

Kognitive Modellierung von Text-, Situations- und mathematischem Verständnis beim Lösen von Textaufgaben¹

Kurt Reusser

1 Kognitive Modellierung mittels Computersimulation

Seit Turing (1950) und von Neumann (1960) die Grundlagen zur Theorie symbolverarbeitender Automaten gelegt und Newell und Simon in den fünfziger Jahren die Computersimulation erstmals als Forschungsmethode in den kognitionspsychologischen Absichten verwendet haben (Newell, Shaw & Simon, 1958; Newell & Simon, 1961, 1972; Simon, 1962), hat sich - vor allem im Zuge der Entwicklung der Kognitionswissenschaft - der Anspruch, Theorien auch als lauffähige Computerprogramme zu formulieren, in der Psychologie als *Forschungsprogramm der kognitiven Modellierung* etabliert (vgl. Schmalhofer & Wetter, 1986; Ohlsson, 1988). Nach diesem Forschungsprogramm können Computersimulationen kognitiver Prozesse als effektive Prozeßtheorien, wie sie Johnson-Laird (1983) als Erklärungstheorien für mentales Verhalten gefordert hat, aufgefaßt werden.

Hatten die ersten kognitiven Modellierungen infolge einer vorerst fehlenden psychologischen Semantik noch weitgehend sprach- und weltwissenstheoretische, logisch-mathematische Prozesse (Beweisen, logische Umformungen, kryptarithmetische Aufgaben lösen) zum Gegenstand, so erlauben die heutigen strukturanalytischen Mittel auch zum Teil die Modellierung sprachlicher und sachlich-qualitativer kognitiver Prozesse.

Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der computergestützten Modellierung von Verstehensprozessen beim Lösen von elementaren mathematischen Sach- oder Textaufgaben (Reusser, 1985, 1989). Was Textrechnungen im Vergleich zu mathematisch isomorphen Aufgaben in numerischer Form schwierig macht, erscheint auf den ersten Blick klar: Ihre Lösung erfordert die Übersetzung einer Problemsituation in Textform in eine mathematische Gleichung. Dies setzt voraus, daß ein Aufgabentext als sprachliches Gebilde entschlüsselt und darin eine Sachsituation mit lückenhafter mathematischer Tiefenstruktur erkannt wird. Wesentlich weniger klar und keineswegs trivial ist es jedoch, im Detail zu explizieren, was im Kopf eines Schülers vorgeht, der eine solche Aufgabe löst, oder woran es liegen könnte, wenn er dabei Schwierig-

¹ Die vorliegende Arbeit, welche auf meiner Habilitationsschrift (Reusser, 1989a) basiert, wurde unterstützt vom Schweizerischen Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (Projekt-Nr. 10-2052.86). Xander Kämpfer, Ruedi Süssi und Markus Sprenger danke ich für die Arbeiten bei der Adaptation des ursprünglich für amerikanische Textaufgaben entwickelten Simulationsprogramms SPS an Aufgaben in deutscher Sprache.

keiten hat. Seit Wundt und der Würzburger Schule weiß die Psychologie von den Grenzen der Genauigkeit, Vollständigkeit und Validität introspektiver und verbaler Daten (Ericsson & Simon, 1984) und allgemein von den Schwierigkeiten, aus Beobachtungen der äußeren Verhaltenskorrelate kognitiver Prozesse zu einer kohärenten Theorie zu gelangen bzw. die Verlaufsform von Verstehens- und Lernprozessen in wünschbarer Auflösung zu modellieren.

Es stellt sich die Frage, inwiefern der Computer in dieser Situation ein nützliches Hilfsmittel darstellen könnte, um kognitive Prozesse zu studieren. Papert (1973) verglich die Erforschung des Denkens mittels des Computers einmal mit der Erforschung des Vogelfluges und wies darauf hin, daß man für diese Art des Fliegens nicht aufgrund der Beobachtung fliegender Vögel eine Erklärung gefunden hat, sondern im wesentlichen erst durch das systematische Experimentieren mit künstlichen Flugobjekten im Windkanal. Analog läßt sich auch mit Bezug auf die Funktion der Computersimulation bei der Erforschung von Verstehens- und Denkprozessen argumentieren: Da keine noch so genaue Beobachtung in natürlichen Settings ausreicht, um das komplexe und dynamische Gefüge sprachlich-mathematischer Verstehensprozesse zu erhellen, bedarf es zusätzlicher und künstlicher Mittel, um eine präzise theoretische Vorstellung dieser Prozesse zu gewinnen. Läßt sich mit Hilfe des Computers eine hinreichend detaillierte Prozedurmodell entwerfen und durcharbeiten, so kann es sodann unter kontrollierten Bedingungen auch einer empirischen Prüfung unterworfen werden.

Reitman (1967) hat den forschungsmethodologischen Grundgedanken einer psychologisch motivierten Computersimulation einmal in die Formel gefaßt: *to invent what you need to know*. Das heißt nicht, einen Denkprozeß frei zu erfinden, sondern den Forschungsprozeß am erreichten Stand der "kognitiven Phänomenologie" (Aebli, 1980) zu orientieren. Erst wenn ein ausgearbeitetes Modell und ein phänomenaler Gegenstand sich im Sinne eines funktionellen Parallelismus nach theoretisch begründbaren, kritischen Indikatoren entsprechen, kann in einem strengen Sinne von kognitiver Simulation gesprochen werden (Hilgard & Bower, 1971).

Ein wichtiges Merkmal der Methode der Computersimulation besteht darin, daß ein erzeugtes Modell bis in den letzten Winkel seines Funktionierens exploriert werden kann, daß Teilprozesse (z.B. Fehlerprozesse) systematisch variiert und auf ihre Effekte hin geprüft werden können und sich empirische Hypothesen von hoher Spezifität ableiten lassen. Ein nicht zu unterschätzender Vorteil besteht schließlich in der gegenüber Textdarstellungen erleichterten Kommunizierbarkeit von Modellen: eine Theorie, die auf dem Computer läuft, kann sozusagen *in actu* betrachtet und studiert werden.

2 Kognitive Modellierung von Mathematisierungsprozessen: Von Bobrow (1964) zu Kintsch und Greeno (1985)

Eines der frühesten Simulationsmodelle eines kognitiven Prozesses, das STUDENT-Programm von Bobrow (1964), hatte die Lösung mathematischer Textaufgaben zum Gegenstand. In Übereinstimmung mit dem sprachgrammatischen Geist der Frühphase

der maschinellen Sprachübersetzung - "a process of dictionary look-up, plus substitution, plus grammatical reordering" (Waltz, 1982, S. 5) - bestand die Funktionsweise des Programms in der direkten, satzweisen Übersetzung (direct translation) englischer Sätze in algebraische Terme aufgrund der Zuordnung von Schlüsselwörtern und Wortkombinationen zu mathematischen Termen und Operationen.

Hier ein von STUDENT gelöstes Problem:

(IF THE NUMBER OF CUSTOMERS TOM GETS IS TWICE THE SQUARE OF 20 PERCENT OF THE NUMBER OF ADVERTISEMENTS HE RUNS, AND THE NUMBER OF ADVERTISEMENTS HE RUNS IS 45, WHAT IS THE NUMBER OF CUSTOMERS TOM GETS?)

In zwei ersten Transformationsschritten ersetzt STUDENT gewisse Ausdrücke durch äquivalente Standardausdrücke (TWICE wird zu 2*, PER CENT zu PERCENT, SQUARE OF zu SQUARE) und ordnet den aufgabenrelevanten Wörtern funktionale Rollenketten zu (tagging by function). "Tags" identifizieren die grammatische Rolle dieser Wörter im Text. Zu den verwendeten "tags" gehören die drei hierarchisch geordneten Operatortypen OP, OP1, OP2, weiter die Etikette VERB für Verben, PRO für Pronomen und QWORD für Fragewörter. Danach wird das Problem durch STUDENT wie folgt repräsentiert:

(IF THE NUMBER (OF/OP) CUSTOMERS TOM (GETS/VERB) IS 2 (TIMES/OP1) THE (SQUARE/OP1) 20 (PERCENT/OP2) (OF/OP) THE NUMBER (OF/OP) ADVERTISEMENTS (HE/PRO) RUNS, AND THE NUMBER (OF/OP) ADVERTISEMENTS (HE/PRO) RUNS IS 45, (WHAT/QWORD) IS THE NUMBER (OF/OP) CUSTOMERS TOM (GETS/VERB))

In einem weiteren Schritt zerlegt STUDENT das Problem in drei einfache "kernel sentences". Unter Weglassung der "function tags" und der Konjunktion "AND" sieht STUDENTs Problemrepräsentation nun wie folgt aus:

THE NUMBER OF CUSTOMERS TOM GETS IS 2 TIMES THE SQUARE 20 PERCENT OF THE NUMBER OF ADVERTISEMENTS HE RUNS. THE NUMBER OF ADVERTISEMENTS HE RUNS IS 45. WHAT IS THE NUMBER OF CUSTOMERS TOM GETS?

Es folgt nun der entscheidende Schritt, durch den die obige Form in ein Gleichungssystem übersetzt wird. Die mathematische Transformation wird dadurch eingeleitet, daß STUDENT einen weiteren Operator identifiziert, nämlich die Gleichheitsrelation IS, welche zweimal im Problemtext und einmal in der Frage vorkommt. Bevor STUDENT das Wort "is" mit "=" gleichsetzt, wird ausgeschlossen, daß "is" hier nicht die Funktion eines Hilfsverbs innehat. Die Übersetzung in ein System von linearen Gleichungen wird dadurch bewerkstelligt, daß die operative Bedeutung der mit "tags" versehenen Operatoren in einem algebraischen Operationslexikon nachgeschaut, und die Operationen der Reihe nach (z.B. PERCENT-Operation (OP2) vor SQUARE-Operation (OP1)) ausgeführt werden. Das Ergebnis sieht so aus:

(THE EQUATIONS TO BE SOLVED ARE)
(EQUAL X00001 (NUMBER OF CUSTOMERS TOM (GETS/VERB)))
(EQUAL (NUMBER OF ADVERTISEMENTS (HE/PRO) RUNS) 45)
(TIMES 2 (EXPT (TIMES .2000
(NUMBER OF ADVERTISEMENTS (HE/PRO) RUNS))2))
(THE NUMBER OF CUSTOMERS TOM GETS IS 162)

Die Gleichungen werden sodann symbolisch notiert und aufgelöst:

$$\begin{aligned} x &= \text{number of customers Tom gets} \\ y &= \text{number of advertisements Tom gets} = 45 \\ y &= 45 \\ x &= 2 * (0.2y) \\ ? &= x \\ x &= 2 * (9) \\ x &= 162 \end{aligned}$$

The number of customers Tom gets = 162.

Daß man mit Schlüsselwörtern und ohne Berücksichtigung des semantischen Kontextes zu verblüffenden Ergebnissen kommen kann, illustrierten zur selben Zeit auch die Programme DOCTOR und ELZA von Weizenbaum (1966; vgl. 1976). Trotzdem reicht, wie schon Paige und Simon (1966) im Anschluß an STUDENT gezeigt haben, eine lexikalisch-syntaktische Behandlung der Sprache nicht aus, um Verstehensprozesse zu modellieren. Es werden, wie die Autoren betonten, "auxiliary representations" benötigt, die von semantischer Information Gebrauch machen.²

Drei jüngere Simulationsmodelle zum Verstehen und Lösen arithmetischer Textaufgaben, die Modelle von Riley, Greeno und Heller (1983), von Briars und Larkin (1984), sowie von Kintsch und Greeno (1985), verdanken ihr Entstehen dem Aufschwung der Kognitiven Wissenschaft, genauer deren Zuwendung zu *bereichsspezifischeren* Strukturen und (Entwicklungs-)Prozessen des Verstehens, Lernens und der Begriffsbildung. B. Modellieren die beiden ersten Theorien Entwicklungsprozesse des konzeptuell-mathematischen Denkens, so beschäftigt sich das Modell von Kintsch und Greeno (1985) vorwiegend mit der Verbindung sprachlicher und mathematischer Verstehensprozesse.

Im Modell von Riley et al. (1983) werden arithmetische Textaufgaben durch Zuordnung verbaler Aussagen zu im Gedächtnis gespeicherten, unterschiedlich differenzierten Problem- und Aktionsschemata verstanden und gelöst. Dem Modell von Briars und Larkin (1984) liegt die Idee zugrunde, daß jüngere Kinder einfache Problemsituationen durch konkret oder innerlich nachvollziehendes Handeln zu verstehen und repräsentieren suchen. Das Modell simuliert, wie Kinder mit Hilfe konkreter Zählheiten wie Spielmarken, und auf der Basis von Schlüsselwörtern, Problemsituationen handelnd durchspielen und daraus das numerische Ergebnis ermitteln.

Was beiden Simulationsmodellen fehlt, ist eine Sprachverarbeitungs-komponente. Hier liegt der Schwerpunkt der Arbeit von Kintsch und Greeno (1985), welche in ihrem Modell erstmals den Versuch unternehmen, die zwei Theorienwelten der Textverarbeitung und des (mathematischen) Problemlösens miteinander zu verbinden. Im Modell werden die Annahmen der strategischen Theorie des Textverstehens von Dijk und Kintsch (1983) mit jenen der Theorie des arithmetischen Problemlösens von Riley et al. (1983) verbunden. Die wichtigste Annahme besteht dabei darin, den Prozeß der mathematisch gerichteten Textverarbeitung als einen zweistufigen Vorgang aufzufassen: als Prozeß des Aufbaus einer textnahen, propositionalen Mikro- und Makrostruktur (von Kintsch seit 1974 als Textbasis bezeichnet) und als Prozeß der

² Mit dem Begriff der *auxiliary representations* haben Paige und Simon (1966) den Begriff des *mental Models* (Johnson-Laird, 1983) oder des *Situationsmodells* (van Dijk & Kintsch, 1983) in gewisser Weise vorweggenommen.

Konstruktion eines von der Textbasis abgeleiteten bzw. vom Text denotierten, mathematischen Problemmodells, auf welchem durch arithmetische (Zähl-)Operationen ein numerisches Ergebnis ermittelt werden kann.

Das Modell von Kintsch und Greeno verfügt somit als einziges der beschriebenen Modelle über eine elaborierte Textverarbeitungs-komponente. Der als Liste von Mikropropositionen dargebotene Problemtext wird mit Hilfe sprachlicher Bedeutungspostulate in eine mathematisch-begriffliche Problemrepräsentation übergeführt. Das Modell ist somit prinzipiell in der Lage, auch Voraussagen über die Wirksamkeit von linguistischen Variablen der Problemformulierung auf Problemverständnis und Fehlertypen zu machen (Cummins, Kintsch, Reusser & Weimer, 1988). Aus empirischen Untersuchungen ist bekannt, daß bereits geringfügige Veränderungen der Problemformulierung erhebliche Effekte auf Verlauf und Ergebnis von Verstehensprozessen haben können (Carpenter, Hiebert & Moser, 1981; Reusser, 1984; DeCorte, Verschaffel & DeWin, 1985; Kilpatrick, 1985; Staub & Reusser, 1991).

Trotz der unbestreitbaren Vorzüge des Modells von Kintsch und Greeno ist dessen Verstehenskompetenz beschränkt, vor allem deshalb, weil mentale Problemmodelle auch hier weitgehend mit Hilfe von Schlüsselwortstrategien konstruiert werden. Das heißt, auch bei diesem verstehensorientierten Modell fehlen Strategien des sprachlichen Schließens sowie inferenzielle Strategien der Verarbeitung von Weltwissen weitgehend. Während bei Riley et al. (1983) die Modellierung der Problemsituation bereits mit einem abstrakten, mathematiknahen mentalen Modell der Aufgabe beginnt, bedienen sich Kintsch und Greeno leistungsfähiger, über Schlüsselwörter im Text abrufbarer, schematischer Strategien, um das mathematische Ziel - die Herstellung einer numerischen Verknüpfungsstruktur - auf möglichst direkte Weise zu erreichen.

Den drei skizzierten Modellen des Lösen arithmetischer Geschichtenaufgaben ist gemeinsam, daß sie alle die mehr oder weniger *direkte Mathematisierung* einer Problemsituation anstreben. Dies leistet aber Verarbeitungsstrategien Vorschub, welche durch die allzu frühe Ausrichtung der Verarbeitung auf das Rechnen dazu beitragen, die textbezogene Analyse der Aufgabe und ihrer Repräsentation in der Gestalt eines vorerst qualitativen Situationsmodells zu vernachlässigen.

3 Vom Text zur Situation zur Gleichung: Ein Prozeßmodell

SPS (für *SituationProblemSolver*; Reusser, 1989a) steht für eine explizite psychologisch-didaktische Handlungs- und Prozeßtheorie des Verstehens und Lösens mathematischer Textaufgaben. Als kognitives Simulationsmodell ist SPS ein *Gedankenexperiment* im Sinne von Dennett (1978). Das Modell ist als Versuch zu sehen, die Beziehungen und Übergänge zwischen sprachlichem und mathematischem Verstehen theoretisch zu klären und daraus didaktische Folgerungen zu ziehen.

In Übereinstimmung mit der Theorie der strategischen Textverarbeitung von van Dijk und Kintsch (1983) wird der Prozeß des Verstehens und der Mathematisierung in SPS als kontinuierliche Sinnkonstruktion unter intentionaler (mathematischer) Perspektive aufgefaßt, das heißt als zielgerichteter Prozeß, welcher "nicht nur von Textmerkmalen, sondern ebenso von Charakteristika des Sprachbenutzers, wie dessen Zielen oder Weltwissen" (S. 11), abhängig ist.

Unter dem Vorgang des Lösen einer mathematischen Textaufgabe verstehe ich den inkrementalen, strategischen Prozeß der Konstruktion einer mathematischen Situationsvorstellung, an dessen Ausgangspunkt ein Problemtext und an dessen Ende ein Antwortsatz zu einer mathematisch gerichteten Frage steht. Der mehrstufige, unter mathematischer Perspektive stehende Prozeß verläuft dabei im Zusammenspiel von Textstruktur, Weltwissen und sozial-kognitivem Kontext. In aufeinander bezogenen, hierarchischen Stufen wird der Problemtext recodiert (Miller, 1956; Bock, 1978) und schrittweise und zielgerichtet in eine mathematische Repräsentation übergeführt. Der Prozeß besteht in einer von mehreren Hauptstrategien und zugeordneten Mikrostrategien gesteuerten Folge von Transformationen, das heißt aus einer endlichen Sequenz transitorischer Übergänge von einer propositionalen Zustandsbeschreibung zur nächsten. Er kann mit Johnson-Laird (1983, S. 44) als *reasoning with propositions* bezeichnet werden.

Sämtliches Wissen ist in SPS in Form von Strategien niedergelegt. Verstehen als strategischer Prozeß bedeutet somit Wissensanwendung von Beginn weg. Entsprechend bedeutet Lernen - als Veränderung von Wissen - das Hinzufügen, Weglassen, Zusammenfassen und Differenzieren von Strategien. Da sich Makro- und Mikrostrategien als Bedingungs-Aktions-Moleküle fassen und in die Form

$$\text{IF } (c_1, c_2, \dots, c_i) \text{ THEN } (a_1, a_2, \dots, a_j)$$

bringen lassen, ist SPS als Produktionssystem (Newell, 1973; Klahr, Langley & Neches, 1987; Opwis, 1988) ausgearbeitet. Jede Produktion bzw. jeder Wissensbaustein steht dabei für eine geistige oder physische Handlung, welche dann ausgeführt wird, wenn gewisse Bedingungen erfüllt sind.

Produktionssystemen unterliegt eine Konzeption des kognitiven Systems des Menschen als "physical symbol system" (Newell, 1980), das heißt als informations- oder symbolverarbeitendes System. Produktionssysteme sind in den letzten Jahren sogar zu den eigentlichen Trägern der Prinzipien und Annahmen einer Psychologie der Informationsverarbeitung geworden. Ein *Produktionssystem als psychologische Modellvorstellung* drückt aus, wie sich ein informationsverarbeitendes System angesichts einer Anforderung seinem eigenen Wissen gemäß verhält, in SPS, wie ein System des Verstehens und Lösen mathematischer Textaufgaben seine Verstehensarbeit organisiert und laufend über sein unmittelbar zukünftiges Verhalten entscheidet. Das *Datengedächtnis* des Produktionssystems enthält zu Beginn das zu lösende Problem, darauf folgend jeweils das zu einem Zeitpunkt t_i erreichte Problemverständnis. Das *Produktionsgedächtnis* enthält hingegen das auf die jeweilige Aufgabe beziehbare sprachliche, situationsbezogene und mathematische Verstehens- und Lösungswissen in prozeduraler Form. Der mit dem Arbeits- und dem Produktionsgedächtnis assoziierte *Interpreter* schließlich kontrolliert und steuert in vielfach wiederkehrenden Auswertungs-Auswahl-Ausführungszyklen (vgl. Opwis, 1988) einen Mustervergleichsprozess, bei welchem das aktuelle Verständnis einer Aufgabe mit dem verfügbaren Wissen im Produktionsspeicher ständig verglichen wird.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über die Architektur und die Makrostrategien von SPS. Das Verstehen und Lösen einer mathematischen Textaufgabe wird als Interpretations- und Konstruktionsprozeß über mehrere theoretisch unterscheidbare, transitorische Verarbeitungsstufen begriffen. Jede der Stufen kann durch die ihr zugeordneten *Makro- und Mikrostrategien* und durch die bei ihrer Anwendung erzeugten *mentalen Repräsentationen* beschrieben werden. Am Anfang des Prozesses steht das Verständnis

des Aufgabentextes im engeren Sinne bzw. die Erzeugung einer *Textbasis* (Kintsch, 1974). Diese wird unter Nutzung des allgemeinen und aufgabenspezifischen Weltwissens sodann zu einem *episodischen Situations- oder Problemmodell* ausgebaut, das heißt: die durch den Aufgabentext denotierte Handlungs- oder Problemsituation wird in ihrer zeitlich-funktionalen Struktur herausgearbeitet. Im weiteren Schritten wird die noch konkretere Handlungs-Situationsvorstellung auf ihr mathematisch relevantes Beziehungsgestüt, das *mathematische Problemmodell*, und anschließend auf die *Gleichung* (Rechnung) reduziert, und es wird ein *numerisches Ergebnis* ermittelt. Dieses wird zuletzt in einen situationsbezogenen *Antwortsatz* eingeordnet.

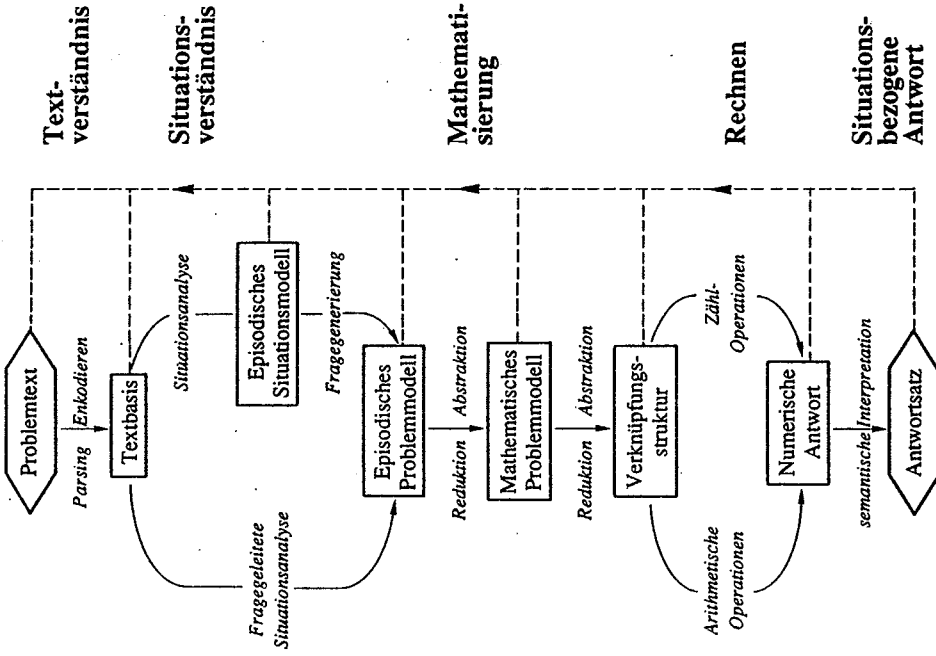


Abbildung 1: Vom Text zur Situation zur Gleichung. Darstellungs- und Verarbeitungsstufen bei der Mathematisierung von Textaufgaben. - Kern des sprachlich-sachlichen und mathematischen Verstehensprozesses ist der planvolle (strategische) Aufbau einer Situationsvorstellung und deren schrittweise Transformation in eine numerische Struktur. Die beiden Wege von der Textbasis zum Episodischen Problemmodell bedeuten, daß Aufgaben mit oder ohne Frage dargeboten werden können. Im letzteren Fall muss der Problemlöser oder das System eine adäquate Frage selber generieren.

Entsprechend den psychologisch-didaktischen Anforderungen an das Verstehen und Lösen mathematischer Textaufgaben (Reusser, 1984, 1989), umfaßt SPS vier Arten von Wissen: Sprachliches Basiswissen, qualitatives Handlungs- und Situationswissen, mathematisches Wissen sowie Planungs- und Kontrollwissen. Während die drei ersten Wissensarten für die semantische Interpretation von Aufgabensituationen erforderlich sind, steuert letzteres, durch das Setzen von Zwischenzielen bzw. das koordinierte Zusammenwirken einer Reihe von Makrostrategien den intentionalen Verstehens- und Mathematisierungsprozeß. Es steht damit für das heuristische Planungs- und Problemlösewissen eines Schülers und umfaßt Strategien wie: Studiere den Aufgabentext, vergegenwärtige dir die Handlungssituation, identifiziere die mathematische Lücke, forme die Aufgabe in eine Gleichung um und rechne sie aus.

3.1 Problemraum und Aufgabentypen

SPS löst die Aufgaben in Tabelle 1 sowie einige Dutzend Varianten davon. Bei den Aufgaben handelt es sich um Klassen sprachlich eingekleideter Additions- und Subtraktionsaufgaben, wie sie in der Grundschule verwendet werden. Der Problemraum umfaßt die Geschehniswelt des (zielgerichteten) Besitztransfers. Bei allen Aufgaben muß eine Besitz- und Handlungssituation, bei der ein oder mehrere Koaktoren über den Transfer von Objekten interagieren, unter einer Problemfrage oder mathematischen Perspektive, welche sich aus der Handlungsintention eines Koaktors ergibt, rekonstruiert werden. In der Standardform der mit oder ohne Frage dargebotenen Aufgaben (Tab. 1, Nr. 1-9) erfährt ein Ausgangszustand, welcher minimal durch die Zuordnung einer Objektmenge zu einem Aktanten gekennzeichnet ist, durch den Transfer von Objekten eine positive (ZUNAHMETRANSFER) oder negative (ABNAHMETRANSFER) Veränderung, die zu einem neuen Zustand, dem Endzustand führt. SPS löst alle VERÄNDERE-Aufgaben (change problems), wie sie in den Modellen von Riley et al. (1983), Briars und Larkin (1984) sowie von Kintsch und Greeno (1985) verwendet wurden. In einer erweiterten Form der Problemgeschichten (Tab. 1, Nr. 10-11) tritt in SPS ein Zielzustand oder ein Motiv zur Basishandlung hinzu, was dieser eine Mittelfunktion und der Gesamthandlung einen intentionalen Charakter verleiht. Eine Situationsbeschreibung einer Aufgabe in SPS besteht somit aus einer zeitlich und funktional geordneten Menge von Handlungsmolekülen oder Situationselementen (SEi), im Fall einer maximal elaborierten Aufgabe bestehend aus einem Setting, einem Ausgangszustand, einer Transferhandlung, einem Endzustand, einem Handlungsziel, einer Zieldifferenz sowie einem oder mehreren Kontextelementen.

1. Claudia hat zwei Schlümpfe auf dem Spielplatz verloren. Sie ist deshalb sehr traurig und will die Schlümpfe morgen suchen gehen. Claudia hat elf Schlümpfe gehabt. - Wieviele Schlümpfe hat sie jetzt noch übrig?
2. Im Turnunterricht hat Paul einen Wettbewerb gewonnen. Als Preis hat er eine Schachtel mit neun Tischtennisbällen erhalten. Drei Bälle hat er noch zuhause in seiner Spielruhe gehabt. - Wieviele Bälle hat Paul nun im ganzen?
3. Urban hat letzten Sonntag beim Wandern neun Vogelfedern zusammengetragen. Heute hat er drei weitere schöne Federn gefunden. - Wieviele Vogelfedern besitzt Urban jetzt?
4. Bis gestern hatte Thomas drei dicke Filzstifte, mit denen er zeichnen konnte. Jetzt besitzt er schon acht Stifte. Heute hat er von seinem Taschengeld eine ganze Anzahl Filzstifte gekauft. - (F1) Wieviele Filzstifte hat sich Thomas gekauft? (F2) Wieviele Filzstifte hat Thomas jetzt mehr als gestern?

5. Vorgestern hat Lisbeth von Franziska ein paar Marmeln erhalten. Zuvor hatte Lisbeth (erst) acht Marmeln. Jetzt besitzt sie neunzehn. - Wie viele Marmeln hat Franziska Lisbeth gegeben?
6. Erich hat im ganzen acht Leuchstifte. Fünf hat er soeben von Willi geschenkt bekommen. - Wieviele Leuchstifte hat Erich vorher gehabt?
7. Peter und Ruedi haben im Wald ein Körbchen Steinpilze und Eierschwämme gesammelt. Die Mutter will zum Abendessen deshalb Pilzschnitten zubereiten. Beim Rüsten muss die Mutter sieben verdorbene Pilze wegwerfen. Fünfzehn Pilze kann sie aber gebrauchen. - Wie viele Pilze haben die Kinder gesammelt?
8. Ursula ist ein Schleckmaul. Eben hat sie noch acht Schokoladestengel gehabt. Jetzt hat sie nur noch vier. Wiewiel Schokoladestengel hat Ursula schon gegessen?
9. Walter hat ein Loch im Schulsack, und so kommt es, dass er häufig Dinge verliert. Gestern hat er auf dem Schulweg drei Farbstifte aus seiner neuen Farbschachtel verloren. Als er zu Hause den Schulsack auspackte, fand er nur noch neun Farbstifte. - Wie viele neue Stifte hat Walter in seiner Farbschachtel gehabt?
10. Selma möchte nach den Ferien ihrer Freundin eine Halskette aus kleinen Muscheln schenken. Deshalb sammelt sie eine Menge Muscheln am Strand. Am Abend prüft sie die Muscheln mit ihrem Bruder und scheidet sechs beschädigte Muscheln aus. Einundzwanzig schöne Muscheln bleiben übrig. Für eine lange Halskette benötigt Selma aber mindestens fünfundzwanzig Muscheln. - (F1) Wie viele Muscheln fehlen ihr noch? (F2) Wie viele Muscheln hat Selma am Strand gesammelt?
11. Anita will für ihr Zimmer einen Wandbehang weben. Sie braucht dazu etwa zwanzig Wollreste in verschiedenen Farben. Eva hat Anita letzte Woche einen ersten Sack mit Wollresten mitgebracht. Gestern hat sie von Regula (weitere) fünf Wollreste erhalten. Jetzt fehlen Anita nur noch vier Wollreste. - (F1) Wieviele Reste besitzt Anita schon? (F2) Wieviele Wollreste hat Regula Anita gegeben?

Tabelle 1: Aufgabenbeispiele zu den in SPS modellierten Problemtypen.

Innerhalb dieser Besitz- und Transfersemantik und der damit verknüpften mathematischen Semantik, variieren die Aufgaben in SPS bezüglich einer Vielzahl weiterer, empirisch bedeutsamer Merkmale des Aufgabenraumes. Diese betreffen, nach einer Unterscheidung von Morgan und Sellner (1980; vgl. Staub & Reusser, 1991), die Präsentationsstruktur und die linguistische Form der Aufgaben. Das heißt, Textaufgaben (wie andere Sachverhalte) können einem Leser - jenseits ihrer mathematischen semantischen Inhaltsstruktur (bei Morgan & Sellner: content structure) - in mannigfaltiger textlicher Formulierung und Variation dargeboten werden. Präsentationsstrukturvariablen des Aufgabenraumes sind in SPS etwa der Ort der mathematischen Lücke (welches ist die gesuchte Größe?), die Anzahl der Koaktoren, der Fragetypus, das Verhältnis von Textordnung und Handlungsordnung (Sequenzierung), die Erzählperspektive, die Variation temporaler Markierungen oder das Auftreten von irrelevanten Information oder von Ambiguität. Fehlt im Aufgabentext zudem eine explizite mathematische Frage, so generiert das Modell aufgrund seines Situationsverständnisses selber eine adäquate Problemfrage.

3.2 Analyse eines Beispiels

SituationProblemSolver wurde auf einer XEROX 1186-Workstation in LISP implementiert. Zur Illustration des Modells wähle ich die folgende Aufgabe (mit Frage F4, jedoch ohne die zusätzlichen Markierungen "bereits", "die ersten" und "sodann")³:

³ In Versuchen haben nur 10 bis 35 Prozent der Erst- und Zweitklässler diese für Grundschüler schwierige Aufgabe gelöst.

Derzeit hat Michael (bereits) neun Marmeln⁴. Einige Marmeln hat er (Die ersten Marmeln hat er) vor einigen Tagen von Hannah auf dem Spielplatz bekommen. Gestern hat ihm (sodann) Rosmarie drei weitere Marmeln geschenkt.

- F1: Wieviele Marmeln hat Michael auf dem Spielplatz erhalten?
 F2: Wieviele Marmeln hat Hannah Michael vor ein paar Tagen gegeben?
 F3: Wieviele Marmeln hat Michael zuerst auf dem Spielplatz erhalten?
 F4: Wieviele Marmeln hat Hannah Michael zuerst auf dem Spielplatz gegeben?

Unter semantisch-analytischem Gesichtspunkt weist die Aufgabe folgendes Merkmalsprofil auf: Es handelt sich um eine von einer Subtraktion führende Zunahmetransfer-Aufgabe mit drei Koaktoren und nebenaktorieller Frage, mit interaktivem Anfangszustand, welcher gleichzeitig der Ort der mathematischen Lücke ist, sowie mit inkonsistenter Erzählperspektive oder Blickpunktwechseln; weiter stimmt die Textordnung nicht mit der Handlungsabfolge überein; Zeitadverbien spielen eine wichtige Rolle bei der Ermittlung der Handlungsabfolge; die Aufgabe ist unterbestimmt, d.h. es wird präsupponiert, daß Michael seine ersten Marmeln von Hannah erhalten hat.

3.2.1 Der Aufbau der Textbasis

SPS erlaubt zwei Arten der Anfangsrepräsentation. Zum einen ist das Modell in der Lage, eine Aufgabe ausgehend von einer Liste von Mikropropositionen zu verarbeiten. Zum andern besitzt es einen Parser, der die Problemeingabe in natürlicher Sprache erlaubt. Der Parser wurde nach Prinzipien eines deterministischen Automaten für die SPS-Sprachwelt entwickelt (Stiefenhofer & Gehri, 1988). Da ihm aber weniger psychologische Überlegungen zur Sprachverarbeitung, als vielmehr Erwägungen zur Benutzerfreundlichkeit zugrunde liegen, wird hier auf eine ausführliche Beschreibung verzichtet.

Textverständnis im engen Sinne bedeutet in SPS den Aufbau einer *Textbasis* (Kintsch, 1974) in propositionalem Format. Die Verarbeitung von Text und von Wissen wird als ein Inferenz-, Elaborations- und Konstruktionsprozeß verstanden, dessen Elemente prädikantente Propositionen darstellen. Propositionen haben sich für die Darstellung kognitiver Prozesse und Strukturen als ein brauchbares Analyse- und Notationsinstrument erwiesen. In Mikropropositionen zerlegte Satzaussagen gelten dabei als die kleinsten Bedeutungseinheiten, die der empirischen Prüfung noch zugänglich sind.

In der Satzproposition "Michael hat derzeit neun Marmeln" stellt das Prädikat HABEN als possessives Relationskonzept eine Beziehung her zwischen vier Argumenten, dem *Besitzer* "Michael", dem *Objekt* "Marmel", der *Zahl* "neun" sowie dem *Zeitadverb* "derzeit". Der Prädikat-Argumentkomplex kann somit in vier Mikropropositionen zerlegt werden:

(HABEN, MICHAEL) & (HABEN, MARMEL) &
 (HABEN, NEUN) & (HABEN, DERZEIT)

Aber nicht nur Sätze, sondern auch ganze Texte lassen sich als propositionale Gefüge darstellen. Die Textbasis ("a representation of the text as it is"; van Dijk & Kintsch,

⁴ Marmeln stehen im Schweizerischen für Mummeln.

1983, S. 51) besteht dabei aus einer Sequenz von durch Argumentüberlappung miteinander verbundener Propositionen.

In SPS erfolgt der Aufbau einer Textbasis zum Zweck der Bildung einer textnahen mentalen Anfangsrepräsentation einer Aufgabe. In Anlehnung an Fillmores (1968) generative Semantik wird sie als Gefüge von satzphasenzentrierten *Kasusrahmen* (case frames) mit einem prädikativen Kern und mehreren Argumenten gedeutet. Nach Fillmore (1977) läßt sich eine Satzproposition (P) durch ein Verb oder Prädikat (V) sowie eine prädikatsabhängige Anzahl obligatorischer (o) und fakultativer (f) Variablen, welche Rollenkasus oder Kasusrelationen (K) genannt werden, ausdrücken.

$$P \Rightarrow V + K_{o1} + K_{o2} + K_{o3} + \dots + K_{oi} + K_{f1} + K_{f2} + \dots + K_{fj}$$

Hörmann (1976) und Aebli (1980) haben - jenseits der linguistischen Fruchtbarkeit der Kasuslehre - auf die strukturellen Parallelen zwischen sprachlichen Kasusrelationen und menschlichen Handlungsrollen hingewiesen. Dies bedeutet, daß sich kasusgrammatische Strukturen auch *handlungstheoretisch* interpretieren lassen.⁵ So wie jedes Satzprädikat einen Kasusraum definiert, bestimmt auch jede Handlung ihre notwendigen und optionalen Mitspieler. Analog dem Verständnis einer Handlung als dem geordneten Stufen einer Beziehung zwischen den Handlungsteilnehmern, kann das Verstehen eines Satzes als mentale Nachkonstruktion einer in einem Satz ausgedrückten Handlungsstruktur aufgefaßt werden. Alle Aufgaben in SPS sind Handlungsaufgaben, das heißt, in den Problemtexten spielen sich Handlungen des (zielgerichteten) Transfers ab. Die Wörter in den Sätzen spielen dabei jene Rollen, die ihnen nach Maßgabe ihres semantischen Gehaltes zukommen.

Ein wichtiger Grund für die Fruchtbarkeit der Kasusgrammatik liegt schließlich in dem, was Charniak (1981) die *case-slot identity theory* genannt hat. Es geht hier um die Ineinsetzung von *Rollenkasus* und *Eingabebefüllung* (slot) bei "Frames", wie sie Minsky (1975) und Winston (1984) als Bausteine geschichtenverstehender Computerprogramme beschrieben haben. Im vorliegenden Modell sind die Bedeutungsstrukturen ebenfalls als *Frames* implementiert. Sie bilden darin die eigentlichen Wissens- und Bedeutungsbausteine.

SLOT	WERT
PRÄDIKAT	<Verb>
KOAKTOR	<Eigenname>
KOAKTOR	<Eigenname>
OBJEKT	<ObjektName>
QUANTITÄT	<Zahl> <NumerischerPlatzhalter>
ZEIT	<Verzeit> <Temporaladverb>
ORT	<LokativInformation>
PRÄD-SPEZ	<Adverb>
OBJ-SPEZ	<Adverb>
ZIEL-MOTIV-SPEZ	<Ziel-/MotivInformation>

Tabelle 2: Kasusgrammatischer Strukturrahmen.

⁵ Hörmann war dieser Handlungsaspekt wichtig, weil sich dadurch Anschluß gewinnen lässt an "eine grosse und lange verschüttete Tradition der Sprachforschung und der Sprachpsychologie" (1976, S. 225). Hörmann meinte hier vor allem Bühler (1934), bei welchem - auf Wundt zurückgehend - eine handlungstheoretische und prädikatzentrierte Kasuslehre in seinem Begriff des *Handlungskitsches* als dem "grundlegende(n) und übergreifende(n) Schema der indogermanischen Sprachen", vorgezeichnet ist (Hörmann, a.a.O. S. 227).

Tabelle 2 zeigt die SPS zugrunde liegende Kasusrahmenfunktion, die als schematische Satzstütze den Assimilationsrahmen für die satzweise Verarbeitung der Aufgaben bildet. Strukturelles Zentrum der Kasusrahmen ist das zur Aufnahme von Zustands-, Handlungs- oder Prozessinformation bestimmte Prädikat. Dem ergänzungsbedürftigen semantischen Kern ist eine variable Zahl obligatorischer und fakultativer Argumente beigeordnet, denen Eingabeöffnungen (slots) in einem Frame entsprechen. Personen, die im Eingabesatz vorkommen, werden von den KOAKTOR-Slots, das Objekt der Satzproposition vom OBJEKT-Slot aufgenommen. Entsprechend werden auch die weiteren Wortkonzepte des Satzes als funktionale Satzergänzungen gedeutet und eingeordnet.

Die Simulation wird durch die Funktion *Solve* gestartet. Zunächst wird eine Reihe von Fenstern (F1-F6) geöffnet, welche die Aufgabe und in rudimentärer Form Aspekte des kognitiven Apparates repräsentieren (vgl. das Layout von Abbildung 2). F1 beinhaltet die natürlich-sprachliche Aufgabe, während F2 ein Teilprotokoll von deren syntaktischer Verarbeitung im Parsingprozess wiedergibt. Im Buffer F3 erscheint die zu einem gegebenen Zeitpunkt fokussierte Satzproposition. F4 gibt Informationen über den Verarbeitungsprozess, während F5 zeigt, unter welcher Makrostrategie die Verarbeitung gerade steht. F6 illustriert schließlich das aktuell erreichte Problemverständnis als ein im Aufbau begriffenes Frame. Im Verlauf der Problemlösung wird in F6 sichtbar, wie sich das Verständnis der Aufgabe allmählich entwickelt und in kleinen und kleinsten Inferenzschritten zur Problemlösung erweitert und differenziert.

Der Verstehensprozess beginnt mit dem zyklischen Lesen (Kintsch & van Dijk, 1978) des Aufgabentextes. Die Konstruktion einer Textbasis stellt dabei einen ersten, zur Bildung eines Frames (Minsky, 1975; Winston & Horn, 1981) führenden Mustervergleichsprozess dar, welcher von der kasusgrammatischen Erwartungsstruktur (top-down Komponente) einerseits und von der dem System verfügbaren Menge lexikalischer *Bedeutungspostulate* (bottom-up Komponente) andererseits gesteuert wird.

Abbildung 2 zeigt einen Zwischenstand beim Aufbau der Textbasis. Während die drei ersten Satzpropositionen (SE1-3) bereits kasussemantisch interpretiert sind (F6), ist der teilweise noch im Arbeitsgedächtnis (F3) befindliche vierte Satz in Abarbeitung begriffen: Zwei lexikalische Erkennungsstrategien (*VerbZeit*, *AbnahmeTransfer*; vgl. F4) haben bereits den interaktiven Handlungskern mit dem PRÄDIKAT GEBEN, den Akteuren GEBENDE und BEGÜNSTIGTER sowie die Verbzeit erfaßt. (Das in F6 dem Prädikat beigeordnete Merkmal *TRO* steht für das semantische Primitivum⁶ TransferOut oder Abnahmetransfer.) Die als nächste feuernde Produktion *Quantität* (F4) wird das Fragepronomen WIEVIELE als numerischen Platzhalter interpretieren und dem vierten Sub-Frame (oder facet) SE4 in F6 als Rollenkasus QUANTITÄT anfügen. Drei weitere Produktionen, die sich als Mikrostrategien ebenfalls auf Bedeutungspostulate der natürlichen Sprache beziehen, werden sodann die Satzinterpretation abschließen.

6 Die lexikalische Verarbeitung in SPS benutzt "semantic primitives" in Anlehnung an Norman und Rumelhart (1975): *POSS* steht für ein semantisches Merkmal für Besitz, während *TRO* und *TRI* für die manchen Aktionsverben als semantische Primitiva innewohnenden Elementarhandlungen *Zunahmetransfer* und *Abnahmetransfer* stehen.

F

The screenshot displays a text-based simulation interface for a problem-solving task. At the top, a header reads 'PROBLEMTEXT'. The main content area is divided into several frames (F1-F6) and a problem description. The problem text describes a scenario involving 'Marmelade' (jam) and 'Marmeladentage' (jam days), with a goal to buy jam for several days. The frames contain various data points and processing steps, including a list of names (MARMEL, MICHAEL, ROSMARIE), dates (PERFEKT GESTERN, PERFEKT DERZEIT, PERFEKT VOR-EINIGEN-TAGEN), and processing stages like 'Parsing - Prädikat' and 'Process - Information'. The interface uses a simple text-based layout with different colors and symbols to represent different elements of the simulation.

Abbildung 2: Aufbau der Textbasis für die Michael-Aufgabe (IntTransOutVerb = Interaktives-AbnahmeTransferVerb; SE1 = Satz-/Situationselement; Zyklus 4 = Einlesen der vierten Satzproposition)

3.2.2 Vom Text zur Situation:

Der Aufbau eines episodischen Problemmodells

Während die Erzeugung einer Textbasis - in Anlehnung an Hörmann (1983) - unter die Frage gestellt werden kann: "Was tun die Wörter miteinander im Satz?", beantwortet die Konstruktion eines episodischen Problemmodells die weiterführende Frage: "Was tun die Sätze miteinander im Text?" Die Differenz zwischen der Textbasis und dem episodischen Problemmodell EPM besteht vor allem in der unterschiedlichen Kohärenz der beiden Verarbeitungsstrukturen. Handelt es sich bei der Textbasis um eine Folge von bloß koreferenziell überlappenden, mittels anaphorischer Relationen verbundener Kasusrahmen, so steht das episodische Situations- oder Problemmodell für den semantisch interpretierten, das heißt temporal und funktional geordneten Situations- und Handlungszusammenhang. Das EPM entspricht somit dem mentalen Bedeutungszusammenhang, den eine Person beim Verstehen einer Aufgabe in ihrem Geist vergegenwärtigt.

Auf die Aufgaben von SPS bezogen, bedeutet der mentale Aufbau einer episodischen Situations- bzw. Problemvorstellung, zu erkennen - zeitlich und funktional - *what leads to what* (Tolman, 1932). Das heißt, daß für einen episodischen Zusammenhang mit zu erkennender mathematischer Lücke rekonstruiert werden muß, welcher Ausgangszustand über eine wie gerichtete Handlung zu welchem Endzustand führt. Im Detail und am Beispiel bedeutet diese Rekonstruktion die Zuordnung von Funktions- und Zeitwerten zu den Satz- oder Situationselementen der Aufgabe. So muß erschlossen werden, daß sich der erste Satz auf den resultierenden Endzustand, der zweite, zusammen mit der Problemfrage, auf den mathematisch unbestimmten und daher gesuchten Anfangszustand, und der dritte Satz auf die dazwischen liegende Dazubekommen-Handlung bezieht. Die Rekonstruktion der Handlungssituation und die entsprechende Konstruktion eines mentalen Modells schließen in SPS in der Regel vier all-gemeine, durch Makrostrategien gekennzeichnete Teilziele ein:

- a) *Die Rekonstruktion der Handlungsordnung aus der Textordnung:* Welches Satzelement im Aufgabentext bzw. welches Sub-Frame in der Textbasis referiert auf welches Situationselement im Situationsmodell? Was ist Anfangszustand (T1)? Was ist (wie gerichtete) Handlung (T2)? Was ist Endzustand (T3)? - Ziel der Strategie ist die Zuordnung von *Zeitwerten* (T1, T2, T3) zu den Zeiteingabeöffnungen der Situationselemente (SEi)
- b) *Die Identifikation eines Protagonisten der Handlung:* Welcher im Text genannte Koaktor "regiert" die Handlung? Welcher Koaktor zeichnet sich durch Charakter, Situation oder Umstände als der episodisch und mathematisch zentrale aus? - Ergebnis dieser Strategie ist die Zuordnung des Labels PROTAGONIST zu dem in Frame als Protagonisten identifizierten Handlungsteilnehmer.
- c) *Die Ermittlung von handlungslogischen Funktionalwerten* (Köhler, 1917; Duncker, 1935) *der Situationselemente oder Textglieder.* Erfährt der Protagonist durch das Handlungsgeschehen in der Aufgabe eine (freiwillige oder unfreiwillige) Vermehrung oder Verminderung seines Besitzes? Welches episodische Element (SEi) steht hierbei für den Ausgangszustand, welches für den resultierenden Zustand der Handlung? - Bei diesem Schritt geht es um das Finden einer semantischen Rolle für die Situationselemente: ANFANGSZUSTAND, ZUNAHMETRANSFER, ABNAHMETRANSFER, ENDSZUSTAND, ZIELDIFFERENZ, ZIELZUSTAND, SETTING oder KONTEXT.

- d) *Die Identifikation und Analyse, gegebenenfalls die Generierung einer Problemfrage.* Ist eine Frage gegeben, so muß diese situationsfunktional interpretiert werden. Auf welches Situationselement bezieht sich die mathematische Frage? Steht die Aufgabe ohne Frage da, generiert SPS aufgrund seines Weltwissens und seines Verständnisses der Aufgabe selber eine mathematische Frage. Meist wird eine solche durch einen intentionalen oder motivationalen Aufgabentext nahegelegt.

Der progressive Ausbau der Textbasis zu einem Situations- oder Problemmodell läßt sich, in Übereinstimmung mit dem gesamten Verarbeitungsprozeß in SPS, als Abfolge von strategie- oder regelgeleiteten Übergängen von einem propositionalen Zustand zu einem nächsten, das heißt als inferenzielles Geschehen, kennzeichnen (vgl. Ballstaedt, Mandl, Schnotz & Tergan, 1981). Ausgehend von im Text selber auftretenden Propositionen, dann mehr und mehr von selber erzeugten propositionalen Zwischenzuständen, werden so lange neue (transitorische) Zustände erzeugt, bis ein vom Modell antizipiertes, temporal und funktional kohärent⁷ interpretierbares Situations- oder Problemmodell aufgebaut ist.

Ausgehend von der Textbasis gibt es fast immer mehrere Inferenzpfade oder Verste-henswege zum Situationsmodell. Im folgenden wird für das Beispiel aber nur einer der (über ein Dutzend) möglichen Verste-henspfade detailliert dargestellt, während zwei weitere Pfade angedeutet werden. Die den verwendeten Verste-hensstrategien zugrunde liegenden semantischen Intuitionen werden dabei als in natürliche Sprache übersetz-bare, intuitiv nachvollziehbare *Bedeutungspostulate* (Carnap, 1952) verstanden.

Abbildung 3 zeigt den ersten Teil des Ausbaus der Textbasis zum Situationsmo-dell. Wie aus dem Informationsfenster F2 ersichtlich, haben fünf Regeln bereits gefeuert. Das erreichte Problemverständnis ist als Frame im Problemmodellfenster F5 festgehalten. Zuerst erkennt die Strategie *Frageidentifizierung* aufgrund der Syntax der Frage, insbesondere des im QUANTITÄT-Slot auftretenden Frageoperators WIEVIELE, das Situationselement SE4*F als Frageproposition. Der Handlungsteil der Pro-duktion besteht darin, dem in *situ nascendi* befindlichen Situationsmodell den neuen Slot Funktionalwert (FW; vgl. Duncker, 1935) mit dem Wert FRAGE zuzuordnen.

Der nächste Verste-hensschritt hat die Identifikation des PROTAGONISTEN der Handlung zum Ziel, d.h. desjenigen Handlungsteilnehmers, um den sich sozusagen die Handlung dreht. Da sich im Aufgabenskript keine eindeutigen Hinweise darauf finden lassen, welcher der drei Koaktoren Hannah, Michael oder Rosmarie als (mathematisch relevanter) Hauptaktor in Frage kommt, ist dieser Schritt beim vorliegenden Beispiel keineswegs trivial. Würde die Frage lauten "Wieviele Marmeln hat Michael zuerst bekommen?", so wäre es einfach, den *einzigen Frageaktor* Michael als Haupthandlungsträger zu bestimmen. In SE4 kommen aber zwei Koaktoren vor - wobei der als Protagonist zu bestimmende Michael nicht einmal in grammatischer Subjektposition steht. Wegen dieser Komplikation erfolgt seine Identifikation durch die relativ komplexe Substrategie *ProtagonistAusSchnittmenge*. Michael wird als derjenige Aktor identifiziert, der in jeder Teilhandlung der Aufgabe vorkommt (als einziger Aktor in der Schnittmenge aller Koaktoren übrigbleibt) und als Träger einer kohärenten Erzähl-perspektive Gewähr für eine zusammenhängende Interpretation der Gesamthandlung bietet (Reusser, 1989b).

⁷ Die kohärente Interpretation einer Situation stellt in SPS den Regelfall dar. Es gibt aber auch mehrdeutige, unterbestimmte und widersprüchliche Aufgaben, die keine kohärente Interpretation erlauben. SPS "versteh" solche Situationen und macht Fehler, wie sie bei empirischen Versuchspersonen auftreten.

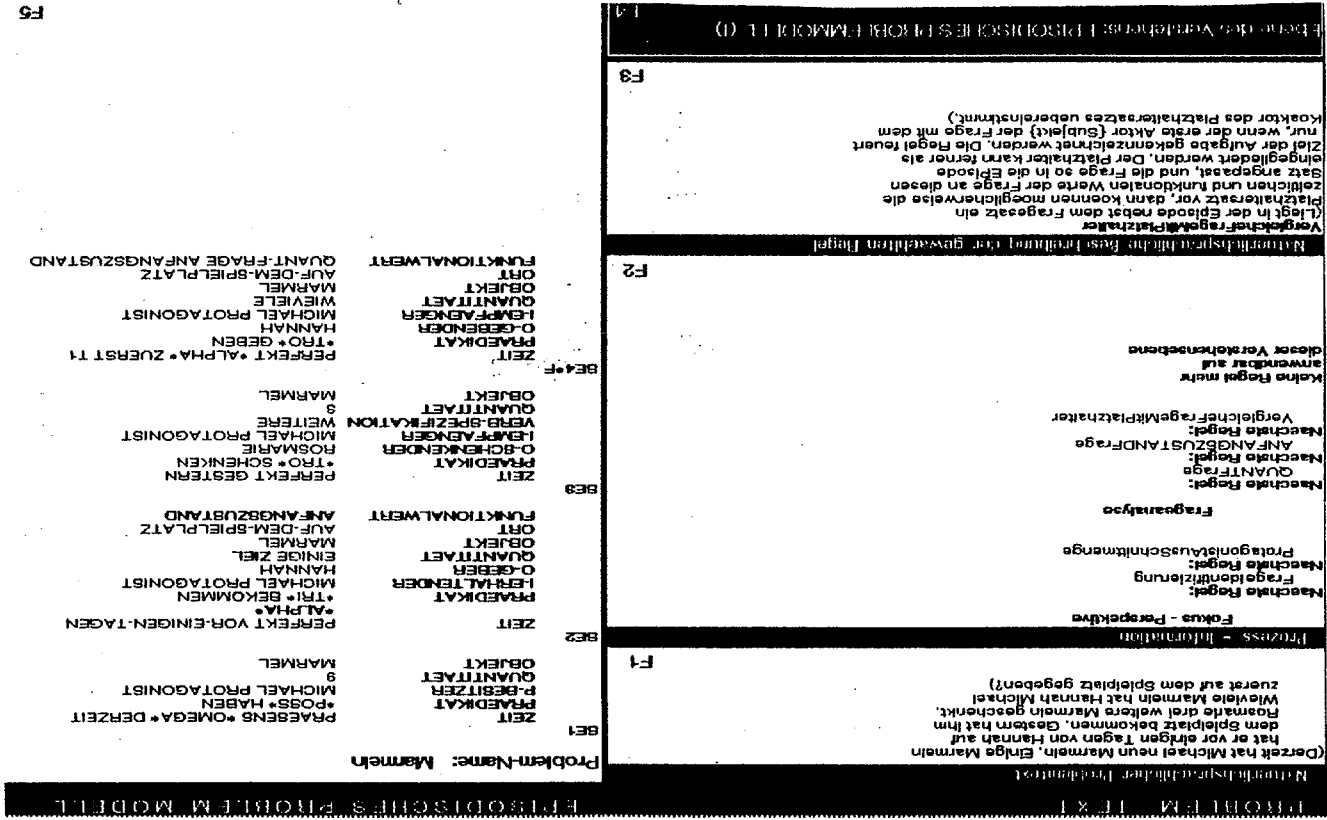


Abbildung 3: Aufbau des episodischen Problemmodells EPM. Erster Teil. F2 zeigt die Reihenfolge, in welcher die Regeln bei diesem Verstehensweg gefeuert haben.

Kognitive Modellierung

Die nächste Mikrostrategie, welche ihren Beitrag zum Situationsverständnis liefert, heißt *QuantFrage*. Sie reagiert auf das Pronomen WIEVIELE und schließt auf eine quantitative Frage: Der Funktionalwert, der in SE4*F bis dahin bloß FW:FRAGE hieß, wird nun zu FW:QUANT-FRAGE differenziert, was dem Erkenntnisakt gleichkommt, daß es sich bei SE4*F um eine *quantitative Frage* handelt. Das Frageverständnis wird durch die nächstfolgende Produktion *AnfangszustandFrage* noch einmal vertieft. Diese reagiert auf das im Zeitslot des Frageelementes befindliche Zeitadverb ZUERST (semantisches Primitivum *ALPHA*) und präzisiert die Handlungsrolle der durch die Frage ausgedrückten Teilhandlung als FW:QUANT-FRAGE ANFANGSZUSTAND. Damit ist SE4*F als Frageelement vollständig bestimmt. Wir wissen nun, daß die Geschichte damit angefangen hat, daß Hannah Michael eine zu bestimmende (unbekannte) Anzahl Marmeln gegeben hat. Die nächste Strategie *VergleicheFrageMitPlatzhalter* knüpft an die Frageanalyse an. Die Strategie hilft, zu erkennen, daß sich die Frage (SE4) und der Platzhaltersatz (SE2) entsprechen, womit die in SE4 gewonnenen Erkenntnisse zur Interpretation von SE2 genutzt werden können. Dies geschieht bei dieser Strategie im vorliegenden Fall dadurch, daß sie den Zeitwert T1 und den Funktionalwert FW:ANFANGSZUSTAND auch in das Situationselement SE2 überträgt und den QUANTITÄT-Slot durch das intentionale Merkmal ZIEL ergänzt.

Damit ist die Situationsanalyse bei der Bestimmung des zeitlichen und funktionalen Aufbaus der Handlung gelangt. Die Fortsetzung der Analyse zeigt Abbildung 4, wo durch das Auftreten von Konfliktskizzen nun auch das Potential der verschiedenen Verstehenswege deutlich sichtbar wird. Der in der Abbildung dokumentierte erste Verstehensweg (F2, F3) besteht aus zwei Inferenzen oder Mikrostrategien. *FixpunktAZ; Poss=>EZ* nutzt das bereits bekannte Wissen, daß SE2 die Anfangshandlung (FW: ANFANGSZUSTAND; ZEIT:T1) darstellt und daß das possessive episodische Element SE1 deshalb nunmehr für das Handlungsergebnis (FW:ENDZUSTAND; ZEIT:T3) stehen kann. Bei dieser Inferenz wird ein Stück Wissen über die allgemeine Struktur von Transferhandlungen präsupponiert, das Wissen nämlich, daß eine Transferhandlung immer zwischen zwei possessive Zustände eingebettet ist. Da Anfangs- und Endzustand bereits rekonstruiert sind, bleibt noch die Interpretation der dazwischen liegenden Handlung als *Zunahmetransfer (ZT)*. Diese Deutung besorgt, in Abstützung auf die VerbSpezifikation WEITERE sowie die Erkenntnis, daß in SE3 der Protagonist Michael in der Rolle des EMPFÄNGERS oder Begünstigten auftritt, die Strategie *P-TriMeh=>ZT*. Umgangssprachlich ist die Strategie plausibel: Wer sagt, er habe drei WEITERE Marmeln (dazu) bekommen, meint, daß dies nicht die ersten Marmeln sind, die er/sie bekommen hat, sondern daß es sich mindestens um das zweite Bekommen einer Anzahl Marmeln handelt. Dadurch, daß jedes episodische Element seine Funktionsrolle (FW: AZ, ZT, EZ) und seine temporale Rolle (ZEIT: T1, T2, T3) erhalten hat, ist der Handlungsaufbau der Situation durchsichtig geworden, das episodische Problemmodell aufgebaut.

In einem zweiten *Verstehenspfad* kommt zuerst die leistungsfähige Strategie *ZeitplanStruktur* zur Anwendung, welche die in den Situationselementen auftretenden Zeitadverbien DERZEIT (SE1), VOR EINIGEN TAGEN (SE2) und GESTERN (SE3) auf einer inneren Zeitskala abbildet, ordinal ordnet und die resultierenden Zeitwerte den entsprechenden Slots der Situationselemente zuordnet (T1 = SE2, T2 = SE3, T3 = SE1). Zur verbleibenden Deutung der Transferhandlung in SE3 (ZEIT=T2) tritt sodann wiederum die Strategie *P-TriMeh=>ZT* auf den Plan. Sie erschließt den Funktionalwert ZT aus der Beobachtung, daß in SE3 der Protagonist in der Rolle des Begünstigten auftritt.

Komplizierter gestaltet sich ein *dritter Verstehensweg*, bei dem von der Situation ausgegangen wird, daß der Problemlöser den Informationswert der Frage zur Interpretation der Problemhandlung nicht zu nutzen weiß, oder bei dem das Problem ohne Frage dargeboten wird. Eine Verstehensmöglichkeit besteht hier darin, daß mit Hilfe der Strategie *OmegaPoss* => *EZ* zuerst der Endzustand der Transferhandlung erschlossen wird. Die Strategie erkennt, daß es sich beim possessiven, im Präsens stehenden Prädikat (mit der Zeitcharakteristik *OMEGA*) um den zeitlichen Endpunkt (Zeit:T3; FW:ENDZUSTAND) der Episode handeln muß. Danach können mit Hilfe paarweiser Vergleiche der Zeitadverbien die Situationselemente wiederum in die zeitliche *ordo naturalis* gebracht werden. Am Schluß bleibt noch die Identifikation der Zwischenhandlung als Zunahmetransfer übrig. Diese erfolgt durch Betrachtung der zum Zeitpunkt T2 ablaufenden Handlung aus dem Blickwinkel des Protagonisten (P-Tri:T2 =>ZF).

3.2.3 Von der Situation zur Gleichung: Mathematisierung, numerische Problemlösung und Antwortsatz

Mit der Konstruktion des episodischen Problemmodells (EPM) ist der aufwendigste Teil der Verstehensarbeit abgeschlossen und die Basis die eigentliche Mathematisierung gelegt. Diese beinhaltet im wesentlichen die Herausarbeitung der mathematischen operativen Beziehungsgestalt einer Aufgabe und besteht aus vier strategischen Schritten: Der Reduktion des EPM zuerst auf das mathematische Problemmodells (MPM), dessen weitere Reduktion auf eine Lösungsgleichung, die numerische Auflösung der Gleichung und die Interpretation des numerischen Ergebnisses in einem Antwortsatz.

a) *Der perspektivische, frageleitete Übergang zum mathematischen Problemmodell (MPM)*. Unter der Kontrolle und Perspektive der (generierten) mathematischen Frage wird die Situationsvorstellung auf ihr mathematisch relevantes Gerüst reduziert: quantitative, funktionale und temporale - das heißt operativ relevante - Information wird im Problemmodell beibehalten, lokale, attraktive und weitere, mathematisch irrelevante Information, wird weggelassen.

Auf das Beispiel bezogen: Die Strategie *MPM-AZ-Frage* erzeugt eine reduzierte Situationsvorstellung, in der die *zeitliche, funktionale und quantitative* Information beibehalten und vom Rest abstrahiert wird (oberer Teil von F2 in Abbildung 5). Gleichzeitig wird die Episode in die *ordo naturalis*, die chronologische Handlungsordnung gebracht. Als fiktive Problemzusammenfassung durch eine Versuchsperson würde die Aufgabe umgangssprachlich etwa so lauten: "Wieviele (Marmeln) waren am Anfang, wenn drei dazu kamen und am Schluß neun da waren?"

b) *Die Abstraktion der Lösungsgleichung*. Das MPM, bei welchem auf die gesuchte mathematische Größe fokussiert wird, stellt die eigentliche Nahtstelle zwischen der situationsbezogen-qualitativen und der mathematischen Problemstruktur dar. Trotzdem bleibt in der abstrakt betrachteten Transferstruktur mit mathematischer Lücke die algebraische oder numerische Struktur immer noch implizit, weswegen es eines weiteren Reduktionsschrittes bedarf, um diese vollends aus dem Handlungskontext herauszulösen, das heißt, um die *temporale Verknüpfungsstruktur von Handlungselementen in eine atemporale*,

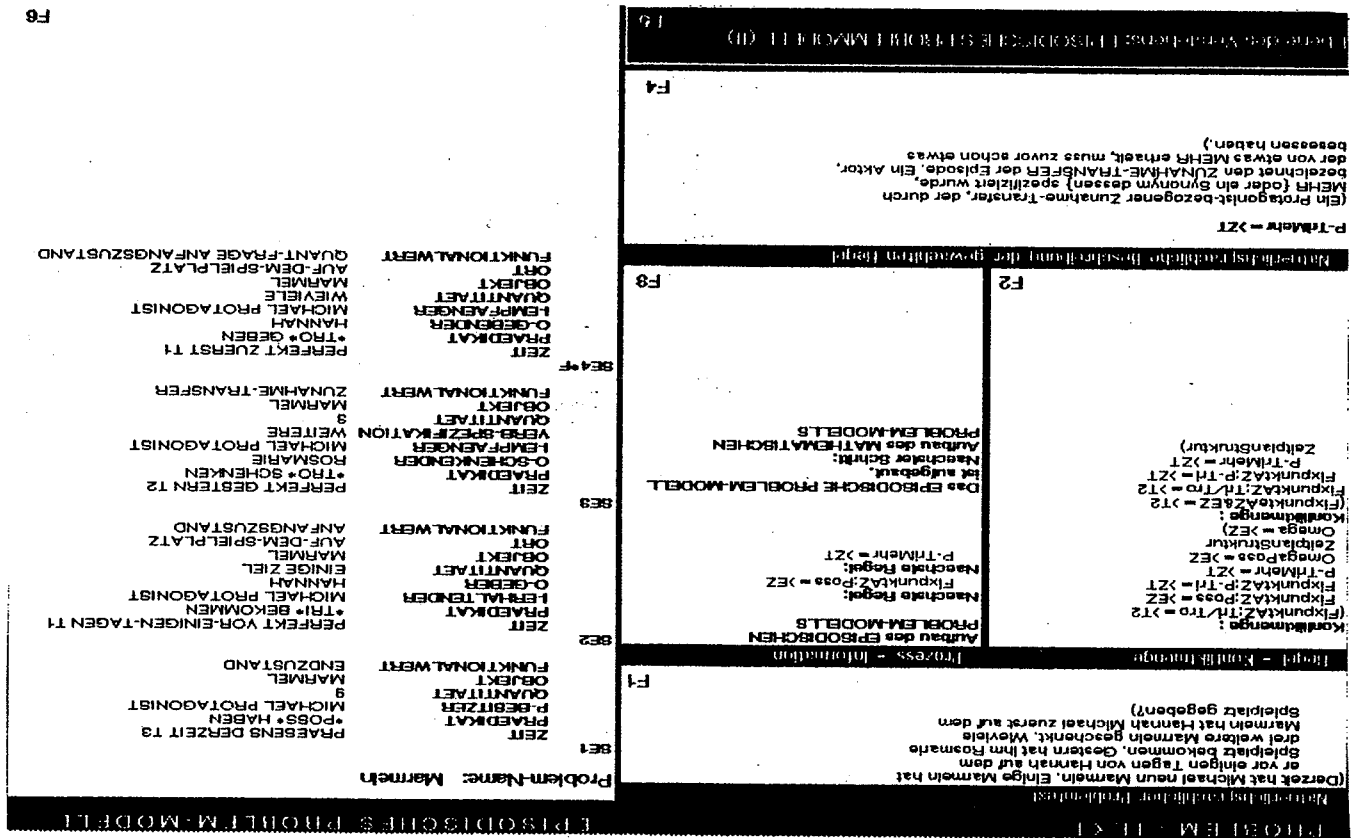


Abbildung 4: Fortsetzung und Abschluss des Aufbaus des EPM. F2 zeigt die Regelkonfliktmengen, aus denen aufgrund strategischer Metaregeln weitere Verstehenswege gebildet werden können.

rein numerische oder algebraische Struktur zu transformieren.⁸ Der Schritt erfolgt in unserem Beispiel durch die Strategie *AbstrahiereGleichung*, durch welche das MPM auf die numerische Struktur $? + 3 = 9$ reduziert wird.

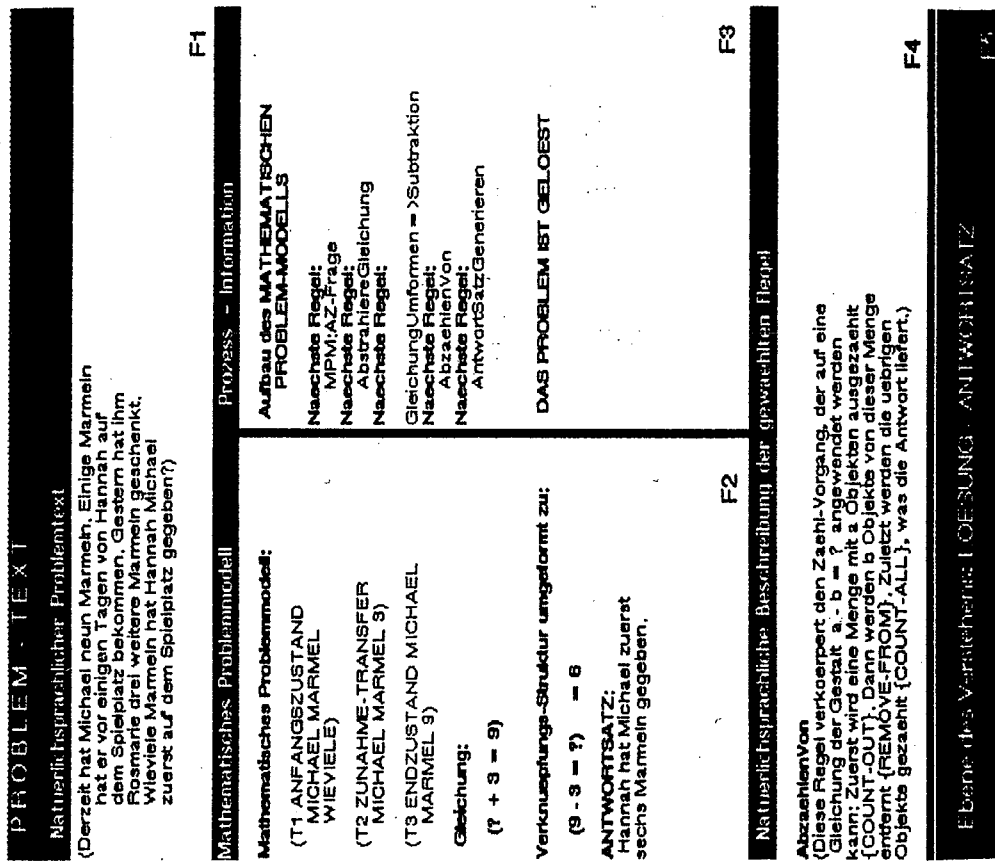


Abbildung 5: Abstraktion des mathematischen Problemmodells und numerische Problemlösung. Das MPM ist im oberen, die Lösungsgleichung und ihre numerische Umformung sind im unteren Teil von F2 ersichtlich. Das MPM wurde durch einen fragegeleiteten Reduktionsprozess aus dem EPM (F6 in Abb. 4) gewonnen.

c) Die *Auflösung der Lösungsgleichung*. Diese erfolgt, je nach Vorwissen des Problemlösers, auf zwei Arten: mit Hilfe einfacher Zählstrategien, wie man sie bei Vorschulkindern antrifft (Carpenter, Moser & Romberg, 1982; Carpenter & Moser, 1983) oder mit Hilfe arithmetischer Operationsverfahren. Zähloperationen, welche empirisch gut bekannt sind (Piaget & Szeminska, 1941; Gel-

⁸ Dieser Schritt erfolgt in Übereinstimmung mit Aebli's (im Anschluss an Piaget erfolgte) Deutung der elementaren mathematischen Operationen als *abstrakte Handlungen* (Aebli, 1980).

man & Gallistel, 1978; Gelman & Meck, 1983) und sich auch nahtlos in die Handlungstheorie von SPS einfügen, können als Verfahren der *direkten Modellierung*, d.h. der interiorisiert oder effektiv ausgeführten handlungsmäßigen Simulation numerischer Verknüpfungsstrukturen mit Lücke, aufgefaßt werden.

Im Beispiel (Abbildung 5) erfolgt zuerst die Umformung (*GleichungUmformen* => *Subtraktion*) der Verknüpfungsstruktur $? + 3 = 9$ in die ausführbare Rechnung $9 - 3 = ?$, und anschließend deren Auflösung mit Hilfe der Abwärtszählstrategie *AbzählenVon*.

d) Die *semantische Interpretation der numerischen Lösung*. Dieser letzte Verarbeitungsschritt besteht in der Generierung eines situationsbezogenen Antwortsatzes, das heißt der Deutung der numerischen Lösung in Begriffen der Situation. Kinder haben oft Mühe mit diesem Prozeß der semantischen Interpretation der Lösungszahl. Sie wissen nach dem Rechnungsvorgang häufig nicht mehr, *was* sie berechnet haben, bzw. *auf welche Frage* sie nun eigentlich eine Antwort gefunden haben. SPS aktiviert, nachdem das numerische Ergebnis ermittelt ist, noch einmal seine episodische Situationsvorstellung, sucht darin die mathematische Lücke und setzt darin die Lösungszahl ein. Schließlich generiert das Modell einen Antwortsatz. Im Beispiel knüpft die Strategie *AntwortSatzGenerieren* an den vorhandenen Fragesatz an und formt ihn nach grammatikalischen Regeln zu einem auf die Protagonisten bezogenen Antwortsatz um. Die Modellierung endet mit dem Satz: "Zuerst hat Michael von Hannah sechs Marmeln bekommen."

Was hier als Simulation des Verständnisses und der Lösung einer mathematischen Textaufgabe Schritt für Schritt an einem Beispiel entfaltet wurde, kostet den geübten Zweitkläßler zwischen zwanzig Sekunden und einer Minute. Viele der rekonstruierten Schritte werden dabei rasch und intuitiv, das heißt relativ unbewußt vollzogen. Dies heißt aber, daß nicht nur wer ein lauffähiges Computermodell entwickeln will, sondern auch, wer Schüler (oder angehende Lehrende) anleiten will, wie man einfache Texte versteht und wie man mathematische Textaufgaben löst (oder zu ihrer Lösung anleitet), nicht darum herum kommt, einige dieser Intuitionen explizit zu fassen.

4 Empirische Konsequenzen von SPS

Gemäß einer strukturalistischen (Nicht-Aussagen-)Konzeption von Theorien (Stegmüller, 1986), lassen sich psychologische Theorien nicht durch kritische Entscheidungsexperimente, sondern nur mit Bezug auf *intendierte Anwendungen* (ebenda) empirisch qualifizieren (Foppa, 1986). Um Wahrheits- oder Gütekriterien für die Theorieprüfung zu gewinnen, ist deshalb auch mit Bezug auf die vorliegende Theorie zu fragen, auf welche Empirie bzw. auf welche Anwendungssituationen sie sich bezieht. SPS läßt sich unter zwei Modellansprüchen qualifizieren und empirisch prüfen.

Unter *nomologischem Aspekt* handelt es sich bei SPS um ein *psychologisches Erklärungs- oder Prozeßmodell*. Empirische Fragen richten sich hier auf die Übereinstimmung von Verhaltensaspekten des Modells mit solchen von Versuchspersonen, etwa mit Bezug auf Strategien, Lösungswege und Aufgabenschwierigkeit. Dabei gilt, daß je mehr sich die zwei Systeme - Modell und Versuchspersonen - nach strukturellen und funktionalen Merkmalen und über Indikatoren, die Bestandteil der Theorie

sein müssen, zur Deckung bringen lassen, desto eher wird geneigt sein man, das eine System als eine Simulation und damit als Erklärung des andern zu akzeptieren.⁹

Entsprechend der Hypothese, daß der textinduzierte, durch Inferenzen und Elaboration gekennzeichnete Aufbau eines episodischen und mathematischen Situationsmodells den Kern des Verstehens und Lösens einer Textaufgabe darstellt, haben sich die bisher durchgeführten Experimente zur Prüfung des psychologischen Prozedurmodells SPS vor allem auf die Variation sprachlicher und situationsbezogener Aufgabenmerkmale bezogen. Es hat sich gezeigt, daß neben mathematischen Strukturvariablen, wie der Transferrichtung oder dem Ort der mathematischen Lücke, Variablen, die sich auf die Präsentationsstruktur der Aufgaben beziehen, tatsächlich eine wichtige Rolle bei deren Verständnis und Lösung zukommt (Reusser, 1989b; Staub & Reusser, 1991). Bei den in SPS modellierten und bislang empirisch variierten Aufgabenmerkmalen handelte es sich um den Einfluß expliziter Problemfragen, die Variation der Textordnung gegenüber der Handlungsordnung, die Variation der Erzählperspektive sowie verschiedener Typen von temporalen und funktionalen Cues, durch welche die (mathematische) Situationsstruktur einer Aufgabe mehr oder weniger deutlich signalisiert wird. Die Ergebnisse der Experimente stehen im Einklang mit dem Modell zugrundeliegender *sprachlich-linguistischen Erklärungshypothese*, wie sie von Cummins, Kintsch, Reusser und Weimer (1988) als Alternative zu einer *logisch-mathematischen Erklärungshypothese* für die Verstehens- und Lösungsschwierigkeiten bei mathematischen Textaufgaben formuliert worden ist.

Pragmatischer Aspekt. SPS kann nicht nur als ein psychologisches Erklärungsmodell, sondern ebenso als ein *didaktisches Handlungs- und Anleitungsmodell* des mathematischen Verstehens und Problemlösens gesehen werden. Ob sich SPS in didaktischen Verstehens- und Handlungskontexten bewährt, hängt von der Verantwortung von Fragen ab wie: Lassen sich über Einsichten des Modells die Diagnose- und Urteilsfähigkeit von Lehrenden mit Bezug auf das sprachlich-mathematische Verstehen schärfen? Und lassen sich die durch das Modell gewonnenen Erkenntnisse bei der didaktischen Anleitung zum sprachlichen und mathematischen Verstehen nutzen?

Eine didaktische Umsetzung hat SPS bisher vor allem durch die Entwicklung des *computergestützten tutoriellen Systems HERON* erfahren (Reusser, Kämpfer & Stüssi, 1990; Reusser, 1992). HERON unterstützt Schüler von der Grundschule bis zur Sekundarstufe I beim Verstehen und Lösen mathematischer Situationsaufgaben. Neben Hilfen zur Durchdringung der sprachlichen und sachlichen Struktur von Textaufgaben liefert der Tutor den Schülern Werkzeuge zur Mathematizierung, das heißt zum externalisierten Aufbau mathematischer Problemmodelle am Bildschirm. HERON geht davon aus, daß ein Schüler beim Verstehen und Lösen einer mathematischen Textaufgabe einige der Repräsentationen erzeugt - und dabei auch den Schwierigkeiten begegnet - wie sie in SPS modelliert und beschrieben wurden. In Analogie zu den Makrostrategien von SPS besteht HERON aus drei miteinander verbundenen Komponenten: (I) einer Anleitungskomponente zum Verstehen des Problemtextes und der Sachsituation, (II) einer Komponente zur Lösungsplanung und Konstruktion von Problemmodellen in der Gestalt von Lösungsbäumen (Aebli, Ruthemann & Staub, 1986), und einer Problemlösekomponente, die das Aufsstellen und Auflösen mathematischer Gleichungen unterstützt.

⁹ Allerdings muss hier angemerkt werden, dass keine formalen Methoden existieren, um die Anpassungsgüte von Simulationsmodellen an empirische Daten auch in einem statistischen Sinne zu bestimmen (vgl. Greeno & Simon, 1984).

Mit der Umsetzung in einen Tutor stellt das Modell SPS, welches unter dem doppelten Anspruch des psychologischen Prozedurmodells und der didaktischen Handlungstheorie steht, sowohl eine *nichtintentionale Prozedurtheorie* als auch eine *intentionale Handlungstheorie* (beides im Sinne von Herrmann, 1987) dar. SPS steht somit exemplarisch für den Versuch einer psychologischen und didaktischen Analyse der bei Sachaufgaben implizierten Verstehens- und Mathematizierungsprozesse.

Literatur

- Aebli, H. (1980). Denken: Das Ordnen des Tuns. Band 1: Kognitive Aspekte der Handlungstheorie. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Aebli, H., Ruthemann, U. & Staub, F. (1986). Sind Regeln des Problemlösens lehrbar? Zeitschrift für Pädagogik, 32, 617-638.
- Ballsaedt, S.P., Mandl, H., Schnotz, W. & Tergan, S.O. (1981). Texte verstehen - Texte gestalten. München: Urban & Schwarzenberg.
- Bobrow, D.G. (1964). Natural language input for a computer problem solving system. Doctoral thesis. Massachusetts Institute of Technology, September 1964.
- Bock, M. (1978). Wort-, Satz-, Textverarbeitung. Stuttgart: Kohlhammer.
- Briars, D.J. & Larkin, J.H. (1984). An integrated model of skill in solving elementary word problems. Cognition and Instruction, 1, 245-296.
- Camap, R. (1952). Meaning postulates. Philosophical Studies, 3, 65-73.
- Carpenter, T.P., Hiebert, J. & Moser, J.M. (1981). The effect of problem structure on first-grader's initial solution processes for simple addition and subtraction problems. Journal for Research in Mathematics Education, 12, 27-39.
- Carpenter, T.P., Moser, J.M. & Romberg, T.A. (Hrsg.) (1982). Addition and subtraction: a cognitive perspective. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Carpenter, T.P. & Moser, J.M. (1983). The acquisition of addition and subtraction concepts. In R. Lesh & M. Landau (Hrsg.), Acquisition of mathematics concepts and processes. N.Y.: Academic Press.
- Charniak, E. (1981). The case-slot identity theory. Cognitive Science, 5, (3), 285-292.
- DeCorte, E., Verschaffel, L. & DeWin, L. (1985). Influence of rewording verbal problems on children's problem representations and solutions. Journal of Educational Psychology, 77, 460-470.
- Cummins, D., Kintsch, W., Reusser, K. & Weimer, R. (1988). The role of understanding in solving word problems. Cognitive Psychology, 20, 405-438.
- Dennett, D.C. (1978). Brainstorms: Philosophical essays on mind and psychology. Cambridge, Mass.: Cambridge University Press.
- van Dijk, T.A. & Kintsch, W. (1983). Strategies of discourse comprehension. N.Y.: Academic Press.
- Duncker, K. (1963). Zur Psychologie des produktiven Denkens. Berlin: Springer. (Original auf englisch, 1935)
- Ericsson, A.K. & Simon, H.A. (1984). Protocol analysis. Verbal reports as data. Cambridge, Mass.: MIT-Press.
- Fillmore, C.J. (1968). The case for case. In E. Bach & R.T. Harms (Hrsg.), Universals in linguistic theory. New York: Holt, Rinehart and Winston.
- Fillmore, C.J. (1977). Topics in lexical semantics. In R.W. Cole (Hrsg.), Current issues in linguistic theory. Bloomington: Indiana University Press.
- Foppa, K. (1986). Thesen zur Rechtfertigungsproblematik in der empirischen Psychologie. Unveröffentlichtes Thesenpapier. Wintersemester 1985/86. Psychologisches Institut der Universität Bern.
- Gelman, R. & Gallistel, C.R. (1978). The child's understanding of number. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Gelman, R. & Meck, E. (1983). Preschoolers' counting: principles before skill. Cognition, 13, 343-359.
- Greeno, J.G. & Simon, H.A. (1984). Problem solving and reasoning (Technical Report). Pittsburgh: Carnegie-Mellon University.

- Herrmann, Th. (1987). Was ist das 'Psychologische' an psychologischen Theorien? In M. Amelang (Hrsg.), Bericht über den 35. Kongress der Deutschen Gesellschaft für Psychologie in Heidelberg, Band 2, 169-167. Göttingen: Hogrefe.
- Hilgard, E.R. & Bower, G.W. (1971). Theorien des Lernens. Band II. Stuttgart: Klett.
- Hörmann, E. (1976). Meinen und Verstehen. Grundzüge einer psychologischen Semantik. Frankfurt: Suhrkamp.
- Hörmann, H. (1983). Was tun die Wörter miteinander im Satz? oder Wieviele sind einige, mehrere und ein paar? Göttingen: Hogrefe.
- Johnson-Laird, P.N. (1983). Mental models. Towards a cognitive science of language, inference, and consciousness. Cambridge: Cambridge University Press.
- Kilpatrick, J. (1985). A retrospective account of the past twenty-five years of research on teaching mathematical problem solving. In E.A. Silver (Hrsg.), Teaching and learning mathematical problem solving (S. 1-15). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Kintsch, W. (1974). The representation of meaning in memory. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Kintsch, W. & Van Dijk, T.A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85, 363-394.
- Kintsch, W. & Greeno, J.G. (1985). Understanding and solving word arithmetic problems. *Psychological Review*, 92, 109-129.
- Klahr, D., Langley, P. & Neches, R. (Hrsg.) (1987). Production system models of learning and development. Cambridge, Mass.: MIT-Press.
- Köhler, W. (1963). Intelligenzprüfungen an Menschenaffen. Berlin: Springer. Original erschienen 1917
- Miller, G.A. (1956). The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 63, 81-97.
- Minsky, M.L. (1975). A framework for representing knowledge. In P.H. Winston (Hrsg.), The psychology of computer vision (S. 211-277). New York: McGraw-Hill.
- Morgan, J.L. & Selner, M.B. (1980). Discourse and linguistic theory. In R.J. Spiro, B.C. Bruce & W.F. Brewer (Hrsg.), Theoretical issues in reading comprehension: perspectives from cognitive psychology, linguistics, artificial intelligence, and education. (S. 165-200). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- von Neumann, J. (1960). The general and logical theory of automata. In J.R. Newman (Hrsg.), The world of mathematics, Vol. 4 (S. 2070-2098). New York: Random Heights.
- Newell, A. (1973). Production systems: models of control structures. In W.G. Chase (Hrsg.), Visual information processes (S. 463-526). N.Y.: Academic Press.
- Newell, A. (1980). Physical symbol systems. *Cognitive Science*, 4, 135-183.
- Newell, A., Shaw, J.C. & Simon, H.A. (1958). Elements of a theory of human problem solving. *Psychological Review*, 65, 151-168.
- Newell, A. & Simon, H.A. (1961). GPS, a program that simulates human thought. In E.A. Feigenbaum & J. Feldman (Hrsg.) (1963), Computers and thought (S. 279-293). New York: McGraw-Hill.
- Newell, A. & Simon, H.A. (1972). Human problem solving. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Ohlsson, S. (1988). Computer simulation and its impact on educational research and practice. *International Journal of Educational Research*, 12(1), 5-34.
- Opwis, K. (1988). Produktionssysteme. In: H. Mandl & H. Spada (Hrsg.), *Wissenspsychologie* (S. 74-98). München: Urban & Schwarzenberg.
- Paige, J.M. & Simon, H.A. (1966). Cognitive processes in solving algebra word problems. In B. Kleinmuntz (Hrsg.), *Problem solving*. New York: Wiley.
- Papert, S. (1973). Theory of knowledge and complexity. In G.J. Dalenoot (Hrsg.), *Process models for psychology* (S. 34-76). Rotterdam University Press.
- Piaget, J. & Szeminska, A. (1941). La Genèse du nombre chez l'enfant. Neuchâtel: Delachaux & Niestlé.
- Reitman, W.R. (1967). Computer simulation models: How to invent what you need to know. Paper presented at University of Chicago. Behavioral science workshop. April 1967.
- Reusser, K. (1984). Problemlösen in wissenschaftstheoretischer Sicht. Problemformulierung und Problemverständnis. Dissertation. Universität Bern.
- Reusser, K. (1985). From situation to equation. On formulation, understanding, and solving "situation problems" (Technical Report No. 143). University of Colorado, Boulder, Institute of Cognitive Science.

- Reusser, K. (1988). Problem solving beyond the logic of things: Contextual effects on understanding and solving word problems. *Instructional Science*, 17, 309-339.
- Reusser, K. (1989a). Vom Text zur Situation zur Gleichung. Kognitive Simulation von Sprachverständnis und Mathematisierung beim Lösen von Textaufgaben. Habilitationsschrift. Universität Bern.
- Reusser, K. (1989b). Textual and situational factors in solving mathematical word problems. Paper presented at the Third Conference of the European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI), Madrid, September 4-7, 1989.
- Reusser, K. (1992). Tutoring systems and pedagogical theory: Representational tools for understanding, planning, and reflection in problem-solving. In S. Lajoie & S. Derry (Hrsg.), *Computers as cognitive tools*. Hillsdale, NJ: Erlbaum (in press).
- Reusser, K., Kämpfer, A. & Stüssi, R. (1990). HERON: Ein adaptives tutorielles System zum Lösen mathematischer Textaufgaben. In A. Reuter (Hrsg.), *Informatik auf dem Weg zum Anwender*. 20. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik, Band II (S. 368-376). Berlin: Springer.
- Riley, M.S., Greeno, J.G. & Heller, J.I. (1983). Development of children's problem solving ability in arithmetic. In H.P. Ginsburg (Hrsg.), *The development of mathematical thinking* (S. 153-196). N.Y.: Academic Press.
- Schmalhofer, F. & Wetter, Th. (1986). Kognitive Modellierung: Menschliche Wissensrepräsentationen und Verarbeitungsstrategien. In G. Richter & Th. Christaller (Hrsg.), *Künstliche Intelligenz: Frühjahresschule Dassel 1986*. Informatikfachberichte. Heidelberg: Springer.
- Simon, H.A. (1962). An information processing theory of intellectual development. Monographs of the society for research in child development, 27, 2.
- Staub, F.C. & Reusser, K. (1991). What makes mathematical word problems difficult? The role of presentational factors. Fourth European Conference for Research on Learning and Instruction (EARLI), Turku, Finland, August 1991.
- Stegmüller, W. (1986). Theorie und Erfahrung: Dritter Teilband. Die Entwicklung des neuen Strukturalismus seit 1973. Berlin: Springer.
- Stiefenhofer, J. & Gehri, H. (1988). Textverständnis beim Lösen von mathematischen Textaufgaben in SPS. Ein Parser. Universität Bern: Abteilung Pädagogische Psychologie und Institut für Informatik.
- Tolman, E.C. (1932). Purposive behavior in animals and men. New York: Appleton-Century-Crofts 1967.
- Turing, A.M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 59, 433-460. Reprinted in E.A. Feigenbaum & J. Feldman (Hrsg.) (1963), *Computers and thought* (S. 11-35). New York: McGraw-Hill.
- Walz, D.L. (1982). The state of the art in natural-language understanding. In W.C. Lehnert & H. Ringle (Hrsg.), *Strategies for natural language processing*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Weizenbaum, J. (1976). *Computer power and human reason*. San Francisco: Freeman.
- Winston, P.H. (1984). *Artificial intelligence*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.
- Winston, P.H. & Horn, B.K.P. (1981). *LISP*. Reading, Mass.: Addison-Wesley.

K. Reiss M. Reiss H. Spandl (Hrsg.)

Maschinelles Lernen

Modellierung von Lernen mit Maschinen

Mit 96 Abbildungen und 11 Tabellen

Professor Dr. Kristina Reiss
Dr. Matthias Reiss
Stedingerstraße 40, W-7000 Stuttgart 31

Dr. Horst Spandl
Karlstraße 86, W-7500 Karlsruhe 1

ISBN 3-540-55641-9 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1992
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

332140-5 4 3 2 1 0 - Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo
Hong Kong Barcelona