

Forschungsinteressen am Graduiertenkolleg Kognitionswissenschaft

Christoph Benzmüller

19. März 1999

1 Bisherige Forschungsinteressen

Nach meinem Diplom galt mein Interesse zunächst der Weiterentwicklung des automatischen Beweisens in Logik höherer Stufe. Ich habe im Rahmen meiner Dissertation einige theoretische Beiträge zum resolutionsbasierten automatischen Beweisen in höherer Stufe geliefert und den Beweiser LEO entwickelt. In Fallstudien konnte ich zwar die Vorteile des neuen Resolutionsansatzes nachweisen (siehe Abschnitt 1.1), erkannte aber auch schnell, daß mit dem auf die Handhabung der Extensionalität spezialisierten Beweiser LEO allein die Mechanisierung mathematischen Denkens nur beschränkt möglich ist. Mittlerweile halte ich die Integration vieler unterschiedlicher automatischer Systeme, gesteuert durch eine kognitiv adäquatere Beweisplanungsebene in einen mathematischen Assistenten (z.B. Ω MEGA) für erforderlich, um insgesamt eine dem Menschen vergleichbare Leistungsfähigkeit zu erreichen. Auch die Interaktion des Mathematikers mit dem mathematischen Assistenten, z.B. zur Spezifikation und Korrektur partieller oder falscher Beweispläne, halte ich auf absehbare Zeit für zwingend erforderlich. Deshalb konzentrierte ich mich neben meinem Promotionsthema auch auf die planbasierte und agentenbasierte Integration automatischer Beweiser in das Ω MEGA System (siehe Abschnitt 1.3). Insbesondere der entwickelte agentenbasierte Vorschlagsmechanismus (siehe Abschnitt 1.2) bietet eine gute Grundlage zur Verbesserung der Benutzerinteraktion.

1.1 Klassische Typentheorie und Anwendungen

Im Mittelpunkt meines Promotionsvorhabens stand die Untersuchung der Mechanisierbarkeit der Gleichheit und der Extensionalitätsprinzipien im automatischen Beweisen in klassischer Typentheorie, d.h. Logik höherer Stufe basierend auf Church's einfach getypten λ -Kalkül [Chu40]. Hinsichtlich der Formalisierung mathematischen Schließens bietet die klassische Typentheorie aufgrund ihrer Expressivität eine vielversprechende Alternative zur Mengentheorie. Es ist sogar möglich — einen genügend starken Semantikbegriff vorausgesetzt — die Gleichheit in klassischer Typentheorie als ein nach dem Leibniz'schen Prinzip (zwei Dinge sind gleich, sofern sie hinsichtlich ihrer Eigenschaften nicht unterschieden werden können) definiertes Konzept zu betrachten. Ein wesentlicher Nachteil traditioneller Ansätze zur Mechanisierung klassischer Typentheorie [And71, JP72, Hue72] betrifft die Handhabung der Extensionalitätsprinzipien¹: Im allgemeinen fordern sie die Hinzunahme der unendlich vieler Extensionalitätsaxiome in den Suchraum. Zur Vermeidung einer Explosion des Suchraumes wird diese Alternative in der Praxis allerdings vermieden.

In meiner Dissertation schlage ich zur Lösung des Problems einen extensionalen Resolutionskalkül (siehe auch [BK98a, Ben97]) aufbauend auf [Koh94, Koh95] und [Hue72, And71] für die klassische Typentheorie vor, der die Extensionalitätsaxiome vermeidet und eine adäquate Mechanisierung der Extensionalitätsprinzipien durch zusätzliche, zielgerichtete Regeln in der Unifikation anbietet. Im Gegensatz zur traditionellen Resolutionsidee werden in der extensionalen Resolution höherer Stufe Unifikation und globale Wiederlegungssuche sehr eng miteinander verbunden. In gewissem Sinne realisiert die extensionale Resolution höherer Stufe nämlich rekursive Aufrufe an den gesamten Widerlegungsprozeß aus der Unifikation heraus, um eine zielgerichtete Handhabung der Extensionalität unter Vermeidung zusätzlicher Axiome zu ermöglichen.

Den Ansatz der extensionalen Resolution habe ich Rahmen meines Promotionsvorhabens um zwei unterschiedliche Ansätze zur Handhabung der primitiven Gleichheit ergänzt (siehe auch [Ben99, Ben98]). Der erste Ansatz basiert auf der Idee der Termersetzung und adaptiert den Paramodulations-

¹Funktionale Extensionalität fordert, daß zwei Funktionen gleich sind (in unsere getypten Sprache ist je ein solches Axiom pro funktionalem Typ erforderlich), wenn sie auf allen Argumenten gleich sind, und Boolesche Extensionalität beschreibt die Übereinstimmung von Gleichheits- und Äquivalenzrelation auf Wahrheitswerten.

kalkül erster Stufe [RW69], während der zweite auf der Differenzreduzierungs-idee aufbaut und den RUE-Kalkül [Dig79] adaptiert.

Zur Analyse der Vollständigkeit der vorgeschlagenen Kalküle war eine Adaption des Beweisprinzips der abstrakten Konsistenz [Smu63, And71] für die sogenannte Henkin Semantik [Hen50] erforderlich. Henkin Semantik ist bekannt als der allgemeinste Semantikbegriff für klassische Typentheorie der vollständige Kalküle erlaubt, während dies für die intuitivere Standardsemantik aufgrund der Gödel’schen Unvollständigkeitsresultate [Göd31] nicht gilt. Ausgearbeitete wird eine ganze Landschaft weiterer Semantikkonstruktionen für die klassische Typentheorie. Dabei wird jeder dieser Semantikkonstruktionen um einen abstrakten Konsistenzbegriff sowie einen entsprechenden Modellexistenzsatz ergänzt (siehe auch [BK98b]).

Neben diesen theoretischen Arbeiten galt mein Interesse aber auch der praktischen Umsetzung der erarbeiteten Kalküle in einem Beweissystem. So implementierte ich im Rahmen meines Promotionsvorhabens den Beweiser LEO (siehe auch [BK98c, Ben97]) und führte Fallstudien durch. Neben einfachen Beweisproblemen über Mengen, bei denen sich LEO im Vergleich zu traditionellen Beweisern erster Stufe (die allerdings die entsprechenden Probleme in der weniger expressiven naiven Mengentheorie kodieren müssen) überlegen zeigte, wurden auch Beispiele aus der Semantikverarbeitung natürlicher Sprache analysiert.

Die Entwicklung von LEO hatte auch entscheidenden Einfluß auf die Entwicklung des Beweisers HOT [Kon98, KK98b] durch Karsten Konrad (Ω -Gruppe, Universität Saarbrücken) im Sonderforschungsbereich 378. Das HOT System basiert auf einem extensionalen Tableauxkalkül, der den oben erwähnten extensionalen Resolutionskalkül in den Tableauxkontext übersetzt und dann um eine gefärbte Unifikation höherer Stufe [HK95a] anreichert. Mit LEO und dem auf linguistische Anwendungen spezialisierten HOT System wurden Fallstudien zur semantischen Verarbeitung durchgeführt [GKK97a], die einerseits die Bedeutung des automatischen Beweisens höherer Stufe illustrieren, aber auch die existierenden Probleme und die enorme Komplexität dieser Anwendungen aufzeigen.

Über den gesamten Zeitraum meiner Promotion verfolgte ich diese Anwendungen des automatischen Beweisens und der Unifikation höherer Stufe in der semantischen Verarbeitung natürlicher Sprache und arbeitete hier insbesondere mit Karsten Konrad (bei der Unifikation höherer Stufe und der Konzeption von HOT) und Michael Kohlhase (Ω MEGA-Gruppe, Universität Saarbrücken) eng zusammen. Auch zu Susanna Kuschert (Graduierten-

kolleg “Kognitionswissenschaft”, Universität Saarbrücken), die derzeit ihre Promotion innerhalb des Graduiertenkollegs abschließt besteht ein enger inhaltsbezogener Kontakt. In ihrer kürzlich eingereichten Arbeit (siehe aber auch [KK97]) entwickelt sie einen dynamischen λ -Kalkül, mit dem Ziel eine Semantikkonstruktion auch auf dynamischer Basis zu unterstützen.

1.2 Agententechniken im Interaktiven Beweisen

Neben meinem Promotionsstudium entwickelte ich gemeinsam mit Volker Sorge (Ω MEGA-Gruppe) einen neuen Kommando-Vorschlagsmechanismus zur Unterstützung des Benutzers im interaktiven Beweisen [BS98a] in mathematischer Anwendungsdomäne. Dieser Ansatz, der auf einer zweistufigen Agenten- und Blackboardarchitektur basiert, bietet sehr gute Möglichkeiten zur Verbesserung der Mensch/Maschine Kommunikation in diesem Anwendungsbereich. Der Vorteil dieses Ansatzes gegenüber traditionellen, passiven Vorschlagsmechanismen ist, daß der Agentenmechanismus stets aktiv im Hintergrund des Systems den aktuellen Beweiszustand und die Benutzereingaben analysiert, um dann in Abhängigkeit zu diesen dynamisch Kommandovorschläge für den nächsten Beweisschritt zu berechnen. Die Liste der jeweils aktuellen Vorschläge werden dem Benutzer in einer graphischen Oberfläche zur Auswahl per Mausklick präsentiert. Der Agentenmechanismus ist sogar in der Lage auf partielle Kommandospezifikation des Benutzers einzugehen und diese dann im Hinblick auf die momentane Beweissituation entsprechend zu vervollständigen.

Der interaktive Beweiser ergreift in diesem Mechanismus also selbst die Initiative und versucht — zusätzlich zum Benutzer — möglichst brauchbare Alternativen für den nächsten Beweisschritt zu berechnen. Das System führt diese Schritte aber nicht selbstständig aus, sondern tritt in Dialog mit dem Benutzer, der die letztendliche Entscheidungsgewalt über auszuführende Beweisschritte beibehält.

Die Berechnung der Kommandovorschläge erfolgt in diesem Agentenmechanismus auf zwei Ebenen. Die untere Ebene stellt dabei pro Kommando des interaktiven Beweisers je ein Blackboard (Parameter-Blackboard) und eine Gemeinschaft von kooperierenden Agenten für dieses Kommando bereit. Die Aufgabe der einzelnen Agenten ist es, in Abhängigkeit zum aktuellen Beweiszustand geeignete Instanziierungen für einen Parameter des zugeordneten Kommandos zu berechnen und diesen auf das Parameter-Blackboard zu schreiben. Die Agenten selbst werden dabei durch vorliegende Einträge

auf dem Parameter-Blackboard gesteuert, d.h. in Abhängigkeit zu bereits existierenden Parametervorschlägen anderer Agenten der Gemeinschaft berechnen sie ihre eigenen Vorschläge und schreiben diese dann wiederum auf das Parameter-Blackboard. Durch diese Art der Kooperation akkumulieren die Parameter-Agenten einer Gemeinschaft letztendlich eine Vielzahl von Instanzierungsvorschlägen für das zugeordnete Kommando auf dem jeweiligen Parameter-Blackboard.

Auf der oberen Ebene des zweistufigen Agentenmechanismus wird pro Kommando des Beweisers je ein Kommandoagent bereitgestellt, deren Aufgabe es ist, die akkumulierten Vorschläge auf den ihnen zugeordneten Parameter-Blackboards der unteren Ebene heuristisch zu bewerten und die besten Instanzierungsvorschläge auszusuchen. Die jeweils ausgewählten Instanzierungsvorschläge (angereichert um den jeweiligen Kommandonamen) aller Kommandoagenten werden auf dem einzigen Blackboard der oberen Ebene — dem Kommando-Blackboard — aufgesammelt. Ein spezieller Präsentationsagent bewertet die einzelnen Kommandovorschläge auf dem Blackboard wiederum anhand heuristischer Kriterien (z.B. die Vollständigkeit der Parameter Instantiierungen der einzelnen Kommandovorschläge), bevor er die heuristisch geordnete Liste von Vorschlägen dem Benutzer dynamisch in einer graphischen Oberfläche zur Auswahl anbietet. Dieser Mechanismus besitzt insofern Anytime Charakter als die Liste der angebotenen Vorschläge sich modulo der verwendeten heuristischen Sortier- und Auswahlkriterien stetig verbessert.

Da selbst das Suchen nach geeigneten Beweisschritten im interaktiven Beweisen in der Regel eine sehr komplexe und berechnungsintensive Aufgabe ist, haben wir erst kürzlich den von vorneherein vorgesehenen ressourcenadaptierenden Agentenmechanismus (jedem Agenten ist ein benutzerdefinierbarer Komplexitätswert zugeordnet, so daß der gesamten Mechanismus durch eine ebenfalls benutzerdefinierbare Komplexitäts-Deaktivierungsschwelle gesteuert werden kann) zu einem ressourcenadaptiven Vorschlagsmechanismus erweitert (auf der Grundlage ihrer eigenen ‘Erfahrung’ adaptieren die Parameteragenten der unteren Ebene ihre Komplexitätswerte nun selbst; diese Selbst-Adaptionen können aber wiederum durch ein explizites Ressourcenreasoning, das auf der oberen, informierteren Ebene stattfindet, überschrieben werden). Der ressourcenadaptive Mechanismus ist detailliert in [BS99] beschrieben.

Der Agentenmechanismus, der als ein beschränkt rationales System im Sinne von [Zil95] angesehen werden kann, wurde zur Unterstützung des

Ω MEGA-Systems [BCF⁺97] implementiert und zeigt bereits in dieser prototypischen Implementierung überraschend starke Problemlösefähigkeiten auf. Während die Vorteile dieses Ansatzes gegenüber den traditionellen passiven Vorschlagsmechanismen im interaktiven Beweisen offensichtlich sind, erscheint es sogar sinnvoll zu untersuchen, inwieweit sich dieser Agentenmechanismus als Basis eines neuartigen, verteilten und ressourcenadaptiven Beweisplanungskonzepts einsetzen läßt.

1.3 Integration externer Systeme in eine mathematische Assistenzumgebung

Eine weitere Forschungstätigkeit neben meinem Promotionsstudium galt der Erarbeitung eines möglichst generischen Konzepts zur Integration interaktiver und automatischer Beweissysteme. Gemeinsam mit Volker Sorge (Ω MEGA-Gruppe, Universität Saarbrücken) und Matthew Bishop (TPS-Projekt, Carnegie Mellon University) erarbeitete ich einen Integrationsansatz der sich die Konzepte des taktikbasierten Beweisen und der Beweisplanung zunutze macht und die Beweisausgaben des zu integrieren Systems als abstrakte Beweispläne interpretiert. Das heißt, die Kalkülregeln des externen Systems werden als Beweismethoden, bzw. Beweistaktiken, im zentralen System widergespiegelt, und die eigentliche Beweistransformation wird durch die stufenweise Expansion der Planoperatoren, bzw. der unterliegenden Beweistaktiken, realisiert. Natürlich besteht die wesentliche Aufgabe der Integration dann darin, die Expansionabbildungen der einzelnen widergespiegelten Beweistaktiken zu definieren. Desto mehr externe Systeme aber bereits auf diese Weise in ein zentrales System integriert sind, desto einfacher wird diese Aufgabe. Denn sehr grob beschriebene oder sehr große Beweisschritte eines externen Systems können im zentralen System bei der Expansion der entsprechenden Beweistaktik als offene Unterprobleme aufgefaßt werden und wiederum an ein geeignetes anderes externes System weitergereicht werden, mit der Hoffnung, daß dieses einen feinkörnigeren Beweisplan zurückliefert.

Das heißt, daß dieser Ansatz es erlaubt, in einer hierarchischen Vorgehensweise die Transformation eines externen Beweises in das interne Format eines zentralen Systems durch andere, bereits integrierte System sinnvoll zu unterstützen. Ferner erfolgt die eigentliche Beweistransformation in transparenter, d.h. in Schritt für Schritt nachvollziehbarer und wiederholbarer, Weise im zentralen System selbst.

Dieser Ansatz wurde angewendet im Rahmen der Integration des Beweisers höherer Stufe TPS [ABI⁺96] in das Ω MEGA-System und ist ausführlich beschrieben in [BBS99, BS98b]. Ein Beispiel in dieser Integration für grobe Beweistaktiken ist die TPS-Regel *RuleP*, die einen kompletten aussagenlogischen Beweis im TPS-System ausblendet und durch eine einzige Regelanwendung ersetzt. Die Expansion der im Ω MEGA-System gespiegelten Taktik *TPS*RuleP* wird realisiert durch einen Aufruf des Beweisers erster Stufe OTTER.

2 Forschungsplan

Mein Interesse gilt dem kognitiv motivierten und ressourcengesteuerten automatischen Beweisen unterstützt durch eine abstrakte Beweisplanungsebene oder durch Multiagentensysteme. Motiviert ist dieses Forschungsthema, durch die im Rahmen meiner Promotion gemachten Erfahrungen: Automatische Beweiser werden wohl kaum eine dem Menschen vergleichbare Leistungsfähigkeit erlangen — höchstens in einzelnen Spezialgebieten. Der Mensch beweist eben auch nicht auf Logikkalkülebene, sondern bedient sich zunächst abstrakter Methoden um einen Beweis vorzustrukturieren und in verschiedenen Unterprobleme zu zerlegen, die dann zu einem Beweis auf Kalkülebene verfeinert werden. Auf der anderen Seite setzt er aber auch automatische Problemlöser ein (z.B. Taschenrechner) und vermeidet kleinere Nebenrechnungen falls möglich. Dieses Vorgehen versuchen wir auch im mathematischen Assistenten Ω MEGA [BCF⁺97] zu realisieren und ich würde mich im Rahmen des Graduiertenkollegs gerne an dieser kognitionswissenschaftlich interessanten Aufgabe beteiligen.

Im Folgenden skizziere ich drei Forschungsvorhaben detaillierter, in denen die Integration externer Systeme in das Ω MEGA-System im Mittelpunkt steht. Eine Eingrenzung oder Gewichtung möchte ich zu diesem Zeitpunkt noch nicht vornehmen, sondern später (ggf. nach Absprache mit den Professoren des Graduiertenkollegs) festlegen, da diese sehr interdisziplinär sind und daher sehr stark von den Kooperationsmöglichkeiten in Graduiertenkolleg und der persönlichen Situation abhängen.

2.1 Anwendungen des Automatischen Beweisens höherer Stufe in der semantischen Verarbeitung natürlicher Sprache.

Die Anwendungsmöglichkeiten der Unifikation höherer Stufe und des automatischen Beweisens höherer Stufe in der semantischen Verarbeitung natürlicher Sprache wurden unter anderem im Projekt LISA im SFB eingehend untersucht. Konkret aufgezeigt wurden z.B. Einsatzmöglichkeiten der Unifikation höherer Stufe zur Analyse von Parallelismusphänomenen, Fokusstrukturen und Ellipsen [GK97, GKK97b, GK96, GKvL96]. Ein häufig auftretender Nachteil dabei ist, daß die Unifikation höherer Stufe zur Übergenerierung tendiert, d.h. sie erzeugt bei der semantischen Analyse nicht erwünschte Lesarten die dann nachträglich ausgefiltert werden müssen.

Der Einsatz eines um Farbnotationen erweiterten λ -Kalküls und eines entsprechend modifizierten Unifikationsalgorithmus kann dieses Problem lösen [GKK97a]. Die Farbnotationen werden dabei als Filterinformationen verwendet, mit dem Ziel die Generierung der unerwünschten Lesarten bereits innerhalb der Unifikation zu unterdrücken. Der gefärbte λ -Kalkül wurde von Michael Kohlhase und Dieter Hutter 1995 entwickelt [HK95b, HK97], allerdings zunächst als ein Steuerungsmechanismus für die Suche im automatischen Beweisen. Erst später wurde die oben skizzierte Anwendung in der Sprachverarbeitung entdeckt.

In gewisser Hinsicht kann die einfache Unifikation höherer Stufe demnach als zu allgemein für diese Anwendungen in der semantischen Verarbeitung natürlicher Sprache klassifiziert werden, weil sie unter Umständen unerwünschte Lesarten generiert. Dies machte die beschriebene Restriktion dieses Berechnungsformalismus notwendig, welche das Übergenerierungsproblem auf der Basis zusätzlicher Farbinformationen löst. Auf der anderen Seite ist die Unifikation höherer Stufe aber auch zu schwach. In [KK98b] wird beispielsweise beschrieben, daß bei der Auflösung von Parallelismusgleichungen unter Umständen die Einbeziehung logischer Äquivalenzen erforderlich ist. Dies kann die syntaktische² Unifikation höherer Stufe aber nicht leisten.

²Um Mißverständnisse zum hier gewählten Begriff der *syntaktischen* Unifikation höherer Stufe zu vermeiden: Zum Teil wird das funktionale Extensionalitätsprinzip im einfach getypten λ -Kalkül und in der Unifikation höherer Stufe auf natürliche Weise berücksichtigt. Deshalb ist der Begriff syntaktische Unifikation höherer Stufe hier nicht ganz zutreffend. Er wird an dieser Stelle trotzdem verwendet, um vor allem das nicht berücksichtigte Extensionalitätsprinzip auf Wahrheitswerten ($a_o \equiv b_o$ gdw. $a_o = b_o$) zu betonen.

Ich möchte darauf hinweisen, daß die Berücksichtigung logischer Äquivalenzen in der Unifikation höherer Stufe bzw. im automatischen Beweisen höherer Stufe eines der Probleme ist, die ich im Rahmen meiner Promotion eingehend untersucht habe. Generell erfordert die Einbeziehung logischer Äquivalenzen in die Unifikation höherer Stufe rekursive Aufrufe an einen Beweiser. Daß heißt, der Unterschied zwischen Unifikation und Beweisen muß aufgehoben werden und beide Algorithmen müssen eng miteinander verwoben werden, strebt man eine generelle Lösung dieser Problems an (siehe auch [BK98a, Ben99]). Es wurde insbesondere bereits in Abschnitt 1.1 darauf hingewiesen, daß der auf linguistische Anwendungen spezialisierte extensionale Tableaubeweiser HOT direkt durch den extensionalen Resolutionsansatz und den Beweiser LEO motiviert ist und Unifikation modulo logischer Äquivalenzen realisiert.

Leider haben die mit HOT und LEO durchgeführten Fallstudien aber auch die enorme Komplexität extensionaler Unifikation höherer Stufe, bzw. extensionalen Beweisens höherer Stufe in der semantischen Verarbeitung aufgezeigt. Größere Beispiele sind zur Zeit mit diesen Ansätzen noch kaum lösbar. Es wurde bisher aber auch noch nicht erschöpfend untersucht, inwiefern sich die bei der linguistischen Vorverarbeitung bestimmten Farbannotationen über die gefärbte Unifikation hinaus sinnvoll verwenden lassen, um die generelle Beweissuche zu steuern.

Anhand von Untersuchungen in diese Richtung möchte ich mich im Rahmen einer Postdoktorandenstelle gerne weiter in die semantische Verarbeitung natürlicher Sprache unterstützt durch Inferenzverfahren aus dem Bereich des automatischen Beweisens einarbeiten und derzeit laufende Forschungsprojekte unterstützen.

Insbesondere bin ich an der Frage interessiert, inwieweit sich denn die in der Entwicklung befindlichen Einzelsysteme zur semantischen Verarbeitung natürlicher Sprache (im SFB-Projekt LISA wird z.B. derzeit ein abduktiver Beweiser, sowie ein Beweiser für Modellgenerierung/Modellelimination zusätzlich zu den Beweisern HOT und LEO entwickelt) zu einem leistungsfähigen Gesamtsystem ergänzen können.

2.2 Entwicklung eines ressourcenadaptiven, agentenbasierten Beweisplanungsansatzes

In Fallstudien hat sich herausgestellt, daß der in Abschnitt 1.2 skizzierte agentenbasierte Vorschlagsmechanismus ein weitaus größeres Problemlösepotential besitzt als in der derzeitigen Anwendung ausgenützt wird. Konkret besteht die Hoffnung, daß bereits ein einfaches Backtracking über die heuristisch selektierten Vorschläge für den jeweils nächsten Beweisschritt zu einem einfachen verteilten, ressourcenadaptiven und in gewissem Sinne reaktiven (aufgrund der speziellen Art der Kooperation der Parameteragenten) Planungsansatz führt. Während einfache Theoreme — wie zum Beispiel die in klassischer Logik allgemeingültige Aussage $\forall P_{o \rightarrow o} \cdot \forall A_o \cdot \forall B_o \cdot ((P A) \wedge (P B)) \Rightarrow (P(A \wedge B))$ — durch einen solch neuartigen Planungsansatz möglicherweise automatisch lösbar werden (zur Zeit ist LEO das einzige System, das solche Probleme automatisch lösen kann), ist die Lösung ernstzunehmender Probleme ohne eine weitere Verfeinerung des Systems nicht zu erwarten. Es erscheint aber sehr interessant zu untersuchen, inwiefern die im klassischen Beweisplanen entwickelten Steuerungskonzepte, wie z.B. die Verwendung von Kontrollwissen, in diesem agentenbasierten Planungsansatz realisiert werden können. Möglicherweise können traditionelle Beweisplanungsansätze sogar als Ganzes durch den agentenbasierten Mechanismus simuliert und um die Aspekte der Verteiltheit sowie Ressourcenadaptivität auf sehr elementarer Ebene (nämlich auf der Parameteragentenebene) ergänzt werden. Auch Lern-techniken könnten auf der reaktiven Parameterebene eingesetzt werden, um die Ressourcenadaptivität des Agentenmechanismus (und damit auch die des agentenbasierten Planungsansatzes) zu optimieren.

Neben der Frage, ob ein solcher agentenbasierte Planungsansatz traditionelle Ansätze subsumieren kann, erscheint es aber mindestens genauso interessant zu untersuchen, inwiefern dieser eher reaktive Planungsansatz sinnvoll mit einem traditionellen Planungsansatz kooperieren könnte. Denkbar ist beispielsweise, daß mithilfe traditioneller Verfahren auf möglichst abstrakter Beweisplanungsebene grobe Beweisskizzen erstellt werden, deren Verfeinerung der möglicherweise flexibleren reaktiven Beweisplanungskomponente überlassen wird.

Ein solcher gemischt reaktiver/traditioneller Beweisplanungsansatz sollte anschließend auch auf seine kognitive Adäquatheit hin überprüft werden. Interessant in diesem Zusammenhang ist, daß bereits jetzt der agentenbasierte Vorschlagsmechanismus aus Abschnitt 1.2, deutliche Parallelen zu der

mehrstufigen Agentenarchitektur aufweist, die von Christoph Jung (Graduiertenkolleg Kognitionswissenschaft) in [Jun98] beschrieben wird.

Leider ist das Ω MEGA System, und deshalb auch unser agentenbasierter Vorschlagsmechanismus in CLOS implementiert und echte Verteiltheit wird in dieser Programmierungsumgebung bisher nicht unterstützt. Insofern ist unsere derzeitige Implementierung auch noch eher eine Simulation des eigentlich anvisierten Systems. Im Rahmen der beschlossenen Reimplementierung des Ω MEGA-Kernsystems in Oz wird aber auch eine Reimplementierung dieses Agentenansatzes möglich sein. Erst dann wird dieser Ansatz die Mensch/Maschine Kommunikation in Ω MEGA entscheidend verbessern können. Mit der praktischen Realisierung eines agentenbasierten Planungsansatzes sollte demnach auch erst im Rahmen dieser Reimplementierung begonnen werden.

2.3 Klausurszenario

Aus kognitionswissenschaftlicher Perspektive halte ich das im SFB 378 *Ressourcenadaptive kognitive Prozesse* für die zweite Projektphase vorgeschlagene, aber leider nicht genehmigte *Klausurszenario* (siehe [37898]) für sehr interessant und herausfordernd, weil es die Integration neuester Forschungsentwicklungen und Systeme aus verschiedenartigen kognitionswissenschaftlichen Einzelprojekten vorsieht. Letztendliches Ziel und Erfolgskriterium ist das Bestehen einer mathematischen Vordiplomsklausur unter Realzeitbedingungen.

Dieses Projekt baut auf bestehenden Kooperationen in der Saarbrücker Kognitionswissenschaft auf, und bündelt diese unter einem gemeinsamen Ziel. Mir persönlich kann die Mitarbeit es ermöglichen, in unterschiedlichen kognitionswissenschaftlichen Feldern aktiv zu werden. Allerdings halte ich es für eher unwahrscheinlich, daß sich das Ziel, eine mathematische Vordiplomsklausur zu bestehen, bereits sehr rasch realisieren läßt. Mein persönlicher Eindruck ist vielmehr, daß dieser ambitionierte Turingtest auf längere Sicht vorbereitet werden sollte. Als Vorgehen schlage ich vor, sich zunächst auf die Integration von zwei, oder drei der beteiligter Systeme bzw. Forschungsbereiche (siehe Skizze der Systemarchitektur in [37898]) zu konzentrieren. Ganz konkret möchte ich vorschlagen, mit der Anbindung des derzeit in der Computerlinguistik entwickelten Beweislesers LIMA an den mathematischen Assistenten Ω MEGA [BCF⁺97], sowie die mathematische Datenbank MBASE [Koh99, Koh98] zu beginnen. Aufgabe des Beweislesers LIMA in

diesem Gesamtsystem ist es mathematische Beweise — wie man sie in einem Textbuch der Mathematik üblicherweise vorfindet — syntaktisch zu analysieren und in Diskursrepräsentationsstrukturen (DRS'en) zu übersetzen. Dann setzt die semantische Auswertung ein, deren Ziel es z.B. ist Anaphern und Ellipsen aufzulösen. Bereits hierbei wird eine Interaktion mit der mathematischen Wissensbank MBASE nötig sein, die das verwendbare Kontextwissen bereitstellt. Das Resultat der semantischen Auswertung soll dann in einen Beweisplan in Ω MEGA übersetzt werden. Die so erzeugten Beweispläne werden in der Regel unvollständig sein und eine wesentliche Aufgabe wird deshalb darin bestehen, ein adäquates Konzept zur Vervollständigung von partiellen Beweisplänen zu erarbeiten und in Ω MEGA zu realisieren. Hierbei ist erneut eine Kooperation mit der mathematischen Wissensbank MBASE erforderlich. Es besteht ferner die Hoffnung das die Vervollständigung partieller Beweispläne durch die in Ω MEGA integrierten automatischen Beweiser (z.B. LEO oder TPS) sinnvoll unterstützt werden kann.

In einem zweiten Schritt soll die skizzierte *Black-Box* Integration zu einer *Glas-Box* erweitert werden. Das heißt, das eine Benutzerschnittstelle entwickelt werden soll, um eine benutzerunterstützte Generierung und Vervollständigung von Beweisplänen zu ermöglichen. Auch der Einsatz von Lern-techniken könnte in diesem Zusammenhang hilfreich sein und sollte untersucht werden.

Mein persönliches Interesse gilt in diesem Rahmen der semantischen Auswertung unter Hinzunahme von Kontextwissen, also der Integration von LI-MA und MBASE, sowie der Generierung und Vervollständigung partieller Beweispläne in Ω MEGA. Meine Arbeiten zur beweisplanunterstützten Integration externer Systeme in Ω MEGA (siehe Abschnitt 1.3) und zu MBASE bilden eine hervorragende Grundlage zur Bewältigung dieser Aufgabe. Weil die verwendeten Repräsentationssprachen auf klassischer Typentheorie aufbauen und evtl. auch automatische Beweiser zur Unterstützung eingesetzt werden, werden mir auch die Rahmen meiner Promotion erworbenen Kenntnisse zugute kommen.

Ausgehend von der Integration der oben genannten Systeme möchte ich mich dann in die anderen am *Klausurszenario* beteiligten Systeme und kognitionswissenschaftlichen Forschungsbereiche einarbeiten und mich z.B. dem automatischen Wissenserwerb im Vorfeld der zu bestehenden Klausur widmen. Die Stellung als Postdoktorand im Graduiertenkolleg würde für die skizzierte Aufgabe eine hervorragende Ausgangsposition bieten, weil sie über den Kontakt zu den Promotionsstudenten im Graduiertenkolleg den Kontakt und

die Einarbeitung in die einzelnen Forschungsgruppen fördern und dadurch die Integrationsarbeiten erleichtern wird. Auch eine projektbegleitende Evaluierung der kognitionswissenschaftlichen Adäquatheit des zu entwickelnden Gesamtsystems würde im Rahmen des Graduiertenkollegs sicherlich erleichtert werden.

Literatur

- [37898] SFB 378. *Ressourcenadaptive kognitive Prozesse — Fortsetzungsantrag Januar 1999 – Dezember 2001*. Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1998.
- [ABI⁺96] Peter B. Andrews, Matthew Bishop, Sunil Issar, Dan Nesmith, Frank Pfenning, and Hongwei Xi. TPS: A theorem proving system for classical type theory. *Journal of Automated Reasoning*, 16(3):321–353, 1996.
- [And71] Peter B. Andrews. Resolution in type theory. *Journal of Symbolic Logic*, 36(3):414–432, 1971.
- [BBS99] Christoph Benzmüller, Matthew Bishop, and Volker Sorge. Integrating TPS and Ω MEGA. *Journal of Universal Computer Science*, 1999. Forthcoming.
- [BCF⁺97] C. Benzmüller, L. Cheikhrouhou, D. Fehrer, A. Fiedler, X. Huang, M. Kerber, M. Kohlhase, K. Konrad, E. Melis, A. Meier, W. Schaarschmidt, J. Siekmann, and V. Sorge. Ω MEGA: Towards a mathematical assistant. In McCune [McC97], pages 252–255.
- [Ben97] Christoph Benzmüller. A Calculus and a System Architecture for Extensional Higher-Order Resolution. Research Report 97-198, Department of Mathematical Sciences, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, USA, June 1997.
- [Ben98] Christoph Benzmüller. An Adaption of Paramodulation and RUE-Resolution to Higher-Order Logic. SEKI-Report SR-98-07, Universität des Saarlandes, 1998.

- [Ben99] Christoph Benzmüller. Extensional Higher-Order Paramodulation and RUE-Resolution. submitted to the 16th International Conference on Automated Deduction (CADE16), 1999.
- [BK98a] Christoph Benzmüller and Michael Kohlhase. Extensional Higher-Order Resolution. In Kirchner and Kirchner [KK98a], pages 56–72.
- [BK98b] Christoph Benzmüller and Michael Kohlhase. Model Existence for Higher-Order Logic. Submitted to the Journal of Symbolic Logic, 1998.
- [BK98c] Christoph Benzmüller and Michael Kohlhase. LEO, a Higher-Order Theorem Prover. In Kirchner and Kirchner [KK98a], pages 139–144.
- [BS98a] Christoph Benzmüller and Volker Sorge. A Blackboard Architecture for Guiding Interactive Proofs. In Fausto Giunchiglia, editor, *Proceedings of the 12th International Conference on Automated Deduction*, number 1480 in LNAI, pages 102–114, Sozopol, Bulgaria, 1998. Springer Verlag.
- [BS98b] Christoph Benzmüller and Volker Sorge. Integrating TPS with Ω MEGA. In Jim Grundy and Malcolm Newey, editors, *Theorem Proving in Higher Order Logics: Emerging Trends*, Technical Report 98-08, Department of Computer Science and Computer Science Lab, pages 1–19, Canberra, Australia, October 1998. The Australian National University.
- [BS99] Christoph Benzmüller and Volker Sorge. Critical Agents Supporting Interactive Theorem Proving. submitted to the 15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI), 1999.
- [Chu40] Alonzo Church. A formulation of the simple theory of types. *Journal of Symbolic Logic*, 5:56–68, 1940.
- [Dig79] Vincent J. Digricoli. Resolution by unificatoin and equality. In William H. Joyner, editor, *Proceedings of the 4th Workshop on Automated Deduction*, Austin, Texas, USA, 1979.

- [GK96] Claire Gardent and Michael Kohlhase. Focus and higher-order unification. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computational Linguistics*, Copenhagen, 1996.
- [GK97] Claire Gardent and Michael Kohlhase. Computing parallelism in discourse. In *Proceedings of IJCAI '97*, pages 1016–1021, Tokyo, 1997.
- [GKK97a] Claire Gardent, Michael Kohlhase, and Karsten Konrad. Higher-order coloured unification: a linguistic application. CLAUS Report 97, University of the Saarland, Saarbrücken, 1997.
- [GKK97b] Claire Gardent, Michael Kohlhase, and Karsten Konrad. A multi-level higher-order unification approach to ellipsis. Submitted to ACL/EACL, 1997.
- [GKvL96] Claire Gardent, Michael Kohlhase, and Noor van Leusen. Corrections and Higher-Order Unification. In *Proceedings of KONVENS'96*, pages 268–279, Bielefeld, Germany, 1996. De Gruyter.
- [Göd31] Kurt Gödel. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. *Monatshefte der Mathematischen Physik*, 38:173–198, 1931. English Version in [vH67].
- [Hen50] Leon Henkin. Completeness in the theory of types. *Journal of Symbolic Logic*, 15(2):81–91, 1950.
- [HK95a] Dieter Hutter and Michael Kohlhase. A coloured version of the λ -calculus. Technical Report SR 95-05, Fachbereich Informatik, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, 1995.
- [HK95b] Dieter Hutter and Michael Kohlhase. A coloured version of the λ -calculus. SEKI-Report SR-95-05, Universität des Saarlandes, 1995.
- [HK97] Dieter Hutter and Michael Kohlhase. A coloured version of the λ -calculus. In McCune [McC97], pages 291–305.
- [Hue72] Gérard P. Huet. *Constrained Resolution: A Complete Method for Higher Order Logic*. PhD thesis, Case Western Reserve University, 1972.

- [JP72] D. C. Jensen and Tomasz Pietrzykowski. A complete mechanization of (ω) -order type theory. In *Proceedings of the ACM annual Conference*, volume 1, pages 82–92, 1972.
- [Jun98] C. G. Jung. Experimenting with layered, resource-adapting agents in the robocup simulation. In *Proc. of the ROBOCUP'98 Workshop*, 1998.
- [KK97] Michael Kohlhase and Susanna Kuschert. Dynamic lambda calculus. In *Proceedings of the 5th Meeting on Mathematics of Language - MOL5*, pages 85 – 92, 1997.
- [KK98a] Claude Kirchner and Helene Kirchner, editors. *Proceedings of the 15th Conference on Automated Deduction*, number 1421 in LNAI, Lindau, , Germany, 1998. Springer Verlag.
- [KK98b] Michael Kohlhase and Karsten Konrad. Higher-order automated theorem proving for natural language semantics. Seki Report SR-98-04, Fachbereich Informatik, Universität Saarbrücken, 1998.
- [Koh94] Michael Kohlhase. *A Mechanization of Sorted Higher-Order Logic Based on the Resolution Principle*. PhD thesis, Universität des Saarlandes, 1994.
- [Koh95] Michael Kohlhase. Higher-Order Tableaux. In P. Baumgartner, R. Hähnle, and J. Posegga, editors, *Theorem Proving with Analytic Tableaux and Related Methods*, volume 918 of *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, pages 294–309, 1995.
- [Koh98] Michael Kohlhase. Towards a mathematical knowledge base. Appears as blue note (internal report), AGS, FB 14, Universität des Saarlandes, October 1998.
- [Koh99] Michael Kohlhase. Towards mathematical vernacular in a mathematical knowledge base. submitted to CADE'99, 1999.
- [Kon98] Karsten Konrad. Hot: A concurrent automated theorem prover based on higher-order tableaux. Seki Report SR-98-03, Fachbereich Informatik, Universität Saarbrücken, 1998.

- [McC97] William McCune, editor. *Proceedings of the 14th Conference on Automated Deduction*, number 1249 in LNAI, Townsville, Australia, 1997. Springer Verlag.
- [RW69] Arthur Robinson and Larry Wos. Paramodulation and TP in first order theories with equality. *Machine Intelligence*, 4:135–150, 1969.
- [Smu63] Raymond M. Smullyan. A unifying principle for quantification theory. *Proc. Nat. Acad Sciences*, 49:828–832, 1963.
- [vH67] Jean van Heijenoort, editor. *From Frege to Gödel A Source Book in Mathematical Logic, 1879-1931*. Source Books in the History of the Sciences. Harvard University Press, 1967.
- [Zil95] S. Zilberstein. Models of Bounded Rationality. In *AAAI Fall Symposium on Rational Agency*, Cambridge, Massachusetts, November 1995.