

- Manuela Lenzen/Günther Knoblich (Hg.): *Embodied Communication in Humans and Machines*. Oxford, 179–200.
- Stich, Stephen (1984): Relativism, rationality, and the limits of intentional description. In: *Pacific Philosophical Quarterly* 65, 211–235.
- Tarski, Alfred (1935–1936): Der Wahrheitsbegriff in den formalisierten Sprachen. In: *Studia Philosophica* 1, 261–405.
- Tomasello, Michael (2009): *Why We Cooperate*. Cambridge (Mass.). [dt.: *Warum wir kooperieren*. Frankfurt a.M. 2010].
- Wachsmuth, Ipke (2000): Kommunikative Rhythmen in Gestik und Sprache. In: *Kognitionswissenschaft* 8, 151–159.
- Wachsmuth, Ipke/Lenzen, Manuela/Knoblich, Günther (Hg.) (2008): *Embodied Communication in Humans and Machines*. Oxford.
- Weaver, Warren (1949/1955): Translation. In: William Locke/Donald Booth (Hg.): *Machine Translation of Languages*. Cambridge (Mass.), 15–23.
- Weizenbaum, Joseph (1966): ELIZA – A computer program for the study of natural language communication between man and machine. In: *Communications of the Association for Computing Machinery* 9, 36–45.
- Zahavi, Amotz (1997): *The Handicap Principle*. Oxford. [dt.: *Signale der Verständigung*. Frankfurt a. M. 1998].

Manuela Lenzen

## 11. Kreativität und Problemlösen

Unter Problemlösen versteht man den Prozess der Ausführung einer, häufig komplexen, Folge von Handlungen zur Erreichung bestimmter Ziele, die nicht durch den Einsatz von Routineverfahren erreicht werden können (Funke 2003; Newell/Simon 1972). Bei menschlichen Problemlösern können solche Handlungen konkret in der Welt oder mental ausgeführt werden. In der Künstliche-Intelligenz-Forschung (KI) können Problemlösealgorithmen mit Systemen mit Aktorik (insbesondere Robotern; s. Kap. II.B.2) kombiniert werden oder auf (symbolischen) Repräsentationen von realen Situationen ausgeführt werden (s. Kap. III.1).

Sowohl in der Psychologie (s. Kap. II.E) als auch in der KI (s. Kap. II.B.1) ist im Standardfall für Problemlösen die Ausgangssituation klar definiert, die Menge der möglichen Handlungen vorgegeben und das Problemlöseziel eindeutig beschreibbar (s. Kap. IV.17). Ist eine dieser Voraussetzungen nicht gegeben, befindet man sich im Bereich des kreativen Problemlösens. Kreativität ist allgemein dadurch charakterisiert, dass Gegebenes derart kombiniert wird, dass Neues entsteht (Boden 2004; Sternberg/Lubart 1999). Beispiele sind die Bildung von Metaphern, die Entdeckung mathematischer Konzepte, die Konstruktion von Artefakten in der Kunst sowie die Entwicklung innovativer Produkte.

### Problemlösen

Problemlösen war eines der zentralen Themen zu Beginn der KI in den 1950er und 1960er Jahren. Konzepte, die in dieser Zeit entwickelt wurden, bilden bis heute die methodische Grundlage für verschiedene Bereiche der KI. Insbesondere Ansätze zur heuristischen Suche finden sich in vielen verschiedenen Anwendungen – vom automatischen Theorembeweiser bis hin zur Roboternavigation (s. Kap. II.B.2). Die frühen Forschungsarbeiten sind insbesondere durch den Problemraumansatz von Allen Newell und Herbert Simon geprägt, deren Vorschlag eines *general problem solver* in ihrer Monografie *Human Problem Solving* (Newell/Simon 1972) detailliert dargestellt ist. Die Arbeiten von Newell und Simon sind ein frühes Beispiel für kognitionswissenschaftliche Forschung, da ihr erklärtes Ziel darin bestand, Computermodelle zu entwickeln, die menschliches Problemlösen simulieren.

*Klassifikation von Problemen.* Die wesentlichen Bestandteile eines Problems sind erstens eine Ausgangssituation (Anfangszustand), zweitens ein oder mehrere Problemlöseziele sowie drittens Operatoren, die auf die Ausgangssituation und folgende Zwischenzustände angewendet werden können, um Problemlöseziele zu erfüllen. Kann in einer gegebenen Situation ein gewünschtes Ziel durch Anwendung eines einzigen Operators oder durch Instanziierung eines Handlungsschemas realisiert werden, so handelt es sich nicht mehr um ein Problem, sondern um eine Aufgabe. Ob etwas eine Aufgabe oder ein Problem ist, hängt u. a. von dem Wissen und den Fertigkeiten ab, über die ein System verfügt. Beispielsweise kann das Umformen eines mathematischen Ausdrucks für einen Schüler ein Problem darstellen, für einen ausgebildeten Mathematiker aber eine Aufgabe. Nach Greeno (1978) können drei Arten von Problemen unterschieden werden:

- Bei *Transformationsproblemen* sind der Anfangszustand und die zulässigen Handlungen bekannt, und die Zielerreichung kann eindeutig festgestellt werden. Das Problem besteht darin, eine zulässige Folge von Operatoranwendungen zu finden, mit denen der Anfangszustand in den Zielzustand transformiert werden kann. Beispiele sind der Turm von Hanoi (s. u.), Wasserumschüttaufgaben (Schmid et al. 2003) oder das Missionare-und-Kannibalen-Problem (Greeno 1974).
- Bei *Neuordnungsproblemen* sind eine Menge von Elementen, zulässige Operatoren und eine Zielbeschreibung gegeben. Beispiele sind Anagramme, d. h. die Neuordnung von Buchstaben in einem Wort so, dass wieder ein zulässiges Wort entsteht, krypto-arithmetische Aufgaben, bei denen in einer Rechenaufgabe Buchstaben so durch Ziffern ersetzt werden müssen, dass die Aufgabe arithmetisch korrekt ist, oder Sudoku-Probleme.
- *Induktionsprobleme* verlangen die Entdeckung einer Gesetzmäßigkeit. Gegeben sind Daten, aus denen eine Regel extrahiert werden soll. Beispiele sind das Fortsetzen von Zahlenreihen oder geometrische Matrix-Probleme, wie sie etwa im Raven-Matrix-Test vorkommen (Carpenter et al. 1990).

Diese Problemarten werden auch als ›geschlossene Probleme‹ bezeichnet (McCarthy 1968). Im Gegensatz dazu stehen *offene Probleme*, die sich nach Dörner (1989) folgendermaßen charakterisieren lassen:

- *Intransparenz:* Es liegen nicht alle zur Problemlösung benötigten Informationen vor, teilweise müssen sie erst noch aktiv beschafft werden;

wann die durchzuführende Informationssuche abgebrochen werden kann (z. B. unter Verwendung einer Stopp-Regel), bleibt vielfach unklar.

- *Dynamik:* Anders als bei statischen Problemen ändert sich der Problemraum während der Bearbeitung häufig und man muss sich auf veränderte Bedingungen einstellen bzw. diese antizipieren; gerade biologische, physikalische oder chemische Abläufe (schnell: Explosionen; langsam: Wachstumsprozesse) können unvorhersehbare Entwicklungen nehmen.
- *Komplexität und Vernetztheit* spielen im Alltag eine ebenfalls wichtige Rolle und beziehen sich auf die Anzahl der beteiligten Variablen und deren Verbindung untereinander: Die isolierte Beeinflussung einer einzelnen Größe gelingt infolge der Vernetztheit nur selten und hat die (oftmals unbeabsichtigte) gleichzeitige Veränderung anderer Größen zur Folge. Komplexität bringt es zudem mit sich, dass die problemlösende Person möglicherweise wichtige Aspekte einer Problemsituation übersieht und damit eine fehlerhafte Komplexitätsreduktion betreibt.
- *Vielzieligkeit:* In alltäglichen Problemsituationen sind dagegen multiple Zielkonstellationen typisch, bei denen die gleichzeitige Optimierung bzw. Maximierung von Zielgrößen vorzunehmen ist. Dies kann zu Konflikten führen und ist oft nur durch wertebasierte Priorisierung auflösbar.

Solche offenen Probleme können nicht mit Standardstrategien, etwa durch heuristische Suche, gelöst werden (s. Kap. IV.17), sondern erfordern kreative Problemlöseprozesse. Offene Probleme werden v. a. im Bereich des komplexen Problemlösens (Funke 2010) betrachtet. Eine spezielle Klasse offener Probleme sind Einsichtsprobleme (s. u.), wie sie bereits in der Gestaltpsychologie beschrieben wurden.

*Problemlösen als Suche im Problemraum.* Die Arbeiten von Newell und Simon haben den in der KI bis heute zentralen Ansatz von Problemlösen als Suche im Problemraum geprägt. Eine Problemlösung ist eine Folge von Operatoranwendungen, die den Anfangszustand in einen Zustand transformiert, in dem die Problemlöseziele erfüllt sind. Problemlöseoperatoren haben üblicherweise Anwendungsbedingungen und können in Form von Wenn-Dann-Regeln (Produktionen) dargestellt werden.

Ein typisches und viel diskutiertes Problem ist das Turm-von-Hanoi-Problem (Kotovsky et al. 1985), bei dem mehrere Scheiben verschiedenen Durchmessers in möglichst wenigen Schritten von einem

Ausgangsstab auf einen Zielstab zu bewegen sind (siehe Abb. 1). Die Anwendungsbedingungen sind: Es darf erstens immer nur eine Scheibe bewegt werden, und es darf zweitens nie eine größere auf eine kleinere Scheibe gelegt werden.

Für das Turm-von-Hanoi-Problem ist der Anfangszustand, dass ein Turm aus drei der Größe nach geordneten Scheiben auf Stab A steht. Problemlöseziel ist, dass der geordnete Turm auf Stab C steht. Ein Problemlöseoperator ist z. B., dass im Anfangszustand die oberste Scheibe von Stab A nach Stab B versetzt wird. Durch die Operatoranwendung auf den aktuellen Zustand wird dieser in einen neuen, einen sog. Folgezustand, transformiert.

Die Menge aller möglichen Zustände, die ein Problem annehmen kann, definiert zusammen mit den Problemlöseoperatoren den Problemraum. Ein Problemraum ist ein Graph, in dem jeder Knoten einen Zustand repräsentiert. Kann ein Zustand durch die Anwendung eines Problemlöseoperators direkt in einen anderen überführt werden, werden die beiden

Zustände durch eine Kante verbunden. Der Problemraum für das Turm-von-Hanoi-Problem mit drei Scheiben ist in Abbildung 1 dargestellt: Beispielsweise kann im Anfangszustand (oberster Knoten) die kleinste Scheibe entweder auf Stab B oder auf Stab C gesetzt werden (zweite Ebene von Knoten). Da die Scheibe wieder zurück auf Stab A gesetzt werden kann, ist die Kante bidirektional. Bei Zustandsübergängen, die nur in eine Richtung gehen, wird die Kante mit einem Pfeil markiert. Auch wenn Newell und Simon festgelegt haben, dass ein Problemlöser den Problemraum mental repräsentiert, scheint dies aufgrund der beschränkten Kapazität des menschlichen Arbeitsgedächtnisses keine plausible psychologische Annahme zu sein. Alternativ kann man davon ausgehen, dass menschliche Problemlöser immer nur einen kleinen Teil des Problemraums, nämlich jene Zustände, die gerade exploriert werden, im Gedächtnis halten.

Bei vielen Problemen wächst die Menge der möglichen Zustände mit der Anzahl der Grundelemente

Abb. sehr schlecht

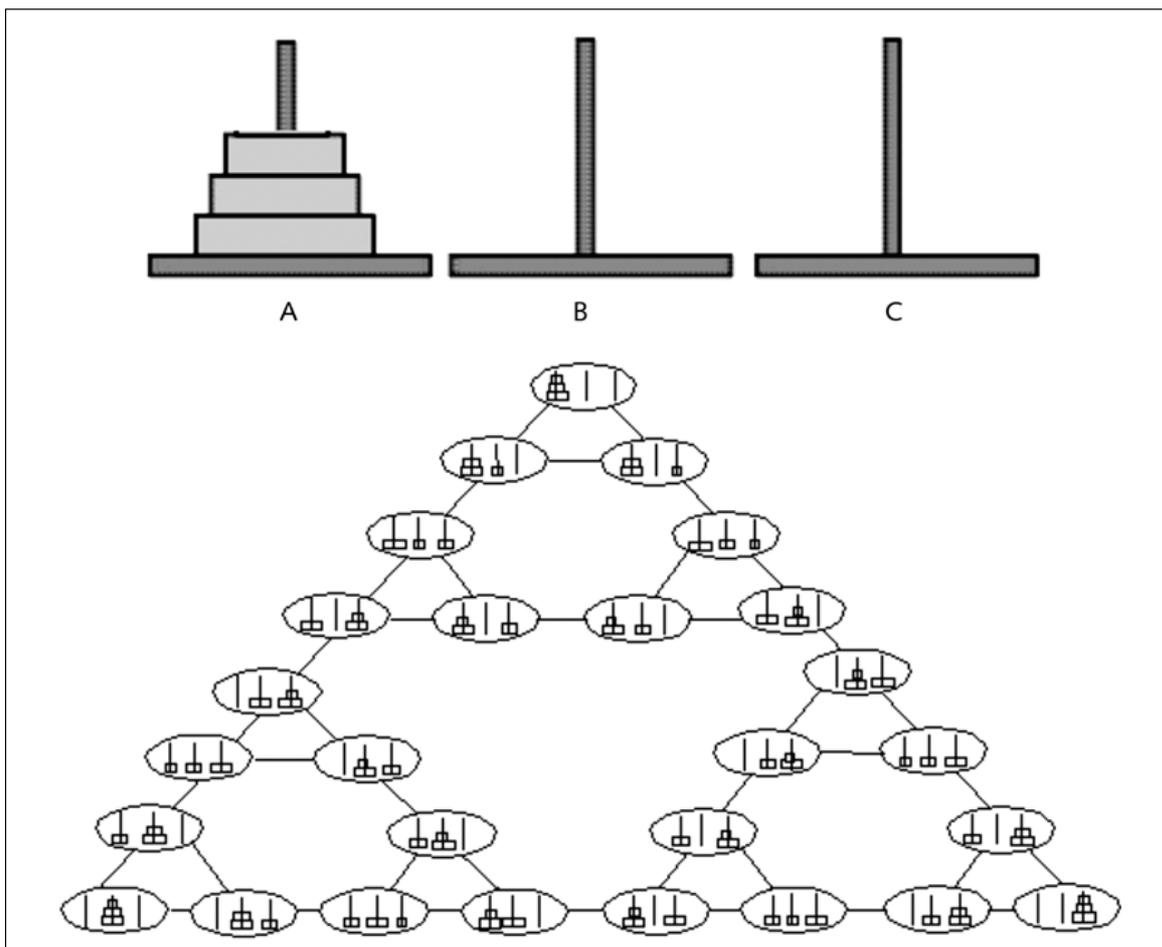


Abbildung 1: Drei-Scheiben-Variante des Turm von Hanoi (oben) mitsamt Problemraum (unten)

exponentiell. Beim Turm-von-Hanoi-Problem gilt allgemein, dass es für  $n$  Scheiben  $3^n$  Zustände gibt. Daher können drei Scheiben der Größe nach geordnet nach dem wahrscheinlichkeitstheoretischen Gesetz der Variation auf 27 Arten auf drei Stäben positioniert werden. Bei zehn Scheiben sind es bereits 59.049 mögliche Zustände! Für Probleme, bei denen der Zustandsraum exponentiell wächst, gibt es keine effizienten Algorithmen zur Ermittlung von korrekten und vollständigen Lösungen. Menschliche Problemlöser schränken hier den Suchraum häufig mit Heuristiken ein. Auch Problemlösealgorithmen in der KI nutzen solche Heuristiken zur Beschränkung des Suchraums. Ebenso können Entscheidungen von Heuristiken gesteuert werden (Gigerenzer/Todd 1999; s. Kap. IV.6). Während ein Problemraum aus einer Struktur von Problemzuständen und möglichen Übergängen besteht, werden in einem Entscheidungsbaum alle möglichen Alternativen (eventuell auch Konsequenzen sowie Wahrscheinlichkeiten von Ausgängen) abgebildet. Auch hier ist die Menge an Optionen häufig sehr groß oder sogar unendlich. Heuristiken dienen in diesem Fall dazu, aufgrund weniger relevanter Aspekte schnell zu einer Entscheidung zu kommen. Simon (1959) hat in diesem Zusammenhang den Begriff der *bounded rationality* eingeführt. Newell und Simons Definition von Problemlösen als schrittweiser Transformation von Zuständen durch Anwendung von Operatoren bildete die Grundlage für die Entwicklung der ersten kognitiven Architekturen (s. Kap. III.1, Kap. IV.17).

*Mittel-Ziel-Analyse und heuristische Suche.* Um eine Folge von Problemlöseoperatoren zu finden, die den Anfangszustand in einen Zielzustand überführen, muss der Problemraum (teilweise) durchsucht werden. Je nach verwendeter Suchstrategie und vorhandenem Wissen über das Problem kann die Suche mehr oder weniger effizient sein und der gefundene Lösungsweg kürzer oder länger. Der kürzeste Lösungsweg für den Turm von Hanoi mit drei Scheiben benötigt sieben Schritte (die äußerste rechte Folge von Kanten in Abb. 1). Basierend auf empirischen Studien mit menschlichen Problemlösern haben Newell/Simon (1972) die Mittel-Ziel-Analyse als heuristische Problemlösestrategie vorgeschlagen. Die Mittel-Ziel-Analyse besteht aus drei rekursiv anwendbaren Regeln: Transformiere den aktuellen Zustand in den Zielzustand, reduziere den Unterschied zwischen dem aktuellen Zustand und dem Ziel und wende einen Problemlöseoperator auf den aktuellen Zustand an.

Beispielsweise möchte man den Anfangszustand des Turms von Hanoi in einen Zustand transformieren, in dem die größte Scheibe auf dem Zielstab C liegt. Also muss der Unterschied zwischen ›größte Scheibe auf A‹ und ›größte Scheibe auf C‹ reduziert werden. Dies kann dadurch gelöst werden, dass man den Problemlöseoperator anwendet, der die größte Scheibe von A nach C versetzt. Allerdings kann dieser Problemlöseoperator im aktuellen (Anfangs-) Zustand nicht angewendet werden, da die Scheibe nicht frei ist. Also möchte man den Unterschied zwischen dem aktuellen Zustand und einem Zustand, in dem die größte Scheibe frei ist, reduzieren. Um dies zu erreichen, wählt man einen Problemlöseoperator aus, der die mittlere Scheibe versetzt. Auch dieser Operator kann nicht direkt angewendet werden. Im nächsten Schritt kann allerdings die kleinste Scheibe versetzt werden. Dadurch ist das Teilziel, die mittlere Scheibe frei zu bekommen, erreicht. Diese kann nun im nächsten Schritt versetzt werden, so dass dann die größte Scheibe frei ist und das ursprüngliche Vorhaben, die größte Scheibe auf den Zielstab zu setzen, nach einem weiteren Zwischenschritt ausgeführt werden kann.

Die Mittel-Ziel-Analyse benötigt einen Speicher (*goal stack*) für Zwischenziele. Ähnlich wie die Idee der mentalen Repräsentation gesamter Problemräume erscheint dies heute wenig plausibel: Dass menschliche Problemlöser beim Lösen des Turms von Hanoi keine vollständige Repräsentation aller offenen Teilziele gespeichert haben, wurde z. B. von Altmann/Trafton (2002) empirisch nachgewiesen. Allerdings bleibt die grundlegende Idee der Mittel-Ziel-Analyse, dass Menschen Probleme häufig so angehen, dass sie diejenige Handlung auszuführen versuchen, die sie auf direktem Weg näher an das Problemlöseziel bringt, bestehen. Dass Menschen sich schwer damit tun, Lösungsschritte zu wählen, die scheinbar vom Ziel wegführen, wurde von Greeno (1974) empirisch für das Missionare-und-Kannibalen-Problem gezeigt.

Zentral für automatisiertes Problemlösen ist die Nutzung eines Verfahrens zur Suche nach einer Folge von Operatoren, die vom Anfangszustand zu einem Zielzustand führen. Diese Suche kann man sich als Bewegung im Problemraum veranschaulichen. Da Problemräume häufig sehr groß sind, ist es weder für Mensch noch für Maschine möglich, systematisch alle möglichen Wege auszuprobieren. Stattdessen werden sog. heuristische Suchverfahren eingesetzt. Eine Heuristik ist eine Daumenregel, die hilft abzuschätzen, ob ein bestimmter Schritt im Problemraum eher zum Erfolg führen wird als alter-

native Möglichkeiten (z. B. eine Autobahnverbindung einer kürzeren Landstraßenverbindung vorzuziehen, wenn es um zeitnahes Erreichen des Ziels geht). Bei der Mittel-Ziel-Analyse wird heuristisch derjenige Problemlöseoperator ausgewählt, von dem angenommen wird, dass er die Distanz zwischen dem aktuellen Zustand und dem Zielzustand am stärksten verringert. Im Allgemeinen sind Heuristiken in der Problemlösung Schätzungen für die anfallenden Restwegkosten, d. h. man bevorzugt denjenigen Folgezustand, von dem man annehmen kann, dass die Anzahl der Schritte (oder bei unterschiedlich ›teuren‹ Operatoren die restlichen Kosten) am geringsten sind.

Das bekannteste heuristische Suchverfahren ist der A\*-Algorithmus, der effizienteste Algorithmus zum Finden einer optimalen Lösung. Hier wird in jedem Schritt für den bisher am besten bewerteten partiellen Lösungsweg die Menge aller möglichen Folgezustände erzeugt. Die neu generierten Pfade werden bezüglich der tatsächlichen Kosten vom Anfangszustand zum letzterzeugten Zustand sowie bezüglich der geschätzten Kosten von diesem Zustand bis zur Zielerreichung bewertet. Eine ausführliche Einführung in den A\*-Algorithmus sowie allgemein in die KI-Methoden des Problemlösens gibt z. B. Schmid (2006).

*Bezug zur KI-Planung.* Etwa zeitgleich zur kognitiv motivierten Mittel-Ziel-Analyse wurde als eines der ersten KI-Planungssysteme der STRIPS-Planer (*Stanford Research Institute Problem Solver*) entwickelt (Fikes/Nilsson 1971; s. Kap. III.1). Wie die Mittel-Ziel-Analyse arbeitet auch der STRIPS-Planungsalgorithmus vom Ziel ausgehend. Beide Verfahren sind sog. lineare Ansätze, d. h. Teilziele werden unabhängig voneinander und nacheinander behandelt. Lineare Ansätze sind unvollständig, so dass in manchen Fällen keine Lösung für ein Problem gefunden wird, obwohl eine Lösung existiert. Dies wurde bereits 1975 am Beispiel der sog. Sussman-Anomalie demonstriert, die die Schwächen dieser nicht-verschränkten Planung aufzeigt. Das Verfolgen einer linearen Strategie kann als Modell menschlicher Problemlösung durchaus angemessen sein, für ein KI-Planungssystem ist Unvollständigkeit jedoch unerwünscht. Moderne Planungsverfahren (Ghallab et al. 2004) sind daher vollständig (Schmid 2006).

Allerdings ist die für STRIPS entwickelte Repräsentationssprache bis heute grundlegend für sog. zustandsbasierte Planer, für die anstelle konkreter Problemlöseoperatoren Operatorschemata definiert

werden (s. Kap. III.1). Beispielsweise können die Problemlöseoperatoren für das Turm-von-Hanoi-Problem in einem einzigen Operatorschema angegeben werden:

*bewege*(scheibe, von, nach)  
 Vorbedingung: *frei*(scheibe), *auff*(scheibe, von),  
*frei*(nach), *kleiner*(scheibe, nach)  
 Effekt: *frei*(von), *auff*(scheibe, nach),  
*nicht auff*(scheibe, von), *nicht frei*(nach)

Dabei sind ›scheibe‹, ›von‹ und ›nach‹ Variablen, die für einen konkreten Zustand mit konkreten Werten belegt werden können. Zustände werden als Mengen von Fakten angegeben. Der Anfangszustand für den Turm von Hanoi kann beschrieben werden durch: *auff*(s1, s2), *auff*(s2, s3), *auff*(s3, A), *frei*(s1). Zudem gilt in allen Zuständen: *kleiner*(s1, s2), *kleiner*(s2, s3), *kleiner*(s1, s3) sowie *kleiner*(s1, A), *kleiner*(s1, B), *kleiner*(s1, C), *kleiner*(s2, A), ..., *kleiner*(s3, C), d. h. jede Scheibe ist kleiner als der leere Stab.

Die Anwendungsbedingungen für den *bewege*-Operator sind im Anfangszustand erfüllt, wenn man *scheibe* mit s1, *von* mit s2 und *nach* mit B belegt. Im Effekt wird beschrieben, welche Fakten im Folgezustand gelten und welche Fakten nicht mehr gelten, d. h. *auff*(s1, s2) und *frei*(B) werden in der Zustandsbeschreibung gelöscht und *frei*(s2) und *auff*(s1, B) werden hinzugefügt. Diese elegante Art, Zustandsübergänge zu berechnen, basiert auf der sog. *closed world assumption*, die annimmt, dass alle Fakten, die in einer Zustandsbeschreibung nicht explizit genannt sind, in dem entsprechenden Zustand auch nicht gelten.

Neuordnungsprobleme wie Sudoku werden üblicherweise mithilfe von Algorithmen für sog. Bedingungserfüllungsprobleme (*constraint-satisfaction-Probleme*) bearbeitet. Solche Algorithmen identifizieren Teillösungen, die den *constraints* genügen, und versuchen, diese Teillösungen zu einer zulässigen Gesamtlösung zu kombinieren (Hofstedt/Wolf 2007).

Planungsalgorithmen werden häufig für Probleme definiert, denen endliche Problemräume mit diskreten Zuständen zugrunde liegen, bei denen alle relevanten Aspekte eines Problemzustands beobachtbar sind, jede Operatoranwendung zu einem deterministischen Effekt führt und Zustandsänderungen nur durch die Operatoranwendungen und nicht durch externe Einflüsse oder die inhärente Dynamik eines Systems herbeigeführt werden können (Ghallab et al. 2004). Ist mindestens eines dieser Kriterien verletzt, spricht man von ›komplexen Problemen‹.

*Lernen und Expertise.* Üblicherweise arbeiten Problemlöseverfahren und Planungssysteme ohne Langzeitgedächtnis, d. h. maschinelle Problemlöser sind nicht in der Lage, aus früheren Problemlöseerfahrungen zu profitieren. Dagegen zeichnen sich menschliche Problemlöser durch die Fähigkeit aus, aus Erfahrung zu lernen. In der KI-Forschung wurde der Ansatz des *reinforcement learning* entwickelt, der diese Art des Lernens explizit adressiert (s. Kap. IV.12). Auch im Bereich der KI-Planung wird in den letzten Jahren versucht, neue Probleme durch Nutzung von Vorerfahrung effizienter lösbar zu machen. In der kognitiven Architektur ACT-R wird Lernen hauptsächlich als Änderung von Bevorzugungswahrscheinlichkeiten für bestimmte Produktionsregeln modelliert. Einen Ansatz, mit dem neue Produktionen aus beispielhaften Problemlösungen erzeugt werden können, schlagen Schmid/Kitzelmann (2011) vor.

In hoch spezialisierten Bereichen, z. B. in der medizinischen Diagnostik oder beim Schachspielen, reichen allgemeine Problemlösestrategien meist nicht aus, um Probleme erfolgreich zu bearbeiten. Hier entwickeln Menschen aufgrund von langjähriger Erfahrung vielmehr eine Expertise. In der KI-Forschung wurden insbesondere in den 1980er Jahren Expertensysteme entwickelt, bei denen versucht wurde, inhaltliches und strategisches Wissen von Experten in Computersystemen umzusetzen (Chi et al. 1988). Es zeigte sich, dass es nahezu unmöglich ist, durch direkte Befragung von Experten und die nachfolgende Modellierung des Wissens alle relevanten Wissensbausteine zu erfassen. Expertenwissen ist häufig implizit und hoch automatisiert und damit keiner direkten Inspektion zugänglich. Eine Alternative zu dieser direkten Art der Wissenserhebung ist die Nutzung von Methoden des maschinellen Lernens (s. Kap. IV.12), mit denen versucht wird, aus Expertenurteilen und Expertenverhalten auf die Wissensstrukturen zu schließen, die diesem Verhalten zugrunde liegen.

### Kreatives Problemlösen

Kreatives Problemlösen adressiert die Bearbeitung offener komplexer Probleme. Sowohl in der experimentell psychologischen Forschung als auch im Bereich der kognitiven Modellierung (s. Kap. II.E.2) werden meist weniger komplexe Probleme von der Art des Turms von Hanoi untersucht. Um psychologisch zu untersuchen, wie Menschen komplexe Probleme lösen (Funke 2010; Knauff/Wolf 2010), wer-

den häufig computersimulierte Szenarien eingesetzt (Brehmer/Dörner 1993).

Eine spezielle Klasse offener Probleme sind sog. Einsichtsprobleme (Kaplan/Simon 1990; Knoblich et al. 1999). Einsichtsprobleme zeichnen sich dadurch aus, dass eine Lösung nur dann gefunden werden kann, wenn das Problem auf eine häufig nicht unmittelbar ersichtliche Art repräsentiert wird. Eine kreative Re-Repräsentation von Problemen wird durch die funktionale Gebundenheit verhindert: Aus Erfahrung erworbenes Wissen über die übliche Verwendung von oder den üblichen Umgang mit Dingen verhindert das Generieren von Alternativen. Ist z. B. eine Streichholzlegeaufgabe der Form  $III + I = VI$  gegeben, so können Probanden das Problem, durch Umlegen eines Hölzchens zu einer korrekten Aussage (in diesem Fall  $III + II = V$ ) zu gelangen, meist schnell und erfolgreich bearbeiten. Muss aber nicht eine Zahl manipuliert werden, sondern ein Operator oder das Gleichheitszeichen, wird die Lösung häufig nur langsam oder gar nicht gefunden, wie z. B. bei der Umformung von  $III - II = IV$  zu  $II + II = IV$  (Knoblich et al. 1999). Selbst bei Transformationsproblemen wie Wasserumschütttaufgaben zeigen Probanden eine sog. funktionale Gebundenheit: Hat mehrfach eine bestimmte Abfolge von Umschüttoperationen zum Erfolg geführt, so wird diese auch auf ein Folgeproblem angewendet, das mit weniger Operationen lösbar ist (Luchins/Luchins 1950). Diese funktionale Gebundenheit kann jedoch durch gezielte Hinweise, z. B. durch die Vorgabe eines analogen Problems, durchbrochen werden (s. u.).

Eine Alternative zur Problemlösung durch Suche im Problemraum ist es, den Lösungsweg eines bereits gelösten ähnlichen Problems auf das neue Problem zu übertragen. Dieser Ansatz wird als ›fallbasiertes Schließen‹ bezeichnet. Dadurch können auch Probleme lösbar werden, die für die Lösung durch Suchverfahren zu komplex sind. Die Herausforderung bei Ansätzen des fallbasierten Schließens besteht darin, ein tatsächlich passendes, bekanntes Problem aus dem Gedächtnis abzurufen.

Der in der KI entwickelte Ansatz des fallbasierten Schließens hat viele Gemeinsamkeiten mit den in der Kognitionswissenschaft entstandenen Ansätzen des analogen Schließens und Problemlösens (s. Kap. IV.17). Bei Analogiemodellen wird häufig von einer strukturierten Repräsentation ausgegangen und nicht der Abruf eines geeigneten Problems, sondern das Mapping zwischen zwei Problemstrukturen als zentraler Prozess betrachtet (Falkenhainer et al. 1989). Der Übertrag von Wissen von einem Problem

zu einem unbekanntem Problem wird häufig auch als Schlüssel zum kreativen Problemlösen betrachtet: Beispielsweise wurde der Physiker Ernest Rutherford zu seinem Orbitalmodell angeregt, indem er Wissen über die bekannte Struktur des Sonnensystems auf das Wasserstoffatom übertrug. Auch das ursprünglich vom Gestaltpsychologen Karl Duncker untersuchte Bestrahlungsproblem ist ein Beispiel für analoges Problemlösen: Personen, die zunächst eine Geschichte über die erfolgreiche Eroberung einer Burg hörten, in dem sich die Soldaten auf alle Eingänge der Burg verteilten, kommen eher darauf, dass Tumorgewebe durch im Kreis angeordnete Strahlen zerstört werden kann, ohne dass gesundes Gewebe mitbeschädigt wird, als andere Personen (Gick/Holyoak 1983).

Kreative Problemlösungen sind seltene Ereignisse. Man kann zwar KI-Programme schreiben, die verschiedene Wissensstrukturen aufeinander übertragen (Langley et al. 1987); die meisten analogen Schlüsse solcher Programme werden jedoch unsinnig sein. Die Herausforderung ist, die wenigen analogen Schlüsse in dieser Menge zu identifizieren, die tatsächlich innovative Problemlösungen darstellen.

## Kreativität

*Aspekte von Kreativität.* Der schöpferische Prozess des Hervorbringens neuer Ideen hat viele Forscher beschäftigt. Allerdings erweist sich trotz dieser vielfältigen Bemühungen der Kenntnisstand als eher beschränkt, was vermutlich mit dem Phänomen und seiner Unberechenbarkeit zu tun hat. Kreativität lässt sich in vier verschiedene Aspekte differenzieren: eine kreative *Person* produziert ein kreatives *Produkt* in einer kreativen *Umgebung* durch einen kreativen *Prozess*.

Die kreative Person ist durch Offenheit und Neugier, aber auch durch Ambiguitätstoleranz (das Aushalten-Können unklarer und uneindeutiger Situationen) gekennzeichnet. Unangepasstheit und Bereitschaft zum Regelverstoß sind ebenfalls charakteristisch und machen den Umgang mit Kreativen manchmal schwierig.

Das kreative Produkt wird durch die Kriterien der Neuigkeit und Nützlichkeit beschrieben. Das erste Kriterium der Neuigkeit wird dabei zunächst aus der Perspektive des Schaffenden definiert, in zweiter Linie aber auch sozial: Selbst auf die Gravitationstheorie gekommen zu sein, mag eine Person zu Recht mit Stolz erfüllen – allerdings ist diese Entdeckung aus gesellschaftlicher Sicht nicht neu. Das zweite Krite-

rium der Nützlichkeit soll dafür sorgen, dass nicht alles Neue auch als kreativ bezeichnet werden muss: Die Passung zu einem zuvor definierten Problem ist hierbei wichtig.

Die kreative Umgebung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle für das Hervorbringen einer neuen Idee. Allerdings zeigen sich hier widersprüchliche Befunde: Zum einen scheinen Herausforderungen (gesellschaftliche Herausforderungen wie z.B. Kriegsbedingungen, aber auch personale wie z.B. Kränkungen) hilfreich zu sein, zum anderen sind entspannende Bedingungen (z.B. Ruhe, schöne Dinge, Natur in freundlicher Dosis) sowie gute Ausstattung ebenfalls hilfreich. Bei aller Widersprüchlichkeit gilt es als sicher, dass heterogene Umgebungen mit hoher Diversität anregender sind als homogene und monotone Umgebungen.

Der kreative Prozess wird typischerweise in mehrere (meist fünf) Phasen zergliedert:

- *Vorbereitung:* Zumindest Produkte von hoher Qualität entstehen nur durch entsprechende Vorbereitung. Wissenschaftliche Entdeckungen oder musikalische Kompositionen von Bedeutung kommen nicht aus dem Nichts, sondern setzen viele Stunden Beschäftigung mit dem Gegenstand voraus. Expertiseforscher (z.B. Ericsson 2003) sprechen von mindestens 10.000 Stunden Vorbereitung.
- *Inkubation:* Eine Phase der Ablenkung nach einer gedanklichen ›Infektion‹ scheint hilfreich. Auch wenn nicht völlig klar ist, warum die fehlende Beschäftigung mit einem Problem dessen Lösung begünstigt, spielt die Ablenkung in der Inkubationsphase eine wichtige Rolle. Eventuell konsolidieren und ordnen sich hier Hirnprozesse in neuer Form.
- *Einsicht:* ›Heureka!‹ (›Ich hab's gefunden!‹) soll Archimedes gerufen haben, als er in seiner Badewanne das Prinzip der Verdrängung entdeckt hatte. Dieser Moment der Einsicht (von den Gestaltpsychologen zu Anfang des 20. Jh.s auch als ›Aha-Erfahrung‹ bezeichnet) kennzeichnet den Schöpfungsakt in zeitlicher Hinsicht, stellt für die kreative Person aber zugleich auch einen Moment des schöpferischen Hochgefühls dar, der in Biografien von Erfindern immer wieder angesprochen wird.
- *Bewertung:* Nach dem Rausch der Einsicht kann es zum Kater der Bewertung kommen – nicht alle kreativen Produkte halten einem kritischen Blick stand, der in dieser Phase auf das Ergebnis schöpferischer Tätigkeit geworfen wird. *Peer reviewing* ist nicht nur in den Wissenschaften, sondern auch

in Kunst und Literatur ein hilfreicher Kontrollprozess, um Produkte noch besser werden zu lassen.

- *Ausarbeitung*: Hier geht es darum, aus der kreativen Idee ein kreatives Produkt werden zu lassen. Erst dann wird aus Kreativität Innovation. Dass der Weg von der Idee zum Produkt anstrengend sein kann, macht die angeblich von Thomas Edison gemachte Aussage deutlich, wonach Genie ein Prozent Inspiration und 99 Prozent Transpiration bedeute.

Eine wichtige Unterscheidung ist diejenige zwischen großer und kleiner Kreativität. Mit *großer Kreativität* sind diejenigen Schöpfungen gemeint, die die Menschheit als Ganzes betreffen. Dazu zählen wissenschaftliche Entdeckungen ebenso wie literarische oder künstlerische Meisterwerke, um ein paar Beispiele zu nennen. *Kleine Kreativität* ist dagegen unspektakulär und findet alltäglich statt. Ist z. B. ein Reißverschluss defekt und verwendet man ersatzweise eine Büroklammer, um den Schieber zu bewegen, handelt es sich dabei um eine kreative Problemlösung. Zu kleiner Kreativität ist fast jeder Mensch in der Lage – große Kreativität findet seltener statt.

Trainings zur Steigerung kreativer Produktivität (z. B. Brainstorming; vgl. die Übersicht in Funke 2008) haben nur wenig Wirksamkeitsnachweise liefern können. Zu den förderlichen Randbedingungen werden u. a. Entscheidungsfreiheit, unerwartete Bekräftigungen, positives Innovationsklima oder ein stimulierendes Milieu gezählt, als hinderlich angesehen werden dagegen Druck durch Kollegen, Supervision oder erwartete Evaluation (Hennessey/Ambabile 2010).

*Computermodelle der Kreativität*. Ein frühes KI-System, das kreative Prozesse zu simulieren versuchte, ist AUTOMATED MATHEMATICIAN (Lenat 1982), das über eine Wissensbasis (s. Kap. IV.25) von grundlegenden mathematischen Gesetzen verfügt und durch die Anwendung mathematischer Operationen aus der Wissensbasis, Generalisierung und Spezialisierung neue Konzepte generiert und mit einem Interessantheitsmaß bewertet. AUTOMATED MATHEMATICIAN konnte durchaus einige mathematische Konzepte, z. B. das Konzept von Primzahlen, neu entdecken.

Die Bildung von Metaphern kann auf Grundlage algebraischer Modelle des analogen Schließens modelliert werden (Holland et al. 1986; Indurkha 1992): Bei einer proportionalen Analogie der Form  $a : b$  wie  $c : d$  wird eine Relation zwischen zwei Struk-

turen  $a$  und  $b$  hergestellt. Durch eine (homomorphe) Abbildung von  $a$  auf  $c$  kann dann die Relation auf  $c$  angewendet werden, um  $d$  zu erzeugen. Beispielsweise kann so die Analogie Tag : Abend wie Leben : Alter dargestellt werden. Dabei stammen *Tag* und *Abend* aus einem ersten Gegenstandsbereich, *Leben* und *Alter* aus einem zweiten. Die Metapher *Lebensabend* kann konstruiert werden, indem beim zweiten Element der Relation ein Wechsel des Gegenstandsbereichs durchgeführt wird.

Naturwissenschaftliche Entdeckungen oder Erkenntnisse werden ebenfalls häufig auf Basis von Analogiemodellen erklärt (vgl. das Rutherford'sche Orbitalmodell, s. o.). Auch die Erschaffung künstlerischer Artefakte wird häufig durch Rekombination von vorhandenen Strukturen modelliert. Beispielsweise werden bei der automatischen Komposition von Musikstücken genetische Algorithmen auf der Basis von grammatikalischen Beschreibungen von Melodien und Rhythmen verwendet (z. B. Ortega et al. 2002).

Boden (2004) unterscheidet zwischen kombinatorischer und explorativ-transformationaler Kreativität. Explorativ-transformationale Kreativität meint Prozesse, die innerhalb eines konzeptuellen Raumes bleiben, wie dies z. B. bei der Lösung von Einsichtsproblemen (s. o.) häufig der Fall ist. Kombinatorische Kreativität hingegen basiert auf der ›ungewöhnlichen‹ Kombination von bekannten Konzepten, wie dies häufig bei Metaphern oder auch bei naturwissenschaftlichen Entdeckungen der Fall ist. Kombinatorische Kreativität wird häufig auch als ›conceptual blending‹ bezeichnet (Guhe et al. 2011; Turner/Fauconnier 2002). Wie beim kreativen Problemlösen gilt auch bei der Schöpfung von Metaphern, bei der Erschaffung von Kunstwerken, bei der Einführung neuer Konzepte in die Mathematik, bei der Entwicklung neuer Modelle in der Naturwissenschaft und bei der Entwicklung innovativer Produkte, dass produktive Kreativität ein seltenes Ereignis ist. Welche kreativen Schöpfungen sich tatsächlich bewähren, zeigt sich häufig erst nach einer längeren Zeitspanne. Entsprechend schwierig ist es, für Modelle der *computational creativity* ein Interessantheitsmaß zu definieren, das zu validen Prognosen führt.

## Literatur

- Altmann, Erik/Trafton, Gregory (2002): Memory for goals. In: *Cognitive Science* 26, 39–83.
- Boden, Margaret (?2004): *The Creative Mind*. London [1990].
- Brehmer, Berndt/Dörner, Dietrich (1993): Experiments

- with computer-simulated microworlds. In: *Computers in Human Behavior* 9, 171–184.
- Carpenter, Patricia/Just, Marcel/Shell, Peter (1990): What one intelligence test measures. In: *Psychological Review* 97, 404–431.
- Chi, Michelene/Glaser, Robert/Farr, Marshall (1988): *The Nature of Expertise*. Hillsdale.
- Dörner, Dietrich (1989): *Die Logik des Mißlingens*. Hamburg.
- Ericsson, Anders (2003): The acquisition of expert performance as problem solving. In: Janet Davidson/Robert Sternberg (Hg.): *The Psychology of Problem Solving*. Cambridge (Mass.), 31–85.
- Falkenhainer, Brian/Forbus, Kenneth/Gentner, Dedre (1989): The structure mapping engine. In: *Artificial Intelligence* 41, 1–63.
- Fikes, Richard/Nilsson, Nils (1971): STRIPS: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. In: *Artificial Intelligence* 2, 189–208.
- Funke, Joachim (2003): *Problemlösendes Denken*. Stuttgart.
- Funke, Joachim (2008): Kreativitätstechniken. In: Vera Nünning (Hg.): *Schlüsselkompetenzen: Qualifikationen für Studium und Beruf*. Stuttgart, 207–219.
- Funke, Joachim (2010): Complex problem solving. In: *Cognitive Processing* 11, 133–142.
- Ghallab, Malik/Nau, Dana/Traverso, Paolo (2004): *Automated Planning*. Amsterdam.
- Gick, Mary/Holyoak, Keith (1983): Schema induction and analogical transfer. In: *Cognitive Psychology* 15, 1–38.
- Gigerenzer, Gerd/Todd, Peter/ABC Research Group (Hg.) (1999): *Simple Heuristics that Make us Smart*. New York.
- Greeno, James (1974): Hobbits and orcs. In: *Cognitive Psychology* 6, 270–292.
- Greeno, James (1978): Natures of problem-solving abilities. In: William Estes (Hg.): *Handbook of Learning and Cognitive Processes*. Hillsdale, 239–270.
- Guhe, Markus/Pease, Alison/Smaill, Alan/Martinez, Maricarmen/Schmidt, Martin/Gust, Helmar/Kühnberger, Kai-Uwe/Krumnack, Ulf (2011): A computational account of conceptual blending in basic mathematics. In: *Cognitive Systems Research* 12, 249–265.
- Hennessey, Beth/Amabile, Teresa (2010): Creativity. In: *Annual Review of Psychology* 61, 569–598.
- Hofstedt, Petra/Wolf, Armin (2007): *Einführung in die Constraint-Programmierung*. Heidelberg.
- Holland, John/Holyoak, Keith/Nisbett, Robert/Thagard, Paul (1986): *Induction*. Cambridge (Mass.).
- Indurkha, Bipin (1992): *Metaphor and Cognition*. Dordrecht.
- Kaplan, Craig/Simon, Herbert (1990): In search of insight. In: *Cognitive Psychology* 22, 374–419.
- Knauff, Markus/Wolf, Ann (2010): Complex cognition. In: *Cognitive Processing* 11, 99–102.
- Knoblich, Günther/Ohlsson, Stellan/Haider, Hilde/Rhennius, Detlef (1999): Constraint relaxation and chunk decomposition in insight problem solving. In: *Journal of Experimental Psychology* 25, 1534–1556.
- Kotovsky, Kenneth/Hayes, John/Simon, Herbert (1985): Why are some problems hard? In: *Cognitive Psychology* 17, 248–294.
- Langley, Patrick/Simon, Herbert/Bradshaw, Gary/Zytkow, Jan (1987): *Scientific Discovery*. Cambridge (Mass.).
- Lenat, Douglas (1982): AM: Discovery in mathematics as heuristic search. In: Randall Davis/Douglas Lenat (Hg.): *Knowledge-Based Systems in Artificial Intelligence*. New York, 1–225.
- Luchins, Abraham/Luchins, Edith (1950): New experimental attempts at preventing mechanization in problem solving. In: *Journal of General Psychology* 42, 279–297.
- McCarthy, John (1968): Programs with common sense. In: Marvin Minsky (Hg.): *Semantic Information Processing*. Cambridge (Mass.), 403–418.
- Newell, Allen/Simon, Herbert (1972): *Human Problem Solving*. Englewood Cliffs.
- Ortega, Alfonso/Alfonso, Rafael/Alfonseca, Manuel (2002): Automatic composition of music by means of grammatical evolution. In: *Proceedings of the 2002 International Conference on APL*, 148–155.
- Schmid, Ute (2006): Computermodelle des Denkens und Problemlösens. In: Joachim Funke (Hg.): *Enzyklopädie der Psychologie, Denken und Problemlösen*. Göttingen, 483–547.
- Schmid, Ute/Kitzelmann, Emanuel (2011): Inductive rule learning on the knowledge level. In: *Cognitive Systems Research* 12, 237–248.
- Schmid, Ute/Wirth, Joachim/Polkehn, Knut (2003): A closer look at structural similarity in analogical transfer. In: *Cognitive Science Quarterly* 3, 57–89.
- Simon, Herbert (1959): Theories of decision making in economics and behavioural science. In: *American Economic Review* 49, 253–283.
- Sternberg, Robert/Lubart, Todd (1999): The concept of creativity. In: Robert Sternberg (Hg.): *Handbook of Creativity*. New York, 3–15.
- Turner, Mark/Fauconnier, Gilles (2002): *The Way We Think*. New York.

Ute Schmid/Joachim Funke