

Deduktion, logisches Denken

Markus Knauff

Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik, Tübingen

und

Abteilung Kognitionswissenschaft der Universität Freiburg

Beitrag für den Band C/II/8 der Enzyklopädie der Psychologie

“Denken und Problemlösen”

Stand 11.03.05

Markus Knauff

Max-Planck-Institut für Biologische Kybernetik

Spemannstr. 38

72076 Tübingen, Germany

EMAIL: markus.knauff@tuebingen.mpg.de

PHONE: + 49 7071 601 740

FAX : + 49 7071 601 616

1. Einleitung

Was „richtiges“ Denken ausmacht, wusste bereits der altgriechische Philosoph Aristoteles. Der Schüler Platons und Erzieher Alexanders des Grossen begründete die *Logik* (vom griechischen "logos": Wort, Rede, Vernunft) als Lehre vom folgerichtigen Denken, also einem Denken, das sich widerspruchsfrei vollzieht und frei ist von Irrtümern. Heutzutage ist logisches Denken wichtiger Bestandteil von Lehrplänen in Schulen und wissenschaftlicher Fortschritt ist ohne Logik unmöglich. Personen, die besser logisch denken können — jedenfalls gemessen an den entsprechenden Skalen von Intelligenztests —, sind im Leben mit größerer Wahrscheinlichkeit erfolgreich. Personen mit geringeren logischen Fähigkeiten laufen mehr Gefahr im Leben zu scheitern. Fehler beim logischen Denken können tragische Folgen haben — der Unfall von Tschernobyl ging auch auf das Konto „unlogischer“ Schlussfolgerungen beim Personal der Leitzentrale (Dörner, 1989).

Durch die Kognitions- und Neurowissenschaften hat sich in den letzten Jahrzehnten unser Wissen über logisches Denken nachhaltig vermehrt. Wie denken Menschen? Warum begehen wir Fehler beim logischen Denken? Was geschieht im Gehirn, wenn wir Logikaufgaben lösen (oder es versuchen)? Sind Menschen überhaupt in der Lage, gemäß den Regeln der formalen Logik zu denken? Vorgestellt werden in diesem Kapitel Ergebnisse zu den drei wichtigsten Varianten des logischen Denkens: Dem Denken mit „wenn“ und „dann“, also dem *konditionalen* oder *bedingten* Schließen, dem Denken mit Quantoren wie „alle“, „einige“ und „keine“, also dem *sylogistischen* Schließen und dem Denken mit Relationen, also dem *relationalen* Schließen. Jedes dieser Themen beginnt mit einigen logischen Grundlagen, denn um zu untersuchen, wie und ob Menschen logisch denken, muss entscheidbar sein, was als logisch gültiger Schluss anzusehen ist. Grundidee der Untersuchungen ist dann der Vergleich zwischen dem logisch gültigen Schluss und den Antworten von Probanden. Anschließend werden Resultate aus dem Bereich der neuro-kognitiven Forschung zum logischen Denken berichtet. Zum Teil gingen diese aus Patientenstudien hervor, denn Hirnschädigungen, die etwa nach Unfällen mit Schädel-Hirn-Traumata, Tumoren oder Schlaganfällen auftreten können, sagen etwas über die Hirnstrukturen aus, die zur Ausführung kognitiver Leistungen notwendig sind. Zum anderen beruhen die vorgestellten Ergebnisse auf bildgebenden Verfahren, bei denen das intakte Gehirn in-vivo untersucht wird, während Probanden logische Schlüsse durchführen. Die Befunde stammen aus einer kleinen Anzahl denkpsychologischer Labore (unter anderem dem des Autors), die sich inzwischen intensiv mit der Verbindung zwischen Denken und Gehirn beschäftigen. Die allen kognitionswissenschaftlichen Arbeiten zugrunde liegende Gleichung „Kognition = Berechnung“ wird dabei auf die biologische Ebene angewendet. Ziel die-

ser Arbeiten ist es, die Berechnungsprozesse beim logischen Denken direkt dort zu untersuchen, wo sie stattfinden – in den Nervenzellen des Gehirns.

Nun gibt es jedoch viele Kontroversen darüber, was die vielen experimentellen Ergebnisse für eine einheitliche Theorie des logischen Denkens bedeuten. Arbeitet unser Gehirn wie ein Computerprogramm, in dem es Schritt für Schritt Regeln anwendet, um zur Lösung einer Logikaufgabe zu gelangen? Liegen gleichartige Mechanismen dem Lösen unterschiedlicher logischer Aufgaben zugrunde? Welche Rolle spielt es, was wir über den Diskursbereich bereits wissen? Welche Rolle spielen anschauliche Vorstellungen, wenn wir Logikaufgaben lösen? Diesen Fragen ist der dritte Teil der Arbeit gewidmet. In allen dargestellten Theorien beruht logisches Denken auf Prozessen, die den Inhalt oder die Form einer mentalen Repräsentation bearbeiten. Die Ansätze unterscheiden sich allerdings darin, welche Operationen und Repräsentationen sie annehmen und wie logische Fehler erklärt werden. Dargestellt wird wie gut die wichtigsten Theorien die empirischen Befunde erklären, wie präzise sie die beim logischen Denken ablaufenden Informationsverarbeitungsprozesse beschreiben und wie gut sie mit den neurowissenschaftlichen Befunden übereinstimmen. Zum Ende der Arbeit werden einige offene Fragen und Kontroversen diskutiert.

2. Kognitionspsychologische Ergebnisse zum deduktiven Denken

2.1 Konditionales Schließen: Denken mit „wenn“ und „dann“ und anderen Junktoren

Das kleine Wörtchen „wenn“ besteht in der englischen Sprache sogar nur aus zwei Buchstaben („if“) und dennoch gibt es wenige Wörter, die von Philosophen, Logikern und Psychologen mit so viel Aufmerksamkeit bedacht wurden (vgl. z.B. Traugott, Meulen, Reilly, & Ferguson, 1986; Edgington, 1995; Woods, 1997). Betrachten Sie die folgende Inferenz und überlegen, ob diese logisch gültig ist.

(1) Wenn es regnet, ist die Straße nass.

Es regnet.

Also ist die Straße nass.

Der Schluss ist gültig und für die meisten Menschen sehr einfach auszuführen. Häufig sind Inferenzen so leicht, dass uns nicht einmal bewusst wird, gerade einen logischen Schluss durchzuführen. Doch ist Schluss (2) ebenfalls valide?

(2) Wenn es regnet, ist die Straße nass.

Die Straße ist nass.

Also regnet es.

Viele Menschen glauben, er sei es, obschon dies *nicht* der Fall ist. Als logisch valide wird diejenige Beziehung zwischen *Prämissen* (über der Linie) und *Konklusionen* (unter der Linie) aufgefasst, bei der wahre Voraussetzungen *immer* zu einem wahren Schluss führen. Daraus, dass die Straße nass ist, folgt jedoch logisch nicht, dass es regnet (Vielleicht fuhr nur gerade ein Wagen der Straßenreinigung vorbei).

Technisch gesprochen ist ein *logischer* Schluss immer ein *deduktiver* Schluss und beide Begriffe werden normalerweise (hier auch) synonym verwendet. Die kleinsten bedeutungstragenden Einheiten solcher logischen bzw. deduktiven Schlüsse sind *atomare Aussagen* über einen Diskursbereich. In den Beispielen (1) und (2) werden die jeweils ersten Sätze als *Hauptprämissen* bezeichnet und bestehen aus zwei atomaren Aussagen, nämlich dem *Vorderglied* („Es regnet“) und dem *Hinterglied* („Die Straße ist nass“). Ferner heißt der Teil eines Satzes, der mit „wenn“ eingeleitet wird „*Antezedent*“ und der mit „dann“ eingeleitete Teil „*Konsequenz*“. Ebenso sind jeweils der zweite Satz, die so genannte *Nebenprämisse* („Es regnet“) und der dritte Satz, die *Konklusion* („Die Straße ist nass“) atomare Aussagen. Diesen Aussagen wird ein Wahrheitswert „wahr“ oder „falsch“ zugeordnet. Wenn eine atomare Aussage wahr ist, dann ist automatisch ihre Verneinung falsch und umgekehrt. Bereits in den später zum *Organon* zusammengefassten logischen Schriften des Aristoteles wurde dieser so genannte Satz vom ausgeschlossenen Dritten – *tertium non datur* — eingeführt. Erstmals systematisch entwickelt wurde dort auch ein zweites logisches Grundprinzip, Bis heute ist es elementarer Bestandteil aller Logiken: die Trennung von Form und Inhalt einer Aussage. Demnach kann die Gültigkeit der Schlussfolgerung (1) allein aufgrund ihrer logischen Form

(3) Wenn p, dann q.

p

q

entschieden werden. Dabei spielt der Inhalt keine Rolle, so dass z.B. auch die Inferenz

(4) Wenn jemand religiös ist, dann ist er verheiratet.

Der Papst ist religiös.

Der Papst ist verheiratet.

gültig ist. Offenbar besteht ein Unterschied zwischen der Gültigkeit eines Beweises und der Richtigkeit eines Schlusses. Als logisch korrekt wird diejenige Beziehung zwischen Prämissen und Konklusionen aufgefasst, bei der wahre Voraussetzungen zu einem wahren Schluss führen. Wenn jedoch eine der Prämissen einer Schlussfolgerung falsch ist, dann kann der Schluss falsch sein, obschon die Beweisführung korrekt ist. So geht die gültige Beweisführung, nach der der Papst verheiratet ist, von (mindestens) einer falschen Prämisse aus und führt deshalb zu einer falschen Konklusion. Die logische Gültigkeit der Schlussfolgerung bleibt davon jedoch unberührt.

2.1.1 Aussagenlogik und Gültigkeit konditionaler Schlüsse

Die Gültigkeit von Schlüssen mit „wenn“ und „dann“ lässt sich im Rahmen der Aussagenlogik beurteilen. Für das Schließen ist entscheidend, dass atomare Aussagen zu komplexen Aussagen zusammengesetzt werden können, wie z.B. in „Es regnet und die Straße ist nass.“ Kernstück der Aussagenlogik sind Operatoren, mit denen diese Verknüpfungen hergestellt werden: „nicht“, „oder“, „und“, „wenn“ und „dann“. Diese Operatoren werden als *Junktoren* oder *Konnektive* bezeichnet. Sie verknüpfen zwei Teilaussagen so zu einer Gesamtaussage, dass der Wahrheitswert der Gesamtaussage von den Wahrheitswerten der Teilaussagen eindeutig bestimmt wird. So wie atomare Aussagen, können also komplexe Aussagen ebenfalls immer nur wahr oder falsch sein. Es gibt zwei Möglichkeiten, die Gültigkeit solcher komplexer Aussagen zu prüfen. In der Logik und Mathematik ist das erste Verfahren als *beweis-theoretische Methode*, das zweite als *modell-theoretische Methode* bekannt. Nicht alle Details dieser Verfahren sind für die Denkpsychologie von Bedeutung. Wissenschaftsgeschichtlich gesehen, hatten aber beide Ansätze großen Einfluss auf die Entwicklung psychologischer Theorien deduktiven Denkens und tragen sehr zum Verständnis logischer Schlüsse bei.

Die beweis-theoretische Methode beruht auf zulässigen Regeln, mit denen aus wahren Aussagen weitere wahre Aussagen hergeleitet werden. Zunächst setzt die Methode jedoch eine Entscheidung darüber voraus, was als syntaktisch korrekte Aussage, technisch gesprochen als *wohlgeformte Formel*, zu betrachten ist. Das ist nichts anderes, als für einen gesprochenen Satz zu entscheiden, ob er den Regeln der deutschen Grammatik entspricht, *bevor* sie

sich Gedanken über den Inhalt des Satzes selbst machen, z.B. darüber ob er wahr oder falsch ist. Die „Wörter“ der Aussagenlogik sind Symbole, z.B. p, q, r, \dots , die für jede beliebige Aussage stehen können (z. B. „Es regnet“) und Symbole für die Junktoren bzw. Operatoren. Sie sind in Tabelle 1 zusammenfassend dargestellt.

Die Regeln zur Bildung wohlgeformter Aussagen (grammatisch korrekter Sätze) sind einfach: Jeder einzelne Buchstabe, ist eine wohlgeformte Formel, das Zeichen \neg gemeinsam mit einem nachfolgenden Buchstaben ist eine wohlgeformte Formel und eine wohlgeformte Formel, gefolgt von einem der Junktoren $\wedge, \vee, \rightarrow$ oder \leftrightarrow und einer weiteren wohlgeformten Formel, ist ebenfalls eine wohlgeformte Formel. Beispiele für wohlgeformte Formeln sind also z.B. $p, \neg p, p \wedge q$, oder $(p \wedge q) \vee (r \wedge s)$. Es ist auch in der Denkpsychologie gängig, Kleinbuchstaben als Symbole für Aussagen zu verwenden. Vor allem aber ist es sehr praktisch das Zeichen „ \neg “ als Symbol für „nicht“ zu benutzen. Die Implikation wird oft auch als *Konditional* bezeichnet. Sie gibt dem Bereich der Denkpsychologie, der sich mit „wenn“ und „dann“ beschäftigt ihren Namen „*konditionales Schließen*“.



Tabelle 1. Junktoren der Aussagenlogik.

Symbol	Bezeichnung	ungefähre Bedeutung in der deutschen Sprache
\neg	Negation	nicht
\wedge	Konjunktion	und
\vee	Disjunktion	oder
\rightarrow	Implikation	wenn, .. dann
\leftrightarrow	Äquivalenz	wenn, ...dann und nur genau dann

Komplexe Aussagen werden mithilfe von Regeln aus elementaren Aussagen abgeleitet. Einige der wichtigsten Regeln sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Mit dem *Modus Ponens (MP)* kann die Inferenz in Beispiel (1) bewiesen werden. Eine Folgerungsbeziehung, die Personen ohne Ausbildung in Logik viel mehr Schwierigkeiten bereitet, ist der *Modus Tollens (MT)*; aus „Wenn es regnet, dann ist die Straße nass“ und „Die Straße ist *nicht* nass“ wird geschlossen, es habe *nicht* geregnet. MP und MT sind die wichtigsten Regeln der Implikation im Zusammenhang mit logischen Schlüssen. Die DeMorgan'schen Regeln dienen zur Umwandlung einer Konjunktion in eine Disjunktion und umgekehrt. Die Regel „*Redutio ad absurdum*“ dient dem Nachweis eines inneren Widerspruchs; wenn aus einer Aussage ihr Gegenteil abgeleitet werden kann, ist sie falsch. Die Regeln aus Tabelle 2 reichen aus, um eine Vorstellung

davon zu entwickeln, wie deduktive Schlüsse mithilfe von Regeln durchgeführt werden können. Versuchen sie einmal, den Schluss (2) zu beweisen, in dem sie p und q durch „es regnet“, und „die Straße ist nass“ ersetzen und dann anhand der Regelanwendung von den Prämissen zur Konklusion zu gelangen. Es wird ihnen nicht gelingen, da das Beispiel keinen gültigen Schluss darstellt. Viele denpsychologische Schulen nehmen an, dass auf genau solchen Regeln auch die deduktiven Schlüsse von Menschen beruhen. Diese Theorien werden in Abschnitt 4.1 besprochen.

Tabelle 2. Einige wichtige Regeln der Aussagenlogik.

Regel	Name
$\frac{(p \rightarrow q) \wedge p}{q}$	Modus Ponens
	Modus Tollens
$\frac{\neg \neg p}{p}$	Doppelte Negation
$\frac{p \wedge q}{\neg(\neg p \vee \neg q)} \quad \frac{p \vee q}{\neg(\neg p \wedge \neg q)}$	De Morgansche Regeln
	Reductio ad absurdum

Die modell-theoretische Methode im Rahmen der Aussagenlogik Inferenzen durchzuführen beruht auf der *Bedeutung* der Junktoren. Üblicherweise wird diese anhand von Wahrheitstabellen definiert. Die Wahrheitstabellen funktionieren für einfache Junktoren, die nur auf eine atomare Aussage angewendet werden, ebenso wie für ganze Ketten von Aussagen, die durch Junktoren verbunden sind. Die einfachste Wahrheitstabelle ergibt sich aus dem Junktor „nicht“, da dieser nur mit einer Aussage operiert. Die Wahrheitstabelle sieht folgendermaßen aus:

P	$\neg p$
wahr	falsch
falsch	wahr

D.h. wenn die Aussage p wahr ist, dann ist $\neg p$ falsch und umgekehrt. Die einfachste Wahrheitstabelle für einen Junktor, der zwei atomare Aussagen verbindet, ist die für die Konjunktion.

p	q	$p \wedge q$
wahr	wahr	wahr
wahr	falsch	falsch
falsch	wahr	falsch
falsch	falsch	falsch

Die Aussage „p und q“ ist nur wahr, wenn beide Teilaussagen wahr sind, andernfalls immer falsch. So ist z.B. die Aussage, eine Person sei „unterhaltsam und kultiviert“, nur wahr, wenn die Person beide Eigenschaften besitzt. Ein unterhaltsamer aber unkultivierter Partygast führt hingegen zu einer falschen Aussage. Anders stellt sich die Disjunktion, dar, wie aus der folgenden Wahrheitstabelle ersichtlich ist. Eine Aussage, die mit „oder“ verknüpfte Aussagen umfasst, ist immer wahr, sobald mindestens eine der Teilaussagen wahr ist. Falsch ist sie nur, wenn beide Aussagen falsch sind. Ein unkultivierter aber unterhaltsamer Gast führt also zur Wahrheit der Aussage der Gast sei „unterhaltsam oder kultiviert“. Man unterscheidet die *inklusive* und die *exklusive* Lesart der Disjunktion. Bei der inklusiven Lesart ist die Disjunktion auch wahr, wenn p und q wahr sind. Hingegen ist der Wahrheitswert der ersten Zeile in der Tabelle „falsch“ für die exklusive Disjunktion. Der Gesamtausdruck wird mithin nur wahr, wenn einer der beiden Teilausdrücke wahr ist, aber nicht beide. Umgangssprachlich entspricht dies dem „entweder ... oder“. Man begegnet dieser Variante der Disjunktion häufig auch unter dem Begriff XOR-Operator.

p	q	$p \vee q$ (inklusive)	$p \vee q$ (exklusiv)
wahr	wahr	wahr	falsch
wahr	falsch	wahr	wahr
falsch	Wahr	wahr	wahr
falsch	falsch	falsch	falsch

Die Wahrheitstabelle für „wenn, ... dann“, ist etwas komplizierter. Dass sie auch Menschen einige Probleme bereitet, wird später dargestellt. Die Wahrheitstabelle für die Implikation „wenndann“ sieht wie folgt aus:

p	q	$p \rightarrow q$
wahr	wahr	wahr
wahr	falsch	falsch
falsch	wahr	wahr
falsch	falsch	wahr

Die Implikation wird also nur falsch, wenn p wahr, aber q falsch ist. Die Aussage „Wenn jemand ein Student ist, dann hat er wenig Zeit“ wird beispielsweise nur falsch, wenn ein Student zu finden ist, der viel Zeit hat. Wahr bleibt die Implikation hingegen, wenn sie eine Person finden, die nicht studiert, aber dennoch keine Zeit hat. Man sieht sofort, dass die Implikation leicht (und fälschlich) im Sinne einer kausalen Beziehung interpretiert werden kann, indem p als Grund für q betrachtet wird (Man ersetze „Student“ und „Zeit haben“, z.B. durch „kein Benzin“ bzw. „Motor streikt“). Später wird gezeigt, dass dies jedoch zu Fehlern in der Inferenz führen kann.

Die „Äquivalenz“ entspricht dem „wenn ... dann, und nur genau dann“. Im Grunde begegnet man ihr nur in Lehrbüchern (Manktelow, 1999) und Enzyklopädien. Ein Beispiel ist „Wenn ein Tier über ein Y-Chromosom verfügt, dann und nur dann ist es männlich“. Die entsprechende Wahrheitstabelle sieht folgendermaßen aus:

p	q	$p \leftrightarrow q$
wahr	Wahr	wahr
wahr	falsch	falsch
falsch	Wahr	falsch
falsch	falsch	wahr

Vielen Personen fällt es leichter, die Gültigkeit aussagenlogischer Schlüsse anhand der Wahrheitstafeln zu begreifen, als anhand der syntaktischen Regeln. Dies gilt speziell für die beiden zentralen logischen Folgerungsbeziehungen (modi) der Aussagenlogik, MP und MT. Es ist offensichtlich, dass, kombinatorisch betrachtet, vier verschiedene Inferenzen möglich sind, wenn p und q jeweils wahr oder falsch sein können. Diese vier Folgerungsbeziehungen sind in Tabelle 3 dargestellt. Es ist sehr wichtig, den Unterschied zwischen MP und MT einerseits und AC und DA andererseits zu berücksichtigen. Wie zu erkennen ist, sind in der Implikation $p \rightarrow q$ nur die Inferenzen MP, auch als *Vorwärtsschließen* bezeichnet, und MT, der *Rückwärtsschluss*, logisch gültige Folgerungsbeziehungen. Hingegen kann bei der Implikation $p \rightarrow q$ aus der *Verneinung des Antezedent* (DA) oder aus der *Bejahung der Konsequenz* (AC) kein gültiger Schluss abgeleitet werden. AC und DA sind nur in der Äquivalenz gültige Schlüsse! Warum dies so ist, lässt sich in Abbildung 1 nachvollziehen, in der die Implikation und die Äquivalenz anhand von Euler-Kreisen dargestellt sind, mit denen die meisten aus dem Mathematikunterricht vertraut sind. Bei der Implikation Schlüsse aus der Verneinung des Antezedent oder aus der Bejahung der Konsequenz zu ziehen, ist einer der schwerwiegendsten

Fehler, der im Rahmen der Aussagenlogik begangen werden kann und tatsächlich kommt er auch im psychologischen Labor häufig vor.

Tabelle 3: Die vier Schlusschemata bei konditionalen Inferenzen. Bei der Implikation ($p \rightarrow q$) sind nur MP und MT logisch gültige Schlüsse.

Schlusschema	Gültigkeit	Beispiel
Modus Ponens (MP, Bejahung der Voraussetzung) Wenn p, dann q p ----- q	gültig	Wenn es regnet, dann ist die Straße nass. Es regnet. Die Straße ist nass.
Bejahung der Konsequenz (AC, affirmation of consequent) Wenn p, dann q q ----- p	nur gültig bei Äquivalenz, ansonsten KEINE gültigen Schlüsse	Wenn es regnet, dann und nur dann ist die Straße nass. Die Straße ist nass. Es regnet.
Verneinung der Voraussetzung (DA, denial of antecedent) Wenn p, dann q $\neg p$ ----- $\neg q$		Wenn es regnet, dann und nur dann ist die Straße nass. Es regnet nicht. Die Straße ist nicht nass.
Modus Tollens (MT) (MT, Verneinung der Konsequenz) Wenn p, dann q $\neg q$ ----- $\neg p$	gültig	Wenn es regnet, dann ist die Straße nass. Die Straße ist nicht nass. Es regnet nicht.

Zwar sind die dargestellten syntaktischen Regeln und die Wahrheitstabellen nicht die einzigen Möglichkeiten, die Gültigkeit von Inferenzen zu prüfen. Jedoch lässt sich mit ihrer Hilfe der Unterschied von Gültigkeitsbeweisen anhand von *Regeln* und *Modellen* am besten demonstrieren. Im ersten Fall ist eine Konklusion nur gültig, wenn sie anhand der in der Aussagenlogik gültigen Regeln aus den Prämissen herleitet werden kann. Im zweiten Fall hängt die Gül-

tigkeit nicht von der Ableitbarkeit anhand von Regeln ab, sondern von der korrekten Interpretation der Prämissen. Eine Konklusion ist nur gültig, wenn es keine Möglichkeit gibt, die Prämissen so zu interpretieren, dass sie im Widerspruch zur Konklusion stehen. Eine Konklusion ist mit anderen Worten nur gültig, wenn sie unter allen möglichen Interpretationen der Prämissen gültig ist.



Abbildung 1. Darstellung der Implikation und der Äquivalenz anhand von Eulerkreisen.

2.1.3 Experimentelle Ergebnisse zum konditionalen Schließen

Konditionale Schlüsse von Menschen können auf verschiedene Weise experimentell untersucht werden. Eine nahe liegende Methode besteht darin, die Probanden mit den Prämissen einer Denkaufgabe zu konfrontieren und anschließend nach den logischen Folgerungen zu befragen. Die Probanden müssen also selbst bedingte Schlüsse durchführen, indem sie eine Konklusion ohne fremde Hilfe ableiten. Dieses experimentelle Vorgehen wird als Generierungsparadigma bezeichnet. Je nach dem, ob nach genau einem logisch gültigen Schluss gefragt wird oder nach allen möglichen, unterscheiden wir zudem zwischen *partiellen* und *generellen* Generierungsaufgaben (Knauff, Rauh & Schlieder, 1995). Der Versuchsleiter variiert die Schwierigkeit der Aufgaben z.B. anhand der Anzahl der Prämissen oder ihrer Reihenfolge. Vor allem aber werden die Aufgaben so konstruiert, dass die Probanden unterschiedliche Folgerungsbeziehungen anwenden müssen, um zu einer validen Konklusion zu gelangen. Als Maß für die Schwierigkeit einer Inferenz dient dann das Verhältnis zwischen generierten gültigen Konklusionen und generierten ungültigen Konklusionen. Häufig wird einfach die relative Häufigkeit richtiger und falscher Reaktionen verwendet. Es kann auch die Zeit gemessen werden, die die Probanden benötigen, um die Konklusionen zu generieren. Zeitmessungen spielen aber vor allem beim zweiten möglichen Versuchsaufbau eine Rolle. Im Verifikationsparadigma werden den Probanden die Prämissen und (mindestens) eine Konklusion präsentiert. Die Aufgabe der Versuchsteilnehmer besteht darin, zu beurteilen, ob die Konklusion

logisch aus den Prämissen folgt¹. Man kann dann zum einen die Zeit messen, die die Probanden benötigen, um die Gültigkeit der Konklusion zu beurteilen: je größer der Zeitbedarf, desto schwieriger ist die Aufgabe. Zum anderen können vier verschiedene Arten von Reaktionen unterschieden werden: Er wurde eine gültige Konklusion präsentiert und der Proband beurteilte diese als valide. Oder es wurde eine logisch ungültige Konklusion dargestellt und der Proband wies diese als invalide zurück. In beiden Fällen wird die Reaktion vom Versuchsleiter als „korrekt“ beurteilt. Als „falsch“ wird die Reaktion der Probanden bewertet, wenn eine invalide Konklusion als gültig akzeptiert wurde oder eine gültige Konklusion als invalide zurückgewiesen wurde. In Anlehnung an die *Signal-Entdeckungs-Theorie* (vgl. die Zusammenfassung in Goldstein, 1997), werden die beiden korrekten Reaktionen als „Treffer“ (*hits*) beziehungsweise „korrekte Zurückweisung“ (*correct rejection*) bezeichnet. Die beiden falschen Reaktionen heißen „falscher Alarm“ (*false alarm*) bzw. „Verpasser“ (*miss*). Es ist wichtig zu sehen, dass terminologisch die Begriffe „valide“ und „gültig“ sowie „invalide“ und „ungültig“ ausschließlich für die logische Beurteilung der Konklusion bzw. des Schlusses reserviert sind. Hingegen beziehen sich die Beurteilungen „korrekt“ und „richtig“ bzw. „inkorrekt“ oder „falsch“ immer nur auf die Reaktion der Versuchspersonen.

2.1.3.1 Konditionale Inferenzen

In vielen Experimenten wurde direkt getestet, wie gut Versuchspersonen konditionale Schlüsse ausführen können. Dabei wurden sowohl Generierungs- als auch Verifikationsparadigmen verwendet. Hauptergebnis dieser Experimente ist, dass Versuchspersonen einige Inferenzen mühelos durchführen. Jedoch gibt es auch Schlüsse, die den meisten Probanden Schwierigkeiten bereiten. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse einer Auswahl von Experimenten dargestellt, in denen Probanden konditionale Schlüsse ausführten. Die Tabelle zeigt die relative Anzahl korrekter Reaktionen auf die Schlüsse MP, AC, DC und MT. Man sieht direkt die großen Unterschiede zwischen den vier Inferenzen. In allen Experimenten führt der MP zu nahezu hundert Prozent korrekten Antworten. Auch der MT wird relativ häufig korrekt beantwortet, jedoch liegt der Prozentsatz richtiger Reaktionen weit unter dem des MP. Offensichtlich ist MT erheblich schwieriger durchzuführen als der MP. DA und AC werden ebenfalls als gültige Schlüsse beurteilt. Beide sind jedoch in der Implikation keine gültigen Inferenzen! Ist es möglich, dass einige Probanden die konditionale Aussage als Implikation und andere als Ä-

¹ Die Bezeichnung „Konklusion“ wird in der Denkpsychologie nicht im strengen logischen Sinne als logische Folgerung aus den Prämissen verwendet, sondern nur als der Satz einer Inferenzaufgabe, dessen logische Gültigkeit geprüft werden muss.

quivalenz auffassen? Erklären würde dies die mittleren Prozentwerte für DA und AC. Es begründet jedoch nicht die geringeren Prozentwerte für MT, denn dieser Schluss ist unter beiden Lesarten der konditionalen Aussage gültig (Manktelow, 1999). Es muss also andere Gründe für die Schwierigkeitsunterschiede geben. Die derzeit dominierenden Erklärungen werden in Abschnitt 4 besprochen.

Tabelle 4: Häufigkeit (in %) der Akzeptierung von MP, DA, AC und MT bei der Implikation $p \rightarrow q$. Logisch valide sind nur MP und MT. DA und AC sind nur bei der Äquivalenz $p \leftrightarrow q$ valide Schlüsse. Ergebnisse zum Teil übernommen aus Evans, Newstead und Byrne (1993).

Experiment	n	MP	DA	AC	MT
Taplin (1971)	56	92	52	57	63
Evans (1977)	16	100	69	75	75
Marcus und Rips (1979) *	78	99	37	28	57
Kern, Mirels und Hinshaw (1983)	72	89	28	27	41
Markovits (1988)	76	100	52	42	59

* Gemittelte Werte über drei Experimente.

2.1.3.2 Wahrheitstabellenaufgaben

Konditionale Inferenzen wurden auch mithilfe so genannter Wahrheitstabellenaufgaben (truth-table tasks) untersucht. Bei diesem Verfahren wird den Probanden eine konditionale Aussage und eine atomare Aussage präsentiert, also z.B.

Konditionale Aussage: wenn p, dann q

Atomare Aussage: p q

Geprüft werden muss, ob die konditionale Aussage wahr oder falsch ist, gegeben die atomare Aussage ist wahr. Bekannt geworden ist vor allem eine Arbeit von Johnson-Laird und Tagart (1969). Sie legten ihren Probanden die vier möglichen atomaren Aussagen vor: p q, $\neg p$ q, p $\neg q$, $\neg p$ $\neg q$. Neben „wahr“ und „falsch“ konnten die Probanden auch entscheiden, ob die atomare Aussage „irrelevant“ für die Gültigkeit der konditionalen Aussage ist. Als wahr wurde die konditionale Aussage nur bei p q akzeptiert; als falsch zurückgewiesen wurde sie bei $\neg p$ q. Mit „irrelevant“ wurde bei p $\neg q$ und $\neg p$ $\neg q$ reagiert. Ersteres ist eine korrekte Reaktion, da aus der Verneinung der Konsequenz kein gültiger Schluss folgt. Auffallend sind jedoch wieder die Probleme beim MT: Die atomare Aussage $\neg p$ $\neg q$ führt nämlich zur Wahrheit der konditionalen Aussage. Trotzdem zeigten etwa 80 Prozent aller Probanden das dargestellte Ergebnismuster. Liegt dies nur an der Antwortmöglichkeit „irrelevant“, weil sie die Versuchspersonen

zu dieser Reaktion „verführt“? Experimentell ausgeschlossen wurde diese Erklärung von Evans (1972a), in dem er seine Probanden aufforderte, Fälle selbst zu wählen, die die konditionale Aussage wahr oder falsch werden lassen. Wieder wurde der MT nicht geprüft.

2.1.3.3 Auswahlaufgabe nach Wason

Eine einfache „Kartenumdrehaufgabe“ hat für die Psychologie des konditionalen Schließens immense Bedeutung. Sie ist so originell, dass sie sich nicht direkt den geläufigen experimentellen Paradigmen zuordnen lässt. Entwickelt wurde die Aufgabe vom bedeutenden Denkpsychologen Peter Wason um 1960 und noch heute findet man in einschlägigen Zeitschriften jedes Jahr dutzende von Experimenten zu der so genannten Auswahlaufgabe nach Wason (Wason-Selection-Task, im Folgenden: WST): Auf dem Tisch vor ihnen liegen vier Karten. Jede dieser Karten ist auf der einen Seite mit einer Zahl und auf der anderen Seite mit einem Buchstaben beschriftet. Die Aufgabe besteht darin, die Gültigkeit folgender Aussage zu prüfen:

- (4) *Wenn sich auf der einen Seite der Karte ein Vokal befindet, dann befindet sich auf der anderen Seite eine gerade Zahl.*

Die Probanden werden aufgefordert, diejenigen Karten anzugeben, die für die Überprüfung der Aussage gewendet werden müssen. Versuchen Sie zunächst selbst diese Aufgabe zu lösen. Die Aufgabe ist in Abbildung 2 dargestellt.

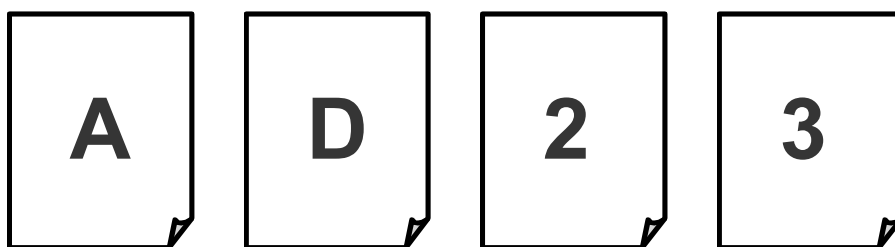


Abbildung 2: Eine Variante der Auswahlaufgabe nach Wason (1966; Wason selection task, WST). Zu überprüfen ist die Aussage: Wenn sich auf der einen Seite der Karte ein Vokal befindet, befindet sich auf der anderen Seite eine ungerade Zahl.

Falls Sie sich für die Karten A und 3 entschieden haben, beherrschen sie bereits das wichtigste Prinzip, um die Gültigkeit einer konditionalen Aussage zu überprüfen. Formal betrachtet haben Sie die Gültigkeit der beiden Folgerungsprinzipien MP und MT geprüft. Verdeutlichen lässt sich dies am einfachsten, wenn man wieder das p für den Antezedent verwendet (Wenn auf der einen Seite ein Vokal, ...) und das q für die Konsequenz (... , dann ist auf der

anderen Seite eine gerade Zahl.). Abstrakt gesehen ist die zu prüfende Aussage wieder eine Implikation der Form $p \rightarrow q$ und diese ist nur gültig, wenn gilt: $p \wedge q$ (MP) und $\neg q \wedge \neg p$ (MT). D.h. die Karte p (A) muss gewendet werden, um zu prüfen, ob sich auf der anderen Seite ein q (gerade Zahl) befindet und die Karte $\neg q$ (3) muss gewendet werden, weil sie keine gerade Zahl ist und sich deshalb auf der anderen Seite kein Vokal befinden darf ($\neg p$). In Abbildung 3 ist dies verdeutlicht.

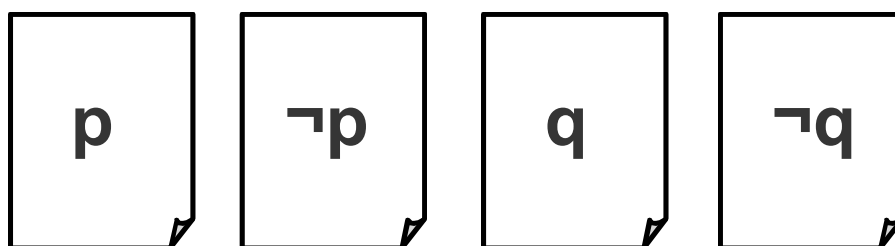


Abbildung 3: Logische Illustration der Auswahl Aufgabe nach Wason, WST (1966).

Die WST bereitet den meisten Menschen große Probleme. Wason und Johnson-Laird (1972) fassten die Resultate einer ganzen Reihe von Experimenten zusammen und zeigten, dass gerade mal vier Prozent aller Versuchspersonen sich für die Prüfung der beiden Karten zur Anwendung von MP und MT entschieden. Wie in Tabelle 4 dargestellt, kamen ansonsten fast alle anderen Kombinationen vor. Die Probanden raten jedoch nicht einfach. Dagegen spricht die große Robustheit und Reliabilität der Ergebnisse über viele experimentelle Variationen hinweg. Berichtet wurden diese nicht nur von Wason und Johnson-Laird (1972), sondern auch von Evans, Newstead und Byrne (1993), mehr als zwanzig Jahre später und basierend auf erheblich größeren Versuchspersonenzahlen. Gegen das Raten spricht auch eine immer wieder replizierte Auswahlpräferenz: Fast die Hälfte aller Versuchspersonen entscheiden sich für die Karten A und 2. Wie es scheint, versuchen sie einen Schluss aus der Bejahung der Konsequenz (AC) zu ziehen, was, wie bereits gezeigt wurde, nicht möglich ist. Korrekt wäre dieser Versuch nur, wenn die Aussage als Äquivalenz (fehl-) interpretiert wurde — sie enthält jedoch keine Aussage der Form „...dann und nur dann befindet sich auf der anderen Seite eine gerade Zahl“.

Warum ist die Wahlaufgabe so schwierig zu lösen? Was erleichtert das Lösen der Aufgabe? Eines lässt sich sofort ausschließen: Den Versuchsteilnehmern ist durchaus klar, dass nach Informationen gesucht werden muss, die die konditionale Aussage falsifizieren. Bietet der Versuchsleiter nämlich die Auflösung (wendet also p und $\neg q$), ist dies für die Probanden sofort einsichtig. Dieses wurde bereits in der ersten Veröffentlichung von Wason

(1968) berichtet und mehrfach repliziert (Dominowski, 1995). Unwissenheit bezüglich der erforderlichen Falsifikation kommt also als Erklärung nicht in Frage. Keinen Einfluss hat auch, ob die Versuchspersonen aufgefordert werden, zu prüfen ob die Aussage richtig oder falsch ist, oder nur gefragt wird, ob sie falsch ist (Griggs, 1995). Auch andere Kandidaten zur Erklärung der Schwierigkeit konnten in zahlreichen Experimenten ausgeschlossen werden. Detaillierte Beschreibungen dieser Befunde sind z.B. in Evans, Newstead und Byrne (1993) oder Manktelow (1999) zu finden.

Tabelle 4: Ergebnisse der Metaanalyse zur Wahlaufgabe nach Wason und Johnson-Laird (1972).

Gewählte Karten		Personen
A, 2	$p \ q$	46 %
A	p	33 %
A, 2, 3	$p, q, \neg q$	7 %
A, 3	$p, \neg q$	4 %
andere Kombinationen		10 %

Nach aktuellem Forschungsstand sind hauptsächlich zwei Faktoren für die Schwierigkeit der Wahlaufgabe verantwortlich: Die Art der *Instruktion* und das *Verständnis* der konditionalen Aussage. In einer Vielzahl von Arbeiten wurden diese beiden Faktoren variiert (z.B. Griggs, 1995; Hoch und Tschirgi, 1985; Yachanin, 1986). Insgesamt demonstrieren diese Arbeiten, dass logisch naive Personen dazu neigen, den Konditionalsatz unangemessen zu repräsentieren. So sind fehlerhafte oder unvollständige Repräsentationen der WST vorprogrammiert. Im Allgemeinen ist es deshalb einfacher, die Aufgabe zu lösen, wenn die Instruktion die Konstruktion einer passenden Repräsentation unterstützt. Griggs (1995) führte deshalb sehr viele „Erleichterungen“ ein, von denen jede für sich bereits zu einer signifikant häufigeren Wahl der korrekten Karten p und $\neg q$ führte. Werden alle diese Erleichterungen kombiniert, so das Ergebnis dieser Arbeit, kann der Prozentsatz der korrekten Wahlen p und $\neg q$ von rund 5% - 10% in der Standardversion der Wahlaufgabe auf über 80 Prozent gesteigert werden.

2.1.3.3 Denken mit Disjunktionen

Auch das Wörtchen „oder“ weckte das Interesse vieler Denkpsychologen. Zwei Fragen stehen dabei im Mittelpunkt: Wie gut Personen mit dem Wahrheitswert von „oder“ umgehen und ob die inklusive oder exklusive Lesart beim Denken bevorzugt wird. In einigen Untersuchungen

müssen die Probanden entscheiden, ob eine atomare Aussage eine Instanz einer disjunktiven Aussage ist. Beispielsweise erhielten sie zunächst die Aussage „Gerade Zahl oder Konsonant“ und anschließend eine gerade oder ungerade Zahl oder einen Vokal oder Konsonant. Ist die Karte eine Instanz der disjunktiven Aussage? Probanden können recht gut mit dieser Fragestellung umgehen: So gut wie alle Probanden bewerten $\neg p \neg q$ als falsch, was unter beiden Lesarten der Disjunktion die korrekte Reaktion ist. Erstaunlicherweise betrachten allerdings nur etwa 80% der Probanden $\neg p q$ und $p \neg q$ als Instanzen der disjunktiven Aussage, obwohl dies unter inklusiver und exklusiver Lesart die korrekte Reaktion sein muss (Evans, 1993a).

Uneinheitlicher sind die Ergebnisse zur zweiten Frage. Einige Experimente zeigten eine deutliche Präferenz $p q$ als gültige Instanzen zu beurteilen, was nur zur inklusiven Lesart der Disjunktion passt (Übersicht in: Newstead, Evans & Byrne, 1993). Andere Arbeiten berichten gegensätzliche Befunde. So waren bei Braine und Rumanin (1981) 41% aller generierten Wahrheitstabellen mit der disjunktiven Lesart vereinbar und bei Sternberg (1979) sogar 81%, gegenüber nur 16%, die mit der inklusiven Interpretation übereinstimmten. Aus diesen und anderen Arbeiten wird zumeist geschlossen „oder“ würde vorzugsweise im exklusiven Sinne verwendet werden (z.B. Fillenbaum, 1974). Wichtiger als die präferierte Lesart von „oder“ ist aber ohnedies seine Verwendung in deduktiven Schlüssen. Genau wie bei der Implikation gibt es auch bei der Disjunktion zwei bestätigende (*affirmativ*) und zwei verneinende (*denial*) Inferenzen. Die affirmativen Schlüsse sind

Entweder p oder q	Entweder p oder q
p	q
-----	-----
q	p

Bei diesen Inferenzen wird aus der Wahrheit der einen Aussage auf die Falschheit der anderen Aussage geschlossen und umgekehrt. Dieser Schluss ist nur bei der exklusiven Disjunktion gültig. Andererseits sind die beiden verneinenden Inferenzen unter beiden Lesarten gültig:

(Entweder) p oder q	(Entweder) p oder q
$\neg p$	$\neg q$
-----	-----
q	p

Die verneinende Inferenz, die aus der Falschheit der einen Aussage auf die Wahrheit der anderen schließt, ist ziemlich trivial und entsprechend begehen Versuchspersonen nur relativ wenige Fehler (z. B. Roberge, 1976a). Schwieriger ist die bestätigende Inferenz, bei der aus der Wahrheit der einen Aussage auf die Falschheit der anderen geschlossen wird, und die nur

in der exklusiven Disjunktion einen gültigen Schluss darstellt. In mehreren Experimenten wurde dieser Schluss zwar in 80% aller exklusiven Disjunktionen korrekt als gültig akzeptiert. Dennoch wurde er auch in rund 40% der inklusiven Disjunktionen fälschlich als gültig akzeptiert (Roberge, 1976b). Insgesamt scheinen exklusive Disjunktionen einfacher als inklusive zu sein. Schwierig werden beide Typen von Inferenzen allerdings, wenn es um doppelte Disjunktionen geht wie z.B. in:

- (5) Erika ist in Berlin oder Wibke ist in Hamburg oder beides.
 Wibke ist in Hamburg oder Desiree ist in München oder beides.

 Was folgt daraus?

Versuchen Sie zunächst selbst diese Aufgabe zu lösen. Es wird sie beruhigen, dass nur etwa 6% aller Probanden in einer Studie von Johnson-Laird, Byrne und Shaeken (1992) auf die richtige Lösung kamen: Erika ist in Berlin und Desiree in München oder Wibke ist in Hamburg oder beides. Zudem hängt die Schwierigkeit von der induzierten Lesart der Disjunktionen ab: Inklusive Disjunktionen sind sogar noch schwieriger als exklusive Disjunktionen (Johnson-Laird et al., 1992).

Auch zur Untersuchung disjunktiver Inferenzen lies sich Peter Wason einen sehr intelligenten Versuch einfallen. Es hilft wieder sehr, wenn sie versuchen, die Aufgabe zunächst selbst zu lösen:

- (6) *In Abbildung 4 sehen sie vier Figuren: ein schwarzes Quadrat, ein weißes Quadrat, einen schwarzen Kreis und einen weißen Kreis. Ich habe mir eine Farbe (schwarz oder weiß) und eine Form (Kreis oder Quadrat) gemerkt. Jede Figur, die entweder die Farbe hat, die ich mir gemerkt habe, oder die Form hat, die ich mir gemerkt habe, aber nicht beides, ist ein THOG. Ich sage Ihnen, dass das schwarze Quadrat ein THOG ist. Bitte entscheiden sie für jede der drei verbleibenden Figuren, ob sie (a) definitiv ein THOG ist, (b) definitiv kein THOG ist oder (c) unentscheidbar ist, ob sie ein THOG ist.*

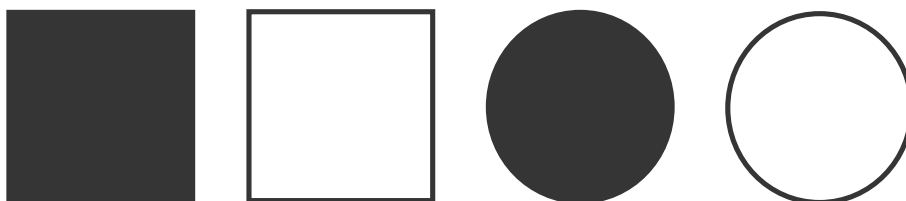


Abbildung 4. Eine Variante der THOG-Aufgabe nach Wason und Brooks (1979). Zu entscheiden ist, welches Objekt ein THOG ist, wenn das schwarze Quadrat ein THOG ist (siehe Text).

Die Antwort lautet, dass das weiße Quadrat und der schwarze Kreis definitiv kein THOG sein können, aber der weiße Kreis ein THOG sein muss. Die überwiegende Zahl von Menschen findet diese Lösung sehr überraschend. Trotzdem: Wenn das schwarze Quadrat ein THOG ist, muss es eine der beiden Eigenschaften besitzen, aber nicht beide. Der Versuchsleiter kann also die Farbe schwarz und die Form Kreis aufgeschrieben haben, oder die Farbe weiß und die Form Quadrat. Weil zwar eine der Eigenschaften, aber nicht beide gelten dürfen, kann weder das weiße Quadrat noch der schwarze Kreis ein THOG sein. Übrig bleibt der weiße Kreis, weil er unter beiden möglichen Regeln eine der beiden Bedingungen erfüllt, aber nicht beide. Sie sind wahrscheinlich, wie die meisten anderen Personen, auf genau die entgegengesetzte Lösung gekommen und dachten, der weiße Kreis sei sicher kein THOG, aber die anderen beiden möglicherweise. Wason und Brooks (1979) nannten diese Lösung den „intuitiven Fehler“ (intuitive error). Newstead, Girotto und Legrenzi (1995) fassten in einem Überblicksaufsatz zusammen, was die Aufgabe so schwierig macht. Wie bei der Wahlaufgabe sind zunächst einige Erklärungsversuche auszuschließen: Unplausibel ist eine Annahme, nach der die Probanden die Bedeutung der exklusiven Disjunktion nicht verstehen. Werden sie nämlich aufgefordert, die Rolle des Versuchsleiters zu übernehmen und selbst ein THOG zu definieren, sind sie dazu mühelos in der Lage. Sogar wenn Versuchspersonen die exakte Bedeutung der exklusiven Disjunktion erklären können, scheitern sie an der THOG-Aufgabe.

Derzeit wird in der Literatur die Schwierigkeit der Aufgabe vorwiegend auf die Überlastung des Arbeitsgedächtnisses zurückgeführt. Aufgrund dieser Überlastung kommt es zu einer Vermischung zwischen den Hypothesen über die Regel des Versuchsleiters und den tatsächlichen Merkmalen des Objektes, dessen THOGhaftigkeit gerade geprüft wird. Diese Erklärung ist als Konfusionstheorie (*confusion theory*) bekannt geworden. Gestützt wird sie durch Arbeiten, in denen die Aufgabe wesentlich besser gelöst wurde, wenn den Versuchspersonen Hilfen angeboten wurden, die das Auseinanderhalten der einzelnen Teile der Aufgabe erleichterten (z.B. Girotto & Legrenzi, 1989, 1992).

2.3.1.4 Denken mit Konjunktion und Negation

Die Konjunktion „und“ wurde kaum denkpsychologisch untersucht. Jedoch spielt sie in vielen Untersuchungen implizit eine wichtige Rolle (vgl. Evans, Newstead & Byrne, 1993). In der Regel können Menschen recht gut mit ihr umgehen. Einige kleinere Studien zeigten jedoch systematische Unterschiede zwischen der logischen Bedeutung der Konjunktion und der all-

täglichen Verwendung von „und“. So sind beispielsweise die beiden folgenden Sätze logisch äquivalent:

Das Kind fiel vom Fahrrad und die Mutter schrie.

Die Mutter schrie und das Kind fiel vom Fahrrad.

Auch im alltäglichen Gebrauch sind diese konditionalen Aussagen nur wahr, wenn beide atomaren Aussagen wahr sind. Gleichwohl wird das „und“ in beiden Sätzen vollkommen anders gelesen. Oft impliziert es ein „deshalb“ „dann“ usw. ohne das dies in der logischen Form vorgesehen ist. „Und“ ist deshalb insbesondere für die Linguistik ein sehr interessantes Wort. Dass es manchmal auch Einfluss auf die Art hat, wie Menschen Inferenzen durchführen, ist in Johnson-Laird und Byrne (1991) nachzulesen.

Wesentlich mehr experimentelle Arbeiten beschäftigten sich mit der Negation. Auch hier spielt die Verbindung zur Psycholinguistik eine große Rolle. Einerseits bedeutet das Verständnis eines verneinenden Satzes noch nicht, dass eine Inferenz durchgeführt wurde. Andererseits hat es doch viel mit Schlussfolgerungen zu tun (Kaup & Zwaan, 2003). Behauptet wurde dies bereits in einer bedeutenden psycholinguistischen Theorie, nach der die Bedeutung verneinender Sätze anhand von Transformationen aus den affirmativen Sätzen hergeleitet wird. Die auf Chomsky (z.B. 1957, 1965) zurückgehende Idee wurde oft anhand sehr einfacher Aufgaben untersucht. Den Probanden werden Sätze wie

Das Dreieck ist nicht rechts vom Quadrat.

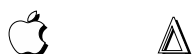
präsentiert und sie müssen entscheiden, ob dieser mit der Anordnung



übereinstimmt. Für die Transformationstheorie spricht, dass die Entscheidung länger dauert, als für den Satz

Das Dreieck ist rechts vom Quadrat.

und die Anordnung



Dabei wird natürlich die längere Lesezeit für den verneinenden Satz berücksichtigt. Derartige Befunde führten zu vielen Verarbeitungsmodellen, in denen die Schwierigkeit des Verständnisses anhand der erforderlichen Anzahl von logischen Operationen erklärt wurden (z.B.

Clark & Chase, 1972). Sie spiegeln sich bis heute in einer Gruppe von Denkktheorien wider, die in Abschnitt 4.1 beschrieben wird. Diese Theorien bieten auch eine mögliche Erklärung für einen Effekt, der u.a. von Evans (1977) berichtet wurde. Den Probanden wurden die Aufgaben des folgenden Typs präsentiert:

(7) Wenn ein Buchstabe kein G ist, dann ist die Zahl eine 9.

Die Zahl ist keine 9.

Der Buchstabe ist ein G?

Anschließend mussten sie die Konklusion prüfen. Offensichtlich handelt es sich in (7) um den bekannten MT, der zwar nicht so gut wie MP gelöst wird, aber doch recht zufrieden stellend. Nicht so jedoch in dieser Form: Der MT mit verneinenden Prämissen fällt vielen Probanden viel schwerer, als der entsprechende Schluss mit affirmativen Prämissen. Oft zitiert wird vor allem ein Effekt, der als Negative Konklusions-Tendenz (*negative conclusion bias*) bezeichnet wird: Enthalten die Prämissen (mindestens) eine verneinende Aussage, so steigt die Wahrscheinlichkeit, dass auch eine ungültige verneinende Konklusion als gültig angesehen wird (vgl. auch Pollard & Evans, 1980).

2.1.3.6 Kontrafaktische und deontische Schlüsse

Der Verständlichkeit halber wurden die experimentellen Befunde zu den Operatoren und Konnektiven des konditionalen Schließens zu Beginn dieses Überblicks berichtet. Neuere Forschungsgebiete beschäftigen sich jedoch mit noch komplizierteren Fragen. Betrachten sie dazu das folgende Beispiel:

Kürzlich fuhr ich mit dem Auto zum Flughafen. Während der Anfahrt streikte der Motor und ich verpasste den Flug. Wenn ich ihn erreicht hätte, wäre ich zu einer Konferenz in die USA geflogen. Am nächsten Tag las ich in der Zeitung, dass ein Bombenanschlag auf die Maschine verübt wurde und alle Passagiere ums Leben kamen. Was wäre passiert, wenn ich keine Panne gehabt hätte?

Dieses (ausgedachte) Beispiel illustriert eine Besonderheit konditionaler Schlüsse: Sie funktionieren nicht nur, wenn über tatsächlich Gegebenes oder Geschehenes nachgedacht wird. Häufig drücken sie aus, wie die Welt anders hätte aussehen können, als sie sich tatsächlich darstellt. Die Wörter „wenn“ und „dann“ spielen gerade dann eine Rolle, wenn wir über das nachdenken, was sein könnte, also hypothetisch denken. Der englische Philosoph David Hume (1748/1999) beschreibt solche Aussagen als diejenigen, die nicht von den aktuellen Fakten

der Wirklichkeit ausgehen. Vielmehr weichen sie von der Faktizität ab und handeln von Alternativen zum wirklich Geschehenen. Schlüsse mit Prämissen, die nur Möglichkeiten, aber keine Fakten beinhalten, werden derzeit unter dem Begriff *kontrafaktisches Denken* eingehend untersucht. Generell weisen solche Aufgaben eine einheitliche Struktur auf:

Wenn A passiert wäre, dann wäre B passiert?

Was wäre der Fall, wenn A passiert wäre / wenn A nicht passiert wäre?

Es müssen also zwei verschiedene Schlüsse durchgeführt werden:

Faktisch: $\neg p \rightarrow \neg q$

Kontrafaktisch: $p \rightarrow q$

Byrne und Tasso (1999) legten ihren Probanden folgende konditionale Prämisse vor:

Wenn kein Benzin im Auto gewesen wäre, dann wäre es liegen geblieben.

In den anschließenden Inferenzen wurden sowohl faktische als auch kontrafaktische Konklusionen berücksichtigt. Jedoch fiel den Probanden der kontrafaktische Schluss leichter als der faktische. Verantwortlich sind dafür wahrscheinlich wieder die Schwierigkeitsunterschiede zwischen MP und MT. Der faktische Schluss entspricht dem MT und der kontrafaktische dem MP. Bei einem unerwarteten Erinnerungstest wurden die kontrafaktischen Schlüsse auch besser erinnert. Zu diesen Phänomenen wurden inzwischen mehrere Arbeiten von Byrne und Kollegen durchgeführt (z.B. Byrne, 1997; Byrne, & McElenny, 2000; Byrne, & Tasso, 1999; Segura, Fernandez-Berrocal, & Byrne, 2002). Einen Überblick über diese Arbeiten gibt Byrne (2002).

Konditionale Inferenzen können sich auch auf Handlungen beziehen, welche Personen aufgrund sozialer Regeln und Normen erlaubt oder verboten sind. Solche Inferenzen werden gegenwärtig unter dem Begriff *deontisches Schließen* erforscht. In einer Studie von Beller (2003) sollten sich die Probanden vorstellen, sie seien bei einem Veranstalter großer Open-Air-Festivals beschäftigt und der Eingangskontrolle zugewiesen. Einlass wird Personen nur gewährt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Die Person besitzt eine Eintrittskarte.

Die Person führt keine Waffen mit sich.

Peter steht in der Schlange vor dem Eingang und besitzt ein Ticket. Darf er hinein? Die meisten Probanden geben an, die Frage sei erst zu beantworten, wenn er nach Waffen kontrolliert wurde. Offensichtlich wird die deontische Aussage als Äquivalenz oder bikonditional interpretiert und unterscheidet sich damit von vielen abstrakten konditionalen Schlüssen. Was passiert allerdings, wenn einer der Musiker am Eingang erscheint? Deontische Schlüsse wurden insbesondere im Zusammenhang mit Inhaltseffekten untersucht. Dabei spielten kontextuell eingebettete Versionen der WST eine zentrale Rolle. Berichtet werden diese Arbeiten in Abschnitt 2.4.1.

2.2 Syllogistisches Schließen: Denken mit „alle“, „einige“ und anderen Quantoren

Viele Schlüsse, die Menschen im Alltag durchführen, beruhen auf Eigenschaften von Objekten, Personen oder Situationen. Häufig resultieren diese in Verallgemeinerungen, die sprachlich mit „Alle x sind ...“ oder „Es gibt kein x, dass ...“ ausgedrückt werden. Ein Beispiel für solche Schlussfolgerungen ist z.B.

- (8) Alle Professoren sind Intellektuelle.
Alle Intellektuellen sind Atheisten.

Alle Professoren sind Atheisten.

Für die meisten Menschen ist der korrekte deduktive Schluss (8) sehr einfach – über 90% aller Aufgaben werden korrekt gelöst. Doch ist Inferenz (9) ebenfalls gültig?

- (9) Alle Professoren sind Intellektuellen.
Alle Atheisten sind Intellektuelle.

Alle Professoren sind Atheisten.

Etwa 70% aller Versuchspersonen glauben *fälschlich* dies sei ein gültiger Schluss. Logisch betrachtet, ist aus den Prämissen in (9) allerdings nur die Konklusion ableitbar, dass einige Professoren Atheisten sind (aber eben nicht alle). Offensichtlich gibt es auch in diesem Bereich des deduktiven Denkens leichte und schwierige Aufgaben. Um formal zu entscheiden,

was als logisch gültige Konklusion angesehen werden kann, muss die Prädikatenlogik verwendet werden.

2.2.1 Prädikatenlogik und Gültigkeit syllogistischer Schlüsse

Formal betrachtet ist die Prädikatenlogik eine Erweiterung der Aussagenlogik, die zusätzlich zur Verknüpfung von Aussagen durch „und“ oder „oder“ auch die Eigenschaften von Objekten betrachtet. Sie unterscheidet in Aussagen zwischen dem, über *das* etwas gesagt wird und dem, *was* darüber gesagt wird. Betrachtet werden also Eigenschaften von Objekten und Geltungsbereiche von Aussagen. Hier werden nur die wichtigsten Ideen der Prädikatenlogik dargestellt. Erstens: Aussagen wie „Professoren sind Intellektuelle“ die in der Aussagenlogik *atomar* sind, werden in der Prädikatenlogik in *Terme* (Professoren) und *Prädikate* (sind Intellektuelle) aufgelöst. Die übliche Schreibweise ist dann z. B.

Intellektuelle (Professoren)

Professoren besitzen die Eigenschaft Intellektuelle zu sein. Die Terme können alle Namen von Objekten des Diskursbereichs sein, also z. B. die Substantive eines natürlichsprachlichen Satzes. Die Prädikate repräsentieren die Eigenschaften und werden in der natürlichen Sprache für gewöhnlich durch Verben und Adjektive ausgedrückt. Zusätzlich führt die Prädikatenlogik Variablen ein, die für ganze Klassen von Objekten oder noch nicht bekannte Objekte des Diskursbereichs stehen können, wie z. B. in

Intellektuelle (x)

Die Variablen erfüllen die aus der Mathematik bekannte Funktion. Das zweite Merkmal der Prädikatenlogik, das über die Aussagenlogik hinausgeht, ist die Verwendung von *Quantoren*. Diese erlauben Aussagen über Mengen von Objekten für die ein Prädikat gilt. Die gesamte Prädikatenlogik beruht auf nur zwei von Gottlob Frege (1879/1993) eingeführten Quantoren: Die *universelle* Quantifizierung macht eine Aussage über alle Elemente einer Menge und die *existentielle* Quantifizierung macht eine Aussage über einzelne Elemente einer Menge. Kurz werden diese auch als *Allquantor* und *Existenzquantor* bezeichnet und durch die Zeichen \forall und \exists symbolisiert. Die erste Prämisse aus Schluss (9) stellt sich dann dar als:

$\forall x (\text{Professoren}(x) \rightarrow \text{Intellektuelle}(x))$

Eine solche allquantifizierte Aussage ist genau dann wahr, wenn die Aussage für jedes Element der Menge gilt. Eine existenzquantifizierte Aussage ist genau dann wahr, wenn die Aussage für mindestens ein Element der Menge gilt. D.h. dem alltagssprachlichen „alle“ entspricht der Allquantor \forall und dem Wort „einige“ der Existenzquantor \exists . Das alltagssprachliche „keine“ lässt sich leicht als „es gibt kein“ durch $\neg\exists$ ausdrücken. Die Quantifizierungen können nur auf Elemente des Diskursbereiches angewendet werden, jedoch nicht auf Eigenschaften, d.h. Sätze des Typs "für jede Eigenschaft E, gilt folgendes..." können nicht behandelt werden. Bei dem vorgestellten System spricht man deshalb präziser von der Prädikatenlogik erster Stufe.

Inferenzen können wie in der Aussagenlogik mit beweis-theoretischen oder modell-theoretischen Methoden durchgeführt werden. Auch in der Prädikatenlogik bedeutet ersteres, dass eine Konklusion nur dann gültig ist, wenn sie anhand der gültigen Regeln aus den Prämissen herleitbar ist. Die zweite Methode beruht wiederum auf der korrekten Interpretation der Prämissen. Eine Konklusion ist nur gültig, wenn die Prämissen nur so zu interpretieren sind, dass sie nicht im Widerspruch zu der Konklusion stehen.

Nun lässt sich auf beiden Wegen eine Teilmenge valider Schlüsse identifizieren, die für die Geschichte der Denkpsychologie die größte Bedeutung hat — die *kategorialen* oder *kategorischen Syllogismen*. Historisch gesehen ist ihre Stellung so herausragend, dass Schlüsse mit Quantoren oft auch kurz als *Syllogismen* oder *syllogistische Schlüsse* schlechthin bezeichnet werden. Daran orientiert sich auch die Überschrift dieses Abschnittes, obschon streng gesehen alle Formen der Deduktion als Syllogismen zu betrachten sind. Während in der Prädikatenlogik beliebig viele Quantoren im Prinzip in beliebig vielen Prämissen vorkommen können, umfassen die Syllogismen nur zwei Prämissen mit jeweils einem Quantor (wie in den Beispielen (8) und (9)). Die Quantoren sind die vier kategorialen Aussagen: *Alle A sind B*, *Einige A sind B*, *Keine A sind B* und *Einige A sind nicht B*. Diese werden laut Konvention mit den Buchstaben A, I, E und O symbolisiert. Zudem werden die Aussagen als *affirmativ* oder *negativ* klassifiziert, je nach dem, ob sie einen bestätigenden oder verneinenden Quantor enthalten. Ob sie außerdem als *universell* oder *partikulär* bezeichnet werden, hängt davon ab, ob sie sich auf alle quantifizierten Objekte des Diskursbereichs oder nur auf eine Teilmenge beziehen. Diese Unterscheidungen sind in Tabelle 5 zusammenfassend dargestellt. Zudem zeigt die Tabelle die prädikatenlogische Schreibweise der kategorialen Aussagen. Tabelle 5 zeigt ihre gültigen Interpretationen anhand von Euler-Kreisen.

Tabelle 5: Die vier kategorialen Aussagen der aristotelischen Syllogismen.

A	Alle A sind B	$\forall x (A(x) \rightarrow B(x))$	bejahend	universell
I	Einige A sind B	$\exists x (A(x) \rightarrow B(x))$	bejahend	partikulär
E	Keine A sind B	$\neg \exists x (A(x) \rightarrow B(x))$	verneinend	universell
O	Einige A sind nicht B	$\exists x (A(x) \rightarrow \neg B(x))$	verneinend	partikulär

Aus den kategorialen Aussagen können Syllogismen konstruiert werden, die aus zwei Prämissen und einer Konklusion bestehen. Daraus ergibt sich eine Anzahl von $4^3 = 64$ möglichen Syllogismen. Der einfachste ist der „perfekte Syllogismus“, in dem der Quantor A in allen drei Sätzen vorkommt. Dieser Syllogismus wird kurz auch als AAA-Syllogismus bezeichnet. Der nächste gültige Syllogismus ist EAE und sieht wie folgt aus.

- (10) Keine A sind B.
 Alle B sind C.

 Keine A sind C.

Wie bei konditionalen Inferenzen bezieht sich die Konklusion immer auf die beiden Endterme A und C, die durch den Mittelterm B verbunden werden. Diese Verbindung anhand des Mittelterms ermöglicht erst die Schlussfolgerung. Sie besteht darin, eine neue Beziehung zwischen A und C zu identifizieren, die in keiner der Prämissen explizit gegeben ist. Allerdings erhöht sich die Anzahl aller möglichen Syllogismen auf 256, weil auch die Terme in den Prämissen in vier verschiedenen Reihenfolgen vorkommen können. Lässt man zudem die Reihenfolgen A – C und C – A in der Konklusion zu, folgen daraus sogar 512 mögliche Syllogismen. Doch wie viele dieser möglichen Syllogismen sind gültig? Prädikatenlogisch gesehen ist die Anzahl valider Syllogismen eindeutig festgelegt, da weder die Figur noch die Reihenfolge der Terme in der Konklusion logisch eine Rolle spielen. Außerdem werden Syllogismen, die in mehreren Figuren äquivalent sind, nur ein Mal gezählt. Nach Salmon (1983) ergeben sich daraus genau 15 gültige Syllogismen: AAA, EAE, AII, EIO, in der ersten Figur,

EAE, AEE, EIO, AOO, in der zweiten Figur, IAI, AII, OAO, EIO in der dritten Figur und in der vierten Figur AEE, IAI und EIO.

In der Psychologie gibt es viele verschiedene Zählweisen. Aristoteles soll nur 12 der 512 möglichen Syllogismen als gültig betrachtet haben, weil er die erste Figur und die C-A Konklusionen in Tabelle 6 unberücksichtigt liess. In manchen psychologischen Arbeiten werden 48 Syllogismen als valide betrachtet (vgl. Garnham & Okhill, 1994). Johnson-Laird und Byrne (1991) geben die Zahl gültiger Syllogismen mit 27 an. Nach Evans (1984) beruhten die unterschiedlichen Angaben, auf unterschiedlichen Zählweisen, je nach dem, ob die Variation in der Konklusion akzeptiert wird oder ob schwache Konklusionen gezählt werden. Schwache Konklusionen sind solche, die sich auf eine kleinere Teilmenge des Diskursbereichs beziehen, als die Inferenz zulässt. Aus AA lässt sich beispielsweise der Schluss I ziehen, was nicht falsch, jedoch schwächer als die Inferenz A ist. Zudem spielt eine Rolle, ob „Alle A sind B“ die Existenz mindestens eines A's und B's impliziert. In der psychologischen Literatur wird inzwischen oft die Zählweise von Johnson-Laird und Byrne (1991) verwendet. Sie berücksichtigt die vier Figuren, akzeptiert die Existenzannahme und lässt keine schwachen Konklusionen zu. Wichtiger als die Anzahl formal gültiger Syllogismen ist für die Psychologie jedoch eine empirische Frage: Welche Syllogismen halten Versuchspersonen für gültig, bzw. wo weichen sie von dem ab, was als logisch gültiger Schluss anzusehen ist?

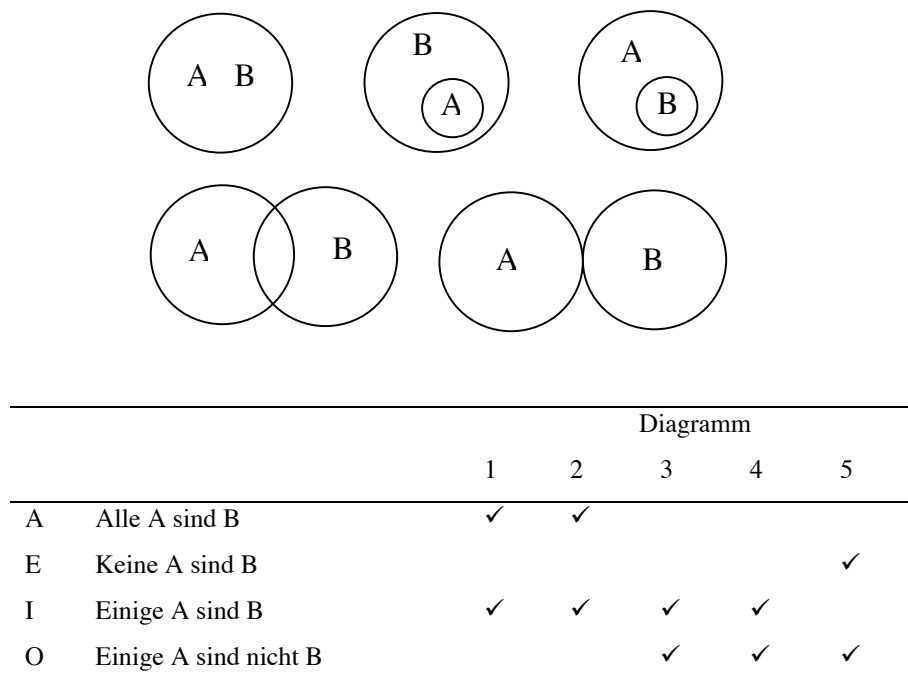


Abbildung 5. Die Bedeutung der Quantoren kann anhand von Euler-Kreisen demonstriert werden. Die Tabelle gibt an, welche Diagramme die Bedeutung der Quantoren wiedergeben.

Tabelle 6: Die vier Figuren der aristotelischen Syllogismen und die zwei Möglichkeiten in der Konklusion.

Figur 1	Figur 2	Figur 3	Figur 4
A – B	B – A	A – B	B – A
B – C	B – C	C – B	C – B
-----	-----	-----	-----
A – C	A – C	A – C	A – C
A – B	B – A	A – B	B – A
B – C	B – C	C – B	C – B
-----	-----	-----	-----
C – A	C – A	C – A	C – A

2.2.2 Experimentelle Resultate zum syllogistischen Schließen

Die experimentellen Paradigmen zur Erforschung des syllogistischen Denkens unterscheiden sich kaum von anderen deduktiven Inferenzen. Auch bei der Erforschung von Syllogismen werden den Probanden Prämissen präsentiert und sie müssen mindestens eine oder alle Konklusionen generieren oder eine vorgegebene Konklusion auf ihre logische Gültigkeit hin überprüfen.

Erstaunlicherweise bewerten Menschen die Syllogismen als leicht nachvollziehbar, wenn man sie ihnen (wie hier) erklärt. Legt man ihnen hingegen entsprechende Denkaufgaben vor, machen sie recht viele Fehler. Chater und Oaksford (1999) verglichen alle derzeit verfügbaren Arbeiten, in denen alle 256 möglichen Syllogismen untersucht wurden. In den Studien wurden den Probanden alle möglichen 16 Prämissenkombinationen in allen 4 Figuren vorgelegt. Anschließend wurden sie aufgefordert, für jede der resultierenden 64 Aufgaben eine der vier möglichen Konklusionen (A, E, I, O) zu wählen oder anzugeben, falls kein logischer Schluss möglich ist. Die Arbeiten von Johnson-Laird und Bara (1984; mit einem kompletten Datensatz) und die Arbeiten von Dickstein (1978) und Johnson-Laird und Steedman (1978; mit jeweils zwei kompletten Datensätzen) zeigen eine bemerkenswerte Übereinstimmung. Die Resultate aller Studien sind in Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt. Insgesamt waren nur 51% aller Reaktionen korrekt. Allerdings gab es enorme Unterschiede zwischen den Aufgaben. So wurden beispielsweise die Aufgaben, die dem perfekten Syllogismus AA aber auch der Syllogismus AE in der ersten Figur entsprechen, zu 90% korrekt gelöst. Hingegen lösten die Pro-

banden nur etwa 27% der Aufgaben zum Syllogismus EI der vierten Figur korrekt. Und dies, obschon die Chance per Zufall eine korrekte Lösung zu wählen, bereits bei 20% liegt (wegen der 5 Antwortalternativen). Woran liegt das? Und warum werden gerade bestimmte falsche Antworten bevorzugt? Zu diesen Fragen gibt es viele experimentelle Befunde. Konzeptionell lässt sich das Lösen von Syllogismen in drei Phasen aufteilen. Zunächst müssen die Prämissen richtig verstanden – d.h. repräsentiert – werden. Anschließend müssen die Informationen der beiden Prämissen kombiniert werden. Und schließlich muss eine Reaktion generiert werden. In allen drei Phasen kann es zu Fehlern kommen.

Tabelle 7: Relative Häufigkeit [in % gerundet auf ganze Zahl] für jeden Syllogismus modifiziert nach Chater und Oaksford (1999). Die erste Spalte gibt den Syllogismus und die Figur an, die zweite die logisch gültige Konklusion, die Spalten 3 bis 6 die von den Probanden gewählte Konklusion. A = alle, I = einige, E = kein, O = einige ... nicht; N = kein gültiger Schluss. Graue Felder markieren die am häufigsten gewählten Konklusionen.

Syllog./ Figur	Gültig	Gewählte Konklusion				Syllog./ Figur	Gültig	Gewählte Konklusion			
		A	I	E	O			A	I	E	O
AA1	A(I)	90	5	0	0	IE1	N	1	1	22	16
AA2	N	58	8	1	1	IE2	N	0	0	39	30
AA3	I	57	29	0	0	IE3	N	0	1	30	33
AA4	I	75	16	1	1	IE4	N	0	1	28	44
AI1	I	0	92	3	3	EI1	O	0	5	15	66
AI2	N	0	57	3	11	EI2	O	1	1	21	52
AI3	I	1	89	1	3	EI3	O	0	6	15	48
AI4	N	0	71	0	1	EI4	O	0	2	32	27
IA1	N	0	72	0	6	IO1	N	3	4	1	30
IA2	N	13	49	3	12	IO2	N	1	5	4	37
IA3	I	2	85	1	4	IO3	N	0	9	1	29
IA4	I	0	91	1	1	IO4	N	0	5	1	44
AE1	N	0	3	59	6	OI1	N	4	6	0	35
AE2	E(O)	0	0	88	1	OI2	N	0	8	3	35
AE3	N	0	1	61	13	OI3	N	1	9	1	31
AE4	E(O)	0	3	87	2	OI4	N	3	8	2	29
EA1	E(O)	0	1	87	3	EE1	N	0	1	34	1
EA2	E(O)	0	0	89	3	EE2	N	3	3	14	3
EA3	O	0	0	64	22	EE3	N	0	0	18	3
EA4	O	1	3	61	8	EE4	N	0	3	31	1
AO1	N	1	6	1	57	EO1	N	1	8	8	23
AO2	O	0	6	3	67	EO2	N	0	13	7	11
AO3	N	0	10	0	66	EO3	N	0	0	9	28
AO4	N	0	5	3	72	EO4	N	0	5	8	12
OA1	N	0	3	3	68	OE1	N	1	0	14	5
OA2	N	0	11	5	56	OE2	N	0	8	11	16
OA3	O	0	15	3	69	OE3	O	0	5	12	18
OA4	N	1	3	6	27	OE4	N	0	19	9	14

III1	N	0	41	3	4	OO1	N	1	8	1	22
II2	N	1	42	3	3	OO2	N	0	16	5	10
II3	N	0	24	3	1	OO3	N	1	6	0	15
II4	N	0	42	0	1	OO4	N	1	4	1	25

2.2.2.1 Fehler bei der Verarbeitung der Prämissen: Konversion und Grice'sche Implikation

Fehler bei der Prämissenverarbeitung wurden bereits von Chapman und Chapman (1959) berichtet. In den Studien wurden syllogistische Prämissen von den Probanden häufig als konvers betrachtet. Aus „Alle Psychologen sind Akademiker“ folgt jedoch nicht „Alle Akademiker sind Psychologen“, ebenso wenig wie aus „Einige Akademiker sind keine Psychologen“ folgt „Einige Psychologen sind keine Akademiker“. Systematisch weiterentwickelt wurde die *Konversionshypothese* insbesondere von Revlis (1975). Unterstützt wird sie z.B. durch Arbeiten von Ceraso und Provitera (1971), in denen die Anzahl falscher Reaktionen durch Vermeidung der Konversion (z.B. durch: „Alle A sind B, aber nicht alle B sind A“) reduziert werden konnte. Andere Arbeiten fragten die Probanden direkt, ob beispielsweise aus „Alle A sind B“ folgt „Alle B sind A“. In einer Studie von Newstead und Griggs (1983) hielten über 35% aller Versuchspersonen den Quantor „Alle...“ und sogar 70 % „Einige ... nicht“ für konvers. Solche und analoge Befunde hatten großen Einfluss auf die Forschung zum syllogistischen Schließen und begründeten zahlreiche Varianten der Konversionstheorie (vgl. Newstead, 1990; Evans, Newstead & Byrne, 1993). Dennoch ist der Geltungsbereich solcher Ansätze beschränkt, da nur „Alle“ und „Einige ...nicht“ anfällig Konversionsfehler sind. Quantoren wie „Einige...“ und „Kein ...“ sind jedoch auch logisch konvers.

Das (Miss-)Verständnis der Prämissen ist auch die Grundidee einer weiteren Erklärung. Diese wurde nach dem Linguisten und Philosophen Paul Grice benannt. Die Grice'sche *Implikationshypothese* beruht auf der alltagssprachlichen Bedeutung der Quantoren. Grice (1975) formulierte einige Prinzipien der Kommunikation (*principles of communication*), wovon das Prinzip der Quantität das wichtigste ist: Gib immer so viel Information wie möglich, aber nur so viel wie nötig. Demnach sollte ein Sprecher niemals „einige“ verwenden, wenn die Aussage auf „alle“ Objekte des Diskursbereichs zutrifft. Fehler könnten entstehen, weil Probanden die Prämissen eines Syllogismus unter Berücksichtigung dieser (und einiger anderer) Regeln verstehen, obgleich diese nicht mit der logischen Bedeutung der Quantoren übereinstimmen. Der Quantor „Einige“ bedeutet logisch gesehen „Mindestens ein und möglicherweise alle“. D.h. die Aussage „Einige Psychologen sind Akademiker“ ist auch wahr, wenn alle Psychologen auch Akademiker sind. Nach den Grice'schen Prinzipien bedeutet jedoch „einige“, dass zwar manche Psychologen aber nicht alle Akademiker sind. Mit anderen Worten, „Einige“

wird nur verwendet, wenn es auch Psychologen gibt, die keine Akademiker sind. Begg und Harris (1989) legten ihren Probanden Sätze der Art

Einige A sind B

vor und fanden, dass diese oft als gleichbedeutend mit

Einige A sind keine B

betrachtet werden. Ähnliche Resultate wurden von Newstead und Griggs (1983) berichtet. Begg (1987) fand sogar, dass „Einige“ von den meisten Personen in Sinne von „weniger als die Hälfte“ verstanden wird. Dieses Ergebnis konnte mit der Grice'schen Implikationshypothese perfekt vorhergesagt werden. Die Probanden erwarten vom Versuchsleiter anscheinend, den Satz „Einige A sind B“ nur zu verwenden, wenn die stärkere Aussage „Alle A sind B“ nicht zutrifft.

Es ist eine Sache, die Fehlinterpretation der Quantoren zu zeigen und Anhaltspunkte für die Grice'sche Interpretation der Prämissen zu finden. Eine andere Frage ist jedoch, ob dies auch eine Erklärung für Fehler beim syllogistischen Schließen bietet. Verstehen Probanden die Prämissen zwar falsch, aber schließen anschließend logisch korrekt? Johnson-Laird und Bara (1984) testeten einige Vorhersagen der Grice'schen Theorie mit Syllogismen des Typs:

(11) Alle B sind C.

Einige A sind nicht B.

Logisch gesehen, ist aus den Prämissen in (11) kein gültiger Schluss ableitbar. Nach Grice'scher Lesart sollte jedoch die zweite Prämisse als „Einige A sind B“ verstanden werden. In diesem Fall wäre die Konklusion „Einige A sind C“ logisch valide. Johnson-Laird und Bara berichten, dass nur 14% der Fehler in ihrer Studie auf diese Weise vorhersagbar waren. Ähnlich sieht es aus, wenn man die gesamten in Tabelle 7 dargestellten Ergebnisse betrachtet. Von allen beobachteten Fehlern können rund 45% anhand der Grice'schen Hypothese erklärt werden — die Ratewahrscheinlichkeit beträgt allerdings bereits 20%.

2.2.2.2 Fehler bei der Weiterverbreitung oder Kombination der Prämissen: Mentale Regeln und Modelle

Fehler beim syllogistischen Schließen können auch nach dem Verstehen der Prämissen auftreten, denn diese müssen nun weiter verarbeitet bzw. in eine Repräsentation integriert werden. Einer der ersten Versuche, auf diese Weise Fehler beim syllogistischen Schließen zu er-

klären, stammt von Erickson (1974, 1978) und wurde von Guyote und Sternberg (1981) weiterentwickelt. In der Theorie von Erickson kamen die Euler-Kreise als „kognitive Theorie“ des Denkens zu Ehren. Ursprünglich wurden sie vom Schweizer Mathematiker Euler entwickelt, um einer Gräfin Logik beizubringen. Erickson entwickelte jedoch auf ihrer Grundlage eine detaillierte Theorie syllogistischen Schließens. Er nahm an, dass Menschen die Prämissen eines Syllogismus zunächst mithilfe von Euler-Kreisen repräsentieren und dann die Kreise für die einzelnen Prämissen zusammenfügen. Aus dieser integrierten Repräsentation wären dann neue Informationen abzulesen. Wie dies funktionieren könnte, wurde dann von Guyote und Sternberg (1981) präzisiert. Die Theorie kann einige Fehler beim syllogistischen Denken recht gut erklären (vgl. Evans, Newstead & Byrne, 1993). Problematisch ist jedoch, von einer fehlerfreien Übertragung der Prämissen in die Euler-Kreise auszugehen. Die Fehler beim Verständnis von Prämissen sprechen eindeutig gegen diese Annahme. Stenning und Kollegen (z.B. Stenning & Oberländer, 1995) vermieden diesen Fehler in ihrer Theorie syllogistischen Schließens. In ihrem Ansatz werden ebenfalls Euler-Kreise verwendet, um die mentale Repräsentation syllogistischer Prämissen und Inferenzen zu erklären. Zusätzlich werden jedoch auch die Grice'schen Interpretation der Prämissen in die Theorie integriert und es zeigt sich so eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Befunden (Stenning, 2002).

Auch in den gegenwärtig dominierenden Theorien des logischen Denkens werden Fehler aufgrund der fehlerhaften Weiterverarbeitung der Prämissen erklärt. Die Theorien betrachten entweder die falsche Anwendung *logischer Regeln* als mögliche Fehlerquelle. Oder sie nehmen an, dass die Konstruktion eines *mentalen Modells* der Prämissen fehlerhaft verläuft. Beide Erklärungsansätze beruhen auf grundsätzlich verschiedenen Auffassungen darüber, welche kognitiven Prozesse dem deduktiven Denken zugrunde liegen.

In der *Theorie mentaler Logik* beruht syllogistisches Denken auf der Durchführung mentaler Beweise, bei denen die Konklusionen mithilfe logischer Regeln aus den Prämissen abgeleitet werden. Solche natürlichen Deduktionssysteme basieren auf den aussagenlogischen Operatoren für die Konjunktion, Disjunktion, Negation sowie für die Implikation. Hinzu kommen einige Inferenzschemata (Regeln), wovon der MP am wichtigsten ist. Sie werden als Kernschemata bezeichnet. Außerdem werden in den verschiedenen Theorien mentaler Logik noch einige zusätzliche Regeln angenommen. So spielt in der Theorie von Rips (1994) die Grice'sche Implikation eine große Rolle, nach der „Einige A sind B“ impliziert „Einige A sind nicht B“. Zudem gibt es eine Regel, die die Existenz von A's und B's festlegt. Solche (und einige weitere) Regeln sind ausschließlich psychologisch motiviert und in rein logischen Systemen normalerweise nicht zu finden. Umgekehrt wird auf einige Regeln verzichtet, die in

rein logischen Systemen üblich sind. So ist z.B. in der Theorie von Rips (1994) keine Regel für den MT vorgesehen. Die Operatoren und Regeln solcher Deduktionssysteme reichen zwar nicht aus, um alle in der Prädikatenlogik möglichen Schlüsse durchzuführen. Jedoch können mit ihnen alle Syllogismen der Denkpsychologie modelliert werden. Es bedarf also keiner zusätzlichen Regeln für die Quantoren „Alle“ und „Einige“.

Fehler beim logischen Schließen werden von der Theorie mentaler Logik auf verschiedene Weise erklärt. Zum einen kann es zu Fehlern im Verständnis der Prämissen kommen. Um diese zu berücksichtigen, gibt es unter anderem die Regel für die Grice'sche Implikation. Bedeutender ist jedoch die Erklärung, die auf der Weiterverarbeitung der Prämissen aufbaut, wenn diese bereits in einer logischen Form im Arbeitsgedächtnis repräsentiert sind. Laut der Theorie mentaler Logik verfügen Menschen grundsätzlich über die Fähigkeit logisch zu denken, jedoch wird diese Fähigkeit durch zahlreiche Randbedingungen eingeschränkt. Deduktive Schlüsse können die Möglichkeiten des Systems überfordern. Allgemein wird eine Inferenz als fehleranfälliger betrachtet, je mehr Regeln angewendet werden müssen, um von den Prämissen zur Konklusion zu gelangen. Ferner können Störungen des Auffindens oder beim Ausführen der Regeln für Fehler verantwortlich sein. Eine genaue Darstellung dieser Theorie findet sich unter 4.1.

Völlig anders begründet die *Theorie mentaler Modelle* die Schwierigkeit syllogistischer Schlüsse (Johnson-Laird, 1983; Johnson-Laird & Byrne, 1991, Johnson-Laird, 2002). Sie hat eines mit den auf Euler-Kreisen beruhenden Theorien gemeinsam: Auch in der Theorie mentaler Modelle werden die Informationen der einzelnen Prämissen in eine *gemeinsame* Repräsentation integriert, die dann weiter inspiziert werden kann, um neue Information zu extrahieren. Die Theorie mentaler Modelle beschreibt die zugrunde liegenden Prozesse aber detaillierter und ohne Verwendung von Euler-Kreisen. Ausgangspunkt der Theorie ist die Annahme, dass eine Konklusion nur wahr ist, wenn sie unter allen möglichen Interpretationen der Prämissen wahr ist. Damit steht die *Bedeutung* der Prämissen im Mittelpunkt der Theorie mentaler Modelle. Schlussfolgerungen werden als ein Prozess beschrieben, bei dem Modelle der in den Prämissen beschriebenen Sachverhalte konstruiert und anschließend nach neuen Informationen inspiziert werden. Die mentalen Modelle sind „Modelle“ im strengen logischen Sinne, also Strukturen, in denen die Prämissen wahr sind. Psychologisch gesehen, sind sie mentale Repräsentationen von wahrgenommenen oder vorgestellten Sachverhalten. Diese Theorie ist ebenfalls unter 4.2 ausführlicher dargestellt.

2.2.2.3 Fehler bei der Generierung der Reaktion: Atmosphäre und Abgleich

Ursachen für Fehler beim syllogistischen Schließen können auch in der letzten Phase des Inferenzprozesses begründet sein. Diese Theorien gehören zu den ältesten Ansätzen der Denkpsychologie und wurden erstmals von Woodworth und Sells (1935) formuliert. Die beiden bekanntesten Versionen dieser Theorien sind die Atmosphärenhypothese (*atmosphere hypothesis*) und die Abgleichshypothese (*matching hypothesis*).

Woodworth und Sells (1935) äußerten in ihrer Atmosphärenhypothese erstmals die Vermutung, die Wahl einer bestimmten Konklusion, könne allein durch den Modus der Prämissen bestimmt werden. Eine Reformulierung dieser Idee ist bei Begg und Denny (1969) zu finden. Die Prämissen schaffen demnach eine „Atmosphäre“, die die Bevorzugung einer bestimmten Konklusion nahe legt: mindestens eine negative Prämisse führt immer zu einer negativen Konklusion und mindestens eine partielle Prämisse führt zu einer partiellen Konklusion. Nur in den übrigen Fällen werden positive bzw. universelle Konklusionen gewählt. Diese einfachen Annahmen können die empirischen Befunde überraschend gut erklären. So sagt die Theorie beispielsweise vorher, dass aus den Prämissen in (16)

- (16) Alle A sind B.
Alle B sind C.

korrekt geschlossen wird „Alle A sind C“. Für die Prämissen in (17)

- (17) Einige A sind B
Einige B sind C

sagt sie ebenfalls korrekt die falsche Reaktion „Einige A sind C“ vorher. In (18)

- (18) Alle B sind C.
Einige A sind B.

wird richtig vorhergesagt, dass die Konklusion „Keine A sind C“ korrekt als invalide verworfen wird (korrekte Zurückweisung). Wann immer die Atmosphärenhypothese getestet wurde, zeigte sie sehr gute Vorhersagergebnisse (vgl. Evans, Newstead & Byrne, 1993).

Eine verwandte Erklärung bietet die Abgleichshypothese, die vor allem von Wetherick und Gilhooly (1990) vertreten wird. Nach dieser Annahme wird von den Probanden der Quantor in der Konklusion gewählt, der bereits in den Prämissen vorkam. Konklusion und Prämissen

werden also „abgeglichen“ bzw. „gematcht“. Bei zwei unterschiedlichen Quantoren in den Prämissen wird der konservativere bevorzugt, also derjenige, der über die geringste Anzahl von Objekten des Diskursbereichs eine Aussage macht. „Kein“ wird also dem Quantor „Einige“ und dieser wiederum dem Quantor „Alle“ vorgezogen. Leider kommt die Hypothese zu denselben Vorhersagen wie die Atmosphärenhypothese, wenn beide Prämissen denselben Quantor enthalten. Unterschiedlich sind die Vorhersagen nur bei Aufgaben wie:

- (19) Einige A sind B
Keine B sind C

Gemäß Matching-Hypothese sollten die Probanden den konservativeren Quantor bevorzugen und deshalb die Konklusion „Keine A sind C“ wählen. Die Atmosphärenhypothese sagt die Bevorzugung von „Einige A sind nicht C“ vorher, da mindestens eine partielle Prämisse zu einer partiellen Konklusion führt. Von allen Syllogismen in Tabelle 7, bei denen die beiden Theorien unterschiedliche Vorhersagen machen, sind etwa 30% der Fehler durch die Atmosphärenhypothese und etwa 15% durch die Matching-Hypothese erklärbar.

2.2.3 Experimentelle Ergebnisse zum Schließen mit mehreren Quantoren und Sorites

Kategoriale Syllogismen sind nur eine kleine Teilmenge aller in der Prädikatenlogik (erster Stufe) durchführbaren Schlüsse, weil sie nur jeweils einen Quantor je Prämisse enthalten. Prädikatenlogisch gesehen können aber beliebig viele Quantoren in den Prämissen vorkommen. Bislang gibt es nur wenige denpsychologische Arbeiten zu diesem Thema. Johnson-Laird, Byrne und Tabossi (1989) legten ihren Probanden Prämissen des folgenden Typs vor:

- (20) Keiner der Maler ist am gleichen Ort wie alle Musiker.
Alle Musiker sind am gleichen Ort wie alle Autoren.

Den Probanden fiel es relativ leicht, die richtige Konklusion zu generieren:

Keiner der Maler ist am gleichen Ort wie alle Autoren.

Wurden ihnen jedoch die Prämissen

- (21) Keiner der Maler ist am gleichen Ort wie alle Musiker.
Alle Musiker sind am gleichen Ort wie einige Autoren.

fiel es ihnen sehr schwer, zu der gültigen Konklusion

Keiner der Maler ist am gleichen Ort wie einige Autoren.

zu gelangen. Woran liegt das? Schwierigkeiten den Effekt zu erklären haben Theorien, die auf Fehlern beim Prämissenverständnis oder der Antwortgenerierung basieren. So ist z.B. die Relation „am gleichen Platz“ symmetrisch und Fehler können somit nicht anhand der Konversionshypothese erklärt werden. Johnson-Laird et al. (1989) konstruierten die Aufgaben jedoch speziell, um Fehler bei der Prämissenweiterverarbeitung zu untersuchen. Sie wollten herausfinden, ob die Anzahl der erforderlichen Regeln oder die Zahl der möglichen Modelle für das Auftreten von Fehlern verantwortlich ist. Die Resultate unterstützen ihre Theorie mentaler Modelle.

Eine andere Art von Schlüssen mit Quantoren sind die so genannten *Sorites*. Ein Sorite, oder Kettenschluss, ist eine Reihe miteinander verbundener Syllogismen, wie im folgenden Beispiel:

- (22) Alle Tiger sind Raubkatzen.
 Alle Raubkatzen sind Katzen.
 Alle Katzen sind Säugetiere.
 Alle Säugetiere sind Tiere.
 Alle Tiere sind Lebewesen.

Bei den Sorites ist eine gültige Inferenz nur mit dem Quantor „Alle“ in den Prämissen möglich. Die generische Form (22) lautet:

- (23) Alle A sind B.
 Alle B sind C.
 Alle D sind E.
 Alle E sind F.
 Alle F sind G.

Griggs (1976) legte seinen Probanden solche Prämissen vor und fragte anschließend nach der Gültigkeit der Aussagen „Alle A sind B“, „Alle A sind C“, „Alle A sind D“, „Alle B sind C“

alle B sind D“ usw. Außerdem wurde nach der Gültigkeit von „Alle B sind A“, „Alle C sind A“ usw. gefragt. Zwei Resultate waren besonders wichtig: Zum einen nahm die Anzahl korrekter Antworten linear mit der Distanz zwischen den Termen zu, d.h. „Alle A sind C“ wurde häufiger korrekt als gültig erkannt als „Alle A sind D“ und dieses wiederum häufiger als „Alle A sind E“. Zum zweiten kam es zu vielen logisch invaliden Rückwärtsverkettungen. In über der Hälfte aller Aufgaben schlossen die Probanden, dass aus „Alle A sind C“ auch folgt „Alle C sind A“ usw. Es gab nur relativ wenig ausgearbeitete Theorien zu den beiden Effekten beim Schließen mit Sorites (vgl. Evans, Newstead & Byrne, 1993). Offensichtlich passen die Befunde mit den Annahmen der Konversionshypothese gut zusammen und sind auch in den Theorien mentaler Modelle und mentaler Beweise zu erklären.

2.3 Relationales Schließen: Transitive Inferenzen und Denken mit Relationen

Viele Denkleistungen beruhen auf Vergleichen und Unterschieden zwischen Objekten eines Diskursbereiches. Gewissermaßen stellen sie das Gegenstück zu den Verallgemeinerungen beim syllogistischen Schließen dar. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich deshalb mit Inferenzen, die auf Relationen beruhen, wie im folgenden Beispiel:

- (24) Professor X schrieb mehr Bücher als Professor Y.
 Professor Y schrieb mehr Bücher als Professor Z.

 Professor X schrieb mehr Bücher als Professor Z.

Aufgaben dieses Typs werden als *transitive Inferenzen*, *Drei-Term-Aufgaben* (*three-term-series-problems*) oder *lineare Syllogismen* bezeichnet (Johnson-Laird, 1972). Sie beruhen auf Relationen zwischen Objekten oder Sachverhalten. Die Problemlosigkeit, mit der Menschen solche transitive Inferenzen durchführen, bedeutet aber nicht, dass auch die Erklärung der zugrunde liegenden Prozesse einfach ist. Zudem können diese Aufgaben durch geringe Variationen schnell sehr schwierig werden. Betrachten sie dazu das folgende Beispiel:

- (25) Professor Y schrieb mehr Bücher als Professor Z.
 Professor X schrieb weniger Bücher als Professor U.
 Professor X schrieb mehr Bücher als Professor Y.

 Wer schrieb die meisten Bücher?

Sehr vielen Menschen fallen solche Schlüsse überhaupt nicht leicht. Ganz sicher liegt dies nicht an der verwendeten Relation „schrieb mehr Bücher als“. Transitive Inferenzen wurden besonders anhand räumlicher Relationen zwischen Objekten untersucht. So ist beispielsweise aus „X links von Y“ und „Y links von Z“ sofort „X links von Z“ zu schließen. Betrachtet man die herausragende Stellung des Raumes für alle Menschen (und andere Tiere), ist das Interesse an derartigen Aufgaben nicht erstaunlich und auch ein großer Teil dieses Abschnittes wird sich diesem Typ widmen. Darüber hinaus wird es aber auch um kompliziertere räumliche Inferenzen gehen, insbesondere um das Schließen in zwei räumlichen Dimensionen. Solche Aufgaben können z. B. so aussehen:

- (26) Das Telefon steht rechts vom Computer.
 Die Kaffeetasse steht links vom Computer.
 Die Lampe steht vor dem Computer.
 Das Buch liegt rechts von der Lampe.

 Liegt das Buch vor dem Telefon?

Man kann solche Schlüsse im Rahmen der Prädikatenlogik beweisen, muss es jedoch aufgrund ihrer Offensichtlichkeit nicht unbedingt. Der folgende Abschnitt fasst deshalb nur einige der wichtigsten Eigenschaften von Relationen zusammen. Anschließend werden die experimentellen Arbeiten berichtet, die sich mit transitiven Inferenzen und Drei-Term-Aufgaben beschäftigten. Im Anschluss werden die Arbeiten zum relationalen Denken in mehr als einer Dimension beschrieben.

2.3.1 Logische Eigenschaften von Relationen

Logisch gesehen besteht der Satz „Die Erde ist größer als der Mond“ aus den beiden Termen „Erde“ und „Mond“ und dem Prädikat „größer als“. In der klassischen aristotelischen Logik sind Schlüsse mit solchen Aussagen nicht möglich. Außerdem wurde die Prädikatenlogik hier bisher nur für einstellige Prädikate wie „ist eine gerade Zahl“, „ist ein THOG“, „Ist ein Gläubiger“ verwendet. Im Fall von „größer als“ erfordert das Prädikat jedoch genau zwei Argumente. Es gibt auch Relationen mit mehr als zwei Argumenten, wie z.B. in „A liegt zwischen B und C“, jedoch spielen diese bei der Erforschung deduktiver Schlüsse seltener eine Rolle (vgl. allerdings Jahn, Johnson-Laird, & Knauff, 2005).

Es gibt eine große Anzahl von Ausdrücken, die zweistellige Relationen beschreiben. Darunter sind Präpositionen wie „zu der Zeit des“ und Relationsnomen wie „ist Vater von“. Oft wird ein Nomen also nur durch Hinzufügung eines „ist“ zu einer Relation. In anderen Fällen drücken Verben direkt eine zweistellige Relation aus: „Die Ministerin berät den Kanzler“, „Der Junge liebt das Mädchen“, „Der Hai frisst den Surfer“ oder „Der Schlüssel ist in der Hosentasche“. Ausschlaggebend sind die verschiedenen Merkmale solcher relationalen Ausdrücke. So ist z.B. „ist Vater von“ nicht umkehrbar (symmetrisch, s. u.), „ist verwandt mit“ jedoch schon, aus „Die Ministerin berät den Kanzler“ folgt nicht, dass der Kanzler die Ministerin berät. Aus „A ist so groß wie B“, folgt jedoch, dass auch B so groß ist wie A. Aus „Der Schlüssel ist in der Hosentasche des Bischofs“ und „Der Bischof ist in der Kathedrale“ folgt „Der Schlüssel ist in der Kathedrale“ (auch wenn das recht gekünstelt klingt), jedoch folgt aus „Peter ist befreundet mit Hans“ und „Hans ist befreundet mit Ralf“ nicht „Peter ist befreundet mit Ralf“.

Einige der Eigenschaften zweistelliger Relationen zwischen den Objekten x und y des Diskursbereichs (D) sind in Tabelle 8 in prädikatenlogischer Notation zusammengefasst. Tabelle 9 gibt Beispiele für sprachliche Ausdrücke und ihre logischen Eigenschaften.

Tabelle 8. Einige logische Eigenschaften von Relationen.

Konvexität	$\forall (x, y) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \vee y R x$
Reflexivität	$\forall (x) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R x$
Irreflexivität	$\forall (x) \text{ aus } D \text{ gilt: } \neg (x R x)$
Symmetrie	$\forall (x, y) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \rightarrow y R x$
Antisymmetrie	$\forall (x, y) \text{ aus } D \text{ gilt: } (x R y) \wedge (y R x) \rightarrow \neg (x \leftrightarrow y)$
Asymmetrie	$\forall (x, y) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \rightarrow \neg (y R x)$
Transitivität	$\forall (x, y, z) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \wedge y R z \rightarrow x R z$
Intransitivität	$\forall (x, y, z) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \wedge y R z \rightarrow \neg (x R z)$
Nicht-Transitivität	$\forall (x, y, z) \text{ aus } D \text{ gilt: } x R y \wedge y R z \rightarrow \neg ((x R z) \vee \neg (x R z))$

Viele der genannten sprachlichen Ausdrücke führen direkt zu Inferenzen. Wegen der Symmetrie von „verwandt mit“ folgt beispielsweise aus „Anna ist verwandt mit Petra“ sofort „Petra ist verwandt mit Anna“. Viele Linguisten argumentieren deshalb, diese „Umkehrungen“ hätten bereits viel mit Schlussfolgerungen zu tun (vgl. Cruse, 1986, Kap. 5).

Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit „echten“ Schlussfolgerungen, bei denen mindestens zwei relationale Terme $X r_1 Y$ und $Y r_2 Z$ vorgegeben werden und die Aufgabe der

Probanden ist, eine neue Relation $X r_3 Z$ zu finden, die notwendig aus den beiden ersten folgt. Je nach dem wie viele Objekte des Diskursbereiches solche Aufgaben enthalten, können sie auch als Vier-Term-, Fünf-Term-Aufgaben usw. oder allgemeiner als n-term-Aufgaben bezeichnet werden. Technisch gesehen geht es dabei um die *Komposition* von Relationen. Gegeben eine Relation zwischen X und Y und eine weitere Relation zwischen Y und Z, dann ist diese Komposition die Relation zwischen X und Z. Transitiv Inferenzen sind ein Spezialfall solcher Schlüsse. Sie beruhen allein auf transitiven Relationen. Der allgemeinere Fall des relationalen Schließens lässt auch andere Typen von Relationen zu.

Tabelle 9. Beispiel für einige Relationen und ihre logischen Eigenschaften (Darstellung mit Änderungen und Ergänzungen nach Goodwin und Johnson-Laird, 2005).

	Transitivität	Symmetrie
	+ = transitiv	+ = symmetrisch
	- = intransitiv	- = antisymmetrisch
	0 = nicht-transitiv	0 = asymmetrisch
zur Zeit des	+	+
ist Vater von	-	0
ist verwandt mit	+	+
berät	0	0
liebt	0	0
isst	-	0
ist in	+	0
ist intelligenter als	+	0
größer als	+	0
links von/rechts von	+	0
direkt links von/ rechts von	-	-
gleichzeitig mit	+	+
steht auf	0	0
früher als	+	0
nah bei	0	0
nächstgelegen zu	-	0

2.3.2 Experimentelle Ergebnisse zum relationalen Schließen

William James war einer der ersten Psychologen, der sich mit relationalen Schlüssen beschäftigte. Im Mittelpunkt standen dabei transitive Inferenzen, die James als „fundamentales Inferenzprinzip“ betrachtete. Für jede lineare Anordnung $a < b < c < \dots < z$ schreibt er: „... any number of intermediarities may be expunged without obliging us to alter anything in what remains written“ (James, 1890, S. 64). Derselbe Gedanke ist in der einflussreichen Theorie transitiver Inferenz von Hunter (1957) wieder zu finden. In Hunters Arbeiten werden transitive Inferenzen anhand von nur zwei elementaren mentalen Operationen erklärt. Prämissen wie „B ist kleiner als A“ werden, erstens, immer in „A ist größer als B“ konvertiert und, zweitens, kann die Reihenfolge der Prämissen vertauscht werden. Mit beiden Operationen gemeinsam wird z.B. aus

(27A) B ist größer als C.

B ist kleiner als A.

das Prämissenpaar

(27B) A ist größer als B.

B ist größer als C.

Genau wie bei James, kann nun in (27B) der Mittelterm B eliminiert werden, ohne dabei die Beziehung zwischen den beiden Endtermen A und C zu verändern — es folgt „A ist größer als C“. Hunters Theorie wird auch durch einige experimentelle Befunde gestützt. So steigt beispielsweise die erforderliche Zeit zur Verifikation einer Konklusion mit der Anzahl der notwendigen mentalen Operationen an (Hunter, 1957). Es gibt jedoch auch zahlreiche experimentelle Ergebnisse, die mit Hunters Ansatz gar nicht erklärt werden können und auf den allgemeineren Fall des relationalen Schließens ist der Ansatz ohnehin nur bedingt anwendbar.

2.3.2.1 Transitive Inferenzen und eindimensionale räumliche Schlüsse

Schlüsse über die Anordnung von Objekten in einer Dimension wurden häufig untersucht. Berichtet wird hier aus Experimenten, die auf transitiven und nicht-transitiven Relationen beruhen. Konzeptionell lässt sich eine Reihe von Faktoren unterscheiden, die für die Schwierigkeit solcher Schlüsse verantwortlich sein können. Wenn Hunters Theorie zutrifft, dann

sollte beispielsweise die Schwierigkeit einer Inferenzaufgabe von der Reihenfolge der Terme X, Y, Z, ... in den Prämissen abhängig sein. Auch sollte eine Rolle spielen, in welcher Reihenfolge die Prämissen selbst präsentiert werden. Was passiert, wenn die Prämissen nicht nur zu einer eindeutigen Lösung führen, sondern mehrere Möglichkeiten zulassen? Wird ein Schluss durch diese Unbestimmtheit der Prämissen erschwert?

2.3.2.1.1 Termreihenfolgeeffekt

Die Anordnung

x y z

kann auf vier verschiedene Weisen beschrieben werden und aus allen folgt eine gültige Konklusion über die Relation zwischen den Endtermen x und z. Diese Tatsachen stehen in unmittelbarer Beziehung zur Termreihenfolge beim syllogistischen Schließen, die bereits in Tabelle 6 dargestellt wurde. Johnson-Laird und Kollegen untersuchten das Phänomen zunächst in diesem Bereich und prägten den Begriff „Figural effect“ (Bara, Bucciarelli, & Johnson-Laird, 1995; Johnson-Laird & Bara, 1984; Johnson-Laird & Steedman, 1978) Ausgedrückt wird damit, dass die Reihenfolge der Prämissen Einfluss auf die Form der Konklusion hat, wenn diese von den Probanden selbst generiert werden kann. Für die oben dargestellte Anordnung kommen die vier in Tabelle 10 dargestellten Prämissen in Frage.

Tabelle 10: Die vier Figuren beim Schließen mit transitiven Relationen.

	Figur 1	Figur 2	Figur 3	Figur 4
Prämisse 1	X links von Y	Y rechts von X	X links von Y	Y rechts von X
Prämisse 2	Y links von Z	Y links von Z	Z rechts von Y	Z rechts von Y

Oberauer und Wilhelm (2000) präsentieren ihren Probanden solche Prämissen, gefolgt von einer entsprechenden graphischen Abbildung. Der erste Term der ersten Prämisse wird nach ihren Ergebnissen als Referenzobjekt verwendet, zu dem der zweite Term in Beziehung gesetzt wird. Entsprechend kam es zu längeren Verarbeitungszeiten, wenn die Termreihenfolge in den Prämissen von der Reihenfolge des Erscheinens in der graphischen Darstellung abwich. Dieser Befund stimmt gut mit einem Verarbeitungsmodell für räumliche Relationen überein, das von Logan (1994) entwickelt wurde.

Knauff, Rauh, Schlieder und Strube (1998) führten Experimente mit transitiven und nicht-transitiven räumlichen Relationen durch. Den Versuchspersonen wurden die Terme in den in Tabelle 10 genannten Reihenfolgen präsentiert. Anschließend sollten sie eine Konklusion

generieren und konnten dabei frei zwischen den Reihenfolgen $x R z$ oder $z R x$ wählen. Zwar wurden in 63% aller Aufgaben die Reihenfolge $z R x$ gewählt, jedoch war diese Bevorzugung stark von der Termreihenfolge abhängig. Die Reihenfolge $x R z$ wurde häufiger für Prämissen in der Figur $x R y$, $y R z$ gewählt, als für $y R x$, $y R z$ und $x R y$, $z R y$ und $y R x$, $z R y$. In Rauh, Schlieder und Knauff (1997) ist eine algorithmische Modellierung vorgeschlagen, die diesem Effekt Rechnung trägt. Dabei wird bei der Prämissenverarbeitung inkrementell eine Repräsentation des Sachverhaltens aufgebaut. Die Reihenfolge der Terme in den Prämissen bestimmt, welches Objekt als Referenzobjekt verwendet und von welchem Objekt ausgegangen wird, um die Repräsentation nach neuen Informationen (über $x R z$) „abzusuchen“. Da der Aufbau der Repräsentation bei den Prämissen $x R y$ oder $y R z$ mit dem z abschließt, wird direkt an dieser Stelle mit dem „Absuchen“ der Repräsentation begonnen.

2.3.2.1.2 Prämissenreihenfolgeeffekt

Noch mehr Arbeiten beschäftigten sich mit der Frage, ob die Reihenfolge der Prämissen die Schwierigkeit eines relationalen Schlusses beeinflusst. In Anlehnung an eine Arbeit von Ehrlich und Johnson-Laird (1982) führten Knauff, Rauh, Schlieder und Strube (1998) ein Experiment durch, bei dem zwischen kontinuierlicher, semi-kontinuierlicher und diskontinuierlicher Prämissenreihenfolge unterschieden wurde. Im ersten Fall werden drei Prämissen in der Reihenfolge $A r_1 B$, $B r_2 C$, $C r_3 D$ präsentiert, im zweiten Fall in der Ordnung $B r_2 C$, $C r_3 D$, $A r_1 B$ und im diskontinuierlichen Fall in der Reihenfolge $C r_3 D$, $A r_1 B$, $B r_2 C$. Die kontinuierliche und die semi-kontinuierliche Reihenfolge führten zu rund 40% Fehlern und die diskontinuierliche zu 50% Fehlern. Bemerkenswert sind aber besonders die Verarbeitungszeiten für die Prämissen, die in Tabelle 11 dargestellt sind. Wie zu erkennen ist, ist die Verarbeitungszeit der dritten Prämisse in diskontinuierlicher Reihenfolge im Vergleich zu den anderen Bedingungen signifikant länger.

Der *Prämissenreihenfolgeeffekt* wurde in einer ganzen Reihe weiteren Arbeiten berichtet (van der Henst, 1999) und wird üblicherweise mit der Schwierigkeit erklärt eine mentale Repräsentation des beschriebenen Sachverhalts zu konstruieren. In kontinuierlicher und semi-kontinuierlicher Reihenfolge gibt es immer einem gemeinsamen Mittelterm in zwei aufeinander folgenden Prämissen. Weil dies bei diskontinuierlicher Prämissenreihenfolge nicht der Fall ist, sind die Prämissen schwieriger zu verarbeiten. Die Umwandlung der Reihenfolge ist mit zusätzlichem kognitivem Aufwand verbunden.

Tabelle 11. Durchschnittliche Prämissenlesezeiten in Sekunden als Funktion der Prämissenreihenfolge aus Knauff, Rauh, Schlieder und Strube (1998).

Prämissenreihenfolge	Prämisse 1	Prämisse 2	Prämisse 3
kontinuierlich	13,0	11,2	10,9
semi-kontinuierlich	13,6	11,0	14,4
diskontinuierlich	12,4	13,9	19,5

2.3.2.1.3 Präferenzeffekt und Verifikationsfehlereffekt

Was geschieht, wenn es für einen Satz räumlicher Prämissen nicht nur eine Lösung gibt, sondern mehrere Anordnungen denkbar sind? Zu dieser Frage wurden in unserem eigenen Labor viele Experimente durchgeführt. Probanden wurden dabei mit Prämissen der Art

- (28) x überlappt von links y
y überlappt von links z

konfrontiert. Beachten sie, dass es sich bei „überlappt von links“ um eine nicht-transitive Relation handelt. Die in (28) beschriebenen Beziehungen stimmen nämlich mit den drei Anordnungen in Abbildung 6 überein.

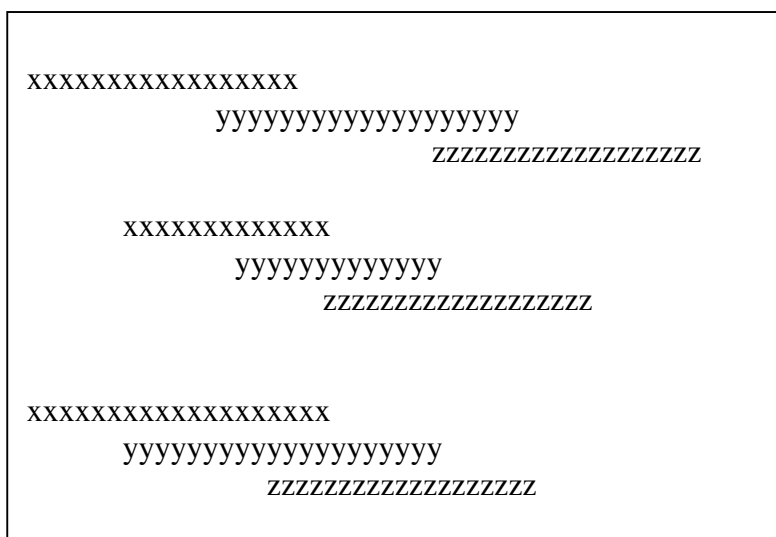


Abbildung 6. Drei mögliche „Modelle“ der Prämissen in Beispiel (28).

Nur im dritten Beispiel der Abbildung 6 folgt auch „x überlappt von links z.“ Im ersten Beispiel liegt x ganz links von z und im zweiten Fall berührt das Ende von x den Anfang von z.

In den Experimenten werden die Probanden lange trainiert, um solche feinen Unterscheidungen vorzunehmen. Außerdem gibt es manchmal bis zu 13 mögliche Konklusionen. Das Hauptergebnis dieser Studien nennen wir *Präferenzeffekt*: Obgleich es immer mehrere Lösungen für eine Aufgabe gibt, wird von den Probanden fast immer nur eine dieser Lösungen generiert, während andere ebenfalls korrekte Lösungen ignoriert werden. Interessanterweise stimmen fast alle Probanden darin überein, welche Lösungen sie generieren und ignorieren (im obigen Beispiel ist es die erste Anordnung; Knauff, 1999; Knauff, Rauh & Schlieder, 1995; Knauff, Rauh, Schlieder & Strube, 1998; Rauh, Schlieder & Knauff, 1997). Wahrscheinlich sind Unterschiede in der Schwierigkeit, sich die Anordnungen vorzustellen, also im Arbeitsgedächtnis zu repräsentieren und aktiv zu halten, für diese Bevorzugungen verantwortlich. Die am einfachsten vorzustellenden Situationen haben wir als *präferierte mentale Modelle (PMM)* bezeichnet.

In einem weiteren Experiment mussten die Probanden keine neuen Konklusionen generieren, sondern vorgegebene Schlüsse auf ihre Gültigkeit hin überprüfen (Verifikation). Hier zeigt sich, dass Konklusion die zu den PMM korrespondieren auch schneller und häufiger als korrekt bezeichnet werden als andere ebenfalls korrekte, jedoch nicht aus dem PMM ablesbare Konklusionen. Dieser Befund wird als *Verifikationsfehlereffekt* bezeichnet (Rauh, Schlieder & Knauff, 1996; Rauh, Hagen, Knauff, Kuß, Schlieder & Strube, 2005). Schlieder und Berendt (1998) bieten zwei algorithmische Modelle an, um den Präferenzeffekt und den Verifikationsfehlereffekt zu erklären.

2.3.2.2 Zwei-dimensionales räumlich-relationales Schließen

Einige denkpsychologische Fragestellungen lassen sich besser untersuchen, wenn man eine zweite Raumdimension zulässt. Viele Forscher haben sich deshalb vornehmlich mit diesen Aufgaben beschäftigt. An dieser Stelle soll nur eine besonders wichtiger Forschungslinie dargestellt werden. Begründet wurde dieser in einer Arbeit von Byrne und Johnson-Laird (1989). In der Arbeit geht es um die Schwierigkeit räumlicher Inferenzen. Wie sich bereits zeigte, wird diese durch eine Vielzahl von Aspekten beeinflusst, jedoch wurde von Byrne und Johnson-Laird, als Vertreterin bzw. Gründer der Theorie mentaler Modelle, ein Faktor besonders betont. Die Annahme lautet: Je mehr „mentale Modelle“ aus den Prämissen einer Denkaufgabe konstruiert werden können, desto schwieriger ist die Aufgabe. Deutlich wird dies, betrachtet man die Aufgaben (29)-(31).

- | | | | | | |
|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|
| (29) | A liegt rechts von B. | (30) | B liegt rechts von A. | (31) | B liegt rechts von A. |
| | C liegt links von B. | | C liegt links von B. | | C liegt links von B. |

D liegt vor C.
E liegt vor B.

D liegt vor C.
E liegt vor B.

D liegt vor C.
E liegt vor A.

Für (29) existiert ein eindeutiges Modell

C	B	A
D	E	

und die Schlussfolgerung „D liegt links von E“ ist gültig. Für Aufgabe (30) gibt es zwar zwei Modelle

C	A	B	A	C	B
D		E		D	E

die Schlussfolgerung „D liegt links von E“ ist aber trotzdem gültig, weil es kein Modell gibt, welches dieser Konklusion widerspricht. Für (31) sind ebenfalls zwei Modelle möglich:

C	A	B	A	C	B
D	E		E	D	

Wie man sieht, gibt es jedoch keine Beziehung zwischen D und E, die in allen Modellen gilt. Die einzige logisch gültige Konklusion lautet deshalb „nichts folgt aus den Prämissen“. Byrne und Johnson-Laird (1989) führten Experimente mit solchen Aufgaben durch und fanden, dass zwar über 70% des Aufgabentyps (29), aber nur knapp die Hälfte aller Aufgaben des Typs (30) korrekt gelöst wurden. Sogar noch mehr Schwierigkeiten hatten die Probanden mit Aufgabentyp (31); nur etwa ein Drittel dieser Aufgaben wurde korrekt gelöst. Dieser *Unbestimmtheitseffekt* spielt (wie unten gezeigt wird) bis heute in der Theorie mentaler Modelle eine zentrale Rolle.

2.4 Inhaltseffekte, anschauliche Vorstellungen und Arbeitsgedächtnis

Warum sind manche logische Schlüsse sehr einfach und andere so schwierig? Denkpsychologische Arbeiten, der Überblick hat dies gezeigt, gehen dieser Frage meist mithilfe abstrakten Materials und möglichst ohne Bezug zu inhaltlichen Kontexten nach. Andere experimentelle Befunde zeigen jedoch, wie sehr der „Inhalt“ die Schwierigkeit einer Logikaufgabe beeinflusst. Zwei Themen wird in der Denkpsychologie besondere Aufmerksamkeit geschenkt:

Wie, erstens, werden logische Schlüsse durch unser Wissen über den Diskursbereich beeinflusst und, zweitens, welche Rolle spielen anschauliche Vorstellungen für die Schwierigkeit einer Denkaufgabe? Ergänzt werden diese Themen neuerdings durch ein drittes Forschungsgebiet, in dem die Verbindung zwischen Denken und Arbeitgedächtnisses untersucht wird.

2.4.1 Effekte des thematischen Inhalts

Betrachten Sie zunächst die Regel: „Wenn ein Jugendlicher Bier trinkt, dann muss er über 16 Jahre alt sein“. Nehmen sie dann weiter an, sie seien für ein Fest verantwortlich und möchten prüfen, ob keiner der Gäste gegen die Regel verstößt. Ziemlich sicher werden sie nach Personen unter 16 Jahren suchen und kontrollieren, ob diese trotzdem Bier trinken. Die logische Struktur des Konditionalsatzes entspricht genau der klassischen WST, mit der sehr viele Menschen Schwierigkeiten haben. Gleichwohl fällt es in diesem Kontext kaum jemanden schwer, sofort zu prüfen, ob eine Person, die unter 16 ist ($\neg q$) trotzdem Bier zu sich nimmt (p). Derartige Effekte des thematischen Inhalts sind nicht nur für die Forschung zur WST, sondern für alle Forschungsgebiete des deduktiven Schließens bedeutsam. Sie können wie im obigen Beispiel Fehlschlüsse verhindern bzw. korrekte Schlüsse erleichtern. Jedoch kann „Hintergrundwissen“ auch gültige Schlüsse unterdrücken.

Johnson-Laird, Legrenzi und Legrenzi (1972) führten eines der ersten Experimente zu Inhaltseffekten beim konditionalen Schließen durch. Die italienischen Versuchspersonen mussten die Regel „Wenn ein Brief verschlossen ist, dann muss er mit 50 Lira frankiert sein.“ prüfen (was damals in Italien stimmte). Ihnen wurden die Briefumschläge wie in Abbildung 7 präsentiert.

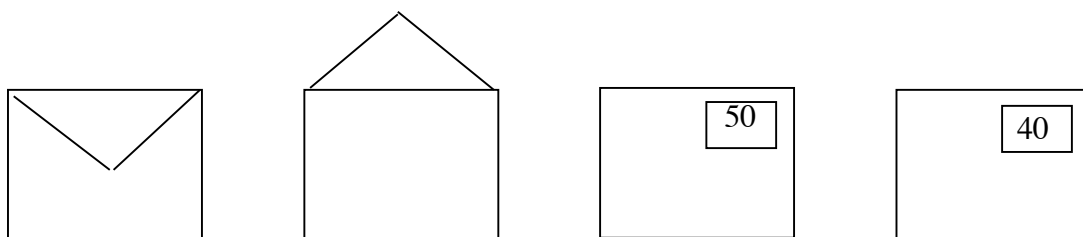


Abbildung 7: Die „Postversion“ der Wason'schen Wahlaufgabe (WST) aus einer Studie von Johnson-Laird et al. (1972).

Obgleich bei der originalen WST kaum richtige Lösungen beobachtet werden, wählten in dieser inhaltlichen Einbettung 22 von 24 Probanden die korrekten Karten p und $\neg q$. Wie die Lösung einer Denkaufgabe vom Inhalt der Aufgabe abhängt wurden in einer ganzen Reihe weiterer Experimente nachgeprüft. So verglichen Griggs und Cox (1982) sowie Manktelow

und Evans (1979) verschiedene thematische Inhalte und berichteten von Inhalteffekten nur bei bekannten, jedoch nicht bei arbiträren Inhalten. Beispielsweise konnten die Probanden die Aufgabe leicht lösen, wenn die Regel hieß „Wenn eine Person Schnaps trinkt, muss sie mindestens 19 Jahre sein“ (ein Gesetz in Florida, wo das Experiment durchgeführt wurde), jedoch kam es nicht zu einer Verbesserung, wenn die Regel lautete „Wenn jemand Schellfisch isst, dann trinkt er Gin“. Auch die unterschiedliche Frankierung von Briefumschlägen hatte bei den Probanden aus Florida keinen Effekt – es gibt dort keine entsprechenden Posttarife.

Ist menschliches Denken also doch unlogisch? Um diese Frage kreisten dutzende weitere Experimente. Dabei wurde Peter Wasons Wahlaufgabe zur "Drosophila der Denkpsychologie" (Beller, 1997). Im Zentrum dieser Forschung stehen Inferenzen darüber, wie sich Personen aufgrund bestimmter sozialer Regeln verhalten dürfen oder müssen. Weiter oben wurde dieses *deontische Schließen* bereits anhand des Beispiels "Wenn eine Person ein Ticket hat und keine Waffen mit sich führt, dann darf sie in die Veranstaltung" eingeführt. Bereits 1985 entwickelten Cheng und Holyoak mit der Theorie der *pragmatischen Schlussfolgerungsschemata* eine bis heute einflussreiche Theorie solcher Inferenzen. Die ziemlich radikale These lautet, es gäbe nur erlernte Beziehungen zwischen Prämissen und Konklusion, die logisch keine Notwendigkeit haben. Nur deshalb können Probanden mit inhaltlichem Material leichter Schlüsse durchführen. Ähnlich radikal ist auch die evolutionäre Theorie darwinistischer Algorithmen, die von Cosmides (1989) eingeführt wurde. Beide Ansätze werden in 4.3 beschrieben.

Inhalteffekte wurden auch beim syllogistischen und relationalen Schließen beobachtet. Die Übersetzung des englischen Begriffs „belief bias“ in „Voreingenommenheiten“ ist dabei so üblich wie (wegen der nur in deutscher Sprache negativen Konnotation) irreführend. Beschrieben wird mit den Begriffen die Tatsache, dass mit Überzeugungen übereinstimmende Konklusionen eher akzeptiert oder generiert werden als nicht mit diesem „Vorwissen“ zusammenpassende. Versuchsweise können sie die Schlüsse (32) bis (35) auf ihre logische Gültigkeit zu überprüfen.

(32) Alle Sportler sind gesund.

Einige gesunde Personen sind wohlhabend.

Einige Sportler sind wohlhabend.

(33) Alle Studenten sind arm.

Kein Student ist dumm.

Einige arme Personen sind nicht dumm.

(34) Alle Männer sind gesund.

Einige gesunde Personen sind Frauen.

Einige Männer sind Frauen.

(35) Alle Mönche sind Männer.

Ein Mönch ist eine Frau.

Einige Männer sind keine Frauen.

Die Beispiele stammen aus Manktelow (1999). Sollten sie (32) und (33) für gültig und (34) und (35) für ungültig gehalten haben, sind sie dem „belief bias“ aufgesessen. Tatsächlich sind (32) und (34) ungültige und (33) und (35) gültige Schlüsse. Unterschiede bestehen nur im thematischen Inhalt. Die Konklusionen in (32) und (33) „klingen glaubhafter“ als die Konklusionen (34) und (35). Offenbar gibt es Probleme mit einem der logischen Grundprinzipien überhaupt: der Trennung von logischer Form und Inhalt. Dass beim syllogistischen Schließen beide Faktoren interagieren, wurde erstmalig von Wilkins (1928) und dann in vielen weiteren Arbeiten gezeigt. Tabelle 12 zeigt die Ergebnisse einer Studie von Evans, Barston und Pollard (1983). Offensichtlich werden logisch gültige Schlüsse häufiger als valide akzeptiert als logisch ungültige Schlüsse und glaubhafte häufiger als ungläubhafte. Jedoch war der Effekt der Glaubhaftigkeit bei den invaliden Inferenzen stärker als bei den validen. Dieses Befundmuster hat sich in vielen weiteren Studien bestätigt (vgl. Evans, Newstead & Byrne, 1993; Garnham & Oakhill, 1994).

Tabelle 12. Prozentsatz akzeptierter Schlüsse als Funktion der logischen Gültigkeit und der Glaubhaftigkeit der Konklusion in einem Experiment von Evans, Barston und Pollard (1983).

	valide	invalide
glaubhaft	86	66
unglaubhaft	62	13

Evans, Barston und Pollard (1983) schlagen zur Interaktion zwischen logischer Validität und Glaubhaftigkeit zwei Erklärungen vor. Im *Modell der selektiven Prüfung (selective scrutiny)* geht die Anwendung von Heuristiken zur Prüfung der Glaubhaftigkeit dem eigentlichen Schlussfolgerungsprozess voraus. So werden glaubwürdige Konklusionen sofort akzeptiert und nur unglaubliche Schlüsse auf logische Gültigkeit überprüft. Im zweiten Erklärungsansatz spielt die *Fehlinterpretation der logischen Notwendigkeit (misinterpretation of necessity)* eine Rolle. Möglicherweise irren die Probanden, weil sie nicht die logische Notwendigkeit – eine Konklusion muss wahr sein – verwenden, sondern nur die Möglichkeit – eine Konklusion könnte wahr sein. Auf diese Weise akzeptieren sie glaubhafte jedoch invalide Schlüsse. Ausgearbeitete Erklärungen werden, wie unten gezeigt wird, von der Theorie mentaler Modelle und von der Theorie mentaler Beweise angeboten. Klauer, Musch und Nauer (2000) entwickelten ein multinomiales Modell, nach dem nur ein mentales Modell für die Prämissen und die Konklusion konstruiert wird, sofern diese glaubhaft sind. Unglaubliche Prämissen und Konklusionen werden als logische Negationen repräsentiert.

Interaktionen zwischen logischer Gültigkeit und Glaubhaftigkeit beim relationalen Schließen wurden von Dutke (1993) berichtet. Er verwendete Aufgaben mit fünf Termen wie in (29) bis (31) und variierte den thematischen Inhalt. Dabei zeigt sich, dass die Mehrdeutigkeit in Aufgaben des Typs (30) zu keiner Verschlechterung der Leistung führt, wenn die Aufgabe z. B. von der Anordnung von Besteck und Porzellan auf einem Esstisch handelt. Anscheinend verwenden die Probanden „Hintergrundwissen“ über die typische Anordnung, um die Mehrdeutigkeit der Beschreibung aufzulösen. Handelte die Aufgabe von Werkzeug auf dem Garagenboden, wofür es keine typischen Anordnungen gibt, trat die bekannt größere Schwierigkeit wieder auf.

Rauh (2000) stellte den Zusammenhang zwischen thematischem Inhalt und präferierten mentalen Modellen (PMM) beim räumlich-relationalen Schließen her. Probanden wurden in dieser Arbeit auf zwei Gruppen verteilt. Gruppe 1 wurde instruiert sich in die Lage eines Chemiefabrikanten zu versetzen. Gruppe 2 übernahm die Perspektive eines Umweltschützers. Anschließend wurde beiden Gruppen berichtet, dass von der Chemiefabrik verschiedene chemische Substanzen x, y, z in einen Fluss ausgelassen werden und Gefahr für die Umwelt droht, wenn x und z durchmischt werden. Die Ergebnisse lassen sich am besten anhand von Beispiel (28) verdeutlichen. In der inhaltlichen Variante dieser Aufgabe entschieden sich fast alle „Chemiefabrikanten“ für die erste Konklusion, in der keine Gefahr besteht (weil die Regionen nicht überlappen) und fast alle „Umweltschützer“ für die dritte Variante, bei der Gefahr im Verzug ist (weil sich die Regionen überlappen). Es gab also eine klare Abhängigkeit

von der Interessenlage der Probanden. Am wichtigsten ist jedoch die Analyse der Reaktionszeiten. Interessanterweise benötigten die Probanden signifikant weniger Zeit, wenn die von ihnen bevorzugte Schlussfolgerung mit der abstrakten PMM übereinstimmte. Umgekehrt dauerte die Entscheidung länger, wenn das abstrakte PMM nicht der „gewünschten Lösung“ entsprach. Nach Rauh (2000) wird also immer zunächst das abstrakte PMM konstruiert, während es zusätzlichen kognitiven Aufwands bedarf, dieses Modell zu modifizieren, wenn ein anderes Modell gefunden werden muss, das ebenfalls mit den Prämissen übereinstimmt.

2.4.2 Die Rolle anschaulicher Vorstellungen

Eine besondere Form von Inhaltseffekten hängt mit der *Anschaulichkeit* der Aufgabe zusammen. Eine Aufgabe kann anschauliche Vorstellungen hervorrufen oder diese begleiten. Anschauliche Vorstellungen werden von vielen Menschen berichtet, wenn man sie fragt, wie sie deduktive Schlüsse durchführen. Sie berichten dann meistens, sie würden sich den in den Prämissen beschriebenen Sachverhalt „vor dem inneren Auge vorstellen“ und diese Vorstellung nach weiteren Informationen „absuchen“, um zu einer Lösung zu kommen.

Der Einfluss anschaulichen Inhalts auf das Lösen deduktiver Schlussfolgerungen wurde in der kognitiven Psychologie mehrfach untersucht. Pioniercharakter hatte eine Arbeit von De Soto, London und Handel (1965), die Probanden transitive Inferenzen wie in (36) vorlegten

(36) Ann ist größer als Beth.

Cath ist kleiner als Beth.

Wer ist die Größte?

Aufgrund ihrer Daten argumentierten die Autoren, ihre Probanden seien zum Lösen dieser Aufgabe in der Lage, weil sie anschauliche Vorstellungen der genannten Personen generierten und diese „vor dem inneren Auge“ inspizierten, um ihre Größe zu vergleichen. Ähnliche Überlegungen sind z. B. bei Huttenlocher (1968) zu finden, nach deren Auffassung Probanden bei solchen Aufgaben mentale Repräsentationen aufbauen, die als analog zur physikalischen Anordnung beschrieben werden.

Wenn Schlussfolgerungsprozesse auf der Konstruktion und Inspektion visueller Vorstellungen beruhen, dann sollte Schließen einfacher sein, wenn die Inhalte der Logikaufgabe leicht anschaulich vorgestellt werden können. Bereits ab 1970 wurde diese Hypothese in mehreren Arbeiten getestet. So berichteten z. B. Shaver, Pierson und Lang (1975), die Leistung

beim schlussfolgernden Denken werde positiv beeinflusst durch einfache Vorstellbarkeit, durch Instruktionen, die die Verwendung von Vorstellungen unterstützen, und durch die individuelle Fähigkeit der Probanden, Vorstellungen zu generieren. Ähnliche Befunde berichten Clement und Falmagne (1986), in deren Untersuchungen Probanden weniger Fehler beim Schlussfolgern produzierten, wenn das Material leicht vorzustellen war. Im Widerspruch dazu stehen allerdings Arbeiten, die keinen Zusammenhang zwischen Vorstellbarkeit und Schlussfolgern nachweisen konnten. Sternberg (1980) fand beispielsweise keine Unterschiede zwischen leicht und schwer vorstellbaren Aufgaben, ebenso wie Richardson (1987) keine Erleichterung durch bessere Vorstellbarkeit zeigen konnte. In dieselbe Richtung weisen Befunde von Johnson-Laird, Byrne und Tabossi (1989) sowie Newstead, Pollard und Griggs (1986). Interessant ist auch, dass Sternberg (1980) keinen Zusammenhang zwischen der Performanz in Schlussfolgerungsaufgaben und Leistungsunterschieden in Vorstellungstests finden konnte.

Ausgangspunkt einer Reihe von Experimenten, die in unserem Labor durchgeführt wurden, war die Annahme, dass die Uneinheitlichkeit der in der Literatur berichteten Befunde zum Vorstellen und Schlussfolgern auf eine Konfundierung visueller und räumlicher Vorstellbarkeit zurückgeht. Deshalb wurden in Knauff und Johnson-Laird (2002) zunächst Werte für die visuelle und räumliche Vorstellbarkeit räumlicher und relationaler Begriffe empirisch erhoben. Die Resultate zeigen, dass vier verschiedene Arten von Relationen unterschieden werden können: visuell-räumliche Relationen wie z. B. „über“ und „unter“ sind leicht visuell und leicht räumlich vorstellbar, visuelle Relationen wie z. B. „schmutziger“ und „sauberer“ sind leicht visuell, aber schwer räumlich vorstellbar, räumliche Relationen wie z. B. „nördlich“ und „südlich“ sind leicht räumlich, aber schwierig visuell vorstellbar und Kontrollrelationen wie „besser“ und „schlechter“ sind weder visuell noch räumlich leicht vorstellbar. Diese Relationen wurden anschließend in mehreren Experimenten verwendet, in denen Probanden transitive Inferenzen lösen mussten. Die leichte visuelle Vorstellbarkeit führte in den Experimenten nicht nur nicht zu einer Verbesserung, sondern sogar zu einer signifikanten Verschlechterung der Leistung. Die beiden wichtigsten Befunde sind in Tabelle 13 zusammenfassend dargestellt. Zum einen benötigten die Probanden beim Lösen rein visueller Aufgaben signifikant mehr Zeit als bei den anderen Aufgaben. Zum anderen gab es einen signifikanten Trend der folgenden Art: Schlüsse mit visuellen Relationen führten zu längeren Lösungszeiten als Schlüsse mit Kontrollrelationen, diese erforderten mehr Zeit als visuell-räumliche Aufgabe, und diese führten wiederum zu längeren Lösungszeiten als die rein räumlichen Aufgaben. Offenkundig ist für die Leistung beim Schlussfolgern die Einfachheit, mit der eine räumliche Repräsentation konstruiert werden kann, entscheidend und dieser Konstruktions-

prozess kann durch visuelles Vorstellen sogar beeinträchtigt werden. Rein visuelle Relationen wie „schmutziger“ und „sauberer“ können also den Aufbau einer Repräsentation behindern — wir bezeichnen dies als *visual-impedance effect* —, während rein räumliche oder zusätzlich räumliche Relationen den Aufbau mentaler Repräsentationen begünstigen. In einer anderen Arbeit konnten wir zeigen, dass geburtsblinde Menschen, die keine bildhaften Vorstellungen erleben, keine solche Beeinträchtigung zeigen (Knauff & May, 2005).

Tabelle 13. Mittlere Reaktionszeit (in Sek.) beim deduktiven Schlussfolgern als Funktion verschiedener Aufgabentypen aus Knauff und Johnson-Laird (2002).

	visuelle Relationen	Kontroll- Relationen	visuell- räumliche Relationen	räumliche Relationen
Experiment 1 *	2,7 **	2,4	2,2	-
Experiment 2 *	3,4 **	2,6	2,5	-
Experiment 3	4,5 **	3,8	3,7	3,5

* In Experiment 1 und 2 wurden nur die ersten drei Aufgabentypen verwendet.

** Auf 5%-Niveau signifikanter Unterschied zu Kontrollrelationen. Außerdem ist der Trend über alle drei bzw. vier Aufgabentypen in allen Experimenten statistisch signifikant

2.4.3 Deduktives Denken und Arbeitsgedächtnis

Zwischen Denkprozessen und der Struktur des Arbeitsgedächtnisses besteht eine enge Verbindung. Gleichwohl wurde diese Brücke in der psychologischen Literatur lange Zeit nicht geschlagen. Seit einigen Jahren zeichnet sich jedoch ein Interesse an der Verbindung zwischen Theorien des Denkens und des Arbeitsgedächtnisses ab. Wie die Drei-Term-Aufgaben in der Denkpsychologie, so hat sich auch in der Forschung zum Arbeitsgedächtnis ein experimentelles Paradigma besonders durchgesetzt. Dieses Paradigma wird als *Doppel- bzw. Zweitaufgabentechnik* oder als *Interferenzparadigma* bezeichnet. Hintergrund ist meistens die Arbeitsgedächtnistheorie von Baddeley (z.B. 1986), in der verschiedene Subsysteme des Arbeitsgedächtnisses postuliert werden, die jeweils auf die Verarbeitung spezifischer Informationsarten spezialisiert sind. Ausgangspunkt von Zweitaufgabenexperimenten ist die Annahme, dass sich zwei Aufgaben, die dasselbe Arbeitsgedächtnissubsystem beanspruchen, dieselben Ressourcen teilen müssen und deshalb gegenseitig stören sollten, während Aufgaben die in unterschiedlichen Subsystemen gelöst werden, sich nicht gegenseitig beeinflussen sollten. Für die Denkpsychologie ist der Umkehrschluss entscheidend: Welche Art der Information beim Denken verarbeitet wird, lässt sich aus dem Vergleich der Wirkung von Nebenaufgaben erschließen, deren Struktur bereits bekannt ist.

In der klassischen Version des von Baddeley und Hitch (1974) eingeführten Modells, besteht das Arbeitsgedächtnis aus drei Grundbausteinen: Die artikulatorische Schleife (*articulatory loop*) ist für die Verarbeitung verbaler Information zuständig, während der visuell-räumliche Notizblock (*visuo-spatial sketch pad, VSSP*) auf die Speicherung und Manipulation visueller und räumlicher Information spezialisiert ist. Für beide Teilsysteme werden jeweils eine passive Speicherkomponente und ein Aufrechterhaltungsmechanismus angenommen, der für die längere Haltedauer sorgt (Baddeley & Logie, 1992). Das dritte Teilsystem, die zentrale Exekutive (*central executive*), übernimmt die Funktion einer Koordinatorin, die die Informationsverarbeitung organisiert, für die Ressourcenverteilung sorgt und zwischen verschiedenen Verarbeitungsstrategien auswählt.

Die Beteiligung verschiedener Arbeitsgedächtnisteilsysteme an Schlussfolgerungsprozessen wurde erstmals in einer Arbeit von Hitch und Baddeley (1976) untersucht. In dieser Studie beeinträchtigte gleichzeitiges Nachsprechen von Wörtern die Leistung für einfache grammatische Schlussfolgerungsaufgaben. Ansonsten ist bezüglich der Rolle der artikulatorischen Schleife bei verschiedenen Schlussfolgerungsaufgaben von eher uneinheitlichen Ergebnissen zu berichten. So fanden z.B. Evans und Brooks (1981) keine Leistungsbeeinträchtigung durch Belastung der artikulatorischen Schleife bei konditionalen Schlussfolgerungen, während diese in anderen Arbeiten nachgewiesen wurde (z.B. Toms, Morris & Ward, 1993). Außerdem kann vermutlich der Zusammenhang zwischen artikulatorischer Zusatzbelastung und verschiedenen Schlussfolgerungsaufgaben durch vorhergehendes Training der Probanden moduliert werden (vgl. Meiser, Klauer & Naumer, 2000).

Konsistenter sind die Ergebnisse zur Funktion der zentralen Exekutive beim deduktiven Denken. Aufgaben, die beträchtlichen Koordinationsaufwand erfordern, z.B. das Generieren von Zufallszahlen, behindern die Leistung beim konditionalen Schließen (Klauer, Stegmaier & Meiser, 1997), beim syllogistischen Schließen (Gillhooly, Logie, Wetherick & Wynn, 1993) und auch bei relationalen Schlussfolgerungen (Vandierendonck & De Vooght, 1997). Anscheinend übernimmt die zentrale Exekutive bei fast allen deduktiven Schlussfolgerungsaufgaben eine wichtige Funktion.

Ausführlich wurde gerade die Verbindung zwischen räumlich-relacionalem Denken und den Arbeitsgedächtnissystemen untersucht. Generell konnten Leistungsverschlechterungen beim räumlich-relationalen Schließen durch die zusätzliche Belastung der zentralen Exekutive (Klauer et al., 1997, Vandierendonck & De Vooght, 1997) und, wie zu erwarten war, des visuell-räumlichen Notizblocks (Klauer et al. 1996; Klauer et al. 1997) nachgewiesen werden.

Belastungen der artikulatorischen Schleife haben dagegen kaum negative Auswirkungen auf räumlich-relationale Schlussfolgerungen (Klauer et al., 1997).

Die berichteten Befunde zur Rolle des VSSP sind eindeutig, unterscheiden jedoch nicht zwischen den visuellen und räumlichen Aspekten der zugrunde liegenden Prozesse. Experimente zur Erforschung des Arbeitsgedächtnisses zeigen jedoch die Unverzichtbarkeit einer solchen Differenzierung (Klauer & Zhao, 2004; Übersicht in Logie, 1995). Daher wurden von Knauff, Jola, Rauh, Schlieder und Strube (2004) mehrere Experimente durchgeführt, in denen relationale Schlüsse der folgenden Art ausgeführt wurden:

Das rote Rechteck liegt links vom grünen Rechteck.

Das grüne Rechteck liegt links vom blauen Rechteck.

Liegt das rote Rechteck links vom blauen Rechteck?

Gleichzeitig mit diesen Aufgaben wurden Nebenaufgaben bearbeitet, die entweder visuell oder auditiv dargeboten wurden und entweder räumliche oder keine räumlichen Eigenschaften aufwiesen. Zu signifikanten Leistungsbeeinträchtigungen in der Denkaufgabe führen nur die räumlichen Zweitaufgaben und zwar unabhängig davon, ob sie visuell oder auditiv dargeboten wurden. Dagegen war für die visuellen Nebenaufgaben keine signifikante Leistungsbeeinträchtigung messbar.

3 Neuroanatomie des logischen Denkens

Was geht im Gehirn vor sich, wenn wir Logikaufgaben lösen? Lange Zeit waren Untersuchungen mit Patienten die einzige Möglichkeit etwas über die neuronalen Grundlagen des deduktiven Denken zu erfahren. Diese ersten Ergebnisse waren häufig nur ein Nebenprodukt der Diagnostik und Behandlung von Hirnschädigungen. Inzwischen kann mithilfe funktionseller bildgebender Verfahren das intakte Gehirn untersucht werden. Beide Forschungsrichtungen haben auf ihre Weise zum Verständnis der neuronalen Basis des logischen Denkens beigetragen.

3.1 Folgen von Hirnschäden

Die Fähigkeit deduktive Schlüsse durchzuführen wird uns oft erst bewusst, wenn diese durch Hirnschädigungen beeinträchtigt wird. Solche Schäden können beispielsweise nach Schädel-Hirn-Traumata, Tumoren oder Schlaganfällen vorkommen. Der Ausfall kortikaler Strukturen

führt dann zu gestörter Informationsverarbeitung und verrät so etwas über die Hirnstrukturen, die zur Ausführung logischer Denkleistungen *notwendig* sind.

3.1.1 Beeinträchtigungen beim konditionalen Schließen

Konditionales Denken bei Patienten mit Hirnschäden wurde in einer viel beachteten Arbeit von Whitaker, Markovits, Savary, Grou und Braun (1991) untersucht. Zwei Gruppen von Probanden wurden verglichen, eine mit anteriorer unilateral temporaler Lobektomie (bei der ein Epilepsieherd chirurgisch entfernt wird) in der linken Hirnhälfte und eine mit der entsprechenden Schädigung in der rechten Hemisphäre. In der Untersuchung waren die Patienten mit der rechtseitigen Schädigung beeinträchtigt, wenn sie Schlüsse mit unglaublichen Prämissen durchführen mussten. In Abwandlung von (1) wurden ihnen Logikaufgaben der Art

(38) Wenn es regnet, ist die Strasse trocken.

Es regnet.

präsentiert. Patienten mit rechtseitiger Schädigung schlossen daraus „Die Straße ist nass“. Sie waren also nicht in der Lage, den Schluss durchzuführen ohne „Hintergrundwissen“ zu verwenden. Linkseitige Patienten zeigten hingegen Schwierigkeiten bei Schlüssen mit glaubhaften Prämissen und zwar sowohl mit dem MP als auch mit dem MT. Hier ist jeweils eine Beispielaufgabe:

(39) Wenn der Akku geladen ist, dann funktioniert der Walkman.

Der Akku ist geladen.

Also funktioniert der Walkman.

(40) Wenn der Akku geladen ist, dann funktioniert der Walkman.

Der Walkman funktioniert nicht.

Der Akku ist nicht geladen.

Die linkseitigen Patienten konnten nicht von der Glaubhaftigkeit der Prämissen profitieren. Studien zum konditionalen Schließen wurden auch von Golding (1981) durchgeführt. Er legte Probanden mit Schädigungen in der linken oder rechten Hirnhälfte eine Variante der WST

vor. Ergebnis: Nur einer der linksseitig geschädigten Patienten und keine der Kontrollpersonen wählen die korrekten p und $\neg q$ Karten (um die Regel zu falsifizieren), während zehn der zwanzig Patienten mit rechtsseitiger Schädigung diese Karten wählten – und damit weit über dem Erwartungswert lagen. Teilweise decken sich die Ergebnisse mit einer Studie von Goel, Shuren, Sheseesly und Grafman (2004), in der ebenfalls die WST verwendet wurde. Die Patienten litten unter genauer umrissenen Läsionen im linken und rechten präfrontalen Kortex. Getestet wurden zwei Versuchsbedingungen: Die bekannte abstrakte Variante der WST und eine Version mit thematischen Inhalt (das Alkohol-Beispiel aus 2.4.1). Erwartungsgemäß wurde die Leistung in der thematischen Bedingung bei den gesunden Kontrollpersonen besser. Hingegen trat bei den Patientengruppen kein Verbesserungseffekt auf. Zudem waren die Patienten mit linksseitiger Läsion mit dem thematischen Material noch stärker beeinträchtigt als die rechtsseitigen Patienten. Goel und seine Kollegen entwickelten daraus eine Theorie zur Verbindung zwischen thematischen Inhalt und Hirnstrukturen, die weiter unten dargestellt ist.

3.1.2 Beeinträchtigungen beim syllogistischen Schließen

Der russische Psychiater Deglin und sein amerikanischer Kollege (Deglin & Kinsbourne, 1996) setzten die elektrokonvulsive Therapie (EKT) zur Behandlung schwer depressiver und schizophrener Patienten ein. Bei der EKT wird die Funktion der stimulierten Hirnstruktur für etwa 30 bis 40 Minuten blockiert (was eine temporäre Läsion simuliert). Während dieser Zeit mussten die Patienten in zwei Experimenten syllogistische Denkaufgaben lösen. Im ersten Experiment wurden ihnen Aufgaben wie in (41) und (42) vorgelegt.

- (41) Alle Städte auf dem Breitengrad von St. Petersburg erleben „Weisse Nächte“
Die Stadt Primorsk liegt auf demselben Breitengrad wie St. Petersburg.

Gibt es „Weisse Nächte“ in Primorsk oder nicht?

- (42) Alle Säugetiere ernähren ihre Kinder mit Milch.
Das Känguru ist ein Säugetier.

Ernährt das Känguru seine Kinder mit Milch oder nicht?

Aufgabentyp (41) sollte in Beziehung zu den Erfahrungen der Patienten stehen („Weisse Nächte“ sind taghelle Nächte, die in der Region jeden Winter vorkommen) und wurde deshalb als „bekannt“ bezeichnet. Als „unbekannt“ wurde der Aufgabentyp (42) betrachtet. Die EKT

blockierte bei den beiden Patientengruppen entweder die linke oder die rechte Hirnhälfte. Außerdem mussten die Patienten „laut denken“ und ihre Entscheidungen begründen. Sie wurden anschließend als „theoretisch“ (rein logisch) oder „empirisch“ (erfahrungsbasiert) beurteilt. Deglin und Kinsbourne berichteten Ergebnisse, wonach die Patienten vor der Behandlung ihre Schlüsse meist „theoretisch“ begründeten, in dem sie versuchten, die logische Struktur zu beschreiben. Nach Blockade der rechten Hirnhälfte verstärkte sich diese Tendenz signifikant. Umgekehrt führte die Blockierung der linken Hirnhälfte zu sehr viel mehr „empirischen“ Begründungen. In der zweiten Studie waren Aufgaben wie in (43) und (44) zu lösen.

(43) Alle Bäume gehen im Wasser unter.

Birken sind Bäume.

Gehen Birken im Wasser unter oder nicht?

(44) Alle Affen klettern auf Bäume.

Das Stachelschwein ist ein Affe.

Klettert das Stachelschwein auf Bäume oder nicht?

In Aufgabentyp (43) war die Hauptprämisse und in (44) die Nebenprämisse offensichtlich inhaltlich falsch. In dieser Studie wiesen vor der Behandlung die meisten Probanden die falschen Prämissen zurück („Bäume gehen doch nicht unter“) und gaben an, nichts aus den Prämissen schließen zu können. Nach Blockierung der linken Hirnhälfte nahmen diese „empirischen“ Zurückweisungen der Prämissen noch zu, während nach der rechtsseitigen Blockade die Anzahl „theoretischer“ Schlussfolgerungen signifikant anstieg.

3.1.3 Beeinträchtigungen beim relationalen Schließen

Überhaupt eine der ersten systematischen Untersuchungen mit hirngeschädigten Patienten wurde von Carramazza (1976) durchgeführt. In der Studie waren Patienten nach einer links temporalen Lobektomie nicht mehr in der Lage, relationale Zwei-Term-Aufgaben wie in (45) zu lösen.

(45) A ist größer als B.

Wer ist der Größte?

Hingegen waren Aufgaben wie in (46) für Patienten mit Läsionen in anterioren Teilen der rechten Hirnhälfte nicht mehr lösbar.

- (46) A ist größer als B.
Wer ist der Kleinste?

Anscheinend spielt eine Rolle, dass in Aufgabentyp (45) die verbalen Relationen in den „Prämissen“ und der „Konklusion“ übereinstimmen (größer – Größte), in Aufgabentyp (46) jedoch nicht (größer – Kleinste). Eine Arbeit von Read (1981), in der Patienten mit linkstemporaler und Patienten mit rechtstemporaler Lobektomie relationale Drei-Term-Aufgaben wie in (47) und (48) lösen mussten, unterstützt diese Sicht.

- (47) Mary ist größer als Georg.
Georg ist größer als Carol.
Wer ist der Größte?

- (48) Mary ist größer als Georg.
Georg ist größer als Carol.
Wer ist der Kleinste?

Zwar zeigten beide Gruppen Beeinträchtigungen, jedoch waren diese bei linkshemisphärischen Patienten bei (47) und bei Läsionen in der rechten Hirnhälfte bei (48) ausgeprägter. Ähnliche Resultate mit fast identischem Material werden von Geminiani und Bucciarelli (1998) berichtet. Sie untersuchten eine Stichprobe von zwanzig Patienten mit rechts-lateralen zerebralen Läsionen und berichten von einer Beeinträchtigung im Vergleich zu einer Kontrollgruppe.

3.1.4 Linkes Hirn, rechtes Hirn und deduktives Denken

Das Interesse an der Zuständigkeit der beiden Hirnhälften geht auf eine in den Neurowissenschaften weitgehend akzeptierte „Arbeitsteilung“ zurück. Sie wird in den vielzitierten Arbeiten des späteren Nobelpreisträgers Roger Sperry deutlich. Er untersuchte *split-brain*-Patienten, bei denen die beiden Hemisphären operativ voneinander getrennt werden, um spezielle Formen der Epilepsie zu behandeln (in einer Hirnhälfte auftretende epileptische Anfälle können sich so nicht auf die andere Hirnhälfte ausbreiten und sind deshalb leichter zu kon-

trollieren). Leider führt die Behandlungsmethode auch zu spezifischen Ausfällen, aus denen jedoch auf die unterschiedlichen Funktionen der beiden Hirnhälften geschlossen werden kann. So konnte Sperry nachweisen, dass diese Patienten ein Wort, wenn es auf der linken Seite ihres Gesichtsfeldes präsentiert wurde, mit Hilfe der rechten Hirnhälfte „lesen“ und auch mit der von der rechten Hemisphäre gesteuerten linken Hand schreiben können. Sie können jedoch nicht angeben, welches Wort sie gelesen oder geschrieben hatten. Dies funktionierte nur, wenn das Wort auch im rechten Gesichtsfeld, also mit der linken Hirnhälfte, zu „sehen“ war. Sperrys Ergebnisse zusammen mit vielen ähnlichen Untersuchungen führten zu einer Unterteilung, in der die linke Hemisphäre mehr für sprachliche Verarbeitungsprozesse sowie abstraktes Denken zuständig ist. Die rechte Hirnhälfte wird hingegen mehr mit anschaulichen, figuralen und räumlichen Verarbeitungsprozessen in Verbindung gebracht (z.B. Sperry, 1973). Einige Denkpsychologen halten diese Unterscheidung für wichtig, weil verschiedene denkpsychologische Theorien (wie später noch dargestellt wird) zu unterschiedlichen Vorhersagen führen. Festzuhalten bleibt zunächst die Uneinheitlichkeit der Befunde. Konditionale und syllogistische Schlüsse scheinen durch Schädigungen der linken Hirnhälfte beeinträchtigt zu werden. Allerdings ist diese Hirnhälfte auch für die sprachliche Verarbeitung und das Verständnis der Prämissen zuständig. Möglicherweise sind die Defizite also allein auf Probleme beim Verstehen der Prämissen zurückzuführen. Hinweise darauf bietet vor allem die Arbeit von Whitaker et. al. (1991). Patienten mit rechtseitiger Schädigung sind nicht in der Lage einen syllogistischen Schluss durchzuführen, ohne auf ihr Wissen zurückzugreifen. Außerdem waren in der Studie von Goel et al. (2004) die Patienten mit linksseitiger Läsion mit dem thematischen Material noch stärker beeinträchtigt als die rechtseitigen Patienten. Studien mit Parkinson-Patienten weisen ebenfalls in diese Richtung. Diese Personen zeigen regelmäßig einen reduzierten Metabolismus in Regionen des linken präfrontalen Kortex auf. Zunächst konnten Cohen, Bouchard und Scherzer (1994) eine damit einher gehende Beeinträchtigung beim deduktiven Denken nachweisen. Jedoch wurde in der Arbeit von Grossmann, Corvall und Gollomp (1991) gezeigt, dass diese Schwierigkeiten an Problemen beim Verständnis der Prämissen liegen.

3.2 In-Vivo Untersuchungen mithilfe funktioneller bildgebender Verfahren

Patientenstudien offenbaren, welche kortikalen Regionen für die Ausführung logischer Denkleistungen *notwendig* sind. Mit funktionellen bildgebenden Verfahren wird untersucht, welche Hirnstrukturen *hinreichend* sind, um diese Leistung hervorzubringen. Zudem kann mit diesen Technologien das intakte Gehirn untersucht werden. Experimentell gesehen bieten

damit die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und besonders die funktionelle Magnet-Resonanz-Tomographie (fMRT) mehr Möglichkeiten der Kontrollier- und Generalisierbarkeit als Patientenstudien. Außerdem lassen diese Technologien präzisere Lokalisierungen und damit genauere Rückschlüsse auf die Art der Informationsverarbeitungsprozesse zu.

Tabelle 14 hier einfügen

3.2.1 Funktionelle Anatomie des konditionalen Schließens

Tabelle 14 fasst die Ergebnisse aller bis zum Jahr 2004 verfügbaren Bildgebungsexperimente (PET und fMRT) zum deduktiven Denken zusammen. Im oberen Drittel sind die Studien zum konditionalen Schließen aufgelistet.²

Als erste maßen Goel, Gold, Kapur und Houle (1997) die Hirnaktivität von Versuchspersonen, während sie Denkaufgaben lösten. Jeweils die Hälfte der deduktiven Aufgaben (es gab auch noch Induktionsaufgaben) waren konditionale oder syllogistische Schlüsse. Zwischen diesen konnte in der Studie nicht unterschieden werden. Außerdem gab es nur wenig (gemessene) Aktivierungen vor allem im linken frontalen Kortex und im Hinterhauptlappen. Später verglichen Parsons und Osherson (2001) konditionale Schlüsse und Wahrscheinlichkeitsaufgaben wie in (49) bzw. (50).

(49) Wenn er Elektriker ist, dann besucht er zweimal wöchentlich die Abendschule.

Er ist Elektriker.

Besucht er zweimal wöchentlich die Abendschule?

(50) Wenn er Herzspezialist ist, dann fährt er jeden Morgen mit dem Fahrrad zur Arbeit oder er geht regelmäßig zum Schwimmen.

Er ist Herzspezialist.

Wie wahrscheinlich ist es, dass er jeden Morgen mit dem Fahrrad zur Arbeit fährt?

Verglichen mit den probabilistischen Aufgaben waren während der konditionalen Schlüsse Areale im rechten medial-temporalen Kortex, im inferior-frontalen Kortex und in den Basalganglien aktiviert. Hinzu kamen noch einige subkortikale Strukturen, was aber vor allem am

² Nicht dargestellt sind zwei Arbeiten zum konditionalen Schließen von Houdé et al. (2000) und Houdé et al. (2001), die sich mit Trainingseffekten beim deduktiven Denken beschäftigen.

Inhalt einiger Aufgaben gelegen haben dürfte. Kaum Aktivierung wurde in der linken Hirnhälfte gemessen.

In einer Studie von Knauff, Mulack, Kassubek, Salih und Greenlee (2002) wurde die neuronale Basis konditionaler Inferenzen mit Logikaufgaben des Typs (51) und (52) untersucht.

(51) Wenn der Lehrer verliebt ist, dann isst er gerne Pizza.

Der Lehrer ist verliebt.

Der Lehrer isst gerne Pizza.

(52) Wenn der Lehrer verliebt ist, dann isst er gerne Pizza.

Der Lehrer isst nicht gerne Pizza.

Der Lehrer ist nicht verliebt.

Die Probanden mussten per Knopfdruck entscheiden, ob die Konklusion logisch aus den Prämissen folgt. Leider konnten wir keinen Unterschied zwischen Aufgaben im MP (51) oder MT (52) feststellen. Jedoch führten beide Aufgabentypen zu bilateral erhöhter Aktivierung im medialen frontalen Gyrus und im Cingulum sowie in Regionen, die zur Verarbeitung von Sprache und dem Verstehen der Sätze in Beziehung stehen. Zudem gab es erhöhte Aktivierung in superioren and inferioren Bereichen des parietalen Kortex sowie im visuellen Assoziationskortex. Diese Aktivierungen sind nicht, wie in anderen Studien, auf die visuelle Präsentation des Materials zurückzuführen, da die Aufgaben über einen Kopfhörer akustisch präsentiert wurden und nicht von visuellem Input begleitet wurden. Gleichwohl kam es zu den beschriebenen Aktivierungen in Hirnstrukturen, die für visuell-räumliche bzw. anschauliche Informationsverarbeitungsprozesse zuständig sind.

3.2.2 Funktionelle Anatomie des syllogistischen Schließens

Die verfügbaren Bildgebungsstudien zum syllogistischen Schließen sind im mittleren Drittel von Tab. 14 dargestellt. Goel, Gold, Kapur und Houle (1998) verwendeten Aufgaben wie

(53) Einige Offiziere sind Generäle.

Keine Zivilisten sind Generäle.

Einige Offiziere sind keine Zivilisten.

und berichteten ausschließlich Aktivierungen in der linken Hirnhälfte. Dort kam es zu erhöhtem Metabolismus im frontalen Kortex, im Cingulum und in Regionen, die am Sprachverstehen beteiligt sind. Keine Aktivierung wurde in parieto-okzipitalen Regionen gemessen. Aus der Abwesenheit von Aktivität in der rechten Hemisphäre und im Hinterhaupt- und Scheitellappen schlossen Goel et al. (1998), dass visuell-räumliche, anschauliche Prozesse beim Lösen deduktiver Inferenzen keine Rolle spielen. Wie in Tabelle 14 zu erkennen ist, stellt die Arbeit von Osherson, Perani, Cappa, Schnur, Grassi und Fazio (1998) diese Interpretation jedoch in Frage. Sie identifizierten mehrere parietale und okzipitale Strukturen in der rechten Hirnhälfte, in dem sie die Sprachverarbeitungs-komponenten und andere Faktoren besser kontrollierten. Auch die späteren Resultate von Goel und Kollegen (Goel, Büchel, Frith & Dolan, 2000; Goel & Dolan, 2003; Goel & Dolan, 2004) weisen in diese Richtung. So wurden in Goel und Dolan (2004) syllogistische Schlüsse wie

(54) Alle Tiere mit 32 Zähnen sind Katzen.

Keine Katzen sind Hunde.

Keine Hunde haben 32 Zähne.

mit einer Kontrollbedingung und induktiven Inferenzen verglichen. Syllogistische Schlüsse führten zu stärkerer Aktivierung in der rechten Hirnhälfte als induktive Schlüsse. In der Kontrollbedingung wurde die Konklusion in (54) durch einen im Rahmen der Aufgabe sinnlosen Satz ersetzt (z.B. „Alle Zebras haben Streifen). Beim Vergleich zur Kontrollbedingung zeigten sich beim syllogistischen Schließen stärkere Aktivierungsanstiege unter anderem im rechten und linken inferior-okzipitalen Kortex, im temporalen Kortex und im inferioren und mittleren frontalen Gyrus.

3.2.3 Funktionelle Anatomie des relationalen Schließens

Relationales Denken wurde bislang nur anhand eindimensionaler Inferenzen erforscht. Die Ergebnisse sind im letzten Drittel von Tabelle 14 zusammengefasst. Knauff et al. (2002) untersuchten relationale Inferenzen mit transitiven und nicht-transitiven Relationen, wie in Beispiel (55) dargestellt.

- (55) Das rote Rechteck liegt links vom grünen Rechteck.
Das grüne Rechteck überlappt das blaue Rechteck.

Das rote Rechteck überlappt das blaue Rechteck.

Die Konklusion musste verifiziert werden. Erhöhte Aktivierung gab es in sprach-bezogenen Arealen, dem frontalen Gyrus und im Cingulum sowie im parietalen Kortex und visuellen Assoziationsarealen. Diese Ergebnisse wurden in mehreren Arbeiten repliziert, in denen relationale Schlüsse verwendet wurden, um die neuronalen Korrelate von Inhaltseffekten sowie von visuellen und räumlichen Denkprozessen zu untersuchen. Außerdem würde relationale Schlüsse bei der Unterscheidung zwischen den neuronalen Mechanismen des Denkens und des Arbeitsgedächtnisses untersucht.

3.2.4 Neuronale Korrelate von Inhaltseffekten

Inhaltseffekte wurden — dies hat sich bereits in Abschnitt 2.4 gezeigt — in allen Bereichen des deduktiven Denkens nachgewiesen. Der thematische Inhalt hat demnach einen erheblichen Einfluss auf die Schwierigkeit eines deduktiven Schlusses und kann auch die Art der gewählten Konklusion beeinflussen. Spiegeln sich diese Inhaltseffekte auch in der Beteiligung verschiedener neuronaler Strukturen wider? Bildgebungsstudien zu Inhaltseffekten beim konditionalen Schließen gibt es bisher nicht. Jedoch weist die schon genannte Patientenstudie von Goel, Shuren, Sheseesly und Grafman (2004) auf die Rolle von Strukturen im linken präfrontalen Kortex hin, wenn konditionale Schlüsse mit thematischem Inhalt gelöst werden müssen. Rechts-präfrontale Regionen scheinen mehr an konditionalen Schlüssen ohne thematischen Inhalt beteiligt zu sein.

In einer Studie von Goel und Dolan (2003) wurden Inhaltseffekte beim syllogistischen Schließen untersucht. Die Probanden mussten drei Typen von Inferenzen überprüfen.

- (59) Einige Monoschiden sind Rumbels.
Alle Rumbels sind Pflanzenfresser.

Einige Monischiden sind Pflanzenfresser.

- (60) Keine Zigaretten sind billig.
Einige Suchtmittel sind billig.

Einige Suchtmittel sind keine Zigaretten.

- (61) Keine Suchtmittel sind billig.
Einige Zigaretten sind billig.

Einige Zigaretten sind keine Suchtmittel.

Aufgaben des Typs (59) wurden als wissens-neutral, Aufgaben des Typs (60) als glaubhaft und Aufgaben der Art (61) als unglaubhaft kategorisiert. Goel und Dolan (2003) fanden erhöhte Aktivierung im linken temporalen Kortex für die wissens-bezogenen (glaubhaften und unglaubhaften) Inferenzen und in einem bilateral-parietalen Netzwerk während der wissens-neutralen Aufgaben. Aktivierung im rechten lateralen präfrontalen Kortex war messbar, wenn die Probanden eine unglaubhafte, aber logisch gültige Inferenz verifizierten.

Auch zu Inhalteffekten beim relationalen Schließen führten Goel und Kollegen Experiment durch. Goel und Dolan (2001) ließen ihre Probanden Drei-Term-Aufgaben mit abstraktem und konkretem Inhalt lösen und variierten zudem die *Räumlichkeit* der Logikaufgaben. Daraus ergab sich ein zweifaktorielles Versuchsdesign. Jeweils ein Beispiel für die Aufgabentypen „konkret-räumlich“, „abstrakt-räumlich“, „konkret-unräumlich“ und „abstrakt-unräumlich“ sind in (62), (63), (64) bzw. (65) dargestellt.

- (62) Karen ist vor Laren.
Laren ist vor Jane.

Karen ist vor Jane.

- (63) K. ist vor L.
L. ist vor J.

K. ist vor J.

- (64) K ist jünger als L.
L ist jünger als J.

K ist jünger als J.

- (65) K ist jünger als L.
L ist jünger als J.

K ist jünger als J.

Die Probanden mussten die logische Gültigkeit der Konklusion prüfe und die Reaktionszeiten und Fehlerraten zeigten den erwarteten Erleichterungseffekt für den thematischen Inhalt. Die hämodynamischen Reaktionen wurden wie in Goel und Dolan (2004) mit „sinnlosen Konklusionen“ und untereinander verglichen. Wie in Tabelle 14 zu erkennen ist, führten alle relationalen Schlüsse wieder zu erhöhter Aktivierung in einem bilateralen parieto-okzipitalen und frontalen Netzwerk, wobei jedoch die Aktivierung im parietalen Kortex bei den abstrakten Aufgaben sogar noch höher ausfiel. Zum Thema „Inhaltseffekte“ schlagen Goel und Kollegen ein *Zwei-Prozess-Modell* des Denkens vor. Demnach basieren deduktive Schlüsse mit abstraktem, wissens-neutralem Material auf Prozessen in einem bilateralen, fronto-parietalen Netzwerk, während konkrete, wissens-bezogene Inferenzen auf Informationsverarbeitungsprozessen in der linken Hirnhälfte, insbesondere in frontalen und temporalen Strukturen basieren (Goel, Schuren, Sheesley & Grafman, 2004).

3.2.5 Deduktives Denken – visuell oder räumlich oder beides?

Auch die Anschaulichkeit des thematischen Inhalts spiegelt sich in verschiedenen neuronaler Systemen wider. Allerdings stehen dabei nicht Lateralisierungen wie bei abstrakten und konkreten Aufgabeninhalten im Vordergrund, sondern die Beteiligung parietaler und okzipitaler Hirnstrukturen. In einer Vielzahl von Studien wurde nämlich nachgewiesen, dass visuelle und räumliche Verarbeitungsprozesse auf neuroanatomisch distinkten Hirnstrukturen beruhen. Erinnern visueller Reize (Figuren, Objekte, Gesichter, Buchstaben usw.) führte in fast allen Studien zu Aktivierung im ventralen Temporalkortex (insbesondere in BA 21, 22, 37 und MT) und meistens auch zu vermehrter Aktivierung in okzipitalen Regionen, die funktionell zum sekundären visuellen Kortex korrespondieren (BA 18, 19). Gemeinsam werden diese Regionen als ventrales Projektionssystem (*ventral pathway*) oder oft auch als „What“-System bezeichnet (Ungerleider, 1996; Ungerleider & Mishkin, 1982). Fraglich ist hingegen, ob auch der retinotop organisierte primäre visuelle Kortex (ungefähr BA 17) am Erinnern visueller Information beteiligt ist, wie beispielsweise von Kosslyn (1994) behauptet wird. Einige Arbeiten scheinen Hinweise in diese Richtung zu bieten (Kosslyn et al. 1993; Kosslyn, Thompson & Alpert, 1997; Kosslyn et al., 1999; Sabbah et al. 1995), während die überwiegende Zahl von Studien keine erhöhte Aktivierung im primären visuellen Kortex bei visuellen Arbeitsgedächtnisprozessen finden konnte (D'Esposito et al., 1997; Knauff, Kassubek, Mulack & Greenlee, 2000; Mellet, Tzourio, Denis & Mazoyer, 1995; Mellet et al., 1996; Roland & Gulyas, 1995; eine gute Übersicht ist in Kosslyn & Thomson, 2003, zu finden). Räumliche

Verarbeitungsprozesse wurden durchgängig in Regionen des Scheitellappens lokalisiert. Zusammen werden diese Regionen als parieto-okzipitales System, dorsales Projektionssystem (*dorsal pathway*) oder „Where“-System bezeichnet (Ungerleider, 1996; Ungerleider & Mishkin, 1982). Entscheidend ist, dass einige dieser Regionen, insbesondere im posterioren Teil des parietalen Kortex sowie in ventralen intraparietalen Arealen, an der modalitätsunspezifischen Integration räumlicher Information aus verschiedenen perzeptiven Systemen beteiligt sind (z.B. Anderson, 1997).

In Tabelle 14 wird deutlich, welche Rolle visuelle und räumliche Verarbeitungsprozesse beim logischen Denken spielen. Auffallend ist vor allem die nahezu durchgängige Aktivierung rechts-hemisphärischer parietaler Regionen bei allen Aufgabentypen. Die Aktivierung dieser Regionen spricht für die Beteiligung räumlicher Prozesse und diese scheinen unabhängig von der Art der Logikaufgabe oder der Räumlichkeit des Inhaltes selbst zu sein. Visuelle Hirnareale sind gleichfalls häufig aktiviert, das Befundmuster ist jedoch eher uneinheitlich. Um die Rolle dieser visuellen Hirnareale gezielt zu untersuchen wurde eine Studie von Knauff, Fangmeier, Ruff und Johnson-Laird (2003) durchgeführt. In dem Experiment benutzten wir die in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen „räumlichen“, nicht-räumlichen“, „visuellen“ und visuell-räumlichen“ Relationen und konnten so die visuellen und räumlichen Aspekte des Aufgabeninhalts systematisch zu variieren. Die Probanden mussten akustisch präsentierte Inferenzen mit diesen Relationen verifizieren. Aktivierung fanden wir wieder in Bereichen des Gehirns, die für die Verarbeitung visueller und räumlicher Information zuständig sind. Die Orte der Aktivierung — in Abbildung 8 durch die helleren Regionen dargestellt — waren jedoch sehr unterschiedlich. So führten alle Aufgaben zu erhöhter Aktivierung in Regionen des Scheitellappens und die Beteiligung dieser Hirnregionen war unabhängig von der Vorstellbarkeit des Aufgabeninhalts (in Abbildung 8 links). War der Inhalt der Aufgabe jedoch überdies noch leicht visuell vorzustellen (wie z.B. „In der Hund ist schmutziger als die Katze“), führte dies zusätzlich zu erhöhter Aktivierung in frühen Arealen des visuellen Kortex (Knauff, Fangmeier, Ruff & Johnson-Laird, 2003; in Abbildung 8 rechts).

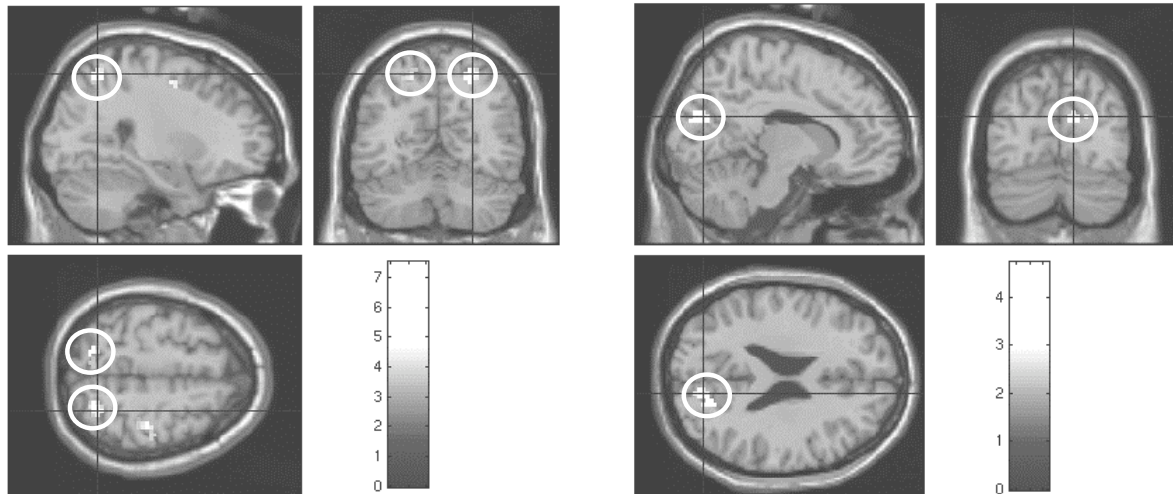


Abbildung 8: Am deduktiven Denken mit verbalen Relationen können unterschiedliche Regionen des Gehirns beteiligt sein. Die Abbildungen zeigen die Ergebnisse einer fMRT-Untersuchung. Das Gehirn ist aus drei verschiedenen Perspektiven dargestellt: von der Seite, als wäre es etwa zwischen den Augen vertikal durchtrennt, transversal, als ob es vertikal parallel zu der Achse zwischen den Ohren durchtrennt wäre und horizontal durchtrennt, etwa parallel zu den Augenbrauen. Die hellen Flecken in den drei Abbildungen links zeigen, dass beim relationalen Schließen Hirnregionen aktiv sind, die für die Konstruktion und Inspektion räumlicher Repräsentationen zuständig sind. Die drei rechten Abbildungen zeigen, dass es jedoch zu zusätzlicher Aktivierung in visuellen kortikalen Regionen kommt, wenn die verbale Relation leicht visuell vorgestellt werden kann.

3.2.5 Inferenzprozesse, Prämissenrepräsentation und Arbeitsgedächtnis

Alle bisher berichteten Arbeiten unterschieden nicht zwischen den neuronalen Korrelaten der Inferenzprozesse selbst und den neuronalen Prozessen, die mit der reinen Speicherung der Prämisseninformation im Arbeitsgedächtnis zusammen hängen. In Tabelle 14 sind jedoch zwei Arbeiten dargestellt, in denen dieser Frage nachgegangen wurde. Sie helfen auch die Unterscheidung zwischen visuellen und räumlichen Verarbeitungsmechanismen beim logischen Denken weiter zu präzisieren. In Ruff, Knauff, Fangmeier und Spreer (2003) mussten die Versuchspersonen nicht nur relationale Schlussfolgerungsaufgaben lösen, sondern außerdem die Prämissen der identischen Aufgaben im Arbeitsgedächtnis aktiv halten ohne Schlussfolgerungen durchzuführen. So ist ein Vergleich zwischen Denkprozessen und Gedächtnisprozessen möglich. Wie in den anderen Studien führt das Schlussfolgern zu Aktivität im visuellen Assoziationskortex und im parietalen Kortex sowie im dorsolateralen und präfrontalen Kortex. Der direkte Vergleich der Aktivität während der beiden Aufgaben zeigte jedoch zudem, dass Schlussfolgern zu mehr Aktivität im dorsolateralen und medialen Präfrontalkortex führte, während die Aufgabenaufrechterhaltung mit mehr Aktivität in bilateralen okzipitalen

Arealen verbunden war. Offensichtlich beinhalten die Schlussfolgerungen vor allem exekutive Prozesse, während die Aktivierung des visuellen Kortex vor allem auf die Aufrechterhaltung der Prämissen zurück geht. Eine Arbeit von Fangmeier, Knauff, Ruff, & Sloutsky (2005) konnte diesen Befund untermauern. Neben der Unterscheidung der Inferenzprozesse von reinen Gedächtnisprozessen konnte hier auch der genaue zeitliche Verlauf der Aktivierung im Gehirn untersucht werden. In Abbildung 9 sind drei Phasen unterschieden: Das Verstehen der Prämissen (a), die Enkodierung und Weiterverarbeitung der Prämissen (b) und die Überprüfung der zu verifizierenden Konklusion (c). Wie in der Abbildung zu sehen ist, führte nur die anfängliche Verarbeitung und Repräsentation der Prämissen zu erhöhter Aktivierung im mittleren und inferioren bilateralen Okzipitalkortex und Teilen des linken temporalen Gyrus. Während des weiteren Inferenzprozesses verschwindet diese Aktivierung jedoch und wird ersetzt durch bilaterale neuronale Aktivität im linken anterioren frontalen Kortex, im Parietalkortex und im mittleren frontalen Gyrus. Während der reinen Aufrechterhaltung wurden zu keinem Zeitpunkt die letztgenannten Aktivierungen gemessen, sondern hauptsächlich die Aktivität im okzipitalen Kortex (Man vergleiche a mit d, b mit e und c mit f).

Mit diesen Befunden wird auch die Verbindung zwischen visuellen Vorstellungen und deduktiven Inferenzen deutlich. Visuelle Vorstellungen scheinen während der Verarbeitung und Aufrechterhaltung der Prämissen eine Rolle zu spielen, weil Probanden versuchen sich den in den Prämissen beschriebenen Sachverhalt visuell vorzustellen. Dies gilt besonders, wenn der Prämisseninhalte leicht visuell vorzustellen ist (siehe Tabelle 14 und Knauff, et al., 2003). Geht es jedoch in die entscheidende Phase der Inferenz selbst, spielen nur noch abstrakt räumliche, nicht-visuelle Prozesse und vor allem exekutive Funktionen im frontalen und prefrontalen Kortex eine Rolle. Auch wenn diese Ergebnisse bisher nur für den Bereich des relationalen Schließens vorliegen, spricht vieles dafür, dass ähnliche neuronale Mechanismen auch in anderen Bereichen des deduktiven Schließens eine Rolle spielen (Knauff, 2005).

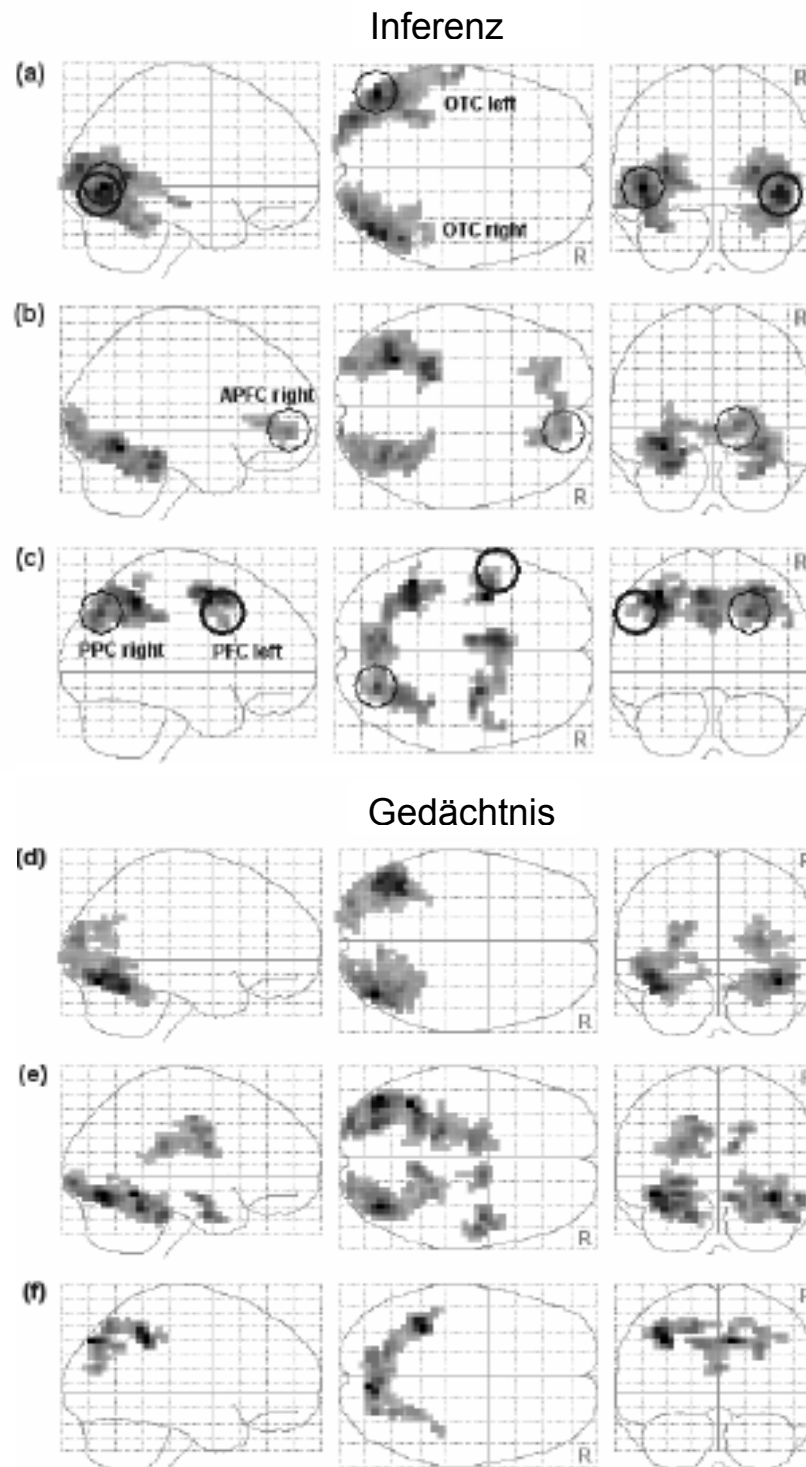


Abbildung 9: Am deduktiven Denken und an der Aufrechterhaltung der Prämisseninformation im Gedächtnis sind unterschiedliche Hirnareale beteiligt. Die Abbildungen zeigen die Ergebnisse einer fMRT-Untersuchung von Fannngmeier, Knauff, Ruff und Sloutsky (2005). Die dunklen Flecken in den Abbildungen links (a bis c) stellen die Aktivierung während des relationalen Schließens dar. In den Abbildungen rechts (d bis f) ist die Aktivität während der Aufrechterhaltung der Prämisseninformation im Gedächtnis dargestellt. Die Abbildungen unterscheiden außerdem drei Phasen: Das Verstehen der Prämissen (a und d), die Enkodierung und Weiter-

verarbeitung der Prämissen (b und e) und die Überprüfung der Konklusion bzw. eine wiederkehrende Prämisse (c bzw. f). (Erläuterungen im Text).

4. Theorien deduktiven Schließens

In der Regel begnügt sich die Wissenschaft nicht allein mit der Ansammlung experimenteller Befunde, sondern versucht vielmehr die Beziehungen zwischen den Einzelergebnissen in irgendeiner Art theoretisch zu erfassen und eine *Erklärung* für die empirischen Ergebnisse zu finden. Was macht uns also (manchmal) zu guten „Logikern“? Und warum machen wir auch Fehler? Der nachfolgende Abschnitt berichtet die Beiträge verschiedener denkpsychologischer Theorien zum Gesamtverständnis des logischen Denkens und ordnet die berichteten kognitions- und neurowissenschaftlichen Ergebnisse in diese Konzeptionen ein. Orientiert ist die Darstellung an der (bereits eingeführten) logischen Unterscheidung zwischen der Ableitbarkeit eines Satzes und der Gültigkeit eines Arguments. Häufig wird diese mit dem Unterschied zwischen *syntaktischen* und *semantischen* Theorien des logischen Denkens gleichgesetzt. In syntaktischen Theorien ist eine Konklusion deduktiv valide, wenn sie anhand der gültigen Regeln aus Prämissen ableitbar ist. In semantischen Theorien ist eine Konklusion gültig, wenn die Konklusion in allen möglichen Modellen gilt, in denen auch die Prämissen gelten. Neben syntaktischen und semantischen Theorien wurden in der Psychologie auch *pragmatische* Theorien und die so genannten *Fehlertheorien* des logischen Denkens entwickelt. Logisch gültig ist in den pragmatischen Theorien eine Konklusion, wenn sie in allen Situationen nützlich ist, die das entsprechende Inferenzschema aktivieren. Fehlertheorien konzentrieren sich ganz auf die Frage, warum Personen beim logischen Denken von den Wahrheitswerten der formalen Logik abweichen.

4.1 Mentale Logik und mentale Beweise: Deduktion als formaler, syntaktischer Prozess

Jean Piaget, einer der einflussreichsten Entwicklungspsychologen, gab Kindern unter zehn oder elf Jahren nur wenig Chancen logisch zu denken. Zunächst müssen Heranwachsende die *Stufe der formalen Operationen* (etwa ab dem 11. Lebensjahr) erreichen, um logisch Denken zu können, d.h. mit dem Denken nicht mehr an konkrete Dinge gebunden oder auf gegebene Informationen beschränkt zu sein, sondern die Wahrheit von Aussagen allein aufgrund ihrer formalen Eigenschaften zu entscheiden. Vor Erreichen dieser Entwicklungsphase verfügen sie nicht über die „*logischen Regeln*“, die dazu erforderlich sind. „Logische Regeln“ sind bis heute das zentrale Konzept im Rahmen einer der einflussreichsten Theorien des deduktiven Denkens. Ausgangspunkt der „*Theorie mentaler Beweise*“ oder „*Mentalen Logik*“ ist die

gedächtnispsychologische Tatsache, dass im deklarativen Gedächtnis Informationen (auch) in Form von Propositionen, den kleinsten bedeutungstragenden Einheiten, denen ein Wahrheitswert *Wahr* oder *Falsch* zugewiesen werden kann, gespeichert werden. Propositionen sind zwar mit linguistischen Einheiten nicht gleichzusetzen, diesen jedoch sehr ähnlich (z.B. Anderson, 1983). Viele Forscher bringen die Theorie „mentaler Beweise“ oder „mentalen Logik“ deshalb mit den berichteten neuronalen Aktivierungen in der linken Hirnhälfte oder im temporalen Kortex in Verbindung (Goel, et al. 1997; 1998; Houdé & Tzourio-Mayozer, 2003; Wharton & Grafman, 1998). Allgemein teilt die Theorien einer mentalen Logik (TML) mit vielen anderen Theoretikern der Kognitionswissenschaften (Fodor, 1975; McNamara, 1986; Pylyshyn, 2002) eine epistemologische Grundauffassung, nach der ein propositionen-basiertes deklaratives Gedächtnis auch ein propositionales Repräsentationsformat von Informationen beim Denken voraussetzt (O’Brien, 2004). Alle Varianten der TML sind stark von der beweistheoretischen Methode der formalen Logik geprägt (die deshalb zu Beginn dieser Arbeit eingeführt wurde) und werden deshalb auch als *syntaktische Theorien* bezeichnet. Die *Kompetenz* deduktive Schlüsse durchzuführen beruht demzufolge auf neuronalen Mechanismen, die propositionale Repräsentationen der Prämissen weiterverarbeiten. Funktional können diese Mechanismen als mentaler Beweise beschreiben werden, bei denen die Konklusionen mithilfe *logischer Regeln* oder *Inferenzschemata* aus den Prämissen abgeleitet werden (Braine & O’Brien, 1998; Rips, 1994; Geurts, 2003). Es gibt verschiedene Varianten der TML, wovon jedoch die Ansätze von Martin Braine (Braine, 1978; Braine & Romain, 1983; Braine, Reiser & Romain, 1984, Braine & O’Brien, 1998) und von Lance Rips (1983, 1989, 1990, 1994) am bekanntesten sind. Braine schlug bereits 1978 einen Satz natürlicher *Inferenzschemata* vor, der sich bis heute nur unwesentlich verändert hat. Eine Auswahl der postulierten Inferenzschemata nach O’Brien (2004) sind in Tabelle 15 in etwas veränderter Notation und mit jeweils einem Beispiel dargestellt.

Nach Braine werden logische Schlüsse durchgeführt, in dem die in der Tabelle dargestellten Inferenzschemata ausgeführt werden. Die Schemata selbst sind im Langzeitgedächtnis verfügbar und entweder stark überlernt oder angeboren. Während der Verarbeitung der Prämissen wird im Arbeitsgedächtnis eine propositionale Repräsentation der Aufgabeninformation aufgebaut, auf die dann die Inferenzschemata angewendet werden, um zu weiteren logisch validen propositionalen Aussagen (Konklusionen) zu kommen. Zudem nimmt Braine einige weitere Mechanismen (Hilfsschemata) an. Diese sind für das Verstehen der Prämissen und die Übersetzung in eine mentale Repräsentation zuständig. Ist diese im Arbeitsgedächtnis repräsentiert, ist außerdem ein Kontrollmechanismus notwendig, der den Inferenzprozess steuert,

die geeigneten Inferenzschemata auswählt und diese zu komplexeren Ketten zusammensetzt. Ist dieser Prozess abgeschlossen muss das Resultat (die Konklusion) rückübersetzt und das Antwortverhalten gesteuert werden.

Tabelle 15. Eine Auswahl von Regeln, die in der Theorie „natürlicher Deduktionssysteme“ nach Braine angenommen werden. Insgesamt sind 16 bzw. 13 (je nach Version der Theorie) solcher Regeln Grundlage der Theorie. Die vorliegende Auswahl ist (mit veränderter Notation) orientiert an der Darstellung bei O'Brien (2004).

Schema	Beispiel
$\neg \neg p$ _ p	Es ist falsch, dass kein Sprung in der Schüssel ist. _ Es ist ein Sprung in der Schüssel
IF p_1 OR p_2 OR p_3 OR ... THEN q; p_1 _ p	Wenn dort ein Pferd oder ein Esel oder eine Ziege oder ist, dann ist es ein Bauernhof. Es gibt eine Ziege. _ Es ist ein Bauernhof.
IF p_1 OR p_2 OR p_3 OR ... THEN q; $\neg p_1$ _ p_2 OR p_3 OR	Es gibt ein Pferd oder einen Esel. Es gibt kein Pferd _ Es gibt einen Esel.
IF p THEN q; p _ q	Wen es regnet, ist die Straße nass. Es regnet. _ Die Strasse ist nass.
$p_1; p_2; p_3; \dots p_n$ _ p_1 AND p_2 ; AND p_3 ; AND ... p_n	Es gibt ein Pferd. Es gibt einen Esel. Es gibt eine Ziege. _ Es gibt ein Pferd und einen Esel und eine Ziege.
p ; $\neg p$ _ INCOMPATIBLE	Es gibt einen Esel; Es gibt keinen Esel. _ inkompatibel

Given a chain of reasoning of the form

Suppose p

_ q

One can conclude If P THEN q

Die ersten drei Regeln in Tabelle 15 sind unmittelbar klar und die vierte ist der MP. Die beiden letzten Regeln kommen so nicht in formalen logischen Systemen vor. Diese Abwei-

chung von der formalen Logik ist jedoch ein Kennzeichen der Theorie nach Braine, da er das Ziel verfolgt, eine „natürliche Logik“ zu entwickeln, in der die Konnektive und Inferenzschemata sowohl von der Bedeutung der natürlichsprachlichen Konnektive als auch von der formalen Logik abweichen dürfen. Erforderlich ist diese Abweichung laut Braine, da die mentalen Inferenzschemata weniger Information enthalten können als die logischen und in ihrem alltagssprachlichen Gebrauch immer auch extralogische Information enthalten sind. Diese Abweichung zwischen formaler und mentaler Logik ist auch ein entscheidender Grund für das Auftreten von Fehlern, denn die Wahrheitswerte der mentalen Logik können von den Wahrheitswerten der formalen Logik abweichen. Zusätzlich können Fehler durch fehlerhafte Anwendung oder Unverfügbarkeit von Regeln hervorgerufen werden. Braine unterscheidet drei Sorten von Fehlern: *Verständnisfehler* entstehen, weil die Prämissen falsch verstanden werden. *Strategiefehler* treten auf, wenn eine direkte Lösung mit den vorhandenen Schluss-schemata nicht möglich ist und deshalb „Heuristiken“ angewendet werden, um dennoch zu einer sinnvollen Lösung zu kommen. Und schließlich gibt es *Prozessfehler*, bei denen die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses überlastet wird und so Inferenzen falsch oder unvollständig ausgeführt werden.

Prozessfehler spielen auch in der Theorie von Rips eine große Rolle. Genau genommen sind sie hier von noch größerer Bedeutung, da sich Rips mit seinem System von Regeln viel strenger als Braine an den Gesetzen der formalen Logik orientiert hat. Abweichung zwischen natürlichen und formalen Wahrheitswerten kommen deshalb als Fehlererklärung nicht in Betracht. Wie stark die Theorie von Rips durch die formale Logik und Systeme der Künstlichen Intelligenz (KI) geprägt ist, zeigt sich auch darin, dass sie vollständig in einem Computerprogramm implementiert ist. Das System PSYCOP (PSYChology Of Proof) ist damit die am weitesten ausspezifizierte *syntaktische* Theorie des Denkens (Rips, 1994). Die Theorie ist eine Weiterentwicklung von ANDS (A Natural Deduction System; Rips, 1983) und berücksichtigt auch einige Erkenntnisse, die im Rahmen der „natürlichen Deduktionssysteme“ nach Braine gewonnen wurden. Um menschliches logisches Denken zu rekonstruieren nimmt Rips eine Vielzahl von Regeln an. Größtenteils entsprechen diese Regeln genau denen der Aussagenlogik. Jedoch gibt es auch Regeln, die in rein logischen Systemen nicht vorkommen und umgekehrt gibt es einige Regeln nicht, die in der Aussagenlogik verwendet werden. So ist z.B. keine Regel für den MT vorgesehen (was solche Schlüsse schwierig macht). In der Architektur von PSYCOP können Regeln entweder *vorwärts* oder *rückwärts* angewendet werden. *Vorwärtsregeln* kommen bei der Generierung von Konklusionen zum Einsatz, während *Rückwärtsregeln* für die Verifikation von Konklusionen zuständig sind. Einige wichtige Regeln

aus PSYCOP sind in Tabelle 16 zusammengestellt. Sie ermöglichen Inferenzen in den vier Modi des syllogistischen Schließens. Wichtig ist, dass keine Quantoren vorkommen, sondern allein mit dem Inventar der Aussagenlogik ausgekommen wird.

Tabelle 16. Einige wichtige Regeln aus PSYCOP. Sie ermöglichen die Inferenzen in den vier Modi des syllogistischen Schließens. In der ersten Zeile ist der Modus dargestellt, in der zweiten Zeile die Inferenzregel und in der dritten Zeile die Implikation dieser Regel in PSYCOP (verändert nach Rips, 1997, Kapitel 7).

	Regel	Beschreibung
A	All A are B	
	If A (x) THEN B (x)	Wenn X ein A ist, dann ist X ein B.
	A (a) AND B (a)	Es gibt Dinge, die A und B sind.
I	Some A are B	
	A (b) AND B (b)	Es gibt Dinge, die A und B sind.
	A (a) AND NOT B (a)	Es gibt Dinge a, die A und nicht B sind.
E	No A are B	
	NOT (A (x) AND B (x))	Es gibt keine Dinge, die A und B sind.
	A (a) AND NOT B (a)	Es gibt Dinge a, die A und nicht B sind.
O	Some A are not B	
	A (b) AND NOT B (b)	Es gibt Dinge b, die A und nicht B sind.
	A (a) AND B (a)	Es gibt Dinge a, die A und B sind.

Inferenzen werden in PSYCOP durchgeführt, in dem eine Verbindung zwischen den Prämissen und der Konklusion der Denkaufgabe hergestellt wird. Angeboten werden diese Verbindungen durch einfache Inferenzregeln wie z.B. den MP. Wie dann ein deduktiver Schluss gemäß PSYCOP verlaufen könnte, lässt sich gut anhand der Darstellung des syllogistischen Schließens bei Rips (1994, Kap. 3) nachvollziehen. Demnach wird die Aufgabe (66)

- (66) Alle Erzbischöfe sind Gläubige.
 Alle Gläubigen sind Kirchgänger.

 Alle Erzbischöfe sind Kirchgänger.

gelöst, in dem die folgende Regel für die *Transitivität* angewendet wird.

WENN A (x) DANN B (y)

WENN B (x) DANN C (y)

WENN A (z) DANN C (z)

Eine andere Regel wird als „Exklusivitätsregel“ bezeichnet. Sie lautet:

WENN A (x) DANN B (x)

NICHT (B (y) UND C (y))

NICHT (A (z) UND C (z))

Mit dieser Regel ist z.B. die Gültigkeit des folgenden Schlusses (67) direkt zu beweisen:

- (67) Alle Erzbischöfe sind Gläubige.
Keine Gläubigen sind Kannibalen.

Kein Erzbischof ist ein Kannibale.

Wie entstehen nun Fehler beim logischen Denken? Allgemein wird eine Inferenz als fehleranfälliger betrachtet, je mehr Regeln angewendet werden müssen, um von den Prämissen zur Konklusion zu gelangen. Man betrachte z.B. die Aufgabe (68):

- (68) Alle Kirchgänger sind Gläubige.
Einige Agnostiker sind keine Gläubigen.

Einige Agnostiker sind keine Kirchgänger.

Im Vergleich zu (66) und (67) ist die Gültigkeit von (68) schwieriger zu beweisen, weil dazu vier verschiedene Inferenzregeln im Arbeitsgedächtnis aktiv gehalten werden müssen. Es ist hier nicht erforderlich, diese vier Regeln – Vorwärts-UND-Eliminierung, Rückwärts-UND-Einfügung, Rückwärts-NICHT-Einführung und Rückwärts-WENN-Eliminierung – nachzuvollziehen. Wichtiger ist zu begreifen, dass in PSYCOP das Setzen von *Zwischenzielen* von

entscheidender Bedeutung ist und damit die Theorie sehr in die Nähe von „Problemlösen“ rückt. Im Prinzip beruht die Lösung der deduktiven Aufgabe auf dem Problemraum-Modell, wie es bereits von Newell und Simon (1972) eingeführt wurde. Trotz dieser Nähe zur KI gibt es auch zahlreiche Unterschiede zu rein formalen Deduktionssystemen. So ist z.B. die Vielzahl von Regeln in PSYCOP redundant, was für ein formales System nicht gestattet ist. Außerdem werden in PSYCOP Regeln in Zukunft häufiger eingesetzt, wenn sie bei früheren Lösungsprozessen mit Erfolg verwendet wurden. Eine solche „Gewichtung“ von Regeln gibt es in rein logischen Systemen ebenfalls nicht. Rips lässt die Redundanz und Gewichtungen jedoch zu, um menschliches Denken zu rekonstruieren.

4.2 Mentale Modelle: Deduktion als semantischer Prozess der Prämissenintegration

Heftig kritisiert werden die auf mentalen Regeln basierenden Theorien des logischen Denkens vor allem von Vertretern der *Theorie mentaler Modelle* (TMM; Johnson-Laird, 1983; Johnson-Laird, 2002; Johnson-Laird & Byrne, 1991). Für sie existieren keine mentalen Regeln im Sinne der TML. Logische Schlüsse werden vielmehr durchgeführt, in dem die in den Prämissen gegebenen Informationen „mental modelliert“ und die resultierende Repräsentation inspiziert wird, um neue Information zu extrahieren. Ausgangspunkt der Theorie ist das *modelltheoretische Verfahren* der Logik: Eine Konklusion ist nur wahr, wenn sie unter allen möglichen Interpretationen der Prämissen wahr ist. Damit steht die *Semantik* der Prämissen im Mittelpunkt der TMM. Schlussfolgerungen werden als kognitive Prozesse beschrieben, bei denen Modelle der in den Prämissen beschriebenen Sachverhalte konstruiert und anschließend nach neuen Informationen inspiziert werden. Die mentalen Modelle sind „Modelle“ im strengen logischen Sinne, also Strukturen, in denen die Prämissen wahr sind. Psychologisch gesehen sind sie jedoch vor allem Repräsentationen von wahrgenommenen oder vorgestellten Sachverhalten. Aus diesem Grund werden mentale Modelle in aller Regel mit den berichteten neuronalen Aktivierungen in der rechten Hirnhälfte oder im okzipito-parietalen Kortex in Verbindung gebracht (Goel, et al. 1997; 1998; Houdé & Tzourio-Mayozer, 2003; Knauf, et al. 2002; Knauff, et al. 2003; Wharton & Grafman, 1998).

Auch in der TMM werden die kognitiven Mechanismen funktional und nicht neuronal beschreiben. Ein Schlussfolgerungsprozess verläuft demnach in drei Schritten: In der ersten Phase wird im Arbeitsgedächtnis ein mentales Modell der Prämisseninformation konstruiert. In der zweiten Phase wird dieses konstruierte Modell untersucht, um Beziehungen zu entdecken, die in den Prämissen nicht explizit erwähnt wurden. So wird eine vorläufige Konklusion

generiert. In der dritten Phase werden alternative Modelle konstruiert und daraufhin untersucht, ob eines dieser Modelle der vorläufig für gültig gehaltenen Konklusion widerspricht. Ist dies nicht der Fall, wird diese Konklusion als gültig akzeptiert – die Denkaufgabe ist gelöst (Johnson-Laird, 1983; Johnson-Laird & Byrne, 1991). Johnson-Laird und Byrne (1991) bezeichnen die drei Phasen als *comprehention*-, *desription*, und *validation phase*. Treffender werden sie jedoch durch die Begriffe *Modellkonstruktion*, *Modellinspektion* und *Modellvariation* charakterisiert (Knauff, Rauh, Schlieder & Strube, 1998a). So strittig der exakte Verlauf der einzelnen Phasen ist, so nahe liegend ist die Erklärung für das Auftreten von Fehlern. Die Schwierigkeit eines Schlusses hängt ab von der Anzahl der zu berücksichtigenden Modelle. Je mehr Modelle im Arbeitsgedächtnis konstruiert und inspiziert werden müssen, desto schwieriger ist die Aufgabe. Auch diese Grundidee lässt sich anhand des obigen Beispiels (11) verdeutlichen. Die erste Prämisse („Alle Erzbischöfe sind Gläubige“) wird in der Schreibweise von Johnson-Laird auf folgende Weise repräsentiert:

[Erzbischof]	Gläubiger
[Erzbischof]	Gläubiger
...	

Jede Zeile steht für eine Person des Diskursbereichs. D.h. sie lesen ungefähr „Der erste Erzbischof ist ein Gläubiger; der zweite Erzbischof ist ein Gläubiger, der ... usw.“ Die Punkte zeigen an, dass jeder weitere Erzbischof auch ein Gläubiger sein muss. Die Klammern stehen für eine erschöpfende Repräsentation, d.h. ein Objekt dieser Menge kann nirgends sonst im Modell auftauchen. Wann immer links ein Erzbischof auftaucht, muss auch rechts ein Gläubiger stehen. Die Gläubigen sind nicht in Klammern gesetzt, weil sie auch an anderen Positionen auftauchen dürfen, ohne dass dies der Bedeutung der Prämisse widerspricht. Die Kurzschreibweise der ersten Prämisse lautet:

[E]	G
[E]	G

Das Modell der zweiten Prämisse („Alle Gläubigen sind Kirchgänger“) ist dann:

[G]	K
[G]	K

Nun werden die beiden Modelle der Prämissen in ein gemeinsames mentales Modell integriert:

[[E] G] K
[[E] G] K

Aus diesem Modell ist die gültige Konklusion „Alle Erzbischöfe sind Kirchgänger“ direkt abzulesen und es ist kein Modell vorstellbar, welches dieser Konklusion widerspricht. Betrachten sie nun jedoch nochmals Beispiel (68). Ganz offensichtlich ist das folgende Modell möglich (mit A für Agnostiker, K für Kirchgänger und G für Gläubige):

[K [G]]
[K [G]]
A
A

Aus diesem Modell ist abzulesen „Keine Kirchgänger sind Agnostiker“ und tatsächlich geben Probanden dies meist als Konklusion an (siehe Abschnitt 2.2). Diese Antwort ist jedoch falsch, wenn nach einer logisch validen Konklusion gefragt ist. Es existieren nämlich zwei weitere Modelle, die mit den Prämissen übereinstimmen:

[K	[G]]	[K	[G]]
[K	[G]]	[K	[G]]
K	A	K	A
	A	K	A
...		...	

Aus dem linken Modell folgt „Einige Agnostiker sind keine Kirchgänger“. Diese vorläufige Konklusion wird aber wiederum durch das dritte, rechte Modell widerlegt. Es gibt nur eine Konklusion, die in allen drei Modellen der Prämissen gültig ist: „Einige Kirchgänger sind keine Agnostiker“. Nur wenige Probanden, wie wir gesehen haben, können diese Aufgabe korrekt lösen.

Die Beispiele verdeutlichen, wie die Theorie mentaler Modelle Fehler beim deduktiven Schließen erklärt. Inferenzen, die mehrere Modelle erfordern, sind schwieriger als Schlüsse mit nur einem Modell. Auch einige typische Fehler können so begründet werden. Sie entste-

hen, weil die Anzahl der möglichen Modelle die Kapazität des Arbeitsgedächtnisses überschreitet. Es werden deshalb Konklusionen aus Modellen abgelesen, obschon diese durch ein anderes Modell widerlegt werden würde. Eine weitere Fehlerquelle sind die bereits in Abschnitt 2.3.2.1.3 eingeführten *präferierten mentalen Modelle* (PMM). Existieren für einen Satz von Prämissen mehrere Modelle, wird nur das „sparsamste“ konstruiert und andere ebenfalls mögliche Modelle ignoriert. Übersehene Modelle können so nicht zur Falsifikation des PMM herangezogen werden (Rauh, Hagen, Knauff, Kuß, Schlieder & Strube, 2005).

4.3 Bereichsspezifische Regeln und Schemata: Deduktion als Verwendung domänenabhängigen Wissens

Bereits weiter vorne wurden die *Inhaltseffekte* beim deduktiven Denken beschrieben. Phänomene dieser Art bilden die Grundlage einer ganzen Klasse von *domänenabhängigen* Theorien des deduktiven Denkens. Während die TML und TMM von allgemeingültigen Mechanismen ausgehen, die allen logischen Schlüssen zugrunde liegen, basieren diese Ansätze auf *inhaltspezifischem* Wissen über die konditionalen Regeln eines Diskursbereichs. Die logische Struktur der Aufgabe spielt nur eine untergeordnete Rolle, da aus der Alltagswelt genügend Wissen über den Wahrheitswert eines logischen Ausdrucks verfügbar ist.

Bereits 1985 wurde eine domänenspezifische Theorie der Deduktion von Cheng und Holyoak eingeführt. Ihre Theorie der *pragmatischen Inferenzschemata* beschäftigt sich zwar „nur“ mit der WST, aber erregte trotzdem viel Aufsehen. Zentral für die Theorie sind so genannte *Erlaubnisschemata* (*permission schemata*), die in Situationen erworben wurden, in denen es einer Erlaubnis bedurfte, um eine bestimmte Handlungen auszuführen. Sie sind auf alle konditionalen Inferenzen der Art „Wenn die Handlung ausgeführt werden soll, dann muss die Vorbedingung erfüllt sein“ anwendbar. Cheng und Holyoak (1985) führten vier solcher Erlaubnisschemata ein:

- | | |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Regel 1 | Wenn die Handlung ausgeführt werden soll, dann muß die Vorbedingung erfüllt sein. |
| Regel 2 | Wenn die Handlung nicht ausgeführt werden soll, dann muß die Vorbedingung nicht erfüllt sein. |
| Regel 3 | Wenn die Vorbedingung erfüllt ist, dann kann die Handlung ausgeführt werden. |
| Regel 4 | Wenn die Vorbedingung nicht erfüllt ist, dann kann die Handlung nicht ausgeführt werden. |

Cheng und Holyoak (1985) berichten eine Reihe von Experimenten zur Prüfung ihres Ansatzes. Angewendet auf die inhaltliche WST, bei der Jugendliche erst mit 16 Jahren Bier trinken dürfen (vgl. 2.4.1), steht die Handlung für p und die Erlaubnis für q . Entsprechend muss die Regel 1 zur Wahl von p (Bier trinken) und Regel 4 zur Prüfung von $\neg q$ (nicht über 16) führen. Ähnliche Ergebnisse wurde auch aus einem anderen Experiment berichtet. Eine Gruppe von Probanden erhielt die Information: *Wenn auf der einen Seite der Karte „Einreise“ steht, dann ist auf der anderen Seite „Cholera“ als Krankheit in der Liste genannt.* Einer zweiten Gruppe wurde gesagt, es handle sich bei den „Karten“ um die Formulare der Einwanderungsbehörde und die Regel lautete: *Jeder, der einreisen möchte, muss gegen Cholera geimpft sein, während Durchreisende nicht geimpft sein müssen.* In dem Experiment, erzielte die zweite Gruppe, die das Erlaubnisschema anwenden konnte, deutlich bessere Ergebnisse als die erste Gruppe, der der Konditionalsatz ohne inhaltliche Einbettung vorgelegt wurde. Weitere Ergebnisse wurden bereits weiter vorne unter dem Stichwort „deontisches Schließen“ behandelt (vgl. 2.1.3.6). Technisch betrachtet ist die Ähnlichkeit der Theorie pragmatischer Schemata mit den wissensbasierten Systemen der KI unverkennbar. Auch diese beruhen zum großen Teil auf inhaltspezifischen Regeln und einigen Verarbeitungssubsystemen, die die Auswahl der Regeln und deren Anwendung steuern (vgl. z.B. Russell & Norvig, 2003). Solche Systeme waren auch Vorbild für eine der einflussreichsten universellen Theorien menschlicher Kognition – die ACT und später ACT* bzw. ACT-R genannte Theorie von Anderson (siehe das Kapitel von Schmidt, in diesem Band). Psychologisch gesehen ist jedoch auch die Frage nach dem Erwerb solcher inhaltspezifischer Regeln bedeutsam. Bei Cheng und Holyoak wurden sie per *induktivem* Denken aus alltäglichen Erfahrungen generiert. In der verwandten *Theorie sozialer Verträge* (*social contract theory*; Cosmides, 1989) wird hier ein evolutionstheoretisches Argument angeführt. Ob soziale Vereinbarungen eingehalten werden oder nicht, so das Argument, ist von essentieller Bedeutung für das Überleben eines Individuums oder einer gesamten sozialen Gruppe. Möglicherweise haben deshalb Menschen spezielle Mechanismen entwickelt, mit denen *Betrüger* entlarvt werden können und diese Mechanismen führten zum Erwerb von Wissen über konditionale Zusammenhänge. Zurück geht die Idee eines „Betrüger-Detektor-Moduls“ auf den Evolutionsbiologen Trivers und dessen Theorie des „reziproken Altruismus“ (Trivers, 1971). Demnach ist ein Betrüger eine Person, die etwas entgegennimmt (z.B. eine Hilfe), ohne den Verpflichtungen, die damit verbunden sind, später nachzukommen. Cosmides führte zur Untermauerung ihres Ansatzes ein originelles Experiment durch, in dem geprüft wurde, ob konditionale Schlüsse, die auf die Verletzung sozialer Vereinbarungen hinweisen, einfacher als andere durchzuführen sind. Den Probanden wurde

die konditionale Regel „Wenn ein Mann Cassava-Wurzel isst, hat er eine Tätowierung im Gesicht“ vorgelegt. Eine Gruppe der Probanden stellt sich vor, sie seien Ethnologen und versuchen herauszubekommen, ob diese Regel bei einem bestimmten Volk auf einer pazifischen Insel zutrifft. Der zweiten Gruppe wurde gesagt, die Cassava Wurzel sei ein Aphrodisiakum und dürfe deshalb nur von verheirateten Männern auf der Insel verzehrt werden. Außerdem haben Verheiratete immer eine Tätowierung im Gesicht. Ihre Aufgabe ist es, Verstöße gegen die Regel aufzudecken. In dieser und vielen anderen Studien wurde gezeigt, dass bessere Leistungen bei WST mit sozialen Vereinbarungen nur auftreten, wenn die Probanden sich in die Rolle eines „Regelüberwachers“ versetzen, jedoch nicht, wenn sie nur „Beobachter“ sind (Gigerenzer & Hug, 1992). Insgesamt hat sich die Theorie sozialer Verträge, ebenso wie die Theorie pragmatischer Schemata, für den Bereich des deduktiven Denkens mit sozialen Inhalten als brauchbar herausgestellt. Außerdem werden neurowissenschaftliche Argumente für die Existenz eines „Betrüger-Detektor-Moduls“ ins Feld geführt. So wurden in einigen bereits genannten Studien konditionale Schlüsse mit sozialem Inhalt mit neuronalen Mechanismen in der linken Hirnhälfte und insbesondere in frontalen und temporalen Strukturen in Verbindung gebracht, während abstrakte deduktive Schlüsse auf Prozessen in einem bilateralen, frontoparietalen Netzwerk beruhen (z.B. Goel, Schuren, Sheesley und Grafman, 2004). Der Patient R.M. aus einer neuropsychologischen Untersuchung von Stone, Cosmides, Tooby, Kroll und Knight (2002) litt unter Schädigungen in orbito-frontalen und temporalen Regionen sowie der Amygdala. Diese Regionen gehören zum limbischen System und die Forscher konnten bei dem Patienten eine Dissoziation zwischen sozialen und nicht-sozialen Inferenzen nachweisen. Er war beeinträchtigt in konditionalen Inferenzen, bei denen ein Betrüger entlarvt werden musste, jedoch nicht bei logisch identischen abstrakten Schlussfolgerungen. Auch aus vielen anderen Bereichen der sozialen Kognition liegen neurowissenschaftliche Ergebnisse vor, die die Besonderheit sozialer Inferenzen belegen (Cummins, 1998).

4.4 Kodierungstheorien und Antwort-Tendenz-Theorien

Unter den Begriffen „Kodierungstheorien“ und „Antwort-Tendenz-Theorien“ wird eine Vielzahl von „Mini-Theorien“ des deduktiven Denkens zusammengefasst. Sie würden in diesem Beitrag schon an vielen Stellen erwähnt. Theoretisch konzentrieren sich diese Ansätze nicht auf die Frage, wie Menschen in der Lage sind gültige Schlüsse durchzuführen, sondern darauf, wie Fehler beim deduktiven Denken begründet werden können. Es sind deshalb keine Kompetenz-, sondern reine *Fehlertheorien* des deduktiven Denkens. So erklären die in Abschnitt 2.2.2.1 dargestellte *Konversionshypothese* und die *Grice'sche-Implikationstheorie* Fehler

beim logischen Schließen allein anhand des (falschen) Verständnisses der Prämissen einer Denkaufgabe. Sie werden deshalb auch als *Kodierungstheorien* bezeichnet. Entsprechendes gilt auch für die in unter 2.2.2.3 berichteten *Atmosphären-* und *Matching-Hypothesen*. Da sie Fehler allein anhand der Bevorzugung bestimmter Antworten erklären, werden sie als *Antwort-Bias-Theorien* bezeichnet. Charakteristisch für alle Theorien dieser Gruppe ist die Bedeutung extra-logischer Merkmale einer Denkaufgabe. Fehler gehen entweder auf oberflächliche Merkmale der Prämissen, die Vernachlässigung relevanter Information, das Missverständnis der Prämissen oder die Anwendung von Heuristiken zurück. Die neuronalen Korrelate solcher Prozesse wurden bisher nicht gefunden (allerdings auch nicht gesucht).

4.5 Verbindungen zwischen den Theorien und Bewertung

In allen dargestellten Theorien werden Logikaufgaben zunächst in einer internen Repräsentation enkodiert, diese Repräsentation anschließend mithilfe logischer Prozeduren weiterverarbeitet und erst zum Schluss wieder dekodiert. Dieses allgemeine Schema des logischen Denkens ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Ansätze unterscheiden sich allerdings darin, welche Prozesse und Repräsentationen sie annehmen und in welcher Phase des Inferenzprozesses die Ursachen für Fehler gesehen werden. Mit Sicherheit ist keine der Theorien in der Lage, alle experimentellen Ergebnisse erklären. Jedoch werden die meisten Befunde in der Kombination der einzelnen Theorien verstehbar. Fehler gehen danach auf ein Gemisch aus nicht-logischen und logischen Prozessen zurück. In der ersten Phase wird eine interne Repräsentation der Logikaufgabe gebildet. Obgleich dabei keine deduktiven Prozesse im strengen Sinne ablaufen, können bestimmte Merkmale der Logikaufgabe nicht-logische Prozesse begünstigen. Hierzu zählt insbesondere das Missverständnis der Prämissen, wie es in den Kodierungstheorien beschrieben wird. Bereits 1962 führte Henle Fehlschlüsse bei logischen Inferenzen nur auf das Verständnis der Prämissen und nicht den Inferenzprozess selbst zurück: „[...] wrong answers are obtained by correct reasoning if we consider the syllogism as the subject understood it rather than the one the investigator hoped to present“ (Henle, 1962, S. 372). Zwar gehören die Kodierungstheorien zu den simpelsten Ansätzen der Denkpsychologie. Jedoch sind sie für die Theorie des logischen Denkens unverzichtbar, weil sie sehr elementare Fehler während des Aufgabenverstehens beschreiben.

Ein weiteres Merkmal, das nicht-logische Prozesse begünstigen kann, ist die Beziehung der Aufgabe zum Vorwissen der Person. Stimmt beispielsweise das Vorwissen mit den Wahrheitswerten der formalen Logik überein, kann es die Inferenz erleichtern. Umgekehrt führt das Vorwissen zu Fehlern, wenn die logischen Wahrheitswerte eine andere Schlussfol-

gerung erfordern. Diese Befunde aus Verhaltensexperimenten werden auch durch neurowissenschaftliche Ergebnisse unterstützt, denn auch diese sprechen für Unterschiede in der neuronalen Verarbeitung von abstraktem und konkretem Material und einen Abgleich von Wahrheitswerten des Vorwissens mit logischen Wahrheitswerten. An diesen wissensintensiven Prozessen ist die linke Hirnhälfte und insbesondere Strukturen im präfrontalen Kortex beteiligt, während abstrakte Inferenzen vor allem durch die neuronale Informationsverarbeitung in der rechten Hirnhälfte realisiert werden. Die Einsichten, die im Rahmen evolutionsbiologischer und bereichsspezifischer Theorien gewonnen wurden, spielen hier eine wichtige Rolle. Strittig ist indes, ob in unseren Gehirnen ein neuronales Substrat des „Betrüger-Detektor-Moduls“ zu finden sein wird. Zwar sind die domänenspezifischen Theorien stark evolutionstheoretisch motiviert und deshalb natürlicherweise an den neurobiologischen Grundlagen menschlichen Denkens interessiert. Andererseits hinterlässt die Evolution keine „Fossilien“ in unseren Gehirnen, anhand deren die Herausbildung eines solchen Moduls nachvollzogen werden könnte (Cummins, 1998). Strittig ist auch die Tragweise des Ansatzes. In der *Theorie adaptiven Verhaltens*, wie sie von Gigerenzer und Kollegen vertreten wird, muss sogar jeder Denkprozess an eine gegebene Umwelt und an die sozialen Strukturen angepasst sein und zu diesem Zweck wurden adaptive Heuristiken entwickelt, die nichts mehr mit logischem Denken zu tun haben (vgl. Gigerenzer & Geissmaier, in diesem Band). Das passt allerdings nur schwer damit zusammen, dass Menschen logische Denkaufgaben auch ohne Vorwissen lösen können. Dieses „logische Denken“ im engeren Sinne ist Gegenstand der zweiten Stufe eines Inferenzprozesses. Nun werden die internen Repräsentationen anhand spezifischer Prozeduren weiter verarbeitet (siehe Abbildung 10). Je nach Theorie sind diese Prozeduren syntaktischer oder semantischer Natur. Syntaktische Theorien sind bezüglich der angenommenen Informationsverarbeitungsprozesse am weitesten fortgeschritten. Sie bieten detaillierte Informationen über die Art der Repräsentation einer Logikaufgabe und wie diese während des Denkprozesses weiterverarbeitet wird. Andererseits beschränken sich die empirischen Belege für die Regeltheorien vorwiegend auf den Bereich des konditionalen Schließens. Hier hat sich der Ansatz aber durchaus als nützlich herausgestellt (Rips, 1994; Yang, Braine, und O'Brien, 1998). Neurowissenschaftlich gesehen sprechen einige Ergebnisse für die Rolle der postulierten sprach-ähnlichen Repräsentationen und Mechanismen beim logischen Denken, auch wenn bisher nicht im Detail geklärt ist, wie viel der beobachteten neuronalen Aktivität auf die sprachliche Verarbeitung und das Verständnis der Prämissen zurück geht. In jedem Falle scheint hier ein sehr große Varianz über die verschiedenen Logikaufgaben hinweg vorzuherrschen. Generell spielen linguistische Prozesse beim konditionalen und syllogistischen Schlie-

ßen eine größere Rolle als beim relationalen Denken. Dies passt zu dem engen Gültigkeitsbereich der TML, der zugleich aber auch einer ihrer Hauptnachteile ist. Zudem können Inhaltseffekte beim logischen Denkens von allen syntaktischen Theorien nicht direkt erklärt werden, es sei denn, diese treten nur in der ersten Phase auf, also allein bei Übersetzung der Prämissen in die interne Repräsentation. Theoretisch betrachtet stellt sich zudem die Frage, ob die zweite Regeltheorie, PSYCOP, mit ihren zahllosen Redundanzen, Regelgewichtungen und Zusatzannahmen als theoretische Konzeption des logischen Denkens überhaupt falsifizierbar ist.

Derzeit wird von den meisten Denkpsychologen die TMM favorisiert. Zum einen ist sie sehr viel universeller als die TML. Zum anderen hat sie sich in allen Bereichen des deduktiven Denkens – und darüber hinaus – experimentell sehr gut bewährt (Übersichten sind zu finden in: Evans, Newstead & Byrne, 1993; Manktelow, 1999; Garnham & Oakhill, 1994). Eine Sonderstellung nimmt dabei der Bereich des relationalen Denkens ein. Die enge Verbindung zwischen anschaulichen Vorstellungen und räumlichem Denken kann keine andere Theorie besser erklären. Die in Abschnitt 2.3 berichteten *Prämissen-* und *Termreihenfolgeeffekte*, der *Präferenz-* und *Verifikationseffekt* sowie der *Unbestimmtheitseffekt* bieten starke Unterstützung für die TMM und sind im Rahmen anderer Theorien kaum zu erklären. Überdies liegen für diesen Bereich des deduktiven Denkens algorithmische Modellierungen vor, die die beteiligten Informationsverarbeitungsprozesse detailliert beschreiben (Bara, Bucciarelli & Lombardo, 2001; Ragni, Knauff & Nebel, 2005; Schlieder & Berendt, 1997). Neurowissenschaftlich ist die TMM für das relationale Denken ebenfalls gut untermauert. Das zeigen die in Abschnitt 3 berichteten Ergebnisse. Bemerkenswert ist besonders die gute Übereinstimmung zwischen den neuronalen Aktivierungsmustern und den in 4.2 beschriebenen Inferenzschritten. Demnach basiert die *Modellkonstruktion* auf neuronalen Prozessen in parietalen und okzipitalen Kortexen. Während der *Modellinspektion* kommen zusätzliche Berechnungsprozesse ins Spiel, die vor allem im anterioren präfrontalen Kortex lokalisiert sind und bekanntermaßen an der Integration von Relationen und der Berücksichtigung multipler Informationen beteiligt sind (Waltz et al., 1999; Prabhakaran, Narayanan, Zhao & Gabrieli, 2000; Christoph et al., 2001). Die *Validierungsphase* schließlich wird durch Strukturen im dorsolateralen präfrontalen Cortex gesteuert, die für exekutive Kontrollprozesse verantwortlich sind (Smith & Jonides, 1999; Fletcher & Henson, 2001). Auch wenn manche Aspekte der TMM noch durchaus strittig sind (Rauh, Hagen, Knauff, Kuß, Schlieder & Strube, 2005; Vandierendonck, Dierckx & De Vooght, 2004), ist sie derzeit wohl der beste Ansatz, um zu erklären, wie die interne Repräsentation einer Logikaufgabe anhand spezifischer Prozeduren weiterverarbeitet wird und nach der Rückübersetzung in eine Konklusion und das entsprechende

Antwortverhalten zur Lösung der Aufgabe führt. Im Antwortverhalten kommen dann die in den Antworttendenz-Theorien beschriebenen Bevorzungen ins Spiel. Auf diese Theorien kann die Denkpsychologie ebenso wenig verzichten, wie auf die Kodierungstheorien.

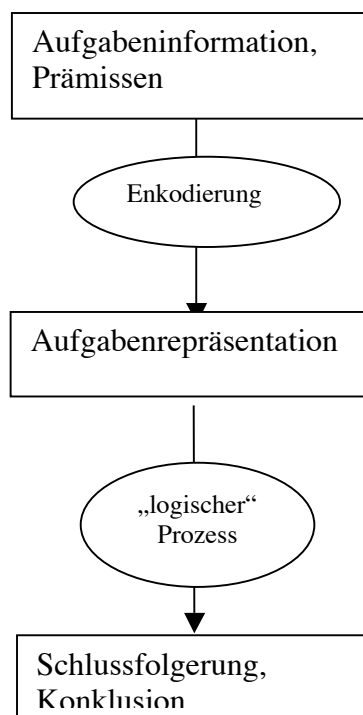


Abbildung 9. Bei der Lösung einer Logikaufgabe wird diese zunächst in einer internen Repräsentation enkodiert. Diese mentale Repräsentation wird dann mithilfe logischer Prozeduren weiterverarbeitet. Zum Schluss wird die modifizierte Repräsentation wieder dekodiert und führt so zum Antwortverhalten der Person. Die Art der mentalen Prozesse und Repräsentationen ist abhängig vom Typ der Logikaufgabe und in allen Phase des Inferenzprozesses können Fehler auftreten. Deshalb können Personen oft nicht die Schlüsse ziehen, die gemäß den Regeln der Logik zu erwarten wären.

5 Abschließende Bemerkungen

Ziel dieser Arbeit war es, darzustellen was uns Menschen in die Lage versetzt Schlüsse durchzuführen, die mit den Regeln der Logik übereinstimmen, aber auch warum wir dabei häufig Fehler begehen und Irrtümern unterliegen. Zu diesem Zweck wurde die formale Logik, Befunde aus Verhaltensexperimenten und neurowissenschaftliche Resultate berichtet. Betrachtet man die Literatur zum logischen Denken, wird allerdings nur die Bedeutung kognitionspsychologischer Experimente nicht in Frage gestellt. Strittig ist hingegen welche Rolle die formale Logik für die Denkpsychologie spielt und welchen Nutzen man sich von neurowis-

senschaftlichen Untersuchungen versprechen kann. Es ist nur fair, zum Abschluss dieser Arbeit diese anderen Sichtweisen nicht zu verschweigen.

Ausgangspunkt des ersten Streitpunktes ist die Frage, ob der Vergleich zwischen den Schlussfolgerungen von Menschen und den Regeln der „reinen“ Logik überhaupt sinnvoll ist. Lange Zeit herrschte die Meinung vor, das Denken sei der Gegenstand der Logik schlechthin und menschliches Denken gehorche den logischen Gesetzen. In der Philosophie entwarfen Kant, Leibniz und Descartes und in der Logik insbesondere George Boole das Bild des Menschen, als ein vernunftbegabtes Wesen, das sich *rational* verhält und dessen Denken den Regeln der Logik folgt. Rationalität wird in dieser Tradition als die Kompetenz betrachtet, logisch korrekte Entscheidungen zu treffen. Nun wissen wir inzwischen jedoch – der Überblick hat dies gezeigt –, dass Personen oft nicht die Schlüsse ziehen, die gemäß den Regeln der Logik zu erwarten wären. Sind Menschen somit doch von Grund auf „irrationale Wesen“? Und wie kann „Irrationalität“ erklärt werden? Eine der Antworten auf diese Frage passt nicht gut mit der vorliegenden Arbeit zusammen. Seit nunmehr über 40 Jahren wehrt sich eine ganze Gruppe von Forschern vehement dagegen, Antworten, die von den Normen der Logik abweichen, als „Fehler“ zu bezeichnen. Denkprozesse müssen, so das Argument, an Umweltbedingungen und an soziale Strukturen angepasst sein. Dazu werden adaptive Heuristiken verwendet, die zwar mit logischer Korrektheit nichts zu tun haben, aber trotzdem *rational* sind. Auf diese Weise wird „Irrationalität“ vollständig als „adaptives Verhalten“ umdefiniert und die formale Logik also normatives Modell der Denkpsychologie abgelehnt. Für diese Forscher sind alle Einsichten dieses Beitrags nur Märchen (vgl. Gigerenzer und Geissmaier, in diesem Band).

Die in dieser Arbeit berichteten Befunde basieren auf einem anderen Verständnis von Rationalität. Zwar wird auch in diesem Rahmen die Adaptivität und Inhaltsabhängigkeit menschlichen Denkens nicht geleugnet. Gleichwohl wird die normative Sicht auf logische Schlussfolgerungen nicht aufgegeben, sondern zwischen verschiedenen Typen der „Rationalität“ unterschieden. Das Verhalten von Personen kann *adaptiv rational sein*, wenn es am ehesten zur Erreichung eines Zieles beiträgt, also der Situation angepasst ist. Abweichungen von den logischen Regeln sind dabei eher die Regel als die Ausnahme. *Normativ rational* ist hingegen ein Verhalten, das mit den Normen der Logik übereinstimmt (Anderson, 1990; 1991). Die beiden Formen von Rationalität werden häufig auch als *absichtsvolle Rationalität (rationality of purpose)* und *Rationalität des Prozesses (rationality of process)* bezeichnet (Evans, 1993b; Evans & Over, 1996) und so kann erklärt werden, warum Menschen auf der einen Seite über eine hohe Kompetenz für angepasstes und zielgerichtetes Verhalten verfü-

gen, auf der anderen Seite aber auch Schlüsse durchführen können, die mit den Regeln der Logik übereinstimmen. Es ist nicht schwer zu erkennen, dass der vorliegende Beitrag den Sinn dieses Vergleichs zwischen formaler und mentaler Logik verdeutlichen sollte.

Der zweite Streitpunkt der Denkpsychologie betrifft die Bedeutung neurowissenschaftlicher Ergebnisse. In der Tat ist es für eine denkpsychologische Arbeit ziemlich ungewöhnlich, dass solche Arbeiten hier ausführlich berichtet wurden. Normalerweise werden in derartigen Aufsätzen fast nur Befunde aus Verhaltensexperimenten zu den kognitiven Grundlagen logischen Denkens berichtet und, wie der Überblick gezeigt hat, gibt es nur eine kleine Anzahl von Arbeitsgruppen, die sich für die neuronale Basis des logischen Denkens interessieren. Die meisten Denkpsychologen vertreten eine Auffassung, nach der für das Verständnis logischen Denkens unbedeutsam ist was im Gehirn passiert. Mentale Phänomene – also auch das logische Denken – sind reine *Berechnungsprozesse*. Wie diese Berechnungen im Gehirn durchgeführt werden, spielt keine Rolle, weil für jedes Problem, welches prinzipiell berechenbar ist, immer auch eine Maschinerie existiert, die diese Berechnungen ausführen kann (die so genannte Church-Turing-Hypothese; Cummins, 1989; Newell, 1980; Pylyshyn, 1984; vergleiche die Darstellung in Gardner, 1989).

Ein Anliegen der vorliegenden Arbeit war es, an diesem Desinteresse der Denkpsychologie zu rütteln. Dabei geht es keineswegs nur um die „Lokalisierung“ geistiger Fähigkeiten oder gar um eine „neue Phrenologie“ des Geistes (Uttal, 2001). Methodisch betrachtet bietet die Messung neuronaler Aktivierungsmuster – der Überblick hat dies hoffentlich gezeigt – vielmehr die Möglichkeit präzise formulierte Hypothesen über die Art von Informationsverarbeitungsprozessen zu testen. Tatsächlich ist nämlich die Prämisse nicht uneingeschränkt richtig, nach der ein bestimmter Berechnungsprozess in jeder erdenklichen Maschine zu realisieren ist, sofern diese äquivalent zu einer Turing-Maschine ist (Giunti, 1997). Zum anderen lässt die Lokalisierung kognitiver Phänomene im Gehirn auch wichtige Rückschlüsse auf Berechnungsprozesse zu. Die Forschung ist zwar derzeit noch weit davon entfernt, die Mechanismen neuronaler Informationsverarbeitung im Detail zu begreifen. Unstrittig ist inzwischen jedoch, dass die Gesamtorganisation des Gehirns hoch spezialisierte Module umfasst, die für unterschiedliche Verarbeitungsprozesse zuständig sind. Die Auffassung, überall im Gehirn sei alles möglich (Lashley, 1929), ist schlichtweg falsch. Findet man beispielsweise, wie in dieser Arbeit berichtet, dass an der Lösung einer Logikaufgabe eine spezielle Hirnstruktur beteiligt ist, bietet dies wichtige Hinweise auf die Art der Berechnungsprozesse (denken sie z.B. an die Interpretation der Ergebnisse zu Rolle visueller und räumlicher Hirnareale). Die eingangs erwähnte Gleichung „Kognition=Berechnung“ wir dabei also nicht in Frage

gestellt und ebenso wenig wird die interessante Frage *wie* logisches Denken funktioniert durch die wesentlich langweiligere Frage *wo* es funktioniert ersetzt.

Nun haben sie in diesem Kapitel einiges darüber gelernt, *wie* logisches Denken funktioniert und warum sie manchmal „unlogisch“ Denken und Handeln. Vielleicht haben sie auch gelernt, dass man vorsichtig sein muss, wenn man vom so genannten „gesunden Menschenverstand“ spricht. Vor allem aber wissen sie nun, dass logisches Denken zwar nicht immer reibungslos verläuft, aber sie deshalb noch lange kein „irrationales Wesen“ sind. Sie verfügen über beachtliche logische Fähigkeiten.

Danksagung

Der Autor bedankt sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Unterstützung im Rahmen des Heisenberg-Programms. Außerdem dankt der Autor den Kolleginnen und Kollegen im Sonderforschungsbereich „Raumkognition“ (SFB/TR 8) insbesondere ??? für viele nützliche Kommentare zum Manuskript dieser Arbeit. Herzlicher Dank für viele hilfreiche Anmerkungen gebührt auch dem Herausgeber Prof. Dr. Joachim Funke, sowie ???, ???, und Herrn cand. Math. Benjamin Meier.

Literatur

- Andersen, R.A. (1997). Multimodal integration for the representation of space in the posterior parietal cortex. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 352, 1421-1428.
- Anderson, J. R. (1990). *The adaptive character of thought*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Anderson, J. R. (1991). Is human cognition adaptive? *Behavioural and Brain Sciences*, 14, 471-517.
- Baddeley, A.D. (1986). *Working memory*. Oxford UK: Oxford University Press.
- Baddeley, A.D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47-90). New York: Academic Press.
- Baddeley, A.D., & Logie, R. H. (1992). Auditory imagery and working memory. In D. Reisberg (Ed.), *Auditory imagery*. Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Bara, B.G., Bucciarelli, M. & Johnson-Laird, P.N. (1995). Development of syllogistic reasoning. *American Journal of Psychology*, 108, 157-193.
- Bara B.G., Bucciarelli M. & Lombardo V. (2001) Mental model theory of deduction: A unified computational approach. *Cognitive Science*, 25, 839-901.
- Begg, I. (1987). Some. *Canadian Journal of Psychology*, 41, 62-73.
- Begg, I. & Denny, J. (1969). Empirical reconciliation of atmosphere and conversion interpretations of syllogistic reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 81, 351-354.
- Begg, I. & Harris, G. (1989). On the interpretation of syllogisms. *Journal of Verbal Learning and Learning Behavior*, 21, 595-620.
- Beller, S. (1997). *Inhaltseffekte beim logischen Denken: Der Fall der Wason'schen Wahlaufgabe*. Lengerich: Pabst.

- Beller, S. (2003). The flexible use of deontic mental models. In R. Alterman, & D. Kirsh (Eds.), *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 127-132). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Braine, M. D. S., & O'Brein, D. P. (Eds.). (1998). *Mental logic*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Braine, M.D.S. & Rumanin, B. (1981). Development of comprehension of "or". *Journal of Experimental Child Psychology*, 31, 46-70.
- Byrne, R.M.J. (1997). Cognitive processes in counterfactual thinking about what might have been. *Psychology of Learning and Motivation*, 37, 105-154.
- Byrne, R.M.J. (2002). Mental models and counterfactual thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 6, 405-445
- Byrne, R. M. J., & Johnson-Laird, P. N. (1989). Spatial reasoning. *Journal of Memory and Language*, 28, 564-575.
- Byrne, R.M.J. & McEleney, A. (2000) Counterfactual thinking about actions and failures to act. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26, 1318-1331.
- Byrne, R.M.J. & Tasso, A. (1999). Deductive reasoning with factual, possible, and counterfactual conditionals. *Memory & Cognition*, 27, 726-740.
- Ceraso, J. & Provitera, A. (1971). Sources of error in syllogistic reasoning. *Cognitive Psychology*, 2, 400-410.
- Chapman, L.J. & Chapman, A.P. (1959). Atmosphere effect re-examined. *Journal of Experimental Psychology*, 58, 220-226.
- Chater, N. & Oaksford, M. (1999). The probability heuristic model of syllogistic reasoning. *Cognitive Psychology*, 38(2), 191-258.
- Cheng, P.W. & Holyoak, K.J. (1985). Pragmatic reasoning schemas. *Cognitive Psychology*, 17, 391-416.
- Chomsky, N. (1957). *Syntactic structures*. The Hague: Mouton.
- Chomsky, N. (1965). *Aspects of the theory of syntax*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Christoff, K., Prabhakaran, V., Dorfman, J., Zhao, Z., Kroger, J.K., Holyoak, K. J., et al. (2001). Rostrolateral prefrontal cortex involvement in relational integration during reasoning. *NeuroImage*, 14, 1136-49.
- Clark, H.H., & Chase, W.G.(1972). On the process of comparing sentences against pictures. *Cognitive Psychology*, 3, 472-517.
- Clement, C. A., & Falmagne, R. J. (1986). Logical reasoning, world knowledge, and mental imagery: Interconnections in cognitive processes. *Memory & Cognition*, 14, 299-307.
- Cohen, H., Bouchard, S. & Scherzer, P. (1994). Language and verbal reasoning in Parkinson disease. *Neuropsychiatry, Neuropsychology and Behavioral Neurology*, 7 (3), 166-175.
- Cosmides, L. (1989). The logic of social exchange: Has natural selection shaped how humans reason? Studies with the Wason selection task. *Cognition*, 31, 187-276.
- Cruse, D. A. (1986). *Lexical Semantics*. Cambridge (UK): Cambridge University Press.
- Cummins, R. (1989). *Meaning and Mental Representation*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Cummins, D.D. (1998) Social Norms and Other Minds: The Evolutionary Roots of Higher Cognition. In Cummins, D.D., & Allen, C.A. (1998) *The Evolution of Mind* (pp. 30-50). New York: Oxford University Press.
- Deglin, V. L., & Kinsbourne, M. (1996). Divergent thinking styles of the hemispheres: How syllogisms are solved during transitory hemisphere suppression. *Brain & Cognition*, 31, 285-307.
- De Soto, C. B., London, M., & Handel, M. S. (1965). Social reasoning and spatial paralogic. *Journal of Personality and Social Psychology*, 2, 513-521.

- D'Esposito, M., Detre, J. A., Aguirre, G. K., Stallcup, M., Alsop, D. C., Tippet, L. J. & Farah, M. J. (1997). A functional MRI study of mental image generation. *Neuropsychologia*, 35, 725-730.
- Dickstein, L. S. (1978). The effect of figure on syllogistic reasoning. *Memory & Cognition*, 6, 76-83.
- Dörner, D. (1989): *Die Logik des Mißlingens*. Reinbek: Rowohlt Verlag.
- Dominowski, R.L. (1995). Content effect in Wason's selection task. In S.E. Newstead & J.St.B.T. Evans (Eds.), *Perspectives on thinking and reasoning. Essays in honour of Peter Wason* (pp. 41-67). Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Dutke, S. (1993). Mentale Modelle beim Erinnern sprachlich beschriebener Anordnungen: Zur Interaktion von Gedächtnisschemata und Textrepräsentation. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 40, 44-71.
- Edgington, D. (1995). On conditionals. *Mind*, 104, 235-330.
- Ehrlich, K., & Johnson-Laird, P. N. (1982). Spatial descriptions and referential continuity. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 21, 296-306.
- Erickson, J.R. (1974). A set analysis of behavior in formal syllogistic reasoning tasks. In R. Solso (Ed.), *Loyola symposium on cognition* (Vol. 2, pp. 305-329). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Erickson, J.R. (1978). Research on syllogistic reasoning. In R. Revlin & R.E. Mayer (Eds.), *Human reasoning* (pp. 39-50). Washington, DC: Winston.
- Evans, J.St.B.T. (1972a). On the problem of interpreting reasoning data: logical and psychological approaches. *Cognition*, 1, 373-384.
- Evans, J.St.B.T. (1972b). Interpretation and "matching bias" in a reasoning task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, 193-199.
- Evans, J.St.B.T. (1977). Linguistic factors in reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 29, 297-306.
- Evans, J.St.B.T. (1984). Heuristic and analytic processes in reasoning. *British Journal of Psychology*, 75, 451-468.
- Evans, J.St.B.T. (1993a). The mental model theory of conditional reasoning: critical appraisals and revision. *Cognition*, 48, 1-20.
- Evans, J. St. B. T. (1989). *Bias in human reasoning*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum.
- Evans, J.St.B.T. (1993b). Bias and rationality. In K.I. Manktelow & D.E. Over (Eds.), *Rationality*. London: Routledge.
- Evans, J.St.B.T., Barston, J.L & Pollard, P. (1983). On the conflict between logic and belief in syllogistic reasoning. *Memory and Cognition*, 11, 295-306.
- Evans, J. St. B. T. & Brooks, P. G. (1981). Competing with reasoning: A test of the working memory hypothesis. *Current Psychological Research*, 1, 139-147.
- Evans, J. St. B. T., Newstead, S. E., & Byrne, R. M. J. (1993). *Human reasoning. The psychology of deduction*. Hove (UK): Lawrence Erlbaum Associates.
- Evans, J. St. B. T. & Over, D. E. (1996). Rationality in the selection task: Epistemic utility versus uncertainty reduction. *Psychological Review*, 103, 356-363.
- Fangmeier, T. Knauff, M., Ruff, C. C. & Sloutsky, V. (2005). fMRI Evidence for a three-stage-model of relational reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience (under revision)*.
- Fillenbaum, S. (1974a). Pragmatic normalization: Further results for some conjunctive and disjunctive sentences. *Journal of Experimental Psychology*, 102, 574-578.
- Fillenbaum, S. (1974b). Or: Some uses. *Journal of Experimental Psychology*, 103, 913-921.
- Fletcher, P.C. & Henson, R N. (2001). Frontal lobes and human memory. Insights from functional neuroimaging. *Brain*, 124, 849-881
- Fodor, J. A. (1975). *The language of thought*. New York: Crowell.

- Frege, G. (1879/1993). Begriffsschrift. In Angelelli, I. (Hrsg.), *Begriffsschrift und andere Aufsätze*. Hildesheim: Olms Georg AG.
- Gardner, H. (1989). *Dem Denken auf der Spur*. Stuttgart: Klett-Cotta.
- Garnham, A. & Oakhill, J. (1994). *Thinking and reasoning*. Oxford, UK: Blackwell.
- Geminiani, G. C., & Bucciarelli, M. (1998). Deductive reasoning in right-brain damaged. In *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 386-391). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Geurts, B. (2003). Reasoning with quantifiers. *Cognition*, 86, 223–251.
- Gigerenzer, G., & Hug, K. (1992). Domain-specific reasoning: Social contracts, cheating, and perspective change. *Cognition*, 43, 127-171.
- Gilhooly, K. J., Logie, R. H., Wetherick, N. E., & Wynn, V. (1993). Working memory and strategies in syllogistic-reasoning tasks. *Memory & Cognition*, 21, 115-124.
- Giroto, V. & Legrenzi, P. (1989). Mental representation and hypothetico-deductive reasoning: The case of the THOG problem. *Psychological Research*, 51, 129-135.
- Giroto, V. & Legrenzi, P. (1992). The parents of THOG are called SARS: Mental representation and reasoning. Paper presented to the *Second International Conference on Thinking*, Plymouth, UK.
- Giunti, M. (1997). *Computation, dynamics and cognition*. New York: Oxford University Press.
- Goel, V., Büchel, C., Frith, C. & Dolan, R.J. (2000). Dissociation of mechanisms underlying syllogistic reasoning. *NeuroImage* 2000, 12, 504-514
- Goel, V., & Dolan, R. J. (2001). Functional neuroanatomy of three-term relational reasoning. *Neuropsychologia*, 39, 901-909.
- Goel, V. & Dolan, R.J (2003). Explaining modulation of reasoning by belief. *Cognition*, 87, B11-B22.
- Goel, V. & Dolan, R.J. (2004). Differential involvement of left prefrontal cortex in inductive and deductive reasoning. *Cognition*, 93, B109-21.
- Goel, V., Gold, B., Kapur, S., & Houle, S. (1997). The seats of reason? An imaging study of deductive and inductive reasoning. *NeuroReport*, 8, 1305-1310.
- Goel, V., Gold, B., Kapur, S., & Houle, S. (1998). Neuroanatomical correlates of human reasoning. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10, 293-302.
- Goel, V., Makale, M. & Grafman, J. (2004). The hippocampal system mediates logical reasoning about familiar spatial environments. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 16, 654-664.
- Goel, Shuren, Sheseesly und Grafman (2004). Asymmetrical involvement of frontal lobes in social reasoning. *Brain*, 127, 783-790.
- Goldstein, E.B. (1997). *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum.
- Golding, E. (1981). The effect of unilateral brain lesion on reasoning. *Cortex*, 17, 31-40.
- Goodwin, G. P. & Johnson-Laird, P.N. (2005). Reasoning about relations. *Psychological Review*. In Druck.
- Grice, H.P. (1975). Logic and conversation. In P. Cole & J.L. Morgan (Eds.), *Syntax and semantics*. (Vol. 3: *Speech acts*, pp. 41-58). New York: Academic Press.
- Griggs, R.A. (1976). Logical processing of set inclusion relations in meaningful text. *Memory and Cognition*, 4, 730-740.
- Griggs, R.A. (1995). The effects of rule clarification, decision justification and selection instruction on Wason's abstract selection task. In S.E. Newstead & J.St.B.T. Evans (Eds.), *Perspectives on thinking and reasoning. Essays in honour of Peter Wason*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Griggs, R.A. & Cox, J.R (1982). The elusive thematic-material effect in Wason's reasoning task. *British Journal of Psychology*, 73, 407-420.

- Grossman, M., Carvell, S. & Gollomp, S. (1991). Sentence comprehension and praxis deficits Parkinson disease. *Neurology*, 41 (10), 1620-1626.
- Guyote, M.J & Sternberg, R.J. (1981). A transitive-chain theory of syllogistic reasoning. *Cognitive Psychology*, 13, 461-525.
- Hamm, F. (1989). *Natürlich-sprachliche Quantoren*. Tübingen: Niemeyer.
- Hitch, G. J., & Baddeley, A. (1976). Verbal reasoning and working memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28, 603-621.
- Hoch, S. J. & Tschirgi, J.E. (1985). Cue redundancy and extra logical inferences in a deductive reasoning task. *Memory & Cognition*, 11, 200-209.
- Houdé, O., Zago, L., Crivello, F., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B. & Tzourio-Mazoyer, N. (2001). Access to deductive logic depends on a right ventromedial prefrontal area devoted to emotion and feeling: evidence from a training paradigm. *NeuroImage*, 14, 2486-1492.
- Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12, 721-728.
- Houdé, O. & Tzourio-Mazoyer, N. (2003). Neural foundations of logical and mathematical cognition. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 507 - 514
- Hume D. (1748/1999). *An Enquiry Concerning Human Understanding*. Oxford (UK):: Oxford University Press.
- Hunter, I.M.L. (1957). The solving of three-term series problems. *British Journal of Psychology*, 48, 286-298.
- Huttenlocher, J. (1968). Constructing spatial images: A strategy in reasoning. *Psychological review*, 75, 550 - 560.
- Jahn, G., Johnson-Laird, P. N., & Knauff, M. (2005). Reasoning about consistency with spatial mental models: Hidden and obvious indeterminacy in spatial descriptions. In: C. Freksa, M. Knauff, B. Krieg-Brückner, B. Nebel, & T. Barkowsky (Eds.), *Spatial Cognition IV: Reasoning, Action, Interaction*. (pp. 165-180). Berlin: Springer.
- James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Holt.
- Johnson-Laird, P. N. (1972). The three-term series problem. *Cognition*, 1, 57-82.
- Johnson-Laird, P. N. (1983). *Mental models*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Johnson-Laird, P. N. (1998). Imagery, visualization, and thinking. In J. Hochberg (Ed.), *Perception and Cognition at Century's End* (pp. 441-467). San Diego, CA: Academic Press.
- Johnson-Laird, P.N. (2002). Peirce, logic diagrams, and the elementary operations of reasoning. *Thinking & Reasoning*, 8, 69-95.
- Johnson-Laird, P. N., & Bara, B. G. (1984). Syllogistic inference. *Cognition*, 16, 1-61.
- Johnson-Laird, P. N., & Byrne, R. M. J. (1991). *Deduction*. Hove (UK): Erlbaum.
- Johnson-Laird, P.N., Byrne, R.M.J. & Shaeken, W. (1992). Propositional reasoning by model. *Psychological Review*, 99, 418-439.
- Johnson-Laird, P. N., Byrne, R. M. J., & Tabossi, P. (1989). Reasoning by model: The case of multiple quantification. *Psychological Review*, 96, 658-673.
- Johnson-Laird, P.N., Legrenzi, P & Legrenzi, M.S. (1972). Reasoning and a sense of reality. *British Journal of Psychology*, 62, 395-400.
- Johnson-Laird, P.N., & Steedman, M. (1978). The psychology of syllogisms. *Cognitive Psychology*, 10, 64-99-
- Johnson-Laird, P.N & Tagart, J. (1969). How implication is understood. *American Journal of Psychology*, 82, 367- 373.
- Kaup, B. & Zwaan, R.A. (2003). Effects of negation and situational presence on the accessibility of text information. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29, 439-446.

- Klauer, K. C., Musch, J. & Naumer, B. (2000). On belief bias in syllogistic reasoning. *Psychological Review*, 107, 852-884.
- Klauer, K. C., Oberauer, K. Roßnagel, C. & Musch, J. (1996). Mentale Modelle und mentale Bilder. *Zeitschrift für Psychologie*, 204, 41-54.
- Klauer, K. C., Stegmaier, R., & Meiser, T. (1997). Working memory involvement in propositional and spatial reasoning. *Thinking and Reasoning*, 3, 9-47.
- Klauer, K.C. & Zhao, Z. (2004). Double dissociations in visual and spatial short-term memory. *Experimental Psychology: General*, 133 (3), 323–338.
- Knauff, M. (1999). The cognitive adequacy of Allen's interval calculus for qualitative spatial representation and reasoning. *Spatial Cognition and Computation*, 1, 261-290.
- Knauff, M. (2005). A Neuro-Cognitive Theory of Reasoning with Mental Models and Visual Images. In C. Held, M. Knauff & G. Vosgerau (Hrsg.). *Mental Models in Cognitive Psychology, Neuroscience, and Philosophy*. North-Holland: Elsevier.
- Knauff, M., Fangmeier, T., Ruff, C. C. & Johnson-Laird, P. N. (2003). Reasoning, models, and images: Behavioral measures and cortical activity. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 4, 559–573.
- Knauff, M., & Johnson-Laird, P. N. (2002). Visual imagery can impede reasoning. *Memory & Cognition*, 30, 363-371.
- Knauff, M., Kassubek, J., Mulack, T., & Greenlee, M. W. (2000). Cortical activation evoked by visual mental imagery as measured by functional MRI. *NeuroReport*, 11, 3957-3962.
- Knauff, M. & May, E. (2005). The role of visual mental imagery in deductive reasoning: Results from experiments with sighted, blindfolded, and congenitally totally blind persons. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* (in Druck).
- Knauff, M., Mulack, T., Kassubek, J., Salih, H. R., & Greenlee, M. W. (2002). Spatial imagery in deductive reasoning: A functional MRI study. *Cognitive Brain Research*, 13, 203-212.
- Knauff, M., Rauh, R., & Schlieder, C. (1995). Preferred mental models in qualitative spatial reasoning: A cognitive assessment of Allen's calculus. In *Proceedings of the Seventeenth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 200-205). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Knauff, M., Rauh, R., Schlieder, C., & Strube, G. (1998a). Mental models in spatial reasoning. In C. Freska, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition - An interdisciplinary approach to representing and processing spatial knowledge* (pp. 267-291). Berlin: Springer.
- Knauff, M., Rauh, R., Schlieder, C., & Strube, G. (1998b). Continuity effect and figural bias in spatial relational inference. In *Proceedings of the Twentieth Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 573-578). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Knauff, M. & Schlieder, C. (2005). Spatial inference: No difference between mental images and models. *Behavioural and Brain Sciences*, 27, 589-590.
- Knauff, M. & Strube, G. (2002). Anschauliches Denken und Arbeitsgedächtnis: Kognitive und kortikale Prozesse. *Psychologische Rundschau*, 53, 49-60.
- Knauff, M., Strube, G., Jola, C., Rauh, R., & Schlieder, C. (2004). The psychological validity of qualitative spatial reasoning in one dimension. *Spatial Cognition and Computation*, 4, 167-188.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L., Maljkovic, V., Weise, S. B., Chabris, C. F., Hamilton, S. E., Rauch, S. L., & Buonanno, F. S. (1993). Visual mental imagery activates topographically organized visual cortex: PET investigations. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 5, 263-287.

- Kosslyn, S. M., Pascual-Leone, A., Felician, O., Camposano, S., Keenan, J. P., Thompson, W. L., Ganis, G., Sukel, K. E., & Alpert, N. M. (1999). The role of area 17 in visual imagery: Convergent evidence from PET and rTMS. *Science*, *284*, 167-170.
- Kosslyn, S. M., & Thompson, W.L. (2003). When is early visual cortex activated during visual mental imagery? Theory and meta-analysis. *Psychological Bulletin*, *129*, 723-746.
- Kosslyn, S. M., Thompson, W. L., & Alpert, N. M. (1997). Neural systems shared by visual imagery and visual perception: a positron emission tomography study. *NeuroImage*, *6*, 320-334.
- Lashley, K. S. (1929). *Brain mechanisms and intelligence: A quantitative study of injuries to the brain*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Logan, G. D. (1994). Spatial attention and the apprehension of spatial relations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *20*, 1015-1036.
- Logie, R. H. (1995). *Visuo-spatial working memory*. Hove (UK): Erlbaum.
- Manktelow, K.I. (1999). *Reasoning and Thinking*. Hove (UK): Psychology Press.
- Manktelow, K.I. & Evans, J.St.B.T. (1979). Facilitation of reasoning by realism: Effect or non-effect? *British Journal of Psychology*, *70*, 477-488.
- McNamara, J. (1986). *A border dispute: The place of logic in psychology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Meiser, T., Klauer K. C. & Naumer, B (2000) Propositional reasoning and working memory: The role of prior training and pragmatic contents. *Acta Psychologica*, *106*, 303-327.
- Mellet, E., Tzourio, N., Crivello, F., Joliot, M., Denis, M., & Mazoyer, B. (1996). Functional anatomy of spatial mental imagery generated from verbal instructions. *Journal of Neuroscience*, *16*, 6504-6512.
- Mellet, E., Tzourio, N., Denis, M., & Mazoyer, B. (1995). A positron emission tomography study of visual and mental exploration. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *7*, 433-445.
- Morris, A. K. (2000). Development of logical reasoning: children's ability to verbally explain the nature of the distinction between logical and nonlogical forms of argument. *Developmental Psychology*, *36*(6), 741-758.
- Morra S. (2001). On the information-processing demands of spatial reasoning. *Thinking and Reasoning*, *7*, 347-365.
- Newell, A. (1980). Physical Symbol Systems. *Cognitive Science*, *4*, 135-183.
- Newstead, S.E. (1990). Conversion in syllogistic reasoning. In K. Gilhooly, M.T.G. Keane, R. Logie & G. Erdos (Eds.), *Lines of thought: Reflections on the psychology of thinking (Vol. 1)*. London: Wiley.
- Newstead, S. E. Evans, J.St.B.T. & Byrne, R. M. J. (1993). *Human Reasoning*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Newstead, S.E., Girotto, V. & Legrenzi, P. (1995). The THOG problem and its implications for human reasoning. In S.E. Newstead & J.St.B.T. Evans (Eds.), *Perspectives on thinking and reasoning. Essays in honour of Peter Wason* (261-285). Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Newstead, S.E. & Griggs, R.A. (1983). The language and thought of disjunction. In J.St.B.T. Evans (Ed.), *Thinking and reasoning: Psychological approaches*. London: Routledge & Kegan Paul.
- Newstead, S.E., Handley, S.J., & Buck, E. (1999). Falsifying mental models: Testing the predictions of theories of syllogistic reasoning. *Memory and Cognition*, *27*, 344-354.
- Newstead, S. E., Pollard, P., & Griggs, R. A. (1986). Response bias in relational reasoning. *Bulletin of the Psychonomic Society*, *2*, 95-98.
- O'Brien, D. P (2004). Mental-Logic theory: What it proposes, and reasons to take this proposal seriously. In J. Leighton R.J. & Sternberg (Eds.), *The nature of reasoning* (pp. 205-233). New York: Cambridge University Press.

- O'Brien, D.P., Braine, M.D.S. & Yang, Y. (1994). Propositional reasoning by models? Simple to refute in principle and in practice. *Psychological Review*, 101, 711-724.
- Oberauer, K. & Wilhelm, O. (2000). Directionality in deductive reasoning, I: The interpretation of single premises. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26, 1702-1712
- Oaksford, M. & Chater, N. (1994). A rational analysis of the selection task as optimal data selection. *Psychological Review*, 101, 608-631.
- Osherson, D., Perani, D., Cappa, S., Schnur, T., Grassi, F., & Fazio, F. (1998). Distinct brain loci in deductive versus probabilistic reasoning. *Neuropsychologia*, 36, 369-376.
- Parsons, L.M. & Osherson, D. (2001). New evidence for distinct right and left brain systems for deductive versus probabilistic reasoning. *Cereb Cortex*, 11(10), 954-65.
- Pollard, P. & Evans, J.St.B.T. (1980). The influence of logic on conditional reasoning performance. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32, 606-624.
- Prabhakaran V., Narayanan K., Zhao Z. & Gabrieli J.D. (2000). Integration of diverse information in working memory within the frontal lobe. *Nature Neuroscience*, 3(1), 85-90.
- Pylyshyn, Z. W. (1984). *Computation and Cognition: Toward a Foundation for Cognitive Science*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Pylyshyn, Z. (2002). Mental imagery: In search of a theory. *Behavioural and Brain Sciences*, 25, 157-238.
- Ragni, M., Knauff, M. & Nebel, B. (2005) A. Computational theory of spatial reasoning with mental models. *Proc. of the 27th Annual Meeting of the Cognitive Science Society*. (submitted).
- Rauh, R. (2000). Strategies of constructing preferred mental models in spatial relational inference. In W. Schaeken, G. De Vooght, A. Vandierendonck, & G. d'Ydewalle (Eds.), *Deductive reasoning and strategies* (pp. 177–190). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Rauh, R., Hagen, C., Knauff, M., Kuß, T., Schlieder, C. & Strube, G. (2005). From preferred to alternative mental models in spatial reasoning. *Spatial Cognition and Computation* (in Druck)..
- Rauh, R., Schlieder, C. & Knauff, M. (1996). Cognitive bias in spatial relational inference: The role of preferred mental models in reducing inferential complexity. In *Abstracts of Accepted Contributions to the 3rd International Conference on Thinking* (S. 1-5). London: University College.
- Rauh, R., Schlieder, C., & Knauff, M. (1997). Präferierte mentale Modelle beim räumlich-relationalen Schließen: Empirie und kognitive Modellierung. *Kognitionswissenschaft*, 6, 21-34.
- Read, D. E. (1981). Solving deductive-reasoning problems after unilateral temporal lobectomy. *Brain and Language*, 12, 116-127.
- Revlis, R. (1975). Two models of syllogistic inference: Feature selection and conversion. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 14, 180-195.
- Richardson, J. T. E. (1987). The role of mental imagery in models of transitive inference. *British Journal of Psychology*, 78, 189-203.
- Rips, L. J. (1994). *The psychology of proof*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Roberge, J.J. (1976a). The effect of negation on adults' disjunctive reasoning abilities. *Journal of General Psychology*, 91, 23-28.
- Roberge, J.J. (1976b). Reasoning with exclusive disjunctive arguments. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 28, 419-427.
- Roland, P. E., & Gulyás, B. (1995). Visual memory, visual imagery, and visual recognition of large field patterns by the human brain: Functional anatomy by positron emission tomography. *Cerebral Cortex*, 5, 79-93.

- Ruff, C. C., Knauff, M., Fangmeier, T., & Spreer, J. (2003). Reasoning and working memory: Common and distinct neuronal processes. *Neuropsychologia*, 41, 1241-1253.
- Russell, S. & Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (2. Auflage). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Sabbah, P., Simond, G., Levrier, O., Habib, M., Trabaud, V., Murayama, N., Mazoyer, B. M., Briant, J. F., Raybaud, C., & Salamon, G. (1995). Functional magnetic resonance imaging at 1.5 T during sensorimotor and cognitive tasks. *European Journal of Neurology*, 35, 131-136.
- Salmon, W. C. (1983). *Logik*. Stuttgart: Reclam.
- Schlieder, C., & Berendt, B. (1998). Mental model construction in spatial reasoning: A comparison of two computational theories. In U. Schmid, J. F. Krems & F. Wysotzki (Eds.), *Mind modelling: A cognitive science approach to reasoning, learning, and discovery* (pp. 133-162). Lengerich: Pabst Science Publishers.
- Segura, S. Fernandez-Berrocal, P. & Byrne, R.M.J. (2002). Temporal and causal order effects in counterfactual thinking. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*. 55, 1295-1305.
- Shaver, P., Pierson, L., & Lang, S. (1975). Converging evidence for the functional significance of imagery in problem solving. *Cognition*, 3, 359-375.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1997). Working memory: A view from neuroimaging. *Cognitive Psychology*, 33, 5-42.
- Smith, E. E., & Jonides, J. (1999). Storage and executive processes in the frontal lobes. *Science*, 283, 1657-1661.
- Sperry, R. (1973). Lateral Specialization of Cerebral Function in the Surgically Separated Hemispheres. In F. J. McGuigan and R. A. Schoonover (Eds.), *The Psychophysiology of Thinking* (pp. 5-19). New York: Academic Press.
- Stenning, K. (2002). *Seeing reason*. Oxford: Oxford Univ Press.
- Stenning, K., Oberländer, K. (1995). A cognitive theory of graphical and linguistic reasoning: Logic and implementation, *Cognitive Science*, 19, 97-140.
- Sternberg, R. J. (1979). Development patterns in the encoding and comprehension of logical connectives. *Journal of Experimental Child Psychology*, 28, 469-498.
- Sternberg, R. J. (1980). Representation and process in linear syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 119-159.
- Stone, V., Cosmides, L., Tooby, J., Kroll, N. & Knight, R. (2002). Selective Impairment of Reasoning About Social Exchange in a Patient with Bilateral Limbic System Damage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (17), 11531-11536.
- Toms, M., Morris, N., & Ward., D. (1993). Working memory and conditional reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 46A, 679-699.
- Traugott, E.C., ter Meulen, A., Reilly, J.S. & Ferguson, C.A. (1986). *On conditionals*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Trivers, R. L. (1971). The evolution of reciprocal altruism. *Quarterly Review of Biology*, 46, 35-37.
- Ungerleider, L. G. (1996). Functional brain imaging studies of cortical mechanisms for memory. *Science*, 270, 769-775.
- Ungerleider, L. G., & Mishkin, M. (1982). Two cortical visual systems. In D. J. Ingle, M. A. Goodale & R. J. W. Mansfield (Eds.), *Analysis of visual behaviour* (pp. 549-587). Cambridge, MA: MIT Press.
- Uttal, W. R. (2001). *The new phrenology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- van der Henst, J.B. (1999). The mental model theory of spatial reasoning re-examined: The role of relevance in premise order. *British Journal of Psychology*, 90, 73-84.

- Vandierendonck, A. & De Vooght, G. (1997). Working memory constraints on linear reasoning with temporal and spatial contents. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 50A, 803-820.
- Vandierendonck, A., Dierckx, V. & De Vooght, G. (2004). Mental model construction in linear reasoning: Evidence for the construction of initial annotated models. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 57A, 1369-1391.
- Waltz, J. A., Knowlton, B. J., Holyoak, K. J., Boone, K. B., Mishkin, F. S., Menezes Santos, M. de, Thomas, C. R., & Miller, B. L. (1999). A system for relational reasoning in human prefrontal cortex. *Psychological Science*, 10, 119-125.
- Wason, P.C. (1968). Reasoning about a rule. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20, 273-281.
- Wason, P.C & Brooks, P.G. (1979). THOG: The anatomy of a problem. *Psychological Research*, 41, 79-90.
- Wason, P. & Johnson-Laird, P. (1972). *Psychology of Reasoning: Structure and Content*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Wethrick, N. & Gilhooly, K. (1990). The figural effect in syllogistic reasoning. In K. Gilhooly, M.T.G. Keane, R. Logie & G. Erds (Eds.), *Lines of thought: Reflections on the psychology of thinking* (Vol. 1, pp.99-108). London: Wiley.
- Wharton, C., and Grafman, J. (1998). Deductive reasoning and the brain. *Trends in Cognitive Science*, 2, 54-59.
- Whitaker, H.A., Markovits, H., Savary, F., Grou, C., Braun, C. (1991). Inference deficits after brain damage. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 13, 38.
- Wilkins, M.C. (1928). The effect of changed material on the ability to do formal syllogistic reasoning. *Archives of Psychology*, 16, 102.
- Woods, M. (1997). *Conditionals*. Oxford: Clarendon Press.
- Woodworth, R.S. & Sells, S.B. (1935). An atmosphere effect in formal syllogistic reasoning. *Journal of Experimental Psychology*, 18, 451-460.
- Yachanin, S. A. (1986). Facilitation in Wason's selection task: Content and instructions. *Current Psychological Research and Reviews*, 5, 20-29.
- Yang Y., Braine, M.D.S. & O'Brien, D.P. (1998). Some empirical justification of one predicate-logic model. In M.D.S. Braine & D.P. O'Brien (Eds.) *Mental Logic* (pp. 333-365). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Yang, Y. & Johnson-Laird, P.N. (2000). How to eliminate illusions in quantified reasoning. *Memory & Cognition*, 28, 1050-1059.