

Dietrich Dörner

Gibt es künstliche Intelligenz?

Umi-Or, Limi-Ur

Bei einem Test für das optische Kurzzeitgedächtnis sollte ein Proband eine rote Figur (siehe Abbildung 1) eine Minute lang betrachten, sich einprägen und danach möglichst fehlerfrei reproduzieren. Nach etwa 10 Sekunden meinte der Proband, sich die Abbildung eingepägt zu haben, keine weitere Zeit zu benötigen und murmelte vor sich hin "Umi Or, Limi UR". Und reproduzierte die Vorlage in kurzer Zeit fehlerfrei.

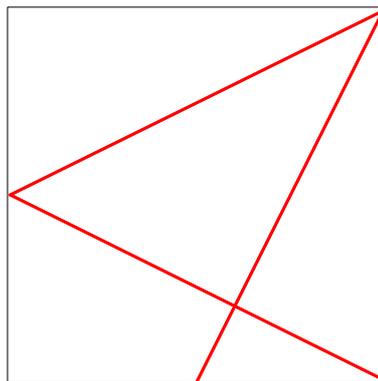


Abb. 1: Ein Test für das optische Kurzzeitgedächtnis

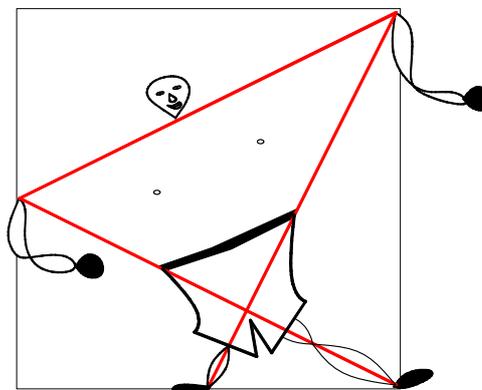


Abb. 2: Der "besoffene Boxer"

Was bedeutet hier "Umi-Or", "Limi-Ur"? Der Leser wird ahnen: Die Versuchsperson hatte sich markante Punkte der Vorlage 'symbolisch' gemerkt. Umi bedeutet "unten Mitte", Or "oben rechts",

Limi bedeutet folgerichtig "links Mitte" und Ur "unten rechts". Die Versuchsperson hatte die Vorlage also *sprachlich codiert*, um die gestellte Aufgabe ohne größeren Aufwand lösen zu können.

Bei der gleichen Aufgabenstellung bemerkte ein anderer Proband spontan: "Das ist ein besoffener Boxer!" Und skizzierte mit wenigen Strichen die auf Abbildung 2 zu erkennende Figur. Er hatte sich offensichtlich mehr gemerkt, als ihm vorgegeben war – er hatte die Figur gewissermaßen *semantisch angereichert*. Das erleichterte ihm die Lösung der Aufgabenstellung.

Beide Versuchspersonen haben sich regelwidrig verhalten, haben also nicht, wie vorgeschrieben war, allein ihr 'optisches Kurzzeitgedächtnis' genutzt, um sich die Vorlage 'mechanisch' einzuprägen, sondern haben sich *eigene Methoden* ausgedacht.

Der interessierte Leser wird den 'Turm von Hanoi' kennen – ein Denkspiel, wie in Abbildung 3 dargestellt: Dort soll der linke Turm nach rechts versetzt werden. Dabei darf stets nur eine Scheibe versetzt und niemals eine größere Scheibe auf eine kleinere gelegt werden. Eine schwierige Aufgabe!¹

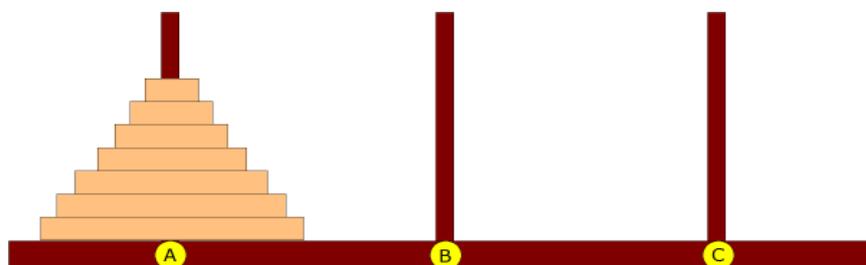


Abb. 3: Der Turm von Hanoi

Bei einem Experiment mit dem 'Turm von Hanoi' meinte eine Versuchsperson: "Der linke Turm soll also nach rechts und ich darf nie eine größere Scheibe auf eine kleinere legen. – Das ist doch einfach! Machen wir es so!" und drehte das Holzbrettchen mit den Pfählen und dem Turm um 180°. "So war das nicht gedacht!" protestierte der Versuchsleiter. Die Versuchsperson drehte die Konfiguration lächelnd zurück und löste anschließend die Aufgabe in kurzer Zeit durch das Versetzen der Scheiben nahezu fehlerfrei.

Eine andere Versuchsperson verhielt sich ähnlich. Die Pfähle waren mit A, B und C gekennzeichnet. "Der Turm auf A soll also auf C! Kein Problem!", meine sie und vertauschte die Etiketten A und C unter den Pfählen. "Alles klar?" lachte sie schelmisch, denn sie ahnte gewiss, dass der Versuchsleiter diese Lösung nicht akzeptieren würde. Doch auch dieser Proband war zuletzt in der Lage, in kurzer Zeit die 'richtige' Lösungsmethode zu finden.²

1 Der 'Trick' ist dabei, dass die Ziele beim Umsetzen der Scheiben mit deren Anzahl bzw. mit der Größe des Turmes, der versetzt werden soll, korrelieren: Wenn ein Turm aus einer ungeraden Anzahl von Scheiben besteht, sollte die erste Scheibe auf den Zielpflock gelegt werden, die zweite auf den Nebenflock, usw. Sofern ein Turm jedoch aus einer geraden Anzahl von Scheiben besteht, sollte die erste Scheibe auf denjenigen Pflock gelegt werden, der nicht der Zielpflock ist. Der Sinn dieser Regel ist leicht einzusehen und daraus – sowie aus einigen Unterregeln, die leicht abzuleiten sind – ergibt sich die Verfahrensweise für einen Turm beliebiger Höhe.

2 Wenn Sie einen intelligenten Mitarbeiter suchen und hätten den 'Turm von Hanoi' oder jene Merkaufgabe als einziges Kriterium, wen würden Sie bevorzugt einstellen, denjenigen, der sich an die vorgegebenen Regeln hält oder denjenigen, dem eine Lösung einfällt, die den Konventionen nicht gehorcht? Der Autor wüsste schon, wie er sich entscheiden würde. Indes, manchmal sucht man nicht jemanden, der neue Regeln erfinden kann, sondern denjenigen, der brav erledigt, was ihm aufgetragen wurde.

Conclusio: In allen abgehandelten Fällen war die *Erfindung neuer Regeln* zu beobachten.

Intelligenz

Wer also ist 'intelligent', was ist 'Intelligenz'? – Der Psychologie ist es leider noch nicht gelungen, für 'Intelligenz' eine befriedigende Definition zu finden.

Insgesamt sind wohl drei Gruppen von Definitionen zu unterscheiden.

1. Die meisten psychologischen Definitionen bewegen sich am Rande der Tautologie, wenn beispielsweise postuliert wird, dass Intelligenz die Fähigkeit sei, Bedeutungen und Sinnzusammenhänge zu erfassen. Hier bleibt zu fragen: Und worauf basiert die Fähigkeit, Bedeutungen und Sinnzusammenhänge zu erfassen? Auf der Intelligenz! So beißt sich die Katze in den Schwanz.

Oder es wird behauptet, Intelligenz sei die Fähigkeit zum Denken (oder Problemlösen). Und worauf basiert die Denkfähigkeit? Auf der Intelligenz! Denn auch was Denken ist, wissen die Psychologen nicht allzu genau. Es gibt hier viele ungeklärte Fragen. So wird zum Beispiel über die Funktion sowie das Verhältnis von Sprache und Denken gestritten. Die Funktion der Selbstreflexion für die Gestaltung des Denkens wird kaum beachtet (siehe unten).

2. Eine zweite, auf den ersten Blick mehr analytische Art der Definition des Begriffs besteht darin, Intelligenz auf mehrere Fähigkeiten zurückzuführen. Beispielsweise darauf, dass Intelligenz darin bestünde, numerische, figural-bildhafte oder sprachliche Inhalte zu manipulieren, und dass diese Manipulationen gekennzeichnet seien durch bestimmte Merkmale, so u.a. durch die 'Verarbeitungskapazität', die 'Bearbeitungsgeschwindigkeit', durch 'Einfallsreichtum' und 'Gedächtnis'. – Auch hier bleiben die Begriffsinhalte vage; sicherlich weiß jeder, was Einfälle sind, aber woher sie kommen, weshalb manche Menschen viele, andere weniger Einfälle haben, ist unbekannt. Überhaupt bestehen sehr unklare Vorstellungen darüber, welche Informationsverarbeitungsprozesse sich hinter diesen Fähigkeiten verbergen. Wenn zum Beispiel verbale und figural-bildhafte Inhalte als verschiedene 'Materialien' der Informationsverarbeitung angesehen werden, fällt doch auf den zweiten Blick auf, dass diese Kategorien sich überschneiden. 'Lesen' ist zum Beispiel gewiss den verbalen Informationsverarbeitungsprozessen zuzuordnen, so muss aber beim Lesen beispielsweise ein 'b' von einem 'd' unterschieden werden können. Und das ist eine figural-bildhafte Aufgabe. Sicherlich gehören solche Unterscheidungen zum Leseprozess und damit zu den verbalen Fähigkeiten. Warum werden diese beiden Fähigkeiten dann aber als verschiedenartig nebeneinander gestellt? – Diese *Fähigkeitenkonzeption* von Intelligenz führt dazu, dass Intelligenz gewöhnlich mit Hilfe von Tests zu messen versucht wird, die solche verschiedenen Fähigkeiten separat prüfen.
3. Die dritte Art von Definitionen bezieht sich auf die Veränderung der Informationsverarbeitung; man betont, dass Intelligenz etwas damit zu tun hätte, sich an neue Situationen anzupassen, zu lernen. Das klingt plausibel, doch ist zu beachten, dass es sehr unterschiedliche Formen des Lernens gibt: Das primitive Erlernen von Zusammenhängen und das Lernen durch Einsicht, welches oben, bei der Merkaufgabe und dem 'Turm von Hanoi' besprochen wurde. Guthke (1972) betonte: "Die Intelligenz als der wesentlichste konstituierende Bestandteil der intellektuellen Lernfähigkeit ist die hierarchische strukturierte Gesamtheit jener Fähigkeiten, die das Niveau und die Qualität der Denkprozesse einer Persönlichkeit charakterisieren." Das ist gut und schön, aber man würde über jene 'Fähigkeiten' sowie die Art und Weise, wie sie 'hierarchisch strukturiert' sind, gern etwas mehr wissen.

Fassen wir zusammen (oder lassen wir zusammenfassen):

"Böse Zungen könnten sagen: Eine beneidenswerte Situation. Sie wissen nicht, was es ist, aber sie können es messen!" meinte der Freiburger Psychologe Robert Heiß (Heiß, 1960). Diese Aussage ist mehr als 50 Jahre alt, aber prinzipiell hat sich seither nicht viel geändert.

Wir meinen, dass man sich an die dritte der oben vorgeschlagenen Definitionen anhängen sollte. Intelligenz hat etwas mit der Fähigkeit zu tun, neuartige Situationen zu bewältigen. Aber nicht jede der Methoden zur Bewältigung neuartiger Situationen wollen wir intelligent nennen. Denn neuartige Situationen können durch blindes Zufallsprobieren (mehr oder minder effektiv) bewältigt werden, und das ist nicht intelligent (= einsichtsvoll). Tauglicher wäre folgende Definition: Intelligenz ist die Fähigkeit, *sich selbst* zum Zwecke der Lösung einer neuen Aufgabe neu zu programmieren, also einen Lösungsprozess selbst zu erfinden.

Eine ähnliche Definition ist bei Georg Klaus (1968) zu finden: "Intelligenz ist die Fähigkeit, Verhaltensalgorithmen herzustellen und auf diese Weise Probleme zu lösen." Klaus geht noch einen Schritt weiter: Zur Intelligenz gehört auch, die Beseitigung von Fehlern in den Algorithmen. Damit rückt die Fähigkeit von Menschen in den Blickpunkt, sich selbst und ihr eigenes Denken zum Objekt der Betrachtung zu machen.

Künstliche Intelligenz

Neulich wurde in einer Werbeanzeige eine 'intelligente' Elektro-Kochplatte angepriesen. Nach dem Einschalten der Stromzufuhr solle sich die Platte nicht sofort erhitzen, sondern zunächst prüfen, ob sie mit einem Gegenstand belastet ist; nur in diesem Fall werde sie sich erwärmen. Ganz schön clever, die Kochplatte. Und ein Kinderschutz! Selbstverständlich ist die Kochplatte nicht intelligent; nur weil ihr irgendeine Art von Waage verpasst wurde, ist sie nicht intelligent geworden, sondern verharrt auf dem Intelligenzgrad 0. Die Kochplatte prüft auch nichts; sie reagiert lediglich auf den Zustand 'Gewicht' anders als auf 'kein Gewicht'. Sie hat auch nicht die Absicht, Kinder vor Schäden zu bewahren, denn sie weiß nicht, was Kinder sind.

Auf der Anzeige war zudem zu lesen: Diese Kochplatte *erkennt*, ob Sie wirklich etwas kochen wollen oder ob Sie (oder Ihr Kind) nur versehentlich den Schalter betätigt haben. – Die Kochplatte erkennt überhaupt nichts. Erkennen bedeutet beim Menschen, dass er einen neuen Zusammenhang verstanden hat, und dass diese Erkenntnis womöglich auch in anderen Situationen nützlich sein könnte. Und über diesen Zuwachs seiner Kompetenz freut er sich; deshalb ist das Denken – wenn es denn zu Erkenntnissen führt – erfreulich. Die Kochplatte erkennt weder einen neuen Zusammenhang, noch überhaupt einen, noch kann ihr dieser Zusammenhang in anderen Kontexten nützen, noch kann sie sich darüber überhaupt Gedanken machen, noch freut sie sich. 'Erkennen' ist hier also nur ein unbedachter Sprachgebrauch, falls damit nicht suggeriert werden soll, dass die Kochplatte über Intelligenz verfügt.

Alles, was nach Kenntnis des Autors gemeinhin als 'künstliche' Intelligenz bezeichnet wird, ist letztlich allein ein *System vorprogrammierter, bedingter Befehle*; mit Selbstprogrammierung hat das nichts zu tun. Wenn also ein automatischer Staubsauger erkennt, dass er in Gefahr gerät, die Treppenstufen herab zu fallen, sobald er weiterfährt, wenn er erkennt, dass er einen Teppichboden anders reinigen muss als einen Parkettboden, wenn er erkennt, dass er von einem Hindernis aufgehalten wird, dieses also umfahren muss, wenn er erkennt, dass er – ehe er seine Reinigungstätigkeit fortsetzt – besser zur Steckdose zurückfahren sollte, um seinen Akku aufzuladen, so ist

dieses 'Erkennen' darauf zurückzuführen, dass der Automat auf die eine Bedingung anders reagiert als auf eine beliebig andere. Aber mit Intelligenz im Sinne von Selbstprogrammierung hat das Ganze nichts zu tun.

Unser Teppichreinigungsautomat hat keine Ahnung davon, *warum* er bei zur Neide gehender Akkuladung zur Steckdose fahren sollte. Er hält an! Er weiß auch nicht, *warum* er nicht weiterfahren sollte, wenn er an einen Treppenabsatz gerät. Er stellt fest, dass eine bestimmte Bedingung gegeben ist, die ihm vorschlägt – besser: befiehlt – umzukehren. Eine Begründung ist dem Automaten nicht bekannt.

Für ein tatsächlich intelligentes System ist also entscheidend zu wissen, weshalb eine Handlung erfolgt, welchem Zweck sie dient. Denn nur mit dem Wissen um den Zweck sind Ersatz- oder Ergänzungsaktionen zu planen. Wenn der 'intelligente' Staubsauger wüsste, dass er die Steckdose zum Zweck der Energieversorgung anstrebt, könnte er – im Falle der Unerreichbarkeit einer funktionierenden Steckdose – den Ersatz des nahezu leeren Akkus durch einen vollen anstreben, der beispielsweise im Küchenschrank zu finden wäre. Intelligent wäre er nur, wenn er selbst auf die Idee mit dem Akku käme, nicht aber, wenn ihm die Idee als Verhaltensalternative für den Fall der Ergebnislosigkeit der Suche nach einer funktionsfähigen Steckdose einprogrammiert worden wäre.

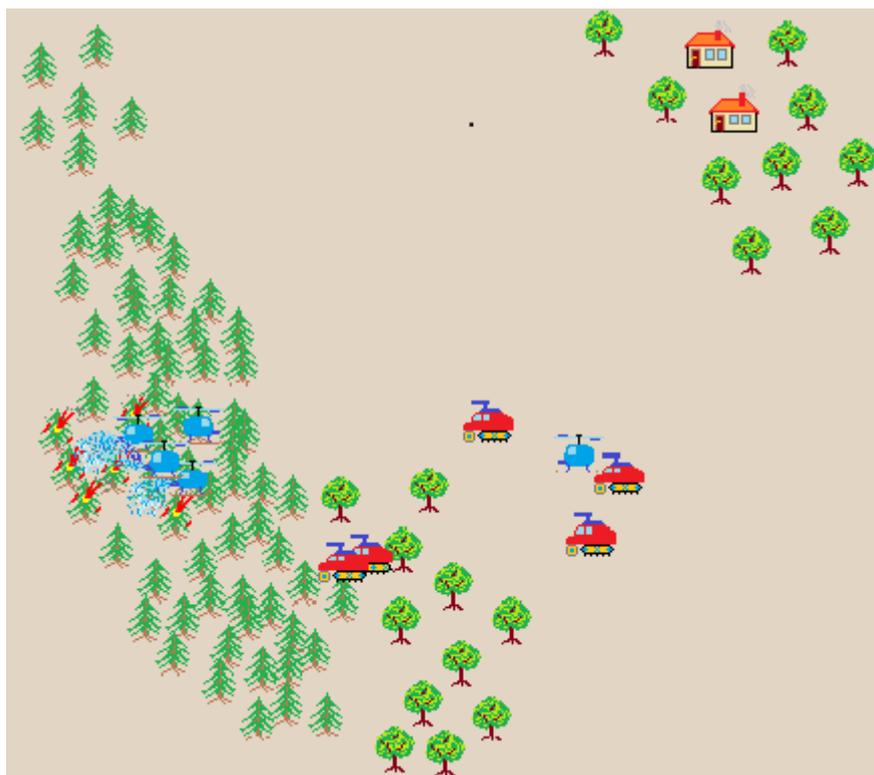


Abb. 4: Die Bekämpfung von Buschfeuern in Australien

Das Problem sei an einem komplexeren Beispiel demonstriert: In einem Computerspiel gibt es 'intelligente' Feuerwehrfahrzeuge, die selbständig ihre Brandbekämpfungstätigkeit organisieren. Abbildung 4 skizziert die Situation. Es existieren zwei Arten von Feuerwehrfahrzeugen, einerseits schwere Kettenfahrzeuge (die auch Schneisen in den Wald schlagen können), andererseits Hubschrauber. Ein Verbund beider Typen ist in der Lage, Brände selbständig zu löschen.

Falls die Löschfahrzeuge kein Feuer wahrnehmen können, bitten sie Hubschrauber, nach Brandherden Ausschau zu halten. Die jeweilige Hubschrauberbesatzung teilt dann den Löschfahrzeugen mit, wo Feuer zu finden sind, und die Löschfahrzeuge suchen die angegebenen Ziele. Zuvor versuchen die Hubschrauber mit ihrer begrenzten Wasserkapazität, die Feuer zu löschen. Dabei greifen sie das jeweilige Feuer gewöhnlich nicht frontal an, sondern von den Flanken oder der Lee-Seite. Zudem informieren sich die Löschfahrzeuge gegenseitig über ihre jeweiligen Ziele und Tätigkeiten, koordinieren also ihre Aktivitäten. – Einem externen Betrachter vermittelt sich der Eindruck eines höchst selbständigen, sehr intelligenten Systems, auch einzeln intelligenter Agenten. Eigenständigkeit, selbständiges Erkennen der jeweiligen Lage, selbständige Entschlussfassung (stets mit Rücksicht auf das Ganze!) scheint ihr Verhalten zu bestimmen.

Doch nichts davon ist richtig. Die Löschfahrzeuge erscheinen nur deshalb als intelligent, weil sie einer relativ kleinen Anzahl von bedingten Regeln folgen.

- "Wenn du ein Feuer siehst und der Parameter 'Suchen-und-Bekämpfen' ist 'an', dann bewege dich in Richtung auf das Feuer, aber nur, wenn noch keine andere Einheit das gleiche Ziel hat!"
- "Wenn sich in deiner Bewegungsrichtung ein Hindernis befindet, so suche nach einer Lücke im Hindernis und setze diese Lücke als Zwischenziel!"
- "Wenn du einem Feuer näher als 10 m gekommen bist und der Parameter 'Suchen-und-Bekämpfen' ist 'an', dann sprühe Wasser auf das Feuer!"
- "Wenn dein Tank im Zustand 'Reserve' ist, dann suche nach einem Tankfahrzeug oder einer Tankstelle! Wenn aber das Feuer fast gelöscht ist, fahre nicht zum Tanken, sondern lösche weiter bis zur 'Notreserve'!"

Die Anzahl von 10-15 solcher Implikationen stellen die 'Intelligenz' einer Feuerwehreinheit dar. Diese Befehle werden oft hintereinander geschaltet (genauer gesagt: sie bilden 'automatisch' Verhaltenssequenzen). Zunächst wird nach einem Brandherd gesucht, dann wird zum erkannten Ziel gefahren, dabei werden Hindernisse umgangen und schließlich wird gelöscht. Und wenn das Löschen beendet ist, dann Derart bedingte Befehle kombinieren sich in vielfacher Weise dadurch, dass ein Verhalten die Bedingungen für andere erzeugt. Und damit erscheint das Verhalten des Systems als selbständig, vernünftig und bedacht.

Sogar *Selbstbezüglichkeit* kann in einem solchen Regelsystem realisiert sein:

- "Wenn du seit 100 Zeiteinheiten keinen Befehl bekommen hast, setze 'Suchen-und-Bekämpfen' auf den Zustand 'an'!"

Das erscheint nun wirklich als sehr selbständiges Verhalten. Die Feuerwehreinheit hat die Einsicht: "Ah ja, die obere Kommandozentrale ist anscheinend ausgefallen oder es gibt Störungen im Funksystem, also sollte ich mich selbständig auf die Suche nach Feuer begeben!" So sieht es aus, aber so ist es nicht. In Abhängigkeit vom Zeitverlauf wird ein Parameter verändert. Warum das geschieht und welchen Zweck das verfolgt, weiß das Löschfahrzeug nicht.

Auch *Selbstreflexion* erscheint realisiert:

- "Wenn du ein Zwischenziel setzt, das du schon einmal als Zwischenziel gesetzt hast, so setze den Parameter 'Kreis' auf 'an'!" ('Kreis' ist hier nichts als eine 'boolesche' Variable mit den beiden Werten 'an' und 'aus'. Lassen Sie sich also nicht von der Bedeutung der Buchstabenfolge

'K-r-e-i-s' dazu verleiten, zu glauben, die Löscheinheit habe eine Kreisfahrt identifiziert. Man hätte, statt 'Kreis' ebenso die Buchstabenfolge 'jjtzXP' als Namen für die Variable setzen können.)

- "Wenn 'Kreis' 'an' ist, dann zerstöre die aktuelle Zwischenzielhierarchie und setze das Endziel als 'aktuelles Ziel'!"

Die Einheit 'erkennt' also, dass sie im Kreis fährt und trifft Maßnahmen dagegen. (Das hilft gegen Kreisfahrten nicht immer, aber häufig.)

Echte Selbstreflexion ist das natürlich auch nicht, da die Feuerweereinheit nicht weiß, weshalb sie, wenn sie im Kreise fährt, ihre Zielhierarchie ändern soll. Sie ändert die Hierarchie, weil es so in ihrem Programm steht. Den Grund dieser Änderung kennt sie nicht. Und eigentlich erkennt sie auch nicht, dass sie im Kreis fährt; sie ändert unter bestimmten Bedingungen den Wert einer Variablen. Der Programmierer weiß, dass die wiederholte Setzung des gleichen Zwischenziels ein Indiz für eine Kreisfahrt sein kann, die Feuerweereinheit weiß das nicht.

Eine solche Steuerung kann als vernünftig, richtig, dem Problem angemessen bezeichnet werden. Nur eines kann nicht behauptet werden, dass sich das System aufgrund seiner Einsichten diese vernünftigen Steuerungen selbst ausgedacht hat. Und auch nicht, dass das System intelligent ist – intelligent war bzw. ist der Programmierer. (Und Programmierer sagen über ihre Produkte: "KI ist nicht eine Abkürzung für 'künstliche Intelligenz' sondern für 'künstlicher Idiot'.")

Derlei Systeme mit mehr oder minder komplizierten bedingten Befehlen können sicherlich sehr nützlich sein. Und daher werden solche Systeme auch weiterhin entworfen und konstruiert, und sie werden in unserem Alltag einen immer größeren Raum einnehmen. Und man wird solche Systeme auch weiterhin 'künstliche Intelligenz' nennen; KI hat sich eingebürgert. Aber Betrachtungen, wie die hier vorgetragenen, können immerhin bewirken, dass aufgehört wird zu glauben, dass uns die 'künstliche Intelligenz' – in der zur Zeit existierenden Form – eines Tages von unserem Platz als mit überragenden kognitiven Fähigkeiten ausgestatte Spezies verdrängen wird. Ray Kurzweil wird nicht müde zu betonen, dass das in absehbarer Zeit der Fall sein wird. Man muss ihm nicht glauben, denn die heutige, so genannte künstliche Intelligenz ist zu 100 % unser eigenes Produkt. Und wir sollten die KI nicht allzu hoch achten, wohl aber ihre Erzeuger – Informatiker und Programmierer – die solche Systeme entwerfen und realisieren. Diese müssen wirklich intelligent sein.

Das Fazit: *Künstliche Intelligenzen sind nur anscheinend intelligent!* Sie können sich nur in den Bereichen (scheinbar) intelligent verhalten, für die sie programmiert wurden. Der Leser möge versuchen, mit einem hocheffizienten Schachcomputer 'Mensch-ärgere-Dich-nicht' zu spielen! Und weil diese Scheinintelligenzen völlig hilflos sind, sobald es darum geht, sich an neue Bereiche anzupassen, werden wir kaum auf natürliche, d.h. menschliche Intelligenz verzichten können.

Unvollständige Kalküle und Gödel

Die oben behandelten Feuerwehrfahrzeuge verfügen mit ihren Wenn-dann-Befehlen über ein "Produktionssystem", wie es J.R. Anderson (s. z.B. Anderson & Lebière, 1998) nennt. Mit seiner ACT-R-Theorie versucht Anderson, menschliches Denken zu erklären.

Ein Produktionssystem besteht aus einer endlichen Anzahl von bedingten oder unbedingten Befehlen, so wie im Fall der Feuerwehrfahrzeuge geschildert. Anderson (und viele seiner Schüler)

entwerfen derlei Produktionssysteme, um damit das menschliche Denken zu erklären. Menschliches Denken ist eben die – je nach den gegebenen Bedingungen – variable Aneinanderreihung der Befehle eines solchen Produktionssystems. Das System produziert also Verhalten. (Die Bezeichnung 'Produktion' für eine Implikation, eine Wenn-dann-Aussage, wurde übrigens nicht gewählt, um damit auszudrücken, dass man auf diese Weise Verhalten produzieren kann. Er sollte vielmehr die Bezeichnung 'Ableitung' ersetzen; die Väter der modernen Logik mochten keine Semantik in ihren Systemen. Es wird nichts 'abgeleitet', es werden aufgrund vorgegebener Zeichenreihen und aufgrund bestimmter Transformationsregeln neue Zeichenreihen 'produziert').

Ist nun die Ableitung einer Verhaltensweise aus einem Produktionssystem 'Denken'? Wir meinen, dass das allenfalls teilweise stimmt; vielleicht ähneln die Ableitungsprozesse jenen Formen des Denkens, die die Engländer *reasoning*, schlussfolgerndes Denken nennen.

Diejenigen Formen des Denkens, die dazu dienen, Produktionssysteme zu erstellen oder zu verwerfen, können damit nicht gemeint sein. Im Gegensatz etwa zu Insekten haben Menschen kaum feste Produktionssysteme im Gehirn, sondern verwenden viel Denkarbeit darauf, solche zu entwerfen und zu ändern, sie zu erweitern oder zu verwerfen. Das heißt, es gibt eine recht umfangreiche Welt des Denkens jenseits der Deduktionen.

Produktionssysteme sind *Kalküle* im Sinne der Logik. Ein Kalkül enthält eine Menge von logischen Aussagen, die für wahr gehalten werden: Axiome. Aus einem Kalkül lassen sich Aussagen ableiten, gewöhnlich unendlich viele. Der Kalkül unserer Feuerweereinheiten lässt sich auf eine unendliche Menge von Waldbränden anwenden und erzeugt jeweils spezifische, stets andere Verhaltensweisen. Der Kalkül ist also durchaus kreativ und erzeugt gelegentlich auch Verhaltensweisen, die selbst den Programmierer (häufig negativ) überraschen.

Solche Produktionssysteme sind oft unvollständig. Es fehlen bestimmte Regeln. Z.B. fehlte in einer Vorform des Feuerwehrprogramms, das wir oben schilderten, die Regelung für Kreisfahrten. Das bedeutete eine erheblich geringere Effizienz der Feuerweereinheiten. Außerdem fehlten die Regelungen der Zusammenarbeit. Von einem wirklich intelligenten System sollte man erwarten, dass es diese Unzulänglichkeiten selbst identifizieren und den Missständen abhelfen kann. Das aber können die Systeme allenfalls dann, wenn sich falsche Annahmen im Axiomensystem befinden.

Ein System, welches gemäß eines Kalküls Verhaltensweisen produziert, kann 'merken', dass eine Implikation falsch ist. Wenn in einem Kalkül die Implikation vorhanden wäre: "Wenn du unter der Bedingung A die Aktion x ausführst, kommt M heraus!" und wenn dann bei der Anwendung der Regel nicht M herauskäme, könnte das System den Kalkül verändern, indem es die Implikation aus dem Regelwerk entfernt oder indem es die Implikation einschränkt ("Wenn du unter der Bedingung A und B x ausführst, so kommt M heraus!") oder indem es die Implikation in eine Wahrscheinlichkeitsaussage verwandelt: "Wenn Du unter der Bedingung A die Aktion x ausführst, kommt mit einer Wahrscheinlichkeit p ($p < 1$) M heraus!". Der Kalkül würde in jedem Fall eingeschränkt; er würde schwächer.

So könnte also das System durchaus lernen. Leider könnte es nur lernen, was nicht geht. Könnte es denn nicht auch 'positiv' lernen, könnte es nicht lernen, was geht? Es kann, jedenfalls anscheinend: Die Feuerweereinheiten in Abbildung 4 könnten einen Weg durch einen dichten Wald suchen und finden, um anschließend das Ergebnis ihrer Exploration in ihrem Gedächtnis abzuspeichern und sogar zu kommunizieren. Auf diese Weise würde eine Art von Wege-Kultur bei den Feuerlöschleinheiten entstehen. Es entsteht aber nicht wirklich etwas Neues, da der Weg

durch den Wald jeweils gemäß dem Kalkül abgeleitet worden ist; unter gleichen Bedingungen würde er wieder so abgeleitet werden.

(Obwohl der Weg implizit im Kalkül enthalten ist, ist es sehr hilfreich, ihn sich zu merken. Denn wenn man sich im gleichen Bereich – bei den Feuerweereinheiten: im gleichen Waldgebiet – erneut bewegen muss, könnte man auf die erneute zeitaufwendige Ableitung verzichten. Mit der Zeit würde man im Waldgebiet ein ganzes Wegenetz kennen, und das würde die Bewegung entschieden erleichtern und beschleunigen, besonders, wenn man seine Erfahrungen mit anderen teilt.)

Aber tatsächlich kreativ sind die Feuerwehrfahrzeuge nie; sie verharren innerhalb des Kalküls. Unsere 'Boxer-' und 'Turm-von-Hanoi'-Versuchspersonen hingegen erschaffen neue Kalküle.

Das Erschaffen neuer Kalküle oder die Erweiterung der bestehenden um neue Regeln, ist wichtig, denn Kalküle haben ihre Grenzen. Einmal die, die daraus resultieren, dass der Programmierer nicht an alles denkt. Aber noch schlimmer: Es gilt für Kalküle der Gödelsche Unvollständigkeitssatz:

- Jeder Kalkül, welcher Prädikate 2. Stufe (oder höher) aufweist, ist unvollständig.

Was heißt das? Was ist zunächst ein Prädikat 2. Stufe? Ein Prädikat ist eine Relation, eine Beziehung. Eine Beziehung ist beispielsweise '>', eine andere '<', eine andere ist 'stärker als' und natürlich ist auch die Gleichheit eine Beziehung $A = B$.

Eine Relation 2. Ordnung ist eine Relation zwischen Relationen oder eine Eigenschaft von Relationen. Eine einfache Relation 2. Ordnung wäre beispielsweise die Symmetrie. In der Aussage "Gleichheit ist symmetrisch!" (d.h. also, dass es gleichgültig ist, ob man schreibt $A = B$ oder $B = A$; beide Aussagen sind gleichwertig) ist 'symmetrisch' ein 'Prädikatenprädikat', ein Prädikat 2. Ordnung. Ein anderes Prädikat 2. Ordnung wäre die Umkehrbarkeit: Wenn $B > A$, dann $A < B$.

Das wären also Prädikaten-Prädikate. Es gibt auch Prädikaten-Prädikaten-Prädikate, also Relationen zwischen Relationen zwischen Relationen oder Eigenschaften von Relationen 3. Ordnung.

In unserem 'Feuerwehrekalkül' gibt es Prädikaten-Prädikate. Z.B. die Umkehrbarkeit: Wenn FW A schneller ist als FW B, so ist FW B langsamer als FW A.

Und für Kalküle vom Prädikatenkalkül 2. Ordnung aufwärts gilt der Gödelsche Unvollständigkeitssatz. Dieser besagt: Aus einem Kalkül mit Prädikaten mindestens 2. Ordnung kann man nicht alles, was mit dem Kalkül verträglich ist, ableiten. Etwas konkreter: Nicht alles, was nach Maßgabe des Kalküls wahr ist, ist aus dem Kalkül ableitbar. Und deshalb ist ein solches Kalkül unvollständig. Und die Unvollständigkeit ist auf keine Weise aufhebbar.

Denn man könnte meinen, dass man eine Aussage, die nicht ableitbar ist, dem Kalkül hinzufügen kann. Auf diese Art und Weise wird dann eine größere Menge von Aussagen ableitbar als vorher, weil durch die Kombination des neuen Satzes mit den anderen Sätzen des Kalküls Aussagen abgeleitet werden können, die bislang nicht ableitbar waren.

Das hilft aber alles nichts! Denn die Menge der ableitbaren Sätze ist zwar unendlich, aber die Menge der insgesamt gemäß dem Kalkül wahren Sätze ist gewissermaßen noch unendlicher. Die Menge der ableitbaren Sätze bleibt immer eine echte Teilmenge der innerhalb des Kalküls wahren Sätze. Man kann das Kalkül auf keine Weise vollständig machen. – Der Gödelsche Unvollständigkeitssatz war ein vernichtender Schlag etwa gegen die Hoffnung von Leibniz, Kalküle schaffen

zu können, in denen man die Entdeckung von neuen Zusammenhängen deduktiv bewältigen könnte. (Eine gute Einführung in Gödels Unvollständigkeitssätze findet sich bei Hoffmann, 2013.)

Die Gödelschen Sätze sagen aus, dass Handlungssysteme, gleichgültig für welche Bereiche, immer unvollständig sind und ewig bleiben werden. Oder sie sind vollständig, dann aber sind sie widersprüchlich. – Das aber werden Personen, die der Meinung sind, im Besitz eines Ideengebäudes zu sein, welches letztgültig alle Wahrheiten enthält, sehr ungern hören wollen.

Konkret bedeutet der Gödelsche Unvollständigkeitssatz für die Brandbekämpfung unserer Feuerwehreinheiten folgendes: Für eine bestimmte Brandsituation gibt es möglicherweise eine erfolgreiche Bekämpfungsmethode, die aber aus dem Axiomensystem leider nicht ableitbar ist.

Noch konkreter: Für eine Krebserkrankung gibt es möglicherweise Heilung durch eine Kombination bekannter Methoden. Aber der Arzt, der streng deduktiv, nach den Regeln der Kunst verfährt, kann sie nicht finden.

'Endgültig' ein Kalkül für einen bestimmten Handlungsbereich zu haben bedeutet, man muss sich darauf einstellen, den Kalkül ständig weiterentwickeln zu müssen, selbst wenn er wahr ist. Denn er ist für immer unvollständig. Wir müssen die Schwächen des Kalküls erkennen können und ihn dann weiter entwickeln. Dafür aber ist das Kalkül immer wieder kritisch zu betrachten und zu überlegen, wie er neuen Umständen angepasst werden kann. Sofern das Kalkül erfolgreiches Handeln ermöglicht hat, fällt das aber uns Menschen besonders schwer: Menschen lieben die Sicherheit!

Jenseits von Gödel?

Aus einem Kalkül ist also nicht alles abzuleiten? Wir Menschen können das, jedenfalls nahezu.

Wir können neue Axiome erfinden und auch neue Ableitungsregeln. Und auf diese Weise können wir Kalküle sinnvoll erweitern. Wir entgehen dem Gödelschen Unvollständigkeitssatz nicht, aber wir können ihn – gewissermaßen asymptotisch – außer Kraft setzen.

Wie geschieht das? Betrachten wir wieder ein Beispiel. Wenn Menschen planen – beispielsweise eine Reise mit dem Zug zu einem bestimmten Ziel aus verschiedenen Fahrten zusammensetzen – , dann neigen sie dazu, *vorwärts* zu planen: "Von Bamberg komme ich nach Lichtenfels, von dort nach Kulmbach, von da nach Coburg, dann nach Sonneberg und schließlich nach Lauscha!"

Vorwärtsplanen ist eine natürliche, aber nicht immer die beste Form der Planung. U.U. stellt sich heraus, dass man viel zu spät in Lauscha ankommt. Dann müsste die Planung wiederholt, also früher aus Bamberg abgefahren werden. Das ließe sich durch *rückwärts* planen ersparen: "Wenn ich um 18:00 Uhr in Lauscha ankäme, müsste ich um 17:30 Uhr in Saalfeld abfahren; damit ich vor 17:30 Uhr in Saalfeld bin, müsste ich in Probstzella um 16:45 Uhr abfahren..." Die Rückwärtsplanung würde vielleicht schneller sein; vielleicht wäre auch von Fall zu Fall eine Kombination von Vorwärts- und Rückwärtsplanung erfolgreicher.

Auf welche Weise kann man seine Planungs- und Handlungsorganisationsfähigkeiten verändern und verbessern? Die zentrale Methode ist hier wohl die Selbstreflexion. Man muss die eigenen, erfolglosen Planungen betrachten und sich überlegen, woran es lag, dass sie erfolglos waren. Aus einer solchen Analyse ergeben sich dann die Alternativen der Planungsmodalitäten. "Wenn ich von Bamberg aus vorwärts plane, beziehe ich eine wichtige Information, die ich berücksichtigen

sollte, zunächst nicht oder nur ungefähr in meine Planung ein: die gewünschte Ankunftszeit in Lauscha. Das kann dann die Ursache werden, die gesamte Vorwärtsplanung unter Umständen mehrfach wiederholen zu müssen. Das könnte ich mir ersparen, indem ich von vornherein, von Lauscha ausgehend, rückwärts plane!" – So ließen sich die Ableitungsmethoden für ein Kalkül verändern und erweitern.

Durch Selbstreflexion sind Einsichten in den eigenen Planungsprozess zu gewinnen, wird verstanden, warum etwas nicht oder weniger gut gelingt und wie Abhilfe geschaffen werden kann. Übrigens: man sollte 'Einsicht' nicht mit der Feststellung eines Zusammenhanges verwechseln. Man wird vielleicht empirisch feststellen: "Wenn ich auf den Lichtschalter drücke, dann geht das Licht an!" – Der nächste Stromausfall wird mich belehren, dass das nicht unbedingt immer zutreffen muss.

Die *Einsicht* in einen Zusammenhang ist viel stärker als die *Identifikation* eines Zusammenhanges. Eine Einsicht bedeutet nicht: "Wenn A, dann B!", sondern "Wenn A, dann B! Und das muss so sein, weil ...". – Dieses ist deshalb zu betonen, weil in der Psychologie immer wieder Tendenzen auftreten, das Gewinnen von Einsichten, Lernen durch Denken, abzuschaffen (s. z.B. Selg & Schermer, 2011, S. 113). Andererseits werden die Unterschiede zwischen Kontingenzlernen und der Gewinnung von Einsichten relativiert. Das Erkennen der Schwächen einer Vorwärtsplanung – wie oben beschrieben – geschieht keineswegs durch das Erleben der Unzulänglichkeiten der Vorwärtsplanung allein, sondern durch die Analyse der Gründe der Unzulänglichkeit. Rückwärtsplanen *muss* besser sein als Vorwärtsplanen; das ist keine Frage der Empirie.

Die Veränderung der Ableitungsregeln durch Selbstreflexion ist eine Form der Änderung eines Kalküls. Außerdem – und das ist fast noch wichtiger – können wir die 'Implikationen', die eigentlichen 'Produktionen' verändern. Oder wir können neue erfinden.

Wie kann das geschehen? Wiederum ein Beispiel: Der Leser möge annehmen, er befände sich mitten im Wald. Vor ihm liege ein tonnenschwerer Baumstamm, sauber von Ästen befreit, und außerdem stehe ihm ein Wagen mit einem Pferd zur Verfügung.

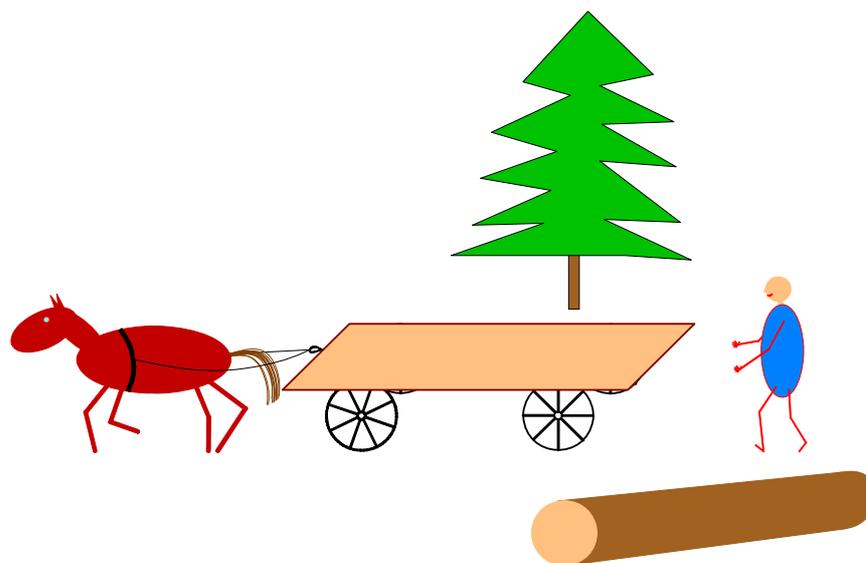


Abb. 5: Der Pferdewagen 1

Der Leser steht vor der Aufgabe, den Baumstamm auf den Wagen zu verladen. Die übliche Methode "Einfach-drauf-werfen!" funktioniert offensichtlich nicht; daher ist eine neue Idee gefragt. – Wenn man mehreren Versuchspersonen die in Abbildung 5 skizzierte Aufgabe stellt, fallen der Mehrzahl nur wenige Möglichkeiten ein. Wäre Hilfe aus dem nächsten Dorf zu erwarten? Gewiss eine denkbare Lösung, aber es könnte sein, dass im Dorf keine Hilfe zu finden ist. Also muss versucht werden, die Aufgabe selbst zu lösen. – So wäre zu überlegen, den Baumstamm mit einem Seil und einer Schlinge mit Hilfe des Pferdes zuerst an einem Ast anzuheben und danach auf den Wagen abzusenken. Allerdings wird das Vorhaben kaum erfolgreich sein, denn es dürfte auch für ein starkes Pferd unmöglich sein, einen tonnenschweren Baumstamm zu bewältigen: ein Pferd wiegt allenfalls 600-700 kg, der Baumstamm würde also im wesentlichen unbewegt am Boden liegen bleiben.

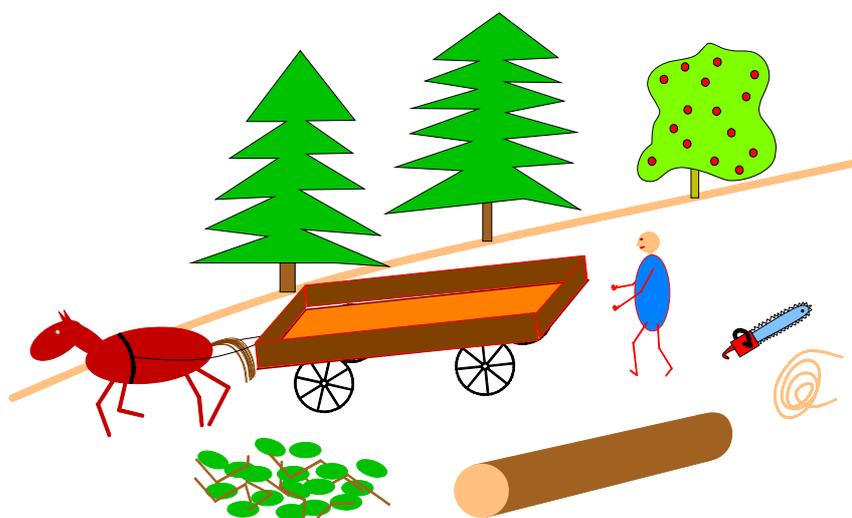


Abb. 6: Der Pferdewagen 2

Wenn den Probanden die gleiche Aufgabe mit der Abbildung 6 erteilt wird – einer gegenüber der in Abbildung 5 gezeigten, 'angereicherten' Situation – sieht die Angelegenheit hoffnungsvoller aus. Zu sehen sind ein Wagen mit Seitenwänden, Laub, das beim Entästen des Baumes angefallen ist, sowie eine Kettensäge.

Hier kommen Probanden leicht auf die Idee, aus den Seitenwänden eine schiefe Ebene zu errichten und das Pferd zu benutzen, den Baumstamm über diese schiefe Ebene auf den Wagen zu ziehen sowie zur Verminderung der Reibung zwischen Baum und schiefer Ebene Blätter oder kleine Äste als Unterlage zu verwenden.

Die Reichhaltigkeit des Bildes provoziert die Versuchspersonen dazu, sich zu überlegen, wie die vorhandenen Dinge zur Lösung der Aufgabe verwenden könnten. Es wäre aber zu einfach, die Dinge nur zu betrachten, es muss gedacht werden! Der entsprechende Denkvorgang ist eine allgemeine Prozedur, um neue Mittel und Möglichkeiten für die Lösung einer Aufgabe zu finden. Es ist ein Denken, welches wir "Was-ist-es-und-was-tut es?"-Denken nennen wollen. Der Prozess besteht daraus, sich Fragen zu stellen, allerdings nicht nur Fragen der Art "Was ist es?" und "Was tut es?", sondern weitaus anderer Art.

Dieser Algorithmus braucht *sinnliche Anschauungen* von den Dingen; es ist beispielsweise nötig zu wissen, welche Eigenschaften die Dinge besitzen, um dann eine Reihe von Fragen stellen:

"Was tut das Laub von selbst? Es wird verfaulen und vermodern. Wenn es verfault, entsteht eine schmierige Masse. Doch halt, die lässt sich auch jetzt schon erzeugen, indem man das Laub zerquetscht oder zerstampft. Es ist grünes Laub, enthält also Wasser. Zerrieben entsteht ein Gleitmittel für das reibungslosere Bewegen des Stammes!"

Zu fragen ist mithin nicht nur, was 'es' tut. Sondern auch, was man selbst damit tun kann. Viele andere Fragen können sich anschließen. Beispielsweise kann es hilfreich sei, zu wissen, warum sich etwas genau hier und nicht woanders befindet? Hat es jemand oder etwas zu einem bestimmten Zweck hierher gebracht? Zu welchem?

Man stellt also hinsichtlich einer Sache Kausal- und Finalfragen. Aber auch andere können nützlich sein, z.B. Ganzes-/Teil-Fragen. "Woraus besteht das?" (in unserem Fall zum großen Teil Laub und Wasser! Die Frage haben wir oben implizit bereits gestellt und beantwortet!) – "Und was kann man aus den Teilen machen?" "Einen Brei, also ein Schmiermittel!" Oder Teil-/Ganzes-Fragen: "Wo findet man Laub?" Oder Unter-/Oberbegriffsfragen: "Was ist Laub noch?", "Futter für die Rehe!" Das hilft hier nicht weiter. Oder doch? "Wenn man unter den Baumstamm Rehelle binden würde, könnte man ihn auch leichter bewegen. Und der Stamm würde dann nicht zurückrutschen! Rehelle sind nicht vorhanden, aber vielleicht eine Decke?..."

Der Was-ist-es-und-was-tut-es?-Prozess erzeugt also neues Material, welches wiederum als Ausgangspunkt eines neuen Was-ist-es-was-tut-es?-Prozesses dienen kann. Vom Laub zum Rehelle mit Rückrutsch-Hemmung; das ist doch immerhin ein Einfall.

Was hier stattfindet ist keineswegs ein zielloses, freies Assoziieren oder 'Versuch und Irrtum', sondern ein sehr differenzierter, gerichteter Erkundungsprozess, ist eine "allgemeine, rekursive, analytisch-synthetische Konstellationsamplifikation", kurz "ArasKam" (s. Dörner & Wearing 1995).

Voraussetzung für erfolgreiche ArasKams ist zum einen eine differenzierte Sprachbeherrschung, denn die Fragen des Was-ist-es-was-tut-es?-Algorithmus stellt man sich sprachlich; ein Wesen, das keine grammatikalische Sprache hat, kann sich die notwendigen Fragen nicht stellen. Sprache ist für die ArasKam eine unbedingte Voraussetzung.

Zum zweiten sind möglichst anschauliche Erfahrungen notwendige Voraussetzungen für eine erfolgreiche ArasKam. Eine propositionale (also rein symbolische) Bedeutungsstruktur, wie sie in der Cognitive Science üblich ist (s. z.B. Ashcraft, 2006, p. 322 ff), hilft nicht viel; man braucht die Bilder (*nicht nur die optischen*, auch akustische Bilder und Geruchs- und Tastbilder). Was aus Blättern auch werden kann, hat man vielleicht erfahren, als man ein Pfefferminzblatt in der Hand zerrieb. – Ein Bild von Laura, wenn sie Spaghetti isst, sagt weitaus mehr als die Zerlegung des Satzes "Laura isst Spaghetti mit der Gabel" in die Propositionen (d.h. elementaren Sätze) – Essen (Laura, Spaghetti), Essen (Laura, mit Gabel) –, die nach der propositionalen Bedeutungstheorie die Bedeutung des Satzes darstellt (s. Ashcraft, 2006, p. 324). Genauer gesagt: Die Bedeutung eines Satzes sind die einfachen Propositionen, in die man den Satz zerlegen kann und all das, was man daraus ableiten kann. Diese 'formale Semantik' ist zur Zeit sehr im Schwange. Sie verzichtet auf Bilder, wohl aus methodischen Gründen. Mit logischen Aussagen lässt sich gut umgehen, mit Bildern kann man nicht so schön methodisch verfahren wie mit Aussagen. Sie stellen kein klares, sauberes, abgeschlossenes Kalkül dar, dafür aber ein fast unerschöpfliches.

Wir wollen nicht beim Laub bleiben; bei der Betrachtung der Szene in Abbildung 6 könnte man auch noch auf völlig andere Ideen kommen. Z.B. auf diese: "Hier gibt es eine Kettensäge! Diese könnte man benutzen, um den Stamm zu zerlegen, beispielsweise in Scheiben zu jeweils 20 kg

Gewicht, die sich leichter auf den Wagen werfen lassen." – "Ja, dann macht man aber doch den Stamm kaputt!" – "Na und? Wenn er doch Brennholz werden soll."

Durch die ArasKam lassen sich neue Operatoren, neue 'Produktionen' erfinden. Und daraus können sich völlig neue Kalküle ergeben. Dafür müssen verschiedene Voraussetzungen gegeben sein:

1. Natürlich haben Menschen, denen es leicht fällt, sich sehr reichhaltige *Bilder* von Situationen zu machen, bessere Voraussetzungen für die ArasKam, als Menschen, die das nicht so gut können.

Schon Platon wusste, dass neben der Sprache auch das Bild beim Denken eine große Rolle spielt und spielen muss. "So nimm dann auch an, dass noch ein anderer Meister sich zu derselben Zeit in unsern Seelen befindet. ... Ein Maler der nächst dem Schreiber die Bilder der Gespräche in die Seele einzeichnet." (Philebos 39 b in Platon, Bd. 7, S. 349)

Also Bild und Sprache benötigen wir! Was noch?

Lichtenberg meinte, dass das Genie dadurch gekennzeichnet sei, dass es im Umgang mit der Welt ständig den Was-ist-es-und-was-tut-es?-Algorithmus erprobt. "Das große Genie urteilt in Gesellschaften nicht allein oft in Dingen die nicht in sein Feld gehören, sondern auch in den seinigen nicht allzeit gut, es seien denn Dinge, die es sehr häufig überdacht hat, oder worüber eine bloße Belesenheit entscheidet. Sich selbst allein gelassen besitzt es eine gewisse Aufmerksamkeit auf alltägliche Dinge, in welchem ein Hauptunterscheidungszeichen des großen Geistes zu liegen scheint, sich nicht durch Lokal-Denkungsart hinreißen zu lassen, alle Begebenheiten als individua anzusehen und nicht durch einen dem schwachen Menschen sehr natürlichen Kunstgriff sie in dem Genere summo alltäglicher Dinge alle gleich unbemerkt vorbei streichen zu lassen. So ist niemand der Welt, hauptsächlich der gelehrten, unnützer, als derjenige Fromme, der alle Dinge nur in dem Genere summo des Irdisch-Vergänglichen, oder seine Empfindungen in unseren Worten ausgedrückt, des Nichtswürdigen übersehen und der Untersuchung unwürdig schätzt. Der Philosoph muss hierin einigermaßen seinem Schöpfer nachahmen, und, wenigstens in einem engen Bezirk nur individua sehen. Diese Art die Dinge zu betrachten ist ein Hauptkennzeichen des Genies, es betrachtet freilich nicht alles so, es würde sonst Gott selbst sein müssen. Diese Art die Dinge anzusehen gibt dem Genie eine gewisse Kenntnis der Dinge um sich, die nichts weniger als immer systematisch ist, die aber hinlänglich ist das Wahre vom Falschen wo nicht völlig genau abzusondern, doch die erste Trennung durchaus zu machen..." (Lichtenberg 2000, S. 5; Rechtschreibung und Zeichensetzung wie im Original.)

Durch diese Art fortwährender Weltbetrachtung und -analyse schafft sich das 'Genie' einen Vorrat von Erfahrungen, die es fallweise einsetzen kann. Bei dem 'Rehfell-als-Gleitmittel!'-Einfall spielte das Wissen des Probanden eine Rolle, dass man früher Langlaufskiern Felle unterschnallte, um mit dem Ski auf der einen Seite einen Abhang erklimmen zu können (der Ski rutscht nicht rückwärts), auf der anderen Seite aber einen Hang herab fahren zu können (der Ski gleitet ohne Hemmung vorwärts).

2. Also braucht man viele *Erfahrungen* über alles und jedes. Und man sollte keine Gelegenheit auslassen, solche Erfahrungen zu sammeln!
3. Und dann schließlich ist eine differenzierte *Sprache* wichtig, um die Dinge differenziert 'befragen' zu können.
4. Und man sollte eine motivationale Bedingung noch erwähnen, die einen ständig antreibt, neue Erfahrungen zu sammeln, nämlich die *Neugier*, das Bestreben, sich möglichst oft dem Unbekannten auszusetzen.

Die beiden Beispiele, die wir diesem Beitrag voranstellten – die Lösung der Merkaufgabe durch 'Umi-Or-Limi-Ur' bzw. die Lösung des 'Turm-von-Hanoi'-Problems durch Drehen des Brettchen bzw. durch Ändern der Etiketten – sind die Ergebnisse einer ArasKam. Ein System, welches in der Lage wäre, sich mit Hilfe dieses Algorithmus neue Operatoren zu verschaffen und welches außerdem in der Lage wäre, sein problemlösendes Vorgehen selbstkritisch zu hinterfragen, um es den jeweiligen Gegebenheiten anzupassen, wäre auf dem besten Wege zur Intelligenz. Es wäre in der Lage, sich selbst zu programmieren.

Ist ein solches System auch als künstliches System möglich? Wir meinen: Ja! Denn unsere Beschreibung des ArasKam liegt nahe an der Beschreibung eines Prozesses der Informationsverarbeitung. Aber diesen Prozess wirklich zu algorithmisieren, wird nicht einfach sein. Man muss ein solches System mit natürlicher Sprache ausstatten; allein das ist ein schwieriges Unterfangen. Man muss eine lebenslange Sammlung und Vernetzung/Integration von Information realisieren können, sowie den Umgang mit Bildern. Auch das ist problematisch. – Ray Kurzweil wird im 'Spiegel' vom 02.12.2013 mit der Aussage zitiert, dass bis 2045 natürliche und künstliche Intelligenz nicht mehr zu unterscheiden wären. Bislang sind Ansätze einer solchen Konvergenz nicht zu erkennen.

Ein 'echtes' System mit künstlicher Intelligenz würde mehr einem *künstlichen Lebewesen* gleichen, als den heutigen Systemen mit künstlicher Intelligenz. Es müsste motiviert sein, auf jeden Fall Neugier besitzen, wohl auch eine Art von Kompetenzbedürfnis. Es müsste über 'echte' Sprachfähigkeit verfügen, inklusive die Fähigkeit, Sprache zur Konstruktion von Vorstellungen benutzen zu können. Es müsste den Umgang mit Bildern beherrschen; in dieser Beziehung sind die gegenwärtigen Systeme der künstlichen Intelligenz noch sehr mangelhaft.

Auf jeden Fall wäre aber ein solches künstliches System insofern problematisch, als seine Entwicklung *nicht mehr voraus zu sehen* wäre. Im Gegensatz zu den gegenwärtig bekannten, gemeinhin als künstliche Intelligenz deklarierten Systemen, wäre es aber wirklich autonom.

Literatur

- Anderson, J. R. & Lebière, C. (1998): Atomic Components of Thought. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N.J.
- Ashcraft, Mark. H. (2006): Cognition (4th Edition). Pearson International Edition, Upper Saddle River, N. J.
- Dörner, Dietrich & Wearing, Alex J. (1995): Complex Problem Solving. Toward a (Computersimulated) Theory. In: Frensch, Peter & Funke, Joachim (Eds.): Complex Problem Solving – The European Perspective. Lawrence Erlbaum, Hillsdale, N. J., pp 65-99
- Guthke, J. (1972): Zur Diagnostik der intellektuellen Lernfähigkeit. Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin
- Heiß, R. (1960): Zum Begriff der Intelligenz. Diagnostica, Vol. 6, S. 3-11
- Hoffmann, Dirk, W. (2013): Die Gödel'schen Unvollständigkeitssätze. Springer, Berlin
- Klaus, Georg (1968): Lexikon der Kybernetik. Dietz-Verlag Berlin

- Lange, Erhard & Alexander, Dietrich (Herausgeber) (1982): Philosophenlexikon. Dietz-Verlag Berlin
- Lichtenberg, Georg Christoph (2000): Schriften und Briefe – Sudelbücher I (herausgegeben von Wolfgang Promies). Zweitausendeins, Frankfurt/Main
- Platon (Ausgabe von 1990): Timaios – Kritias – Philebos. Band 7 der Werke in 8 Bänden, herausgegeben von Gunther Eigler, bearbeitet von Heinz Hoffmann, deutsche Übersetzung von Friedrich Schleiermacher. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Selg, H. & Schermer, Franz J. (2011): Lernen. In: Schütz, Astrid, Brand, Matthias, Selg, Herbert & Lautenbacher, Stefan (Herausgeber): Psychologie. Kohlhammer, Stuttgart, S. 104-119

[13.12.13]

Anschrift des Autors:

Prof.em. Dr. Dietrich Dörner
Otto-Friedrich-Universität Bamberg
An der Weberei 5
D – 96049 Bamberg

dietrich.doerner@uni-bamberg.de