Entscheidungs- und Willensfreiheit in konnektionistischen Modellen

Dietrich Albert & Christof Körner

Albert, D., & Körner, C. (1996). Entscheidungs- und Willensfreiheit in konnektionistischen Modellen. In M. von Cranach, & K. Foppa (Eds.), *Freiheit des Entscheidens und Handelns. Ein Problem der nomologischen Psychologie* (pp. 219-233). Heidelberg, Germany: Asanger.

Unter *Willensfreiheit* wollen wir die Möglichkeit verstehen, sich innerhalb eines gewissen Rahmens eigene Ziele oder Präferenzen zu setzen und zu eigenen Wertvorstellungen zu kommen. Diese sind Produkte von Erfahrungen und können aufgrund von Erfahrungen modifiziert werden.

Entscheidungsfreiheit wird als die Möglichkeit verstanden, eine von zwei oder mehr (Handlungs-)Alternativen auszuwählen.

Während also Willensfreiheit die Setzung eigener Ziele und Wertvorstellungen betrifft, bezieht sich Entscheidungsfreiheit auf die Auswahl einer von mehreren Handlungsalternativen bzw. direkt auf die Auswahl eines bestimmten von mehreren Objekten aus einer vorgegebenen Alternativenmenge. Diese Auswahl ist wesentlich durch die vorgeordnete Setzung der Ziele und Präferenzen determiniert. Somit wird Entscheidungsfreiheit als nachgeordneter Aspekt von Willensfreiheit aufgefaßt, oder anders gesagt: Entscheidungsfreiheit setzt Willensfreiheit bis zu einem gewissen Grade voraus.

Aus psychologischer Sicht stellt sich in diesem Zusammenhang das Problem, wie in einer Entscheidungssituation die unterschiedlichen Ziele und Präferenzen einer Person mit den aktuell hinzutretenden Informationen und Bewertungen von Alternativen und deren Merkmalen zusammenwirken und zu einer Entscheidung bzw. der Auswahl einer Alternative führen. Dabei muß der Umstand Berücksichtigung finden, daß Ziele und Präferenzen wie auch Alternativen untereinander wechselseitig in vielfacher Beziehung zueinander stehen.

Der Ausgangspunkt für die folgenden Überlegungen besteht darin, folgende Größen als zu erfüllende Randbedingungen in ein Modell menschlichen Entscheidens einzuführen: Einerseits die Abhängigkeiten innerhalb der Menge der subjektiven Ziele und Präferenzen sowie innerhalb der Menge der in der Entscheidungssituation hinzukommenden Informationen, andererseits auch die Abhängigkeiten zwischen diesen beiden Mengen.

Bei einer Entscheidungssituation ist die gleichzeitige Erfüllung einer großen Anzahl von Randbedingungen gefordert. Zumeist wird es keine perfekte Entscheidung geben, bei der alle Randbedingungen erfüllt sind. Auch werden einige Randbedingungen wichtiger sein als andere. Die Lösung erfordert also die Erfüllung von möglichst vielen der wichtigsten Randbedingungen.

Um den Prozeß der Verarbeitung und Integration dieser Randbedingungen im Hinblick auf eine Entscheidung zu beschreiben und zu erklären, wird im folgenden eine Interpretation eines konnektionistischen Modells und eines

Spezialfalls davon gegeben. Dabei wird menschliches Entscheiden zwischen Alternativen als Suchprozeß nach einer unter gegebenen Randbedingungen möglichst optimalen Lösung aufgefaßt.

Grundstruktur konnektionistischer Entscheidungsmodelle

Die Eigenschaft konnektionistischer Modelle, zu einer vorgegebenen Menge von Randbedingungen eine möglichst optimale Lösung zu finden, wird als *constraint satisfaction* (McClelland & Rumelhart, 1988) bezeichnet. Verschiedenartigste Abhängigkeiten zwischen repräsentierten Größen, hier allgemein *(Un-)Verträglichkeiten* genannt, können als Randbedingungen repräsentiert werden. Insbesondere diese Eigenschaft lassen die Vertreter dieser Klasse als Modelle menschlichen Entscheidens besonders geeignet erscheinen.

Als Ausgangspunkt für die Modellarchitektur dient eine endliche Menge einfacher *Verarbeitungselemente (units)*, die entweder einen diskreten – meist binären – Wert oder einen in der Regel auf das Einheitsintervall eingeschränkten reellen Wert, die sogenannte *Aktivierung* oder den *Aktivierungszustand*, annehmen können. Diese Verarbeitungselemente können prinzipiell alle wechselseitig (bidirektional) miteinander verknüpft sein; beim Verknüpfungsmuster sind aber Einschränkungen z. B. in Form fehlender Verknüpfungen möglich. Die Verbindung zwischen zwei Elementen ist durch eine (meist positive) reelle Zahl, die *Verbindungsstärke*, gewichtet.

In den hier betrachteten Modellen kann zur Beschreibung des Gesamtzustands eines Netzwerks, also all der Aktivierungszustände seiner Verarbeitungselemente und der zugehörigen Verbindungsstärken, ein globales Maß als Summe über die paarweisen Produkte der Aktivierungen der Verarbeitungselemente, gewichtet mit den zugehörigen Verbindungsstärken, definiert werden.

Die Dynamik der Netzwerke, also ihr Verhalten in der (diskreten) Zeit, wird durch eine Gleichung beschrieben, die für die Verarbeitungselemente eine Regel angibt, nach der diese von einem Aktivierungszustand in den (zeitlich) nächsten übergehen. Diese Regel ist so geartet, daß die lokalen Zustandsübergänge der einzelnen Verarbeitungselemente im Laufe der Zeit zu einer Maximierung des globalen Maßes für den Gesamtzustand des Netzwerks führen.

Diese geschilderten Prinzipien der Architektur und Dynamik, insbesondere aber die darin umgesetzte Eigenschaft der constraint satisfaction erfahren in konkreten Modellen Spezifikationen, die eine entsprechende Interpretation als Modelle menschlichen Entscheidens erlauben. Im folgenden werden zwei Modelle dieser Klasse vorgestellt[1].

A. Boltzmann-Maschinen

Boltzmann-Maschinen (Aarts und Korst, 1989) werden auch als thermodynamische konnektionistische Modelle bezeichnet, weil ihre Dynamik eine Analogie

in der Vielteilchenphysik besitzt. Eine Menge von Verarbeitungselementen, die lediglich einen Aktivierungszustand von Eins (Ein) oder Null (Aus) haben können, sind wechselseitig über Verbindungen miteinander verknüpft. Auch Verbindungen eines Verarbeitungselementes mit sich selbst sind erlaubt. Jeder Verbindung ist ein reellwertiges Gewicht als Verbindungsstärke zugeordnet. Ist dieses Gewicht gleich Null, so besteht keine Verbindung zwischen den Verarbeitungselementen. Für jedes verbundene Paar von Verarbeitungselementen wird das Produkt aus den beiden Zuständen der Verarbeitungselemente und dem Wert ihres Gewichtes gebildet. Diese Produkte werden über alle Verbindungspaare aufsummiert. Die resultierende sogenannte *Konsensusfunktion* ordnet jedem Systemzustand, d. h. jeder möglichen Kombination von Aktivierungen der Verarbeitungselemente eine reelle Zahl zu. Ist der Wert eines Verarbeitungselementes Null, so ist auch das Produkt mit allen weiteren damit verbundenen Verarbeitungselementen Null und dieses Element und seine Verbindungen liefern keinen Beitrag zum Konsensus. Die Veränderung im globalen Maß des Konsensus, die sich aus dem Zustandswechsel eines einzelnen Verarbeitungselementes ergibt, kann lokal, d. h. ausschließlich durch Betrachtung des jeweiligen Elementes und seines Zustandes berechnet werden.

Ziel der Modelldynamik ist die Maximierung des Konsensus. Einzelne Verarbeitungselemente ändern aufgrund ihres Beitrages zum Konsensus und einer Zufallskomponente ihre Zustände so, daß der Konsensus im Laufe der Zeit zunimmt. Die Zufallskomponente ist zu Beginn des Prozesses groß, so daß auch eine vorübergehende Abnahme des Konsensus möglich ist. Mit der Zeit wird der Zufallseinfluß immer mehr verringert, so daß die Zustandsübergänge der Verarbeitungselemente immer stärker vom damit einhergehenden Konsensusunterschied abhängen, bis sie schließlich nur noch durch ihn bestimmt werden. Dieses Verfahren gewährleistet, daß Boltzmann-Maschinen unter bestimmten Umständen durch viele lokale Zustandsänderungen einzelner Verarbeitungselemente das globale Maximum der Konsensusfunktion finden und nicht in einem lokalen Maximum „gefangen" bleiben, wie dies möglich wäre, wenn das Verfahren ohne Zufallseinfluß durchgeführt würde.

Der Prozeß des Wählens und Entscheidens zwischen Alternativen kann in diesem Rahmen als Such- bzw. Problemlöseprozeß aufgefaßt werden, der zu einer Menge vorgegebener, vielfältig miteinander in Beziehung stehender Randbedingungen (constraints) eine möglichst gute Lösung zu finden sucht, und damit eine Entscheidung trifft, die mit den Randbedingungen bestmöglich verträglich ist. Die Alternativen selbst, sowie die Ziele, Präferenzen und Wertvorstellungen des Entscheiders, auch der gesamte Entscheidungskontext, zu dem bspw. eine experimentelle Instruktion gehören kann, werden durch die Verarbeitungselemente repräsentiert.

Welche Größen im Modell repräsentiert werden, wird von Fall zu Fall verschieden sein. Für eine übliche Entscheidungssituation werden sicherlich

Verarbeitungselemente, die die Alternativen und deren Merkmale abbilden, vorgesehen sein. Weiterhin wird man Verarbeitungselemente für subjektive Präferenzen benötigen. Diese können sich auf einzelne Merkmale, aber auch auf Alternativen selbst beziehen. Das bedeutet, daß im Modell wechselseitige Verknüpfungen zwischen Verarbeitungselementen der Präferenzen und Verarbeitungselementen der Alternativen und Merkmale bestehen. Sind Merkmale der Alternativen mit den Präferenzen verträglich, so wird die Verknüpfung mit einer entsprechend großen positiven Verbindungsstärke versehen sein. Ist das Gegenteil der Fall, so wird die Verbindungsstärke negativ sein. Wenn ein Merkmal oder eine Alternative bezüglich verschiedener Präferenzen neutral sind, so ist die Verbindungsstärke Null, d. h. es besteht keine Verknüpfung zwischen den jeweiligen Verarbeitungselementen. Auch unter den Verarbeitungselementen, die Alternativen und Merkmale sowie Präferenzen repräsentieren,werden Verknüpfungen – je nach deren Verträglichkeit miteinander – bestehen. Üblicherweise sind die Verknüpfungen, die Ziele und Präferenzen des Entscheiders betreffen, mit einem hohen Gewicht versehen. Auf diese Weise sind die Randbedingungen der Entscheidungssituation im Modell repräsentiert.

Bestehe eine einfache Entscheidungssituation beispielsweise darin, den nächsten Urlaubsort auszuwählen. Es gebe eine Präferenz für „Erholungsurlaub" und für „Sonne, Strand und Meer". Eine Alternative mag nun zwar die letzteren Eigenschaften besitzen, weswegen ihre entsprechenden Merkmale mit der Präferenz eine positive Verknüpfung haben und ihre gemeinsame Aktivierung den Konsensus erhöht. Allerdings habe diese Alternative auch das Merkmal „überlaufen", welches aufgrund der Zugehörigkeit zur Alternative höchstwahrscheinlich aktiviert wird. Dieses Merkmal aber ist mit der Präferenz „Erholungsurlaub" unverträglich, also negativ verknüpft, was bei seiner Aktivierung eine Verringerung des Konsensus zur Folge hat. Je nach Bedeutsamkeit der Präferenzen und Verfügbarkeit weiterer Alternativen kann aber dennoch eine Lösung gefunden werden, die die Randbedin-gungen hinreichend erfüllt.

Sind also zwei Verarbeitungselemente aktiv, so ist auch die zwischen ihnen bestehende gewichtete Verknüpfung aktiviert, die die Randbedingungen bzw. die wechselseitigen Verträglichkeiten repräsentiert. Auf Alternativenebene sind z.B. zwei Alternativen miteinander unverträglich, wenn es sich um eine Zwangswahl handelt, also genau eine der beiden Alternativen zu wählen ist. Die diese Alternativen repräsentierenden Verarbeitungselemente wären dann durch eine große negative Verbindungsstärke verknüpft, so daß bei ihrer gleichzeitigen Aktivierung der Konsensus deutlich abnähme. Besitzen zwei oder mehrere Alternativen das gleiche Merkmal, z. B. „sonniger Strand", so wird eine entsprechende Präferenz im Verlauf des Entscheidungsprozesses über eine positiv gewichtete Verknüpfung höchstwahrscheinlich dieses Merkmal aktivieren; dieses seinerseits ist durch entsprechende Verknüpfungen mit den Alternativen verbunden, die dieses Merkmal besitzen, und wird daher die Wahrscheinlichkeit

erhöhen, daß diese Alternativen gleichfalls aktiviert werden. Es bestehen also Randbedingungen zwischen verschiedenartigsten Verarbeitungselementen.

In Übereinstimmung mit Befunden zum Lauten Denken beim Wählen zwischen Alternativen steht die Modelleigenschaft, daß zu Beginn des Entscheidungsprozesses Repräsentationen, also Verarbeitungselemente durchaus eher zufällig aktiv sind, während im zeitlichen Verlauf des Entscheidens immer stärker solche Repräsentationen von Merkmalen aktiv werden, die mit der endgültigen Entscheidung in Übereinstimmung stehen. Am Anfang des Prozesses wird der gesamte Raum möglicher Zustandskombinationen der Verarbeitungselemente nach einer Lösung „abgesucht". Dabei findet das System schon solche Teilräume, die einen substantiellen Beitrag zum Konsensus leisten, weil die beteiligten, d. h. aktivierten Verarbeitungselemente aufgrund positiver Gewichte besonders verträglich miteinander sind. Dadurch wirkt sich der Zufallseinfluß bei ihnen weniger aus. Üblicherweise wird es sich dabei v. a. um Verarbeitungselemente handeln, die Präferenzen abbilden, denn diese sind mit anderen Verarbeitungselementen durch Verknüpfunen mit hohem Gewicht verbunden. Im Zeitverlauf konzentriert sich die Suche dann darauf, weitere Verarbeitungselemente zu finden, die den Konsensus weiter erhöhen, auch wenn ihr Beitrag geringer ist. Normalerweise werden bereits zu Beginn des Entscheidungsprozesses viele Verarbeitungselemente, die Präferenzen abbilden, aktiviert sein, da diese mit anderen Verarbeitungselementen über hohe Verbindungsgewichte verknüpft sind.

Eine Entscheidung gilt als getroffen, wenn sich der Konsensus durch Zustandsübergänge von Verarbeitungselementen nicht mehr erhöhen läßt und daher keine Zustandsänderungen mehr auftreten. Die Zustände der Verarbeitungselemente und die durch sie repräsentierten Randbedingungen bei der Entscheidung stehen zu diesem Zeitpunkt in einem optimal verträglichen Verhältnis zueinander.

Ein interessanter Fall ergibt sich, wenn die Konsensusfunktion zwei Maxima besitzt. Das System wählt dann zwar einen Endzustand, der einem dieser beiden Maxima entspricht; dies geschieht aber mehr oder weniger zufällig. Ließe man das System die gleiche Entscheidung nochmals treffen, so könnte es sich genauso für die durch das andere Maximum repräsentierte Alternative entscheiden.

Zwingt man das System zu einer vorzeitigen Entscheidung, tritt ein interessantes Phänomen auf. Man läßt in diesem Fall den Entscheidungsprozeß nicht bis zum Ende ausführen, bei dem der Zufallseinfluß bei den Zustandsänderungen der Verarbeitungselemente keine Rolle mehr spielt. Statt dessen wird das System vorher „angehalten" und der Zustand zu diesem Zeitpunkt betrachtet. Je näher dieser Zeitpunkt dem Endzustand zeitlich benachbart ist, desto höher werden in der Regel die Konsensuswerte bereits sein. Die Güte der Entscheidung im Sinne der Verträglichkeit der Randbedingungen nimmt also im Zeitverlauf zu. Da aber der Zufallseinfluß bei den Zustandsübergängen noch wirk-

sam ist, kann durchaus auch eine Konfiguration mit sehr geringem Konsensus auftreten. Dies ist umso wahrscheinlicher, je weiter der Anhaltezeitpunkt von dem Zeitpunkt des Endzustandes des Systems entfernt ist. Auch dieses Modellverhalten stimmt mit Beobachtungen überein, die sich ergeben, wenn man Personen zwingt, vorzeitig eine Entscheidung zu treffen.

Eigenschaften menschlichen Entscheidens unter Zeitdruck haben ebenfalls eine Entsprechung in Boltzmann-Maschinen. Menschliche Entscheider kommen bei wachsendem Zeitdruck zu weniger optimalen Entscheidungen. Das gleiche Phänomen ergibt sich im Systemverhalten, wenn der Zufallseinfluß zu schnell verringert wird. Das Modell trifft seine Entscheidung dann zwar in kürzerer Zeit, hatte aber weniger Gelegenheit, den Raum möglicher Aktivierungszustände abzusuchen, was dazu führen kann, daß es bei einem lokalen Maximum der Konsensusfunktion „stehenbleibt".

Verschiedenene Entscheidungen lassen sich hinsichtlich ihrer Güte, ausgedrückt als Höhe des erreichten Konsensus, miteinander vergleichen. Dadurch ergibt sich u. a. die Möglichkeit, Entscheidungen qualitätsabhängig zu treffen. Eine Entscheidung gilt erst als getroffen, wenn ein bestimmter Konsensuswert, also ein Kriterium, erreicht ist oder überschritten werden kann. Wenn dies geschieht, kann eine zufriedenstellende Entscheidung bereits getroffen werden, bevor der Entscheidungsprozeß das Konsensusmaximum erreicht. Aufgrund des probabilistischen Elements der Netzwerkdynamik kann im Verlauf der Entscheidung der Konsensus schon in einem frühen Stadium Werte annehmen, die in der Nähe des Kriteriums liegen oder es sogar überschreiten. Dieses könnte im Extremfall zu einer (vorzeitigen) anderen Alternativenauswahl führen als derjenigen, die beim Erreichen des Konsensusmaximums beobachtet würde. Das damit einhergehende Phänomen des „Schwankens" zwischen Alternativen steht in Einklang zu Befunden aus Untersuchungen zu kriteriumsabhängigen Wahlmodellen (Albert, Aschenbrenner & Schmalhofer, 1989), die gleichermaßen Entscheiden als Prozeß der Evidenzakkumulation für die verfügbaren Alternativen auffassen. Wird nun andererseits das Kriterium nicht erreicht, so kann dies so gedeutet werden, daß die Entscheidungsumstände keine Wahl ermöglichen, die das Qualitätskriterium des Entscheiders befriedigt.

B. Harmonie-Netzwerke

Harmonie-Netzwerke (Smolensky, 1986) können als Spezialfälle von Boltzmann-Maschinen angesehen werden. Sie sind im vorliegenden Kontext deshalb von Interesse, weil eine Einschränkung in ihrer Architektur eine größere Strukturierung des repräsentierten Wissens ermöglicht, sowie die Repräsentation elementarlogischer Aussagen und deren Verknüpfungen gestattet. Die Dynamikprinzipien von Harmonie-Netzwerken erlauben dann die Lösung von Wahrheitswerteproblemen bei Boolschen Termen. Der höhere Strukturierungsgrad erlaubt uns eine Interpretation des dynamischen Geschehens in Harmonie-Netzwerken im Hinblick auf Entscheidungs- und Willensfreiheit.

Die Verarbeitungselemente von Harmonie-Netzwerken werden in zwei Teilmengen zerlegt, die *Repräsentationselemente* und die *Wissensatome*. Im Gegensatz zu Boltzmann-Maschinen, bei denen alle möglichen paarweisen Verknüpfungen zugelassen sind, dürfen bei Harmonie-Netzwerken die Verarbeitungselemente innerhalb einer dieser Teilmengen nicht miteinander verknüpft sein. Die Randbedingungen zwischen den Repräsentationselementen werden durch die Wissensatome ausgedrückt. Die Repräsentationselemente, die selbst nochmals unterteilt sein können, dienen einerseits zur Abbildung externer Größen im Netzwerk; das sind im vorliegenden Fall wiederum Alternativen, deren Merkmale, Instruktionen, Kontextmerkmale etc. Andererseits sind durch sie abstraktere Größen wie Wertvorstellungen, Präferenzen, allgemeine Ziele usw. repräsentiert. Die Wissensatome enthalten Informationen darüber, wie die Repräsentationselemente miteinander in Beziehung stehen, d. h. welche Repräsentationselemente in aktiviertem Zustand mit anderen verträglich sind, so daß deren Aktivierung ebenfalls günstig ist, und mit welchen sie unverträglich sind. Die Verträglichkeitsinformation in den Wissensatomen wird durch ein positiv reelles Gewicht modifiziert, das mit jedem Wissensatom assoziiert ist. So ist es möglich, den Verträglichkeitsinformationen beim Entscheidungsprozeß unterschiedlich große Bedeutung zukommen zu lassen.

Während also bei Boltzmann-Maschinen die constraints (implizit) in den Verknüpfungen zwischen den Verarbeitungselementen enthalten sind, werden sie bei Harmonie-Netzwerken explizit durch eigene Verarbeitungselemente, die Wissensatome und deren Gewichte, dargestellt.

Durch die obengenannte Einschränkung im Verknüpfungsmuster ist bei Harmonie-Netzwerken eine Strukturierungsmöglichkeit der Verarbeitungselemente gegeben, die sich als Verarbeitung in mehreren Schichten darstellen läßt. Dabei wechseln sich Schichten von Repräsentationselementen mit Schichten von Wissensatomen ab. Die Verarbeitungselemente einer Schicht sind miteinander nur indirekt durch Verarbeitungselemente einer anderen Schicht verknüpft.

In einem Harmonie-Netzwerk als Entscheidungsmodell wird es eine Schicht von Repräsentationselementen geben, die externe Größen wie z.B. Merkmale von Alternativen abbildet. Darauf folgt eine Schicht mit Wissensatomen, die Informationen darüber enthalten, welche Merkmale zu welchen Alternativen gehören. Die Alternativen selbst sind dann in einer weiteren Schicht von Repräsentationselementen angesiedelt. Nun können zusätzliche Schichten folgen. Beispielsweise könnten Wissensatome die Randbedingung festlegen, daß alle Alternativen miteinander unverträglich sind, also eine Zwangswahl vorliegt. Auch andere (externe) constraints, wie eine experimentelle Instruktion sind hier möglich.

In „höheren" Schichten von Repräsentationselementen im Netzwerk werden dann subjektive Präferenzen des Entscheiders anzutreffen sein, die über Wissensatome besonders starke, d. h. mit besonders hohem Gewicht versehene, Randbedingungen für die eher externen Repräsentationselemente spezifizieren. In noch „höheren" Netzwerkschichten folgen dann Ziele und Wertvorstellungen, also immer abstraktere Größen, die für eine Entscheidung maßgeblich sind.

Analog zur Konsensusfunktion bei Boltzmann-Maschinen ist in Harmonie-Netzwerken ein globales Verträglichkeitsmaß definiert, die sogenannte *Harmoniefunktion*, die die Kompatibilität zwischen Zuständen der Repräsentationselemente und den Randbedingungen, die in den Wissensatomen repräsentiert sind, „mißt". Die (wiederum binären) Zustände der Verarbeitungselemente hängen von dieser Funktion und einem Zufallseinfluß ab.

Außerdem wird eine Konstante spezifiziert, deren Betrag vom Harmoniebeitrag, den ein Wissensatom bei seiner Aktivierung liefern würde, abgezogen wird. Dadurch wird für Wissensatome gewissermaßen eine Schwelle festgelegt, wieviele der mit ihnen verknüpften Repräsentationselemente miteinander verträglich (im Vergleich zu unverträglichen) und aktiv sein müssen, bevor sich die Harmonie erhöht. Wäre diese Konstante Null, so würde die Harmonie durch Aktivierung des Wissensatoms erhöht, sobald mehr miteinander verträgliche Repräsentationselemente als miteinander unverträgliche Repräsentationselemente, die mit dem Wissensatom verbunden sind, aktiv sind. Je größer der Wert der subtraktiven Konstante, desto mehr aktive Repräsentationselemente müssen im Sinne des jeweiligen Wissensatoms miteinander (un-)verträglich sein, damit sich die Harmonie erhöht. Die Größe dieser Konstante ist also ein Kennwert dafür, wie genau die durch ein Wissensatom festgelegten Randbedingungen für die Repräsentationselemente von diesen eingehalten werden müssen.

Rodenhausen (1993) hat eine Methode vorgeschlagen, mit der sich elementarlogische Aussagen (Propositionen) und deren junktorenlogische Verknüpfungen („nicht", „und", „oder", „wenn, dann", „genau dann, wenn"), die sogenannten *Boolschen Terme*, einschließlich ihrer Wahrheitswerte in Harmonie-Netzwerken repräsentieren lassen. Der Wahrheitswert eines Boolschen Termes richtet sich nach dem Wahrheitswert seiner Elementaraussagen und deren Verknüpfung. Einfache Aussagen („Ich möchte einen Urlaub im Süden verbringen.") und ihr Wahrheitswert (Wahr oder Falsch) werden auf die Repräsentationselemente eines Harmonie-Netzwerks und deren Aktivierungszustände (Ein oder Aus) abgebildet.

Rodenhausen gibt ein Verfahren zur Konstruktion von Wissensatomen an, so daß die komplexen Beziehungen einer endlichen Menge Boolscher Terme in den Wissensatomen repräsentiert werden können. Er zeigt, daß derart konstruierte Harmonie-Netzwerke in einem Zustand enden, der für die vorgegebene Menge

Boolscher Terme eine Lösung in dem Sinne darstellt, daß die Repräsentationselemente solche Aktivierungszustände, also Wahrheitswerte für Elementaraussagen annehmen, daß alle Boolschen Terme wahr werden, sofern eine solche Lösung existiert.

Dies bedeutet, daß sich das gesamte Wissen einer Person um ihre Ziele und Präferenzen, über verfügbare Alternativen mit ihren Merkmalen, den gegebenen Kontext und sämtliche dazu vorhandenen Abhängigkeiten in einem Harmonie-Netzwerk abbilden lassen, sofern sie aussagenlogisch formulierbar sind. Dies dürfte in sehr vielen Fällen möglich sein. Wenn kein Zustand gefunden werden kann, der alle Boolschen Terme wahr macht, so findet das Harmonie-Netzwerk einen zu diesem möglichst ähnlichen Endzustand, also dennoch einen maximaler Harmonie. Der Entscheidungsprozeß in Harmonie-Netzwerken verläuft wie bei Boltzmann-Maschinen. Zu Beginn werden unter größerem Zufallseinfluß unterschiedliche Verarbeitungselemente im Gesamtraum möglicher Zustände aktiv und mit Hinblick auf die Harmonie werden bereits Teilräume mit hohen Harmoniewerten vom Netzwerk aufgefunden. Im Verlauf der Suche ergeben sich immer weniger Zustandsänderungen der Verarbeitungselemente, und auch hier endet das Netzwerk in einem Gesamtzustand maximaler Harmonie, der als Entscheidung interpretiert werden kann. Diese Entscheidung stellt einen optimalen Kompromiß zwischen allen in den Wissensatomen repräsentierten Randbedingungen dar.

Da die Randbedingungen, die von den übergeordneten Schichten des Netzwerks ausgehen, aufgrund ihres hohen Gewichts, das mit den entsprechenden Wissensatomen assoziiert ist, besonders großen Einfluß auf die Harmonie haben, werden ihre korrespondierenden Repräsentationselemente wahrscheinlich bereits zu Anfang, mit größter Wahrscheinlichkeit aber am Ende des Entscheidungsprozesses aktiviert sein. Dies bedeutet, daß in der Regel eine mit den Präferenzen und Wertvorstellungen verträgliche Entscheidung getroffen wird.

Unsere Betrachtungsweise von Entscheidungen in konnektionistischen Modellen könnte, soweit sie bisher dargestellt wurde, als eine *top-down*-Sichtweise beschrieben werden. Entscheidungen sind dadurch gekennzeichnet, daß vor allem Verarbeitungselemente auf „unteren" Ebenen des Netzwerks ihre Zustände während des Entscheidungsprozesses so wählen, daß sie mit den Zuständen und Randbedingungen verträglich sind, die durch „höhere" Elemente gegeben sind. Dies hat zur Folge, daß gerade solche Merkmale und Alternativen aktiviert werden, die mit den Präferenzen in Einklang stehen.

Für den Normalfall alltäglicher Entscheidungen erscheint uns diese Betrachtungsweise ausreichend. Ein Entscheider wird am Ende eines solchen Entscheidungsprozesses nicht seine Ziele und Wertvorstellungen in Zweifel gezogen oder revidiert haben. Diese werden im Gegenteil kaum von der Entscheidung betroffen sein.

Die Funktionsweise konnektionistischer Entscheidungsmodelle schließt aber eine eher *bottom-up* orientierte Informationsverarbeitung keineswegs aus. Auch wesentliche Präferenzen und Ziele müssen nicht zwangsläufig bei einer Entscheidung Berücksichtigung finden. Beispielsweise läßt sich eine Zwangswahlsituation denken, in der nur „suboptimale", d.h. mit den Präferenzen überwiegend unverträgliche, Alternativen zur Verfügung stehen. Da eine Entscheidung aber getroffen werden muß, werden am Ende des Entscheidungsprozesses zwangsläufig einige Ziele repräsentierende Verarbeitungselemente nicht aktiviert sein: Die Ziele mußten preisgegeben werden, um zu einer Entscheidung zu gelangen. Gleichwohl befindet sich das System auch hier in einem Zustand maximaler Harmonie, der den schwierigen Entscheidungsbedingungen Rechnung trägt.

Liegen für die Entscheidungssituation Randbedingungen vor, die in der Entscheidung unbedingt berücksichtigt sein müssen, so spricht man auch von *hard constraints*, im Gegensatz zu *soft constraints*, deren Berücksichtigung nicht unbedingt erforderlich ist. Diejenigen Verarbeitungselemente, hier also Repräsentationselemente, deren Einfluß auf die Entscheidung unbedingt berücksichtigt werden soll, können von vornherein aktiviert werden und dürfen ihren Zustand auch während des Entscheidungsprozesses nicht ändern. Diese Vorgehensweise wird als *clamping* bezeichnet.

In Richtung auf eine bottom up-Verarbeitungsweise können sich auch besondere Umstände des Entscheidungskontextes auswirken. Das ist beispielsweise bei Entscheidungsexperimenten mit einem sogenannten Perspektivenwechsel der Fall (Gertzen, Schmalhofer, Aschenbrenner & Albert, 1990). Versuchspersonen in der Situation eines Fußballtrainers wählen einmal aus der gleichen Menge von Spielern einen für den Posten des Mannschaftskapitäns, ein andermal einen als Stürmer aus. Obwohl sich an den verfügbaren Alternativen unter der jeweiligen Perspektive nichts ändert, wird am Ende eine andere Entscheidung getroffen werden, weil sich die Perspektive, d.h. eines der Entscheidungsziele situationsabhängig geändert hat.

Anhand dieser Beispiele wird deutlich, wie besondere Merkmale des Entscheidungskontextes, die möglicherweise als hard constraints unbedingte Berücksichtigung verlangen, die Entscheidungsfreiheit einschränken können. Einige weitere solcher Möglichkeiten werden im folgenden Schlußabschnitt diskutiert.

Konsequenzen für Entscheidungs- und Willensfreiheit

Entscheidungen sind in den vorgestellten Modellen dadurch gekennzeichnet, daß es wichtige, zu berücksichtigende Randbedingungen, wie beispielsweise die von den persönlichen Präferenzen des Entscheiders ausgehenden, gibt. Durch geeignete Aktivierung von aktuell variierbaren Größen – beim „alltäglichen"

Entscheiden also insbesondere die die Alternativen und ihre Merkmale betreffenden Verarbeitungselemente und Verknüpfungen – wird normalerweise ein Optimum an Gesamtverträglichkeit mit den Präferenzen erreicht. Dies ist auch dann der Fall, wenn nur suboptimale Alternativen zur Verfügung stehen. Dann kann jedoch die Situation eintreten, daß wichtige Ziele nicht in Entscheidungen verwirklicht werden können und preisgegeben werden müssen. Dies dürfte bei der überwiegenden Anzahl alltäglicher Entscheidungen nicht erforderlich sein. Das heißt, es können im Sinne der Entscheidungsfreiheit solche Alternativen ausgewählt werden, die mit den durch die Präferenzen gegebenen Randbedingungen im Einklang stehen; der Entscheider wählt eine Alternative, ohne über die zugrundeliegenden Ziele und Präferenzen zu reflektieren. Wenn die Entscheidungssituation eine solche Entscheidung nicht mehr zuläßt oder wenn die Konsequenzen einer Entscheidung unerwartet negativ sind, wie es beispielsweise der Fall ist, wenn eine Rückmeldung dem Entscheider eine falsche Entscheidung signalisiert (siehe unten), können bestimmte Wertvorstellungen in die Entscheidung nicht mehr integriert werden. Wir nehmen an, daß ein Entscheider erst solche Situationen zum Ausgangspunkt für die Modifikation oder Revision seiner Ziele und Präferenzen macht, sofern die Generierung (Erfindung) neuer Alternativen ausgeschlossen ist.

Eine Möglichkeit für die Revision von Zielen und Präferenzen ist Erfahrung; so ließen Kadijk, Albert, Kauffmann, Körner und Rodenhausen (1991) in mehreren Experimenten Versuchspersonen unterschiedliche Entscheidungsregeln wie die lexikographische oder die „elimination by aspects"-Regel erlernen. Dies geschah, indem den Versuchspersonen mehrere beschriebene Alternativen zur Wahl dargeboten wurden. Nach der Entscheidung wurde die – nach der jeweils zugrundegelegten Entscheidungsregel – optimale Alternative rückgemeldet. Die Regel selbst wurde den Personen aber niemals mitgeteilt. Es zeigte sich, daß die Vpn nach (oft mehreren hundert Übungsentscheidungen) in der Lage waren, die Regel zu erlernen und auf neue Alternativen richtig anzuwenden.[2] Das Verhalten der Entscheider konnte mit einem konnektionistischen Modell erfolgreich simuliert werden. Konkret heißt dies, daß das konnektionistische Modell fähig war, die durch die Rückmeldung der richtigen Alternative (im Sinne der jeweiligen Entscheidungsregel) induzierten Präferenzen in seinen Verbindungsstärken als constraints abzubilden. Bei der anschließenden Vorgabe neuer Alternativen (ohne Rückmeldung) traf das Modell dann regelgemäße Entscheidungen, ebenso wie die menschlichen Entscheider. Wir haben es hier mit dem Vorgang zu tun, daß Präferenzen aufgrund von Erfahrungen erlernt oder ent-wickelt werden. Die Erfahrungen bestehen aus dem wiederholten Entscheiden zwischen Alternativen und der Information, welche Alternative (in einem bestimmten Sinne) als bessere anzusehen ist.

Man könnte hier die Freiheit, Ziele und Präferenzen zu entwickeln, insofern eingeschränkt sehen, als die Modelle ja gerade nur das Wissen erwerben, welches erforderlich ist, um die optimale Alternative zu wählen und neue Entscheidungssituationen entsprechend bewältigen zu können. Hier spiegelt eine zentrale Eigenschaft der Modelle wider, nämlich deren Adaptivität: Die Ziele und Präferenzen werden vom Modell gerade so und nicht anders gewählt, daß es in seiner Umwelt erfolgreich agieren, d.h. entscheiden kann. Die erworbenen Präferenzen selbst können nun – wie in den skizzierten Experimenten der Fall – als Randbedingungen künftige Entscheidungen determinieren, so wie eingangs in der Definition von Willensfreiheit und Entscheidungsfreiheit vorgeschlagen. So betrachtet stellt diese Form der Adaptivität keine Einschränkung der Willensfreiheit dar, sondern vielmehr die optimale Nutzung der Möglichkeiten zur Entwicklung von Zielen und Präferenzen unter der Zielsetzung erfolgreichen Handelns in der Umwelt. Selbstverständlich ist es, beispielsweise durch Begrenzung möglicher Verarbeitungselemente oder mittels clamping (s.o), immer möglich, das Modell in seiner Anpassungsfähigkeit so einzuschränken, daß es nurmehr bestimmte Präferenzen erwerben kann, die dann möglicherweise für optimales Entscheiden nicht mehr ausreichen.

Eine weitere Möglichkeit, im Rahmen der Modelle zu neuen Zielen und Wertvorstellungen zu kommen, besteht darin, diese direkt in das Modell einzuführen. Dazu bietet der bereits skizzierte Ansatz von Rodenhausen (1993) eine gute Möglichkeit. Neue aussagenlogisch formulierte Präferenzen oder neues Wissen über bestimmte Zusammenhänge bzw. Abhängigkeiten zwischen den bereits repräsentierten Informationen können in Form zusätzlicher Repräsentationselemente und Wissensatome in das Modell aufgenommen werden. Es sei beispielsweise ein Harmonie-Netzwerk gegeben, welches die erforderlichen Präferenzen und Alternativen-Informationen eines Entscheiders zum Kauf alkoholischer Getränke besitze. Die alltäglichen Kaufentscheidungen können damit gut abgebildet werden. Nehmen wir nun weiter an, der Entscheider habe Geburtstag. Dies führt dazu, daß er ansonsten wichtige Ziele, wie z.B. „Preisgünstiges Einkaufen" oder gar das Ziel, kein Geld für Alkohol auszugeben, vernachlässigt zugunsten eines zuvor nicht repräsentierten Zieles, etwa von der Art: „Ich habe Geburtstag und erlaube mir einen gewissen Luxus". Der (ungewöhnliche) Kauf von Champagner in dieser Entscheidungssituation aufgrund selbstgesetzter neuer Ziele kann im Modell nur durch entsprechende zusätzliche Verarbeitungselemente abgebildet werden. Eine ähnliche Situation liegt vor, wenn die Auswirkungen von Fremd- oder Selbst-Instruktion auf das Entscheidungsverhalten zu berücksichtigen sind. Man denke z.B. an eine Information oder Instruktion wie „Müllvermeidung und -trennung sind unverzichtbare Beiträge zum Umweltschutz" und die damit mögliche Revision von Präferenzen und deren Auswirkungen auf Entscheidungen.

Derartige Setzungen neuer Ziele und Wertvorstellungen können durch entsprechende Modifikation der Repräsentation Boolscher Terme zwar relativ leicht direkt in das Modell eingeführt werden. Der Prozeß der Auswahl, Setzung oder Revision von Zielen selbst, beispielsweise aufgrund von Instruktionen, ist jedoch im Rahmen des Entscheidungsmodells nicht abbildbar. Anders formuliert ist zwar das Ergebnis solch einer Werterevision und ihrer Konsequenzen für die Entscheidungsfreiheit abbildbar, nicht jedoch das Wie und Warum dieser Revision, also der die Willensfreiheit betreffende Vorgang. Anders als beim zuvor beschriebenen adaptiven Lernen aus Erfahrung, bei dem Präferenzen sukzessive aufgrund der Interaktion mit der Umwelt aufgebaut werden, bleibt in den geschilderten Beispielen der Mechanismus, mit dem derartige Setzungen im Sinne der Willensfreiheit erfolgen.

Wie könnte in den hier betrachteten konnektionistischen Entscheidungsmodellen nun der Fall abgebildet werden, daß Werte ohne externe Information (Rückmeldung der Konsequenzen, Instruktion und Information) sich ändern, also das Modell gewissermaßen „eigenständig" Ziele und Präferenzen setzt, und welche Bedingungen müssen vorliegen, damit dies eintritt? Um diesen Fall zu behandeln, müssen einige über den bisherigen Rahmen hinausgehende Annahmen zur Architektur und Dynamik der Modelle gemacht werden. Im wesentlichen werden Strukturen und Prozesse benötigt, die eine Art Gedächtnis für frühere Harmonien des Netzwerks darstellen und einen Vergleich von früheren und aktuellen Harmonien ermöglichen. Dieser Vergleich wird auf Grundlage eines Harmonie-Kriteriums, z.B. dem Mittelwert der gespeicherten Harmonien, durchgeführt. Darüber hinaus ist ein Kontrollprozeß erforderlich, der Verbindungsstärken und Randbedingungen (beispielsweise die in den Wissensatomen kodierten) vorübergehend ändern oder hypothetische Entscheidungsaufgaben generieren kann. Bei aktuellen Entscheidungen berechnete Harmonien werden jeweils mit gespeicherten Harmoniewerten aus zuvor getroffenen Entscheidungen verglichen. Sind die aktuellen Harmonien im Vergleich zu früheren in bezug auf das Kriterium zu gering, so sind drei Varianten, die zur Revision von Zielen, Präferenzen und Werten führen können, im Rahmen der Modelle diskussionswürdig. Diese unterscheiden sich mit Blick auf die Menge zu berücksichtigender Randbedingungen bei der Werterevision. Je mehr Randbedingungen auf der Ebene der Alternativen und ihrer Konsequenzen in Betracht gezogen werden müssen, desto gravierender werden die Änderungen der Ziele und Präferenzen sein.

(1) Anhand der aktuellen kriteriumsunterschreitenden Entscheidungsalternativen und ihrer Konsequenzen beginnt der Kontrollprozeß systematisch die Verbindungsstärken und die in den Wissensatomen kodierten Randbedingungen, welche Ziele und Präferenzen betreffen, unmittelbar zu ändern. „Systematisch" bedeutet hierbei, daß zunächst Änderungen auf eher „unterem" Niveau der Wertehierarchie stattfinden, also die wichtigsten Ziele zunächst nicht in Betracht gezogen werden. Nach jeder Änderung wird die Harmonie im Netzwerk neu berechnet und mit dem Kriterium verglichen. Wird das Kriterium

überschritten, so ändert der Kontrollprozeß dauerhaft die Verbindungsstärken und Randbedingungen in den Wissensatomen, die dann künftige Entscheidungen determinieren. Bei diesem Verfahren stellen also die aktuellen Alternativen und ihre Konsequenzen harte Randbedingungen dar.

Diesen Vorgang kann man so interpretieren, daß das Modell nun keine Entscheidung zwischen Handlungsalternativen trifft, sondern die vom Kontrollprozeß variierten Randbedingungen auf der Werte-Ebene des Modells die Alternativen darstellen, die zur Auswahl stehen. Es wird hier also anhand des Kriteriums eine Entscheidung zwischen Zielen und Präferenzen getroffen, mithin also ein Akt der Willensfreiheit im eingangs vorgeschlagenen Sinn ausgeführt.

Der geschilderte Prozeß der Werte-Revision steht dabei in Analogie zur Situation des menschlichen Entscheiders, der mit der Güte seiner aktuellen Entscheidungen im Vergleich zu früheren unzufrieden ist. Um der Unzufriedenheit abzuhelfen, prüft er anhand aktueller Entscheidungsprobleme, ob durch die Revision einiger (zunächst weniger wichtiger) Ziele eine bessere Qualität seiner Entscheidungen zu erzielen ist. Sofern dies der Fall ist, behält er die neuen Ziele bei.

(2) Das Modell „simuliert" unter Berücksichtigung seiner bisherigen Erfahrungen eine große Anzahl von Entscheidungssituationen, also denkbarer Alternativen samt ihrer möglichen Konsequenzen und berechnet jeweils die Harmonie. Dabei werden sich Verbindungsstärken und Randbedingungen mittelbar ändern. Im Grunde handelt es sich also um Lernen aus Erfahrung, wie es oben geschildert wurde. Allerdings sind die Alternativen und ihre Konsequenzen vom Modell selbst generiert, also hypothetisch, und es handelt sich um eine Art von Erfahrung, die als „innere" charakterisiert werden könnte. Auch haben wir es hier mit einer großen Anzahl unterschiedlicher Entscheidungssituationen und nicht mit der begrenzten Menge aktuell zur Auswahl stehender Alternativen und ihrer Konsequenzen wie in (1) zu tun. Als Ergebnis werden wiederum neue Ziele erhalten. Wenn dann bei künftigen realen Entscheidungen mit den neuen Zielen Harmonien erreicht werden, die das Kriterium überschreiten, so werden diese auch künftig verwendet, andernfalls werden die ursprünglichen beibehalten. Dieser Fall kommt mit weniger zusätzlichen Annahmen aus, insofern hier keine systematische Variation der Randbedingungen erforderlich ist und folglich auch keine Vergleiche unterschiedlicher Harmonien (bei unterschiedlichen Randbedingungen) erforderlich sind.

Die Analogie zum menschlichen Entscheider besteht bei diesem Vorgehen zunächst wieder darin, daß die Güte aktueller Entscheidungen zu einem unbefriedigenden Zustand geführt hat, der eine mögliche Werte-Revision einleitet. Nun kommt ein Reflexionsprozeß darüber in Gange, welche Alternativen und mögliche Konsequenzen von Entscheidungen aufgrund bisheriger Erfahrungen und Werte überhaupt denkbar und wünschenswert sind. Auf der Grundlage dieser vorgestellten Entscheidungsprobleme kann der Entscheider seine Ziele und Präferenzen gegebenenfalls neu wählen und in künftigen Entscheidungssituationen erproben. Kommt es zu einer Änderung der Werte, so wird diese als ein Ausdruck des freien Willens erlebt.

(3) Die dritte Variante stellt gewissermaßen eine Kombination der beiden vorigen insofern dar, als nur eine begrenzte Menge aktuell zur Verfügung stehender Alternativen (nicht aber deren Konsequenzen bei einer Entscheidung) als harte Randbedingungen in einem Lernprozeß beteiligt sind. Mögliche Konsequenzen werden vom Modell „simuliert" und unter Veränderung von Verbindungsstärken und Randbedingungen einer Neubewertung unterzogen. Es wird also geprüft, ob durch eine Revision von Zielen, die bei gegebenen Alternativen zu anderen Entscheidungen und einhergehenden Konsequenzen führen dürfen, eine Verbesserung der Harmonie erreicht werden kann. Ist dies der Fall, so wird die damit einhergehende Änderung der Werte und Entscheidungen als Akt der Willens- und Entscheidungsfreiheit interpretierbar.

Die zuletzt skizzierten Möglichkeiten, Phänomene aus dem Bereich der Willensfreiheit in konnektionistische Entscheidungsmodelle einzuführen, erforderten Zusatzannahmen, die bislang noch nicht im Rahmen der diskutierten Modelle realisiert wurden. Auch fehlt, im Gegensatz zum Erwerb von Zielen durch Erfahrungslernen, bislang die experimentelle Evidenz, die diese Annahmen rechtfertigen könnte. Die hier vorgestellten Entscheidungsmodelle und Möglichkeiten ihrer Erweiterung stellen unseres Erachtens aber einen Ansatz dar, von dem gezeigt wurde, daß er nicht nur auf Probleme der Entscheidungsfreiheit, sondern gleichfalls auf Phänomene der Willensfreiheit sinnvoll anzuwenden ist.

Anmerkungen

1 Diese wurden im Rahmen eines von der DFG geförderten Projekts zur Entscheidungsforschung (Al 205/4) an der Universität Heidelberg untersucht bzw. ausgearbeitet.

2 Gleichwohl waren die Versuchspersonen meistens nicht in der Lage, die Regel zu verbalisieren.

Literatur

Aarts, E. & Korst, J. (1989). Simulated annealing and Boltzmann machines. Chichester: John Wiley.

Albert, D., Aschenbrenner, K.M. & Schmalhofer, F. (1989). Cognitive choice processes and the attitude-behavior relation. In A. Upmeyer (Ed.), Attitudes and behavioral decisions. (pp. 61-99). New York: Springer.

Gertzen, H. et al. (1990). Criterion-dependent choices between binary alternatives presented by name or description. Poster presented at the Annual Meeting of the Society for Judgment and Decision Making. New Orleans.

Kadijk, M.R. et al. (1991). Connectionist decision making according to learned rules. Paper presented at the 2nd European Congress of Psychology. Budapest.

McClelland, J.L. & Rumelhart, D.E. (1988). Explorations in parallel distributed processing. A handbook of models, programs, and exercises. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.

Rodenhausen, H. (1993). Connectionist Decision Models. Unveröff. Diss., Universität Heidelberg

Smolensky, P. (1986). Information processing in dynamical systems: Foundations of harmony theory. In J.L. McClelland & D.E. Rumelhart (Eds.), Parallel distributed processing. Vol.I: Foundations (pp. 194-281). Cambridge, Massachusetts: MIT Press.