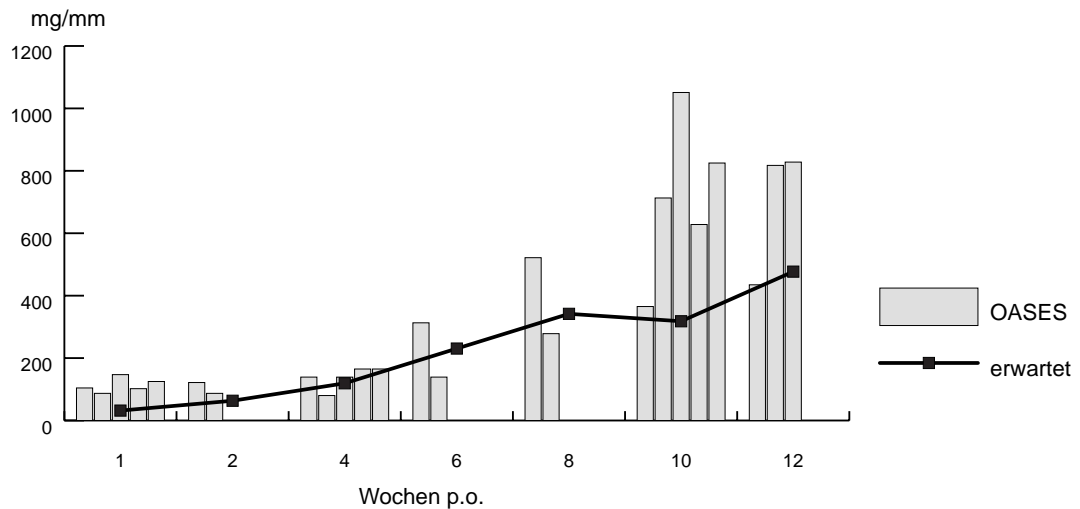


Abb. 24: Verlauf der Mineralisation, für die Untersuchungsgruppe B.

4.5 Anfragen zur Kallusfläche und zur periostalen Kallusfläche

Als Grundlage sowohl für die Anfragen zur Kallusfläche, als auch für die zur periostalen Kallusfläche dienten konkrete Literaturstellen ((Aro H.T., Wippermann B., Hodgson S., Chao E., 1990), (Grundnes O., Reikerås O., 1992), (Claes L., Wilke H.-J., Rübenacker S., Kiefer H. 1989), (Egger L., Gottsauner-Wolf F., Palmer J., Aro H.T., Chao E., 1993), (Egger, Histan, Norrdin, Konde, Schwarz, 1986), (Egger, Lewallen, Norrdin, Schwarz, Histan, Palmer, Chao, 1988)).

Die Abb. 25 und die Abb. 26 fassen die jeweiligen Ergebnisse der Anfragen zusammen.

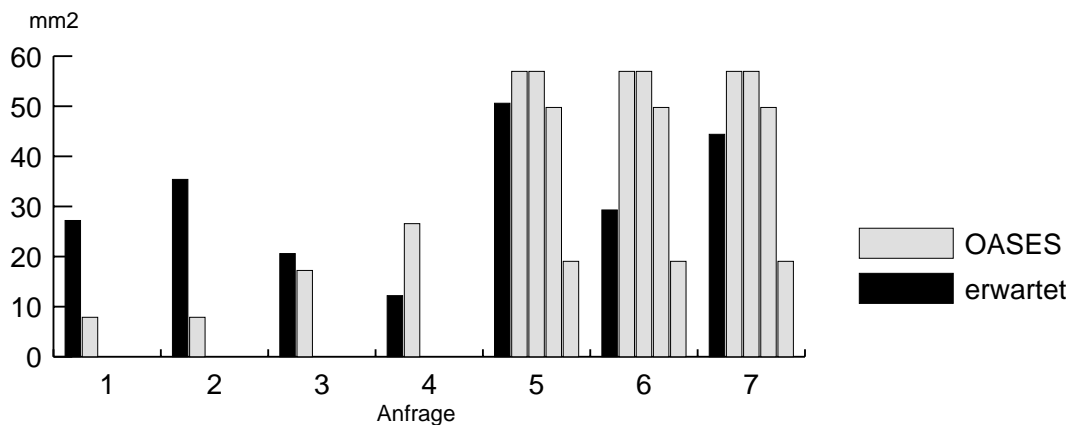


Abb. 25: Anfragen zur Kallusfläche.

Die vorhergesagten und realen Werte für die Kallusfläche zeigen starke Abweichungen. Ein Grund hierfür ist, daß die Literaturstellen, die in der Fallbasis gespeichert sind, widersprüchliche Ergebnisse bezgl. der Kallusfläche enthalten, obwohl sie zum Teil sehr ähnliche Versuchsanordnungen verwenden. So wird bei der Untersuchung

(Aro H.T., Wippermann B., Hodgson S., Chao E., 1990) nach 4 Wochen eine Kallusfläche von 29 mm², bei (Aro H., Eerola E., Aho A.J., 1985) dagegen von 7.88 mm² gemessen.

Auch bei den gemessenen Ergebnissen zur periostalen Kallusfläche sind gravierende Unterschiede bei den verschiedenen Literaturstellen zu beobachten. So wird für die periostale Kallusfläche in (Egger L., Gottsauner-Wolf F., Palmer J., Aro H.T., Chao E., 1993) ein Wert von 78.9 mm², in (Egger, Lewallen, Norrdin, Schwarz, Histan, Palmer, Chao, 1988) ein Wert von 119 mm² und in (Egger, Histan, Norrdin, Konde, Schwarz, 1986) ein Wert von 29.9 mm² gemessen. Da in diesen Literaturstellen sehr ähnliche, wenn nicht sogar dieselben, Versuchsanordnungen verwendet werden und diese daher von OASES zur Berechnung der jeweiligen Anfragen herangezogen werden, liefert das System auch an dieser Stelle Ergebnisse, die stark von den tatsächlich beobachteten Werten abweichen, wie etwa bei den Anfragen 3 bis 9.

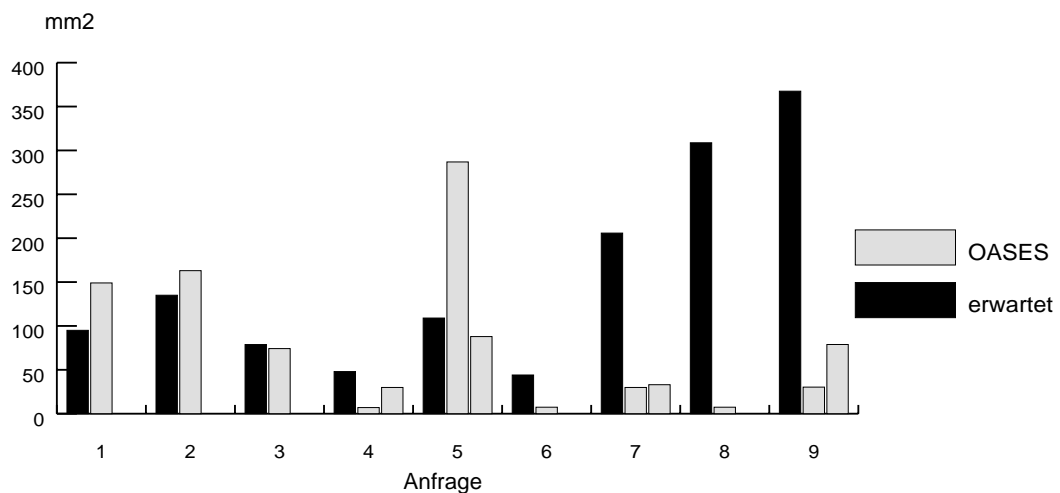


Abb. 26: Anfragen zur periostalen Kallusfläche.

Abweichungen von den berechneten zu den gemessenen bzw. erwarteten Ergebnissen können demnach auch als Hinweis für Widersprüchlichkeiten in den für die Anpassung betrachteten Untersuchungen gewertet werden.

5 Rück- und Ausblick

Das System wurde in kurzen Rückkopplungszyklen zwischen Anwendern und Systementwicklern in Form verfeinerter Prototypen entwickelt. Dabei stand die fallbasierte Methodik im Mittelpunkt. Obwohl Parameter, welche die Knochenheilung beeinflussen, ebenso wie die Literatur zu diesem Bereich sehr vielfältig sind, zeigte es sich, daß die Fallbasis mit nur ca. 45 Literaturstellen (650 Fällen) die meisten Literaturstellen umfaßt, die vom Experten im Kontext der Problemstellung als sinnvoll eingeschätzt wurden. Die Auswahl geeigneter Literaturstellen, Konsistenzüberprüfung und eine Bereinigung der Fallbasis dominierten daher die Wissensakquisition.

Die in der Evaluierung dokumentierten guten Ergebnisse sind nicht zuletzt Resultat dieser Form der Wissensakquisition.

Der im Zwischenbericht erwähnten Upscale Problematik konnte durch eine Umstrukturierung der Fallbasen und Einschränkung der zu betrachtenden Fälle erfolgreich begegnet werden. Auch Anfragen, die umfangreiche Berechnungen und zahlreiche Vergleiche in der Fallbasis beinhalten, werden vom System innerhalb weniger Minuten berechnet. Aus Sicht der Anwender sind die Antwortzeiten akzeptabel.

Metaregeln, in Form von unterschiedlichen Parametereinstellungen, kontrollieren und steuern den fallbasierten Inferenzmechanismus. Um Experimente mit dem System reproduzierbar zu halten, können Sitzungen automatisch protokolliert werden. Zu jeder Sitzung gehören Metaregeln, Anfragen und eingegebene Hypothesen. Ein experimenteller Zugang zu dem System und die Evaluierung der entwickelten Methoden werden dadurch erleichtert.

Neuere Untersuchungen im Bereich der Knochenheilung variieren die Untersuchungsparameter über die Zeit. Diese können im System zwar eingegeben aber nicht verarbeitet werden, ein Defizit, welches sich zu diesem Zeitpunkt nicht beheben läßt. Bisher liegen nur sehr wenige Arbeiten mit dynamischen Untersuchungsparametern vor. Es erscheint nicht sinnvoll, ein Verfahren zu entwickeln, das dynamische Untersuchungen untereinander oder mit statischen Untersuchungen in Beziehung setzt, ohne die Möglichkeit zu haben, dieses Verfahren auch anschließend zu evaluieren.

Ungeklärt ist nach wie vor die Rolle expliziten, generellen Wissens, da die Wissensdomäne sich einer induktiven oder modellbasierten Herangehensweise, selbst im Hinblick auf eine Ergänzung der Fälle, widersetzt. Die vom System induktiv hergeleiteten Hypothesen wiesen zu wenig Erklärungspotential für einen direkten Einsatz im System auf. Dies ist vor allem auf die sehr heterogene Fallbasis zurückzuführen. Dagegen finden Hypothesen, in Form verallgemeinerter Fälle, die vom Benutzer explizit eingegeben werden, ihre Anwendung im fallbasierten Schließen und führen erwartungsgemäß zur Reduktion von Antwortzeiten.

Die vom System produzierten Antworten sind mit Sicherheiten gewichtet, die sich über die Verrechnungen einzelner Sicherheitsfaktoren miteinander ergeben, welche in der Ähnlichkeit der im Schlußfolgerungsprozess angewendeten Fälle begründet liegen. Die Validität und Implikationen dieser Verrechnungen wurden experimentell analysiert und solange verfeinert, bis die Einschätzungen des Systems und der Anwender bezgl. der Güte einzelner Ergebnisse übereinstimmten.

Viele dieser seit dem Zwischenbericht bearbeiteten Punkte dienten dazu, den Prototypen so abzurunden, daß eine umfangreiche Evaluierung der entwickelten Methoden und Techniken durch die Benutzer komfortabel möglich wurde. Die Evaluierung der Ergebnisse zeigte, daß trotz einer heterogenen und relativ kleinen Fallbasis das System gute Ergebnisse erzielt: Untersuchungsverläufe, die der Literatur entnommen wurden, konnten weitgehend reproduziert werden. Auch das Wissensakquisitionstool und die dem fallbasierten Schließen angegliederten Erklärungsme-

chanismen wurden von den Anwendern positiv beurteilt. Dies sind jedoch nur notwendige und keine hinreichenden Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz eines solchen Softwaretools. Die letztendliche Frage, ob das System in der alltäglichen Forschungsarbeit seinen Platz finden wird, kann zu diesem Zeitpunkt nicht beantwortet werden, da eine solche Evaluierung aufgrund zeitlicher Restriktionen leider nicht möglich war.

Ein anderes ebenso wichtiges Ziel war und ist die Applikation der entwickelten Methoden und Techniken innerhalb eines anderen Anwendungsgebietes. Es soll damit einerseits der Nachweis erbracht werden, daß sich die für das Gebiet der Knochenheilung entwickelten Methoden auf andere experimentelle Forschungsbereiche übertragen lassen und sinnvoll eingesetzt werden können, andererseits werden von neuen Anwendungsgebieten auch neue Anregungen erwartet, die sich methodisch umsetzen lassen. Hierzu existieren Vorarbeiten mit der Abteilung Anästhesiologie der Universitätsklinik Ulm. Klinische Untersuchungen, die den Effekt von Medikamentengaben vor der Operation auf das Befinden der Patienten nach der Operation hin dokumentieren, sind hier Gegenstand des Interesses. Dieser Problembereich scheint für einen Einsatz des Systems besonders interessant, da einerseits sowohl die interessierenden Fragestellungen als auch die Fallstruktur beider Anwendungsgebiete weitgehend übereinstimmen. Andererseits zeichnen sich auch Unterschiede zum Gebiet der Knochenheilung ab. Auf dem Gebiet der Anästhesiologie lassen sich einfacher generelle, kontextunabhängige Hypothesen formulieren, um die entwickelte Methode des fallbasierten Schließens mit induktiven und modellbasierten Techniken zu kombinieren.

6 Literatur

- Aamodt A. and Plaza E., 1994: CBR: Foundational Issues, Methodological Variations and System Approaches. *AI Communications* 7(1):39-59.
- Aro H., Eerola E., Aho A.J., 1985: Determination of Callus Quantity in 4-Week-old Fractures of the Rat Tibia. *Journal of Orthopaedic Research*. No. 3, 101-108.
- Aro H., Kelly P.J., Lewallen D.G., Chao E.Y.S., 1990: The Effects of Physiologic Dynamic Compression on Bone Healing under External Fixation. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. No. 256, 260-273.
- Aro H.T., Wippermann B., Hodgson S., Chao E., 1990: Internal Remodeling of Periosteal New Bone During Fracture Healing. *Journal of Orthopaedic Research*. No. 8, 238-246.
- Aro H.T., and Chao E.Y.S., 1993: Bone-healing patterns affected by loading fracture fragment stability, fracture type, and fracture site compression. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. No. 293, 8-17.
- Bareiss E.R., Porter B.W. and Weir C.C., 1988: Protos. An Exemplar-Based Learning apprentice. *International Journal of Man-Machine Studies*. 29: 549-561.
- Bento C., Costa E., 1993: Similarity Metric for Retrieval of Cases Imperfectly Explained. Wess. S., Althoff K.-D., Richter M.M., (eds.): *Topics in Case-Based Reasoning*. Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, Heidelberg.
- Claes L., Reinmüller J., Dürselen L., 1987. Experimentelle Untersuchungen zum Einfluß der interfragmentären Bewegungen auf die Knochenheilung. *Hefte zur Unfallheilkunde*. No 189, 5358.
- Claes L., Wilke H.-J., Augat P., Rübenacker S., Margevicius K.J., 1995: Effect of Dynamization on Gap Healing of Diaphyseal Fractures under External Fixations. *Clinical Biomechanics*. Vol. 10. No. 5., 227-234.
- Clancey W.J., and Shortliffe E.H., 1984: *Readings in Medical Artificial Intelligence, The First Decade*. Addison Wesley, Massachusetts.
- Duda R. and Hart P., 1973: *Pattern Classification and Scene Analysis*. New York, Wiley.
- Egger L., Gottsauner-Wolf F., Palmer J., Aro H.T., Chao E., 1993: Effects of Axial Dynamization on Bone Healing. *The Journal of Trauma*. Vol.34, No.2, 185-192.
- Egger, Hinstead, Norrdin, Konde, Schwarz, 1986: An Experimental Comparison of Canine Osteotomy Healing stabilized with Constantly Rigid Fixation against Decreasingly Rigid Fixation. 32nd Annual ORS, New Orleans, Louisiana, Feb. 17-20.
- Egger, Lewallen, Norrdin, Schwarz, Hinstead, Palmer, Chao, 1988: Effects of destabilizing rigid external fixation on healing of unstable canine osteotomies. 34th Annual Meeting, Orthop Res Society: 302.
- Eriksson H., Puerta A.R., and Musen M.A., 1993: Generation of Knowledge-Acquisition Tools from Domain Ontologies. Report KSL-93-56, Knowledge Systems Laboratory, Stanford University, California.

- Frawley W.J., Piatetsky-Shapiro G., and Matheur C.J., 1992: Knowledge Discovery in Databases: An Overview. *AI Magazine*. Vol. 14. No.3., 57-70.
- Goel A., 1991: A Model-Based Approach to Case Adaptation. In: Proc. of the Thirteen Annual Conference of the Cognitive Science Society. Northvale, NJ. Erlbaum.
- Goodship A. E., Watkins P. E. and Kenwright J., 1993: The role of fixator frame stiffness in the control of fracture healing. An experimental study. *J. Biomechanics*. 26(9): 1027-34.
- Goodship A.E., Kenwright J., 1985: Influence of Induced Micromovement upon the Healing of Experimental Tibial Fractures. *The Journal of Bone and Joint Surgery*. No.4, 651-655.
- Grappa U., Puppe F., Schewe S.: Graphical knowledge acquisition for medical diagnostic expert systems. *Artificial Intelligence in Medicine*. No.4, 185-211.
- Grundnes O., Reikerås O., 1992: Blood flow and mechanical properties of healing bone; femoral osteotomies studied in rats. *Acta Orthop Scand*. No.63(5), 487-491.
- Grundnes O., Reikerås O., 1993: Effects of instability on bone healing: Femoral osteotomies studied in rats. *Acta Orthop Scand*. No.64(1), 55-58.
- Guise D.A., Guise N.B. and Miller R.A., 1993: Consistency Enforcement in Medical Knowledge Base Construction. *Artificial Intelligence in Medicine* 5, 245-253.
- Kenwright J. and Goodship A.E., 1989: Controlled Mechanical Stimulation in the Treatment of Tibial Fractures. *Clinical Orthopaedics and Related Research*. No. 241, 36-47.
- Kenwright J. and Goodship A.E., 1989: The Effect of Different Regimes of Acial Micromovement on the Healing of Experimental Tibial Fractures. 13th International Conference on Hoffmann® External Fixation; Rochester, Minnesota: 40.
- Kolodner J., 1993: *Case-Based Reasoning*. Morgan Kaufman, Publishers.
- Koton P., 1988: Integrating Case-Based and Causal Reasoning. In: Proc. of the Tenth Annual Conference of the Cognitive Science Society. Northvale, NJ. Erlbaum.
- Mars N.J.I. and Miller P.L., 1988: Knowledge Acquisition and Verification Tools for Medical Expert Systems. In Miller P. (ed.): *Selected Topics in Medical AI*. Springer Verlag, New York, 141-152.
- Michalski R.S., 1983: A Theory and Methodology of Inductive Learning. *Artificial Intelligence* 20(2): 111-161.
- Michalski R.S., 1990: Toward a unified theory of learning: Multistrategy Task-Adaptive Learning. Technical Report, MLI1990-1. George Mason University.
- Miller T.M. and Maserie F.E., 1990: The Demise of the "Greek Oracle" Model for Medical Diagnosis Systems. *Meth. Info. Med.* 29 (1990):1-2.
- Mitchell T.M., Keller T., and Kedar-Cabelli S., 1986: Explanation-Based Generalizations: A Unifying View. *Machine Learning Journal* 1. 81-106.
- Morik K., Wrobel S., Kietz J.-U. and Emde W., 1993: *Knowledge acquisition and Machine Learning: Theory Methods and Applications*. Academic Press, London, New York.

- Musen M.A., Combs D.M., Walton J.D., Shortliffe E.H., and Fagan L.M., 1988: Opal toward the Computer-Aided Design of Oncology Advice Systems. In Miller P. (ed.): Selected Topics in Medical AI. Springer Verlag, New York, 167-180.
- Nebot A., Cellier F.E., and Linkens D.A., 1993: Controlling an Anaesthetic Agent by Means of Fuzzy Inductive Reasoning. In Proceedings QUARDET'93: Qualitative Reasoning Decision Technologies, Barcelona, Spain, June 16-18.
- Puppe F., Gappa U., Poeck K., Bamberger S., 1996: Wissensbasierte Diagnose und Informationssysteme. Springer Verlag, Heidelberg.
- Quinlan J.R., 1986: Induction of Decision Trees. In: Machine Learning, Vol. 1, 81-106.
- Quinlan J.R. , 1989: Probabilistic Decision Trees. In: Kodratoff Y., Michalski R. (eds.): Machine Learning, An Artificial Intelligence Approach Vol. 3, Morgan Kaufman Publishers. San Mateo, 140-152.
- Quinlan J. R., 1993: C4.5: Programs for machine learning. San Mateo, Morgan Kaufmann.
- Richter M.M. and Wess S., 1991: Similarity, Uncertainty and Case-Based Reasoning in PATDEX. In Boyer R.S. (ed.): Automated Reasoning, Essays in Honor of Woody Bledsoe. Kluwer Academic Publishing. 249-265.
- Riesbeck C.K. and Schank R.S., 1989: Inside Case-Based Reasoning. Northvale, NJ. Erlbaum.
- Sebag M. and Schoenauer M., 1993: A Rule-Based Similarity Measure. In: Wess S., Althoff K.-D., Richter M.M. (eds.): Topics in Case-Based Reasoning. Lecture Notes in Artificial Intelligence. Heidelberg, Springer, 119-131.
- Seitz A., Uhrmacher A.M., 1996: Cases vs. Model-Based Knowledge- An Application in the Area of Bone Healing. German Workshop on Case-Based Reasoning, Berlin, März 1996.
- Soo V.-W., Wang J.S., Wang S.P., 1994: Learning and Discover from Clinical Database: An Incremental Concept Formation Approach. Artificial Intelligence in Medicine 6(1994) 249-261.
- Uhrmacher A.M., R.J Frye & F.E. Cellier, 1996: Applying Fuzzy based Inductive Reasoning to Analyze Qualitatively the Dynamic Behavior of An Ecological System. Accepted by the International Journal on Artificial Intelligence in Natural Resource Management.
- Users Interface Guidelines, 1991: Inside Macintosh, by Apple Computer, Inc.