

Rainer Rothkegel

Die mentale Repräsentation von Distanzen

Dissertation
Universität Tier

Für meine Eltern

Inhalt

Vorwort	7
1 Einführung und Überblick	8
2 Der Begriff der mentalen Repräsentation	10
2.1 Kovarianztheorien	10
2.1.1 Fodors Kausaltheorie	11
2.1.2 Dretskes Kovarianztheorie	12
2.2 Evolutionäre Theorien	13
2.3 Repräsentationen als Isomorphismen	13
2.4 Fazit	20
3 Repräsentationen räumlicher Informationen	22
3.1 Bildhafte und propositionale Repräsentationen	22
3.2 Kategoriale Relationen und Koordinatensysteme	24
3.3 Egozentrische und allozentrische Distanzen	25
3.4 Implizite und explizite Repräsentationen	27
4 Die Geometrie räumlicher Repräsentationen	31
4.1 Meßtheoretische versus psychophysische Fragestellungen	31
4.2 Ist die Frage nach der Geometrie räumlicher Repräsentationen sinnvoll?	32
4.3 Die euklidische Geometrie	35
4.4 Minkowski-Metriken	38
4.5 Sind räumliche Repräsentationen metrisch?	39
4.5.1 Symmetrie	40
4.5.2 Positivität und Dreiecksungleichung	43
4.6 Segmentäre Additivität	44
4.7 Fazit	45
5 Einflußfaktoren auf die subjektive Distanz	46
5.1 Die psychophysische Funktion	46
5.1.1 Die Reperzeptionshypothese	47
5.1.2 Die Transformationshypothese	48
5.1.3 Die Unsicherheitshypothese	49
5.2 Der Merkmalsakkumulationseffekt	50
5.2.1 Das analoge Zeitmesser-Modell	52
5.2.2 Die Skalierungshypothese	52
5.2.3 Die Speicherbedarfs-Hypothese	54
5.3 Der Effekt der Segmentierung	55
5.4 Ein Modell für alle Effekte?	56
6 Distanzen und Reaktionszeiten	60
6.1 Mental-Scanning	60
6.2 Rekognitions-Priming	60
6.3 Reaktionszeiten für Distanzurteile	65
6.4 Fazit	68
7 Reaktionszeitexperimente zur Repräsentation von Pfadlängen	70
7.1 Experiment I	72
7.1.1 Methode	73
7.1.1.1 Versuchspersonen	73
7.1.1.2 Material	73

7.1.1.3	Versuchsplan	74
7.1.1.4	Versuchsablauf.....	75
7.1.2	Ergebnisse.....	76
7.1.3	Diskussion.....	79
7.2	Experiment II.....	80
7.2.1	Methode	81
7.2.1.1	Versuchspersonen	81
7.2.1.2	Material	81
7.2.1.3	Versuchsplan	83
7.2.1.4	Versuchsablauf.....	84
7.2.2	Ergebnisse.....	85
7.2.3	Diskussion.....	87
7.3	Experiment III.....	89
7.3.1	Methode	92
7.3.1.1	Versuchspersonen	92
7.3.1.2	Material	92
7.3.1.3	Versuchsplan	93
7.3.1.4	Versuchsablauf.....	94
7.3.2	Ergebnisse.....	95
7.3.3	Diskussion.....	97
7.4	Diskussion der Experimente I-III	97
8	Überblicksrepräsentationen beim Erlernen von Routen.....	102
8.1	Routenwissen und Überblickswissen	102
8.2	Routenrepräsentationen und Überblicksrepräsentationen	107
9	Reaktionszeitexperimente zur Trennung von Routen- und Überblicksrepräsentationen	112
9.1	Experiment IV.....	113
9.1.1	Methode	113
9.1.1.1	Versuchspersonen	113
9.1.1.2	Material	113
9.1.1.3	Versuchsplan	114
9.1.1.4	Versuchsablauf.....	115
9.1.2	Ergebnisse.....	117
9.1.3	Diskussion.....	119
9.2	Experiment V.....	123
9.2.1	Methode	125
9.2.1.1	Versuchspersonen	125
9.2.1.2	Material	125
9.2.1.3	Versuchsplan	125
9.2.1.4	Versuchsablauf.....	126
9.2.2	Ergebnisse.....	126
9.2.3	Diskussion.....	128
9.3	Diskussion der Experimente IV und V	130
10	Zusammenfassung und Resumee	131
Literatur		136

Vorwort

Die Fähigkeit, uns erfolgreich in der Umwelt zu bewegen und Orte wiederzufinden, an denen wir schon einmal gewesen sind, setzt die Speicherung räumlicher Informationen im Gedächtnis voraus. Diese Fähigkeit ist nicht spezifisch für den Menschen. Sie ist auch im Tierreich allgegenwärtig. Schon Ameisen sind beispielsweise in der Lage, sich beim Auskundschaften der Umwelt die Entfernung und Richtung des Nestes zu merken. Die Allgegenwärtigkeit dieser Fähigkeit bedeutet jedoch nicht, daß es sich dabei um ein triviales Problem handelt. Daß der Aufbau räumlicher Repräsentationen eine komplexe Leistung des menschlichen Geistes ist, ist schon daran zu erkennen, wie oft wir damit scheitern. Wir sind häufig damit überfordert, uns Wege einzuprägen, die Orientierung nicht zu verlieren oder uns Routen im Überblick vorzustellen. Doch gerade dieser Umstand, daß wir Fehler machen und manchmal lange nachdenken müssen, um uns eine räumliche Orientierung zu verschaffen, ermöglicht es zu untersuchen, welche Prozesse bei der Verarbeitung räumlicher Informationen stattfinden und wie diese Informationen repräsentiert werden.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie räumliche Distanzen im Gedächtnis repräsentiert sind. In den hier vorgestellten Experimenten wurde der Zeitbedarf für Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis benutzt, um Rückschlüsse auf die beteiligten Repräsentationen und Prozesse zu ziehen. Das Zustandekommen dieser Arbeit ist ein Resultat der Unterstützung und Anregung verschiedener Personen, denen ich im folgenden danken möchte.

Für vielfältige Unterstützung bei dieser Arbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre in ihren Projekten danke ich meinen Betreuern Karl Friedrich Wender und Axel Buchner. An der Erhebung der Daten waren folgende Personen beteiligt, denen ich an dieser Stelle noch einmal herzlich danken möchte: Kerstin Adrian, Claudius Del Savio, Arnd Görres, Petra Hoppe, Ulla Kern, Simone Knop, Claire Koch, Eva Schmitt, Wolfgang Steinhoff und Maria Wilmer im Rahmen ihres Empiriepraktikums, Markus Schmitz im Rahmen seiner Diplomarbeit und schließlich Oliver Lindemann, Frauke Faßbinder und noch einmal Simone Knop im Rahmen ihrer Tätigkeit als wissenschaftliche Hilfskräfte. Almut Hupbach und André Melzer danke ich für Korrekturen an dieser Arbeit, den anderen Mitgliedern der Abteilung für Allgemeine Psychologie der Universität Trier für Anregungen und Diskussionen, Christian Bermes für philosophische Hinweise aller Art und Christof Körner für meinen trotz perfekter Rahmenbedingungen äußerst unproduktiven Arbeitsaufenthalt in Graz. Schließlich möchte ich noch allen danken, die vor allem in der Endphase dieser Arbeit viel Geduld und Verständnis aufbringen mußten: meinen Eltern, Peter Bak, Gabi Becker und Christiane Schmalen. Doch kein Vorwort ohne Vorsatz: Das wird jetzt alles wieder besser.

1 Einführung und Überblick

Menschen sind in der Lage, sich eine Vielzahl von Informationen über ihre Umwelt zu merken. Dies gilt auch für Distanzen. Wir sind in der Lage, zumindest grob zu schätzen, wie lang der Weg von der eigenen Wohnung bis zum Arbeitsplatz ist. In der Regel können wir einschätzen, welcher von zwei Wegen der kürzere ist. Schwieriger wird es meistens, wenn wir bestimmen sollen, wie weit ein direkter, gerader Weg von einem Ort zum anderen wäre, wenn wir uns zwischen diesen Orten bisher nur auf Wegen bewegt haben, die kompliziert sind und viele Abbiegungen enthalten. Aber selbst in diesen Fällen können wir oft zumindest ungefähr einschätzen, wie weit diese Orte in der Luftlinie auseinander liegen. Dies gelingt uns oft sogar dann, wenn wir uns niemals zwischen diesen beiden Orten hin- und herbewegt haben.

Dieses Wissen spielt eine wichtige Rolle in unserem täglichen Leben. Es beeinflußt unsere Entscheidungen, wohin wir gehen wollen und wie wir am besten dorthin kommen. Die Frage liegt nahe, wie dieses Wissen aufgebaut ist, oder, anders formuliert, wie Distanzen mental repräsentiert sind. Ist beispielsweise die Länge meines täglichen Weges von der Wohnung zum Arbeitsplatz irgendwo in meinem Gedächtnis als einfaches Datum verfügbar? Möglicherweise ist das nicht der Fall, aber ich bin trotzdem in der Lage, diese Distanz abzuschätzen, weil ich über andere Informationen verfüge, aus denen ich die Weglänge ableiten kann. Möglicherweise habe ich Informationen über die Länge einzelner Teilstücke dieses Weges im Gedächtnis abgespeichert, und ich bin dadurch in der Lage, die Länge des gesamten Weges abzuleiten. Vielleicht ist mein Wissen über Distanzen auch indirekt in Form von Bildern oder Landkarten im Gedächtnis gespeichert.

Diese Ideen machen deutlich, daß verschiedene Grade von Unmittelbarkeit vorstellbar sind, in denen Distanzen im Gedächtnis gespeichert sind. Bevor man sich Gedanken macht, ob man das untersuchen kann, muß man sich jedoch zuerst die Frage stellen, ob dieses Konzept der Unmittelbarkeit so präzisiert werden kann, daß es experimentell prüfbar wird. Die Frage nach indirekten versus direkten Repräsentationen setzt wiederum voraus, daß man weiß, wann von einer Repräsentation zu sprechen ist und wann nicht. Was genau ist damit gemeint, wenn ich davon spreche, daß ich eine bestimmte Distanz repräsentiert habe? Diese Frage wird in Kapitel 2 untersucht. In Kapitel 3 werden verschiedene Kriterien vorgestellt, anhand derer sich Hypothesen zur Repräsentation räumlicher Relationen unterscheiden lassen. Unter anderem wird die Frage untersucht, ob man ein Konzept wie die Unmittelbarkeit einer Repräsentation präzise definieren kann.

Im Anschluß daran werden Fragestellungen und Ergebnisse zur Repräsentation von Distanzen vorgestellt. In der Forschung zur Repräsentation von Distanzen lassen sich zwei Fragestellun-

gen unterscheiden. Zum einen kann man nach der Relation zwischen Distanzen in der Welt und Distanzen im Gedächtnis fragen, zum anderen kann man die Relationen zwischen mental repräsentierten Distanzen untereinander untersuchen.

Kapitel 4 widmet sich der zweiten Frage. Bereits in der Schule haben wir gelernt, mit Distanzen zu rechnen. Diese Fertigkeit fußt auf der Geometrie, die Euklid bereits ca. 300 v. Chr. formuliert hat. Zum Beispiel versetzt uns der Satz des Pythagoras in die Lage, die Länge der Hypotenuse in einem rechtwinkligen Dreieck zu berechnen. Aber gilt dieser Satz auch für Distanzen im Gedächtnis? Sind diese Prinzipien fest in unseren Verstand eingebaut, wie Kant nahelegte? Oder geht der menschliche Geist auf ganz andere Weise mit Distanzen um? Es geht in diesem Kapitel also primär um die Beziehungen, die zwischen mental repräsentierten Distanzen herrschen.

In Kapitel 5 wird untersucht, welche Beziehungen zwischen den Distanzen in der Welt und den Distanzen im Gedächtnis vorliegen. Es ist unmittelbar einsichtig, daß große Distanzen in der Welt großen Distanzen im Gedächtnis entsprechen müssen und kleine Distanzen in der Welt auch kleinen Distanzen im Gedächtnis entsprechen müssen, sonst wären wir nicht in der Lage, uns erfolgreich durch die Welt zu bewegen. Das bedeutet jedoch nicht, daß diese Zuordnung frei von Verzerrungen sein muß. In Kapitel 6 wird untersucht, auf welche Weise Distanzen in der Welt auf Distanzen im Gedächtnis abgebildet werden und welche Faktoren diese Abbildung beeinflussen. Die in diesem Kapitel diskutierten Modelle machen Annahmen über die Repräsentationen und Prozesse, die Distanzurteilen zugrunde liegen.

Diese Annahmen wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe von Reaktionszeiten untersucht. Kapitel 6 gibt einen Überblick über den Einsatz von Reaktionszeiten in Untersuchungen zum räumlichen Gedächtnis. In Kapitel 7 werden drei Experimente vorgestellt und diskutiert, die diese Technik verwenden, um Schätzungen von Pfadlängen zu untersuchen. Diese Experimente untersuchen Routenwissen, da Distanzen immer entlang von Routen geschätzt werden. Im Anschluß daran wird Überblickswissen untersucht. Überblickswissen kann näherungsweise als Wissen über räumliche Relationen zwischen Objekten charakterisiert werden, das unabhängig von Routen durch eine Konfiguration ist. Kapitel 8 stellt dieses Konzept vor und diskutiert experimentelle Befunde zur Existenz von Überblickswissen. Die bisherigen Ergebnisse und Konzepte lassen größtenteils keine Rückschlüsse auf Repräsentationen zu. Daher wird das Konzept der Überblicksrepräsentation eingeführt. In Kapitel 9 werden zwei Experimente vorgestellt, die sich der Frage widmen, ob beim Erlernen von Routen Überblicksrepräsentationen entstehen können.

In Kapitel 10 werden die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt und im Hinblick auf die theoretischen Konzepte interpretiert. Darüber hinaus wird diskutiert, ob die verwendete Technik ein geeignetes Mittel darstellt, um Repräsentationsannahmen zu testen.

2 Der Begriff der mentalen Repräsentation

“It was going to be an awful afternoon until Uncle Wilifried thought of Mental Representations (which was a game that we hadn't played for years) and everybody got very excited and we jumped up and down and waved our hands and talked at once and had a perfectly lovely romp” (Fodor, 1991).

Da das Thema dieser Arbeit die Repräsentation von Distanzen ist, soll zunächst geklärt werden, was mit dem Begriff der mentalen Repräsentation gemeint ist. Mit der Frage, wie räumliche Informationen im Gedächtnis repräsentiert sind, setzen sich eine Vielzahl kognitionswissenschaftlicher Studien auseinander. Gefragt wird jedoch meist nur nach dem Format der Repräsentation. Die Voraussetzung, daß es überhaupt mentale Repräsentationen gibt, wird in der Regel nicht in Frage gestellt. Die Annahme mentaler Repräsentation kann durchaus als Grundpfeiler der kognitiven Psychologie angesehen werden (Stillings et al., 1991). Stellt man sich die Frage, was überhaupt gemeint ist, wenn von mentalen Repräsentationen gesprochen wird, so stellt sich schnell heraus, daß es nicht leicht ist, eine Definition zu finden, die allgemein Zustimmung findet.

Ein erster Schritt hin zu einer Definition könnte die Vereinbarung sein, daß eine Repräsentation etwas ist, das *sich auf etwas anderes bezieht*. Diese Definition ist jedoch zu unpräzise, um wirklich nützlich zu sein, da sich sofort die Frage stellt, wie man denn entscheiden soll, ob etwas sich auf etwas anderes bezogen oder gerichtet ist. Bei dieser Konzeption von mentaler Repräsentation handelt es sich um eine *intentionale* Definition, da es darum geht, ob eine Bezugnahme vorliegt. Die Kernannahme einer naturalistischen Theorie des menschlichen Geistes besagt jedoch, daß alle intentionalen Eigenschaften prinzipiell auf nichtintentionale Eigenschaften, wie beispielsweise physikalische Eigenschaften zurückführbar sind. Will man dieser Kernannahme Rechnung tragen, muß es also möglich sein, den Begriff der Repräsentation nichtintentional zu definieren. Zu diesem Problem gibt es in der Kognitionswissenschaft und vor allem in der Philosophie des Geistes verschiedene Lösungsvorschläge.

2.1 Kovarianztheorien

Eine Klasse dieser Theorien, die sogenannten *Kovarianztheorien*, gehen von der zentralen These aus, daß kausale Beziehungen zwischen mentalen Repräsentationen und der Welt den semantischen Inhalt der Repräsentationen bestimmen. Nimmt man einen roten Gegenstand wahr, so wird dadurch das Konzept „Rot“ aktiviert und diese Verursachungsbeziehung sorgt dafür, daß das Konzept „Rot“ für alle Dinge steht, die rot sind. Diese Klasse von Theorien

wird Kovarianztheorien genannt, weil die Präsenz oder Nicht-Präsenz eines Phänomens in der Welt bestimmt, ob die Repräsentation dieses Konzeptes aktiviert wird.

2.1.1 Fodors Kausaltheorie

Fodors (1987) kausale Theorie mentaler Repräsentation hat als Ausgangspunkt eine Theorie, die er als „*krude Kausaltheorie*“ bezeichnet: Ein mentales Symbol S repräsentiert eine Eigenschaft F , wenn ein gesetzmäßiger Zusammenhang von der Art besteht, daß alle Instanzen und nur Instanzen von F Token von S verursachen. Unter einem Token wird dabei eine raumzeitlich lokalisierbare, konkrete Instanz eines Typs verstanden. Im einzelnen würde dies bedeuten, daß beispielsweise das Konzept „Katze“ auf Katzen verweist, weil Katzen und nur Katzen konkrete Instanzen des Konzeptes „Katze“ verursachen.

Diese Definition ist aus zwei Gründen problematisch (Cummins, 1996; Schumacher, 1997). Das erste Problem ist, daß nicht berücksichtigt wird, daß nicht alle Repräsentationen korrekt sind. Wenn beispielsweise ein Hund fälschlicherweise als Katze erkannt wird, handelt es sich um eine Fehlrepräsentation des Hundes. Die krude Kausaltheorie läßt jedoch keinen Raum für Fehlrepräsentationen. Wenn ein mentales Symbol S sowohl von Instanzen der Eigenschaft F (z. B. einer Katze) als auch von Instanzen der Eigenschaft G (z. B. einem Hund) verursacht werden können, dann hat das Symbol S den Inhalt „ F oder G “ (z. B. „ist eine Katze oder ein Hund“). Nach der kruden Kausaltheorie sorgen also Fehlrepräsentationen dafür, daß sich der Inhalt einer Repräsentation ändert. Dieses Problem wird als *Disjunktionsproblem* bezeichnet, und Fodor versucht, es dadurch zu lösen, daß er eine Differenzierung der Kausalbeziehungen zwischen Instanzen eines Typs und Token von Symbolen einführt. Wenn aufgrund einer Fehlrepräsentation eine Instanz der Eigenschaft G zu einem Token des Symbols S führt, dann ist diese Kausalbeziehung *asymmetrisch abhängig* von dem Bestehen einer Kausalrelation zwischen Instanzen der Eigenschaft F und Token des Symbols S .

Diese Asymmetrie zeigt sich in *kontrafaktischen Konditionalsätzen*. Wenn eine Katze kein „Katzen“-Token verursachen kann, dann kann auch ein Hund kein „Katzen“-Token verursachen. Umgekehrt gilt diese Abhängigkeit jedoch nicht: Wenn ein Hund kein „Katzen“-Token verursachen kann, so bedeutet das nicht, daß eine Katze kein „Katzen“-Token verursachen kann. Im Falle von asymmetrisch abhängigen Kausalrelationen ist die abhängige Kausalrelation eine Fehlrepräsentation. Andererseits gibt es symmetrische Kausalrelationen: Ist die Kausalrelation zwischen Instanzen von G und S -Token *symmetrisch abhängig* von der Kausalrelation zwischen F und S -Token, dann ist der Inhalt von S die Disjunktion „ F oder G “. Die Art der Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Kausalrelationen entscheidet also darüber, ob eine (korrekte) Repräsentation oder eine Fehlrepräsentation vorliegt.

Gegen diesen Vorschlag läßt sich jedoch einwenden, daß zur Trennung zwischen Repräsentation und Fehlrepräsentation die Unterscheidbarkeit derselben bereits vorausgesetzt wird. Wenn die Kausalextension eines mentalen Symbols S die Menge aller Instanzen ist, die S -Token verursachen können, dann gehören im obigen Beispiel sowohl F als auch G zur Kausalextension von S . Die Menge der Instanzen, die S -Token hervorrufen können, ist insofern homogen, als die Verursachung von S -Token durch G sich nicht von der Verursachung von S -Token durch F unterscheiden läßt, ohne die zu erklärende Unterscheidung zwischen korrekter Repräsentation und Fehlrepräsentation bereits vorauszusetzen.

Der zweite problematische Aspekt an der kruden Kausaltheorie ist, daß nicht alle Instanzen von F Token von S verursachen müssen. Beispielsweise müssen nicht alle Katzen Token vom Typ „Katze“ verursachen, da nicht alle Katzen wahrgenommen werden. Die Voraussetzung dafür, daß eine Katze ein Token vom Typ „Katze“ verursacht, ist, daß das kognitive System aufmerksam ist, die richtigen Schlüsse zieht und das nötige Wissen besitzt. Würde man diese Einschränkung Fodors Definition von Repräsentation hinzufügen, so würde sie jedoch zirkulär, da die Spezifikation der Bedingungen, unter denen in einem kognitiven System Token eines Symbols verursacht werden, voraussetzt, daß man weiß, was das Symbol repräsentiert. Der Umstand, daß nicht alle Katzen Token vom Typ „Katze“ hervorrufen, ist problematisch für Fodors Theorie, da dadurch impliziert ist, daß die Extension des Symbols „Katze“ die Teilmenge jener Katzen ist, die wahrgenommen werden.

2.1.2 Dretskes Kovarianztheorie

Die Repräsentationstheorie von Dretske (1981; 1988) definiert Repräsentationen ebenfalls über Kovariation. Nach dieser Theorie hat ein kognitiver Zustand eine bestimmte Proposition als Inhalt, wenn dieser Zustand ein perfekter Indikator für den Wahrheitswert dieser Proposition ist: Ein kognitiver Zustand M eines Organismus O hat die Proposition p als Inhalt, wenn die bedingte Wahrscheinlichkeit, daß p wahr ist, gegeben O ist im Zustand M , 1 ist. Diese Konzeption leidet ebenso wie Fodors Kausaltheorie unter dem Mangel, daß sie Fehlrepräsentationen nicht zuläßt. Wenn ein Organismus O im Zustand M ist, obwohl die Proposition p nicht wahr ist, dann hat M auch nicht p zum Inhalt. Dretske versucht, diesen Mangel zu beseitigen, indem er zwischen (idealen) *Lernbedingungen* und *Normalbedingungen* unterscheidet. Unter Lernbedingungen kovariert das Vorkommen des Sachverhaltes p zuverlässig mit dem Auftreten von M . Unter Normalbedingungen kann diese Kovarianz jedoch unzuverlässig sein, womit Fehlrepräsentationen zustande kommen können. Dieser Ansatz bleibt jedoch unbefriedigend, da es zum einen nicht plausibel ist, daß Fehler, die in der Normalbedingung auftreten können, in der Lernbedingung nicht auftreten können, und zum anderen die Unterscheidung zwischen Lern- und Normalbedingungen nicht aufgrund von naturalistischen Kriterien geschieht (Schumacher, 1997).

2.2 Evolutionäre Theorien

Evolutionäre Theorien mentaler Repräsentation zeichnen sich dadurch aus, daß der Inhalt einer Repräsentation durch seine biologische Funktion bestimmt wird. In der Theorie von Millikan (1989) ist ein Sachverhalt dann eine Wahrheitsbedingung für eine Repräsentation, wenn das Vorliegen dieses Sachverhaltes im Laufe der Evolution unter *Normalbedingungen* die biologische Funktion erfüllt hat, die Reproduktion des Trägers der Repräsentation zu gewährleisten. Ein Bientanz würde nach dieser Auffassung deshalb eine Proposition, wie etwa „in Richtung x gibt es Blumen“, zum Inhalt haben, weil er im Laufe der Evolutionsgeschichte die Bienen veranlaßt hat, in Richtung x zu fliegen, und dies nur dann zur Erhaltung der Art beiträgt, wenn man in Richtung x Blumen findet. Die einschränkende Bemerkung, daß dies nur unter Normalbedingungen gelten muß, ist in etwa vergleichbar mit Randbedingungen, die gelten müssen, damit eine Vorhersage zutrifft. Sie bestimmen nicht den Inhalt der Repräsentation. Für das Beispiel des Bientanzes würde zu den Normalbedingungen zählen, daß keine natürlichen Feinde auf dem Weg zu den Blumen lauern oder daß der Wind nicht zu stark weht, um dorthin zu gelangen. Diese Repräsentationstheorie hat den Vorteil, daß sie die Möglichkeit von Fehlrepräsentationen zuläßt. Zu einer Fehlrepräsentation kommt es dann, wenn eine Überzeugung seine biologische Funktion nicht erfüllt. Veranlaßt beispielsweise ein Bientanz eine Biene dazu, in eine Richtung zu fliegen, in der keine Blumen sind, so besagt die repräsentierte Proposition nicht „in Richtung x gibt es keine Blumen“, sondern es handelt sich um eine Fehlrepräsentation der Proposition „in Richtung x gibt es Blumen“. Gegen dieses Konzept lassen sich jedoch andere Einwände erheben (Cummins, 1996). Zum Beispiel lassen sich Fälle konstruieren, in denen Überzeugungen nur dann ihren biologischen Zweck erfüllen, wenn sie falsch sind. Problematisch ist auch die Zurückführung von Überzeugungen auf die Selektionsgeschichte des Trägers. Ein kognitives System, das künstlich geschaffen wurde, hat keine Selektionsgeschichte, womit nach der evolutionären Theorie impliziert ist, daß die Repräsentationen in diesem System keine Inhalte haben. Will man also Repräsentationen nicht auf menschliche oder zumindest biologische Wesen einschränken, läßt sich der Begriff der Repräsentation nicht mehr unter Rückgriff auf die Selektionsgeschichte definieren.

2.3 Repräsentationen als Isomorphismen

In der kognitiven Psychologie hat sich eine andere Auffassung durchgesetzt. Nach dieser Auffassung wird eine Repräsentation als *Isomorphismus* zwischen einer repräsentierten Welt und einer repräsentierenden Welt verstanden (Gallistel, 1990; Palmer, 1978; Scheerer, 1993; Shepard & Chipman, 1970). Isomorphismus läßt sich als Strukturgleichheit übersetzen. In der Mathematik ist ein Isomorphismus als eine bijektive Funktion definiert, die zwei Mengen aufeinander abbildet.

Sowohl die repräsentierte Welt als auch die repräsentierende Welt werden als *Relationensysteme* aufgefaßt. Ein Relationensystem (auch *Relativ*) besteht aus einer Menge A und einer Menge von n (endlich stelligen) Relationen R_1, \dots, R_n auf A , abgekürzt $\langle A; R_1, \dots, R_n \rangle$. Sei m_i die Stelligkeit der Relation R_i . Dann heißt die Folge (m_1, \dots, m_n) der *Typ* des Relativs. Zwei Relationensysteme gleichen Typs $\langle A; R_1, \dots, R_n \rangle$ und $\langle B; S_1, \dots, S_n \rangle$ sind genau dann *isomorph*, wenn es eine bijektive Funktion $f: A \rightarrow B$ gibt, die die beiden Mengen so aufeinander abbildet, daß gilt

$$R_i(a_1, \dots, a_m) \leftrightarrow S_i(f(a_1), \dots, f(a_m)), i=1, \dots, n. \quad (2.1)$$

Ein Isomorphismus ist also eine Abbildung einer Menge in eine andere, die die Relationen innerhalb dieser Mengen quasi mit abbildet. Isomorphe Abbildungen werden auch *strukturertreu* genannt, da die Beziehungen zwischen den Elementen erhalten bleiben. Auf mentale Repräsentationen übertragen bedeutet das, daß jedem Element der repräsentierten Welt genau ein Element der repräsentierenden Welt zugeordnet sein muß. Zum anderen müssen in einer Repräsentation gewisse Beziehungen zwischen den Elementen der repräsentierten Welt eine Entsprechung in der repräsentierenden Welt haben. Damit wird deutlich, daß die Frage, ob ein bestimmter Ausschnitt der Welt in einem kognitiven System repräsentiert ist, unterspezifiziert ist. Um diese Frage sinnvoll stellen zu können, muß man angeben, hinsichtlich welcher Relationen diese Elemente repräsentiert sein sollen.

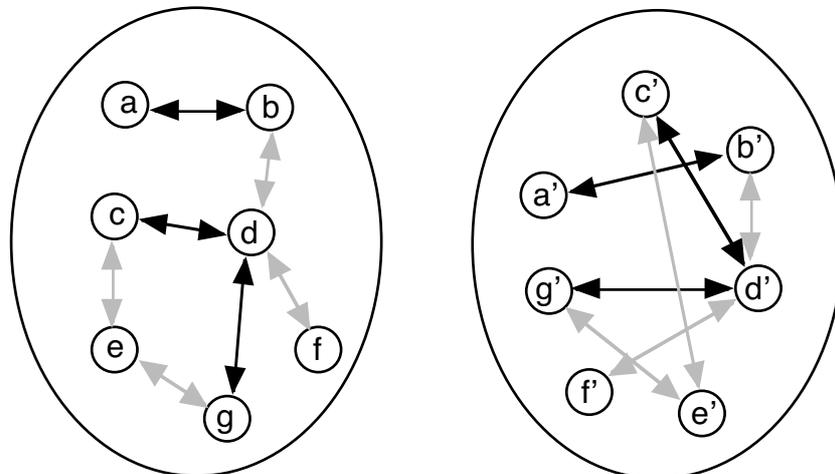


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung zweier isomorpher Relationensysteme. Schwarze Pfeile stellen zweistellige Relationen dar. Graue Pfeile stellen dreistellige Relationen dar.

Können wir uns mit dieser Definition zufrieden geben? Anders gefragt, ist ein Isomorphismus eine notwendige und hinreichende Bedingung dafür, daß wir von einer mentalen Repräsentation sprechen würden? Führt man sich Beispiele vor Augen, bei denen wir das Vorliegen einer mentalen Repräsentation konstatieren würden, so bemerkt man schnell, daß ein Isomorphismus ein zu strenges Kriterium ist. Repräsentationen können ungenau und fehlerhaft sein. In diesen Fällen liegt kein Isomorphismus vor.

Eine Möglichkeit, die Definition mentaler Repräsentationen etwas weniger streng zu gestalten, besteht darin, anstelle eines Isomorphismus einen *Homomorphismus* zu fordern. Ein Homomorphismus unterscheidet sich von einem Isomorphismus dadurch, daß die Abbildung $f: A \rightarrow B$ nicht bijektiv sein muß. Damit ist erlaubt, daß mehrere Elemente der repräsentierten Welt einem Element der repräsentierenden Welt zugeordnet werden. Allerdings müssen für alle Elemente der repräsentierten Welt, die in ein und dasselbe Element der repräsentierenden Welt abgebildet werden, dieselben Relationen gelten, das heißt, die repräsentierten Elemente dürfen sich hinsichtlich keiner der Relationen unterscheiden. Ein Homomorphismus ist also insofern schwächer als ein Isomorphismus, als er Fehler in der Zuordnung von Elementen der repräsentierten Welt zu Elementen der repräsentierenden Welt zuläßt, die dadurch entstehen, daß bestimmte Eigenschaften, die einzelne Elemente voneinander unterscheidbar machen, nicht wahrgenommen oder nicht berücksichtigt werden.

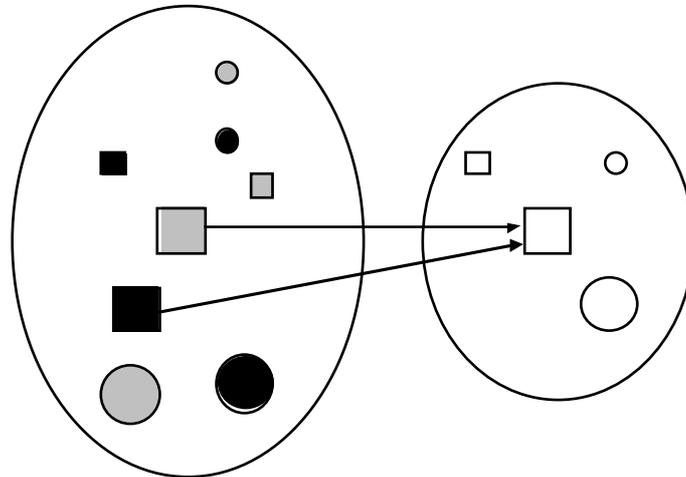


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung zweier Relationensysteme, die homomorph, aber nicht isomorph sind. Beide Relationensysteme bestehen aus den Äquivalenzrelationen „gleiche Form“ und „gleiche Größe“. Der Homomorphismus ordnet zwei Elemente gleicher Form und Größe im linken Relativ jeweils einem Element derselben Form und Größe im rechten Relativ zu.

Die Zurückführung des Repräsentationsbegriffes auf Homomorphismen hat jedoch nur scheinbar Vorteile gegenüber der Isomorphismusdefinition. Da nicht festgelegt ist, was als ein Element in der repräsentierten Welt zu betrachten ist, kann jeder Homomorphismus in einen Isomorphismus umgewandelt werden, indem man die Elemente anders definiert. In der obigen Abbildung werden die Elemente der repräsentierten Welt (linkes Relationensystem) durch unterschiedliche Ausprägungen in den drei Dimensionen „Form“, „Größe“ und „Farbe“ unterschieden, während die Elemente im Repräsentat (rechtes Relationensystem) sich nur durch Form und Größe unterscheiden. Da einem Element des Repräsentats mehrere Elemente der repräsentierten Welt zugeordnet werden, handelt es sich nicht um einen Isomorphismus, sondern um einen Homomorphismus. Beispielsweise können sich Objekte in der repräsentierten Welt auf einer Dimension unterscheiden, die für Menschen nicht wahrnehmbar ist und die deshalb auch nicht in die Repräsentation eingehen kann. Gegenstände können nach dem

Ausmaß ihrer Alpha-Strahlung unterschieden werden, obwohl diese Strahlung nicht unmittelbar wahrnehmbar ist, und deshalb in der Regel nicht repräsentiert wird. Die Dimension „Alpha-Strahlung“ in der repräsentierten Welt hat somit keine Entsprechung in der repräsentierenden Welt. Dadurch können verschiedene Gegenstände, die sich nur in ihrer Alpha-Strahlung unterscheiden, auf ein und denselben Gegenstand in der repräsentierten Welt abgebildet werden. Somit ist die Abbildung homomorph, aber nicht isomorph. Der Homomorphismus kann jedoch in einen Isomorphismus umgewandelt werden, indem diejenigen Dimensionen, die im Repräsentat keine Entsprechung haben, bei der Definition eines Elementes in der repräsentierten Welt nicht berücksichtigt werden. Definiert man im obigen Beispiel zwei Objekte der repräsentierten Welt als identisch, wenn sie sich hinsichtlich der Form und der Größe nicht unterscheiden, so wird aus der homomorphen Abbildung ein Isomorphismus. Die Zurückführung des Repräsentationsbegriffes auf Homomorphismen löst also keines der Probleme des Isomorphismusbegriffes.

Wie in vielen anderen Konzeptionen mentaler Repräsentation (siehe z. B. Schumacher, 1997) besteht auch in der Isomorphismusdefinition das Problem, daß sie fehlerhafte Repräsentationen nicht zuläßt. Sobald eine Relation in der Welt keine Entsprechung in der repräsentierten Welt findet, kann man nicht davon sprechen, daß sich ein Fehler in der Repräsentation befindet, sondern muß schließen, daß diese Relation nicht repräsentiert ist. Doch wie kommen wir auf die Idee, daß es sich bei einem Element in der repräsentierenden Welt um das Repräsentat eines bestimmten Elements der repräsentierten Welt handelt, wenn dieses Element nicht in denselben Relationen zu anderen Elementen steht? Vermutlich liegt die Antwort darin, daß der größte Teil der Relationen in der repräsentierten Welt eine Entsprechung hat. Im Extremfall würde für alle bis auf eine Relation die relationale Struktur für das Element der repräsentierenden Welt genau dieselbe sein wie die für das Element der repräsentierten Welt. Zusätzlich würde für die eine Relation, die den Isomorphismus verletzt, gelten, daß sie in allen bis auf einem Tupel deckungsgleich mit der entsprechenden Relation in der repräsentierten Welt ist. In diesem Fall liegt es nahe, zu sagen, daß die Repräsentation einen Fehler enthält, insofern als die Relation R_x ein falsches Element enthält. Streng genommen müßte man jedoch diese Relation R_x aus dem Relationensystem herausnehmen, um überhaupt noch von einer Repräsentation sprechen zu können. Um fehlerhafte Repräsentationen zu erlauben, müßte die Definition von Repräsentationen als Isomorphismen also um ein Fehlerkonzept erweitert werden. Die Frage, wie das geschehen kann, ist jedoch noch nicht gelöst. Es dürfte schwierig, wenn nicht gar unmöglich sein, eine derartige Definition zu finden, die weiterhin eine trennscharfe Entscheidung darüber zuläßt, wann ein Relationensystem ein anderes repräsentiert und wann nicht.

In einer anderen Hinsicht ist die Isomorphismusdefinition möglicherweise zu schwach. Man kann für zwei Mengen gleicher Mächtigkeit Isomorphismen definieren, die so schwach sind,

daß sie fast immer gelten. Beispielsweise ist den Anforderungen eines Isomorphismus schon Genüge getan, wenn es auf beiden Mengen jeweils eine Identitätsrelation gibt: $R(x,y)$ gdw. $x=y$. Existiert auf beiden Mengen jeweils eine derartige Relation, so ist jede beliebige bijektive Abbildung der beiden Mengen aufeinander ein Isomorphismus. Damit kann man jedoch für alle Mengen gleicher Mächtigkeit sagen, daß sie einander repräsentieren. Repräsentationsaussagen werden damit nahezu bedeutungslos. Um Repräsentationen über Isomorphismen definieren zu können, müßte also gefordert werden, daß zumindest eine der Relationen, die aufeinander abgebildet werden, nicht „trivial“ ist. Eine Schwierigkeit dürfte darin liegen, formal festzulegen, wann eine Relation trivial ist und wann nicht. Als Minimalforderung könnte man festsetzen, daß nichttriviale Relationen auf einer Menge ungleich dem kartesischen Produkt der Menge und gleichzeitig ungleich der leeren Menge sein müssen. Dieses Kriterium ist jedoch nicht stark genug, da es beispielsweise die Identitätsrelation in obigem Beispiel noch nicht ausschließt.

Eine weitere Variante trivialer Isomorphismen kann auf Relationensystemen definiert werden, deren Objektmengen einelementig sind. Dies wird in der Definition des Isomorphismus nicht ausgeschlossen, jedoch macht es die Definition von Repräsentationen unbrauchbar. Eine Relation auf einer Menge der Mächtigkeit eins ist entweder die leere Menge oder sie enthält als einziges Element ein Tupel, das das einzige Element sich selbst zuordnet. Damit ist es trivial, für eine beliebige mentale Entität eine Menge isomorpher Relationen zu finden. Läßt man einelementige Objektmengen zu, kann somit jede beliebige mentale Entität jede beliebige Entität in der repräsentierten Welt repräsentieren.

Ein weiteres Problem der Isomorphismusdefinition ist, daß sie offen läßt, ob die Relationen zwischen den Elementen in der repräsentierten Welt durch tatsächliche Prozesse realisiert sein müssen. Genügt es, über arbiträre Eigenschaften der Repräsentate Relationen zu definieren, die sich auf Relationen zwischen Repräsentanda abbilden lassen, oder muß man einen mentalen Prozeß fordern, der diese Eigenschaften verarbeitet und durch sein Ergebnis die mentalen Entitäten einander zuordnet? Um das Problem anschaulicher zu machen, kann man sich als Repräsentandum eine Menge von Linien auf einem Blatt Papier vorstellen, die einander in verschiedenen Winkeln schneiden. Nehmen wir an, daß diese Linien in einer bildhaften Struktur repräsentiert werden. Nun kann man für die Menge der Linien auf dem Papier verschiedene Relationen definieren, beispielsweise die Relation „schneiden sich im 60 Grad Winkel“, die alle Linien einander zuordnet, die sich in einem Winkel von 60 Grad schneiden. Dieselbe Relation kann auch über den bildhaft repräsentierten Linien definiert werden. Damit wäre der Isomorphismusdefinition Genüge getan, und man kann behaupten, daß die Linien hinsichtlich der Relation „schneiden sich im 60 Grad Winkel“ repräsentiert sind. Es ist jedoch vorstellbar, daß die Prozesse, die auf der bildhaften Linienrepräsentation

arbeiten, gar nicht in der Lage sind, zu bestimmen, ob sich zwei Linien im 60 Grad Winkel schneiden.

Kann man in diesem Fall trotzdem von einer mentalen Repräsentation sprechen? Falls man diese Frage bejaht, müßte man beispielsweise einer Person, die Peanos Axiome der natürlichen Zahlen repräsentiert hat, auch zuschreiben, daß sie alle mathematischen Theoreme, die sich daraus ableiten lassen, repräsentiert hat. Dies erscheint auf den ersten Blick unsinnig, wird aber dann vertretbar, wenn man eine strikte Trennung zwischen den Begriffen „Repräsentation“ und „Wissen“ aufrechterhält. Versteht man unter Wissen die Menge von Sätzen, die ein kognitives System zu formulieren in der Lage ist, so impliziert die Tatsache, daß etwas repräsentiert ist, nicht mehr, daß man darüber etwas weiß. Diese Konzeption ist durchaus sinnvoll, wenn man nicht-mentale Repräsentationen betrachtet. Wenn eine Photographie eines Elefanten einen Elefant repräsentiert, so bedeutet das nicht, daß das Photopapier etwas über Elefanten weiß.

Die Alternative wäre, für alle Relationen auf mentalen Entitäten zu fordern, daß sie durch mentale Prozesse implementiert sein müssen. Dies hätte den Vorteil, daß es ein Kriterium dafür gibt, wann eine Relation vorliegt. In der Mathematik ist eine Relation auf einer Menge als Teilmenge des kartesischen Produkts dieser Menge definiert. Welche Elemente diese Teilmenge beinhaltet, ist dabei nicht von Belang. Es muß keine sinnvolle Zuordnungsvorschrift geben, die einzelne Elemente einer Menge aufgrund irgendwelcher Eigenschaften dieser Elemente einander zuordnet. Deshalb ist es nicht sinnvoll zu fragen, ob eine bestimmte Relation auf der Menge der mentalen Entitäten existiert. Relationen können beliebig definiert werden. Fordert man jedoch, daß Relationen durch mentale Prozesse implementiert sein müssen, so sind sie nicht mehr arbiträr. Diese Konzeption ist jedoch ebenfalls unbefriedigend, da sie die begriffliche Trennung zwischen Repräsentation und Prozeß untergräbt. Vom Standpunkt der Forschung zur Künstlichen Intelligenz aus gesehen, sind Repräsentationen identisch mit Daten (Scheerer, 1993). Durch die Forderung, daß Relationen auf Daten durch Prozesse implementiert sein müssen, wäre es nicht mehr möglich, konzeptuell zwischen Repräsentations- und Prozeßannahmen zu trennen, da eine Repräsentationsannahme bereits Prozeßannahmen beinhaltet.

Zudem wird das Problem, daß auf jeder Menge beliebige Relationen definiert werden können, ebenfalls nicht vollständig gelöst. Die Forderung, daß Relationen durch Prozesse implementiert sein müssen, sorgt zwar dafür, daß die Relationen auf der Menge mentaler Entitäten nicht mehr beliebig sind, die Relationen in der Welt bleiben jedoch weiterhin arbiträr. Damit kann für eine Menge mentaler Entitäten, auf der eine Menge mentaler Prozesse arbeitet, eine beliebige Menge gleicher Mächtigkeit von Objekten in der Welt definiert werden, die die mentalen Entitäten repräsentiert, da die Relationen in der Welt immer so definiert werden

können, daß sie den Relationen auf den mentalen Entitäten entsprechen. Es läßt sich also nicht vermeiden, für die Relationen zusätzliche Kriterien einzuführen, etwa, daß sie durch Eigenschaften der Elemente einer Menge definiert sind. Führt man diese zusätzlichen Kriterien jedoch ein, so ergibt sich keine Notwendigkeit mehr für die Forderung, daß Relationen auf mentalen Entitäten durch Prozesse realisiert sein müssen. Es spricht also einiges gegen die Forderung, daß Relationen auf mentalen Entitäten durch Prozesse implementiert sein müssen.

Die Vorstellung, ein einfacher Isomorphismus zwischen einem Objekt der repräsentierten Welt und einem Objekt der Repräsentation reiche aus, um das Konzept der Repräsentation zu definieren, wird auch von Shepard und Chipman (1970) kritisiert. Für eine Menge von Neuronen, die das Konzept „Quadrat“ repräsentiert, zu fordern, daß diese Neuronen quadratisch angeordnet sein müssen, trägt nichts zu der Erklärung bei, warum ein Quadrat in der repräsentierten Welt auch tatsächlich als Quadrat erkannt und benannt wird. Der von den Autoren vorgeschlagene Ausweg besteht darin, Repräsentationen als Isomorphismen zweiter Ordnung zu definieren:

“The crucial step consists in accepting that the isomorphism should be sought – not in the first order relation between (a) an individual object, and (b) its corresponding internal representation – but in the second order relation between (a) the relations among alternative external objects, and (b) the relations among their corresponding internal representations” (Shepard & Chipman, 1970, S. 2).

Was von den Autoren hier als Isomorphismus zweiter Ordnung vorgeschlagen wird, entspricht jedoch genau der Standarddefinition des Isomorphismus. Ein Isomorphismus ist schon per definitionem eine Funktion, die Relationen einander zuordnet. Sie kritisieren, daß es unsinnig ist zu fordern, daß die Eigenschaften eines Quadrates in der mentalen Repräsentation erhalten bleiben müssen. Dies ist in der Tat nicht sinnvoll, wird jedoch von der Definition des Isomorphismus auch nicht gefordert. Es ist jedoch durchaus möglich, mentale Repräsentationen von Quadraten ausfindig zu machen, ohne Beziehungen zu anderen geometrischen Objekten ins Spiel zu bringen. So kann man ein Quadrat beispielsweise als eine vierelementige Menge von Seiten definieren, für die bestimmte Relationen erfüllt sein müssen, nämlich beispielsweise eine Identitätsrelation bezüglich der Seitenlänge, eine Relation der Rechtwinkligkeit für angrenzende Seiten und eine Relation der Parallelität für gegenüberliegende Seiten. Um von einer mentalen Repräsentation des Konzepts „Quadrat“ zu sprechen, genügt es, eine Menge von Relationen auf mentalen Entitäten ausfindig zu machen, die sich den genannten Relationen eineindeutig zuordnen lassen. Darüber hinaus gibt es durchaus Beispiele für Isomorphismen erster Ordnung. So werden visuelle Reize im visuellen Kortex retinotrop repräsentiert, das heißt, die räumliche Verteilung der Erregung der Nervenzellen im Kortex entspricht (weitgehend) der räumlichen Verteilung der Aktivierung retinaler Zellen.

2.4 Fazit

Bei den in diesem Kapitel vorgestellten sogenannten Repräsentationstheorien handelt es sich genau genommen nicht um Theorien, sondern um Definitionen. Es ist daher unsinnig zu fragen, welche Repräsentationstheorie zutrifft, denn Definitionen haben keinen Wahrheitswert. Das bedeutet jedoch nicht, daß es unmöglich ist, gute von schlechten Definitionen zu trennen. Ein wichtiges Kriterium ist, ob eine Definition präzise genug ist, um in jedem Fall entscheiden zu können, ob es sich um eine Repräsentation handelt oder nicht. Dieses Kriterium ist für eine intentionale Definition nicht erfüllt, da sich wohl kaum ein Konsens dazu herbeiführen läßt, ob etwas für etwas anderes steht, ohne weitere Kriterien dafür in der Hand zu haben. Ein anderes, wichtiges Kriterium ist, ob die Extension des definierten Begriffes sich mit der Extension des vorwissenschaftlichen Begriffes deckt, der präzise gefaßt werden soll. Bei allen hier vorgestellten Versuchen, den Begriff der Repräsentation mit Hilfe nichtintentionaler Begriffe zu definieren, treten an dieser Stelle ernsthafte Probleme auf.

Kovarianztheorien haben mit dem Problem zu kämpfen, daß keine vollständige Kovariation zwischen dem Auftreten eines Phänomens und dem Hervorrufen einer Repräsentation dieses Phänomens vorliegen muß. Die bisherigen Versuche, Abweichungen von dieser perfekten Kovariation mit Hilfe nicht intentionaler Begriffe zu erfassen, kann man als gescheitert betrachten. Evolutionäre Theorien lassen zwar Raum für Fehlrepräsentationen, aber sie sind unter anderem deshalb problematisch, da Repräsentationen nur durch einen Rekurs auf die Selektionsgeschichte des Trägers der Repräsentation faßbar sind. Dieser Umstand macht diese Definition für eine computationale Theorie kognitiver Vorgänge unbrauchbar. Die Zurückführung des Repräsentationsbegriffs auf einen Iso- oder Homomorphismus ist zunächst ein attraktiver Lösungsvorschlag, da man einerseits auf einen präzise definierten Begriff zurückgreift und andererseits mit diesem Begriff eine weites Feld von Repräsentationsphänomenen abdecken kann, das auch nicht-mentale Repräsentationen umfaßt. Die Isomorphismusdefinition läßt jedoch ebenso wie die Kovarianztheorien keinen Raum für Fehlrepräsentationen. Zudem sind Isomorphismen zu abstrakt definiert, um Fälle, in denen man nicht von einer Repräsentation sprechen würde, auszuschließen.

Es stellt sich die Frage, welche Implikationen diese Probleme für das Unterfangen haben, eine nicht intentionale Definition von Repräsentation zu finden. Möglicherweise muß man einfach akzeptieren, daß ein nicht intentional definierter Repräsentationsbegriff eine andere Extension besitzt als unser naiver, intentionaler Begriff. Das hieße beispielsweise, daß man sich von dem Konzept der Fehlrepräsentation verabschiedet. Eine andere Möglichkeit wäre, das Vorhaben einer naturalistischen Erklärung aufzugeben. So steht beispielsweise Putnam, früher einer der führenden Vertreter des Naturalismus, mittlerweile dem Versuch, intentionale Begriffe zu eliminieren, skeptisch gegenüber.

„Es hat nicht den Anschein, als könne das Intentionale ohne weiteres auf das Nichtintentionale zurückgeführt werden, sondern es beginnt so auszusehen, als dringe das Intentionale sogar in unsere Beschreibungen des Nichtintentionalen ein, als sei das Intentionale (oder vielmehr das Kognitive) in gewissem Maße allgegenwärtig“ (Putnam, 1997, S. 81).

Daneben gibt es insbesondere in der Philosophie eine ganze Reihe von Autoren, die den Begriff der Repräsentation für überflüssig erklären. Die Kritik am Repräsentationalismus geht jedoch teilweise an den hier geschilderten Problemen vorbei, da sie sich an einem sehr naiven Repräsentationsbegriff orientiert (Mormann, 1997). In der vorliegenden Arbeit soll die Isomorphismusdefinition mentaler Repräsentation beibehalten werden, wobei allerdings triviale Isomorphismen ausgeschlossen sein sollen und fehlerhafte Abbildungen zugelassen werden.

3 Repräsentationen räumlicher Informationen

“Different representations make different information explicit and, hence, are useful for different purposes” (Kosslyn et al., 1989, S. 723).

Die im letzten Kapitel diskutierten Repräsentationstheorien lassen offen, welche Fakten repräsentiert werden und in welchem Format sie repräsentiert werden. Repräsentationen räumlichen Wissens lassen sich in verschiedenen Dimensionen unterscheiden, die im folgenden vorgestellt werden sollen.

3.1 Bildhafte und propositionale Repräsentationen

Das Konzept bildhafter Repräsentationen ist durch die introspektive Beobachtung motiviert, daß es Erinnerungen gibt, die nahe an der ursprünglichen Wahrnehmung des erinnerten Sachverhalts sind. Für diese wahrnehmungsnahen Erinnerungen wurde der Begriff „*Imagery*“ geprägt. Für den Bereich der visuellen Wahrnehmung bedeutet dies, daß Erinnerungen an visuelle Eindrücke dem ursprünglichen Wahrnehmungseindruck des erinnerten Bildes gleichen. Imagery ist jedoch nicht an die visuelle Vorstellung gebunden, sondern auch in anderen Modalitäten, wie etwa der akustischen, taktilen oder olfaktorischen zu beobachten.

Am weitesten entwickelt ist diese Theorie jedoch in Bezug auf die visuelle Modalität, hauptsächlich durch die Arbeiten von Paivio und Kosslyn (Kosslyn, 1973; 1976; 1981; 1988; Kosslyn, Ball & Reiser, 1978; Kosslyn, Holtzman, Farah & Gazzaniga, 1985; Kosslyn, Pick & Fariello, 1974; Kosslyn, Pinker, Smith & Shwartz, 1979; Kosslyn & Pomerantz, 1977; Paivio, 1971; 1975). Paivio unterscheidet in seiner *Dualen Kodierungstheorie* zwischen einem verbalen Kode und einem nonverbalen Kode, in dem Sachverhalte wahrnehmungsnah repräsentiert werden. Das Postulat eines wahrnehmungsnahen Kodes stützt sich auf Befunde, daß Bilder von Objekten leichter zu erinnern sind als Namen, und daß die Instruktion, abstrakte Formen bildhaft zu enkodieren, deren Wiedererkennbarkeit fördert. Kosslyn postuliert einen visuellen Speicher als Teil des Gedächtnissystems, in dem Informationen analog enkodiert werden, und der funktional einem Koordinatensystem gleicht. Baddeley unterteilt das Arbeitsgedächtnis in eine *phonologische Schleife* und einen *visuell-räumlichen Speicher*¹ (siehe z. B. Baddeley, 1990). Diese Theorie wird unter anderem durch Interferenzexperimente gestützt, die zeigten, daß das Behalten verbaler Inhalte durch phonologische Aufgaben (wie beispielsweise rückwärts zählen) gestört wird, während es durch visuell-räumliche Aufgaben weitgehend unbeeinflusst bleibt. Für das Behalten visuell-räumlicher Informationen gilt umgekehrt, daß das Behalten visuell-räumlicher Inhalte durch visuell-

¹ engl.: visuo-spatial sketchpad

räumliche Aufgaben gestört wird, während es durch phonologische Aufgaben weitgehend unbeeinflusst bleibt.

Kosslyn stützte seine These auf *Mental-Scanning-Experimente*. In *Mental-Scanning-Experimenten* sollen die Versuchspersonen ein Bild im Gedächtnis mental absuchen. Die Zeit, die benötigt wird, um von einem Anfangspunkt zu einem Zielpunkt zu gelangen, war in diesen Experimenten abhängig von der räumlichen Distanz zwischen den beiden Punkten. Die wohl am häufigsten als Stützung für die These analoger Repräsentationen zitierten Befunde stammen aus Experimenten zu mentaler Rotation von Shepard und seinen Mitarbeitern (einen Überblick gibt Shepard, 1988). In diesen Studien zeigte sich, daß die Zeit, die benötigt wird, um zu entscheiden, ob zwei Objekte unterschiedlicher Orientierung identisch sind, linear mit dem Rotationswinkel zwischen den Objekten anstieg. Dieser Befund deckt sich mit der Annahme, daß sich Personen die Rotation der Objekte im Geiste vorstellen.

Die Vorstellung analoger, bildhafter Repräsentationen blieb jedoch nicht unwidersprochen. Reaktionszeiten für mentale Rotationen werden auch von anderen Faktoren als dem Rotationswinkel, beispielsweise der Komplexität der Figuren, beeinflusst, und der Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmendem Rotationswinkel könnte auch auf die ansteigende Komplexität mentaler Berechnungen zurückzuführen sein, die keine kontinuierliche Rotation der Objekte realisieren (siehe Millar, 1994). An Kosslyns *Mental-Scanning Experimenten* wurde kritisiert, daß die ansteigenden Reaktionszeiten mit zunehmender Distanz möglicherweise nur das Wissen der Versuchspersonen über Bewegung von Gegenständen in der physikalischen Welt widerspiegeln. Pylyshyn (1981) argumentierte, diese Aufgabe sei kognitiv penetrierbar, das heißt durch konzeptgesteuerte Prozesse beeinflussbar, und daher nicht als Beleg für eine Repräsentationsannahme zu gebrauchen. Nach der Auffassung von Pylyshyn lassen sich die angeblichen Belege für imaginale Repräsentationen auch durch ein Modell propositionaler Kodierung erklären, das annimmt, daß räumliche Relationen ausschließlich in abstrakten Propositionen enkodiert werden. Der angeblich räumliche Charakter bildhafter Vorstellungen ist nach dieser Auffassung nichts anderes als das Resultat nicht explizit gemachten Wissens über räumliche Relationen. Mentale Bilder sind nur phänomenale Beschreibungen von Bewußtseinszuständen, sollten aber nicht als Repräsentationsannahme mißbraucht werden, da sie keinen Erklärungswert besitzen.

Die als *Imagery-Debatte* bekannte Kontroverse zwischen den Vertretern analoger und propositionaler Repräsentationen spaltete die Kognitive Psychologie in zwei Lager und ist bis heute zu keinem befriedigendem Abschluß gekommen (siehe z. B. Millar, 1994). In einem Teil der wissenschaftlichen Gemeinde hat sich mittlerweile die Auffassung durchgesetzt, daß diese Debatte fruchtlos ist. Möglicherweise sind die Theorien analoger und propositionaler Kodierung inkommensurabel im Sinne Kuhns (1976), das heißt, sie lassen sich prinzipiell nicht

gegeneinander testen. So argumentiert Anderson (1978) beispielsweise, daß sich Repräsentationsannahmen prinzipiell nicht gegeneinander testen lassen. In seinem *Mimikri-Theorem* versucht er zu zeigen, daß sich zwei Repräsentationsformate *A* und *B* auf Verhaltensebene prinzipiell nicht gegeneinander testen lassen, da Repräsentationen vom Typ *A* immer als Teil des Abrufprozesses temporär in das Format *B* umkodieren lassen, um ein Verhalten zu zeigen, das nicht direkt aus *A*, jedoch aus *B* ableitbar ist. Diese Auffassung blieb jedoch ebenfalls nicht unwidersprochen (Pylyshyn, 1979).

Kosslyn ist mittlerweile dazu übergegangen, Evidenz für imaginale Repräsentationen aus Computersimulationen und neurophysiologischen Studien zu sammeln (Kosslyn, 1994). Durch Verfahren wie *PET* (Positronen-Emissions-Tomographie) oder *fMRI* (functional magnetic resonance imaging) kann beispielsweise der cerebrale Blutfluß sichtbar gemacht werden. Dadurch kann festgestellt werden, welche Bereiche im Gehirn durch eine bestimmte Aufgabe besonders beansprucht werden. Diese Studien gaben Hinweise darauf, daß das Areal V1 des visuellen Kortex, das eine retinotrope Organisation visueller Eindrücke aufweist, auch in visuellen Vorstellungen aus dem Gedächtnis beteiligt ist. In Experimenten, in denen Versuchspersonen sich Buchstaben unterschiedlicher Größe vorstellen sollten, konnte gezeigt werden, daß das Aktivierungsmuster im Areal V1 von der Größe der Buchstaben abhing. Bei großen Buchstaben wurde der anteriore Teil von V1, der die Aktivierung parafovealer Retinazellen repräsentiert, stärker aktiviert als bei kleinen Buchstaben. Umgekehrt wurde bei kleinen Buchstaben der posteriore Teil von V1, der die Aktivierung fovealer Retinazellen repräsentiert, stärker aktiviert als bei kleinen Buchstaben. Befunde wie dieser lassen Kosslyn zu dem Schluß kommen, die *Imagery-Debatte* sei in seinem Sinne gelöst.

3.2 Kategoriale Relationen und Koordinatensysteme

Experimente mit lateralisierter Darbietung räumlicher Anordnungen deuten darauf hin, daß räumliche Relationen auf zwei verschiedene Arten repräsentiert werden. *Kategoriale Repräsentationen* spezifizieren die Relationen zwischen Objekten in abstrakter Weise, ohne auf Distanzen Bezug zu nehmen. Beispiele für kategoriale Relationen sind „links von“, „rechts von“, „auf“ oder „unter“. *Koordinaten-Repräsentationen* kodieren dagegen die Lage von Objekten in relativ präzisen, parametrischen Einheiten. Kosslyn vertritt die Auffassung, daß kategoriale Repräsentationen im Gehirn linkshemisphärisch lokalisiert sind, während Koordinaten-Repräsentationen rechtshemisphärisch lokalisiert sind.

Um diese Auffassung zu prüfen, wurden einfache Zeichnungen tachistoskopisch entweder in die rechte oder die linke Gesichtsfeldhälfte eingeblendet (Kosslyn et al., 1989). In einem der Experimente bestanden die Zeichnungen beispielsweise aus dem Umriß einer irregulär geformten Figur und einem Punkt, der entweder auf dem Umriß lag oder sich in einer von

zwei verschiedenen Entfernungen vom Umriß befand. In der *kategorialen Aufgabe* sollten die Versuchspersonen entscheiden, ob sich der Punkt auf der Linie befand. In der *Distanzaufgabe* sollten die Versuchspersonen dagegen entscheiden, ob sich die Entfernung des Punktes von dem Umriß unterhalb oder oberhalb eines festgelegten Distanzintervalls befand.

In der kategorialen Aufgabe waren die Reaktionszeiten kürzer, wenn die Zeichnungen in die rechte Gesichtsfeldhälfte eingeblendet wurden, als wenn sie in die linke Gesichtsfeldhälfte eingeblendet wurden. Für die Distanzaufgabe ergab sich der umgekehrte Effekt. Da sich die Nervenbahnen vom Auge zum Gehirn im Chiasma Opticum kreuzen, spricht dieses Ergebnis für eine rechtshemisphärische Verarbeitung von Distanzinformationen und eine linkshemisphärische Verarbeitung von kategorialen räumlichen Relationen. Dieses Ergebnis ließ sich auch für die Relationen „links“ versus „rechts“ und „darüber“ versus „darunter“ replizieren. Die Dissoziation zwischen kategorialen Aufgaben und Distanzurteilen läßt sich auch schon bei fünfjährigen Kindern nachweisen (Koenig, Reiss & Kosslyn, 1990). Die These der linkshemisphärischen Verarbeitung kategorialer Information wird auch durch ein Experiment von Laeng, Peters und McCabe (1998) gestützt, die zeigen konnten, daß die erinnerte Position von Punkten in einem Kreis bei linkshemisphärischer Darbietung stärker durch kategoriale Information beeinflusst wird als bei rechtshemisphärischer Darbietung.

3.3 Egozentrische und allozentrische Distanzen

Repräsentationen räumlicher Informationen können auch danach unterschieden werden, welchen Referenzrahmen sie benutzen. Sind räumliche Relationen nur in Bezug auf das Subjekt kodiert, spricht man von einer *egozentrischen* Raumrepräsentation. Für eine Raumrepräsentation in Form eines Koordinatensystems würde dies bedeuten, daß der Beobachter immer der Ursprung des Koordinatensystems ist und daß die Achsen dieses Koordinatensystems durch die Körperachsen des Beobachters definiert sind. Im Gegensatz dazu spricht man von einer *allozentrischen* Raumrepräsentation, wenn die enkodierten räumlichen Relationen unabhängig von der Position des Beobachters sind. Eine formale Unterscheidung der beiden Referenzsysteme liefert Klatzky (1998).

Die empirischen Befunde deuten darauf hin, daß egozentrische Relationen genauer repräsentiert sind als allozentrische (Loomis, da Silva, Fujita & Fukusima, 1992). Dies wird besonders beim Vergleich ego- versus allozentrischer Distanzschätzungen deutlich. In einer Studie von Loomis et al. (1992) wurden die Versuchspersonen gebeten, die Position zweier Objekte auf der sagittalen Achse so einzustellen, daß die Distanz zwischen den beiden Objekten gleich der Distanz zwischen zwei anderen Objekten auf einer frontoparallelen Achse war. Je nach Entfernung der Anordnung vom Beobachter wurde die sagittale Distanz um bis zu 90% größer eingestellt als die frontoparallele Distanz. In der selben Studie sollten die Versuchspersonen

sonen auch egozentrische Distanzen durch „Gehen ohne Sehen“² schätzen. In dieser Aufgabe mußten die Versuchspersonen sich die Position eines Objektes einprägen und anschließend zu der Stelle gehen, an der sich das Objekt befand, ohne das Objekt sehen zu können. Die geringen Fehler in dieser Aufgabe deuten darauf hin, daß die Versuchspersonen egozentrische Distanzen sehr genau wahrnehmen und im Gedächtnis behalten können. Für die vorliegende Arbeit ist vor allem interessant, ob die Repräsentation von Distanzen im Gedächtnis egozentrisch oder allozentrisch ist.

Nach der Theorie von Gallistel (1990) werden allozentrische mentale Karten durch zwei Prozesse gebildet. Zum einen münden frühe Wahrnehmungsprozesse in die Konstruktion einer egozentrischen Repräsentation. Zum anderen werden in einem Pfadintegrations-Prozeß Geschwindigkeits- und Beschleunigungsinformationen benutzt, um die Position des Beobachters in einem allozentrischen Koordinatensystem zu berechnen. Durch die Integration dieser beiden Informationen ist es möglich, eine mentale Karte zu bilden, in der räumliche Relationen zwischen Objekten allozentrisch repräsentiert sind. Von Touretzky und Redish (1996) liegt eine weitgehend ausgearbeitete Theorie dazu vor, wie ego- und allozentrische Repräsentationen bei Nagetieren miteinander interagieren. Nach dieser Theorie werden räumliche Informationen in fünf miteinander verbundenen Komponenten verarbeitet.

- Die visuelle Wahrnehmung sorgt für egozentrische Objektkoordinaten.
- Die Erfassung der Richtung des Kopfes geschieht durch *Kopfrichtungs-Zellen*, die unabhängig von der Position des Nagetieres dann feuern, wenn das Tier eine bestimmte Richtung einnimmt. Sie versorgen das System mit allozentrischer Orientierungsinformation, relativ zu einer Referenzrichtung, die durch Landmarken und/oder Signale des vestibulären Systems vermittelt werden.
- Durch Pfadintegration wird die Position des Tieres in allozentrischen Koordinaten berechnet. Diese Komponente erhält ihre Eingaben durch den optischen Fluß, der bei Bewegung entsteht, durch Efferenzkopien der Muskelbewegungen beim Laufen und durch vestibuläre Signale.
- Die Informationen aus der visuellen Wahrnehmung und die Kopfrichtung werden in einer lokalen Ansicht integriert, in der die Positionen von Objekten egozentrisch in Bezug auf die Position, aber allozentrisch in Bezug auf die Orientierung repräsentiert werden.
- Das Ergebnis der Pfadintegration und die lokale Ansicht werden schließlich zu einem Ortskode miteinander verrechnet. Das neuronale Substrat des Ortskodes sind die sogenannten *Platzzellen* (siehe z. B. O’Keefe, 1993; O’Keefe & Nadel, 1978; 1979) im Hippo-

² engl.: walking without vision

campus, die jeweils dann feuern, wenn sich das Tier an dem Ort befindet, der einer Zelle zugeordnet ist (dem sog. *Platzfeld*). Platzzellen feuern unabhängig von der Orientierung eines Tieres und werden nicht ausschließlich durch visuelle Informationen gesteuert, da sie auch im Dunkeln funktionieren.

Nach dieser Theorie werden also motorische Efferenzkopien, visuelle und vestibuläre Signale so miteinander verknüpft, daß verschiedene ego- und allozentrische Repräsentationen entstehen. Dieses Modell ist jedoch sicher nicht ohne Einschränkungen auf den Menschen übertragbar, da Menschen in der Lage sind, durch konzeptgesteuerte, kognitive Prozesse räumliche Informationen auf ganz unterschiedliche Arten zu inferieren.

O'Keefe (1993) hat ein Modell entwickelt, das zeigt, wie Vektoren auf neurophysiologischer Ebene durch Oszillationen von Zellen repräsentiert sein könnten und wie die zur Transformation eines egozentrischen in ein allozentrisches Koordinatensystem nötige Vektorarithmetik durch neurophysiologische Prozesse implementiert sein könnte.

3.4 Implizite und explizite Repräsentationen

Die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen ist im Bereich der Raumkognition häufig anzutreffen. Beispielsweise läßt sich für die im vorigen Abschnitt vorgestellten Unterscheidung zwischen ego- und allozentrischen Repräsentationen zeigen, daß in einer egozentrischen Raumrepräsentation die allozentrische implizit enthalten ist (siehe z. B. Klatzky, 1998). Eine besondere Rolle spielt diese Unterscheidung im Bereich des räumlichen Schließens, in dem die Generierung und Überprüfung von in den Prämissen implizit enthaltener Konklusionen untersucht wird. Von psychologischer Seite wird dabei häufig versucht, mit Hilfe der Theorie mentaler Modelle zu erklären, wie räumliches Schließen beim Menschen funktioniert (Johnson-Laird & Byrne, 1991; Knauf, Rauh, Schlieder & Strube, 1998). Diese Unterscheidung ist jedoch auch für die Künstliche Intelligenzforschung relevant, wo beispielsweise durch Constraint-Systeme oder Kalküle, wie dem *Allen-Kalkül* (Allen, 1983) oder dem *Region Connection Calculus* (z. B. Renz & Nebel, 1998) versucht wird, räumliche Inferenzen zu generieren.

Auch für die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Repräsentation von Distanzen ist die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen relevant. Hat mir beispielsweise irgendwann einmal jemand mitgeteilt, daß die Distanz zwischen Bonn und Trier ca. 150 km beträgt, so könnte ich diese Information als Satz oder als Proposition im Gedächtnis abgelegt haben. Habe ich demgegenüber eine bildhafte Repräsentation der Deutschlandkarte, so bin ich möglicherweise in der Lage, die Distanz zwischen Bonn und Trier aus meiner mentalen Karte abzulesen. Im ersten Fall braucht die Distanz nur abgerufen zu werden und ist damit direkt verfügbar. Im Falle der bildhaften Repräsentation ist ein

Prozeß nötig, der die in der Karte implizit enthaltene Distanzinformation extrahiert. Deshalb kann man im ersten Fall von expliziten Repräsentationen und im zweiten Fall von impliziten Repräsentationen sprechen.

Einem intuitiven Verständnis nach wären Informationen dann explizit repräsentiert, wenn sie lokal und damit separat von anderen Informationen repräsentiert sind. Damit geht einher, daß diese Informationen direkt verfügbar sind. Implizit wäre eine Repräsentation dagegen dann, wenn sie strukturell verborgen ist, aber trotzdem durch irgendwelche Prozesse wiederhergestellt, das heißt explizit gemacht werden kann.

Diese Dichotomie mag auf den ersten Blick überzeugend und fruchtbar erscheinen, sie ist jedoch inkonsistent, wie Kirsh (1990) nachweist. Problematisch an dieser Definition ist, daß Struktur- und Prozeßannahmen miteinander vermischt sind, die einander nicht notwendigerweise bedingen.

“From a process perspective information is explicit only when it is ready to be used. No computation is necessary to bring the content into a usable form. From a structural perspective information is explicit when it has a definite location and a definite meaning. The confusion arises when a representation that seems to be in a usable form when viewed structurally turns out to be in a non-immediately usable form procedurally” (Kirsh, 1990, S. 344).

Eine Information kann beispielsweise durchaus lokal und separat von anderen Informationen repräsentiert sein und trotzdem kann es sehr aufwendig sein, sie abzurufen, z. B. wenn aufwendige Suchprozesse nötig sind, um sie aufzufinden, oder wenn sie nur mit einer aufwendigen Prozedur entschlüsselt werden kann. Kirsh (1990) versucht, diese Inkonsistenzen zu umgehen, indem er explizite Repräsentationen sowohl über strukturelle als auch über prozedurale Kriterien definiert. Dies ist in manchen Fällen mit einer Präzisierung, in anderen Aspekten jedoch auch mit einer Aufweichung der Begriffe verbunden. Das Ergebnis stellt auch nur eine Näherungslösung dar. Man kann sich durchaus fragen, ob es nicht vernünftiger wäre, entweder auf die strukturelle oder auf die prozedurale Komponente ganz zu verzichten.

In der vorliegenden Arbeit sollen explizite von impliziten Repräsentationen nur anhand struktureller Kriterien unterschieden werden. Der Vorteil einer strukturellen Definition gegenüber einer prozeduralen Definition ist, daß man die Eigenschaften explizit versus implizit einer Repräsentationsform zuschreiben kann, ohne auf Prozeßannahmen zurückgreifen zu müssen, während es bei prozeduralen Definitionen unmöglich ist, zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen zu unterscheiden, ohne Prozeßannahmen mit dieser Unterscheidung zu verbinden. Der Nachteil dieser Vorgehensweise besteht jedoch darin, daß sich aus einer strukturellen Definition keine Vorhersagen ableiten lassen. Repräsentationsannahmen lassen sich nur testen, wenn man zusätzliche Annahmen darüber trifft, welche Prozesse auf diesen Repräsentationen laufen. Für die Ausgangsfragestellung dieser Arbeit bedeutet

dies, daß zwar nach der Struktur der Repräsentation von Distanzen gefragt wird, daß aber diese Frage nur beantwortet werden kann, indem Annahmen über die Prozesse getroffen werden, die auf diesen Repräsentationen ablaufen.

Auf räumliche Relationen bezogen, können explizite von impliziten Repräsentationen auf folgende Weise unterschieden werden: Eine räumliche Relation ist dann explizit repräsentiert, wenn in der Repräsentation eines Raumes eine Struktur existiert, die diese und nur diese Relation kodiert. Ein Beispiel für eine explizite Repräsentation ist die Proposition „die Distanz zwischen Trier und Bonn beträgt 150 Kilometer“. Demgegenüber soll von impliziten Repräsentationen gesprochen werden, wenn es in der Repräsentation keine Struktur gibt, die der kodierten räumlichen Relation eineindeutig zugeordnet werden kann. Dies kann zum einen dann der Fall sein, wenn es zwar eine Struktur im Gedächtnis gibt, die die in Frage kommende Relation kodiert, diese Struktur jedoch auch zusätzliche Informationen enthält. Werden beispielsweise Distanzen durch Vektoren kodiert, liegt keine explizite Repräsentation der Distanz vor, da der Vektor neben der Distanzinformation auch Richtungsinformation enthält. Eine weitere Möglichkeit der impliziten Kodierung von Distanzen stellt eine bildhafte Repräsentation dar. Ein klassisches Beispiel für eine bildhafte Repräsentation ist der von Kosslyn vorgeschlagene *visual Buffer*. Hier handelt es sich um eine bildhafte Struktur mit den Eigenschaften einer *Bitmap*. In einer solchen *Bitmap* sind Distanzen zwar repräsentiert, jedoch läßt sich keine Informationseinheit angeben, die eine bestimmte Distanz und nur diese Distanz kodiert.

Für die Repräsentation einer Route ist auch denkbar, daß einige Distanzen explizit repräsentiert sind, während andere implizit repräsentiert sind. Sind beispielsweise nur Distanzen zwischen auf der Route benachbarten Objekten explizit repräsentiert, so sind damit auch Distanzen zwischen nicht aufeinanderfolgenden Objekten repräsentiert, nur handelt es sich dabei um eine implizite Repräsentation. Diese Distanzen können nur durch Kombination der explizit repräsentierten Distanzen entlang des verbindenden Pfades ermittelt werden. Für alle Formen impliziter Repräsentationen gilt, daß die repräsentierte Information erst durch Inferenzprozesse verfügbar gemacht werden kann. Diese Inferenzprozesse müssen in der Lage sein, relevante von irrelevanter Information zu trennen und/oder verschiedene Informationen zu integrieren.

Die Unterscheidung zwischen expliziten und impliziten Repräsentationen genügt jedoch nicht, um die Ausgangsfragestellung zu beantworten. Es ist durchaus denkbar, daß bestimmte Distanzen implizit durch andere Distanzen repräsentiert sind, daß diese anderen Distanzen jedoch wiederum implizit beispielsweise durch Positionsinformationen repräsentiert sind. Die beiden Arten von Distanzen wären also durch die Dichotomie „explizit versus implizit“ nicht

zu unterscheiden. Deshalb soll hier der Begriff einer abgeleiteten Repräsentation³ eingeführt werden. Ein Repräsentat *A* soll dann *abgeleitet* von einem Repräsentat *B* heißen, wenn der Abruf von *A* den Abruf von *B* voraussetzt. Das Repräsentat *B* wird in dieser Arbeit *primitiver Parameter* genannt. Ist die Länge eines Pfades beispielsweise nur dadurch repräsentiert, daß die Längen aller Routensegmente in diesem Pfad repräsentiert sind, so ist die Pfadlänge eine abgeleitete Repräsentation der Routensegmente. Die Routensegmente sind wiederum primitive Parameter hinsichtlich der Repräsentation der Pfadlänge.

Mit Hilfe der beiden Dichotomien implizit versus explizit und abgeleitet versus primitiv kann nun die Ausgangsfragestellung dieser Arbeit präzisiert werden. Es soll geklärt werden, ob Distanzen in einer räumlichen Repräsentation explizit oder implizit kodiert sind. Falls Distanzen implizit kodiert sind, soll darüber hinaus geklärt werden, aus welchen primitiven Parametern die Repräsentation der Distanzen abgeleitet ist.

³ In der Literatur zum räumlichen Gedächtnis finden sich ähnliche Konzepte (Gallistel, 1990; Klatzky, 1998; Palmer, 1978).

4 Die Geometrie räumlicher Repräsentationen

„Ich habe ein Dreieck und eine gerade Linie, welche eine Dreiecksseite schneidet; wird diese Linie bei genügender Verlängerung auch eine zweite Dreiecksseite schneiden? Ja, befiehlt die Anschauung. Sie befiehlt es einfach, und ich kann nichts dagegen machen“ (Reichenbach, 1928/1977, S. 52).

Eine räumliche Struktur kann durch die Objekte und die Distanzen zwischen diesen Objekten vollständig beschrieben werden, das heißt, sie ist durch diese Informationen eindeutig bestimmt. Dies gilt jedoch nur, wenn man nicht von einem absoluten Raum ausgeht, da die Lage der Struktur in einem absoluten Koordinatensystem durch die Interobjektdistanzen nicht bestimmt ist. Sieht man von dieser Einschränkung ab, wird deutlich, daß durch die Untersuchung der Repräsentation von Distanzen praktisch eine Untersuchung von räumlichen Repräsentationen ermöglicht wird.

4.1 Meßtheoretische versus psychophysische Fragestellungen

In der Untersuchung räumlicher Repräsentationen lassen sich mindestens zwei verschiedene Fragestellungen unterscheiden. Zum einen kann man nach dem Verhältnis zwischen Repräsentat und Repräsentandum fragen. Hier handelt es sich um die Frage, wie räumliche Relationen in der repräsentierten Welt auf Relationen zwischen mentalen Entitäten abgebildet werden. Geht man von der Isomorphismusdefinition mentaler Repräsentationen aus, so bedeutet dies zu fragen, wie der Isomorphismus zwischen Welt und Repräsentat beschaffen ist. Diese Fragestellung ist also eine psychophysische und sie wird mit den Mitteln der Psychophysik untersucht. Das bedeutet, daß typischerweise räumliche Relationen im Stimulusmaterial systematisch variiert werden, um zu ermitteln, ob oder wie sich diese Variationen in der mentalen Repräsentation widerspiegeln.

Zum anderen kann man nach der inneren Struktur räumlicher Repräsentationen fragen. Hier handelt es sich um die Fragestellung, welche Relationen zwischen mentalen Entitäten untereinander bestehen. Hier geht es also nicht darum, wie die Relation zwischen Außenwelt und mentalen Repräsentationen beschaffen ist, sondern um die Fragestellung, wie mentale Repräsentationen aufgebaut sind. Diese Fragestellung wird mit Hilfe der Meßtheorie untersucht. Konkret wird dabei untersucht, welche Relationen zwischen mentalen Entitäten bestehen müssen, damit man sie in ein bestimmtes numerisches Relativ, das heißt in eine numerische Menge, für die bestimmte Relationen gelten, abbilden kann.

Diese beiden Fragestellungen lassen sich zwar konzeptuell unterscheiden, sie sind jedoch nicht unabhängig voneinander untersuchbar, da empirische Untersuchungen praktisch immer

sowohl eine psychophysische als auch eine meßtheoretische Hypothese voraussetzen. Ergebnisse aus psychophysischen Untersuchungen lassen sich nur dann auswerten, wenn Annahmen über das Skalenniveau der abhängigen Variablen getroffen werden. Genauso lassen sich meßtheoretische Fragestellungen nur überprüfen, wenn Annahmen darüber getroffen werden, in welchem Verhältnis die mentale Repräsentation zu den abhängigen Variablen steht. Sind die abhängigen Variablen räumliche Maße, wie beispielsweise die Koordinaten eines Objekts in einer Positionieraufgabe oder die Position der von der Versuchsperson gesetzten Markierung bei einer Distanzschätzung mittels Linienskalen, so handelt es sich gewissermaßen um die Umkehrfunktion der psychophysischen Abbildung. Bei nicht-räumlichen abhängigen Variablen wie zum Beispiel Reaktionszeiten oder Ja/Nein Urteilen handelt es sich zwar nicht um psychophysische Abbildungen, aber es müssen trotzdem Annahmen über das Verhältnis zwischen Repräsentation und Urteil getroffen werden und diese Annahmen lassen sich am ehesten durch psychophysische Methoden prüfen.

In diesem Kapitel sollen räumliche Repräsentationen zunächst unter dem meßtheoretischen Gesichtspunkt betrachtet werden. Die hier behandelte Fragestellung ist somit, welchen Restriktionen räumliche Repräsentationen unterliegen und ob man diese Restriktionen durch eine bestimmte Geometrie beschreiben kann. Die Frage nach dem Verhältnis zwischen räumlichen Repräsentationen und dem repräsentierten Raum wird in Kapitel 5 untersucht.

4.2 Ist die Frage nach der Geometrie räumlicher Repräsentationen sinnvoll?

Kant (1781/1995) argumentierte, daß Urteile (heute würde man eher von Propositionen sprechen) in drei verschiedene Typen eingeteilt werden können. Ein *analytisches Urteil a priori* ist eine Aussage, bei der das Prädikat im Subjekt schon enthalten ist. Ein analytisches Urteil a priori ist also per definitionem und unabhängig von aller Erfahrung wahr. Ein *synthetisches Urteil a posteriori* geht hingegen über eine reine Explikation des Subjektbegriffes hinaus und ist nur durch die Erfahrung überprüfbar. Das Konzept des Raumes findet nach Kant in keiner dieser beiden Klassen Platz. Hier handelt es sich um eine Anschauungsform des Geistes, die weder durch begriffliche Analysen noch durch die Erfahrung gewonnen werden kann. Das Konzept des Raumes ist nach Kant weder eine logische Notwendigkeit, noch aus der Erfahrung ableitbar, sondern es handelt sich um eine der Voraussetzungen jeder Erfahrung. Der Raumbegriff ermöglicht nach Kant *synthetische Erkenntnisse a priori*, wie sie in der Geometrie vorkommen. Die Idee des Raumes ist danach ein Funktionsprinzip unseres Verstandes. Daß dieses Funktionsprinzip nach der Auffassung Kants den Gesetzmäßigkeiten der euklidischen Geometrie unterliegt, ist nicht weiter verwunderlich, denn es war in dieser

Zeit schlicht nicht vorstellbar, daß eine Geometrie von den euklidischen Axiomen abweichen kann.

Die Kant'sche Raumkonzeption spielt auch in der neueren Raumkognitionsforschung noch eine Rolle (O'Keefe, 1993). Obwohl in der Zwischenzeit eine Reihe nicht-euklidischer Geometrien entwickelt wurde, ist insbesondere die Annahme immer noch verbreitet, daß die formalen Prinzipien der euklidischen Geometrie auch für räumliche Repräsentationen und Prozesse gelten. Dies wird manchmal dadurch begründet, daß die Welt schließlich auch euklidisch sei und daß es deshalb plausibel ist anzunehmen, daß sich diese euklidischen Eigenschaften im Laufe der Evolution auch auf unsere räumlichen Repräsentationen übertragen haben (McNamara & Diwadkar, 1997). Diese Argumentation ist jedoch erstens nicht schlüssig und zweitens zunächst schwer mit den empirischen Befunden in Einklang zu bringen, wie im folgenden dargelegt werden soll.

Zunächst einmal ist es zumindest irreführend – wenn nicht sogar einfach falsch – zu behaupten, unsere Welt sei euklidisch. Die euklidische Geometrie fußt auf den fünf Axiomen des Euklid, die er in seinen „Elementen“ formuliert hat. In diesen Axiomen werden die grundlegenden Begriffe, wie „Punkt“ oder „Gerade“ definiert und irreduzible Beziehungen zwischen diesen Entitäten postuliert. Sie enthalten keine Aussagen über die Welt und können demnach weder empirisch bestätigt noch falsifiziert werden. Nach den Worten Poincarés (1914, S. 81) ist es unmöglich, „mit dem Empirismus in der Geometrie einen vernünftigen Sinn zu verbinden“. Der radikal konventionalistischen These Poincarés steht die etwas gemäßigtere Auffassung Reichenbachs gegenüber, die jedoch letzten Endes ebenfalls zu der Einsicht führt, daß es unmöglich ist, die Geometrie der Welt zu bestimmen: Die Zuschreibung einer Geometrie zu einer Welt ist abhängig von den Annahmen, die benötigt werden, um Längen oder Distanzen in der Welt messen zu können.

„Sei irgend eine Geometrie G gegeben, welche die Meßkörper befolgen; dann können wir immer eine universelle Kraft K so wirksam denken, daß die Geometrie eigentlich die Form einer beliebig zu wählenden Geometrie G hat und die Abweichung von G auf einer universellen Deformation der Meßkörper beruht. [...] Erst die Kombination $G+K$ ist eine Angabe von Erkenntniswert“ (Reichenbach, 1928/1977, S. 45).

Es ist nicht einmal möglich, sich auf die Behauptung zurückzuziehen, die euklidische Geometrie sei deshalb der adäquateste Formalismus zur Beschreibung der Welt, da es mit Hilfe der euklidischen Geometrie möglich ist, Gesetzmäßigkeiten in der Welt besonders sparsam oder elegant zu beschreiben. So folgt aus der wohl einfachsten Annahme über das universelle Kraftfeld, nämlich, daß es nicht vorhanden ist, daß die Geometrie nicht-euklidisch wird, wie sich aus der Relativitätstheorie ableiten läßt (Reichenbach, 1928/1977, S. 48f).

Wenn man der Welt also schon keine Geometrie zuschreiben kann, kann es dann möglich sein, räumlichen Repräsentationen eine Geometrie zuzuschreiben? In der Anfang des 20.

Jahrhunderts durch die Relativitätstheorie ausgelösten Diskussion herrschte die Meinung vor, daß man weder der physikalischen Welt, noch mentalen Vorstellungen eine Geometrie zuschreiben kann.

„Wir müssen zugeben, daß der abstrakte Raum kein Gegenstück und keine Grundlage in irgendeiner physikalischen oder psychologischen Wirklichkeit hat. Die Punkte und Linien des Geometers sind weder physikalische noch psychologische Objekte; sie sind nichts weiter als Symbole für abstrakte Beziehungen“ (Cassirer, 1944/1990, S. 75).

Noch deutlicher kommt diese Auffassung in H. Webers Enzyklopädie der Elementar-Mathematik zum Ausdruck.

„Die ursprüngliche Vorstellung vom Raume enthält nichts Genaueres, nichts Scharfes in sich. Es gibt darin keinen Punkt, keine Linie, keine Fläche und also auch keine Maße und keine Geometrie. Diese Begriffe sind Schöpfungen des denkenden Geistes“ (zit. nach Schouten, 1924, S. 7).

Trotz dieser Zweifel an der Möglichkeit, Raumrepräsentationen eine Geometrie zuschreiben zu können, gibt es mittlerweile eine Reihe empirischer Studien zur Geometrie räumlichen Wissens. Durch die Analyse der Restriktionen, denen räumliche Urteile unterliegen, wird versucht, Rückschlüsse auf die zugrundeliegende Geometrie zu ziehen. Beispielsweise werden die Beschränkungen untersucht, denen subjektive Distanzen unterliegen. Die euklidische Geometrie bezieht sich zwar nicht nur auf Distanzen, sondern benutzt viele andere Konstrukte, wie Geraden, Ebenen, Kreise, Polygone, Winkel und Parallelen, aber alle diese Konstrukte können (wenn auch teilweise umständlich) durch Distanzen definiert werden (Suppes, Krantz, Luce & Tversky, 1989, S. 14). Für die physikalische Welt kann nicht ermittelt werden, ob die Distanzen den Gesetzen der euklidischen Geometrie gehorchen, da die Geometrie erst das Rezept dafür liefert, wie die Distanzen gemessen werden können.

So ist beispielsweise für die *Minkowski-Metrik* (siehe Kapitel 4.4), einer Verallgemeinerung der euklidischen Metrik, die Distanz zwischen zwei Punkten abhängig von einer Minkowski-Konstante. Damit ist klar, daß für die empirische Messung einer Minkowski-Distanz in der Welt erst eine *Minkowski-Konstante* r festgelegt werden muß. Erst die Minkowski-Konstante gibt an, wie die Unterschiede in den einzelnen Dimensionen miteinander integriert werden müssen. Solange r nicht festgelegt ist, können Distanzen also nicht gemessen werden. Damit ist es unmöglich zu ermitteln, welches r „in der Welt“ gilt. Für mentale Raum-Repräsentationen stellt sich die Situation anders dar. Personen können befragt werden, wie groß die Distanz zwischen zwei Objekten ist, ohne daß man eine bestimmte Geometrie vorgibt. Aus den empirischen Distanzurteilen kann dann rückgeschlossen werden, ob den Antworten eine Metrik zugrunde liegt und wenn ja, welche. Mit Hilfe der Meßtheorie kann man vorhersagen, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit man von einer bestimmten Geometrie sprechen kann.

Allgemein gesprochen untersucht die Meßtheorie Messungen, das heißt, Abbildungen einer empirischen Domäne in eine numerische Domäne. Beide Domänen werden als Relationensysteme (Relative) konzipiert. Das *empirische Relativ* besteht aus einer Menge von empirisch interpretierten Elementen und einer Menge von Relationen auf diesen Elementen. Das *numerische Relativ* besteht dementsprechend aus einer numerisch interpretierten Menge und einer Menge von Relationen auf dieser numerischen Menge. Ein Messung liegt dann vor, wenn es einen Homomorphismus Φ zwischen dem empirischen und dem numerischen Relativ gibt. Die Definition ist damit sehr ähnlich zur Definition einer Repräsentation und in der Tat kann man die Abbildung eines empirischen Relativs in ein numerisches Relativ als Repräsentation betrachten. Ist die Abbildung homomorph, so ist Φ eine *Skala* und die Bilder werden als *Skalenwerte* oder *Meßwerte* bezeichnet. Die primäre Fragestellung der Meßtheorie ist, welche Eigenschaften ein empirisches Relativ besitzen muß, damit es in ein gegebenes numerisches Relativ homomorph abgebildet werden kann. Dieses Problem wird als *Repräsentationsproblem* bezeichnet (Orth, 1983). Um es zu lösen, muß ein *Repräsentationstheorem* bewiesen werden. Ein Repräsentationstheorem besagt, daß bei Gültigkeit einer gegebenen Menge von Axiomen für ein empirisches Relativ ein Homomorphismus des empirischen Relativs in ein gegebenes numerisches Relativ besteht. Wenn also für subjektive räumliche Relationen dieselben Restriktionen gelten wie für die Relationen, die in einer bestimmten Geometrie gelten, dann kann geschlossen werden, daß der subjektive Raum durch diese Geometrie repräsentiert werden kann.

4.3 Die euklidische Geometrie

Eine der einflußreichsten Theorien zur Geometrie mentaler Raumrepräsentationen stammt von Piaget und Inhelder (Piaget & Inhelder, 1975; Piaget, Inhelder & Szeminska, 1975). Nach deren Stufenmodell entwickelt sich das menschliche Raumkonzept von einer topologischen Repräsentation über eine projektive Geometrie bis hin zur euklidischen Geometrie. In der frühesten Phase werden in der Raumrepräsentation ausschließlich topologische Relationen, wie beispielsweise Relationen der Nähe, Getrenntheit, Ordnung oder Eingeschlossenheit enkodiert. Am Ende der Entwicklung steht ein Repräsentationsformat, das Relationen zwischen Objekten auf Relationen in einem kartesischen Koordinatensystem zurückführt.

Das Stufenmodell der Raumrepräsentation blieb jedoch nicht unwidersprochen (einen Überblick gibt Mandler, 1988). Die Kennzeichnung der frühesten Phase als „topologisch“ ist insofern irreführend, als einige der postulierten Relationen keine topologischen Konzepte sind. Während beispielsweise die Relation „in“ eine topologische Relation ist, gilt das für die Relationen „auf“, „darüber“ oder „darunter“ nicht. Die Kennzeichnung früher Raumrepräsentationen als topologisch wird auch weniger einleuchtend, wenn man bedenkt, daß topologische Relationen nicht notwendigerweise weniger komplex sein müssen als Relationen in der

euklidischen Geometrie. Die These, daß zu Beginn der kognitiven Entwicklung keine euklidischen Konzepte vorhanden sind, läßt sich ebenfalls bezweifeln. So läßt sich beispielsweise schon in sehr frühen Stadien der kindlichen Entwicklung zeigen, daß Kreise von Ellipsen unterschieden werden. Mandler (1988) schließt aus diesen Befunden, daß von Anfang an sowohl topologische als auch euklidische Relationen repräsentiert werden und die Entwicklung räumlicher Kognitionen primär als Präzisierung dieser Konzepte zu verstehen ist. Liben (1988) führt die uneinheitliche Befundlage darauf zurück, daß die verwendeten Konzepte teilweise unterschiedlich definiert sind und in der Interpretation der Ergebnisse nur unzureichend zwischen der Speicherung räumlicher Information und räumlichem Denken getrennt wird.

Die Idee eines euklidischen Raumkonzeptes erfährt nicht nur aus der Entwicklungspsychologie Unterstützung. Auch die neurophysiologische Theorie von O'Keefe und Nadel schreibt den Raumrepräsentationen im Hippocampus eine euklidische Geometrie zu (O'Keefe, 1993; O'Keefe & Nadel, 1978). O'Keefe (1993) schlägt ein Modell vor, nachdem die Pyramidenzellen im Hippocampus durch ihre Oszillationen Vektoren kodieren (siehe auch Campbell, 1993). Die Amplitude der Oszillationen repräsentiert die Distanz zu einem Objekt, während die Phasenverschiebung relativ zu einer Referenzschwingung den Winkel kodiert. Die Transformationen dieser Vektoren auf neurophysiologischer Basis gehorchen den Restriktionen der euklidischen Geometrie.

In Multidimensionalen Skalierungen (MDS) von Distanzurteilen bei zweidimensionalen Lernvorlagen konnte vielfach gezeigt werden, daß sich zweidimensionale Lösungen ergeben, die gut mit dem Daten übereinstimmen (siehe z. B. Baird, Merrill & Tannenbaum, 1979; Birnbaum, Anderson & Hynan, 1989; Hourihan & Jones, 1979; Merrill & Baird, 1979; Pipkin, 1982; Sherman, Croxton & Giovanatto, 1979a). In Untersuchungen unserer Arbeitsgruppe (Wender, Wagener-Wender & Rothkegel, 1997) ergaben sich die besten Lösungen bei Verwendung einer Minkowski-Konstante von $r=2$. Aus diesem Ergebnis kann man schließen, daß die euklidische Metrik die Distanzurteile am besten repräsentiert (Borg & Staufenbiel, 1984). Allerdings muß einschränkend bemerkt werden, daß es problematisch ist, die Übereinstimmung statistisch abzusichern. Dies gilt sowohl für die Übereinstimmung der Skalierungslösung mit den Distanzen als auch für die Übereinstimmung der Skalierungslösung mit der Lernvorlage (Borg & Leutner, 1985; Borg & Staufenbiel, 1984). Zudem zeigt McNamara, daß sich auch mit Distanzfunktionen, die nicht metrisch sind, in Multidimensionalen Skalierungen sehr gute Stress-Werte erzielen lassen.

„The claim is that in principle a reasonable accurate spatial display (i.e., an image) can be generated from a nonmetric representation of the original space“ (McNamara, 1991, S. 181).

Für einen Test der Geometrie, die empirischen Distanzurteilen zugrunde liegt, wäre es wünschenswert, wenn Skalierungslösungen, die eine euklidische oder Minkowski'sche Metrik voraussetzen, mit anderen nicht-euklidischen Geometrien verglichen würden. Auch für Geometrien, die nicht der Minkowski-Metrik folgen, können Skalierungsverfahren entwickelt werden (Tobler, 1976). Bisher fehlt jedoch ein systematischer Vergleich dieser Verfahren.

Argumente gegen die Auffassung, daß subjektive Distanzen den Restriktionen der euklidischen Geometrie unterliegen, lassen sich aus der psychophysischen Beziehung zwischen objektiven und subjektiven Distanzen ableiten. Beispielsweise läßt sich zeigen, daß räumliche Repräsentationen nicht euklidisch sein können, wenn die darin repräsentierten Distanzen eine Stevens'sche Potenzfunktion (mit Exponenten ungleich 1) der euklidischen Distanzen in der Vorlage sind (Baird, Wagner & Noma, 1982). Durch eine Transformation der Distanzen in einem euklidischen Raum mit Hilfe einer Potenzfunktion werden folgende Verzerrungen erzeugt:

- Additionen und/oder Subtraktionen von Distanzen verletzen die Dreiecksungleichung (siehe unten).
- Gerade Linien im untransformierten Raum sind im transformierten Raum nicht mehr gerade.
- Manche Winkel im untransformierten Raum gibt es im transformierten Raum nicht.
- Ein Vollkreis im transformierten Raum muß nicht einen Winkel von 360 Grad haben.
- In einem Parallelogramm, das aus zwei gleichseitigen Dreiecken besteht, läßt sich der Winkel einer Ecke nicht additiv aus den Winkeln der Dreiecke bestimmen.

Sind repräsentierte Distanzen eine Potenzfunktion der tatsächlichen Distanzen, so ergibt sich also eine Geometrie, die die Restriktionen der euklidischen Geometrie in vieler Hinsicht verletzt. Die Tatsache, daß Distanzurteile eine Potenzfunktion der tatsächlichen Distanzen sind, muß jedoch nicht notwendigerweise bedeuten, daß dies auch für repräsentierte Distanzen gilt. Einige durchaus ernst zu nehmende Modelle führen die Stauchung der subjektiven Distanzskala auf Antwortphänomene zurück. Diese Modelle werden in Kapitel 5 diskutiert.

Durch die Analyse von Richtungsschätzungen lassen sich ebenfalls Rückschlüsse auf die Geometrie des subjektiven Raumes ziehen. Läßt man Versuchspersonen Winkel zwischen allen Paaren von Objekten einer räumlichen Anordnung schätzen, so kann mit einem Verfahren, das ähnlich wie die parametrische Multidimensionale Skalierung arbeitet, aus der resultierenden Dreiecksmatrix eine räumliche Anordnung rekonstruieren, in der die Winkel zwischen den Objekten maximal gut mit den empirischen Winkelschätzungen übereinstimmen (Gordon, Jupp & Byrne, 1989). In einem Experiment unserer Arbeitsgruppe ergab dieses

Verfahren eine gute Übereinstimmung der Skalierungslösung mit der Stimuluskonfiguration, wengleich sich auch ein systematischer Einfluß der Lernroute zeigte (Wender et al., 1997). Wie in der MDS ergibt sich jedoch auch bei der Skalierung von Richtungsurteilen das Problem, die Güte der Anpassung der Skalierungslösung an die empirischen Urteile inferenzstatistisch abzusichern.

Durch Richtungsschätzungen lassen sich auch systematische Verletzungen von Restriktionen der euklidischen Geometrie nachweisen. In einem Experiment von Moar und Bower (1983), in dem die Probanden Winkel zwischen amerikanischen Städten in beiden Richtungen schätzen mußten, zeigte sich, daß die geschätzten Richtungen nicht reversibel waren. Moar und Bower (1983) ließen ihre Probanden darüber hinaus Richtungen zwischen Triaden von Orten in einer Stadt schätzen. Die resultierenden Urteile wiesen eine Verzerrung hin zu rechten Winkeln auf. Diese Tendenz, Winkel zu rechten Winkeln zu verzerren, ließ sich auch in anderen Studien nachweisen (Byrne, 1979; Sadalla & Montello, 1989). Die Winkelsumme der Dreiecke lag damit im Experiment von Moar und Bower über 180 Grad.

Während in der euklidischen Geometrie die Winkelsumme im Dreieck immer 180 Grad betragen muß, ist dies in Riemann'schen Geometrien nicht erforderlich. In diesen Geometrien sind alle euklidischen Axiome bis auf das *Parallelenaxiom* erfüllt. Das Parallelenaxiom besagt, daß sich in einer Ebene durch einen Punkt außerhalb einer Geraden genau eine Gerade legen läßt, welche die andere in keinem in endlicher Entfernung gelegenen Punkt schneidet. Riemann'sche Geometrien machen diese Voraussetzung nicht. In sphärischen Geometrien ist die Winkelsumme im Dreieck größer als 180 Grad. Für den visuellen Raum gibt es Indizien, daß er mit einer hyperbolischen Geometrie am besten beschrieben werden kann (Drösler, 1966; Suppes et al., 1989).

4.4 Minkowski-Metriken

Eine allgemeinere und damit schwächere Form der euklidischen Metrik ist die Minkowski-Metrik. Für die Familie der *Minkowski-Metriken* ist die Distanz zwischen zwei Punkten a (mit den Koordinaten (a_1, \dots, a_n)) und b (mit den Koordinaten (b_1, \dots, b_n)) in einem n -dimensionalen Raum definiert als

$$\delta(a, b) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - b_i|^r \right)^{\frac{1}{r}}. \quad (4.1)$$

Setzt man die Minkowski-Konstante $r=2$, so erhält man die euklidische Metrik. Für die Minkowski-Metrik findet sich ein Repräsentationstheorem in Suppes et al. (1989). Es gibt an, daß bei Gültigkeit bestimmter Axiome in einem empirischen Relativ ein Homomorphismus in das durch die Minkowski-Metrik definierte numerische Relativ besteht. Will man prüfen, ob

eine räumliche Repräsentation den Gesetzen einer Minkowski-Metrik folgt, so muß also geprüft werden, ob diese Axiome für räumliche Repräsentationen gelten.

Eine Grundvoraussetzung für das Vorliegen einer Minkowski-Metrik ist, daß das empirische Relativ durch eine Metrik repräsentiert werden kann. Einige Untersuchungen zum räumlichen Gedächtnis widmen sich der Frage, ob räumliche Repräsentationen überhaupt metrisch sind.

4.5 Sind räumliche Repräsentationen metrisch?

Eine (Distanz-) Funktion δ ist genau dann eine *Metrik*⁴, wenn sie jedem Paar von Punkten x und y eine reelle Zahl zuordnet, so daß folgende drei Axiome erfüllt sind.

$$\text{Positivität:} \quad \delta(x,x)=0 \text{ und } \delta(x,y)\geq 0, \text{ wenn } x\neq y \quad (4.2)$$

$$\text{Symmetrie:} \quad \delta(x,y)=\delta(y,x) \quad (4.3)$$

$$\text{Dreiecksungleichung:} \quad \delta(x,y)+\delta(y,z)\geq\delta(x,z) \quad (4.4)$$

Führt man sich vor Augen, was obige Axiome besagen, so erscheint es trivial, daß räumliches Wissen metrisch ist. Die Anforderungen, die eine Metrik an eine Meßstruktur stellt, sind sehr schwach. Sie können beispielsweise für eine beliebige Menge dadurch erfüllt werden, daß man $\delta(x,x)=0$ und $\delta(x,y)=1$ für $x\neq y$ setzt. Auch inhaltlich betrachtet scheint es unsinnig anzunehmen, jemand würde glauben, zwei Orte, die auf derselben Stelle liegen, hätten eine Distanz größer als 0 zueinander oder zwei Orte, die nicht auf derselben Stelle liegen, hätten eine Distanz von 0 zueinander (Positivität). Ebenso fällt es schwer, sich vorzustellen, jemand würde die Distanz von Trier nach Frankfurt anders einschätzen als die Distanz von Frankfurt nach Trier (Symmetrie). Auch ist es a priori schwer zu glauben, daß jemand der Meinung sein kann, die Distanz von Trier nach Frankfurt über einen dritten Ort sei kürzer als der direkte Weg (Dreiecksungleichung).

Möglicherweise muß man die Fragen jedoch nur anders stellen, um Verletzungen der Metrik-Axiome entdecken zu können. Formuliert man sie in obigen Stil, genügt Metawissen über Distanzen im euklidischen Raum, um die Repräsentation von Distanzen metrisch erscheinen zu lassen. Würde man nach der Distanz von Trier nach Frankfurt fragen und gleich anschließend nach der Distanz von Frankfurt nach Trier, so würden die meisten Versuchspersonen

⁴ Der Begriff „metrisch“ wird in der kognitionswissenschaftlichen Literatur uneinheitlich verwendet. In vielen Studien wird der Begriff „metrisch“ zur Kennzeichnung eines Skalenniveaus verwendet, das höher ist als eine Ordinalskala. Beispielsweise wird Routenwissen, das nur Sequenzinformation enthält, jedoch keine Information über euklidische Distanzen, oft als nicht-metrisch bezeichnet. Führt man sich dagegen die Definition des Begriffes „Metrik“ vor Augen, so wird deutlich, daß selbst auf einer Nominalskala noch eine Metrik definiert werden kann. Damit ist die Frage, ob räumliches Wissen metrisch ist, strikt zu trennen von der Frage, welches Skalenniveau räumliches Wissen aufweist. Um Inkonsistenzen zu vermeiden, wird in der vorliegenden Arbeit der Begriff „metrisch“ nur zur Kennzeichnung einer Funktion verwendet, die die Axiome einer Metrik erfüllt. Zur Kennzeichnung von Skalenniveaus oberhalb der Ordinalskala wird der Begriff „parametrisch“ verwendet.

wohl einfach die vorherige Antwort wiederholen. Aufschlußreicher sind Untersuchungen, in denen Verletzungen metrischer Axiome weniger augenfällig sind. Es gibt eine Reihe von Studien nach diesem Schema, die zu belegen scheinen, daß mentale Repräsentationen nicht metrisch sind. Diese Einschätzung ergibt sich unter anderem aus der Beobachtung, daß räumliche Urteile das Symmetrieaxiom in systematischer Weise zu verletzen scheinen.

4.5.1 Symmetrie

Lee (1970) ließ Routendistanzen zwischen der Universität von Dundee und verschiedenen Gebäuden in der Stadt einschätzen. Distanzen zu Orten, die in Richtung des Stadtzentrums lagen, wurden als kleiner eingeschätzt als Distanzen in der Gegenrichtung. Wenn die geschätzte Distanz eine Funktion der Fragerichtung ist, so verletzen Distanzen das Symmetrieaxiom. Die erhobenen Schätzungen verletzen die Symmetriebedingung jedoch nicht, da alle Distanzen ausgehend von der Universität geschätzt wurden. Bei diesem Experiment handelt es sich also nicht um einen direkten Test des Symmetrieaxioms.

Cadwallader (1979) erhob Distanzurteile zwischen 30 Paaren von Städten in den Vereinigten Staaten. Zu einem späteren Zeitpunkt sollten die Probanden dieselben Distanzen noch einmal einschätzen, mit dem Unterschied, daß die Reihenfolge der Städte in den Fragen umgekehrt war. Die meisten Differenzen zwischen den Distanzschätzungen der ersten und der zweiten Phase lagen zwischen 10% und 40%, was von Cadwallader als substantiell erachtet wurde. Eine inferenzstatistische Auswertung erfolgte jedoch nicht.

Sadalla, Burroughs und Staplin (1980) ließen ihre Probanden Distanzen zwischen Referenzpunkten und Nicht-Referenzpunkten auf dem Campus der Arizona State University schätzen. Als Referenzpunkte dienten bekannte Landmarken, die historische oder kulturelle Bedeutung hatten. Die Probanden sollten jeweils auf einem Blatt Papier, in dem auf der Mitte eine Landmarke eingetragen war, eine zweite Landmarke in der richtigen Distanz eintragen. Nicht-Referenzpunkte wurden näher zu Referenzpunkten eingetragen als umgekehrt. Für Ähnlichkeitsurteile, die ja gewissermaßen die Inversion von Distanzurteilen darstellen, konnten solche Asymmetrien auch in anderen, nicht räumlichen Domänen nachgewiesen werden (Rosch, 1975; Tversky, 1977). Geht man davon aus, daß diese Asymmetrie in den Distanzurteilen auf Asymmetrien in der mentalen Repräsentation zurückzuführen ist, so heißt das, daß räumliches Wissen nicht metrisch ist oder zumindest nicht immer metrisch sein muß. Es ist jedoch weiterhin durchaus denkbar, daß die zugrundeliegende Repräsentation das Symmetrieaxiom erfüllt und nur die an der Schätzung von Distanzen beteiligten Prozesse für Asymmetrien in den Urteilen sorgen.

McNamara und Diwadkar (1997) untersuchten drei Typen von Modellen, die auf dieser Annahme fußen. Sie unterscheiden zwischen *Stimulusverzerrung*⁵ und *Wiedergabeverzerrung*⁶. In Stimulusverzerrungs-Modellen ist die Verzerrung eine Eigenschaft von Stimuli. In Wiedergabeverzerrungs-Modellen ist die Verzerrung dagegen eine Eigenschaft des Prozesses, der die Distanzinformation aus der räumlichen Repräsentation extrahiert. McNamara und Diwadkar (1997) stellen drei Varianten von Wiedergabeverzerrungs-Modellen einander gegenüber.

Nach dem *schwachen Verzerrungs-Modell* wird auf der Menge der Stimuli eine Verzerrungsfunktion definiert, für die gilt

$$p(x, y) \geq p(y, x) \Leftrightarrow b(x) \geq b(y), \quad (4.5)$$

wobei b eine Verzerrungsfunktion und $p(x, y)$ die Ähnlichkeit zwischen den Stimuli x und y ist. Eine empirisch testbare Vorhersage, die sich aus dem Modell ergibt, ist die *Transitivität der schwachen Verzerrung*⁷:

$$p(x, y) \geq p(y, x) \wedge p(y, z) \geq p(z, y) \rightarrow p(x, z) \geq p(z, x). \quad (4.6)$$

Nach dem *Kategorien-Anpassungs-Modell*⁸ (Huttenlocher, Hedges & Duncan, 1991) wird der Ort eines Objektes auf zwei verschiedenen Detailliertheitsstufen enkodiert, einer hochauflösenden Stufe und einer kategorialen Stufe. In beiden Stufen wird der Ort verzerrungslos, aber ungenau enkodiert, das heißt, auf beiden Stufen kann man sich die Repräsentation des Ortes als Verteilung vorstellen, deren Zentrum auf dem wahren Wert liegt. Verzerrungen in der Wiedergabe eines Ortes geschehen aus zwei Gründen. Zum einen treten sogenannte „*Grenzeffekte*“ auf, das bedeutet, die Verteilung der wiedergegebenen Orte wird durch die Kategoriengrenzen abgeschnitten. Damit ist impliziert, daß die Position eines Objektes, das sich nahe einer Kategoriengrenze befindet, in Richtung des Kategorienzentrums verzerrt wird. Zum anderen treten sogenannte *Prototypeneffekte* auf, das heißt, der wiedergegebene Ort ist ein gewichtetes Mittel aus dem hochauflösenden Wert und dem kategorialen Wert. Die Gewichtung eines Wertes ist um so höher, je präziser er ist.

Um Asymmetrien in Distanzurteilen vorhersagen zu können, müssen zwei weitere Annahmen eingeführt werden. Zum einen muß geklärt werden, wodurch die kategoriale Ortsinformation bestimmt wird. McNamara und Diwadkar (1997) nehmen an, daß für Nicht-Landmarken, deren Ort im Kontext einer Landmarke wiedergegeben werden soll, die kategoriale Ortsin-

⁵ engl.: stimulus bias

⁶ engl.: response bias

⁷ engl.: weak bias transitivity

⁸ engl.: category adjustment model

formation durch den Ort der Landmarke bestimmt wird, der wiederum verzerrungslos ermittelt werden kann. Zum zweiten bestimmt die Reihenfolge von Landmarke und Nicht-Landmarke in der Frage nach der Distanz, ob die Position der Nicht-Landmarke im Kontext der Landmarke ermittelt wird. Wird nach der Distanz von *A* nach *B* gefragt, so wird die Position von *B* im Kontext von *A* ermittelt, wenn *A* eine Landmarke und *B* eine Nicht-Landmarke ist.

Empirische Untersuchungen sowohl mit fiktiven Karten, auf denen Wörter eingezeichnet waren, als auch in realen Umgebungen zeigten, daß das Postulat der schwachen Verzerrungs-Transitivität verletzt war. Die Ergebnisse waren ebenfalls inkonsistent mit dem Kategorien-Anpassungs-Modell, da die Asymmetrien nicht mit zunehmender Interobjektdistanz größer wurden.

McNamara und Diwadkar (1997) schlagen deshalb ein *Kontext-Skalierungs-Modell*⁹ vor, das auf die Annahmen des *Impliziten Skalierungs-Modells* (Holyoak & Mah, 1982) zurückgeht. Asymmetrien in räumlichen Urteilen werden darauf zurückgeführt, daß sich Objekte darin unterscheiden, welche Kontexte sie erzeugen. Beim Abruf einer Distanz wird diese durch den Kontext skaliert. Unterschiedliche Kontexte führen demnach zu unterschiedlichen Distanzurteilen für ein und dieselbe Distanz. Wenn eine Nicht-Landmarke im Kontext einer Landmarke abgerufen wird, so erscheint die Distanz zur Landmarke kleiner als im umgekehrten Fall, da Landmarken einen größeren Kontext erzeugen als Nicht-Landmarken. Ebenso wie das schwache Verzerrungs-Modell und das Kategorien-Anpassungs-Modell ist das Kontext-Skalierungs-Modell ein Wiedergabeverzerrungs-Modell. Für die räumliche Repräsentation im Langzeitgedächtnis wird angenommen, daß sie symmetrisch ist. Asymmetrien in den Urteilen kommen dadurch zustande, daß Teile dieser Repräsentation in das Kurzzeitgedächtnis übertragen und dort skaliert werden. Die von McNamara und Diwadkar (1997) durchgeführten Experimente waren mit dem Kontext-Skalierungs-Modell konsistent. Die Wirkung von Kontexten kann jedoch auch gegenteilig konzipiert werden. Nach der Vergrößerungsglas-Hypothese (Couclelis, Golledge, Gale & Tobler, 1987) erzeugen Referenzpunkte einen detaillierteren Kontext in ihrer unmittelbaren Nachbarschaft, so daß die Regionen um die Referenzpunkte gestreckt werden, um die größere Fülle an Details aufnehmen zu können. Dieses Modell war jedoch nicht dazu konzipiert, Asymmetrien in räumlichen Urteilen vorherzusagen.

Die vorgestellten Modelle zeigen für die Frage, ob räumliche Repräsentationen metrisch sind, daß nach dem augenblicklichen Stand der Forschung Asymmetrien in den Distanzschätzungen durchaus mit der Annahme metrischer Repräsentationen vereinbar sind. Einschränkend

⁹ engl.: contextual scaling model

muß jedoch bemerkt werden, daß in der Studie von McNamara und Diwadkar (1997) nur Wiedergabeverzerrungs-Modelle gegeneinander getestet wurden. Für die Frage nach der Metrik räumlicher Repräsentationen wäre es interessanter, wenn Stimulusverzerrungsmodelle gegen Wiedergabeverzerrungsmodelle getestet würden. Darüber hinaus könnte man gegen das von McNamara und Diwadkar favorisierte Modell einwenden, daß es denselben „Trick“ benutzt, den Anderson (1978) in seinem Mimikri-Theorem verwendet, um zu zeigen, daß Repräsentationsannahmen prinzipiell nicht testbar sind: Um ein bestimmtes Ergebnis (in diesem Fall die Existenz von Asymmetrien) erklären zu können, das mit der Annahme einer Repräsentationsform A (in diesem Fall eine symmetrische Raumrepräsentation) zunächst inkonsistent ist, wird einfach angenommen, daß Repräsentation A temporär in ein anderes Format B (in diesem Fall eine asymmetrische Kurzzeitrepräsentation) umkodiert wird, das das zu erklärende Ergebnismuster erzeugt. Andererseits ist die Annahme, daß zur Lösung räumlicher Aufgaben spezifische Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis generiert werden, durchaus plausibel (Foley & Cohen, 1984).

4.5.2 Positivität und Dreiecksungleichung

Im Unterschied zum Symmetrieaxiom wurde die Gültigkeit der Dreiecksungleichung bisher kaum untersucht. Cadwallader (1979) erhob Distanzvergleiche für alle Triaden von 6 Städten. Über alle Versuchspersonen aggregiert ergab sich, daß 17 von den 20 Triaden das Kriterium der „starken stochastischen Transitivität“ erfüllten,

$$(p(a > b) > .5 \wedge p(b > c) > .5) \rightarrow p(a > c) > \sup\{p(a > b), p(b > c)\}, \quad (4.7)$$

woraus er schloß, daß Intransitivität von Distanzen in der Analyse von aggregierten Daten „kein größeres Problem“ darstellt. Eine Untersuchung der stochastischen Transitivität auf dem Analyseniveau einzelner Versuchspersonen ergab jedoch, daß in den Urteilen von 29 der 56 Versuchspersonen mindestens eine intransitive Triade vorkam. Cadwallader schlußfolgerte daraus, daß die den kognitiven Karten zugrundeliegende Geometrie nicht euklidisch sein kann. Die Ergebnisse sind jedoch zum einen nicht inferenzstatistisch abgesichert, zum anderen sind möglicherweise die meßtheoretischen Voraussetzungen für einen Test der Gültigkeit der Dreiecksungleichung nicht erfüllt.

Ob die Dreiecksungleichung für psychologische Distanzen gilt, ist schwierig zu testen, da ein Test voraussetzt, daß Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis Verhältnisskalenniveau haben. Befinden sich die Daten auf Intervallskalenniveau, so kann die Dreiecksungleichung immer dadurch erfüllt werden, daß eine (genügend große) positive Konstante auf alle Distanzschätzungen addiert wird (McNamara, 1991). Diesem Einwand könnte man jedoch entgegen, daß durch das Positivitätsaxiom ein absoluter Nullpunkt vorausgesetzt wird, wodurch additive Transformationen der Skala nicht mehr zulässig sind. Das bedeutet, daß unter der Vorausset-

zung (mindestens) intervallskalierter Distanzschätzungen die untransformierten Schätzdaten die Dreiecksungleichung erfüllen müssen, wenn eine Metrik vorliegt. Verletzen die Schätzungen die Dreiecksungleichung, so kann man daraus zwar noch nicht ableiten, daß das Axiom der Dreiecksungleichung verletzt ist, aber man kann schließen, daß entweder die Positivität oder die Dreiecksungleichung verletzt ist, und mithin, daß keine Metrik vorliegt.

4.6 Segmentäre Additivität

In Minkowski-Metriken muß über die Metrik-Axiome hinaus das Axiom der *segmentären Additivität* erfüllt sein, das heißt, jedes Paar von Punkten muß durch ein *additives Segment* verbunden sein. Ein additives Segment ist eine Kurve, entlang der die Distanzen additiv sind (Suppes et al., 1989, S. 51). Für einen Test der segmentären Additivität genügt es, wenn die Urteile Ordinalskalennivea haben. Dieser Test setzt voraus, daß man aus empirischen Daten sogenannte *Konturen gleicher Unähnlichkeit*¹⁰ gewinnt. Eine Kontur gleicher Unähnlichkeit ist die Menge aller Punkte mit demselben Grad an Unähnlichkeit (genannt *Radius*) zu einem gegebenen Punkt (genannt *Zentrum*). Konturen gleicher Unähnlichkeit werden „konzentrisch“ genannt, wenn sie dasselbe Zentrum haben.

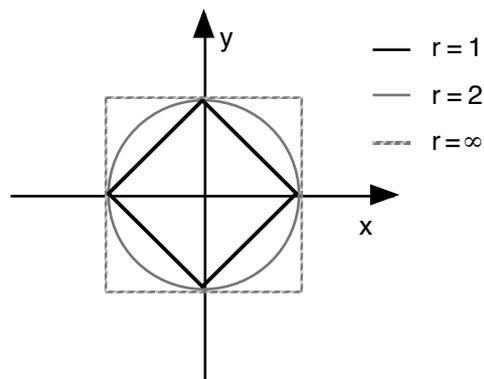


Abbildung 4.1: Konzentrische Konturen gleicher Unähnlichkeit mit identischem Radius für verschiedene Minkowski-Metriken, nämlich die City-Block Metrik ($r = 1$), die euklidische Metrik ($r = 2$) und die Dominanzmetrik ($r = \infty$).

Aus dem Axiom der segmentären Additivität läßt sich ableiten, daß konzentrische Konturen gleicher Unähnlichkeit parallel sein müssen. Das bedeutet, daß Distanzschätzungen zwischen konzentrischen Konturen in allen Richtungen gleich sein müssen. McNamara (1991) glaubt, in seinen Ergebnissen einer Primingstudie (McNamara, 1986) Hinweise darauf zu finden, daß diese Forderung verletzt sein könnte. Reaktionszeiten für identische Primes mit unterschiedlichen Targets ergaben Konturen gleicher Unähnlichkeit, deren Distanz (das heißt, die Differenz der Reaktionszeiten) voneinander stark in Abhängigkeit von der Richtung variiert. Dieses Argument steht jedoch auf schwachen Füßen. Zum einen ist in dieser Studie die

¹⁰ engl.: isodissimilarity contours

räumliche und zeitliche Nähe zwischen den Objekten konfundiert. Damit ist unklar, ob die Reaktionszeiten in dieser Priming-Aufgabe die Repräsentation der räumlichen Distanzen messen (siehe Abschnitt 7.2). Zum anderen sind die Daten zwar geeignet, um Konturen gleicher Unähnlichkeit zu erzeugen, die psychologische Distanz zwischen den Konturen wurde jedoch nicht erhoben. In dieser Analyse wird vorausgesetzt, daß die psychologische Distanz nicht in allen Richtungen konstant ist, da die Differenzen der Reaktionszeiten stark von der Parallelität abweichen.

4.7 Fazit

Die dargestellten Befunde zeigen, daß räumliche Urteile in vielen Fällen gegen die Axiome der euklidischen Geometrie verstoßen. Dies könnte bedeuten, daß mentale Raumrepräsentationen nicht den Restriktionen der euklidischen Geometrie unterliegen. Doch auch sehr viel schwächere Annahmen, wie die metrischen Axiome, sind durch räumliche Urteile teilweise verletzt. Muß man daraus folgern, daß räumliches Wissen nicht einmal metrisch ist? Problematisch an dieser Folgerung ist, daß sie räumliche Urteile mit räumlichen Repräsentationen gleichsetzt. Diese Annahme ist jedoch nicht zwingend. Es sind viele Modelle vorstellbar, in denen die Repräsentation den metrischen oder sogar den euklidischen Axiomen genügt und nur die Abrufprozesse für Verzerrungen in den Urteilen sorgen. Einige dieser Antwortverzerrungsmodelle werden von MacNamara und Diwadkar (1986) diskutiert, aber es fehlt ein systematischer Test von Antwortverzerrungsmodellen gegen Stimulusverzerrungsmodelle, die Verletzungen von Axiomen in den Antworten auf die mentale Repräsentation zurückführen. Ein Test der Gültigkeit räumlicher Axiome muß darüber hinaus sicherstellen, daß die subjektiven räumlichen Relationen auf ein und derselben räumlichen Repräsentation fußen.

„Because behavioral data (maps, distance or proximity estimates, directional judgments) are usually derived from multiple representations that are not simultaneously activated into an internally consistent WM¹¹ representation, it should come as no surprise that the resulting data violate metric axioms“ (Montello, 1992, S. 146).

Solange nicht gezeigt werden kann, daß die Verletzungen der Axiome in den empirischen Urteilen nicht auf Antwortprozesse zurückzuführen sind und daß die untersuchten empirischen Urteile aus einer einzigen räumlichen Repräsentation stammen, bleibt also die Frage offen, ob räumliche Repräsentationen metrisch sind.

¹¹ Arbeitsgedächtnis

5 Einflußfaktoren auf die subjektive Distanz

“[T]here is no single answer to the question of what source of information is the basis of distance knowledge” (Montello, 1997, S. 299).

Im vorhergehenden Kapitel wurde erörtert, in welchem Zusammenhang repräsentierte Distanzen zueinander stehen. Demgegenüber wird in diesem Kapitel der Zusammenhang zwischen mental repräsentierten Distanzen und den physikalischen Distanzen in der Welt behandelt. Zum einen wird die psychophysische Funktion erörtert, die subjektive Distanzen zu physikalischen Distanzen in Beziehung setzt, zum anderen werden weitere Einflußgrößen für subjektive Distanzen identifiziert. Das Verhältnis zwischen physikalischen Distanzen und wahrgenommenen Distanzen ist gut untersucht (siehe z. B. Foley, 1980). In bezug auf im Gedächtnis repräsentierte Distanzen herrscht weit weniger Klarheit. Für die bisher identifizierten Einflußgrößen auf gedächtnisbasierte Distanzschätzungen gibt es unterschiedliche Erklärungsmodelle, die sich sowohl hinsichtlich der postulierten Repräsentationsformen als auch hinsichtlich der Prozeßannahmen unterscheiden. Am Ende dieses Kapitels wird erörtert, wie diese Annahmen mit Hilfe von Reaktionszeiten für Distanzurteile gegeneinander getestet werden können.

5.1 Die psychophysische Funktion

Für die psychophysische Funktion, die Distanzen in der Welt zu subjektiven Distanzen in Beziehung setzt, wird in der Regel angenommen, daß sie dem Stevens'schen Potenzgesetz, $Y = k X^n$ folgt, wobei k und n Konstanten sind, X die Distanz in der Welt ist und Y die geschätzte Distanz ist. Logarithmiert man beide Seiten dieser Gleichung, so sieht man, daß zwischen logarithmierten objektiven Distanzen und logarithmierten subjektiven Distanzen eine lineare Beziehung bestehen muß, denn $\log(Y) = k + n \log(X)$. Das Potenzgesetz ist daher mit Hilfe einfacher linearer Regressionen prüfbar.

Die Größe des Exponenten n gibt an, ob große Distanzen im Vergleich zu kleinen Distanzen eher unterschätzt oder überschätzt werden. Ist n kleiner als 1, werden sie unterschätzt, das heißt, die subjektive Distanzskala ist mit zunehmender Distanz gegenüber der objektiven Skala immer mehr gestaucht. Ist der Exponent größer 1, so bedeutet dies, daß die subjektive Distanzskala mit abnehmender Distanz zunehmend gestaucht ist. Die Größe des Exponenten ist für den Zusammenhang zwischen subjektiven und objektiven Distanzen nicht einheitlich, wie eine Metaanalyse von Wiest und Bell (1985) zeigt. Die Autoren reanalysierten 70 Studien, in denen mit Hilfe von Größen- oder Verhältnis-Skalierung subjektive Distanzen erhoben wurden, unter der Fragestellung, von welchen Faktoren die Höhe des Exponenten abhängt. Die Bedeutsamkeit möglicher Einflußfaktoren wurde mit Hilfe von multiplen

Regressionen zur Vorhersage des Exponenten ermittelt. Die Ergebnisse zeigten, daß die Differenz zwischen minimaler und maximaler Distanz und die Frage, ob es sich um Distanzen im Freien oder in Räumen handelt, bedeutsam für die Größe des Exponenten sind.

Der beste Prädiktor für die Höhe des Exponenten war jedoch der Umstand, ob es sich um direkt wahrgenommene, erinnerte oder inferierte Distanzen handelt. Dieser Prädiktor klärte ca. 40 % der Varianz auf. War die einzuschätzende Strecke bei der Schätzung sichtbar, betrug der Exponent 1.08. Für erinnerte Distanzen betrug er 0.91. Gedächtnisbasierte Distanzschätzungen, bei denen die geschätzten Distanzen inferiert werden mußten, wiesen den kleinsten Exponenten (0.75) auf. Bei Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis ist demnach generell ein Exponent zu erwarten, der kleiner als 1 ist. Große Distanzen werden damit relativ zu kleinen Distanzen unterschätzt.

Die Ergebnisse psychophysischer Untersuchungen lassen offen, ob eine Potenzfunktion tatsächlich die geeignetste Funktion zur Abbildung physikalischer auf subjektive Distanzen ist, da sich sogar lineare Funktionen oft sehr gut an die Daten anpassen lassen. In der Metaanalyse von Wiest und Bell (1985) ergab ein Vergleich linearer Modelle mit der Potenzfunktion für diejenigen Studien, in denen beide Anpassungen berichtet wurden, daß die Potenzfunktion nur zwei Prozent mehr Varianz aufklärte als die lineare Funktion. Dieser Unterschied war zwar statistisch bedeutsam, aber dies kann kaum als hinreichende Evidenz für eine Potenzfunktion gewertet werden, da zu vermuten ist, daß sich mit anderen nichtlinearen Funktionen ähnlich gute Anpassungen erzielen ließen. Somit erscheint es angemessener, für Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis von einer konkaven Funktion zu sprechen, ohne dabei eine spezifische Funktionsvorschrift zu konstatieren.

Für den Unterschied zwischen perzeptiven und gedächtnisbasierten Distanzschätzungen gibt es eine Reihe konkurrierender Erklärungen (Radvansky, Carlson Radvansky & Irwin, 1995; Wiest & Bell, 1985).

5.1.1 Die Reperzeptionshypothese

Nach der *Reperzeptionshypothese*¹² (Kerst & Howard, 1978; Moyer, Bradley, Sorensen, Whiting & Mansfield, 1978) werden Verzerrungen, die in der Wahrnehmung auftreten, auch im Gedächtnis enkodiert. Bei der Wiedergabe aus dem Gedächtnis wird die enkodierte Information auf eine Weise abgerufen, die zur ursprünglichen Wahrnehmung analog ist. Der Abrufprozeß unterliegt dabei denselben Verzerrungen wie der ursprüngliche Wahrnehmungsprozeß. Gedächtnisbasierte Distanzurteile unterliegen deshalb stärkeren Verzerrungen, da die Verzerrungen zweimal zum Tragen kommen. Für das Potenzgesetz bedeutet dies, daß der Exponent unter Gedächtnisbedingungen das Quadrat des Exponenten der Wahrnehmungsbe-

¹² engl.: reperceptual hypothesis

dingungen sein sollte. Warum subjektive Distanzen überhaupt eine Potenzfunktion von objektiven Distanzen sind, wird in diesem Modell nicht erklärt, aber das muß eine Hypothese für Distanzschätzungen nicht unbedingt leisten. Nach Stevens und Galanter (1957) ist die Potenzfunktion ein fundamentales Gesetz, das die sensorischen Systeme und Informationsverarbeitungsprozesse von Organismen beschreibt.

Die Vorhersage der Reperzeptionshypothese deckt sich mit den Ergebnissen eines Experimentes von Kerst und Howard (1978, Exp. 3), in dem die Versuchspersonen Distanzen zwischen Staaten in den USA schätzen sollten. Unter Wahrnehmungsbedingungen ergab sich ein Exponent von 1.04, während er unter Gedächtnisbedingungen bei 1.1 lag, was ungefähr dem Quadrat des Exponenten unter Wahrnehmungsbedingungen (1.08) entsprach. Dieses Ergebnis ist jedoch insofern untypisch, als der Exponent in der Gedächtnisbedingung größer war als in der Wahrnehmungsbedingung.

Baum und Jonides (1979) argumentieren aufgrund von Unterschieden in den Latenzdaten bei perzeptiven versus mnemonischen Distanzvergleichen gegen die Reperzeptionshypothese. In der Gedächtnisbedingung waren die Latenzen eine lineare Funktion des Verhältnisses der zu vergleichenden Distanzen, während in der Wahrnehmungsbedingung diese Funktion quadratisch war. Sie schließen daraus, daß das Wahrnehmungsmodell zwar mit Schätzdaten konsistent sein mag, aber nicht in der Lage ist, die Latenzdaten in Distanzvergleichen zu erklären.

Darüber hinaus steht die Hypothese im Widerspruch zu den Ergebnissen von Wiest und Bell (1985). Aufgrund der durchschnittlichen Größe des Exponenten von 1.08 unter Wahrnehmungsbedingungen würde man für die Gedächtnisbedingung einen Exponenten von 1.17 erwarten. Der durchschnittliche Exponent unter Gedächtnisbedingungen lag jedoch bei 0.91 und damit in der entgegengesetzten Richtung. Allerdings sind in dieser Metaanalyse möglicherweise andere Variablen mit dem Faktor Gedächtnis versus Wahrnehmung konfundiert, so daß man aufgrund der höheren Anzahl berücksichtigter Resultate dem Befund nicht unbedingt mehr Glauben schenken sollte.

5.1.2 Die Transformationshypothese

Nach der *Transformationshypothese* (Kemp, 1988) ist der Unterschied zwischen wahrgenommenen und erinnerten Distanzen auf Transformationsprozesse im Langzeitgedächtnis zurückzuführen. Räumliche Information wird mit der Zeit immer mehr schematisiert, so daß sie Gestaltprinzipien oder hierarchischen Schemata entspricht. Die Ergebnisse zweier Experimente (Kemp, 1988) zeigten, daß der Exponent der Potenzfunktion kleiner wurde, wenn das Retentionsintervall von zwei Minuten auf eine Woche erhöht wurde.

5.1.3 Die Unsicherheitshypothese

Nach der *Unsicherheitshypothese*¹³ (Radvansky et al., 1995) ist die Unterschätzung großer Distanzen im Vergleich zu kleinen Distanzen darauf zurückzuführen, daß manche Distanzen im Gedächtnis nicht mehr verfügbar sind. Distanzen, die nicht mehr verfügbar sind, werden geraten, wobei in diesem Rateprozeß der Bereich, in dem die Distanzen im allgemeinen liegen, berücksichtigt wird. In diesen Fällen werden extreme Antworten vermieden, was dazu führt, daß der Exponent der Potenzfunktion kleiner als 1 wird.

Aus diesem Modell lassen sich mehrere Vorhersagen ableiten. Vergleicht man perzeptive mit mnemonischen Distanzschätzungen, so sollte die Variabilität der geschätzten Distanzen um die Regressionslinie bei perzeptiven Distanzschätzungen größer sein als bei Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis. Außerdem sollte mit abnehmender Steigung der Regressionslinie die additive Konstante der Regressionsgleichung zunehmen, sofern der Bereich, in dem die Distanzen liegen, ungefähr bekannt ist. Die Beziehung zwischen objektiven und geschätzten Distanzen sollte zudem davon abhängen, mit welcher subjektiven Sicherheit die Distanzen geschätzt werden. Schätzungen mit hoher Sicherheit sollten eher perzeptiven Schätzungen ähneln als Schätzungen mit geringer Sicherheit.

Radvansky et al. (1995) prüften diese Hypothese, indem sie Distanzen zwischen Buchstaben auf einem quadratischen Untergrund unter verschiedenen Bedingungen schätzen ließen. Ein Vergleich zwischen einer Wahrnehmungs- und einer Gedächtnisbedingung (Exp. 1) ergab höhere Exponenten und höhere multiplikative Konstanten in der Potenzfunktion für die Wahrnehmungsbedingung. Die Sicherheitseinschätzungen unterschieden sich jedoch nicht, und die Determinationskoeffizienten unterschieden sich nur innerhalb der Urteile, die mit geringer Sicherheit abgegeben wurden. In einem zweiten Experiment wurden gedächtnisbasierte Distanzschätzungen unter Bedingungen untersucht, in denen die Konfiguration vor dem Test entweder als Ganzes oder nur Ausschnittsweise in einem Fenster präsentiert wurde. In der ausschnittweisen Präsentationsbedingung wurde entweder das Fenster über dem Bild verschoben, wodurch die absolute Position eines Objektes noch verfügbar war, oder das Bild wurde unter dem Fenster verschoben, wodurch die absolute Position nicht mehr verfügbar war. Dadurch wurde die Zugänglichkeit der Distanzinformationen in drei Stufen variiert, was sich in vorhergesagter Weise in den Exponenten der Potenzfunktion niederschlug.

Die empirischen Ergebnisse sind also weitgehend konsistent mit den Vorhersagen aus der Unsicherheitshypothese, sie sind jedoch nicht geeignet, die konkurrierenden Erklärungen zu widerlegen. Neben der von Radvansky et al. (1995) favorisierten Variante der Unsicherheitshypothese stellen die Autoren zwei weitere Varianten zur Diskussion, die die Stauchung der

¹³ engl.: uncertainty hypothesis

subjektiven Distanzen auf die Antwortskala zurückführen. Es ist denkbar, daß Personen vermeiden, die oberen und unteren Grenzen der Antwortskala zu benutzen. Eine weitere mögliche Erklärung liefert die Hypothese, daß sich die Versuchspersonen nicht über den Range der Distanzen im klaren sind und deshalb ihre subjektive Antwortskala immer wieder reskalieren müssen. Diese beiden Varianten sind experimentell schwer von der von Radvansky et al. (1995) favorisierten Erklärung zu trennen, aber auch die oben genannte Wahrnehmungs- und die Transformationshypothese sind durch die Befunde von Radvansky et al. nicht widerlegt, wenngleich sie auch einige der gefundenen Effekte nicht vorhersagen können. Möglicherweise ist die Stauchung der subjektiven Distanzskala auf mehr als eine Ursache zurückzuführen, so daß alle postulierten Mechanismen einen Anteil an diesem Effekt haben.

5.2 Der Merkmalsakkumulationseffekt

Distanzurteile werden davon beeinflußt, wie viele Merkmale sich auf der einzuschätzenden Strecke befinden. Relevante Merkmale können dabei beliebige Objekte oder Strukturelemente sein, die während der Exploration wahrgenommen werden. Je mehr Abzweigungen, Straßenschilder, Landmarken, Kreuzungen oder Barrieren sich auf einer Strecke befinden, desto länger wird die Distanz eingeschätzt (Montello, 1997).

In einer Untersuchung von Thorndyke (1981) wurden euklidische Distanzen umso länger eingeschätzt, je mehr Objekte sich auf dem direkten Weg zwischen Anker und Zielreiz befanden. Die Versuchspersonen lernten Karten, auf denen sich Namen von Städten befanden und sollten anschließend Distanzen schätzen. Sowohl in einer inzidentellen (Exp. 1) als auch in einer intentionalen (Exp. 2) Lernbedingung waren die geschätzten Distanzen (bei konstant gehaltener tatsächlicher Distanz) eine lineare Funktion der Anzahl der Objekte auf der einzuschätzenden Strecke. Dieser Effekt ließ sich auch mit präexperimentell gelerntem Material (Städte in den Vereinigten Staaten) nachweisen.

Der Effekt von Barrieren auf räumliche Repräsentationen wurde in einer Vielzahl von Studien untersucht (Acredolo & Boulter, 1984; Cohen, Baldwin & Sherman, 1978; Cohen & Weatherford, 1981; Herman, Miller & Heins, 1987; Kosslyn et al., 1974; Newcombe & Liben, 1982; Sherman, Croxton & Smith, 1979b). Kosslyn, Pick und Fariello (1974) untersuchten den Einfluß von Barrieren auf Distanzschätzungen von Kindern und Erwachsenen. Die Barrieren waren in einer Bedingung undurchsichtig, in einer anderen Bedingung versperrten sie die Sicht nicht. Objekte, die durch Barrieren voneinander getrennt waren, wurden von den Kindern als weiter voneinander entfernt wahrgenommen als Objekte gleicher Entfernung, die nicht durch Barrieren voneinander getrennt waren. Dieser Effekt zeigte sich sowohl für undurchsichtige als auch für durchsichtige Barrieren. Erwachsene schätzten Distanzen

zwischen Objekten, die durch eine undurchsichtige Barriere voneinander getrennt waren, ebenfalls als größer ein. Durchsichtige Barrieren hatten in der Gruppe der Erwachsenen jedoch keinen Einfluß auf die Distanzurteile. Newcombe und Liben (1982) konnten die von Kosslyn, Pick und Fariello gefundene Interaktion der Effekte von Alter und Barrieren mit einer Aufgabe replizieren, in der die Versuchspersonen eine Rangordnung der Interobjektdistanzen erstellen sollten. Bei absoluten Distanzurteilen zeigte sich jedoch keine Interaktion des Effektes der Barrieren mit dem Alter.

Cohen und Weatherford (1981) untersuchten den Effekt visueller Barrieren auf subjektive Distanzen bei Kindern. Kinder im Alter von 5 bis 12 Jahren lernten eine Anordnung von Objekten in einem Raum, in dem zwei Barrieren aufgestellt waren, die die Sicht auf Teile des Raums versperrten. In einer späteren Prüfphase sollten die Kinder die Anordnung der Objekte nachlegen. Die Distanz zwischen zwei Objekten in der rekonstruierten Anordnung wurde überschätzt, wenn sich eine Barriere zwischen den Objekten befand, relativ zu Distanzen für Objekte, die nicht durch eine Barriere getrennt waren. Dieser Effekt wurde mit zunehmender Lernerfahrung kleiner. Das Alter der Kinder hatte keinen Einfluß auf den Effekt der Barrieren.

Herman, Miller und Heins (1987) untersuchten den Effekt von Barrieren bei großen Distanzen. Versuchspersonen aus drei verschiedenen Altersgruppen lernten eine räumliche Anordnung aus 10 Objekten im Freien. Die Objekte waren durch durchsichtige, undurchsichtige oder keine Barrieren getrennt. Nachfolgende Distanzschätzungen waren in der Bedingung „keine Barriere“ gleich zu der Bedingung „durchsichtige Barriere“. Distanzen von 50 Fuß wurden jedoch in der Bedingung „undurchsichtige Barriere“ als länger eingeschätzt als in den beiden anderen Bedingungen. Bei Distanzen von 30 Fuß ergab sich dieses Muster jedoch nicht.

Distanzschätzungen werden ebenfalls von der Anzahl von Winkeln beeinflusst, die sich in einer Route befinden. Sadalla und Magel (1980) ließen ihre Probanden mit Klebeband markierte Routen ablaufen und anschließend unter Verwendung unterschiedlicher Techniken Distanzen schätzen. Die Distanzen wurden umso größer eingeschätzt, je mehr rechte Winkel sich in der Route befanden. Byrne (1979) berichtet ebenfalls eine Zunahme der geschätzten Distanz mit zunehmender Anzahl von Abbiegungen zwischen Gebäuden in einer Stadt. Dieser Effekt der Abbiegungen¹⁴ ließ sich jedoch nicht in allen Studien replizieren. Herman, Norton und Klein (1986) konnten in einer Studie mit Schulkindern keinen Effekt der Abbiegungen feststellen und schlossen daraus, daß es sich bei diesem Effekt nicht um ein robustes Phänomen handelt. Heft (1988) kritisiert an dieser Studie jedoch, daß es sich um keinen adäquaten Test des Effekts der Abbiegungen handelt, da die Abbiegungen nicht mit der

¹⁴ engl.: route angularity effect

Struktur der Räume korrespondierten, in denen sich die Pfade befanden. In der Studie von Herman et al. (1986) führten Abbiegungen nicht notwendigerweise in einen neuen Raum.

Als Erklärung für den Merkmalsakkumulationseffekt werden unterschiedliche Modelle diskutiert. Im folgenden werden diese Modelle dargestellt.

5.2.1 Das analoge Zeitmesser-Modell

Thorndyke (1981) erklärt den Merkmalsakkumulationseffekt mit einer Übertragung von Blickbewegungsphänomenen auf Gedächtnisprozesse. Nach der Blickbewegungstheorie (Woodworth, 1938) werden perzeptuelle Längenschätzungen durch eine Bewegung des Blicks vom Ankerpunkt bis zum Zielpunkt erzeugt. Die Präsenz zusätzlicher Stimuli auf dem einzuschätzenden Pfad erzeugt temporäre Fixationen oder andere Störungen der Blickbewegung und erhöht damit die Zeit, die für die Blickbewegung benötigt wird. Werden Distanzen über die Dauer der Blickbewegung eingeschätzt, so ist die geschätzte Distanz umso größer, je mehr Objekte sich auf dem Pfad befinden. Für gedächtnisbasierte Distanzschätzungen sind nach Thorndykes *analogen Zeitmesser-Modell*¹⁵ ähnliche Prozesse verantwortlich. Distanzen werden durch einen mentalen Suchprozeß geschätzt. Mit dem Start des Suchprozesses wird eine interne Uhr gestartet, die am Ende des Suchprozesses wieder gestoppt wird. Die benötigte Zeit ist die Basis für die Schätzung der Distanz. Befinden sich auf dem Suchpfad keine Objekte, so ist die benötigte Zeit eine lineare Funktion der Distanz. Befinden sich jedoch Objekte auf der Route, so wird der Suchprozeß bei jedem Objekt angehalten und das jeweilige Objekt mit dem Zielreiz verglichen. Wenn sich keine Übereinstimmung ergibt, wird der Suchprozeß fortgesetzt, bis er auf ein weiteres Objekt stößt. Nach diesem Modell sollte die geschätzte Distanz L' auf der Route eine lineare Funktion der tatsächlichen Distanz L und der Anzahl der Objekte O auf der Route sein:

$$L' = a + bL + cO, \quad (5.1)$$

wobei a , b und c Konstanten sind. Nach diesem Modell steigt die geschätzte Distanz linear mit der tatsächlichen Distanz und der Objektanzahl an. Das Modell verbietet eine Interaktion der beiden Einflußgrößen, was durch die varianzanalytischen Ergebnisse in der Studie von Thorndyke (1981) gestützt wird. Das Modell ließ sich sehr gut an die empirischen Distanzschätzungen anpassen. Die erklärte Varianz betrug zwischen 98 und 99 Prozent.

5.2.2 Die Skalierungshypothese

Der Effekt der Merkmalsakkumulation kann im Grundsatz auch durch ein symbolisches Enkodierungsmodell erklärt werden, nach dem Distanzen zwischen benachbarten Objekten symbolisch gespeichert werden. Soll die Länge eines Pfades eingeschätzt werden, auf dem

¹⁵ engl.: analog timing model

sich Objekte befinden, dann werden die betreffenden Interobjektdistanzen aufaddiert. Dieses Modell setzt voraus, daß die enkodierte Distanz zwischen zwei Objekten eine Potenzfunktion (mit einem Exponenten n kleiner als 1) der tatsächlichen Distanz (l_i) ist. Die geschätzte Gesamtlänge ergibt sich damit durch

$$L' = a + \sum_{i=1}^{C+1} kl_i^n, \quad (5.2)$$

wobei C die Anzahl der Objekte auf der Route und a und k Konstanten sind. Der Effekt der Objektanzahl ergibt sich dadurch, daß kleine Interobjektdistanzen durch die Potenzfunktion weniger gestaucht werden als große. Je mehr Merkmale sich auch einer Route befinden, desto kleiner werden die Teilsegmente und damit wird die Gesamtdistanz weniger verkürzt (Briggs, 1973).

In der Studie von Thorndyke (1981) ließ sich dieses Modell fast ebenso gut an die empirischen Daten anpassen wie das analoge Zeitmesser-Modell. Thorndyke hält es jedoch aus drei Gründen für inadäquat. Erstens sollte sich kein Unterschied zwischen perzeptuellen und gedächtnisbasierten Distanzschätzungen ergeben, wenn gedächtnisbasierten Distanzschätzungen nur ein Abruf von Distanzwerten zugrundeliegt, die während der Wahrnehmung gespeichert wurden. Ein Effekt der Objektanzahl ließ sich bei perzeptuellen Distanzschätzungen zwar nachweisen, er war jedoch deutlich schwächer als bei gedächtnisbasierten Distanzschätzungen (Thorndyke, 1981, Exp. 2). Zweitens wurden in den Experimenten von Thorndyke die Versuchspersonen befragt, auf welche Weise sie die Distanzen geschätzt hatten. Nur eine Versuchsperson gab an, Teildistanzen aufaddiert zu haben, während eine große Anzahl der Versuchspersonen berichtete, die Distanzen durch mentales „Entlangwandern“ geschätzt zu haben. Drittens kann das symbolische Enkodierungsmodell den positiven Zusammenhang zwischen Distanz und Reaktionszeit in den Experimenten von Kosslyn, Ball und Reiser (1978) nicht erklären.

Jeder dieser drei Punkte läßt sich jedoch entkräften oder zumindest abschwächen. Ein stärkerer Effekt der Objektanzahl auf gedächtnisbasierte Distanzschätzungen läßt sich beispielsweise unter Zuhilfenahme der Unsicherheitshypothese (Radvansky et al., 1995) erklären. Während in der perzeptuellen Distanzschätzung Fehler nur durch Ungenauigkeiten oder Verzerrungen in der Wahrnehmung entstehen können, kann bei gedächtnisbasierten Distanzschätzungen der Fall eintreten, daß einzelne Interobjektdistanzen nicht mehr verfügbar sind. In diesem Fall ist es plausibel anzunehmen, daß Personen Schätzungen für die fraglichen Distanzen verwenden, die beispielsweise auf einem Durchschnittswert der Distanzen in der gelernten Konfiguration basieren. Würden alle Interobjektdistanzen auf diesem Wege geschätzt, so wäre die geschätzte Gesamtdistanz allein von der Objektanzahl auf dem Pfad abhängig. Die tatsächliche Distanz hätte in diesem Fall keinen Einfluß auf die geschätzte

Distanz. Damit ist auch impliziert, daß der Einfluß der Objektanzahl auf die geschätzte Distanz umso größer ist, je weniger elementare Distanzen abgerufen werden können. Da in perzeptuellen Distanzschätzungen alle elementaren Distanzen verfügbar sind, ist es leicht nachzuvollziehen, daß der Effekt der Objektanzahl hier schwächer ist. Eine Konkretisierung dieses Modells findet sich am Ende dieses Kapitels. Der zweite Einwand von Thorndyke stützt sich auf introspektive Angaben seiner Versuchspersonen, bei denen man sich durchaus die Frage stellen kann, ob diese Angaben nicht eher die Hypothesen der Versuchspersonen über das Zustandekommen von Distanzschätzungen widerspiegelt als eine tatsächliche Erfahrung der ablaufenden Prozesse (Nisbett & Wilson, 1977). Sein drittes Argument steht auf ähnlich schwachen Füßen, da die *Mental-Scanning*-Experimente von Kosslyn zu Recht beispielsweise von Pylyshyn (1981) kritisiert wurden, da sie möglicherweise nur das implizite Wissen¹⁶ der Versuchspersonen über physikalische Bewegungen abbilden.

5.2.3 Die Speicherbedarfs-Hypothese

Nach der *Speicherbedarfs-Hypothese*¹⁷ (Sadalla & Magel, 1980; Sadalla & Staplin, 1980; Sadalla, Staplin & Burroughs, 1979) erhöhen die Abbiegungen die Komplexität der Route, was dazu führt, daß mit zunehmender Anzahl von Abbiegungen mehr Speicherkapazität benötigt wird, um die Route im Gedächtnis zu repräsentieren. Effekte auf subjektive Distanzen könnten dadurch zustande kommen, daß die Menge der Information über eine Route als Heuristik für deren Länge benutzt wird. Diese Hypothese wird durch ein Experiment von Sadalla und Staplin (1980) gestützt. Ähnlich wie in den Experimenten von Sadalla und Magel (1980) schritten die Probanden in der Lernphase eine auf dem Boden markierte Route ab. Die Route enthielt 15 Kreuzungen, die jeweils mit Eigennamen versehen waren. In einer Bedingung waren die Eigennamen geläufig, in einer anderen Bedingung weniger gebräuchlich. In der Testphase sollten die Versuchspersonen sowohl die Länge der Route angeben als auch die Eigennamen reproduzieren. Bei geläufigen Eigennamen wurden mehr Namen reproduziert und die Route wurde als kürzer eingeschätzt als bei seltenen Eigennamen. Wurden den Versuchspersonen vor der Schätzung die Namen nochmals vorgelegt, zeigte sich jedoch kein Effekt auf die Distanzschätzungen. In einer Studie von Foos (1982), in der die Versuchspersonen beim Erlernen einer Route auf einem Universitätscampus unterschiedlich viele Informationen erhielten, zeigte sich jedoch kein Einfluß der Menge an Information auf Schätzungen der Distanz.

¹⁶ Pylyshyn prägte hierfür den Begriff „tacit knowledge“.

¹⁷ engl.: storage size hypothesis

5.3 Der Effekt der Segmentierung

Effekte der Routensegmentierung auf Distanzschätzungen werden auch von Allen und Mitarbeitern berichtet (Allen, 1981; Allen, 1988; Allen & Kirasic, 1985; Allen, Siegel & Rosinski, 1978). In diesen Experimenten lernten Versuchspersonen anhand von Diaserien Routen durch reale Umgebungen. Nachdem die Routen von den Versuchspersonen in subjektive Segmente aufgeteilt wurden, sollten die Versuchspersonen aus dem Gedächtnis Distanzen zwischen je zwei Bildern schätzen und angeben, welches von zwei Bildern näher an einem Referenzbild lag.

In den Distanzurteilen zeigte sich, daß Distanzen innerhalb eines Segmentes unabhängig von der realen Distanz geschätzt wurden. Die Distanzschätzungen innerhalb von Segmenten unterschieden sich nicht. Distanzen zwischen Objekten aus verschiedenen Segmenten waren umso höher, je mehr Segmente zwischen den beiden Bildern lagen. Die Beziehung zwischen realen Distanzen und geschätzten Distanzen glich einer Treppenfunktion, deren Stufen durch die Segmente definiert waren. In den Distanzvergleichen zeigte sich, daß Distanzen zwischen Bildern aus verschiedenen Segmenten größer geschätzt wurden als Distanzen zwischen Bildern aus denselben Segmenten, auch wenn die tatsächliche Distanz kleiner war. Der Effekt ließ sich sogar noch nachweisen, wenn die Distanz innerhalb eines Segmentes dreimal so groß war wie die Distanz zwischen Bildern aus verschiedenen Segmenten. Allen und Kirasic (1985) sehen diesen Effekt als Beleg dafür an, daß aus Gründen der kognitiven Ökonomie der kontinuierliche Strom raumzeitlicher Informationen in mnemonische Einheiten (Chunks) aufgeteilt wird.

Effekte der Segmentierung räumlicher Information auf Distanzen zeigen sich nicht nur in Schätzungen von Pfadlängen, sondern auch in Schätzungen euklidischer Distanzen (Hirtle & Jonides, 1985; Holding, 1992; Holding, 1994; McNamara, Hardy & Hirtle, 1989). Hirtle und Jonides (1985) verwendeten den „geordneter Baum“-Algorithmus¹⁸, um aus Wiedergabeprotokollen hierarchische Strukturen zu extrahieren. Die Versuchspersonen mußten mehrmals hintereinander eine Liste von Landmarken aus dem Gedächtnis wiedergeben. Aus diesen Wiedergabeprotokollen wurde ein graphentheoretischer Baum konstruiert, der die hierarchische Struktur in den Wiedergabeprotokollen abbildete. In einem geordnetem Baum sind alle Elemente der Liste, die in jedem Wiedergabeprotokoll zusammen auftraten, unter einem Knoten zusammengefaßt. Knoten, die immer zusammen auftreten, werden wiederum in einem Knoten einer höheren Hierarchiestufe zusammengefaßt. Der so resultierende Baum spiegelt die hierarchische Struktur räumlichen Wissens wider, wenn man davon ausgeht, daß beim Wiedergeben von Objekten einer räumlichen Anordnung diejenigen Objekte, die zu einem Cluster gehören, immer zusammen wiedergegeben werden. Die Studie von Hirtle und Jonides

¹⁸ engl.: ordered tree algorithm

(1985) zeigte, daß Distanzen zwischen Objekten innerhalb eines Clusters als geringer eingeschätzt werden als Distanzen zwischen Objekten aus verschiedenen Clustern.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt Holding (1992). Sie ließ ihre Versuchspersonen die Namen von Gebäuden auf dem Campus der Universität von Louisville mehrmals aus dem Gedächtnis reproduzieren. Mit Hilfe von Clusteranalysen wurde die hierarchische Struktur der Wiedergabedaten ermittelt. In einer zweiten Sitzung sollten die Probanden aus dem Gedächtnis Distanzen zwischen den Gebäuden schätzen. Distanzen zwischen Gebäuden aus demselben Cluster wurden kürzer geschätzt als Distanzen zwischen Gebäuden aus unterschiedlichen Clustern.

5.4 Ein Modell für alle Effekte?

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, daß subjektive Distanzen nicht nur von der physikalischen Distanz abhängen, sondern daß auch die Anzahl der Merkmale auf einer Strecke und die Segmentierung der Strecke die geschätzte Distanz beeinflusst. Neben den hier dargestellten Einflußfaktoren gibt es auch andere, wie beispielsweise der in Kapitel 4.5.1 dargestellte Referenzpunkteffekt. Weitere mögliche Einflußgrößen werden von Montello (1997) diskutiert.

Die psychophysische Funktion zur Vorhersage von subjektiven Distanzen ist somit nicht nur eine Funktion der tatsächlichen Distanz. Die bisher dargestellten Modelle bilden jedoch nur jeweils einen der Effekte ab. Wünschenswert wäre ein Modell, daß nicht nur *ceteris paribus* den Effekt *einer* Einflußgröße vorhersagen kann, sondern in der Lage ist, für alle denkbaren Kombinationen aus Einflußgrößen eine Vorhersage zu liefern.

Die Effekte der Segmentierung und der Merkmalsakkumulation können möglicherweise auf ein gemeinsames Prinzip zurückgeführt werden. In einem Experiment von Jansen-Osmann (Berendt & Jansen-Osmann, 1997) lernten die Versuchspersonen eine virtuelle Umgebung bestehend aus einer Straße, die an Häusern vorbei führte. Die Straße war durch Kreuzungen segmentiert. Nach der Lernphase mußten die Versuchspersonen die Position bestimmter Häuser auf einer Linie markieren. Die Strecken zwischen den kritischen Positionen waren leer, gefüllt (mit einem weiteren Haus) oder segmentiert. Es zeigte sich sowohl ein Segmentierungseffekt als auch ein Merkmalsakkumulationseffekt. Die Präsenz eines Hauses zwischen zwei Schätzpunkten hatte denselben Effekt auf die Distanz zwischen den Schätzpunkten wie die Präsenz einer Kreuzung. Berendt und Jansen-Osmann schließen daraus, daß der Segmentierungseffekt ein Spezialfall des Merkmalsakkumulationseffektes ist. Die Präsenz eines Merkmales erhöht die geschätzte Distanz, unabhängig davon, ob es sich um ein segmentierendes Merkmal handelt. Geht man davon aus, daß sich Segmentierungseffekte nicht von Merkmalsakkumulationseffekten unterscheiden lassen, kann man jedoch auch den

umgekehrten Schluß ziehen: Jedes Merkmal auf einer Route führt zu einer Segmentierung der Route.

Berendt (Berendt, 1999; Berendt & Jansen-Osmann, 1997) schlägt ein Modell vor, nach dem die Repräsentation einer Route im Langzeitgedächtnis durch einen Graphen beschrieben werden kann. Die Knoten in diesem Graphen repräsentieren entweder Routensegmente oder einzelne Landmarken. Der Graph enthält zwei verschiedene Arten von Kanten. *Nachfolge-Kanten* spezifizieren den unmittelbaren Nachfolger eines Segmentes oder einer Landmarke und enthalten darüber hinaus Distanzinformation. *Enthaltens-Kanten* spezifizieren, zu welchem Segment eine Landmarke gehört. Die Schätzung einer Distanz erfolgt durch *Mental-Scanning* einer Rekonstruktion der Strecke im Kurzzeitgedächtnis, die parametrisch spezifiziert ist und eine limitierte Größe hat. Der Merkmalsakkumulationseffekt wird wie in der Skalierungshypothese darauf zurückgeführt, daß eine Potenz (mit einem Exponenten kleiner als 1) einer Summe kleiner ist als die Summe der Potenzen der Summanden. Segmentierungseffekte können entweder dadurch zustande kommen, daß zur Schätzung der Distanz zwischen zwei Landmarken aus verschiedenen Segmenten nur die Distanz zwischen den Segmenten herangezogen wird, oder dadurch, daß ein segmentierendes Objekt die Objektanzahl in der zu schätzenden Strecke erhöht.

Die Unsicherheitshypothese, die zunächst nur die Stauchung der subjektiven Distanzskala erklärt, kann ebenfalls so erweitert werden, daß sich Segmentierungs- und Merkmalsakkumulationseffekte aus ihr vorhersagen lassen. Dazu ist wie in der Skalierungshypothese die Annahme nötig, daß die Länge eines Pfades in einer Route nicht als Ganzes repräsentiert wird (sofern sich der Pfad über mehrere Segmente erstreckt), sondern nur die Längen der Segmente repräsentiert werden. Pfadlängen würden demnach durch Summation von Segmentlängen geschätzt. Nach der Unsicherheitshypothese sind die Pfadlängen aber Vergessensprozessen unterworfen, so daß manche Pfadlängen geraten werden müssen. Nimmt man an, daß die Wahrscheinlichkeit des Vergessens für alle Segmente einer Route gleich ist, so ergibt sich für die geschätzte Pfadlänge:

$$L' = \sum_{i=1}^{C+1} [pl_i + (1-p)g], \quad (5.3)$$

wobei C die Anzahl der Objekte auf dem Pfad, p die Wahrscheinlichkeit, daß die Länge eines Routensegmentes abgerufen werden kann, l_i die Länge des Routensegmentes i und g die geratene Länge (bzw. deren Erwartungswert) ist. Hält man die Gesamtlänge L eines Pfades konstant, so ist damit für $p < 1$ die geschätzte Pfadlänge eine linear ansteigende Funktion der Anzahl der Routensegmente:

$$L' = pL + (1-p)Cg. \quad (5.4)$$

Mit Hilfe dieser Zusatzannahme ist die Unsicherheitshypothese also in der Lage, nicht nur die Stauchung der subjektiven Distanzskala, sondern auch den Merkmalsakkumulationseffekt und den Routensegmentierungseffekt zu erklären.

Geht man davon aus, daß die Eigenschaften einer Route, die zu Segmentierungseffekten führen, genau wie Objekte auf einer Route zu einem Anhalten des *Scanning*-Prozesses führen, kann das analoge Zeitmesser-Modell (Thorndyke, 1981) ebenfalls Segmentierungseffekte erklären. Die Stauchung der subjektiven Distanzskala gegenüber physikalischen Distanzen bleibt damit jedoch unerklärt. Nimmt man jedoch an, daß die interne Uhr die verstrichene Zeit durch eine Potenzfunktion abbildet, so kann auch das analoge Zeitmesser-Modell die Stauchung der Distanzskala erklären.

Merkmalsakkumulationseffekt, Segmentierungseffekt und die Stauchung der subjektiven Distanzskala können also durch verschiedene Modelle erklärt werden. Bisher kann aufgrund empirischer Daten nicht entschieden werden, welches Modell das adäquateste ist. Zum Teil machen diese Modelle jedoch Annahmen, die sich über Reaktionszeitexperimente testen lassen sollten.

Tabelle 5.1

Vorhersage aus verschiedenen Modellen zur Schätzung von Distanzen für den Effekt der Objektanzahl und der Pfadlänge auf die Reaktionszeit für Distanzurteile.

Modell	Objektanzahl	Pfadlänge
reiner Abruf		
Summationsmodelle	+	
<i>Mental-Scanning</i>		+
analoges Zeitmesser-Modell	+	+

Legende. '+'-Zeichen deuten einen positiven Zusammenhang der Variablen an.

Ein offensichtliches Beispiel ist das analoge Zeitmesser-Modell. Die Zeit, die benötigt wird, um eine Distanz aus dem Gedächtnis zu schätzen, sollte eine Linearkombination aus der einzuschätzenden Länge und der Anzahl der Objekte auf einem Pfad sein: Sie sollte sowohl mit zunehmender Objektanzahl als auch mit zunehmender Pfadlänge ansteigen. Diejenigen Modelle, die eine Summation von Teildistanzen postulieren, lassen ebenfalls einen positiven Zusammenhang zwischen der Anzahl der Objekte und der Reaktionszeit für Distanzurteile erwarten, wenn man davon ausgeht, daß die Summation ein serieller Prozeß ist. Unter der Voraussetzung, daß die Teildistanzen explizit kodiert sind und unter konstantem Zeitbedarf abgerufen werden können, sollte die Reaktionszeit nach diesen Modellen jedoch unabhängig von der Distanz sein. Aufgrund der Reaktionszeit sollten sich auch andere Modelle unterscheiden lassen. Ein reiner *Mental-Scanning* Prozeß sollte zu einer Verlängerung der Reaktionszeit mit zunehmender Distanz führen, die Reaktionszeit sollte aber nicht von der

Objektanzahl abhängen. Sind die zu schätzenden Distanzen demgegenüber explizit repräsentiert und können mit konstantem Zeitbedarf abgerufen werden, so sollte die Reaktionszeit weder von der Länge noch von der Objektanzahl abhängen. Dieses Modell ist zunächst nicht sehr plausibel, da für eine Anordnung aus n Objekten $n(n-1)/2$ Interobjektdistanzen gespeichert werden müssen. Das Modell des reinen Abrufs impliziert damit eine quadratische Speicherkomplexität, womit die Distanzinformation im Gedächtnis sehr ineffizient repräsentiert wäre. Andererseits könnte man aufgrund der in Kapitel 4 diskutierten Verletzungen des Symmetrieaxioms argumentieren, daß die Speicherkomplexität für die Repräsentation von Distanzen sogar noch höher sein muß. Sind räumliche Distanzen asymmetrisch repräsentiert, müßten $n(n-1)$ Distanzen gespeichert werden. Reaktionszeiten für Distanzurteile könnten somit auch Hinweise darauf geben, ob es sich bei den in Kapitel 4 berichteten Verletzungen der metrischen Axiome um Stimulus- oder Wiedergabeverzerrungen handelt.

Durch Reaktionszeiten könnten sich also verschiedene Modelle der Repräsentation voneinander trennen lassen. Zum Teil lassen sich auch für Fehler in den Distanzschätzungen unterschiedliche Vorhersagen aus den verschiedenen Repräsentationsannahmen ableiten. Die Analyse von Fehlern setzt jedoch einen Vergleich von geschätzten Distanzen mit realen Distanzen voraus, was aus einer Reihe von Gründen problematisch ist (Montello, 1991). Reaktionszeiten werden in der Forschung zu mentalen Raumrepräsentationen in verschiedenen Untersuchungsmethoden eingesetzt, die im folgenden diskutiert werden.

6 Distanzen und Reaktionszeiten

Der Zusammenhang zwischen Distanzen in einer Lernkonfiguration und Reaktionszeiten für räumliche Urteile wurde in einer Reihe von Studien untersucht. In diesem Kapitel werden die experimentellen Techniken dargestellt und bewertet, in denen Reaktionszeiten zur Untersuchung räumlicher Repräsentationen eingesetzt werden. Eine klassische Untersuchungsmethode, das mentale Absuchen (*Mental-Scanning*), wurde von Kosslyn eingeführt.

6.1 Mental-Scanning

In einer klassischen Studie von Kosslyn, Ball und Reiser (1978) lernten die Versuchspersonen eine Karte einer fiktiven Insel, auf der verschiedene Objekte wie etwa eine Hütte, ein Brunnen oder ein See eingetragen waren. In der darauffolgenden Testphase wurde den Versuchspersonen zunächst ein Ankerobjekt präsentiert. Die Versuchspersonen sollten ein mentales Bild der Insel generieren und den Fokus der Aufmerksamkeit auf das Ankerobjekt richten. Anschließend wurde ihnen ein Zielobjekt präsentiert. Die Versuchspersonen sollten nun den Fokus der Aufmerksamkeit vom Ankerobjekt zum Zielobjekt wandern lassen und eine Taste drücken, sobald sie beim Ziel angekommen waren. Dieses Verfahren wird als *Mental-Scanning* bezeichnet. Der Zeitbedarf für diese Aufgabe stieg mit der Distanz zwischen den Objekten linear an. Dieser Effekt zeigte sich auch dann, wenn die Anzahl der Objekte auf dem direkten Pfad zwischen Anker- und Zielobjekt konstant gehalten wurde. Wenn die Versuchspersonen jedoch nur instruiert wurden, so schnell wie möglich zu entscheiden, ob sich das dargebotene Zielobjekt auf der Karte befand, ohne daß explizit das Absuchen eines mentalen Bildes gefordert war, zeigte sich kein Effekt der Distanz auf die Reaktionszeiten. Die Autoren interpretierten dieses Ergebnismuster als Evidenz dafür, daß Personen in der Lage sind, bildhafte Repräsentationen zu generieren, die parametrische Informationen enthalten. Wie schon in Kapitel 3 angesprochen, läßt sich an *Mental-Scanning*-Aufgaben kritisieren, daß sie möglicherweise kognitiv penetrierbar sind und die Ergebnisse nur implizite Annahmen der Versuchspersonen widerspiegeln. Deshalb sind sie kaum geeignet, Auskunft darüber zu geben, wie Distanzen im Gedächtnis repräsentiert sind.

6.2 Rekognitions-Priming

Räumliches Rekognitions-Priming ist eine häufig eingesetzte Methode zur Untersuchung der assoziativen Struktur des räumlichen Gedächtnisses. Zunächst lernen die Versuchspersonen eine räumliche Anordnung oder in dem Experiment wird auf präexperimentelles, räumliches Wissen zurückgegriffen. Anschließend sollen sie aus dem Gedächtnis entscheiden, ob ein dargebotener Begriff in der gelernten Anordnung vorkam. Der Begriff, für den die Entscheidung gefällt werden soll, wird als *Target* bezeichnet. Vor dem Erscheinen des *Targets* wird

ein weiterer Begriff, der sogenannte *Prime* präsentiert. Das zeitliche Intervall zwischen Beginn der Präsentation des *Prime* und Beginn der Präsentation des *Target* nennt man *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA). Beim *paarweisen* Priming soll auf den *Prime* nicht reagiert werden. Beim *singulären* Priming ist der *Prime* eines Durchgangs das *Target* des vorhergehenden Durchgangs. Die abhängige Variable in diesem Verfahren ist die Reaktionszeit für korrekte „Ja“-Antworten.

Viele Studien, in denen mit dieser Technik gearbeitet wurde, konnten einen Zusammenhang zwischen der räumlichen Distanz zwischen *Prime* und *Target* und der Reaktionszeit für die Entscheidung nachweisen: Mit zunehmender Distanz zwischen *Prime* und *Target* in der gelernten Anordnung stieg die Reaktionszeit für die Entscheidung, ob das *Target* in der Anordnung vorkam. Dies wurde als Beleg dafür gewertet, daß das räumliche Gedächtnis insofern eine räumliche Organisation aufweist, als räumlich nahe Objekte stärker miteinander assoziiert sind als Objekte, die weit voneinander entfernt sind.

Die erfolgreiche Anwendung des Priming-Paradigmas auf räumliches Wissen in frühen Studien (z. B. McNamara, 1986; McNamara, Ratcliff & McKoon, 1984; Wagener & Wender, 1985; Wender & Wagener, 1990) ließ diese Untersuchungsmethode als die Methode der Wahl zur Untersuchung räumlicher Repräsentationen erscheinen. McNamara (1986) schreibt dem räumlichen Priming entscheidende Vorteile gegenüber den gebräuchlichen Methoden zur Untersuchung räumlicher Repräsentationen, wie Distanzschätzungen, Orientierungsschätzungen, Kartenzeichnen oder Navigation zu. Bei diesen Methoden sei unklar, zu welchem Anteil die Ergebnisse die Struktur räumlicher Repräsentationen widerspiegeln, da in diesen Aufgaben Wiedergabe- und Inferenzprozesse wahrscheinlich eine große Rolle spielen. Eine Methode zur Untersuchung räumlicher Repräsentationen sollte jedoch den kognitiven Verarbeitungsaufwand möglichst gering halten, um die Eigenschaften der Repräsentation möglichst genau erfassen zu können. Nach McNamara (1986) könnte die Methode des Primings geeignet sein, diese Anforderung zu erfüllen, da die Ergebnisse nicht von Wiedergabestrategien beeinflusst sind. Er stützt diese These auf Befunde von Ratcliff und McKoon (1981), die bei einer Wiedererkennens-Priming Aufgabe für das Gedächtnis von Sätzen zeigen konnten, daß die Reaktionszeiten unabhängig von der Wahrscheinlichkeit waren, daß *Prime* und *Target* aus demselben Satz stammten, und Primingeffekte bereits bei einer SOA von 50 ms nachweisbar waren. Wiedererkennens-Priming erfüllt damit die Kriterien für automatische Prozesse und ist daher gut geeignet, Inhalt und Struktur des Wissens zu untersuchen.

Neuere Befunde lassen jedoch Zweifel daran aufkommen, daß räumliches Priming wirklich die geeignetste Methode zur Untersuchung räumlicher Repräsentationen ist. In einer Reihe von Studien zeigten sich entgegen aller Erwartungen keine räumlichen Primingeffekte oder

sogar eine Umkehrung des Effektes (Wagener-Wender, 1993), so daß die Methode selbst zunehmend zum Gegenstand der Forschung wurde, statt als Instrument der Forschung zu dienen.

An den frühen Untersuchungen zum räumlichen Priming läßt sich kritisieren, daß räumliche und zeitliche Nähe konfundiert sind. Legt man den Versuchspersonen in der Lernphase eine Karte vor, auf der verschiedene Orte eingetragen sind, so ist davon auszugehen, daß die Orte nicht alle gleichzeitig gelernt werden, sondern in einer bestimmten Reihenfolge. Ist diese Reihenfolge nicht vorgegeben, so ist zu vermuten, daß Orte, die nahe zueinander liegen, eher nacheinander gelernt werden als Orte, die weit voneinander entfernt sind. Damit ist die räumliche Distanz in der Anordnung mit der zeitlichen Distanz in der Lernreihenfolge konfundiert. Studien, in denen diese Konfundierung aufgehoben wurde (Clayton & Habibi, 1991; Sherman & Lim, 1991; Wagener-Wender, Wender & Rothkegel, 1997) konnten aber häufig keinen räumlichen Primingeffekt nachweisen.

Sherman und Lim (1991) verglichen räumliche Primingeffekte unter Standardbedingungen mit einer Bedingung, in der die raum-zeitliche Konfundierung aufgehoben war. Die Versuchspersonen lernten eine räumliche Konfiguration, die aus Kärtchen bestand, auf denen Namen von Objekten gedruckt waren. In einer Bedingung waren alle Kärtchen immer sichtbar, in einer anderen Bedingung wurden sie in einer vom Experimentator kontrollierten, zufälligen Reihenfolge einzeln aufgedeckt. Räumliche Primingeffekte ließen sich nur nachweisen, wenn alle Objekte in der Lernphase gleichzeitig sichtbar waren. Bei kontrollierter Lernreihenfolge ließen sich Reaktionszeitverkürzungen nur dann nachweisen, wenn statt der üblichen Wiedererkennungsaufgabe eine Ortsentscheidungsaufgabe verwendet wurde, bei der die Versuchspersonen entscheiden sollten, in welcher von zwei Regionen der Karte sich das Target befand.

Clayton und Habibi (1991) hoben die Konfundierung von räumlicher und zeitlicher Nähe dadurch auf, daß sie die Reihenfolge des Erwerbs der Objektpositionen kontrollierten. In drei Experimenten wurden kritische Objektpaare entweder zeitlich kurz hintereinander oder zeitlich weit auseinander gelernt. In einer weiteren Bedingung wurde die zeitliche Nähe systematisch mit der räumlichen Nähe konfundiert. Die Reaktionszeiten zeigten weder in der zeitlich nahen Bedingung noch in der zeitlich fernen Bedingung einen räumlichen Primingeffekt. Allerdings waren die Reaktionszeiten in der zeitlich nahen Bedingung kürzer als die Reaktionszeiten in der zeitlich fernen Bedingung. Die Autoren schlossen daraus, daß nicht die räumliche, sondern die zeitliche Nähe die Stärke der Assoziation zwischen zwei Objekten in einer mentalen Karte bestimmt.

Die Gültigkeit dieses Schlusses wird jedoch durch eine Studie von McNamara, Halpin und Hardy (1992) in Frage gestellt. In dieser Studie wurden räumliche und zeitliche Nähe

faktoriell miteinander kombiniert. Es zeigte sich ein räumlicher Primingeffekt bei zeitlich nahen Objekten, nicht aber in der zeitlich fernen Bedingung. Demgegenüber zeigte sich ein zeitlicher Primingeffekt bei räumlich nahen Objekten, nicht aber bei räumlich fernen Objekten. Diese Ergebnisse werden von den Autoren mit einer dualen Repräsentationshypothese erklärt, nach der räumliche Information in zwei Formaten repräsentiert wird. In einem *nichtparametrischen Code* wird räumliche Information, wie beispielsweise die Benachbarkeit zweier Orte, propositional repräsentiert. In einem *parametrischen Code* werden Informationen, wie die euklidische Distanz oder die zeitliche Reihenfolge, in analoger Weise repräsentiert. Nichtparametrische räumliche Relationen, wie beispielsweise „*x* liegt neben *y*“, werden vor allem dann gebildet, wenn Objekte, die räumlich nah zueinander sind, gleichzeitig kurz hintereinander gelernt werden. Der Grund hierfür könnte darin liegen, daß die zeitliche Nähe die Wahrscheinlichkeit erhöht, daß sich zwei Objekte gleichzeitig im Arbeitsgedächtnis befinden, wodurch die Bildung einer räumlichen Assoziation ermöglicht wird. Die Reaktionszeitmuster in der Wiedererkennungsaufgabe spiegeln demnach die Tatsache wider, daß die Objekte in der Bedingung „räumlich nah, zeitlich nah“ im Gegensatz zu den übrigen Bedingungen durch einen nichtparametrischen Code miteinander assoziiert sind.

Curiel und Radvansky (1998) vertreten dagegen die Auffassung, daß die mentale Organisation räumlichen Wissens primär davon abhängt, welche Informationen beim Erwerb im Vordergrund stehen. Sie prüften diese Hypothese, indem sie Versuchspersonen nach dem Erlernen einer Karte auf unterschiedliche Aspekte dieser Karte hin überprüften. In der *Benennungsbedingung* wurde jeweils der Ort eines Objektes eingeblendet und die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, den Namen des Objektes anzugeben. In der *Zeigebedingung* wurde der Name eines Objektes vorgegeben, und die Versuchspersonen sollten auf den Ort des Objektes in einer leeren Karte zeigen. In einem nachfolgenden Wiedererkennenstest zeigte sich ein räumlicher Primingeffekt ausschließlich in der Zeigebedingung, während sich ein zeitlicher Primingeffekt ausschließlich in der Benennungsbedingung zeigte. Darüber hinaus hatten die Versuchspersonen die Aufgabe, die gelernten Objektnamen in beliebiger Reihenfolge wiederzugeben. Die Reihenfolge der Wiedergabe war in der Benennungsbedingung stärker zeitlich organisiert, während sie in der Zeigebedingung stärker räumlich organisiert war. Die Ergebnisse der Studie deuten darüber hinaus darauf hin, daß die Organisation räumlichen Wissens nur von der tatsächlichen, nicht aber von der intendierten Nutzung räumlicher versus zeitlicher Information abhängt, da die Erwartung, zu einem späteren Zeitpunkt ausschließlich räumliche Information erinnern zu müssen, sich nicht in einer räumlichen Organisation niederschlug (Experiment 2).

Die Ergebnisse anderer Studien machen jedoch deutlich, daß die Theorie von Curiel und Radvansky (1998) noch nicht vollständig in der Lage ist, die Bedingungen vorherzusagen, unter denen räumliches Priming auftritt. In zwei Experimenten unserer Arbeitsgruppe

(Wagener-Wender et al., 1997) gab es nur sehr schwache Hinweise für räumliche oder zeitliche Primingeffekte. Experiment 1 untersuchte das räumliche Priming unter vier Bedingungen, die ähnlich wie in der Studie von Clayton und Habibi dazu konzipiert waren, räumliches Priming unter Standardbedingungen, das heißt mit einer Konfundierung von räumlicher und zeitlicher Nähe, mit Bedingungen zu vergleichen, in denen diese Konfundierung aufgehoben war.

Dazu lernten vier Gruppen von Versuchspersonen eine Karte mit zwölf Objekten, die auf einem Bildschirm präsentiert wurde. Die *Kartengruppe* sah in der Lernphase alle zwölf Objekte immer gleichzeitig. Die Reihenfolge des Erlernens war damit den Versuchspersonen überlassen. In den übrigen Gruppen wurden die Objekte einzeln nacheinander in der Karte eingeblendet, so daß die Reihenfolge des Erlernens kontrolliert war. In der Gruppe *Minimale Route* entsprach die Reihenfolge der Präsentation der Lösung des *Travelling-Salesman-Problems*, das heißt, es war die kürzest mögliche Route, die alle Objekte miteinander verband. Die Gruppe *Maximale Route* erlernte dagegen die Objekte in einer Reihenfolge, die die Länge dieser Route maximierte. Schließlich gab es noch eine Bedingung *Zufällige Route*, in der die Objekte in ständig wechselnder, zufälliger Reihenfolge präsentiert wurden.

Die Reaktionszeiten in der nachfolgenden Wiedererkennenaufgabe zeigten lediglich in der Gruppe Maximale Route einen räumlichen Primingeffekt und stehen damit im Widerspruch zu den Ergebnissen von Clayton und Habibi (1991) und McNamara, Halpin und Hardy (1992). Zudem war selbst in der Gruppe Maximale Route die durch die räumliche Nähe aufgeklärte Varianz der Reaktionszeiten sehr gering. Sie lag bei vier Prozent. Für die Gruppen Minimale Route und Maximale Route wurde darüber hinaus der Einfluß der zeitlichen Distanz untersucht. Hier ergab sich für keine der beiden Gruppen ein Effekt auf die Reaktionszeit. Allerdings zeigte sich ein Effekt der zeitlichen Richtung. Lag der *Prime* in der Lernreihenfolge zeitlich vor dem *Target*, war die Reaktionszeit kürzer gegenüber der umgekehrten Bedingung, in der der *Prime* nach dem *Target* gelernt wurde. Dieser Effekt der zeitlichen Richtung im räumlichen Priming läßt sich in einer Vielzahl von Lernbedingungen und Abfragemethoden nachweisen (Herrmann, Buhl & Schweizer, 1995; Schweizer, 1997; Schweizer, Herrman, Janzen & Katz, 1998).

Experiment 2 war ebenfalls dazu konzipiert, räumliche und zeitliche Einflüsse auf die Reaktionszeiten zu trennen. Hier wurden, ähnlich wie in der Studie von McNamara, Halpin und Hardy (1992), räumliche und zeitliche Nähe innerhalb einer Lernreihenfolge faktoriell voneinander getrennt. Die räumlichen Anordnungen und die Lernreihenfolgen wurden also so konstruiert, daß alle vier Kombinationen der jeweils zweifach gestuften Faktoren *Räumliche Nähe* und *Zeitliche Nähe* realisiert waren. Die Reaktionszeiten zeigten weder einen Effekt der

räumlichen noch einen Effekt der zeitlichen Distanz und stehen damit ebenfalls im Widerspruch zu den Ergebnissen von McNamara, Halpin und Hardy (1992).

Für beide Experimente dieser Studie gilt, daß das Fehlen räumlicher Primingeffekte nicht darauf zurückzuführen ist, daß die Versuchspersonen über keine räumliche Repräsentation verfügten. Ergebnisse von Distanzschätzungen, die jeweils nach der Primingphase durchgeführt wurden, zeigten hohe Korrelationen mit den Distanzen in der Lernkonfiguration. Darüber hinaus ergaben multidimensionale Skalierungen der geschätzten Distanzen durchweg niedrige Stresswerte im zweidimensionalen, euklidischen Raum (Wender et al., 1997). Die Ergebnisse der multidimensionalen Skalierungen zeigen zudem, daß auch zeitliche Manipulationen durchaus einen Einfluß auf die räumliche Repräsentation hatten. Die aus den multidimensionalen Skalierungen resultierenden Konfigurationen zeigen insofern einen Einfluß der Lernreihenfolge, als die Lernrouten regelmäßiger und damit einfacher gemacht wurden. Die weitgehend fehlenden Einflüsse räumlicher und zeitlicher Nähe auf die Reaktionszeiten im Wiedererkennenstest können also nicht darauf zurückgeführt werden, daß die Versuchspersonen diese Variablen nicht repräsentiert hatten.

Dies muß jedoch nicht bedeuten, daß vermeintliche räumliche Primingeffekte rein zeitliche Effekte sind, wie eine Studie von Herrmann, Buhl und Schweizer (1995) deutlich macht. Lernten die Versuchspersonen Listen von Begriffen, indem die Begriffe nacheinander an einer konstanten Position am Bildschirm angezeigt wurden und somit keine räumliche Information vorlag, so ergab sich kein zeitlicher Primingeffekt. Lernten die Versuchspersonen dagegen Objekte entlang einer Route, so waren im nachfolgenden Primingtest die Reaktionszeiten kürzer, wenn der *Prime* in der Lernreihenfolge vor dem *Target* kam, als im umgekehrten Fall. In diesen Experimenten zeigten sich darüber hinaus keine klassischen räumlichen Primingeffekte, das heißt, die Reaktionszeiten steigen nicht mit zunehmender Distanz auf der Route an.

6.3 Reaktionszeiten für Distanzurteile

Reaktionszeiten für Schätzungen von Distanzen wurden nur in wenigen Studien erhoben. Hartley (1977) erhob Reaktionszeiten für perzeptive Längenschätzungen. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, Längen von Linien zu schätzen, die an einem Computermonitor präsentiert wurden. Zusammen mit der einzuschätzenden Linie wurde eine zweite Linie als Standard der Schätzung präsentiert. Die geschätzte Länge wurde von den Versuchspersonen mit Hilfe der Tastatur eingegeben. Die Reaktionszeiten wurden ohne Wissen der Versuchspersonen erhoben. Die Messung wurde mit der Quittierung der Eingabe gestoppt. Die Reaktionszeit für die Längenschätzung war positiv mit der Länge korreliert.

Baum und Jonides (1979) verglichen Latenzen für perzeptive Distanzvergleiche mit Latenzen für mnemonische Distanzvergleiche. Ziel des Experimentes war herauszufinden, ob bei Distanzschätzungen aus dem Gedächtnis dieselben Prozesse ablaufen wie bei perzeptiven Distanzschätzungen. In der *Gedächtnisbedingung* sollten die Versuchspersonen Distanzen zwischen 10 verschiedenen Gebäuden auf dem Campus der Universität von Michigan vergleichen. In jedem Durchgang erschienen jeweils drei Gebäudenamen auf einem Computerbildschirm, und die Versuchspersonen sollten so schnell wie möglich entscheiden, welches von zwei Gebäuden näher an dem Referenzgebäude lag. In der *Wahrnehmungsbedingung* wurden jeweils drei Buchstaben auf dem Bildschirm dargeboten, deren relative Lage zueinander jeweils der Lage von Gebäuden auf dem Campus entsprach. Mit Hilfe von Korrelationen und Partialkorrelationen wurde ermittelt, daß der beste Prädiktor für die Latenzdaten in beiden Bedingungen das Verhältnis der Distanzen war. Allerdings war der Zusammenhang zwischen Latenzen und dem Verhältnis der Distanzen in der Gedächtnisbedingung linear, während er in der Wahrnehmungsbedingung quadratisch war. Das Reperzeptionsmodell kann diesen Effekt nicht ohne weiteres erklären.

Denis und Zimmer (1992) verwendeten eine ähnliche Methode, um Repräsentationen von bildlichen Darstellungen räumlicher Information mit Repräsentationen verbaler Beschreibungen derselben Informationen zu vergleichen. In der *Kartenbedingung* wurde den Versuchspersonen eine Anordnung von Objekten auf einer Kreislinie in Form einer Karte dargeboten. In der *Textbedingung* wurde dieselbe Anordnung verbal beschrieben. In einer Testphase sollten die Versuchspersonen jeweils entscheiden, welches von zwei Zielobjekten näher an einem Referenzobjekt lag. In beiden Bedingungen stieg die Reaktionszeit für diese Entscheidung mit zunehmendem Entfernungsunterschied an.

Baum und Jonides (1979) berichten außerdem von einem Experiment, in dem Reaktionszeiten für mnemonische Distanzschätzungen erhoben wurden. In diesem Experiment ergab sich ein substantieller linearer Zusammenhang zwischen der Distanz und der Latenz für das Distanzurteil.

Sadalla, Burroughs und Staplin (1980, Exp. 4) erhoben ebenfalls Reaktionszeiten für Distanzurteile. Die Versuchspersonen sollten für Paare von Gebäuden auf einem Universitätscampus entscheiden, ob sie mehr oder weniger als 600 Yard voneinander entfernt waren. Die Gebäudepaare bestanden aus einem neutralen Gebäude und einem Gebäude mit entweder hoher oder niedriger Referentialität. Die Reaktionszeiten für Paare mit Referenzpunkten waren niedriger als für Paare, in denen der Zielreiz eine niedrige Referentialität aufwies. Diese Beziehung wurde auch für Reaktionszeiten bei Richtungsurteilen gefunden (Exp. 5). Ein Zusammenhang der Reaktionszeit mit der Distanz zwischen den Gebäuden wurde jedoch nicht berichtet.

McNamara und LeSueur (1989) untersuchten den Einfluß nicht-räumlicher Relationen auf räumliches Priming und subjektive Distanzen. Die Versuchspersonen lernten Anordnungen von jeweils 32 benannten Punkten auf einem Blatt Papier. In einer Distanzschätzaufgabe (Exp. 3b) sollten die Versuchspersonen euklidische Distanzen zwischen einzelnen Punkten einschätzen. Für diese Schätzungen wurde die Reaktionszeit erhoben. In jedem Durchgang wurde ein Paar von Namen präsentiert und die Versuchspersonen sollten eine Taste drücken, sobald sie sich ein Urteil über die Entfernung gebildet hatten. Variiert wurde die Distanz zwischen den Objekten und die episodische Bezogenheit. Die Reaktionszeiten waren für nahe beieinander liegende Objektpaare geringer als für weiter entfernte Objektpaare.

McNamara, Ratcliff und McKoon (1984, Exp. 1) untersuchten den Zusammenhang zwischen Distanzen und Reaktionszeiten für Distanzurteile im Rahmen eines Priming-Experimentes. Die Versuchspersonen lernten fiktive Straßenkarten, auf denen jeweils 16 Städte eingetragen waren. Nach einer Lernphase und einem Wiedererkennenstest sollten die Versuchspersonen Distanzen zwischen jeweils zwei Objekten einschätzen. Die Versuchspersonen sollten eine Taste drücken, sobald sie ein Distanzurteil gebildet hatten. Die geschätzten Distanzen korrelierten mit den Reaktionszeiten signifikant zu $r = .54$. Dieser Befund stützt zunächst das analoge Zeitmesser-Modell. McNamara, Ratcliff und McKoon (1984) argumentieren jedoch, daß die Annahmen dieses Modells adäquater durch den Vergleich der bivariaten Verteilungen der Reaktionszeiten und zugehörigen Distanzurteile unter verschiedenen Bedingungen getestet werden können. Dazu wurden die kritischen Paare von Städten in drei Gruppen aufgeteilt, je nachdem, ob sie auf der Route (das heißt, der Straße, die diese Objekte verband) nah oder weit von einander entfernt waren und ob sie hinsichtlich der euklidischen Distanz nah oder weit voneinander entfernt waren. (Euklidisch ferne Objekte, die auf der Route nah zueinander lagen, konnten in diesem Design nicht auftreten.) Distanzurteile und Reaktionszeiten in jeder dieser drei Bedingungen wurden *vincentisiert*, das heißt, die Verteilung jeder Versuchsperson wurde in Quartile aufteilt, die dann über die Versuchspersonen gemittelt wurden. Die daraus resultierenden Verteilungen für euklidisch nahe und ferne Städtepaare überlappten sich deutlich hinsichtlich der Reaktionszeiten. Ein großer Teil der auftretenden Reaktionszeiten war also sowohl der euklidisch nahen Bedingung als auch der euklidisch fernen Bedingung zugeordnet.

“This indeterminacy shows that there cannot be a monotonically increasing function from latencies to distances, let alone a linear function. These results make any model assuming linear relations between scan times and distance estimations and between scan times and estimation latencies extremely suspect” (McNamara et al., 1984, S. 728).

Der mögliche Einwand, daß der Großteil der Variabilität in den Reaktionszeiten durch andere Prozesse als den Scanvorgang hervorgerufen wird, führt nach Ansicht der Autoren zu einem unplausiblen Modell, da die Varianz dieser restlichen Prozesse sehr hoch sein müßte. Die

Autoren ziehen daraus den Schluß, daß Modelle, die Distanzschätzungen auf Scanzeiten zurückführen, durch dieses Ergebnis in Frage gestellt sind. Diese Argumentation ist jedoch nicht überzeugend, da klar sein dürfte, daß in der Zeit von der Präsentation eines Städtepaars bis zum Tastendruck eine ganze Reihe von Prozessen der Wahrnehmung und Dekodierung sowie motorischer Prozesse stattfinden. Die Annahme, daß diese Prozesse eine hohe Varianz erzeugen, die nicht durch die geschätzte Distanz erklärt werden kann, ist keineswegs unplausibel. Zudem zeigt die signifikante Korrelation zwischen Distanzurteilen und Reaktionszeiten, daß es durchaus einen bedeutsamen Zusammenhang gibt. Es ist nicht einzusehen, warum dieser Zusammenhang stärker als die gefundene Korrelation von .54 sein muß, um lineare *Scanning*-Modelle zu stützen. Die hohe Residualvarianz wäre nur dann problematisch für *Scanning*-Modelle, wenn sie durch Faktoren aufgeklärt würde, für die das *Scanning*-Modell einen Einfluß verbietet. Das war jedoch nicht der Fall. Für den linearen Zusammenhang zwischen Distanzen und Latenzen wird auch keine Alternativerklärung angeboten. Darüber hinaus bleibt auch offen, weshalb die Autoren den Vergleich von Verteilungen für einen adäquateren Test der *Scanning*-Modelle halten.

6.4 Fazit

Die vorangehenden Abschnitte haben gezeigt, daß Reaktionszeiten als Instrument zur Prüfung von Hypothesen bezüglich der Repräsentation von Distanzen eingesetzt werden können. Zum Teil sind mit den verwendeten Verfahren jedoch methodologische Probleme verbunden. *Mental-Scanning*-Aufgaben erscheinen zur Testung von Repräsentationshypothesen ungeeignet, da unklar ist, inwieweit sie kognitiv penetrierbar sind. Räumliches Priming ist zwar von einem methodologischen Standpunkt aus gesehen ein vielversprechendes Paradigma, die Ergebnisse scheinen jedoch von sehr spezifischen Aufgabencharakteristika abzuhängen. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist unklar, welche Eigenschaften räumlicher Repräsentationen durch räumliches Priming erfaßt werden und welche Randbedingungen gegeben sein müssen, um räumliche Primingeffekte zu erhalten.

Reaktionszeiten für Distanzurteile sind bisher kaum systematisch untersucht worden, so daß zum gegenwärtigen Zeitpunkt keine abschließende Beurteilung möglich ist, ob sie als Instrument der Prüfung von Repräsentationshypothesen tauglich sind. In der vorliegenden Arbeit sind Reaktionszeiten für Distanzurteile daher sowohl Mittel zur Überprüfung von Repräsentationshypothesen als auch Gegenstand der Untersuchung, da noch geklärt werden muß, ob diese Reaktionszeiten Eigenschaften mentaler Raumrepräsentationen widerspiegeln. In den wenigen, oben angesprochenen Untersuchungen fehlt ein systematischer Vergleich des Effektes der Anzahl der Merkmale auf einer Strecke mit der Länge der Strecke. Dieser Vergleich ist nötig, um zwischen den in Kapitel 5 angesprochenen Hypothesen zur Repräsentation von Distanzen trennen zu können. Ebenso gibt es keine Studie, die mit Hilfe dieser

Technik die Repräsentation von Distanzen entlang einer Route untersucht. In den oben zitierten Untersuchungen lernten die Versuchspersonen Karten und schätzten anschließend euklidische Distanzen aus dem Gedächtnis. Reaktionszeiten für Distanzurteile beim Routenlernen könnten andere Ergebnisse erzeugen als Reaktionszeiten nach dem Erlernen von Karten. Da Karten in vieler Hinsicht Bildern gleichen, ist es nicht verwunderlich, wenn Urteile nach dem Erlernen von Karten auf einer bildhaften Repräsentation beruhen. Routenlernen zeichnet sich jedoch dadurch aus, daß eine räumliche Anordnung niemals als Ganzes gesehen wird, so daß weniger klar ist, welche Repräsentationen und Prozesse hier beteiligt sind. Die im nächsten Kapitel geschilderten Experimente sollen zur Klärung dieser Frage beitragen.

7 Reaktionszeitexperimente zur Repräsentation von Pfadlängen

Wie bereits in Kapitel 5 angesprochen, lassen sich verschiedene Annahmen bezüglich der Repräsentation von Distanzen mittels der Vorhersagen trennen, die sich für Reaktionszeiten bei Distanzurteilen ableiten lassen. In diesem Kapitel werden Experimente vorgestellt, die diese Vorhersagen überprüfen. Die unabhängigen Variablen in diesen Experimenten sind zum einen die Länge des einzuschätzenden Pfades und zum anderen die Anzahl der Objekte auf dem Pfad. Zur Auswertung der Reaktionszeiten bietet sich entweder eine Varianzanalyse oder eine Regressionsanalyse an.

Die Varianzanalyse setzt voraus, daß die Prädiktoren stochastisch unabhängig sind, das heißt, die unabhängigen Variablen müssen vollständig gekreuzt sein. Für die vorliegende Untersuchung bedeutet das, es muß eine Auswahl von Pfaden gefunden werden, die gewährleistet, daß Pfadlänge und Anzahl der Routensegmente unabhängig voneinander variieren. Dies stellt erhebliche Anforderungen an die Lernvorlage. In bisherigen Experimenten unserer Arbeitsgruppe zeigte sich, daß mit etwa 30 Objekten die Kapazitätsgrenze für das Behalten von Objektpositionen erreicht ist. Eine varianzanalytische Auswertung setzt damit voraus, daß mit einer geringen Anzahl von Objekten möglichst viele Pfade realisiert werden müssen, in denen Objektanzahl und Pfadlänge unabhängig voneinander variieren. Es scheint hoffnungslos, eine derartige Konfiguration in natura vorzufinden, aber selbst die Konstruktion einer derartigen Anordnung wirft Probleme auf, da schon selbstverständliche Randbedingungen wie etwa die, daß sich die Konfiguration nur in zwei Dimensionen erstrecken sollte, viele Konstruktionen in eine Sackgasse geraten lassen.

Weniger Anforderungen an die Lernanordnung stellt eine Regressionsanalyse. Um den Einfluß von Pfadlänge und Objektanzahl getrennt ermitteln zu können, ist es nötig, daß beide Variablen möglichst gering miteinander korrelieren. Stochastische Unabhängigkeit ist jedoch nicht gefordert. Um den Einfluß einer der beiden unabhängigen Variablen auf die Reaktionszeit zu ermitteln, können Partialkorrelationen berechnet werden, die jeweils den Einfluß der anderen Variablen auf Prädiktor und Kriterium auspartialisieren. Eine regressionsanalytische Auswertung nach diesem Schema hat jedoch mindestens zwei Nachteile gegenüber einer varianzanalytischen Auswertung.

Zum einen kann die lineare Regression nur lineare Effekte testen. Das bedeutet, daß ein Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Pfadlänge und/oder Segmentanzahl nur dann entdeckt werden kann, wenn er linear ist. Dies ist nicht sehr bedenklich, solange nur univariate Regressionen berechnet werden, weil in diesem Fall bereits eine Inspektion des Streu-

ungsdiagramms Nichtlinearitäten erkennen läßt. Bei multiplen Regressionen und Partialkorrelationen handelt es sich jedoch um ein komplexeres Zusammenhangsgefüge, das nicht mehr einfach visuell auf Linearität hin geprüft werden kann.

Ein zweiter Nachteil regressionsanalytischer Auswertung besteht darin, daß Interaktionen zwischen den Prädiktoren nicht ermittelt werden können. Manchmal wird zwar bei multiplen Regressionsanalysen von Interaktion gesprochen, wenn der Standardpartialregressionskoeffizient für das Produkt zweier Prädiktoren signifikant von 0 verschieden ist, diese Art der „Interaktion“ unterscheidet sich jedoch deutlich von Interaktionen im varianzanalytischen Sinn. Während sich in Varianzanalysen beliebige Abweichungen von der Additivität der Faktoren in Interaktionen niederschlagen, gilt das bei Regressionsanalysen nur, wenn die Abweichung von der Additivität der Prädiktoren eine lineare Funktion des Produktes der Prädiktoren ist.

Diese beiden Nachteile der Regressionsanalyse sind im Kontext der geplanten Experimente besonders kritisch, da hier keine Vorerfahrungen vorliegen, wie etwaige Effekte der Prädiktoren aussehen könnten. Aus diesen Gründen wird ein varianzanalytischer Versuchsplan einem regressionsanalytischen vorgezogen. Die Pfadlänge soll also vollständig mit der Segmentanzahl gekreuzt werden. Damit sind regressionsanalytische Methoden jedoch nicht gänzlich überflüssig geworden. Beispielsweise ist es sinnvoll, den Zusammenhang zwischen objektiver Pfadlänge und Reaktionszeit mit dem Zusammenhang zwischen subjektiver Pfadlänge und Reaktionszeit zu vergleichen, was nur regressionsanalytisch geschehen kann.

Die Entscheidung für einen faktoriellen Versuchsplan bringt mit sich, daß nur virtuelle Konfigurationen als Stimulusmaterial in Frage kommen, wenn man den Aufwand vertretbar halten will. Dies wirft die Frage auf, inwieweit der Modus des Lernens die Repräsentation beeinflusst. Genauer, führt das Lernen einer virtuellen Umgebung zu anderen Repräsentationen als das Lernen in natürlichen Umgebungen? Die Frage, ob sich räumliche Repräsentationen realer Umgebungen von Repräsentationen virtueller Umgebungen unterscheiden, ist gegenwärtig Gegenstand vieler Untersuchungen (Gale, Golledge, Pellegrino & Doherty, 1990; Richardson, Montello & Mary, in press; Ruddle, Payne & Jones, 1997). Bisher zeichnet sich wenig Evidenz dafür ab, daß unterschiedliche Modi des Erlernens zu qualitativ unterschiedlichen Repräsentationen führen.

Die Wahl der Reaktionszeit für Distanzurteile als wichtigste abhängige Variable setzt voraus, daß die Zeit, die benötigt wird, um die Schätzung auszuführen, nicht von der Höhe der Schätzung abhängen darf. Dies schließt eine Reihe gängiger Verfahren zur Distanzschätzung aus. Beispielsweise ist es nicht möglich, Distanzen durch Markierung auf einer Skala mit Hilfe der Maus am Computer schätzen zu lassen, denn der Weg, der mit der Maus zurückgelegt werden muß, ist von der zu schätzenden Distanz abhängig. Deshalb wurde ein verbales

Antwortformat gewählt (siehe auch McNamara & LeSueur, 1989; McNamara et al., 1984). Die Versuchspersonen sollten mündlich angeben, wie viele Distanzeinheiten zwischen Anker und Zielreiz lagen. Es ist nicht auszuschließen, daß der spezifische Antwortmodus die Ergebnisse beeinflusst, allerdings sprechen bisherige Ergebnisse eher gegen diese Annahme. In einer Metaanalyse von 70 Studien (Wiest & Bell, 1985) zur Schätzung von Distanzen hatte das Antwortformat keinen Einfluß auf die Höhe des Exponenten in der Stevens'schen Potenzfunktion. Dieser Befund ist jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da aufgrund der Tatsache, daß 85% der Studien ein verbales Antwortformat benutzten, die Teststärke dieses Vergleichs relativ gering ist. Es gibt zwar Hinweise darauf, daß nonverbale Größenschätzungen weniger Varianz in den Schätzungen produzieren als verbale Größenschätzungen (Leibowitz, Guzy, Peterson & Blake, 1993), aber dies muß nicht bedeuten, daß Reaktionszeiten für verbale Distanzschätzungen ebenfalls stärker streuen.

Die Messung der Latenz für verbale Distanzschätzungen legt den Einsatz eines Stimmschlüssels zur Erfassung der Latenzen nahe. Es läßt sich jedoch zeigen, daß Stimmschlüssel in Abhängigkeit von dem Anfangsphonem des ausgesprochenen Wortes unterschiedlich schnell ansprechen (Pechmann, Reetz & Zerbst, 1989). Dies ist insbesondere für Distanzschätzungen problematisch, da etwaige Reaktionszeitunterschiede für verschiedene subjektive Distanzen möglicherweise ein Artefakt der Unterschiede in der Ansprechverzögerung des Stimmschlüssels sein könnten. Aus diesem Grund wurden die Reaktionszeiten über einen Tastendruck der Versuchspersonen gestoppt.

7.1 Experiment I¹⁹

In Experiment I lernten die Versuchspersonen eine Anordnung von Objekten, die durch Pfade miteinander verbunden waren. Die Anordnung war so konstruiert, daß in verschiedenen kritischen Pfaden die Anzahl der Objekte auf dem Pfad unabhängig von der Länge des Pfades variierte. Routenlernen wurde dadurch realisiert, daß die Versuchspersonen in der Lernphase jeweils nur einen kleinen Ausschnitt der Anordnung sahen. Die Versuchspersonen konnten in der Lernphase die Anordnung aktiv explorieren, in dem sie durch Drücken von Tasten den sichtbaren Ausschnitt der Karte entlang der Pfade verschoben. Damit gewährleistet war, daß die Versuchspersonen tatsächlich in der Navigationsphase Routenwissen erwarben, mußten sie einen Lerntest absolvieren, in dem sie jeweils den kürzesten Pfad von einem Objekt zu einem anderen Objekt beschreiben sollten. In der nachfolgenden Distanzschätzphase wurden nacheinander jeweils ein Ankerobjekt und ein Zielobjekt aus der Lernphase präsentiert. Beim

¹⁹ Die Experimente I, II und IV der vorliegenden Arbeit wurden bereits in den „Lecture Notes in Artificial Intelligence“ vorgestellt (Rothkegel, Wender & Schumacher, 1998). Die in der vorliegenden Arbeit berichteten Ergebnisse unterscheiden sich zum Teil von den dort berichteten Ergebnissen, was darauf zurückzuführen ist, daß in der vorliegenden Arbeit die Prozedur zur Elimination von „Ausreißern“ vereinheitlicht wurde.

Das Lernmaterial bestand aus einer am Computer dargebotenen räumlichen Anordnung von 21 Objekten. Die Objekte waren symbolische Darstellungen von Gebäuden, die man in einer Stadt antreffen kann. Unter jedem Bild befand sich der Name des Objekts. Die Objekte waren durch gestrichelte Linien miteinander verbunden, die Straßen darstellen sollten. Jedes Paar von Objekten war durch mindestens einen Pfad verbunden.

Das Experiment wurde auf einem Macintosh PowerPC 7100 mit einem 14 Zoll Apple Farbmonitor durchgeführt. In der Navigationsphase wurde jeweils nur ein kleiner Teil der Karte in einem quadratischen Fenster mit einer Kantenlänge von 6.5 cm gezeigt. In diesem Fenster waren maximal zwei Objekte gleichzeitig vollständig sichtbar. In der Mitte des Fensters wurde ein schwarzer Punkt dargeboten, der ein Taxi symbolisieren sollte. Die Versuchspersonen konnten das Taxi mit Hilfe der Pfeiltasten entlang der gestrichelten Linien nach oben, unten, links oder rechts bewegen. Die Bewegung wurde dadurch simuliert, daß der sichtbare Teil der Karte verschoben wurde, während die Position des Fensters und die Position des schwarzen Punktes relativ zum Fenster konstant blieb. Solange eine der Pfeiltasten gedrückt war, wurde die Karte 60 mal pro Sekunde um 2 Pixel in die jeweilige Richtung verschoben.

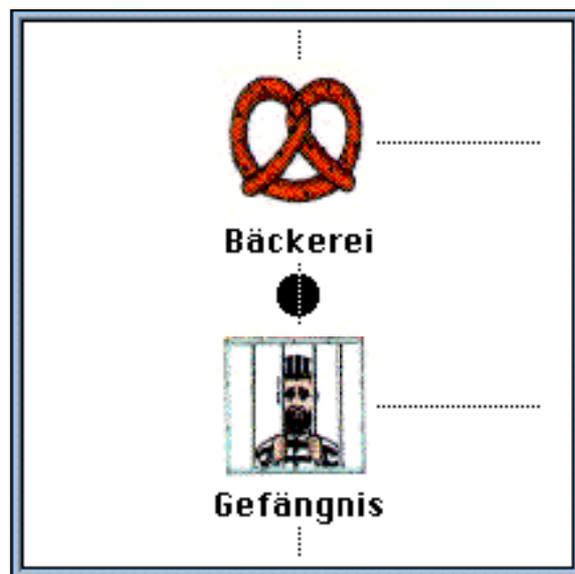


Abbildung 7.2. Sichtbarer Ausschnitt der Lernkonfiguration in Experiment I.

7.1.1.3 Versuchsplan

Die abhängigen Variablen in diesem Experiment waren Schätzungen der Pfadlänge und Reaktionszeiten für diese Urteile. Die unabhängigen Variablen in diesem Experiment waren Pfadlänge und Objektanzahl. Die Pfadlänge ist die Länge des kürzesten Weges (entlang der gestrichelten Linien) zwischen zwei Objekten. Die Objektanzahl bezieht sich auf die Anzahl der Objekte, die auf diesem Pfad liegen. Beide unabhängigen Variablen wurden in drei Abstufungen variiert. Daraus ergibt sich ein 3×3 faktorieller Versuchsplan. Die Pfadlänge

wurde in Abstufungen von 3, 6 und 9 Einheiten²¹ variiert. Die Variable „Objektanzahl“ hatte die Ausprägungen 0, 1 und 2. Beide Faktoren waren meßwiederholt. Die Karte wurde so konstruiert, daß für jede Kombination aus Objektanzahl und Pfadlänge jeweils zwei kritische Pfade existierten. Damit ergeben sich 18 experimentelle Distanzschätzdurchgänge, deren Reihenfolge für jede Versuchsperson zufällig ermittelt wurde. Den experimentellen Fragen gingen drei Übungsfragen voran, die nicht in die Auswertung eingingen.

Alle Versuchspersonen erhielten eine Karte mit identischen Pfaden. Die Objekte wurden jedoch für jede Versuchsperson zufällig den Orten zugeordnet.

7.1.1.4 Versuchsablauf

Das Experiment bestand aus vier Phasen: Navigationsphase, Lernkontrolle, Distanzschätzung und Kartenzeichnen.

Die Versuchspersonen wurden instruiert, sich vorzustellen, sie seien in eine neue Stadt gezogen und wollten in dieser Stadt einen Taxiführerschein machen. Deshalb müßten sie die kürzesten Wege zwischen allen Objekten kennenlernen.

Navigationsphase. Vor Beginn der Navigationsphase wurde den Versuchspersonen mitgeteilt, daß sie zu einem späteren Zeitpunkt in der Lage sein sollten, Distanzen zwischen einzelnen Objekten in der Stadt einzuschätzen. Um die kürzesten Routen zwischen allen Objekten kennenzulernen, konnten sich die Versuchspersonen frei entlang der gestrichelten Linien bewegen. Sie konnten die Stadt solange explorieren, wie sie wollten. Es wurde ihnen jedoch mitgeteilt, daß die Lernphase wahrscheinlich ca. 30 Minuten dauern würde.

Lernkontrolle. Unmittelbar nach der Navigationsphase wurde getestet, ob die Versuchspersonen die Karte gelernt hatten. In jedem Durchgang der Lernkontrolle wurde ein Paar von Objekten präsentiert. Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, die Namen aller Objekte auf dem kürzesten Pfad, der die präsentierten Objekte verbindet, aufzuschreiben. Die Objektamen sollten in der Reihenfolge ihres Erscheinens auf dem Pfad notiert werden. Nachdem die Namen notiert waren, sollten die Versuchspersonen die „Return“-Taste drücken, um die Lösung zu sehen. Die Lösung sollte von den Versuchspersonen mit ihrer Antwort verglichen werden. War die Antwort korrekt, sollte die „R“-Taste gedrückt werden. In diesem Fall wurde der nächste Durchgang aufgerufen. War die Antwort falsch, sollte die „F“-Taste gedrückt werden. In diesem Fall wurden die Versuchspersonen in die Navigationsphase zurückversetzt. Dort sollten sie den abgefragten Pfad noch einmal abfahren, bevor sie in die Lernkontrolle zurückkamen. Den Versuchspersonen wurde mitgeteilt, daß sie nach dem Abfahren des abgefragten Pfades die „Return“-Taste drücken konnten, um in die Lernkontrolle zurück zu

²¹ Die Einheit der Pfadlänge war die Länge eines Striches der gestrichelten Linien, die die Pfade symbolisierten.

gelangen, daß sie jedoch auch die Stadt länger explorieren könnten, wenn sie die Stadt noch besser kennenlernen wollten. Die Lernkontrolle bestand aus neun Durchgängen ansteigender Schwierigkeit. In den ersten drei Durchgängen enthielt der Pfad, der die präsentierten Objekte verband, ein Objekt. Die Lösung für das zweite Tripel der Fragen umfaßte zwei Objekte, und im letzten Tripel wurde nach drei Objekten gefragt.

Distanzschätzung. In der Distanzschätzphase sollten die Versuchspersonen jeweils die Länge des kürzesten Pfades zwischen zwei präsentierten Objekten aus der Lernkonfiguration einschätzen. Die beiden Objekte wurden nacheinander präsentiert. Ähnlich wie in der Lernphase wurde das Bild zusammen mit dem Namen eingeblendet. In einem Dialogfenster wurde zuerst das Ankerobjekt gezeigt. Die Versuchspersonen waren instruiert, sich die Position des Ankers in der Konfiguration vorzustellen und die „Return“-Taste zu drücken, sobald sie völlig konzentriert waren. Nach dem Drücken der „Return“-Taste verschwand das Dialogfenster und nach einem Interstimulusintervall von 2 Sekunden erschien ein zweites Dialogfenster mit dem Zielobjekt. Die Aufgabe der Versuchspersonen war, die kürzeste Pfadlänge zwischen Anker und Zielreiz so schnell wie möglich einzuschätzen. Vor Beginn der Distanzschätzphase wurden sie instruiert, die Länge eines Striches aus den gestrichelten Linien, die die Pfade symbolisierten, als Einheit der Schätzung zu benutzen. Die Versuchspersonen hatten somit die Aufgabe, einzuschätzen, wie viele Striche in den kürzesten Pfad zwischen Anker und Zielreiz passen würden. Um zu verhindern, daß die Versuchspersonen bereits in der Lernphase die Striche zählen, wurde ihnen die Einheit der Schätzung erst zu Beginn der Distanzschätzphase mitgeteilt. Sobald die Versuchspersonen zu einem Urteil gekommen waren, sollten sie die Zahl laut aussprechen und gleichzeitig die „Return“-Taste drücken. Die Messung der Reaktionszeit setzte mit Beginn der Präsentation des Zielreizes ein und wurde gestoppt, sobald die „Return“-Taste gedrückt wurde. Nach dem Drücken der „Return“-Taste verschwand das Dialogfenster mit dem Zielobjekt und ein dritter Dialog wurde präsentiert, in den die Versuchspersonen ihre Antwort nochmals mit Hilfe der Tastatur eingeben sollten. Die Distanzschätzphase setzte sich aus 21 Durchgängen zusammen. Die ersten 3 Durchgänge waren Trainingsdurchgänge und wurden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Kartenzeichnen. Am Ende des Experimentes wurden die Versuchspersonen gebeten, auf einem DIN A4 Blatt eine Karte der Routen zu zeichnen.

7.1.2 Ergebnisse

Die Durchsicht der Kartenzeichnungen ergab, daß die meisten Karten gut mit der Stimuluskonfiguration übereinstimmten. Für die varianzanalytische Auswertung der Pfadlängenschätzungen wurden die beiden Schätzungen pro Kombination von Pfadlänge und Objektanzahl gemittelt. Abbildung 7.3 zeigt, daß die Schätzungen sowohl von der tatsächlichen Pfadlänge,

$F(2,33)=108.72$, $R_p^2=.87^{22}$, $p<.01$, als auch von der Objektanzahl abhängen, $F(2,33)=24.11$, $R_p^2=.59$, $p<.01$. Die Interaktion ist ebenfalls signifikant, $F(4,31)=13.08$, $R_p^2=.63$, $p<.01$. Kontraste ergaben, daß die Schätzungen für Pfade ohne Objekte signifikant kleiner sind als die Schätzungen für Pfade mit einem oder zwei Objekten, $F(1,34)=223.35$, $R_p^2=.87$, $p<.01$. Schätzungen für Pfade mit einem Objekt unterscheiden sich ebenfalls signifikant von Schätzungen für Pfade mit zwei Objekten, $F(1,34)=86.62$, $R_p^2=.72$, $p<.01$. In Abbildung 7.3 ist ebenfalls zu sehen, daß kurze Distanzen überschätzt wurden (im Mittel um 0.86 Einheiten), während lange Distanzen unterschätzt wurden (im Mittel um 0.31 Einheiten). Die Korrelation zwischen objektiven Pfadlängen und mittleren Schätzungen (über alle Versuchspersonen gemittelt) beträgt .90, $p<.01$.

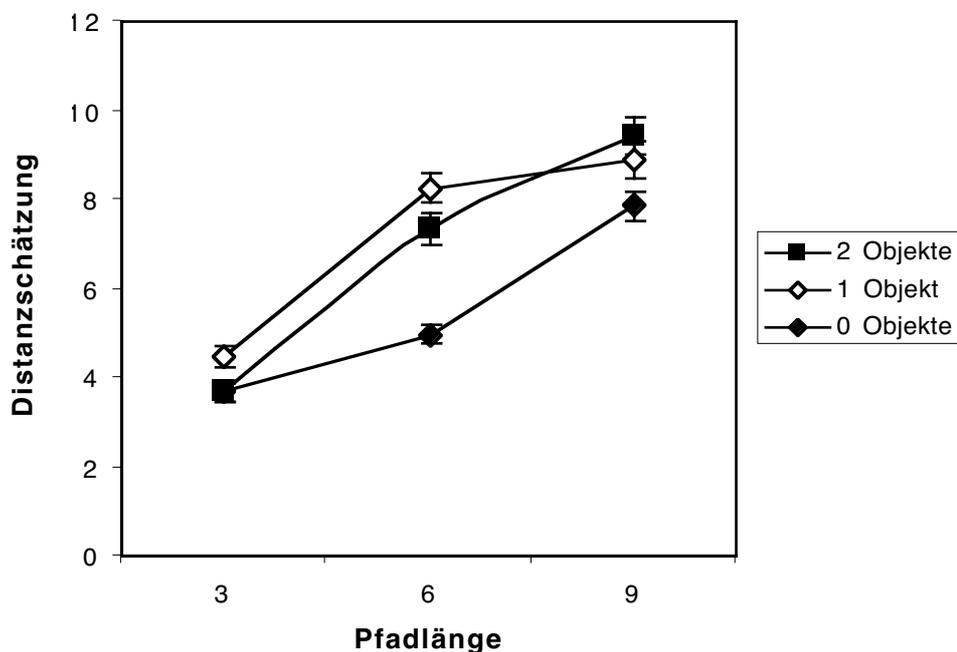


Abbildung 7.3: Geschätzte Distanzen in Abhängigkeit von der Pfadlänge und der Anzahl der Objekte auf dem Pfad in Experiment I. Die Fehlerbalken beziehen sich in allen Graphiken auf den Standardfehler des Mittelwertes.

Für die Analyse der Reaktionszeiten wurden zunächst alle Latenzen über 30000 ms eliminiert. Von den verbleibenden Reaktionszeiten wurde jeweils der Mittelwert für alle abgefragten Pfade (ohne Berücksichtigung der Reihenfolge von Anker und Zielreiz) gebildet. Für die Ausreißerkontrolle wurde die Gesamt-Standardabweichung aller Abweichungen der Reaktionszeiten von ihrem spezifischen Mittelwert berechnet. Alle Reaktionszeiten, die mehr als drei Standardabweichungen von ihrem Mittelwert entfernt waren, wurden eliminiert. Damit wurden insgesamt 17 (2.70 %) Reaktionszeiten von der weiteren Analyse ausgeschlossen.

²² Das partielle R^2 (Cohen, 1977) ist ein Maß für die Effektstärke, die das Verhältnis zwischen der von einem Faktor erklärten Varianz und der Gesamtvarianz, die nicht durch die anderen Faktoren erklärt wird, angibt.

Abbildung 7.4 zeigt die mittleren Reaktionszeiten für alle Kombinationen aus Pfadlänge und Objektanzahl. Für die kürzeste Pfadlänge scheint die Objektanzahl keinen Einfluß auf die Reaktionszeit zu haben. Dagegen steigt bei den Pfadlängen von 6 und 9 Einheiten die Reaktionszeit mit zunehmender Objektanzahl an.

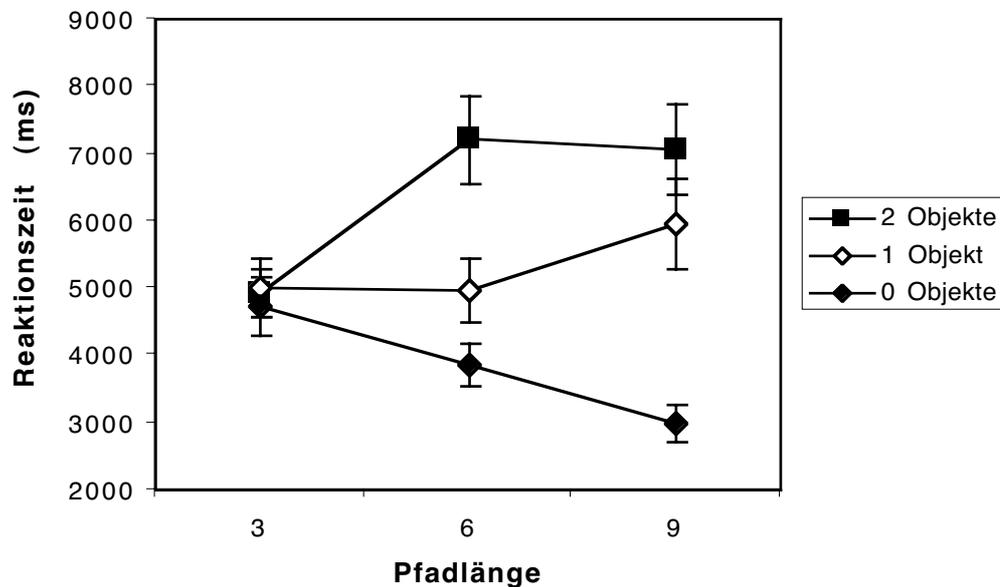


Abbildung 7.4: Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Pfadlänge und der Anzahl der Objekte in Experiment I.

Für die varianzanalytische Auswertung der Reaktionszeiten wurden die beiden Reaktionszeiten pro Kombination von Pfadlänge und Objektanzahl gemittelt. Eine Varianzanalyse mit den Faktoren „Pfadlänge“ und „Objektanzahl“ ergab signifikante Haupteffekte für Pfadlänge, $F(2,32)=3.84$, $R_p^2=.19$, $p=.03$, und Objektanzahl, $F(2,32)=22.94$, $R_p^2=.59$, $p<.01$, und eine signifikante Interaktion, $F(4,30)=6.52$, $R_p^2=.47$, $p<.01$. Um den Zusammenhang zwischen Distanzurteilen und Reaktionszeiten zu ermitteln, wurden jeweils alle Reaktionszeiten und Distanzurteile für einen bestimmten Pfad (ohne Berücksichtigung der Fragerichtung) über alle Versuchspersonen gemittelt und anschließend korreliert. Die Korrelation zwischen Distanzurteilen und Reaktionszeiten beträgt $.34$, $p=.17$. Die Partialkorrelation unter Auspartialisierung der Objektanzahl beträgt $.24$, $p=.33$. Mit der tatsächlichen Pfadlänge korrelieren die Reaktionszeiten zu $.10$, $p=.69$.

Die Konsistenz der Reaktionszeiten kann durch einen Vergleich zwischen den Reaktionszeiten für gleiche Pfadlängen und Objektanzahlen geprüft werden. Eine Durchsicht der Reaktionszeiten für einzelne Pfade ergab, daß sich die Latenzen innerhalb der Zellen des faktoriellen Plans zum Teil sehr deutlich unterschieden. Da für alle Kombinationen von Faktorstufen jeweils zwei kritische Pfade existieren, kann mittels t -Tests ermittelt werden, ob sich die kritischen Pfade innerhalb einer Bedingung signifikant voneinander unterscheiden. Tabelle

7.1 zeigt die absoluten Differenzen zwischen den Reaktionszeiten für Pfade gleicher Länge und Objektanzahl. In den 9 Faktorstufenkombinationen unterscheiden sich die Pfade in 3 Fällen auf dem 5%-Niveau und in 7 Fällen auf dem 10%-Niveau.

Tabelle 7.1

Unterschiede in den Reaktionszeiten für Pfade gleicher Länge und gleicher Objektanzahl in Experiment I.

Objektanzahl	Pfadlänge		
	3	6	9
0	3037.3 $p < 0.01$	813.7 $p = 0.08$	747.4 $p = 0.02$
1	716.9 $p = 0.19$	2770.1 $p < 0.01$	893.9 $p = 0.09$
2	1057.2 $p = 0.06$	609.2 $p = 0.38$	1138.3 $p = 0.09$

Legende. Der obere Wert jeder Zelle gibt die absolute Differenz zwischen den Reaktionszeiten für die Pfadlängenschätzungen an. Darunter ist jeweils das Signifikanzniveau des zugehörigen t -Tests angegeben.

7.1.3 Diskussion

Die Analyse der Pfadlängenschätzungen zeigt, daß die subjektiven Urteile sowohl von der Anzahl der Objekte als auch von der tatsächlichen Pfadlänge abhängen. Hätten die Versuchspersonen nur die ordinale Folge von Objekten repräsentiert, so würde man keinen Einfluß der tatsächlichen Pfadlänge erwarten. Die Schätzungen geben somit einen Hinweis darauf, daß das Wissen der Versuchspersonen über Distanzen über eine rein ordinale Repräsentation hinausgeht. Bei dieser Analyse handelt es sich jedoch nicht um einen direkten Test des Skalenniveaus der Raumrepräsentation. Ein direkter Test würde eine meßtheoretische Analyse erfordern, in der geprüft wird, welche Axiome von den Urteilen erfüllt werden.

Die Mittelwertsunterschiede in den Latenzen machen deutlich, daß die Reaktionszeiten für Pfadlängenschätzungen von räumlichen Charakteristika der einzuschätzenden Pfade abhängig sind. Eine Grundvoraussetzung für den Einsatz von Reaktionszeiten bei Distanzurteilen zur Analyse von räumlichen Repräsentationen ist somit erfüllt. Die Varianzanalyse zeigt, daß die Latenzen sowohl von der Länge des einzuschätzenden Pfades als auch von der Anzahl der Objekte abhängen, die sich auf dem Pfad befinden. Allerdings ergab sich in der Korrelation zwischen subjektiven Pfadlängen und Reaktionszeiten kein signifikanter Zusammenhang. Das Fehlen einer signifikanten Korrelation darf jedoch nicht interpretiert werden, da die Teststärke dieser Analyse aufgrund der geringen Anzahl der Datenpunkte, die in die Korrelation eingehen, äußerst gering ist. Würde die Größe des Effektes der in diesem Experiment ermittelten Korrelation entsprechen (was ungefähr der Konvention für mittlere Effekte von

$r = .30$ entspricht), so ergäbe sich eine Teststärke von $.39^{23}$. Selbst der Konvention nach „starke“ Effekte ($r = .50$) könnten in diesem Experiment nur mit einer Teststärke von $.76$ entdeckt werden. Demnach sind nur die Ergebnisse der Varianzanalyse interpretierbar.

Die Resultate der Varianzanalyse sprechen gegen einen einfachen Abruf explizit repräsentierter Pfadlängen, da man in diesem Fall gleiche Latenzen für alle Pfade erwarten würde, vorausgesetzt, daß der Abruf mit konstanter Zugriffsgeschwindigkeit geschieht. Der Anstieg der Latenzen bei Pfadlängen von 6 und 9 gegenüber der Pfadlänge 3 ist konsistent mit *Mental-Scanning*-Modellen. Der Anstieg der Latenzen mit zunehmender Objektanzahl ist jedoch auch mit einem Summationsmodell vereinbar, wobei dieses Modell aber zunächst keinen Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge erlaubt. Die Interaktion zwischen Pfadlänge und Objektanzahl stellt für beide Modelle ein Problem dar. Insbesondere ist kaum zu erklären, warum bei Pfaden ohne darauf befindlichen Objekten die Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge sinkt.

Möglicherweise ist dieses Ergebnis jedoch gar nicht auf die Variation von Objektanzahl und Pfadlänge zurückzuführen. Tabelle 7.1 zeigt, daß sich die Reaktionszeiten für die beiden kritischen Pfade innerhalb der einzelnen Kombinationen von Pfadlänge und Objektanzahl zum Teil sehr drastisch unterscheiden. Dies deutet darauf hin, daß andere, nicht systematisch kontrollierte Faktoren die Latenzen stark beeinflußt haben. Über die Natur dieser nicht kontrollierten Einflußfaktoren können nur Vermutungen angestellt werden. Eine naheliegende Vermutung ist, daß einige Teile der Karte besser gelernt wurden, da sie häufiger durchfahren wurden, weniger komplex oder salienter sind. So gibt es in der Karte beispielsweise nur jeweils zwei Routensegmente der Länge 6 oder 9. Dies könnte die Salienz dieser Segmente erhöht haben und dadurch zu kürzeren Abrufzeiten geführt haben. Die beiden Segmente der Länge 9 sind zudem ungefähr gleich der horizontalen und vertikalen Ausdehnung der gesamten Anordnung, was ebenfalls den Abruf erleichtern könnte. Dies würde den Abfall der Reaktionszeiten mit zunehmender Pfadlänge bei Pfaden ohne Objekte erklären. Bevor man das Reaktionszeitmuster in diesem Experiment im Hinblick auf die beim Schätzen von Distanzen beteiligten Prozesse erklärt, ist es daher nötig zu prüfen, ob sich die Ergebnisse mit einer homogenen Konfiguration replizieren lassen.

7.2 Experiment II

In Experiment II sollte untersucht werden, ob sich die Ergebnisse von Experiment I mit einer homogenen Stimuluskonfiguration replizieren lassen. Statt der in Experiment I verwendeten Route, in der es mehrere Pfade zwischen zwei Objekten geben konnte, wurden die Objekte in

²³ Alle Teststärkeberechnungen in dieser Arbeit wurden mit dem Programm „G•Power“ (Buchner, Faul & Erdfelder, 1996; Erdfelder, Faul & Buchner, 1996) durchgeführt.

Experiment II entlang einer einzigen, geschlossenen Route plaziert. Zum einen wird dadurch das Gesamtbild der Anordnung homogener, da es keine Teilpfade gibt, die aufgrund ihrer Randlage exponiert sind. Zum anderen ist durch die geschlossene Route eher gewährleistet, daß die einzelnen Teilpfade in der Explorationsphase gleich oft durchfahren werden. Die Verwendung einer geschlossenen Route birgt jedoch die Gefahr, daß sich die Versuchspersonen in der Explorationsphase kein räumliches Wissen aneignen, da sie sich den Weg von einem Objekt zu einem anderen nicht merken müssen, um sich erfolgreich in der Anordnung bewegen zu können. Deshalb wurde an jedem Objekt der Route eine Abzweigung eingefügt, die in einer Sackgasse endete. Diese Manipulation stellt sicher, daß die Versuchspersonen räumliches Wissen erwerben, um die Sackgassen vermeiden zu können.

Darüber hinaus sollte in Experiment II eine weitere Vorhersage getestet werden, die sich aus dem Summationsmodell ergibt. Wenn die Berechnung einer Pfadlänge in einem Durchgang auf Elementardistanzen zurückgreift, die schon im vorhergehenden Durchgang für die Berechnung der Pfadlänge benutzt wurden, so sollte sich dadurch die Reaktionszeit verringern.

Ein solcher Wiederholungseffekt könnte zum einen aus einem beschleunigten Zugriff auf Elementardistanzen resultieren, die schon im vorherigen Durchgang abgerufen wurden, zum anderen könnte er daraus resultieren, daß der Zeitbedarf für das Addieren der Distanzen reduziert wird, da einige Distanzen bereits im vorherigen Durchgang addiert wurden und das Ergebnis noch verfügbar ist.

Die Demonstration eines Wiederholungseffektes würde die Alternativerklärung für die Ergebnisse in Experiment I ausschließen. Falls der Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Objektanzahl darauf zurückzuführen ist, daß zwar alle Pfadlängen explizit repräsentiert sind, aber die Länge von Pfaden mit mehreren Objekten weniger verfügbar ist, sollte es keinen Wiederholungseffekt bei überlappenden Pfaden in aufeinanderfolgenden Durchgängen geben.

7.2.1 Methode

7.2.1.1 Versuchspersonen

An Experiment II nahmen 47 Versuchspersonen (23 Frauen und 24 Männer) teil. Das Alter der Versuchspersonen reichte von 16 bis 40 Jahren und hatte einen Mittelwert von 26. Die Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme am Experiment bezahlt.

7.2.1.2 Material

Die Lernvorlage war ähnlich gestaltet wie in Experiment I.

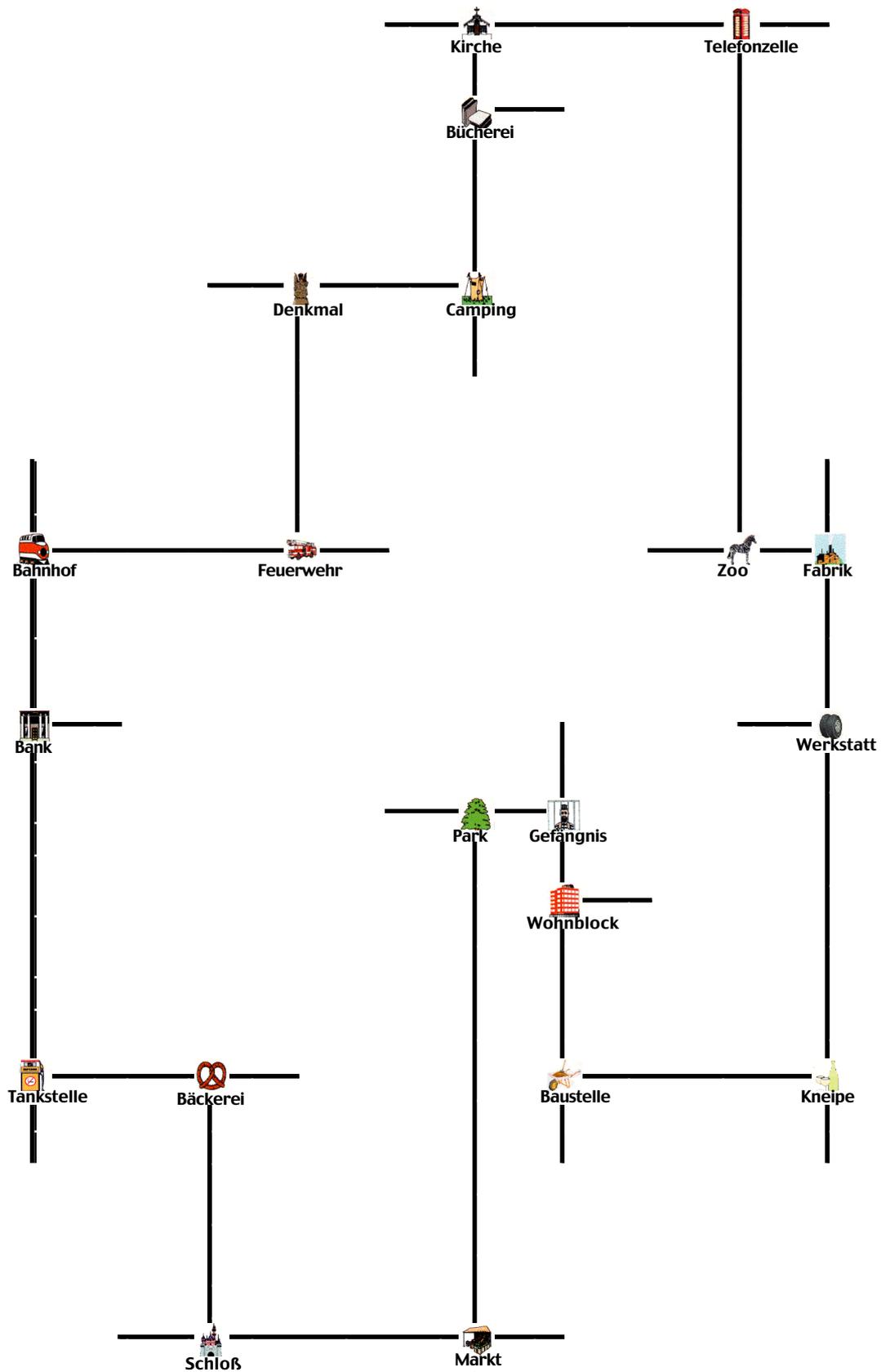


Abbildung 7.5: Lernkonfiguration in Experiment II.

Sie bestand aus einer geschlossenen Route mit 20 Objekten, die identisch zu den in Experiment I verwendeten Objekten waren. Sie wurden auf dieselbe Weise dargestellt. Um die Gefahr des Zählens von Strichen weiter zu reduzieren, wurden die Pfade in Experiment II als Straßen dargestellt. Sie bestanden aus einer dicken schwarzen Linie, in der sich als Mittelstreifen eine gestrichelte, weiße Linie befand. Die Straßen bildeten eine geschlossene Route mit rechtwinkligen Gabelungen, an denen jeweils eine Straße eine Sackgasse war. An jeder Gabelung war ein Objekt positioniert. Wie in Experiment I war nur ein kleiner Ausschnitt der Route zu einem Zeitpunkt sichtbar. Die Seitenlänge des sichtbaren Quadrats war gleich der Länge einer Sackgasse.

Experiment II wurde auf einem Macintosh PowerPC 7200 mit einem 17 Zoll Apple 1710 AV Monitor durchgeführt. Das Abfahren der Straßen wurde durch dieselbe Technik simuliert wie in Experiment I.

7.2.1.3 Versuchsplan

Wie in Experiment I stellten Schätzungen von Pfadlängen und Reaktionszeiten für diese Schätzungen die abhängigen Variablen dar. Die unabhängigen Variablen waren die schon in Experiment I verwendeten Faktoren „Objektanzahl“ und „Pfadlänge“. Daneben wurde ein weiterer Faktor, „Pfadüberlappung“, eingeführt. Die Pfadlänge wurde in zwei Abstufungen variiert. Die kleinere Pfadlänge hatte die Länge von drei Sackgassen. Auf dem Bildschirm entsprach das einer Länge von 14 cm. Die größere Pfadlänge war doppelt so lang. Die Objektanzahl wurde ebenfalls in zwei Abstufungen variiert. Auf dem zu schätzenden Pfad befand sich entweder kein oder ein Objekt. Die dritte unabhängige Variable, „Pfadüberlappung“, bezieht sich darauf, ob sich der in einem (Test-) Durchgang zu schätzende Pfad mit dem im vorhergehenden (Vorbereitungs-) Durchgang einzuschätzenden Pfad überlappt.

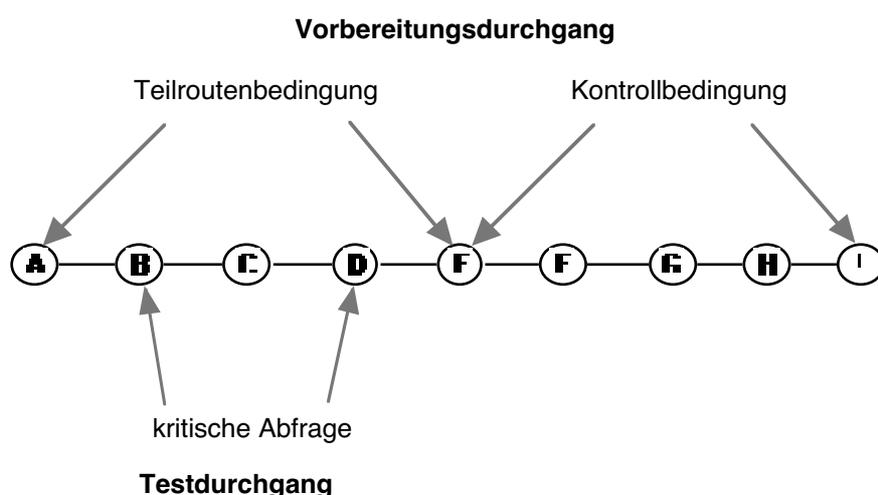


Abbildung 7.6: Konstruktionsprinzip des Faktors „Pfadüberlappung“. Die Pfeile deuten die Anker- und Zielreize in der Schätzung der Pfadlänge unter den einzelnen Bedingungen an.

In der *Teilroutenbedingung* war der im kritischen Durchgang einzuschätzende Pfad ein Teil des im Vorbereitungsdurchgang einzuschätzenden Pfades. Der Anker des Vorbereitungsdurchgangs war in der Teilroutenbedingung immer der unmittelbare (Routen-) Vorgänger des Ankers im Testdurchgang, während der Zielreiz in der Teilroutenbedingung immer der unmittelbare Nachfolger des Zielreizes im Vorbereitungsdurchgang war. Abbildung 7.6 veranschaulicht das Konstruktionsprinzip des Faktors „Pfadüberlappung“ anhand eines Beispiels. Die Objekte einer Route sind in diesem Schema mit den Buchstaben „A“ bis „I“ gekennzeichnet. Im kritischen Durchgang wird nach der Distanz zwischen den Objekten „B“ und „D“ gefragt. Im *Vorbereitungsdurchgang* unterscheiden sich die Fragen in der Teilroutenbedingung und der Kontrollbedingung. In der Teilroutenbedingung umschließt der einzuschätzende Pfad („A“ bis „E“) den Pfad im kritischen Durchgang. In der *Kontrollbedingung* wird nach dem Pfad von „E“ bis „I“ gefragt. Der Anker der Kontrollbedingung ist also gleich dem Zielreiz der Teilroutenbedingung. Dadurch sollten mögliche Primingeffekte, das heißt eine mögliche Voraktivierung von „D“ durch „E“, konstant gehalten werden. Für das Objekt „B“ sind Primingeffekte nicht kontrolliert. Da die Reaktionszeitmessung aber erst mit der Präsentation von „D“ beginnt, sollte das die Ergebnisse nicht beeinflussen.

Damit ergibt sich für Experiment II ein $2 \times 2 \times 2$ faktorieller Versuchsplan. Alle Faktoren waren meßwiederholt. Für jede Kombination aus Pfadlänge und Objektanzahl gab es in der Lernvorlage 2 Objektpaare. Jedes dieser Objektpaare wurde zweimal präsentiert; einmal in der Teilroutenbedingung und einmal in der Kontrollbedingung. Wenn ein Objektpaar zum zweiten Mal in einer Frage präsentiert wurde, wurde die Zuordnung der Objekte zu Anker und Zielreiz vertauscht. Um Wiederholungseffekte zu reduzieren, wurde die Reihenfolge der Fragen für jede Versuchsperson für die erste und zweite Präsentation in Blöcken getrennt randomisiert, so daß die Pfadlänge für alle Objektpaare bereits einmal eingeschätzt war, bevor ein Objektpaar ein zweites Mal abgefragt wurde. Die Distanzschätzaufgabe bestand aus 35 Fragen: 16 kritische Fragen, 16 Fragen für die Vorbereitungsdurchgänge und drei Übungsfragen zu Beginn der Distanzschätzphase.

7.2.1.4 Versuchsaufbau

Experiment II gliederte sich in dieselben Phasen wie Experiment I: Navigationsphase, Lernkontrolle, Distanzschätzung und Kartenzeichnen.

Navigationsphase. Abgesehen von der Instruktion war die Navigationsphase identisch zu Experiment I. Die Versuchspersonen wurden instruiert, die Route abzufahren, mit dem Ziel, sich den Streckenverlauf einzuprägen, so daß sie Sackgassen vermeiden können. Außerdem sollten sie sich die Objekte und ihre Position in der Anordnung einprägen, um später Distanzen schätzen zu können.

Lernkontrolle. Nachdem die Versuchspersonen die Navigationsphase abgeschlossen hatten, wurde ihre Fähigkeit geprüft, Pfadlängen zu schätzen. Dazu wurden jeweils in einem Dialogfenster drei der Objekte in der Lernvorlage präsentiert. Eines der Objekte befand sich oben im Dialogfenster, die anderen beiden Objekte befanden sich auf gleicher Höhe darunter. Die Aufgabe der Versuchspersonen war einzuschätzen, welches der beiden unteren Objekte näher am oberen Objekt lag. Nachdem die Versuchspersonen jeweils ein Objekt durch Anklicken ausgewählt hatten, wurde ihnen in einem weiteren Dialogfenster mitgeteilt, ob die Antwort richtig oder falsch war. War die Antwort richtig, erschien daraufhin die nächste Frage. War die Antwort falsch, wurden sie in die Navigationsphase zurückversetzt. In diesem Fall sollten die Versuchspersonen alle in dieser Abfrage dargebotenen Objekte noch einmal aufsuchen, aber sie konnten auch länger in der Lernvorlage verweilen, wenn sie das wünschten. Nachdem sie die Objekte aufgesucht hatten, konnten sie durch Drücken der „Return“-Taste wieder in die Lernkontrolle zurück gelangen. Die Lernkontrolle bestand aus zehn Fragen.

Distanzschätzung. Die Distanzschätzphase war identisch zu Experiment I mit der Ausnahme, daß die Versuchspersonen die Länge einer Sackgasse als Einheit der Distanzschätzung verwenden sollten. Das heißt, sie sollten einschätzen, wie viele Sackgassen in den Pfad passen würden, der ein bestimmtes Objektpaar miteinander verbindet.

Kartenzeichnen. Wie in Experiment I wurden die Versuchspersonen am Ende des Experimentes gebeten, eine Karte der Objekte und Pfade zu zeichnen.

7.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Distanzschätzungen (siehe Abbildung 7.7) wurden einer Varianzanalyse mit den Faktoren „Objektanzahl“, „Pfadlänge“ und „Pfadüberlappung“ unterzogen. Die geschätzten Distanzen steigen mit zunehmender Objektanzahl, $F(1,46)=7.54$, $R_p^2=.14$, $p<.01$, und zunehmender Pfadlänge an, $F(1,46)=36.86$, $R_p^2=.45$, $p<.01$. Die Schätzungen in der Teilroutenbedingung unterscheiden sich nicht von den Schätzungen der Kontrollbedingung, $F(1,46)=.45$, $R_p^2=.01$. Keine der Interaktionen erreicht das Signifikanzniveau (alle F -Werte lagen unter .84). Wie in Experiment I wurden kleine Distanzen unterschätzt (im Mittel um 0.40), während große Distanzen überschätzt wurden (im Mittel um 1.16).

Für die Auswertung der Latenzen wurden wie in Experiment I zunächst alle Reaktionszeiten über 30000 ms und in einem zweiten Schritt alle Reaktionszeiten, die mehr als drei Standardabweichungen von ihrem pfadspezifischen Mittelwert entfernt lagen, eliminiert. Dies betraf 20 (2.66 %) Reaktionszeiten. Die restlichen Reaktionszeiten wurden einer varianzanalytischen Auswertung unterzogen.

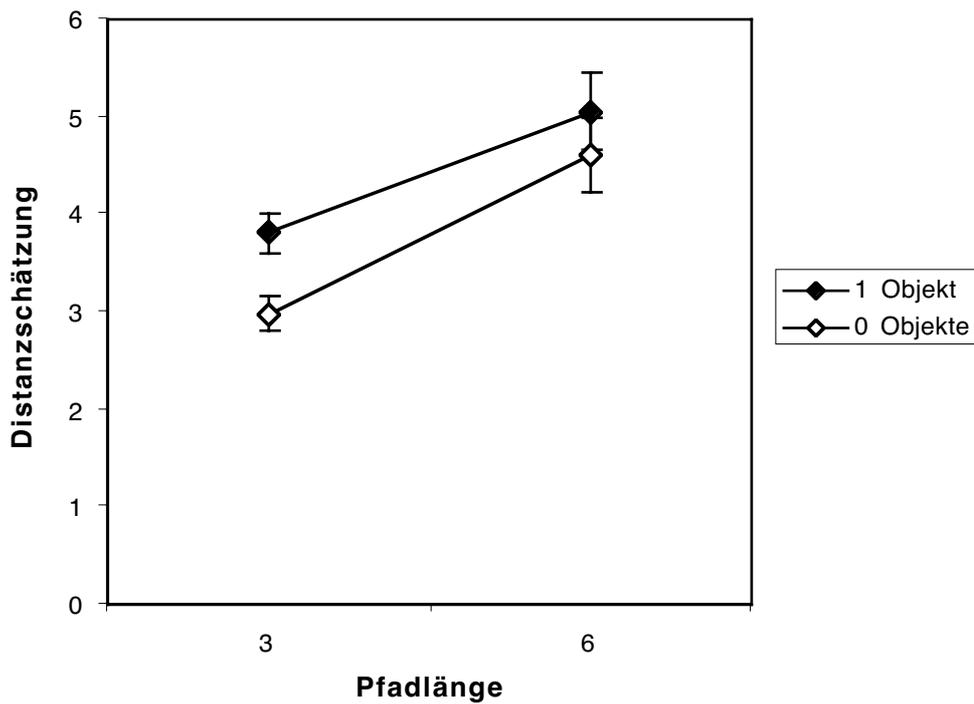


Abbildung 7.7: Geschätzte Pfadlänge in Abhängigkeit von der tatsächlichen Pfadlänge und der Anzahl der Objekte auf dem Pfad in Experiment II.

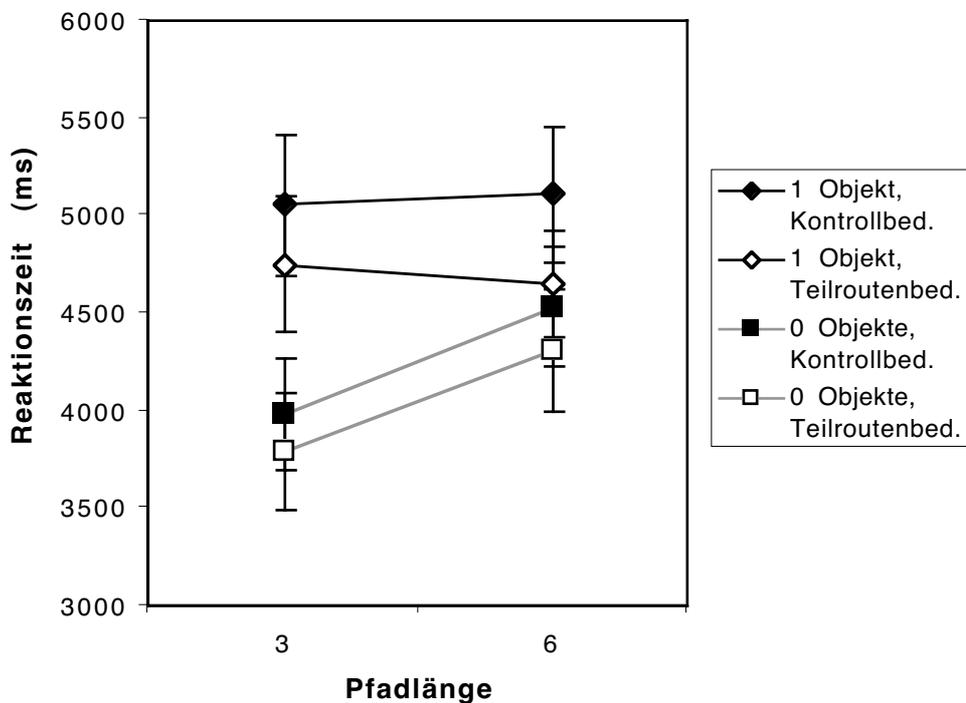


Abbildung 7.8: Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Pfadlänge und der Anzahl der Objekte auf dem Pfad in Experiment II.

Die Reaktionszeiten für Pfade, die kein Objekt enthielten, sind kürzer als für Pfade, die ein Objekt enthielten, $F(1,45)=11.72$, $R_p^2=.21$, $p<.01$ (siehe Abbildung 7.8). Der Haupteffekt der Pfadlänge ist nicht signifikant, $F(1,45)=1.93$, $R_p^2=.04$, $p=.17$. Reaktionszeiten unter der Teilroutenbedingung sind kürzer als Reaktionszeiten unter der Kontrollbedingung, der Haupteffekt verfehlt jedoch knapp das Signifikanzniveau, $F(1,45)=3.40$, $R_p^2=.07$, $p=.07$. Die Interaktion der Pfadlänge mit der Objektanzahl verfehlt ebenfalls knapp das Signifikanzniveau, $F(1,45)=3.87$, $R_p^2=.08$, $p=.06$. Keine der weiteren Interaktionen sind signifikant (alle $F<1$). Der einfache Haupteffekt der Pfadlänge ist bei Pfaden ohne Objekte signifikant, $F(1,45)=6.02$, $R_p^2=.12$, $p=.02$, während sich bei Pfaden mit einem Objekt kein Einfluß der Pfadlänge zeigt, $F(1,45)=.01$, $R_p^2=.00$.

Wie in Experiment I wurden die mittleren Reaktionszeiten pro Item mit den zugehörigen mittleren Distanzschätzungen korreliert. Die Korrelation beträgt $.60$, $p=.01$ (siehe Abbildung 7.9). Bei Auspartialisierung der Objektanzahl reduziert sich die Korrelation zu $.49$, $p=.05$. Die Korrelation der Reaktionszeiten mit der Pfadlänge in der Lernvorlage beträgt $.26$, $p<.34$.

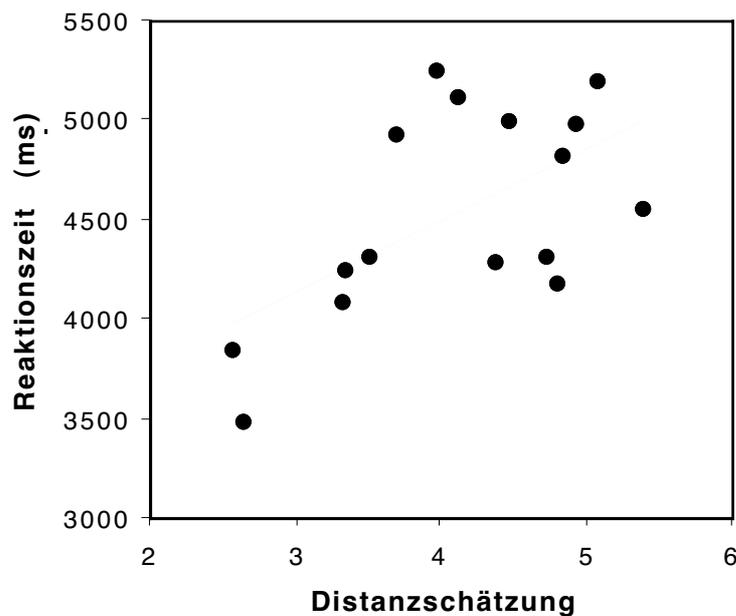


Abbildung 7.9: Mittlere Reaktionszeiten für alle Pfade in Abhängigkeit von der geschätzten Länge des Pfades in Experiment II ($r=.60$).

7.2.3 Diskussion

Die Analyse der Pfadlängenschätzungen zeigt wie in Experiment I einen Einfluß der Objektanzahl und der Pfadlänge, wobei die beiden Faktoren jedoch nicht interagieren. Man kann also auch bei diesem Experiment davon ausgehen, daß die Repräsentation der Objektpositionen auf der Route über eine rein ordinale Skala hinausgeht.

Die Reaktionszeiten auf Pfadlängenschätzungen werden ebenfalls wie in Experiment I mit zunehmender Objektanzahl größer, es läßt sich jedoch kein Haupteffekt der objektiven Pfadlänge nachweisen. Allerdings zeigt sich tendenziell eine Interaktion der beiden Faktoren. Diese Interaktion resultiert jedoch aus einem Ergebnismuster, das den Ergebnissen von Experiment I widerspricht. Die einfachen Haupteffekte der Pfadlänge unter den beiden Stufen der Objektanzahl zeigen, daß bei Pfaden ohne Objekte die Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge ansteigt, während sie bei Pfaden mit einem Objekt annähernd konstant bleibt. Es ergibt sich aber ein deutlicher, positiver Zusammenhang zwischen den Reaktionszeiten und der geschätzten Pfadlänge, der auch bestehen bleibt, wenn der Effekt der Objektanzahl auspartialisiert wird.

Der Effekt der Teilroutenbedingung verfehlt bei zweiseitiger Testung knapp das Signifikanzniveau, wäre jedoch bei einseitiger Testung signifikant. Da es sich beim Effekt der Teilroutenbedingung um eine einseitige Fragestellung handelt, kann man also vorsichtig den Schluß ziehen, daß die Schätzung der Länge von Pfaden, die bereits im vorhergehenden Durchgang Teil des zu schätzenden Pfades waren, beschleunigt wird. Dieses Ergebnis ist konsistent mit der Annahme, daß es sich bei Pfadlängen um abgeleitete Repräsentationen handelt, die durch Integration anderer räumlicher Repräsentationen zustande kommen. In diesem Fall sollte der Umstand, daß diese elementaren Repräsentationen bereits abgerufen wurden, den erneuten Abruf beschleunigen.

Betrachtet man nur die Haupteffekte der Varianzanalyse, so entsprechen die Ergebnisse den Vorhersagen des Summationsmodelles. Aus dem Summationsmodell läßt sich ableiten, daß die Reaktionszeit mit zunehmender Objektanzahl, nicht aber mit zunehmender Pfadlänge ansteigen sollte. Darüber hinaus sollten die Reaktionszeiten in der Teilroutenbedingung kürzer sein als in der Kontrollbedingung.

Bezieht man jedoch die einfachen Haupteffekte und die Korrelation zwischen subjektiver Pfadlänge und Reaktionszeit in die Interpretation ein, so ergibt sich, daß die Pfadlänge durchaus einen Einfluß auf die Reaktionszeit hat. Damit kommt das analoge Zeitmesser-Modell als Erklärung für die gefundenen Effekte in Betracht. Allerdings läßt sich aus diesem Modell heraus nicht begründen, warum die Pfadlänge bei Pfaden, auf denen sich ein Objekt befindet, keinen Einfluß auf die Reaktionszeit hat. Dieses Problem wird jedoch durch die Tatsache entschärft, daß die Pfadlängenschätzungen auch dann noch signifikant mit den Reaktionszeiten korrelieren, wenn der Einfluß der Objektanzahl auspartialisiert wird. Es ist durchaus vorstellbar, daß die mentale Repräsentation der Lernkonfiguration in systematischer Weise gegenüber der Vorlage verzerrt ist. Die Reaktionszeiten sollten jedoch primär von der mentalen Repräsentation der Anordnung abhängen und nicht von der Vorlage. Insofern hat der Zusammenhang zwischen subjektiven Pfadlängen und Reaktionszeiten ein größeres

Gewicht als der Zusammenhang zwischen objektiven Pfadlängen und Reaktionszeiten. Der Effekt der Pfadüberlappung spricht ebenfalls nicht gegen das analoge Zeitmesser-Modell, da sich auch aus einem *Mental-Scanning*-Prozeß Geschwindigkeitsvorteile bei Überlappung von Pfaden vorhersagen lassen. Zum Beispiel könnte das Absuchen eines Pfades beschleunigt sein, wenn er im vorherigen Durchgang bereits abgesucht wurde. Die Beschleunigung des Absuchens müßte allerdings dann bei der Umwandlung der Suchzeit in ein Distanzurteil berücksichtigt werden, da sich in den Pfadlängenschätzungen keine Effekte der Pfadüberlappung zeigen.

Vergleicht man die Ergebnisse der Experimente I und II, so zeigen sich deutliche Unterschiede in Bezug auf den Effekt der Pfadlänge, aber ebenso deutliche Übereinstimmungen in Bezug auf den Effekt der Objektanzahl. Könnte der Effekt der Objektanzahl in Experiment I und II darauf zurückzuführen sein, daß sich Versuchspersonen bei der Exploration unterschiedlich verhalten, je nachdem, wie viele Objekte sich auf einem Pfad befinden? Es ist durchaus wahrscheinlich, daß das Abfahren eines Pfades umso länger dauert, je mehr Objekte sich auf ihm befinden. Beispielsweise könnten die Versuchspersonen bei Objekten angehalten haben, um sich ihre Position einzuprägen. In diesem Fall wäre die Zeit, die benötigt wird, um einen Pfad gegebener Länge abzufahren, eine monoton steigende Funktion der Objektanzahl. Wenn nun die Reaktionszeiten für Distanzurteile die Zeit widerspiegeln würden, die für das Explorieren gebraucht wurde, so könnte man den Effekt der Objektanzahl ohne Rückgriff auf Summationsmodelle oder das analoge Zeitmesser-Modell erklären. Bisher gibt es jedoch kaum Evidenz für einen Einfluß der Zeit auf subjektive Distanzen.

“Although counterintuitive to geographers, nearly all of the empirical evidence on the relationship of travel time to subjective distance is negative” (Montello, 1997, S. 303).

Sadalla und Magel (1980) fanden beispielsweise ansteigende Distanzschätzungen mit zunehmender Anzahl rechter Winkel auf einem Pfad, obwohl die Zeit, die die Versuchspersonen brauchten, um den Pfad abzuschreiten, nicht in Abhängigkeit von der Anzahl der Winkel variierte. Diese Befunde schließen dennoch nicht aus, daß die Reaktionszeiten für Distanzurteile von zeitlichen Variablen beeinflusst werden. Zudem gibt es schwache Hinweise darauf, daß Distanzen von siebenjährigen Kindern als gleich eingeschätzt werden, wenn die Dauer des Abschreitens identisch ist (Herman, Roth & Norton, 1984). Daher scheint es geboten, diese mögliche Artefaktquelle in einem weiteren Experiment zu kontrollieren.

7.3 Experiment III

Dieses Experiment unterschied sich von den vorhergehenden hauptsächlich durch die Lernphase. Die in den Experimenten I und II verwendete Navigationstechnik unterscheidet sich sehr deutlich von dem visuellen Eindrücken, die man normalerweise beim Erlernen von

Routen hat. Es ist nicht auszuschließen, daß die Repräsentation räumlicher Information davon abhängt, wie sie dargeboten wird. Bewegt man sich in einer natürlichen Umgebung, so entstehen beispielsweise charakteristische optische Flußmuster, die für einen Bewegungseindruck sorgen und möglicherweise für das Schätzen von Distanzen relevant sind. In den Experimenten I und II sorgen zwar die Bilder und die Straßen für einen optischen Fluß, aber die Texturen werden auf einer frontoparallelen Achse verschoben, was nicht dem natürlichen Blick nach Vorne entspricht. In Experiment III sahen die Versuchspersonen eine Kamerafahrt entlang einer Straße durch eine virtuelle Umgebung. Entlang der Straße waren Schilder platziert, auf denen Namen von Objekten zu sehen waren, die in einer Stadt vorkommen können. Mit diesem Experiment sollte zum einen geprüft werden, ob sich die in den Experimenten I und II gefundenen Ergebnisse unter ökologisch valideren Bedingungen replizieren lassen, zum anderen sollten die bisherigen Ergebnisse gegen weitere Alternativinterpretationen abgesichert werden.

Wie schon in der Diskussion der Ergebnisse von Experiment II angesprochen, könnte beispielsweise die aktive Exploration in der Lernphase bei den Experimenten I und II dazu geführt haben, daß die Versuchspersonen bei jedem Objekt auf der Karte eine Pause eingelegt haben, um sich das Objekt zu merken. Falls dies der Fall war, steigt die Zeit, die zum Durchfahren eines Pfades benötigt wird, mit zunehmender Objektanzahl auf dem Pfad an. Falls die Reaktionszeit für Distanzschätzungen die Zeit für das Durchfahren eines Pfades widerspiegelt, sollte sie also mit zunehmender Objektanzahl ansteigen. Der Haupteffekt der Objektanzahl könnte somit ein Artefakt der Lernbedingungen gewesen sein. In Experiment III wurde auf eine aktive Exploration verzichtet. Durch die Darbietung der Anordnung in Form eines Filmes konnte sichergestellt werden, daß die Zeit für das Durchfahren eines Pfades unabhängig von der Anzahl der Objekte auf dem Pfad ist.

Eine zweite, in den bisherigen Experimenten nicht kontrollierte mögliche Einflußgröße ist die Verteilung der Pfadlängen zwischen benachbarten Objekten. In den Experimenten I und II war die Länge der einzelnen Routensegmente nicht gleich verteilt. Kurze Pfade zwischen benachbarten Objekten traten häufiger auf als lange. Dies könnte zur Folge haben, daß die langen Pfade salienter und deshalb besser abrufbar sind. Die Reaktionszeit für lange Pfade ohne Objekte könnte also deshalb kürzer sein als für lange Pfade mit einem oder mehreren Objekten, weil der lange Pfad salienter ist als die kurzen Pfade. Aus diesem Grund wurde in Experiment III sichergestellt, daß in der räumlichen Anordnung alle Streckenlängen gleich häufig auftraten.

Ein weiterer Unterschied zu den Experimenten I und II ist, daß die Objekte nur noch durch einen Pfad miteinander verbunden waren. In Experiment I gab es mehrere Verbindungen zwischen zwei Objekten. Da in Experiment II eine geschlossene Route verwendet wurde, gab

es zwischen jedem Paar von Objekten zwei Verbindungen. Da in der Distanzschätzung immer nach der Länge des kürzesten Pfades zwischen zwei Objekten gefragt wurde, ist nicht auszuschließen, daß die Reaktionszeiten durch einen *symbolischen Distanzeffekt* (Moyer & Bayer, 1976; Moyer & Dumais, 1978) beeinflußt wurden. Wenn die Versuchspersonen vor jeder Distanzschätzung entscheiden mußten, welche der beiden Distanzen die kürzere ist, so ist zu erwarten, daß der Zeitbedarf für diese Entscheidung umso größer ist, je weniger sich die Strecken unterscheiden. Da mit zunehmender Länge des kritischen Pfades die Länge des alternativen Pfades abnimmt, würde man schon alleine aufgrund des symbolischen Distanzeffektes erwarten, daß die Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge ansteigt. In den Experimenten I und II wurde darauf geachtet, daß der kritische Pfad deutlich kürzer war als die alternativen Pfade. Dennoch ist nicht auszuschließen, daß der symbolische Distanzeffekt die Reaktionszeiten beeinflußt hat. Die Wahl einer offenen Route als Lernvorlage in Experiment III birgt jedoch die Gefahr, daß die Reaktionszeiten durch serielle Positioneffekte beeinflußt werden. Aus diesem Grund wurden für die kritischen Distanzschätzungen keine Pfade ausgewählt, die im Anfangs- oder Endbereich der Route liegen.

Der Lerntest wurde gegenüber Experiment II ebenfalls abgeändert. Während in Experiment II nach jedem Distanzvergleich rückgemeldet wurde, ob die Antwort richtig oder falsch war, bekamen die Versuchspersonen in diesem Experiment nur noch die Gesamtzahl der Fehler am Ende des Lerntests mitgeteilt. Dies sollte gewährleisten, daß die Versuchspersonen die Distanzen nicht aus den Rückmeldungen im Lerntest lernen können.

Eine weitere Neuerung betrifft die Distanzschätzphase. In den Experimenten I und II wurde den Versuchspersonen zuerst nur der Anker präsentiert. Erst nachdem die Versuchspersonen eine Taste gedrückt hatten, wurde der Zielreiz eingeblendet. Dies könnte dazu geführt haben, daß sich die Versuchspersonen nach Präsentation des Ankers zuerst die Entfernungen zu allen benachbarten Objekten ins Gedächtnis gerufen haben, bevor sie den Zielreiz abgerufen haben. Dies kann durchaus eine sinnvolle Strategie sein, da die Zeitmessung ja erst mit der Präsentation des Zielreizes begann und der Zielreiz in vielen Durchgängen nahe am Anker war. Diese Strategie würde ebenfalls einen Effekt der Objektanzahl produzieren. Ist der Zielreiz ein benachbartes Objekt, so sollte die Antwort schneller erfolgen, da die Distanz bereits vor der Präsentation des Zielreizes abgerufen wurde. Um solche Strategieartefakte zu verhindern, wurde in Experiment III der Zielreiz gleichzeitig mit dem Anker präsentiert.

Gegenüber den ersten beiden Experimenten wurden damit eine ganze Reihe von Modifikationen eingeführt. Dadurch wird es zwar schwierig anzugeben, auf welche Modifikation Unterschiede in den Ergebnissen zurückzuführen sind. Auf der anderen Seite sind die Ergebnisse jedoch besser interpretierbar, da eine Reihe möglicher Artefaktquellen eliminiert wurde.

7.3.1 Methode

7.3.1.1 Versuchspersonen

An Experiment III nahmen 50 Versuchspersonen teil, davon 30 weiblich und 20 männlich. Das Alter der Versuchspersonen variierte zwischen 20 und 40 Jahren und hatte einen Mittelwert von 23 Jahren. Die Versuchspersonen wurden für ihre Teilnahme am Experiment bezahlt.

7.3.1.2 Material

Die virtuelle Route wurde mit „Macromedia Extreme 3D“, einem Modellierungsprogramm für Animationen im dreidimensionalen Raum, erstellt. Die räumliche Anordnung bestand aus einer Grundfläche mit einer grünen, gefleckten Textur, die eine Graslandschaft darstellen sollte. Auf der Grundfläche befand sich eine geschlossene Straße mit einer gekachelten schwarz-weißen Textur. Diese Textur wurde gewählt, da sie einen starken Bewegungseindruck hervorruft. Die Straße bestand aus Segmenten mit drei verschiedenen Längen. Die Segmente waren entweder eine, zwei oder vier Einheiten lang. Am Ende jedes Segmentes befand sich ein Schild. Die Schilder ähnelten Autobahnschildern. Sie bestanden aus einem grauen Rohr, das die Straße überspannte, und einer Tafel in der Mitte über der Straße, auf der in weißer Schrift auf blauem Grund der Name eines Objektes stand, das man in einer Stadt antreffen kann. Die Schilder waren immer im rechten Winkel zum zugehörigen Routensegment platziert. Die Anordnung bestand aus 18 sichtbaren Segmenten.

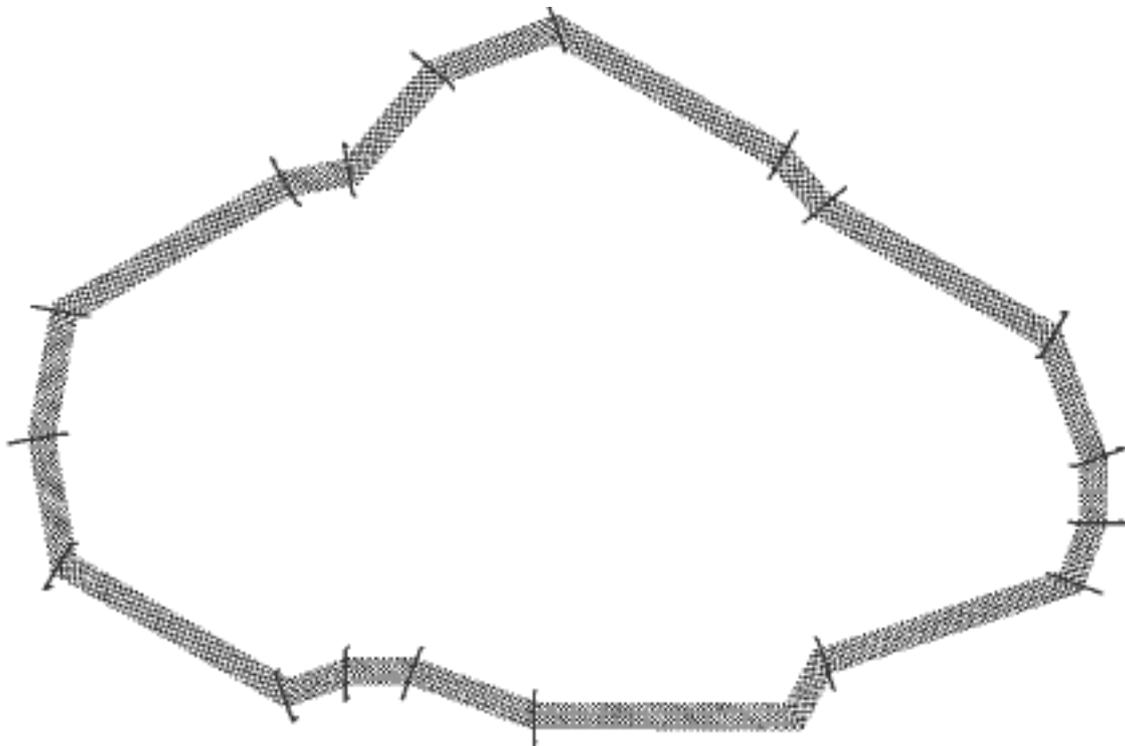


Abbildung 7.10: Lernkonfiguration in Experiment III aus der Vogelperspektive.

Für die Animation wurde eine Kamera entlang der Straße bewegt. Der Anfangspunkt der Kameraanimation war vom Endpunkt durch ein Routensegment getrennt. Vom Endpunkt aus war der Anfangspunkt nicht sichtbar. Damit ergab sich für den Betrachter der Animation nicht der Eindruck einer geschlossenen Route, obwohl der Straßenzug geschlossen war. Die Kamera befand sich immer in der Mitte der Straße und war auf einen unsichtbaren Punkt ausgerichtet, der sich zusammen mit der Kamera entlang der Straße bewegte. Da sich der unsichtbare Punkt immer in einer konstanten Weglänge vor der Kamera befand, begann die Kamera schon kurz vor Erreichen eines neuen Segments in die neue Richtung einzuschwenken. Die gesamte Szene wurde von nur einer Lichtquelle beleuchtet, die an die Position der Kamera gekoppelt war. Die Intensität und der Gradient der Lichtquelle waren so eingestellt, daß immer nur maximal ein Schild gut zu erkennen war. Aus dem dreidimensionalen Modell wurde ein digitaler Film im „QuickTime“-Format erzeugt, der im Experiment vom Versuchssteuerungsprogramm abgespielt wurde. Der Film hatte eine Auflösung von 320 mal 240 Bildpunkten und eine Farbtiefe von 8 Bit. Er wurde mit einer Bildwiederholrate von zehn Bildern pro Sekunde abgespielt. Die Dauer des Films betrug zwei Minuten und 28 Sekunden.

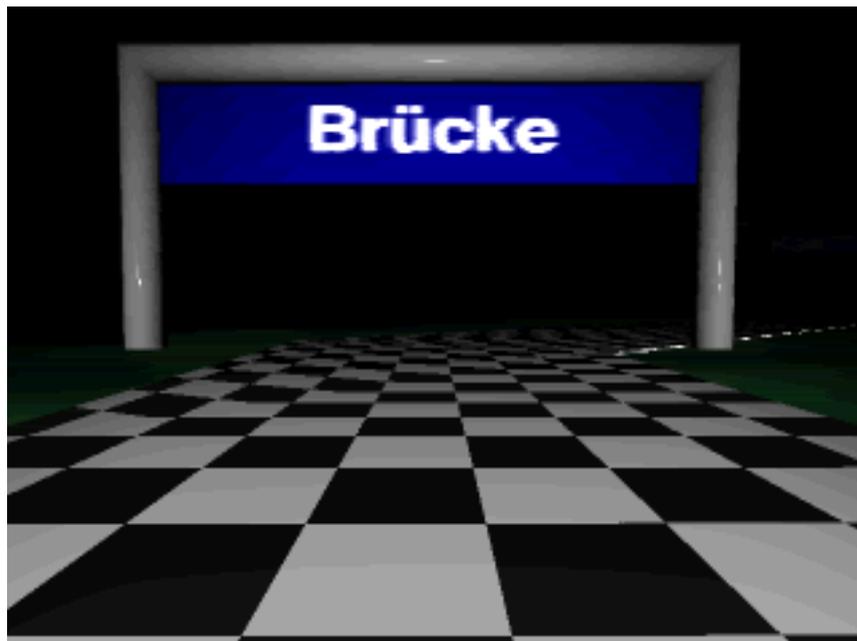


Abbildung 7.11: Ausschnitt aus dem in Experiment III dargebotenen Film.

7.3.1.3 Versuchsplan

Experiment III liegt ein 2×2 faktorieller Versuchsplan mit den Faktoren „Pfadlänge“ und „Objektanzahl“ zugrunde. Der kurze Pfad war genau halb so lang wie der lange Pfad. Auf einem kritischen Pfad befand sich entweder kein oder ein Objekt. Jede Kombination der beiden Faktoren kam in der Route zweimal vor. Um Wiederholungseffekte auszuschließen, wurden die kritischen Pfade in der Route so gewählt, daß sie sich nicht überlappten. Damit ergeben sich acht experimentelle Durchgänge in der Distanzschätzphase. Die Reihenfolge der

Abfrage wurde für jede Versuchsperson zufällig bestimmt. Vor den kritischen Durchgängen mußte jede Versuchsperson drei Übungsfragen beantworten. Anker und Zielreiz in den Übungsfragen waren ebenfalls so gewählt, daß die abgefragten Pfade die kritischen Pfade nicht überlappten. Die Lernkontrolle bestand aus acht Durchgängen in denen jeweils entschieden werden mußte, welches von zwei Objekten näher an einem dritten lag. Die Objekte wurden für jeden Durchgang zufällig bestimmt. Die Zufallsauswahl unterlag jedoch der Einschränkung, daß die Differenz der Pfadlängen im letzten Durchgang mindestens eine Einheit groß sein mußte. (Die kleinere der beiden kritischen Pfadlängen hatte eine Länge von zwei Einheiten.) Um für eine ansteigende Schwierigkeit der Fragen in der Lernkontrolle zu sorgen, wurde für jeden früheren Durchgang in der Lernkontrolle diese kritische Differenz um eine Einheit erhöht.

7.3.1.4 *Versuchsablauf*

Der Versuchsablauf in Experiment III gliederte sich in dieselben Phasen wie Experiment I und II: Navigationsphase, Lernkontrolle, Distanzschätzung und Kartenzeichnen.

Navigationsphase. Zu Beginn der Navigationsphase erschien ein Dialogfenster mit dem Startbild der Animation und zwei darunterliegenden Tasten, einer „Start“-Taste und einer „Ende“-Taste. Die Versuchspersonen waren angewiesen, die „Start“-Taste zu drücken, um den aufgezeichneten Film abzuspielen. Nachdem der Film beendet war, blieb das letzte Bild stehen, bis eine der Tasten gedrückt wurde. Die Filmdarbietung konnte durch Drücken der „Start“-Taste immer wieder wiederholt werden. Die Versuchspersonen waren instruiert, sich den Film mindestens fünfmal anzusehen und erst dann die „Ende“-Taste zu drücken, wenn sie der Meinung waren, sich die Lage der Schilder und die Distanzen zwischen ihnen gut eingepägt zu haben. Durch das Drücken der „Ende“-Taste wurde die Navigationsphase verlassen.

Lernkontrolle. Die Überprüfung des räumlichen Wissens der Versuchspersonen geschah auf ähnliche Weise wie in Experiment II. In einem Dialogfenster wurden in acht Durchgängen jeweils die Namen von drei Schildern aus dem dargebotenen Film präsentiert. Einer der Namen befand sich oben im Dialogfenster, die anderen beiden auf gleicher Höhe darunter. Die Aufgabe der Versuchspersonen war einzuschätzen, welches der beiden unteren Objekte näher am oberen Objekt lag. Im Unterschied zu Experiment II erhielten die Versuchspersonen keine direkte Rückmeldung darüber, ob die Antwort richtig oder falsch war. Erst nachdem alle acht Fragen beantwortet waren, wurden sie durch ein Dialogfenster darüber informiert, wie viele Antworten falsch waren. War mehr als eine Antwort falsch, wurde die Versuchsperson in die Lernphase zurückversetzt, in der sie sich den Film noch mindestens einmal ansehen sollte, bevor sie in die Lernkontrolle zurück gelangte. Erst wenn mindestens sieben der acht Fragen richtig beantwortet waren, gelangten die Versuchspersonen in die Distanzschätzphase.

Distanzschätzung. Die Distanzschätzphase unterschied sich von Experiment I und II hauptsächlich darin, daß Anker und Zielreiz gleichzeitig dargeboten wurden. In jedem Durchgang wurden die Versuchspersonen zunächst aufgefordert, die „Return“-Taste zu drücken, sobald sie bereit waren. Anschließend wurde für eine Sekunde das Wort „Achtung!“ eingeblendet. Unmittelbar danach wurde ein Dialogfenster mit dem Namen zweier Orte eingeblendet. Die Versuchspersonen sollten so schnell wie möglich entscheiden, wie weit die genannten Orte auf der Route voneinander entfernt waren. Sie sollten die Entfernung in Metern schätzen. Zu Beginn der Lernphase wurde ihnen mitgeteilt, der im Film gezeigte Pfad habe eine Gesamtlänge von 1000 Metern. Sobald sie eine Antwort wußten, sollten sie sie laut aussprechen und gleichzeitig die „Return“-Taste drücken. Mit dem Drücken der „Return“-Taste erschien ein weiteres Dialogfenster, in das sie ihre Schätzung eintippen sollten.

Kartenzeichnen. Wie in Experiment I und II wurden die Versuchspersonen am Ende des Experimentes gebeten, eine Karte der Objekte und Pfade zu zeichnen.

7.3.2 Ergebnisse

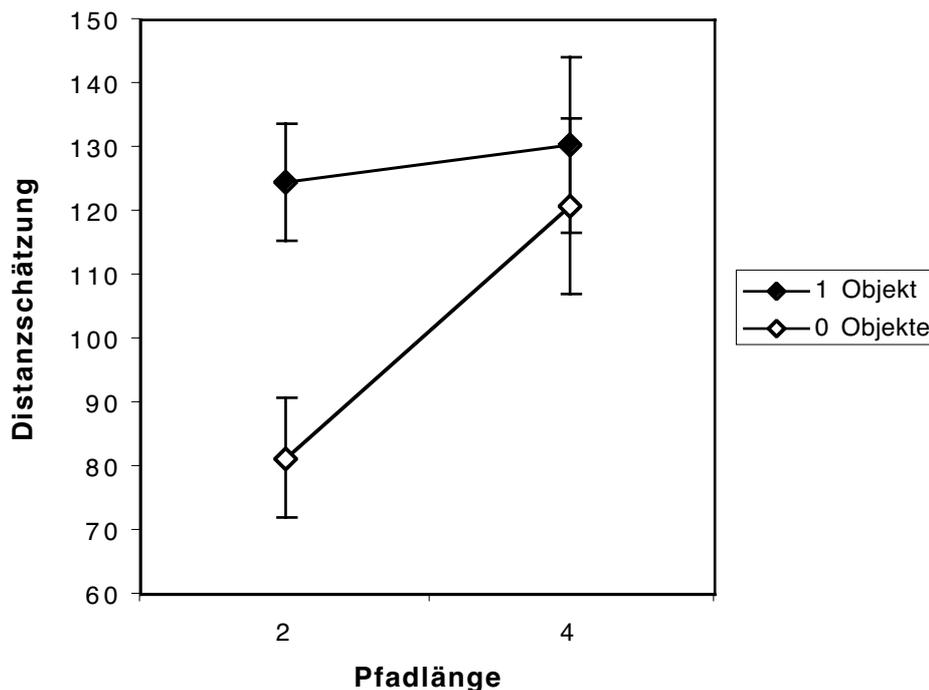


Abbildung 7.12: Geschätzte Pfadlänge in Abhängigkeit von der tatsächlichen Pfadlänge und der Anzahl der Objekte auf dem Pfad in Experiment III.

Abbildung 7.12 zeigt, daß die geschätzten Pfadlängen mit ansteigender tatsächlicher Pfadlänge und ansteigender Objektanzahl zunehmen. Die Analyse der Pfadlängenschätzungen ergab Haupteffekte für Objektanzahl, $F(1,49)=5.78$, $R_p^2=.11$, $p=.02$, und Pfadlänge,

$F(1,49)=10.78$, $R_p^2=.18$, $p<.01$. Die Interaktion wurde nicht signifikant, $F(1,49)=2.97$, $R_p^2=.06$, $p=.09$.

Die Ausreißerkorrektur für die Reaktionszeiten folgte demselben Schema wie in Experiment I und II. Zuerst wurden alle Latenzen über 30000 ms eliminiert. In einem zweiten Schritt wurden diejenigen Latenzen eliminiert, die mehr als drei Standardabweichungen von ihrem pfadspezifischen Mittelwert entfernt lagen. Damit wurden insgesamt 9 (2.25%) Reaktionszeiten eliminiert. Die Reaktionszeiten nahmen mit zunehmender Objektanzahl und mit zunehmender Pfadlänge zu (siehe Abbildung 7.13).

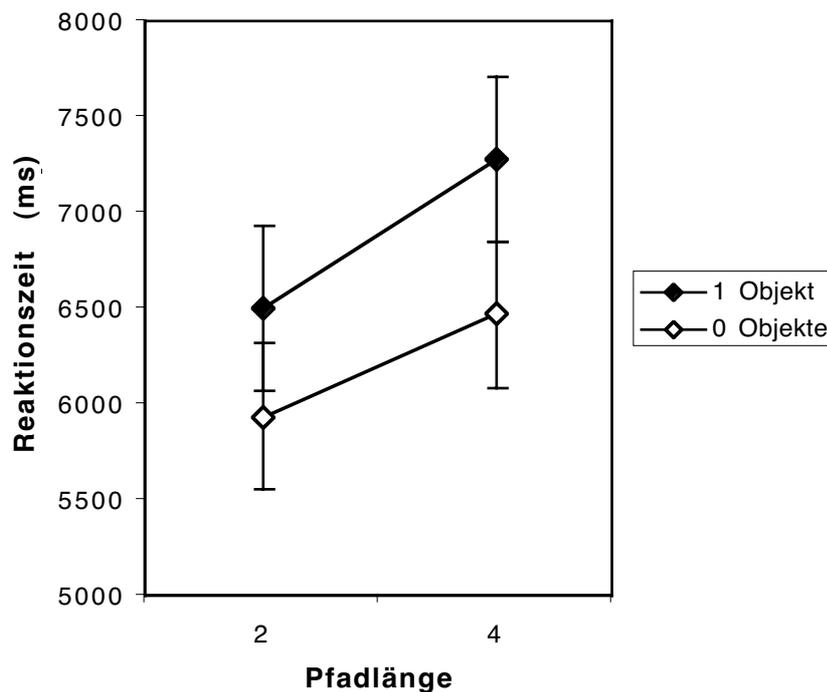


Abbildung 7.13: Reaktionszeiten für Pfadlängenschätzungen in Abhängigkeit von der tatsächlichen Pfadlänge und der Anzahl der Objekte auf dem Pfad in Experiment III.

Die varianzanalytische Auswertung ergab einen Haupteffekt der Objektanzahl, $F(1,49)=9.71$, $R_p^2=.17$, $p<.01$, sowie einen Haupteffekt der Pfadlänge, $F(1,49)=6.40$, $R_p^2=.12$, $p<.02$. Die Interaktion wurde nicht signifikant, $F(1,49)=.39$, $R_p^2=.01$. Eine Korrelation der pfadspezifischen Reaktionszeit-Mittelwerte mit den mittleren Pfadlängenschätzungen ergab $r=.86$, $p<.01$ (siehe Abbildung 7.14). Unter Auspartialisierung der Objektanzahl beträgt die Korrelation $.82$, $p<.01$. Mit der Pfadlänge korrelierten die Reaktionszeiten zu $.34$, $p=.41$.

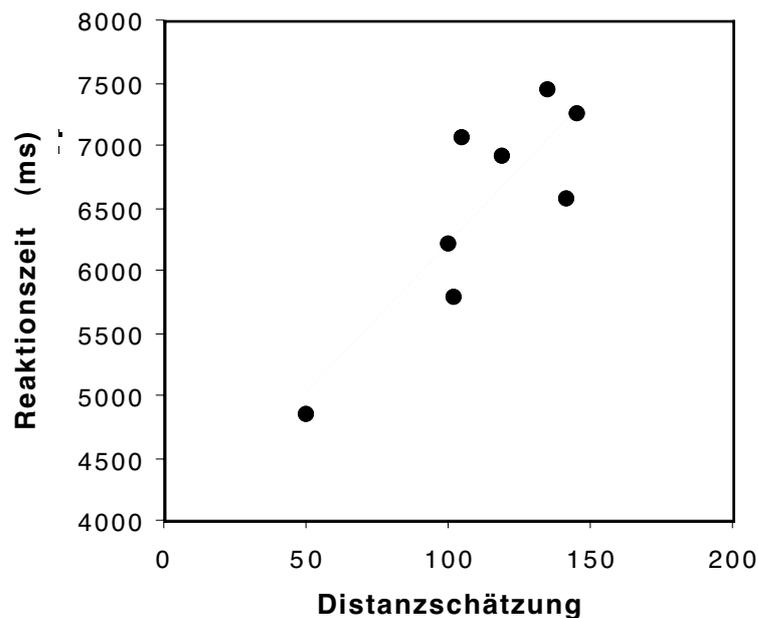


Abbildung 7.14: Mittlere Reaktionszeiten für alle Pfade in Abhängigkeit von der geschätzten Länge der Pfade in Experiment III ($r = .86$).

7.3.3 Diskussion

Wie in den vorherigen Experimenten steigen die geschätzten Pfadlängen sowohl mit der Anzahl der Objekte als auch mit der tatsächlichen Pfadlänge an. Die Distanzschätzungen unterliegen demnach einem Merkmalsakkumulationseffekt und repräsentieren parametrische Eigenschaften der Lernvorlage.

Die Reaktionszeiten steigen ebenfalls mit zunehmender Pfadlänge und zunehmender Objektanzahl an. Darüber hinaus zeigt sich ein deutlich positiver Zusammenhang mit den geschätzten Pfadlängen. Diese Ergebnisse decken sich vollständig mit den Vorhersagen aus dem analogen Zeitmesser-Modell. Verschiedene Alternativerklärungen für die gefundenen Effekte sind in diesem Experiment ausgeschlossen. Der Effekt der Objektanzahl kann nicht auf zeitliche Variablen zurückgeführt werden, da der Zeitbedarf für die Animation unabhängig von der Anzahl der Objekte auf dem Pfad war. Ebenso kann der Effekt der Pfadlänge auf die Reaktionszeit nicht auf einen symbolischen Distanzeffekt zurückgeführt werden, da eine offene Route verwendet wurde.

7.4 Diskussion der Experimente I-III

Die Experimente I, II und III untersuchten den Einfluß von Pfadlängen und Anzahl der Objekte auf dem Pfad auf Reaktionszeiten für Pfadlängenschätzungen. In allen drei Experimenten ergab sich ein Haupteffekt der Objektanzahl auf die Reaktionszeit: Mit zunehmender Objektanzahl stieg die Reaktionszeit an. In bezug auf den Einfluß der Pfadlänge sind die

Ergebnisse etwas weniger einheitlich. In Experiment I ergab sich ein Haupteffekt der Pfadlänge auf die Reaktionszeit, allerdings interagierte die Pfadlänge mit der Objektanzahl in einer Weise, daß nur in der Bedingung „3 Objekte“ von einem Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Pfadlänge gesprochen werden kann. Die Regression der Pfadlängenschätzungen auf die Reaktionszeiten zeigt zwar tendenziell einen Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender subjektiver Pfadlänge, der Zusammenhang war jedoch nicht statistisch abzuschließen. In Experiment II ergab sich ein Anstieg der Reaktionszeit in Abhängigkeit von der Pfadlänge nur für Pfade ohne Objekte, nicht aber für Pfade, auf denen sich ein Objekt befand. Demgegenüber zeigte sich jedoch ein deutlich positiver Zusammenhang zwischen geschätzten Pfadlängen und der Reaktionszeit. In Experiment III sind die Ergebnisse einheitlicher. Hier zeigt sich sowohl in der varianzanalytischen als auch in der regressionsanalytischen Auswertung ein deutlicher Anstieg der Reaktionszeit mit der physikalischen bzw. subjektiven Pfadlänge. Dieser Anstieg ist auch unabhängig von der Anzahl der Objekte auf dem Pfad.

Zusammenfassend betrachtet sprechen die Ergebnisse demnach für einen Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge und zunehmender Objektanzahl, mit der Einschränkung, daß sich die Ergebnisse einzelner Analysen zwischen den Experimenten unterscheiden. Diese Interpretation wird insbesondere durch die Ergebnisse von Experiment III gestützt, in dem verschiedene potentielle Störfaktoren am besten kontrolliert sind.

Einschränkend muß bemerkt werden, daß die unabhängigen Variablen in den Experimenten nur in wenigen Abstufungen variiert wurden. In Experiment I wurden Objektanzahl und Pfadlänge jeweils dreifach abgestuft, in den anderen beiden Experimenten nur zweifach. Damit muß die Frage offen bleiben, wie sich die Reaktionszeiten über einen größeren Bereich möglicher Objektanzahlen und Pfadlängen verhalten. Leider setzt die Komplexität der Anordnung enge Grenzen für eine Variation der Pfadlängen. In Experiment III wurden beispielsweise 18 Objekte benötigt, um jeweils zwei kritische Pfade für alle Kombinationen aus den beiden Streckenlängen und den beiden Objektanzahlen zu erhalten. Würde man diese beiden Faktoren in drei Abstufungen variieren, wären damit wohl schon die Grenzen der Erlernbarkeit der Karte überschritten. Ein möglicher Ausweg besteht darin, die Einflußgrößen nicht mehr unabhängig voneinander zu variieren, sondern verschiedene Kombinationen von Objektanzahlen und Pfadlängen regressionsanalytisch zu testen. Die Vor- und Nachteile dieses Verfahrens wurden schon am Beginn dieses Kapitels angesprochen. Es wäre sicherlich sinnvoll, dieses Verfahren als Ergänzung zu den bisherigen varianzanalytischen Versuchsplänen einzusetzen, um die Interpretation der Ergebnisse auf eine breitere empirische Basis zu stellen.

Aufgrund der bisherigen Ergebnisse kommen in Bezug auf die Repräsentation von Pfadlängen im Gedächtnis nur Modelle in Betracht, aus denen sich ein Anstieg der Reaktionszeiten

mit zunehmender Objektanzahl und zunehmender Pfadlänge vorhersagen läßt. Das Modell expliziter Kodierung aller Pfadlängen, nach dem die Pfadlängen mit konstantem Zeitbedarf abgerufen werden können, ist mit diesem Ergebnis nicht verträglich. Die Ergebnisse schließen ebenfalls ein Modell der Summation explizit kodierter Routensegmente aus, nach dem der Zugriff auf die Länge dieser Routensegmente mit konstantem Zeitbedarf geschieht, und der Zeitbedarf für die Summation dieser Elementardistanzen eine monoton steigende Funktion der Anzahl der Summanden ist. Genauso wenig sind die Ergebnisse mit einem einfachen *Mental-Scanning*-Modell verträglich, nach dem ein Scandvorgang mit konstanter Geschwindigkeit vom Ausgangsobjekt zum Zielobjekt läuft.

Die Ergebnisse sind jedoch mit dem analogen Zeitmesser-Modell (Thorndyke & Hayes Roth, 1982) vereinbar. Nach diesem Modell sollten sowohl die geschätzten Pfadlängen als auch die Reaktionszeiten für die Schätzungen mit zunehmender tatsächlichen Pfadlänge und mit zunehmender Objektanzahl ansteigen. Sowohl die Vorhersage für die Pfadlängenschätzungen als auch die Vorhersage für die Reaktionszeiten wird durch die Experimente I, II und III weitgehend (jedoch mit einigen Einschränkungen) bestätigt. Die Ergebnisse stützen also ein Modell, nach dem Distanzen durch die Abstände in einer mentalen Karte repräsentiert sind und durch mentales Absuchen dieser Karte abgerufen werden können.

Prinzipiell sind jedoch auch andere Modelle denkbar, aus denen sich dasselbe Ergebnismuster vorhersagen läßt. Ein Beispiel hierfür ist das Summationsmodell. Obwohl das Summationsmodell keinen Effekt der Streckenlänge auf die Reaktionszeit vorhersagt, kann es so modifiziert werden, daß es mit diesem Effekt vereinbar ist. Wenn man annimmt, daß die Spurstärke einer repräsentierten Distanz mit zunehmender Entfernung zwischen den Objekten geringer wird und die Zeit, die für die Wiedergabe benötigt wird, eine Funktion der Spurstärke ist, so sollte die Reaktionszeit mit zunehmender Entfernung ansteigen. Allerdings handelt es sich bei diesem Modell nicht mehr um ein rein symbolisches Modell. Obwohl nach diesem Modell eine symbolische Enkodierung der Pfadlängen vorliegt, enthält es analoge Anteile, da über die Spurstärke die Entfernung analog kodiert ist. Damit ist die Spurstärke isomorph zur Pfadlänge. Definiert man Repräsentationen über Isomorphismen, so liegt somit eine analoge Repräsentation der Pfadlängen vor, auch wenn darüber hinaus die Pfadlängen symbolisch kodiert sind. Die Annahme, daß die Spurstärke mit zunehmender Entfernung abnimmt, ist zwar etwas arbiträr, aber es läßt sich durchaus eine Begründung für diese Annahme finden. Beispielsweise ist denkbar, daß Objektrelationen umso eher und umso stärker enkodiert werden, je näher die jeweiligen Objekte zueinander plaziert sind. Diese Auffassung wird beispielsweise von McNamara, Halpin und Hardy (1992) vertreten.

Doch auch ohne Rückgriff auf die unterschiedliche Verfügbarkeit verschiedener Interobjektdistanzen läßt sich mit dem Summationsmodell ein Anstieg der Reaktionszeiten mit zuneh-

mender Distanz vorhersagen. Das Summationsmodell sagt nur dann eine Unabhängigkeit der Reaktionszeit von der Distanz voraus, wenn der Zeitbedarf für die Addition unabhängig von der Größe der Summanden ist. Es gibt jedoch Hinweise darauf, daß unter bestimmten Bedingungen der Zeitbedarf für die Addition von Zahlen mit zunehmender Größe der Zahlen ansteigt (Restle, 1970). Damit würde man auch für die vorliegenden Experimente einen Anstieg der Reaktionszeiten mit zunehmender Pfadlänge erwarten.

Auch mit Modellen der hierarchischen Organisation räumlichen Wissens lassen sich die Ergebnisse der Experimente erklären. Es gibt eine Reihe empirischer Befunde, die zeigen, daß räumliche Repräsentationen hierarchisch gegliedert sein können (siehe Abschnitt 6.3). Insbesondere die Experimente von Allen und seinen Mitarbeitern (siehe z. B. Allen, 1982) haben gezeigt, daß Routenwissen Segmentierungseffekte aufweist. Mit Hilfe von Primingexperimenten kann man zeigen, daß Reaktionszeiten in einer Rekognitionsaufgabe kleiner sind, wenn Prime und Target aus demselben Cluster stammen, als wenn sie zu unterschiedlichen Clustern gehören (McNamara et al., 1989). Für eine Repräsentation von Objekten entlang einer Route würde die Wahrscheinlichkeit, daß zwei Objekte demselben Cluster angehören, mit zunehmender Entfernung der beiden Objekte sinken. Falls Reaktionszeiten für Distanzurteile ebenso wie Reaktionszeiten in einem Rekognitionstest hierarchischen Effekten unterliegen, könnte somit der Anstieg der Reaktionszeit mit zunehmender Pfadlänge auf die hierarchische Organisation des Routenwissens zurückzuführen sein.

Die Ergebnisse lassen sich auch mit einer Variante des einfachen *Scanning*-Modells erklären. Ausgangspunkt dieser Überlegung ist, daß die subjektive Länge eines Pfades mit zunehmender Objektanzahl zunimmt. Wenn ein Pfad tatsächlich als umso länger repräsentiert wird, je mehr Objekte sich auf ihm befinden (und der Effekt der Objektanzahl auf die Längenschätzung nicht ein Effekt von Default-Werten bei unbekanntem Elementarstreckenlängen ist), so kann man auch aufgrund des einfachen *Mental-Scanning*-Modells sowohl einen Haupteffekt der Streckenlänge als auch einen Haupteffekt der Objektanzahl erwarten. Dieses Modell ist also hinsichtlich der vorhergesagten Ergebnisse nicht von Thorndykes analogem Zeitmesser-Modell zu unterscheiden. Allerdings liefert es keine Begründung dafür, warum subjektive Distanzen überhaupt von der Anzahl der Objekte auf dem Pfad abhängen.

Zusammenfassend läßt sich demnach sagen, daß die Ergebnisse Thorndykes analoges Zeitmesser-Modell stützen, aber auch andere Modelle als Erklärung für die Effekte in Betracht kommen. Dennoch sind eine Reihe von Alternativhypothesen durch die vorliegenden Ergebnisse ausgeschlossen.

Die bisher geschilderten Ergebnisse lassen jedoch nur Schlüsse in Bezug auf Routenwissen zu, da immer nur Schätzungen von Distanzen entlang der Lernroute untersucht wurden. Schätzungen euklidischer Distanzen zwischen Objekten, die auf der Lernroute nicht unmittel-

bar benachbart sind, könnten jedoch anderen Gesetzmäßigkeiten folgen. Diese Form von Distanzwissen wird in den nächsten beiden Kapiteln untersucht.

8 Überblicksrepräsentationen beim Erlernen von Routen

“As early as 1929, Lashley reported incidentally the case of a couple of rats who, after having learned an alley maze, pushed back the cover near the starting box, climbed out and ran directly across the top to the goal-box where they climbed down in again and ate.” (Tolman, 1948, S. 203)

Die in der Raumkognition gebräuchliche Unterscheidung zwischen Routen- und Überblickswissen läßt sich sehr leicht durch ein Beispiel erläutern. Lernt man eine Stadt dadurch kennen, daß man in den Straßen umherwandert oder sie mit dem Auto abfährt, so wird man irgendwann in der Lage sein, von einem Teil der Stadt in einen anderen Teil zu kommen, wenn man den Weg schon einmal gelaufen oder gefahren ist. Man kann ungefähr abschätzen, wie lange man gehen muß, und man weiß, an welchen Stellen man in eine andere Straße abbiegen muß. Neue Wege zwischen bekannten Orten zu finden oder sich kürzere Wege zwischen zwei Orten auszudenken, scheint jedoch schwierig zu sein. Oft ist man nicht in der Lage anzugeben, in welcher direkten Entfernung oder in welcher Richtung sich ein Ort gegenüber einem anderen befindet. Das Wissen, das uns in die Lage versetzt, Wege wiederzufinden, die wir bereits kennengelernt haben, wird Routenwissen genannt. Lernt man eine Stadt hingegen dadurch kennen, daß man sich einen Stadtplan einprägt, so ist es viel leichter, Richtungen oder direkte Entfernungen zu beurteilen, da man die Stadt im Überblick kennengelernt hat. Dieses Wissen wird als Überblickswissen bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen Routen- und Überblickswissen spielt eine wichtige Rolle in der Raumkognition. Zum einen ist von Interesse, in welcher Hinsicht sich Routen- und Überblickswissen unterscheiden, zum anderen wird untersucht, ob Routenwissen in Überblickswissen übergehen kann.

8.1 Routenwissen und Überblickswissen

Bereits Tolman (1948) unterscheidet zwischen kognitiven Karten, die eher Routenwissen beinhalten und solchen, die eher Überblickswissen beinhalten. Verfügt eine Ratte in einem Labyrinth über eine sogenannte „Strip Map“, so ist die Position des Tieres nur durch einen einzigen, relativ einfachen Pfad mit der Position des Zieles verknüpft. Verfügt die Ratte demgegenüber über eine sogenannte „Comprehensive Map“, so ist ein größerer Ausschnitt der Umgebung repräsentiert, wodurch sie auch dann noch zum Ziel finden kann, wenn die Ausgangsposition des Tieres verändert wird oder Variationen im Labyrinth eingeführt werden. Seiner Ansicht nach sind Ratten in der Lage, „Comprehensive Maps“ zu entwickeln.

In einer experimentellen Überprüfung dieser These setzte Tolman Ratten wiederholt in ein Labyrinth, in dem sich ein runder Raum befand, von dem ein einziger, gewundener Gang ausging, der nach drei rechtwinkligen Biegungen zur Futterstelle führte. Nachdem die Ratten drei Tage hintereinander in diesem Labyrinth ausgesetzt wurden, wurden sie in ein verändertes Labyrinth gesetzt, in dem der ursprüngliche Gang blockiert war und stattdessen 18 neue Gänge strahlenartig von dem runden Raum ausgingen. Nachdem die Ratten erfolglos versucht hatten, durch den alten Gang zu laufen, wählten sie mit größter Häufigkeit denjenigen Gang, der direkt in die Richtung des Zieles zeigte.

Die gegenwärtig gebräuchliche Unterscheidung zwischen Routen- und Überblickswissen geht auf Shemyakin (1962) zurück und ist vor allem geprägt durch das Modell von Siegel und White (1975). Nach dem einflußreichen Stufenmodell von Siegel und White entwickelt sich räumliches Wissen normalerweise in drei Schritten.

- Lernt man eine räumliche Umgebung durch eine Route kennen, so wird in einer ersten Phase Wissen über Landmarken abgespeichert. Landmarken sind nach der Definition von Siegel und White (1975, S. 23) „unique configurations of perceptual events (patterns)“. Sie enthalten selbst keine räumliche Information außer derjenigen, die in dem Muster selbst steckt.
- Aus dem Wissen über Landmarken entsteht Routenwissen, indem die Landmarken zu einer Folge verknüpft werden. Routenwissen besteht aus Informationen über die Reihenfolge von Landmarken und Informationen über die Aktionen, die an bestimmten Landmarken ausgeführt werden müssen, wie beispielsweise „rechts abbiegen“ oder „geradeaus weitergehen“. In der Definition von Siegel und White enthält Routenwissen keine parametrische Information, womit gemeint ist, daß kein Wissen über Distanzen vorliegt. Routenwissen ist die Folge von Paarassoziationslernen, wobei Landmarken mit Richtungsänderungen assoziiert werden. Das Lernen räumlicher Informationen zwischen den Landmarken ist inzidentell und irrelevant, sofern es nicht dazu beiträgt, den Kurs beizubehalten. Ein konservatives Routenlernsystem wäre zwischen den Landmarken effektiv „leer“. Der leere Raum zwischen den Landmarken wird durch ausgedehnte Erfahrung mit parametrischen Informationen gefüllt.
- Überblickswissen entsteht dann, wenn Personen ein Netzwerk von räumlichen Beziehungen zwischen den Landmarken aufbauen, so daß „direkte“ relationale Informationen über Objekte entstehen, zwischen denen man niemals auf direktem Wege hin und her gewandert ist. Aus der einfachen Verknüpfung zwischen Landmarken und Routen wird eine gestalthafte Repräsentation. Die Existenz von Überblickswissen zeigt sich in der Fähigkeit, Abkürzungen einzuschlagen, effiziente Routen zu finden und die Richtung von Landmarken angeben zu können (Montello, 1998, S. 145).

Die von Siegel und White postulierten Stufen lassen sich verschiedenen Altersstufen zuordnen (Cohen & Schuepfer, 1980). In der Studie von Cohen und Schuepfer lernten Schüler und Studenten eine Route durch ein Gangsystem, in dem verschiedene Landmarken plaziert waren. In einer Testphase, in der einzelne Landmarken entfernt wurden, sollten die Versuchspersonen den vorher gelernten Weg wiederfinden. Die Leistung in diesem Test war bei Schülern der zweiten Klasse stärker vermindert als bei Schülern der sechsten Klasse und bei Studenten. Darüber hinaus waren nur die Studenten in der Lage, die gelernte Konfiguration in einer konsistenten Weise wiederzugeben.

Der Übergang von Routen- zu Überblickswissen findet sich auch in Modellen der künstlichen Intelligenz wieder. Das *TOUR*-Modell (Kuipers, 1978) zeigt, wie Routeninformationen zu Überblickswissen verknüpft werden können. Die postulierte Entwicklungssequenz zwischen Landmarken-, Routen- und Überblickswissen findet sich auch in *PLAN* (Chown, Kaplan & Kortenkamp, 1995), einem computationalen Modell für das Auffinden von Routen, wieder.

In einigen Studien wird das Stufenmodell der Entwicklung von Überblickswissen in Zweifel gezogen. Nach dem Netzwerkmodell (Byrne, 1979; Moar & Carleton, 1982) werden die Informationen beim Erlernen von Routen von Anfang an in ein Netzwerk integriert, dessen Knoten die Landmarken repräsentieren. Die Kanten in diesem Netzwerk repräsentieren Verbindungen zwischen den Landmarken. Dieses Netzwerk wird mit zunehmender Lernerfahrung zwar komplexer und genauer, erfährt jedoch keine qualitative Veränderung. Eine alternative Repräsentationsform räumlichen Wissens in einem Graphen sind sogenannte *Ansichtgraphs* (Mallot, Gillner, van Veen & Bühlhoff, 1998), in denen die Knoten Ansichten von Landmarken und die Kanten Nachbarschaftsbeziehungen zwischen diesen Ansichten repräsentieren. Diese Repräsentationsform stellt eine geringere Abstraktion von dem sensorischen Daten beim Erlernen von Routen dar und kann trotzdem informational äquivalent zu den üblicherweise postulierten *Platzgraphs* sein.

Montello (1998) kritisiert vor allem die Annahme, daß Routenwissen typischerweise keine Distanzinformationen enthält, und schlägt ein Alternativmodell vor, das sich in fünf Hauptaussagen zusammenfassen läßt.

- Es gibt keine Stufe, auf der reines Landmarken- oder Routenwissen existiert, denn die Entwicklung parametrischen, konfiguralen Wissens beginnt bereits beim ersten Kontakt mit einer neuen Umgebung.
- Mit zunehmender Vertrautheit mit einer räumlichen Umgebung geht auch eine Zunahme der Quantität, Genauigkeit und Vollständigkeit räumlichen Wissens einher.

- Die einzige weitgehend qualitative Veränderung in der Entwicklung einer räumlichen Repräsentation besteht in der Integration von Wissen über Orte, die man unabhängig voneinander kennengelernt hat.
- Interindividuelle Unterschiede im Ausmaß und der Genauigkeit räumlichen Wissens zeigen sich wahrscheinlich am deutlichsten im Grad der Wissensintegration.
- Nicht-parametrisches Wissen existiert parallel zu parametrischem Wissen und ist nicht notwendigerweise Vorgänger oder integraler Bestandteil parametrischen Wissens.

Sein Hauptargument für die Existenz parametrischen Wissens von Anfang an ist die Fähigkeit zur Pfadintegration oder Pfadvervollständigung. Schon bei minimaler Erfahrung mit einem Pfad sind Personen in der Lage, Abkürzungen zu finden oder in die Richtung des Ausgangspunktes zu deuten. Dieser Befund schließt zwar nicht aus, daß es Situationen gibt, in denen ausschließlich Wissen über die Sequenz von Landmarken erworben wird, er zeigt jedoch, daß in vielen Lernsituationen parametrisches Wissen bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt vorhanden ist.

Bennett (1996) kritisiert die Annahme von Überblickswissen vor allem bei Tieren (aber auch beim Menschen) in seiner Bestandsaufnahme der Evidenz für die Existenz von kognitiven Karten. Der Begriff „kognitive Karte“ wird von unterschiedlichen Autoren höchst unterschiedlich definiert. Daher muß zunächst geklärt werden, welche Annahmen mit diesem Konzept verbunden sind, wenn man untersuchen will, ob sie existieren oder nicht. Bennet (1996) bezieht sich auf die Definition kognitiver Karten im Sinne von Tolman (1948) (hier bezieht er sich offensichtlich auf Comprehensive Maps) und O’Keefe und Nadel (1978). In beiden Konzeptionen spielt die Fähigkeit, neue Abkürzungen zu finden, eine entscheidende Rolle. Diese Fähigkeit wurde in zahlreichen Studien experimentell untersucht. Viele dieser Studien kommen zu dem Schluß, daß, angefangen mit Insekten bis hin zum Menschen, eine große Anzahl von Arten über kognitive Karten verfügt. Bennett bezweifelt jedoch die Schlüssigkeit dieser Studien, da sie immer eine oder mehrere Alternativinterpretationen offen lassen:

- Die scheinbar neue Abkürzung ist nicht wirklich neu.
- Pfadintegration wurde benutzt, um die neue Abkürzung zu finden.
- Bekannte Landmarken wurden von einem neuen Blickwinkel aus wiedererkannt.

Nach Bennet schließt keine der bisherigen Studien alle drei Alternativinterpretationen aus.

“In all claims of cognitive maps for insects, birds, rodents, primates and humans [...], I found that in no cases were all three alternatives eliminated [...]“ (Bennett, 1996, S. 221f).

Diese Befundlage läßt Bennet zu dem Schluß kommen, daß die Annahme der Existenz kognitiver Karten nicht gerechtfertigt ist. Es gibt jedoch eine ganze Reihe psychologischer Untersuchungen, die von Bennet nicht berücksichtigt werden, und für die es schwer sein dürfte, Alternativerklärungen zu finden. Auch setzt er sich nicht mit den neurophysiologischen Ergebnissen von O'Keefe und Nadel (1978) zur Repräsentation kognitiver Karten im Hippocampus auseinander, obwohl er deren Definition mentaler Karten übernimmt. Wie schon in vorigen Kapiteln angesprochen, haben O'Keefe und Nadel Evidenz dafür gefunden, daß sich im Hippocampus von Ratten sogenannte Platzzellen befinden, die den Aufenthaltsort des Tieres kodieren. Mit Hilfe von Einzelzelleitungen konnte nachgewiesen werden, daß bestimmte Nervenzellen im Hippocampus immer dann feuern, wenn sich die Ratte an einem bestimmten Ort (dem Platzfeld der Zelle) befindet. Damit ist im Hippocampus ein Ortsrepräsentationssystem realisiert, das unabhängig von Lernrouten die Position in einem Koordinatensystem kodiert.

In einigen Studien wurde untersucht, ob sich räumliche Urteile, die sich auf Relationen von Objekten innerhalb einer Lernroute beziehen, von Urteilen unterscheiden, die sich auf Objekte aus verschiedenen Lernrouten beziehen. Moar und Carleton (1982) boten ihren Versuchspersonen Diaderien zweier sich teilweise überlappender Routen durch eine Stadt dar. In der Testphase sollten die Versuchspersonen Distanzen und Richtungen zwischen verschiedenen Objekten schätzen, die sich entweder auf derselben Route („innerhalb“-Bedingung) oder auf unterschiedlichen Routen („zwischen“-Bedingung) befanden. Die beiden Bedingungen unterschieden sich weder bei geringer noch bei hoher Lernerfahrung, was die Autoren als Evidenz gegen das Stufenmodell und für ein Netzwerkmodell interpretieren. Allerdings waren Urteile in Richtung der Route genauer als Urteile gegen die Routenrichtung, was gegen eine vollständig routenunabhängige Repräsentation spricht. Der Befund, daß sich die Genauigkeit der räumlichen Urteile in der „zwischen“ Bedingung nicht von der „innerhalb“-Bedingung unterschied, konnte von Holding und Holding (1989) repliziert werden. In beiden Studien wurden jedoch sehr einfache Routen mit einem hohen Grad an Überlappung verwendet. Golledge et al. (1993) verwendeten komplexere Routen und fanden geringere Fehler beim Schätzen innerhalb einer Route. In der Studie von Montello und Pick (1993) lagen die beiden Routen in verschiedenen Stockwerken eines Gebäudes und überlappten sich nicht. Den Versuchspersonen wurde nur verbal mitgeteilt, in welcher räumlichen Relation sich die Routen zueinander befanden. In der Prüfphase konnten die Versuchspersonen Richtungen innerhalb einer Route genauer und schneller einschätzen als zwischen Routen.

Die Befundlage zur Frage, wie sich Überblickswissen entwickelt, ist also uneinheitlich. Ein Grund dafür dürfte darin liegen, daß die Begriffe Routenwissen und Überblickswissen häufig unscharf definiert sind und nicht einheitlich verwendet werden. Die einflußreiche Konzeption von Siegel und White läßt keine Trennung zwischen Definition und Theorie erkennen, das

heißt, es bleibt unklar, welche Eigenschaften dem Routenwissen per definitionem und welche per Hypothese zugeschrieben werden und empirisch zu prüfen sind. Zudem vermischen sich in dieser Konzeption Annahmen darüber, welche Informationen enkodiert sind, mit Annahmen über das Format der Repräsentation. Im Sinne der in dieser Arbeit getroffenen Unterscheidung zwischen Wissen und Repräsentation bleibt demnach unklar, ob die Dichotomie von Routenwissen und Überblickswissen durch Unterschiede im Wissen oder in der Repräsentation aufgespannt wird. In vielen Fällen wäre es auch schwierig zu entscheiden, ob Routen- oder Überblickswissen vorliegt. Hat eine Person nur Wissen über eine Folge von Landmarken und Aktionen an diesen Landmarken gespeichert, so hat sie im Modell von Siegel und White Routenwissen. Liegen darüber hinaus Informationen über Distanzen vor, so würde man wohl im Modell von Siegel und White immer noch von Routenwissen sprechen. Problematisch wird dieses Modell dann, wenn es einer Person gelingt, aufgrund dieser Informationen Inferenzen zu ziehen. Ist beispielsweise eine Route entlang der Landmarken *A*, *B* und *C* enkodiert, so dürften die meisten Menschen in der Lage sein zu schließen, daß die Distanz zwischen *A* und *C* nicht größer sein kann als die Summe der Distanzen von *A* nach *B* und von *B* nach *C*. Dieses Wissen kann also durchaus entstehen, ohne daß eine Person über eine auch nur annähernd gestalthafte oder koordinatenbasierte Repräsentation verfügt. Die Vermischung von Annahmen darüber, was repräsentiert ist, und wie es repräsentiert ist, macht es also schwierig zu entscheiden, ob Routen- oder Überblickswissen vorliegt.

8.2 Routenrepräsentationen und Überblicksrepräsentationen

Es scheint daher nötig zu sein, Annahmen über das Wissen von den Annahmen über die Repräsentation dieses Wissens zu trennen. In dieser Arbeit soll zwischen Routen- und Überblickswissen auf der einen Seite und Routen- und Überblicksrepräsentationen auf der anderen Seite unterschieden werden. Wissen bezieht sich dabei auf diejenigen Informationen, die ein kognitives System liefern kann. Routenwissen bedeutet demnach, daß eine Person in der Lage ist, räumliche Relationen zwischen auf der Route benachbarten Objekten anzugeben. Von Überblickswissen soll dann gesprochen werden, wenn eine Person räumliche Relationen zwischen Objekten angeben kann, die nicht in unmittelbarer Nachbarschaft auf der Route liegen. Nach dieser Definition ist es möglich, auch dann über Überblickswissen zu verfügen, wenn nur räumliche Relationen zwischen auf der Route benachbarten Objekten repräsentiert sind. Sind einer Person Distanzen und Richtungen zwischen allen auf der Route benachbarten Objekten bekannt, so kann sie auch Distanzen und Richtungen zwischen allen nicht benachbarten Objekten angeben, sofern sie über die Fähigkeit verfügt, diese räumlichen Relationen zu inferieren. Die Unterscheidung zwischen Routen- und Überblickswissen ist dadurch unspezifisch in Bezug auf die zugrundeliegenden Repräsentationen, da es möglicherweise nur darauf ankommt, ob eine Person in der Lage ist, Inferenzen zu ziehen. Hinsichtlich der

zugrundeliegenden Repräsentationen sind Routen- und Überblickswissen möglicherweise ununterscheidbar. Da in der vorliegenden Arbeit jedoch primär Repräsentationen untersucht werden sollen, scheint es sinnvoll, zusätzlich eine Unterscheidung zwischen Routen- und Überblicksrepräsentationen einzuführen.

Eine *Routenrepräsentation* soll in der vorliegenden Arbeit dadurch definiert werden, daß räumliche Relationen nicht benachbarter Objekte nur implizit durch räumliche Relationen benachbarter Objekte repräsentiert sind. In Routenrepräsentationen sind demnach räumliche Relationen zwischen auf der Route nicht benachbarten Objekten abgeleitete Repräsentationen räumlicher Relationen benachbarter Objekte.

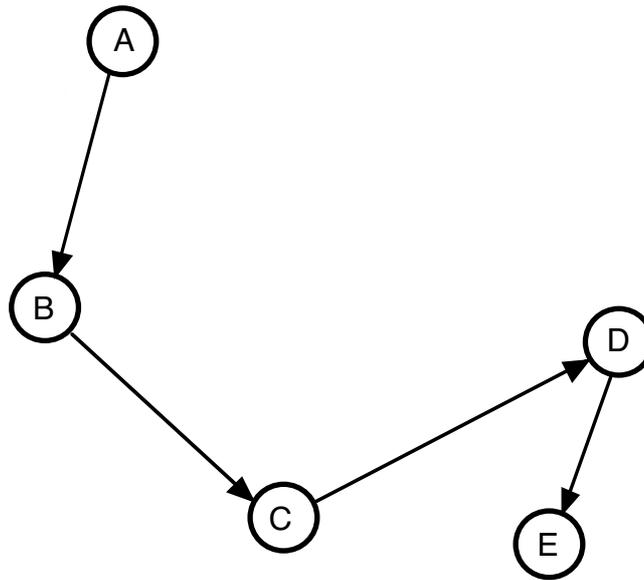


Abbildung 8.1: Beispiel eine Routenrepräsentation. Pfeile zwischen den Objekten deuten explizit kodierte räumliche Relationen an.

Demgegenüber liegt eine *Überblicksrepräsentation* dann vor, wenn räumliche Relationen nicht (auf der Route) benachbarter Objekte keine abgeleiteten Parameter von Relationen benachbarter Objekte sind. Dies muß nicht bedeuten, daß diese Relationen explizit enkodiert sind. Hat die Überblicksrepräsentation beispielsweise das Format einer mentalen Karte, so liegt keine explizite Kodierung von Distanzen und Richtungen nicht benachbarter Objekte vor, aber diese Distanzen und Richtungen sind keine abgeleiteten Parameter der räumlichen Relationen benachbarter Objekte.

Die empirische Trennung zwischen Routen- und Überblickswissen ist ungleich einfacher als die Trennung zwischen Routen- und Überblicksrepräsentationen. Der Großteil der empirischen Studien in diesem Themenkreis liefert nur Evidenz darüber, unter welchen Umständen Überblickswissen entstehen kann. Hier genügt es zu ermitteln, ob Versuchspersonen Relationen zwischen Objekten beurteilen können, die nicht auf der Lernroute benachbart sind.

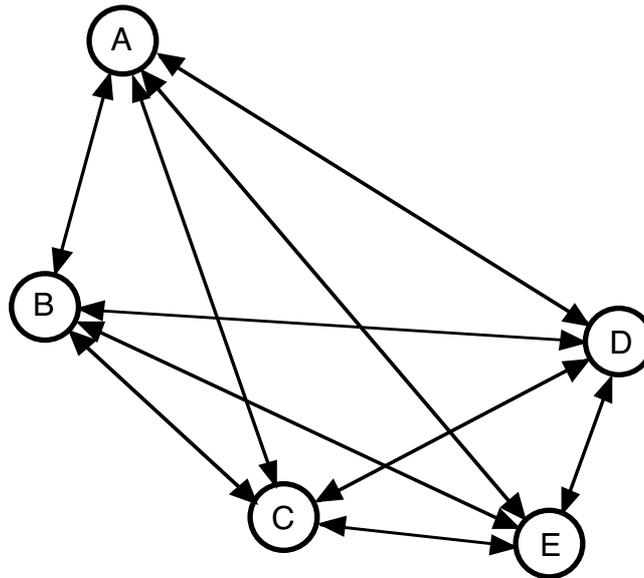


Abbildung 8.2: Beispiel für eine Übersichtsrepräsentation. Pfeile zwischen den Objekten deuten explizit kodierte räumliche Relationen an.

Routenrepräsentationen sind per definitionem an den Modus des Erwerbs der räumlichen Information gebunden, da eine Route durch die zeitliche Abfolge räumlicher Information charakterisiert ist. Übersichtsrepräsentationen könnten demgegenüber eine vollständige Abstraktion vom Modus des Erlernens darstellen. Wenn beim Erlernen von Routen eine Übersichtsrepräsentation entsteht, so ist damit schon impliziert, daß die zeitliche Sequenz des Erlernens zumindest hinsichtlich der Kodierung räumlicher Relationen aus der Repräsentation getilgt ist. Für räumliches Wissen, das beim Erlernen von Karten oder durch Betrachtung einer Anordnung aus der Vogelperspektive entsteht, gibt es dagegen Hinweise, daß die Raumrepräsentation nicht völlig vom Modus des Erlernens abstrahiert ist. In einer Reihe von Studien werden Effekte der Ausrichtung²⁴ des Lernmaterials berichtet (Evans & Pezdek, 1980; Levine, Marchon & Hanley, 1984; Presson & Hazelrigg, 1984; Richardson et al., in press; Roskos-Ewoldsen, McNamara, Shelton & Carr, 1998; Shelton & McNamara, 1997; Sholl, 1987; Tlauka & Wilson, 1996).

Sholl (1987) verglich räumliche Repräsentationen, die durch direkte Erfahrung aufgebaut wurden, mit Repräsentationen, die durch Karten erworben wurden. In ihren Experimenten wurden zwei Konzeptionen mentaler Karten gegeneinander geprüft. Aus der Annahme, daß mentale Karten dieselben Charakteristika wie Bilder aufweisen (Levine, Jankovic & Palij, 1982), lassen sich zwei Vorhersagen ableiten. Zum einen gilt das Prinzip der *Orientierungsspezifität*, das heißt, kognitive Karten sollten, ebenso wie Bilder eine spezifische Orientierung haben. Zum zweiten gilt das Prinzip der *gleichen Verfügbarkeit*, das heißt, alle räumlichen Relationen sollten in der mentalen Karte gleich verfügbar sein. Die alternative Konzeption

²⁴ engl.: alignment effects

kognitiver Karten geht auf das Konzept des *Orientierungsschemas* (Neisser, 1976) zurück. Nach dieser Konzeption sind kognitive Karten Wissensstrukturen, die darauf spezialisiert sind, die perzeptuelle und motorische Exploration der Umgebung zu steuern. Orientierungsschemata sind darauf ausgerichtet, mit Hilfe optischer Flußmuster die Position des Beobachters in Bezug auf Objekte und die Lage von Objekten zueinander zu bestimmen. Dies führt Sholl (1987) zu der Annahme, daß Objekte, die vor dem Beobachter liegen, (auch wenn sie nicht sichtbar sind) schneller lokalisiert werden müßten als Objekte hinter dem Beobachter.

Diese Vorhersagen wurden mit Hilfe von Reaktionszeiten in einer Aufgabe getestet, in der die Versuchspersonen aus dem Gedächtnis die Richtung von Objekten angeben mußten. Die Ergebnisse stützten die Konzeption mentaler Karten als Orientierungsschemata, wenn die Stimuli durch direkte Erfahrung gelernte Gebäude auf einem Universitätscampus waren. Wurden als Stimuli jedoch Orte der Vereinigten Staaten verwendet, die aus einer Karte gelernt wurden, so waren die Ergebnisse konsistent mit der Konzeption kognitiver Karten als Bilder. Wenn die Orte zum Teil durch Reisen bekannt waren, waren die Ergebnisse mit keiner der Konzeptionen konsistent. Sholl (1987) schließt daraus, daß aus lokalen Umgebungen Orientierungsschemata aufgebaut werden, während große geographische Regionen in einem anderen Typ von mentalen Karten repräsentiert werden.

Eine klassische Studie zu Unterschieden zwischen Routenlernen und Kartenlernen stammt von Thorndyke und Hayes-Roth (1982). Die Autoren untersuchten Unterschiede im räumlichen Wissen zwischen einer Gruppe von Studenten, die ein Bürogebäude durch Kartenlernen kennenlernten und einer Gruppe von Angestellten, die in diesem Gebäude arbeiteten und das Gebäude dementsprechend durch Routenlernen kennenlernten. Sie erhoben Distanz- und Richtungsschätzungen und ließen Positionen von Objekten relativ zu anderen Objekten in eine Karte eintragen.

Die Büroangestellten schätzten Routendistanzen genauer ein als euklidische Distanzen, während sich in den Urteilen der Studenten keine Unterschiede ergaben. Dieser Befund stützt die These, daß die Büroangestellten über eine Routenrepräsentation verfügten. Euklidische Distanzen konnten daher nur durch „informale Algebra“ ermittelt werden, die die Routensegmente und die Winkel zwischen den Segmenten in Beziehung setzt. Die Büroangestellten, die erst eine kurze Zeit in dem Gebäude arbeiteten, machten bei der Schätzung von Distanzen und Richtungen um so mehr Fehler, je komplexer der Pfad war, der die beiden Objekte miteinander verband. Geht man davon aus, daß räumliche Urteile um so mehr Fehler akkumulieren, je mehr Informationen miteinander integriert werden müssen, so ist dieser Befund ebenfalls konsistent mit der Annahme, daß diese Personengruppe über eine Routenrepräsentation verfügte.

Die Urteile der Studenten, die eine Karte gelernt hatten, zeigten diese Systematik nicht. Richtungen von Orten, die vom Ausgangspunkt der Schätzung nicht sichtbar waren, konnten von den Büroangestellten besser eingeschätzt werden als von den Studenten. Dieser Effekt wird von Thorndyke und Hayes-Roth auf die Schwierigkeit zurückgeführt, die Vogelperspektive beim Erlernen der Karte in die horizontale Perspektive zu überführen. Die Büroangestellten konnten demgegenüber Objekte genauer in einer Karte platzieren als die Studenten. Diejenigen Büroangestellten, die bereits längere Zeit in dem Gebäude gearbeitet hatten, glichen in ihren Urteilen den Kartenlernern. Die Studie von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) liefert also Evidenz dafür, daß sich in der Tat beim Routenlernen Überblicksrepräsentationen entwickeln können. Darüber hinaus stützen die Ergebnisse das Stufenmodell von Siegel und White (1975).

Sowohl die Ergebnisse von Sholl (1987) als auch die von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) sprechen demnach dafür, daß sich Routenlernen von Kartenlernen hinsichtlich der mentalen Repräsentationen, die aus der räumlichen Information aufgebaut werden, unterscheiden. Obwohl die Studien sowohl hinsichtlich der theoretischen Ausgangspunkte als auch hinsichtlich der verwendeten Untersuchungstechniken sehr unterschiedlich sind, lassen sich dennoch Gemeinsamkeiten in den verwendeten Kriterien ausmachen. Thorndyke und Hayes-Roth fanden in ihrem Experiment Unterstützung für die These, daß Routenlerner räumliche Relationen durch „mentale Arithmetik“, das heißt durch Integration räumlicher Informationen entlang der Route schätzen. Dieses Ergebnis trennte Routen- von Kartenlernern. In den Experimenten von Sholl verletzten Routenlerner das Prinzip der gleichen Verfügbarkeit, das heißt, nicht alle räumlichen Relationen waren gleich gut verfügbar.

Beide Kriterien stehen im Einklang mit der in dieser Arbeit verwendeten Unterscheidung zwischen Routen- und Überblicksrepräsentationen. Werden räumliche Relationen durch mentale Arithmetik geschätzt, so sind sie eine abgeleitete Repräsentation derjenigen Relationen, die in die mentale Berechnung eingehen. Gleichzeitig sind die abgeleiteten Repräsentationen weniger verfügbar als die primitiven Relationen.

Ein interessantes Ergebnis der Studie von Thorndyke und Hayes-Roth ist, daß die Routenlerner nach ausgiebiger Lernerfahrung den Kartenlernern glichen. Abgesehen von dieser Studie gibt es jedoch bisher keine experimentellen Studien, die zeigen konnten, daß sich beim Erlernen von Routen Überblicksrepräsentationen im Sinne der obigen Definition entwickeln können. Im folgenden Kapitel werden Experimente vorgestellt, die diese Fragestellung mit Hilfe von Reaktionszeiten für Distanzurteile prüfen.

9 Reaktionszeitexperimente zur Trennung von Routen- und Überblicksrepräsentationen

Mit Hilfe von Reaktionszeiten für Distanzurteile soll ermittelt werden, ob beim Erlernen von Routen eine Überblicksrepräsentation entstehen kann. Wie im vorigen Kapitel dargelegt, kann durch die Fähigkeit, räumliche Relationen zwischen nicht benachbarten Objekten auf einer Route angeben zu können, zwar Überblickswissen diagnostiziert werden, es bleibt jedoch offen, in welcher Weise dieses Wissen repräsentiert ist. Mit Hilfe einer Routenrepräsentation können beispielsweise euklidische Distanzen zwischen nicht benachbarten Objekten ermittelt werden, wenn sowohl die Distanz als auch die Richtung zwischen benachbarten Objekten enkodiert ist und Personen in der Lage sind, diese Informationen durch informelle Arithmetik im Sinne von Thorndyke und Hayes-Roth (1982) miteinander zu integrieren, um räumliche Beziehungen zwischen nicht benachbarten Objekten zu inferieren. In diesem Fall ist die räumliche Relation zwischen zwei nicht benachbarten Objekten ein abgeleiteter Parameter aus räumlichen Relationen benachbarter Objekte. In einer Überblicksrepräsentation wäre dies nicht der Fall, deshalb können hier räumliche Relationen nicht benachbarter Objekte ohne Zugriff auf die räumlichen Relationen benachbarter Objekte angegeben werden.

In diesem Kapitel werden zwei Experimente vorgestellt, die mittels Reaktionszeiten für Schätzungen der euklidischen Distanz nicht benachbarter Objekte zwischen diesen beiden Alternativen trennen sollen. Werden die euklidischen Distanzen durch Integration räumlicher Informationen entlang der Route geschätzt, die die beiden Objekte miteinander verbindet, so sollte der Zeitbedarf für die Schätzung eine Funktion der Komplexität der Route sein. Je komplexer die verbindende Route ist, desto mehr Informationen müssen miteinander verrechnet werden. Unter der Annahme, daß räumliche Relationen entlang der Route durch einen seriellen Prozeß miteinander verrechnet werden, sollte die Reaktionszeit eine monoton steigende Funktion der Anzahl dieser Informationen sein. Bei einer Überblicksrepräsentation würde man keinen derartigen Zusammenhang erwarten. Erwartungen in Bezug auf die Reaktionszeit sind in diesem Fall davon abhängig, wie die euklidischen Distanzen repräsentiert sind. Im Falle einer expliziten Repräsentation der euklidischen Distanzen sollte die Reaktionszeit für alle Paare von Objekten gleich sein. Für den Fall, daß die Objekte in einer mentalen Karte repräsentiert sind und euklidische Distanzen durch einen *Mental-Scanning*-Prozeß ermittelt werden, sollte die Reaktionszeit mit zunehmender euklidischer Distanz ansteigen.

Diese Vorhersagen wurden geprüft, indem die Versuchspersonen zunächst Routen an einem Bildschirm erlernten. In einer späteren Testphase sollen euklidische Distanzen zwischen einzelnen Objekten auf der Route geschätzt werden. Für diese Schätzungen wurde die

Reaktionszeit erhoben. Variiert wurde die Komplexität des Pfades, der die Routen miteinander verbindet, und die euklidische Distanz zwischen den Objekten.

9.1 Experiment IV

In Experiment IV lernten die Versuchspersonen eine Route mit Hilfe einer Darbietungstechnik, die ähnlich zu der in den Experimenten I und II war. In der Testphase schätzten die Versuchspersonen euklidische Distanzen zwischen einzelnen Objekten ein. Zusätzlich zu den Distanzen sollten die Versuchspersonen Richtungen einschätzen. Für die Richtungsurteile wurden ebenfalls Reaktionszeiten erhoben. Im Falle einer Routenrepräsentation ergeben sich für die Reaktionszeiten bei Richtungsschätzungen dieselben Vorhersagen wie bei Distanzschätzungen: Die Reaktionszeit sollte mit zunehmender Komplexität der verbindenden Route ansteigen, da mit zunehmender Komplexität der Route mehr Informationen integriert werden müssen, um die Richtung einschätzen zu können. Im Falle einer Überblicksrepräsentation könnte die Antwort ebenfalls durch einen *Mental-Scanning*-Prozeß ermittelt werden. Eine mögliche Form dieses Prozesses wäre beispielsweise, daß eine immer größere Umgebung des Ankerreizes solange durchsucht wird, bis der Prozeß auf den Zielreiz stößt. In diesem Fall sollte die Reaktionszeit für Richtungsurteile ebenfalls mit zunehmender Distanz der beiden Objekte ansteigen. Durch Reaktionszeiten für Richtungsurteile könnten also die Ergebnisse der Distanzschätzungen bestätigt werden. Die Schätzung von Richtungen hat zudem gegenüber der Distanzschätzung den Vorteil, daß hier vergleichsweise einfach ein nonverbales Antwortformat gewählt werden kann, für das nicht zu befürchten ist, daß der Prozeß der Abgabe einer Antwort bei unterschiedlichen euklidischen Distanzen unterschiedlich lange dauert.

9.1.1 Methode

9.1.1.1 Versuchspersonen

Insgesamt 46 Versuchspersonen (26 männlich und 20 weiblich) nahmen an dem Experiment teil. Die meisten der Versuchsteilnehmer waren Studierende der Psychologie an der Universität Trier. Das Alter der Versuchspersonen variierte zwischen 20 und 47 Jahren und hatte einen Mittelwert von 23 Jahren. Die Teilnahme am Experiment wurde mit Versuchspersonenstunden abgegolten.

9.1.1.2 Material

Die Lernkonfiguration bestand aus 14 Objekten, die durch eine geschlossene Route miteinander verbunden waren. Jedes Objekt war auf einem Richtungswechsel in der Route plaziert. Die Darbietung wurde wie in den Experimenten I und II durch Verschieben des sichtbaren

Ausschnitts der Anordnung hinter einem Fenster realisiert. Das Experiment wurde auf einem Macintosh PowerPC 7100 mit einem Apple 14 Zoll Farbmonitor durchgeführt.

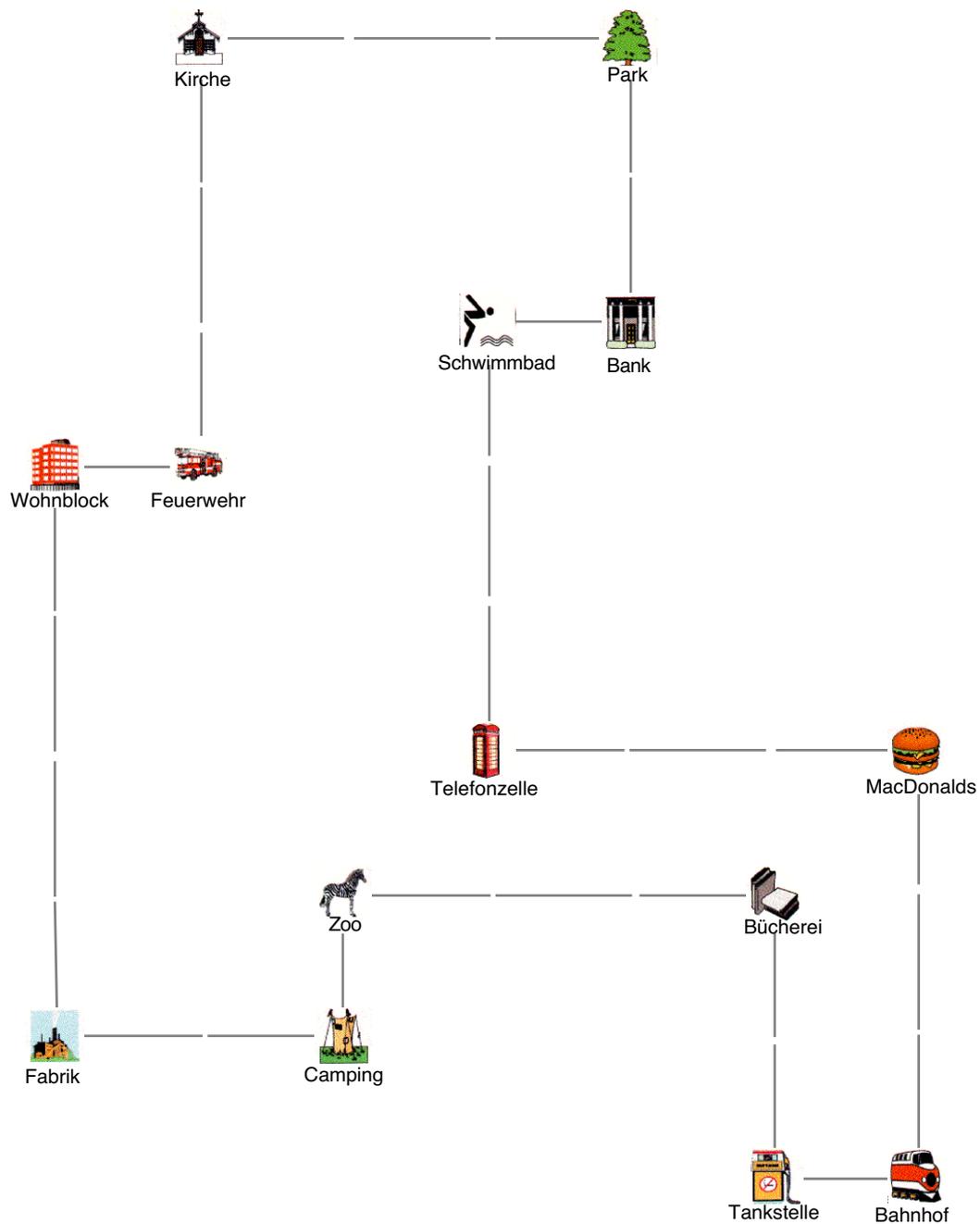


Abbildung 9.1: Lernkonfiguration in Experiment IV.

9.1.1.3 Versuchsplan

Die Versuchspersonen hatten die Aufgabe, sowohl Richtungen als auch Distanzen zu schätzen. Damit ergaben sich vier abhängige Variablen: Distanzurteile, Reaktionszeiten für Distanzurteile, Richtungsurteile und Reaktionszeiten für Richtungsurteile. Die unabhängigen

Variablen in diesem Experiment waren die Pfadkomplexität und die euklidische Distanz. Beide Faktoren wurden in zwei Schritten variiert. Die kürzere euklidische Distanz betrug 6.4 cm, die längere 12.8 cm. Da a priori nicht klar ist, welcher Aspekt eines Pfades seine Komplexität bestimmt, wurde die Karte so konstruiert, daß in den kritischen Items zusammen mit der Pfadlänge auch die Anzahl der Objekte und die Anzahl der Richtungsänderungen in der Route variiert wurde. Die kurze Route war 27 cm lang, ging durch 2 Objekte und hatte 3 Richtungsänderungen. Für die lange Route wurden alle drei Maße verdoppelt. Die euklidische Distanz und die Pfadlänge wurden unabhängig voneinander innerhalb der Versuchspersonen variiert. Da die Karte so einfach wie möglich gehalten werden sollte, gab es nur jeweils einen kritischen Pfad für jede Kombination aus Pfadlänge und euklidischer Distanz.

In der in Abbildung 9.1 dargestellten Anordnung waren die kritischen Objektpaare mit kleiner euklidischer Distanz „Bücherei“ und „McDonalds“ für kurze Pfade bzw. „Zoo“ und „Telefonzelle“ für lange Pfade. Die kritischen Objektpaare mit großer euklidischer Distanz waren „Schwimmbad“ und „Kirche“ für kurze Pfade bzw. „Telefonzelle“ und „Feuerwehr“ für lange Pfade.

Damit konnten für eine varianzanalytische Auswertung jedoch nur vier Werte pro Versuchsperson (das heißt ein Wert pro Faktorstufenkombination) verwendet werden. Da dadurch jedoch möglicherweise die Datenbasis zu instabil ist, um mögliche Effekte entdecken zu können, wurden zusätzliche Distanz- und Richtungsschätzungen erhoben. In diesen zusätzlichen Schätzungen waren euklidische Distanz und Pfadlänge nicht unabhängig voneinander variiert und konnten daher nicht varianzanalytisch ausgewertet werden. Stattdessen wurden sie regressionsanalytisch ausgewertet. Insgesamt sollten Distanzen und Richtungen für 27 Objektpaare eingeschätzt werden. Drei davon waren Übungitems und 24 Items waren für die regressionsanalytische Auswertung bestimmt. Von diesen Items gingen vier in die varianzanalytische Auswertung ein.

Um sicherzustellen, daß die einzuschätzenden Richtungen unabhängig von den Pfadlängen sind, wurde die Orientierung der Karte zwischen den Versuchspersonen in 90-Grad Schritten variiert. Die Objekte wurden für jede Versuchsperson zufällig den Orten zugeordnet. Die Reihenfolge der Fragen wurde ebenfalls für jede Versuchsperson sowohl in der Richtungsschätzung als auch in der Distanzschätzung zufällig bestimmt.

9.1.1.4 Versuchsablauf

Das Experiment bestand aus fünf Phasen: Navigationsphase, Lernkontrolle, Distanzschätzung, Richtungsschätzung und Kartenzeichnen.

Navigationsphase. Zu Beginn der Navigationsphase wurden die Versuchspersonen instruiert, die Lernkonfiguration zu explorieren, um später in der Lage zu sein, Luftliniendistanzen

zwischen den einzelnen Objekten einzuschätzen. Mit Hilfe der Pfeiltasten auf der Tastatur konnten sie sich entlang der Route in der Lernkonfiguration frei bewegen. Es war den Versuchspersonen überlassen, wie lange sie die Anordnung explorieren wollten. Es wurde nur darauf hingewiesen, daß man etwa 30 Minuten für die Explorationsphase veranschlagen könne.

Lernkontrolle. Die Lernkontrolle war identisch zu Experiment II mit dem einzigen Unterschied, daß nicht Pfadlängen, sondern euklidische Distanzen geschätzt werden sollten.

Distanzschätzung. Die Distanzschätzaufgabe war ebenfalls identisch zu Experiment II, wiederum mit dem Unterschied, daß euklidische Distanzen eingeschätzt werden sollten. Die Einheit der Schätzung war wiederum die Länge eines Striches in den gestrichelten Linien, die die Pfade symbolisierten.

Richtungsschätzung. In diesem Teil des Experimentes sollten die Versuchspersonen jeweils die Richtung eines Zielobjektes bezüglich eines Ankerobjektes einschätzen. In jedem Durchgang wurde in einem Dialogfenster zunächst das Ankerobjekt präsentiert. Die Versuchspersonen waren instruiert, die „Return“-Taste zu drücken, sobald sie die Position des Ankerobjektes in der Lernvorlage vor Augen hatten. Nach dem Drücken der „Return“-Taste verschwand das Dialogfenster mit dem Ankerobjekt und ein zweiter Dialog mit dem Zielobjekt und einer Richtungsskala erschien.

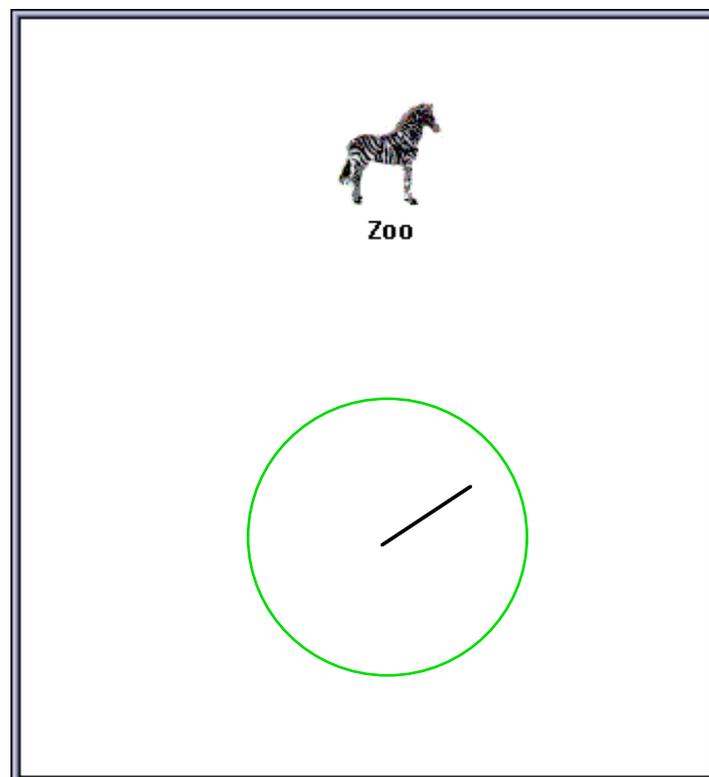


Abbildung 9.2: Dialogfenster zur Richtungsschätzung in Experiment IV.

Die Richtungsskala bestand aus einem Kreis und einer Linie, die von der Mitte des Kreises ausging. Das Ende der Linie folgte den Bewegungen der Maus. Die Versuchspersonen waren instruiert, das Ende der Linie über die Kreislinie in die Richtung zu bewegen, in der das Zielobjekt relativ zum Ankerobjekt lag und die Maustaste zu drücken, sobald die eingestellte Richtung mit der erinnerten Richtung übereinstimmte. Eine ähnliche Technik wurde von Shelton und McNamara (1997) benutzt, um Richtungsschätzungen nach vorgestellten Rotationen der Versuchspersonen von dem Blickwinkel in der Lernphase zu erfassen. Die Reaktionszeit wurde vom Beginn der Präsentation des zweiten Dialogfensters bis zum Drücken der Maustaste gemessen.

Kartenzeichnen. Wie in den bisher geschilderten Experimenten wurden die Versuchspersonen am Ende des Experimentes gebeten, eine Karte der Wege und Orte zu zeichnen.

9.1.2 Ergebnisse

Distanzschätzungen. Für die regressionsanalytische Auswertung der Distanzschätzungen wurden die Schätzungen für alle 24 experimentellen Objektpaare einzeln über alle Versuchspersonen gemittelt. Die mittleren Distanzschätzungen korrelierten mit den euklidischen Distanzen in der Lernkonfiguration zu $r = .88$, $p < .01$. Die mittleren Distanzschätzungen korrelierten ebenfalls signifikant mit der Anzahl der Objekte auf dem Pfad, der Anker und Zielreiz miteinander verband, $r = .44$, $p = .03$, und der Länge dieses Pfades, $r = .56$, $p < .01$.

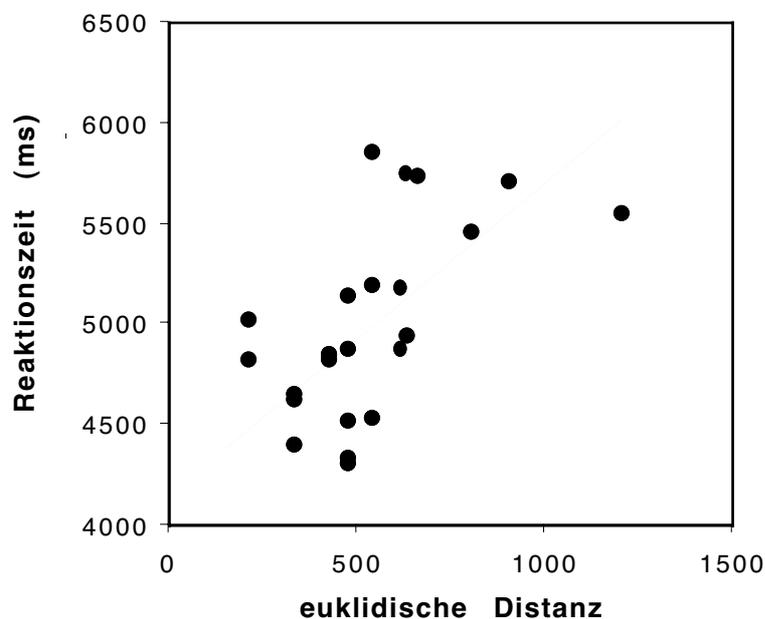


Abbildung 9.3: Mittlere Reaktionszeiten für alle eingeschätzten Distanzen in Abhängigkeit von der euklidischen Interobjektdistanz in Experiment IV ($r = .66$).

Reaktionszeiten. In der Analyse der Reaktionszeiten wurden die Übungsdurchgänge am Beginn der Distanzschätzphase und der Richtungsschätzphase ausgeschlossen. Reaktionszeiten über 30000 ms wurden ebenfalls eliminiert. Von den verbleibenden Reaktionszeiten wurden diejenigen eliminiert, die mehr als drei Standardabweichungen von dem für das abgefragte Objektpaar spezifischen Mittelwert entfernt waren. Insgesamt wurden damit 96 (8.3%) Reaktionszeiten für Distanzurteile und 79 (6.9%) Reaktionszeiten für Richtungsurteile eliminiert.

Für die Reaktionszeiten auf Distanzurteile ergab eine Varianzanalyse mit den Faktoren „Pfadlänge“ und „euklidische Distanz“ weder Haupteffekte noch eine signifikante Interaktion (alle $F < 1$).

Für die regressionsanalytische Auswertung wurden die Reaktionszeiten für alle 24 Objektpaare über die Versuchspersonen gemittelt, wobei nicht danach differenziert wurde, welches Objekt als Anker und welches als Zielobjekt diente. Die mittleren Reaktionszeiten korrelierten signifikant mit der euklidischen Distanz, $r = .66$, $p < .01$ (siehe Abbildung 9.3), mit der Anzahl der Objekte auf dem Pfad, der Anker und Zielreiz miteinander verband, $r = .40$, $p = .05$, und der Länge dieses Pfades, $r = .51$, $p = .01$.

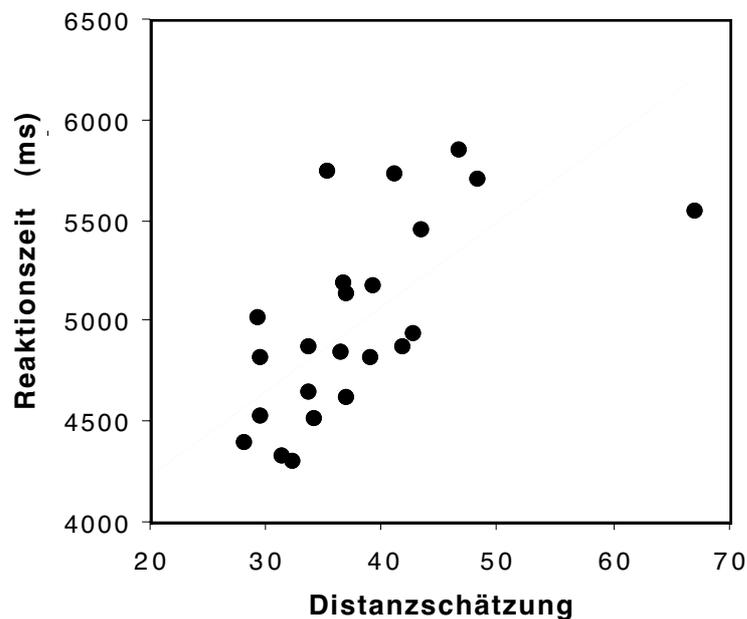


Abbildung 9.4: Mittlere Reaktionszeiten für alle eingeschätzten Distanzen in Abhängigkeit von der geschätzten Interobjektdistanz in Experiment IV ($r = .72$).

Der stärkste lineare Zusammenhang ergab sich mit den mittleren Distanzurteilen, $r = .72$, $p < .01$ (siehe Abbildung 9.4). Um zu prüfen, ob dieser Zusammenhang noch bestehen bleibt, wenn die Daten von den Einflüssen der Objektanzahl und der Pfadlänge bereinigt werden, wurden zusätzlich die Einflüsse dieser Variablen auspartialisiert. Die Partialkorrelation

zwischen mittleren Distanzurteilen und mittleren Reaktionszeiten unter Auspartialisierung von Pfadlänge und Objektanzahl betrug $r = .54, p = .01$. Um zu prüfen, ob der Zusammenhang zwischen Reaktionszeit und Objektanzahl noch erhalten bleibt, wenn der Effekt der euklidischen Distanz kontrolliert wird, wurde eine Partialkorrelation zwischen Reaktionszeit und Objektanzahl unter Auspartialisierung der euklidischen Distanz berechnet. Die Korrelation ergab $r = .37, p = .09$. Für die Pfadlänge als Prädiktor ergab sich bei Auspartialisierung der euklidischen Distanz eine Korrelation von $r = .40, p = .06$.

Für die Reaktionszeiten auf Richtungsurteile wurde ebenfalls eine Varianzanalyse mit den Faktoren „Pfadlänge“ und „euklidische Distanz“ berechnet. Der Haupteffekt der euklidischen Distanz, $F(1,39)=1.68, R_p^2=.04, p=.20$, und die Interaktion, $F(1,39)=0.59, R_p^2=.02$, erreichten nicht das Signifikanzniveau während der Haupteffekt der Pfadlänge das Signifikanzniveau nur knapp verfehlte, $F(1,39)=3.59, R_p^2=.08, p=.07$. Reaktionszeiten für kurze Pfade ($M=4568.7$) waren länger als Reaktionszeiten für lange Pfade ($M=3919.2$).

Die regressionsanalytische Auswertung der Reaktionszeiten für Richtungsurteile geschah analog zur Auswertung der Distanzurteile. Als Prädiktoren wurden die euklidische Distanz in der Lernvorlage, die geschätzte Distanz, die Anzahl der Objekte auf dem Pfad und die Länge des Pfades verwendet. Der stärkste lineare Zusammenhang ergab sich zwischen Reaktionszeiten und geschätzten Pfadlängen, $r = -.20$. Keiner der Prädiktoren erreichte das Signifikanzniveau (alle $p > .34$).

9.1.3 Diskussion

Die substantielle Korrelation zwischen Distanzurteilen und tatsächlichen Distanzen weist darauf hin, daß die Versuchspersonen in der Lage waren, euklidische Distanzen zwischen Objekten zu schätzen, die sie weder gleichzeitig noch direkt nacheinander gesehen hatten. Die subjektiven Distanzschätzungen korrelieren zwar auch mit der Pfadlänge und der Objektanzahl, aber diese Korrelationen sind deutlich niedriger. Die Ergebnisse weisen also darauf hin, daß die Versuchspersonen Überblickswissen entwickelt haben. Dies ist bemerkenswert, da in der Lernphase des Experimentes eine sehr strikte Variante des Routenlernens realisiert wurde. Die Versuchspersonen sahen die Lernkonfiguration niemals als Ganzes und der sichtbare Ausschnitt der Route war so klein, daß nicht einmal zwei benachbarte Objekte gleichzeitig sichtbar waren. Trotzdem ist es den Versuchspersonen offenbar gelungen, die vorhandenen Informationen so zu integrieren, daß Überblickswissen entstehen konnte.

Die Schätzungen selbst geben jedoch keinen Aufschluß darüber, ob dieses Überblickswissen aus einer Überblicksrepräsentation (im oben definierten Sinne) resultiert oder nicht. Diese Frage sollte mit Hilfe der Reaktionszeiten beantwortet werden. Werden Distanzen durch Integration von einzelnen Routensegmenten geschätzt, so sollte die Reaktionszeit mit

zunehmender Komplexität der Route zunehmen. Werden Distanzen dagegen durch mentales Absuchen einer bildhaften Repräsentation geschätzt, so sollte die Reaktionszeit eine Funktion der euklidischen Distanz sein. Die Ergebnisse der Varianzanalyse für Reaktionszeiten bei Distanzurteilen stützen jedoch keines der beiden Modelle, da sich hier weder ein Haupteffekt der Objektanzahl noch ein Haupteffekt der euklidischen Distanz zeigt. Die Varianzanalyse fußt jedoch auf nur einem Urteil pro Versuchsperson und Faktorkombination, so daß der Verdacht nahe liegt, daß die Datenbasis zu instabil ist, um etwaige Effekte entdecken zu können. Die Teststärke der varianzanalytischen Auswertung ist für die Haupteffekte und Interaktionen gleich, da es sich um ein 2×2 -faktorielles Design handelt, und beträgt für mittlere Effekte .92 bei einem α -Niveau von .05. Legt man aufgrund der instabilen Datenbasis schwache Effekte zugrunde, so reduziert sich die Teststärke auf .23.

Gestützt wird diese Erklärung durch den Umstand, daß in den Korrelationsanalysen sowohl ein Effekt der euklidischen Distanz als auch Effekte der Pfadkomplexität, gemessen durch die Objektanzahl und die Pfadlänge, nachweisbar sind. Der beste Prädiktor für die Reaktionszeit war die geschätzte Distanz, gefolgt von der tatsächlichen euklidischen Distanz. Dieses Ergebnis legt nahe, daß die Versuchspersonen in der Tat eine Überblicksrepräsentation entwickelt haben. Der Zusammenhang zwischen Distanzschätzungen und Reaktionszeiten kann nicht auf die Pfadkomplexität als vermittelnde Variable zurückgeführt werden, da die Partialkorrelation unter Auspartialisierung der Objektanzahl und Pfadlänge ebenfalls signifikant ist. Die Komplexität des Pfades hat jedoch ebenfalls einen, wenn auch geringeren, Effekt auf die Reaktionszeit. Dieser Effekt bleibt jedoch nur tendenziell bestehen, wenn der Effekt der euklidischen Distanz auspartialisiert wird. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt ist, daß einige Versuchspersonen nicht in der Lage waren, eine Überblicksrepräsentation zu entwickeln und daher die euklidischen Distanzen durch Kombination von Routensegmenten geschätzt haben.

Die Reaktionszeiten für Richtungsurteile folgen nicht der Systematik der Reaktionszeiten für Distanzurteile. Weder die euklidische Distanz, noch die Komplexität des Pfades scheint einen Einfluß auf die Reaktionszeiten zu haben. Zwar deutet sich in der varianzanalytischen Auswertung ein negativer Effekt der Objektanzahl an, dieser Effekt wird jedoch nicht durch die regressionsanalytische Auswertung bestätigt. Diese Dissoziation der Reaktionszeiten für Distanz- versus Richtungsurteile kann mehrere Ursachen haben.

Ein möglicher Grund für das Ausbleiben von Effekten ist das Antwortformat in der Richtungsschätzaufgabe. Während Distanzen verbal geschätzt wurden und Reaktionszeiten durch Drücken einer Taste erhoben wurde, mußten die Versuchspersonen die Richtungen zwischen Objekten mit Hilfe der Maus angeben. Es ist denkbar, daß diese Eingabemethode zu viel Varianz erzeugt, da sie motorisch schwieriger ist.

Eine mögliche Erklärung für das Ausbleiben eines Anstiegs der Reaktionszeiten mit zunehmender euklidischer Distanz ist, daß es einen gegenläufigen Effekt gibt, der einen möglichen Anstieg der Reaktionszeiten zunichte macht. Verschiedene Modelle der Repräsentation von Orten gehen davon aus, daß die enkodierten Positionen der Objekte mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind (Giraud & Pailhous, 1994; Huttenlocher et al., 1991). Huttenlocher et al. postulieren, daß Objektpositionen in zwei verschiedenen Graden von Detailliertheit repräsentiert sind. Zum einen wird die Zugehörigkeit eines Objektes zu einer (räumlich definierten) Kategorie enkodiert, zum anderen wird sie in einem hochauflösenden Koordinatensystem repräsentiert. Die kategoriale Enkodierung läßt offen, an welcher Stelle des durch die Kategorie definierten Raumes sich ein Objekt befindet. Die enkodierte Position in dem hochauflösenden Koordinatensystem ist eine Verteilung um den wahren Wert. Allerdings ist hier nicht klar, ob die Streuung der Objektpositionen durch eine intrasubjektive, probabilistische Enkodierung zustande kommt, oder ob sie ein intersubjektives Phänomen ist, das entsteht, weil verschiedene Personen unterschiedliche Objektpositionen enkodieren. Nach dem Modell von Giraud und Pailhous, sind Objektpositionen generell in Unsicherheitsregionen enkodiert. Folgt man den Annahmen dieser Modelle und geht man davon aus, daß Distanz- und Richtungsurteile abgeleitete Parameter aus einer Positionsrepräsentation sind, so ergeben sich auch für diese abgeleiteten Parameter Unsicherheitsintervalle. Für Distanzen ist die Größe dieses Intervalls unabhängig von der Distanz, sofern sich die Unsicherheitsregionen der Objekte nicht überlappen.

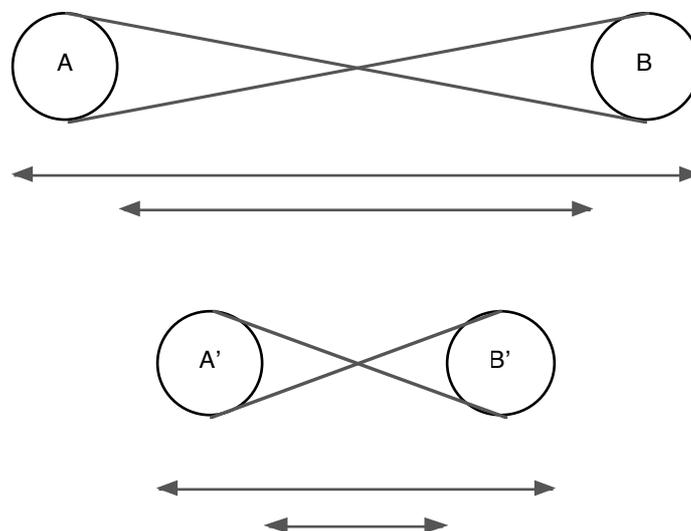


Abbildung 9.5: Veranschaulichung des Zusammenhangs zwischen Unsicherheitsregionen, Unsicherheitsintervallen für Distanzen und Unsicherheitsintervallen für Richtungen.

Abbildung 9.5 stellt die Beziehung zwischen Unsicherheitsregionen für Objektpositionen und Unsicherheitsintervallen in den abgeleiteten Parametern dar. Die Unsicherheitsregionen für zwei Objekte A und B sind als Kreise dargestellt. Das Maximum der Interobjektdistanz entspricht dem oberen Doppelpfeil, das Minimum dem unteren. Für zwei andere Objekte A'

und B' mit Unsicherheitsregionen von identischem Radius, deren Distanz zueinander geringer ist, ändert sich die Differenz zwischen minimaler und maximaler Distanz nicht. Sofern sich die Unsicherheitsregionen nicht überlappen, ist die Größe des Unsicherheitsintervalles immer die Summe der Radien der Unsicherheitsregionen für die enkodierten Objektpositionen.

Die Unsicherheitsintervalle für Richtungsdaten ergeben sich in diesem Schema jeweils durch den Winkel der sich überkreuzenden Linien. Dieser Winkel nimmt mit zunehmender Distanz zwischen den Objekten ab. Die mit zunehmender Distanz kleiner werdenden Unsicherheitsintervalle für Winkel könnten die Reaktionszeit für Winkelschätzungen beeinflusst haben. Wenn Versuchspersonen aus dem Gedächtnis angeben müssen, ob eine Stadt in einer bestimmten Richtung zu einer anderen liegt, steigt die Reaktionszeit mit abnehmender Entfernung der Städte an (Maki, 1981; Maki, Maki & Marsh, 1977; Wilton, 1979), was von Wilton auf die zunehmende Präzision zurückgeführt wird, mit der die Lage der Städte zueinander spezifiziert werden muß.

“A hypothesis now confirmed in a number of experiments is that subjects engaged in spatial problem solving progressively gain access to more precise information, until that which is assessed is sufficient to solve the problem” (Wilton & Pidcock, 1982, S. 525).

Wenn nun die Reaktionszeit für Distanz- und Richtungsurteile mit zunehmender Unsicherheit ansteigt, so bedeutet dies, daß die Reaktionszeiten für Richtungsurteile mit abnehmender Distanz aufgrund der Unsicherheitsintervalle positiv beeinflusst werden, was einer möglichen Zunahme der Reaktionszeit aufgrund längeren Zeitbedarfs für das mentale Absuchen der Positionsrepräsentation entgegenwirkt. Reaktionszeiten für Distanzurteile werden demgegenüber nicht von einer Veränderung der Unsicherheitsintervalle beeinflusst. Dieser Zusammenhang würde somit die Dissoziation der Reaktionszeiten für Distanz- versus Richtungsurteile erklären.

Denkbar ist auch, daß Distanz- und Richtungsurteile auf unterschiedlichen Repräsentationen fußen. Diese These wird beispielsweise von Gordon, Jupp und Byrne (1989) vertreten. Gestützt wird diese These von der Beobachtung, daß die Genauigkeit von Distanz- versus Richtungsschätzungen bei Blinden gegenüber Sehenden dissoziiert ist (Byrne & Salter, 1983). Während Distanzen von Blinden etwa gleich gut geschätzt werden können wie von Sehenden, ist die Fähigkeit, Richtungen einzuschätzen, stark vermindert.

Es lassen sich also verschiedene Erklärungen für das Fehlen systematischer Effekte auf die Reaktionszeiten für Richtungsurteile finden. Diese Erklärungen sind jedoch post hoc und spekulativ. Die Reaktionszeiten für Distanzurteile entsprechen dagegen weitgehend den Erwartungen, die sich aus der Hypothese ergeben, daß die Versuchspersonen eine Überblicksrepräsentation der räumlichen Anordnung entwickelt haben.

Die Ergebnisse lassen jedoch keinen Hinweis darauf zu, ob räumliche Repräsentationen immer die Form von Überblicksrepräsentationen haben. Auf der einen Seite ist es denkbar, daß mentale Karten die generische Repräsentationsform für räumliche Informationen sind. Auf der anderen Seite könnte es sein, daß Überblicksrepräsentationen ähnlich dem Modell von Siegel und White (1975) auf Repräsentationen aufbauen, in denen nur Routeninformation direkt enkodiert ist. Diese These ist konsistent mit den Ergebnissen von Thorndyke und Hayes-Roth (1982), die Fehlermaße in räumlichen Urteilen untersuchten. Die Autoren fanden, daß Büroangestellte, die erst kurz in einem Bürogebäude arbeiteten, eher Routenrepräsentationen aufgebaut hatten, während die räumlichen Urteile von Büroangestellten, die bereits eine längere Zeit dort arbeiteten, in ihren Urteilen von einer Kontrollgruppe, die eine Karte des Bürogebäudes gelernt hatte, nicht zu unterscheiden waren. Möglicherweise entstehen Überblicksrepräsentationen also erst bei ausreichender Lernerfahrung.

Die Absicht, mit der eine räumliche Anordnung gelernt wird, könnte ebenfalls die resultierende Repräsentation beeinflussen. So zeigt sich beispielsweise in Reaktionszeiten beim räumlichen Wiedererkennens-Priming, daß der Zweck, mit dem eine räumliche Anordnung gelernt wird, bestimmt, ob die Assoziationen zwischen den Orten eher zeitlich oder eher räumlich organisiert sind (Curiel & Radvansky, 1998). Möglicherweise findet sich also in diesem Experiment nur deshalb Evidenz für Überblicksrepräsentationen, da die Versuchspersonen bereits vor Beginn der Lernphase wußten, daß sie zu einem späteren Zeitpunkt euklidische Distanzen schätzen sollten. Diese Hypothese wurde in Experiment V überprüft.

9.2 Experiment V

Die primäre Fragestellung in Experiment V war, ob sich Überblickswissen beim Erlernen von Routen spontan entwickelt. Es ist durchaus vorstellbar, daß die Repräsentationsform räumlichen Wissens davon abhängt, wozu man dieses Wissen benötigt. Lernt man eine Konfiguration mit dem Ziel, aus dem Gedächtnis Luftliniendistanzen schätzen zu können, so ist eine reine Routenrepräsentation eine Datenstruktur, die das Ermitteln dieser Distanzen zwar nicht ausschließt, aber doch kompliziert macht, da unter Umständen viele einzelne Informationen miteinander verrechnet werden müssen, um zu einem Urteil zu kommen. Daher scheint es schon aus Gründen der Ökonomie sinnvoll zu sein, eine Überblicksrepräsentation zu entwickeln. Lernt man dagegen eine räumliche Konfiguration mit einem anderen Ziel, so muß eine Überblicksrepräsentation nicht mehr unbedingt das ökonomisch sinnvollste Format sein.

Taylor, Naylor und Chechile (1999) zeigten, daß sich räumliches Wissen nicht nur in Abhängigkeit davon unterscheidet, ob Routen oder Karten gelernt wurden, sondern auch vom Ziel des Lernens abhängt. Die Versuchspersonen lernten ein Stockwerk eines Universitätsgebäudes entweder mit Hilfe einer Karte oder durch Routenlernen kennen. Eine Gruppe hatte

das Ziel, die räumliche Anordnung der Büros zu lernen, die andere Gruppe sollte die kürzesten Routen zwischen verschiedenen Ortspunkten ermitteln. In einer Testphase sollten die Versuchspersonen verschiedene räumliche Aufgaben bearbeiten, in denen entweder Routen- oder Überblickswissen getestet wurde. Versuchspersonen mit dem Ziel, Routen zu lernen, waren in einigen Tests für Routenwissen besser als Versuchspersonen, die das Ziel hatten, die Konfiguration zu erlernen. Umgekehrt waren die Versuchspersonen mit dem Ziel, die Konfiguration zu erlernen, in einigen Tests für Überblickswissen besser als Versuchspersonen mit dem Ziel, die Routen zu erlernen. Diese Studie zeigt somit, daß das Ziel des Lernens einen Einfluß auf die relative Genauigkeit von Routen- versus Überblickswissen hat. Für die im letzten Kapitel definierte Unterscheidung zwischen Routen- und Überblicksrepräsentationen, liefert diese Studie jedoch allenfalls Hinweise, da sie zwar zwischen Routen- und Überblickswissen trennt, jedoch keine Repräsentationsannahmen testet. Es ist denkbar, daß Personen beim Erlernen von Routen keine Überblicksrepräsentationen entwickeln, wenn für das Ziel des Lernens kein Überblickswissen benötigt wird.

In Experiment V wurde diese These dadurch untersucht, daß die Versuchspersonen die euklidischen Distanzen nicht wie in Experiment IV intentional lernten, sondern inzidentell. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde der Versuchsplan und das Versuchsmaterial gegenüber Experiment IV weitgehend gleich gehalten. Die beiden Experimente unterschieden sich hauptsächlich bezüglich der Instruktion, unter der die Versuchspersonen die räumliche Anordnung lernten.

In Experiment V erhielten die Versuchspersonen in der Lernphase keinen Hinweis darauf, daß sie später aus dem Gedächtnis euklidische Distanzen schätzen sollten. Um trotzdem sicherzustellen, daß die Versuchspersonen räumlich lernen, wurde in die Konfiguration aus Experiment IV, ähnlich wie in Experiment II, an jedem Objekt ein zusätzlicher Weg eingefügt, der keine Verbindungen zu den anderen Objekten in der Anordnung hatte. Die Versuchspersonen waren instruiert, die Anordnung so lange zu durchfahren, bis sie sie so weit gelernt hatten, daß sie nicht mehr in die Sackgassen führen.

Da die Richtungsschätzungen in Experiment IV nicht zu interpretierbaren Ergebnissen führten, wurde in Experiment V auf sie verzichtet. Stattdessen wurde die Distanzschätzphase erweitert. Es ist vorstellbar, daß die Schätzung euklidischer Distanzen die Repräsentation dieser Distanzen verändert. Geht man davon aus, daß das Ziel mit dem eine räumliche Anordnung gelernt wird, bestimmt, wie diese Anordnung repräsentiert ist, so ist es plausibel anzunehmen, daß durch die Aufgabe, euklidische Distanzen zu schätzen, die Repräsentation einer Anordnung, die mit einem anderen Ziel gelernt wurde, im nachhinein verändert wird. Einmal geschätzte euklidische Distanzen könnten beispielsweise in die Raumrepräsentation integriert werden. Um dies zu testen, wurden alle Distanzen zweimal abgefragt. Verändert

sich die Repräsentation durch das Schätzen von Distanzen, so sollte sich das Ergebnismuster bei der zweiten Abfrage gegenüber der ersten Abfrage ändern.

9.2.1 Methode

9.2.1.1 Versuchspersonen

An Experiment V nahmen 70 Versuchspersonen teil. Die Stichprobe setzte sich aus 52 Frauen und 18 Männern zusammen. Das Alter variierte zwischen 19 und 34 Jahren und hatte einen Durchschnitt von 22 Jahren. Die Teilnahme am Experiment wurde mit Versuchspersonenstunden abgegolten.

9.2.1.2 Material

Die zu lernende räumliche Anordnung war identisch zu der Anordnung in Experiment IV, mit dem Unterschied, daß an jedem Objekt eine Sackgasse eingefügt war. Die Sackgassen waren so plaziert, daß beim Durchfahren der Anordnung im Uhrzeigersinn an jedem Objekt eine Richtungsänderung nötig war, unabhängig davon, ob man die Sackgasse oder den korrekten Weg wählte. Beim Durchfahren der Anordnung in der entgegengesetzten Richtung ist dies jedoch nicht gewährleistet. Deshalb wurde das Versuchssteuerungsprogramm gegenüber Experiment IV so modifiziert, daß die Versuchspersonen die Anordnung nur im Uhrzeigersinn durchfahren konnten. Das Experiment wurde an einem Macintosh Quadra 700 Computer mit einem 14 Zoll Farbmonitor durchgeführt.

9.2.1.3 Versuchsplan

In der Distanzschätzphase wurden dieselben Distanzen wie in Experiment IV abgefragt. Alle experimentellen Distanzen wurden jedoch zweimal abgefragt, wobei in der zweiten Abfrage Anker und Zielreiz miteinander vertauscht waren. Damit mußte jede Versuchsperson 51 Distanzen schätzen, die sich aus drei Übungsfragen und 2×24 experimentellen Fragen zusammensetzten. Die Reihenfolge der Fragen war für alle Versuchspersonen getrennt so randomisiert, daß alle Distanzen bereits einmal abgefragt waren, bevor eine Distanz ein zweites Mal abgefragt wurde. In beiden Blöcken war die Hälfte der Fragen entlang der Fahrtrichtung gestellt, das heißt, der Anker lag in der Fahrtrichtung vor dem Zielreiz. Die andere Hälfte war entgegen der Fahrtrichtung. Ob eine Frage im ersten Block entlang der Fahrtrichtung gestellt wurde oder nicht, wurde ebenfalls für jede Versuchsperson zufällig bestimmt. Der zweifaktorielle Versuchsplan in Experiment IV (mit den Faktoren „euklidische Distanz“ und „Pfadkomplexität“) wurde damit um die beiden Faktoren „Fragerichtung“ (vorwärts versus rückwärts) und „Block“ (erster versus zweiter Block) erweitert.

9.2.1.4 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf stimmte weitgehend mit dem in Experiment IV überein. Auf eine Richtungsschätzung wurde jedoch verzichtet.

Navigationsphase und Lernkontrolle. Zu Beginn der Navigationsphase wurden die Versuchspersonen instruiert, die räumliche Anordnung so lange zu durchfahren, bis sie in der Lage sind, alle Sackgassen zu vermeiden, das heißt, an jeder Verzweigung den richtigen Weg einzuschlagen. Die Lernkontrolle war in die Navigationsphase integriert: Wenn die Versuchspersonen zehn fehlerlose Runden durch die Anordnung gefahren waren, war die Lernphase beendet.

Distanzschätzung. Der Ablauf der Distanzschätzaufgabe war identisch zu Experiment II. Alle Distanzen wurden in einem Block abgefragt.

Kartenzeichnen. Wie in den bisherigen Experimenten wurden die Versuchspersonen am Ende des Experimentes gebeten, eine Karte der Wege und Orte zu zeichnen.

9.2.2 Ergebnisse

Distanzschätzungen. Für die regressionsanalytische Auswertung der Distanzschätzungen wurden die Schätzungen für alle Objektpaare über die Versuchspersonen gemittelt. Distanzschätzungen in Fahrtrichtung korrelierten mit den Distanzschätzungen entgegen der Fahrtrichtung zu $r = .70$, $p < .01$ in der ersten Hälfte der Distanzschätzungen und zu $r = .78$, $p < .01$ in der zweiten Hälfte.

Tabelle 9.1

Korrelationen zwischen euklidischer Distanz, Pfadlänge und Objektanzahl in der Lernvorlage und geschätzten Distanzen.

Distanzschätzung	euklidische Distanz	Pfadlänge	Objektanzahl
erste Phase	.44	.54	.53
zweite Phase	.62	.55	.47
beide Phasen	.48	.59	.54

Legende. Die Korrelationen sind zuerst getrennt für die beiden Hälften der Distanzschätzungen dargestellt. In der letzten Zeile befinden sich die Korrelationen für Distanzschätzungen, die über die beiden Phasen gemittelt wurden.

In Tabelle 9.1 ist der Zusammenhang der geschätzten Distanz mit den Prädiktoren „euklidische Distanz“, „Pfadlänge“ und „Objektanzahl“ dargestellt. Die entsprechenden Partialkorrelationen finden sich in Tabelle 9.2. Alle Korrelationen sind auf dem 5%-Niveau signifikant. In der ersten Hälfte der Distanzschätzungen sind die Pfadlänge und die Objektanzahl auf dem Pfad, der die Objekte miteinander verbindet, bessere Prädiktoren für die geschätzte Distanz als die euklidische Distanz. In der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen fällt der Einfluß der

Objektanzahl ab, während sich der Einfluß der euklidischen Distanz erhöht, so daß nun die euklidische Distanz die meiste Varianz in den Distanzschätzungen aufklärt.

Tabelle 9.2

Partialkorrelationen zwischen Distanzschätzungen und euklidischer Distanz (unter Auspartialisierung der Pfadlänge und Objektanzahl), Pfadlänge und Objektanzahl (jeweils unter Auspartialisierung der euklidischen Distanz).

Distanzschätzung	euklidische Distanz	Pfadlänge	Objektanzahl
erste Phase	.44	.52	.54
zweite Phase	.62	.56	.52
beide Phasen	.59	.60	.59

Legende. Die Korrelationen sind zuerst getrennt für die beiden Hälften der Distanzschätzungen dargestellt. In der letzten Zeile befinden sich die Korrelationen für Distanzschätzungen, die über die beiden Phasen gemittelt wurden.

Reaktionszeiten. Die Reaktionszeiten wurden mit demselben Verfahren wie in den anderen Experimenten von Ausreißern bereinigt. Zunächst wurden alle Reaktionszeiten über 30000 ms eliminiert.

Tabelle 9.3

Korrelationen zwischen euklidischer Distanz, Pfadlänge und Objektanzahl in der Lernvorlage, Distanzschätzungen und den Reaktionszeiten für Distanzschätzungen.

Reaktionszeit	Distanzschätzung	euklidische Distanz	Pfadlänge	Objektanzahl
<i>Abfrage in</i>				
<i>Fahrtrichtung:</i>				
erste Phase	.22	.08	.10	.00
zweite Phase	-.09	-.54 ($p < .01$)	-.10	-.04
beide Phasen	.11	-.27	.03	-.01
<i>Abfrage entgegen</i>				
<i>der Fahrtrichtung:</i>				
erste Phase	.00	-.22	.14	.10
zweite Phase	.62 ($p < .01$)	.62 ($p < .01$)	.19	.16
beide Phasen	.31	.30	.25	.20

Legende. Signifikanzniveaus sind nur für diejenigen Korrelationen angegeben, die auf dem 5%-Niveau signifikant sind.

Anschließend wurden diejenigen Reaktionszeiten eliminiert, die mehr als drei Standardabweichungen von ihrem bedingungsspezifischen Mittelwert entfernt lagen. Die Standardabweichung wurde wie bisher aus der Gesamtheit der spezifischen Mittelwertsabweichungen berechnet. Insgesamt wurden 71 (2.17 %) Reaktionszeiten von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Korrelation der Reaktionszeiten zwischen der Abfrage in Fahrtrichtung und

der Abfrage entgegen der Fahrtrichtung betrug $-.05, p = .81$. in der ersten Hälfte der Items und $.12, p = .58$ in der zweiten Hälfte. Dies erfordert eine getrennte Betrachtung der Ergebnisse für die beiden Fragerichtungen. Für Reaktionszeiten, bei denen der Ankerreiz in Fahrtrichtung vor dem Zielreiz lag (Abfrage in Fahrtrichtung), gibt es nur mit einem Prädiktor eine signifikante Korrelation (siehe Tabelle 9.3): In der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen korreliert die Reaktionszeit negativ mit der euklidischen Distanz in der Lernvorlage, $r = -.54, p < .01$. Der negative Zusammenhang bleibt auch bei Auspartialisierung der Objektanzahl und der Routenlänge bestehen, $r = -.51, p < .01$. Dieser Effekt zeigt sich jedoch nicht bei Verwendung der Distanzschätzung anstelle der euklidischen Distanz als Prädiktor für die Reaktionszeit. Hier gibt es weder in der einfachen Korrelation, $r = -.09, p = .67$, noch bei Auspartialisierung der Objektanzahl und der Routenlänge, $r = .00$, einen signifikanten negativer Zusammenhang.

Obwohl sich in der Vorhersage der Reaktionszeiten ein deutlicher Unterschied zwischen der euklidischen Distanz und der geschätzten Distanz ergibt, läßt sich zwischen den beiden Variablen ein positiver Zusammenhang feststellen. Die einfache Korrelation zwischen euklidischer Distanz und geschätzter Distanz beträgt in der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen in Fahrtrichtung $r = .53, p < .01$. Unter Auspartialisierung der Objektanzahl und der Pfadlänge bleibt dieser Zusammenhang bestehen, $r = .51, p < .02$.

In der ersten Hälfte der Distanzschätzungen ist der Zusammenhang zwischen euklidischer Distanz und Reaktionszeit leicht positiv, aber nicht signifikant. Lag der Ankerreiz in Fahrtrichtung vor dem Zielreiz (Abfrage entgegen der Fahrtrichtung), so ergeben sich signifikante Effekte ebenfalls nur in der zweiten Hälfte der Abfragen. Hier ergibt sich ein etwa gleich starker, positiver Zusammenhang mit der euklidischen Distanz und der geschätzten Distanz, $r = .62, p < .01$. Darüber hinaus ergeben sich keine signifikanten Korrelationen.

Der Zusammenhang zwischen euklidischer Distanz und geschätzter Distanz beträgt in der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen entgegen der Fahrtrichtung $r = .62, p < .01$. Die Partialkorrelation beträgt $r = .72, p < .01$.

9.2.3 Diskussion

In den Distanzschätzungen zeigt sich, daß die Versuchspersonen in der Lage waren, Überblickswissen zu erwerben. Die geschätzten Distanzen korrelieren signifikant mit den euklidischen Distanzen und dieser Zusammenhang bleibt auch bestehen, wenn der Effekt der Objektanzahl und der Pfadlänge auspartialisiert wird. Sowohl in den einfachen Korrelationen als auch in den Partialkorrelationen zeigt sich, daß der Einfluß der euklidischen Distanz in der zweiten Hälfte der Schätzungen größer wird. Die Schätzungen werden also genauer, obwohl die Versuchspersonen keine erneute Gelegenheit hatten, die Anordnung zu lernen. Ein möglicher Grund für die größere Genauigkeit ist, daß die Versuchspersonen im Laufe der

Schätzungen bessere Strategien entwickeln, um die euklidischen Distanzen zu schätzen. Darüber hinaus könnte die erhöhte Genauigkeit darauf hindeuten, daß durch die Schätzaufgabe selbst die repräsentierten Distanzen so korrigiert werden, daß sie eine konsistente Überblicksrepräsentation ergeben. Durch das Eliminieren von Inkonsistenzen (wie beispielsweise Verletzungen der Dreiecksungleichung) könnte eine Repräsentation entstehen, die der Lernvorlage ähnlicher ist.

In den Reaktionszeiten zeigt sich für die erste Hälfte der Schätzungen kein signifikanter Zusammenhang mit der euklidischen Distanz oder der Pfadkomplexität. Erst in der zweiten Hälfte der Schätzungen zeigt sich ein Einfluß der euklidischen Distanz, allerdings hängt dieser Einfluß davon ab, ob die Distanzen in Fahrtrichtung abgefragt wurden. Lag der Ausgangspunkt der Schätzung in Fahrtrichtung vor dem Zielreiz, so gibt es einen inversen Zusammenhang zwischen der euklidischen Distanz und der Reaktionszeit. Eine Verringerung der Reaktionszeit mit zunehmender euklidischer Distanz läßt sich weder aus der Annahme einer Routenrepräsentation noch aus der Annahme einer Überblicksrepräsentation ableiten. Erstaunlicherweise zeigt sich diese inverse Beziehung jedoch nicht in der Korrelation zwischen Reaktionszeiten und Distanzurteilen, obwohl die geschätzten Distanzen signifikant mit den euklidischen Distanzen in der Vorlage korrelieren. Die Reaktionszeit wird demnach von demjenigen Varianzanteil der euklidischen Distanzen beeinflusst, der nicht die Distanzschätzungen beeinflusst.

Bei Schätzungen entgegen der Fahrtrichtung zeigt sich in der zweiten Hälfte der Urteile ein positiver Zusammenhang zwischen der euklidischen Distanz und der Reaktionszeit. Parallel dazu gibt es einen ähnlichen Zusammenhang zwischen subjektiven Distanzen und Reaktionszeiten. Das Ergebnismuster in der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen bei Schätzungen in Fahrtrichtung entspricht also den Erwartungen, die sich aus der Annahme einer Überblicksrepräsentation ergeben. Daß sich der positive Zusammenhang der Reaktionszeiten mit der Distanz nur in der zweiten Hälfte der Distanzschätzungen ergibt, stützt die These, daß die Aufgabe, euklidische Distanzen zu schätzen, die Bildung einer Überblicksrepräsentation erzwingt. Konsistent mit dieser Annahme ist auch der Umstand, daß die Korrelation der Distanzurteile mit der euklidischen Distanz in der Lernvorlage von der ersten zur zweiten Hälfte der Distanzschätzungen ansteigt. Allerdings findet sich in den Reaktionszeiten keine Evidenz dafür, daß in der ersten Hälfte der Schätzungen die Distanzen aus einer Routenrepräsentation geschätzt wurden. Weder die Pfadlänge, noch die Objektanzahl korreliert signifikant mit der Reaktionszeit. Insgesamt decken sich die Ergebnisse also nur teilweise mit der Annahme, daß sich durch das Schätzen euklidischer Distanzen nach dem Erlernen von Routen eine Überblicksrepräsentation entwickelt.

9.3 Diskussion der Experimente IV und V

Die Experimente IV und V waren dazu angelegt, herauszufinden, ob sich beim Erlernen von Routen Überblicksrepräsentationen entwickeln können. In Experiment IV zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang der Reaktionszeiten für Distanzurteile mit der euklidischen Distanz und mit den Distanzurteilen selbst. Dieser Zusammenhang kann nicht auf Indikatoren der Pfadkomplexität zurückgeführt werden. Dieses Ergebnis spricht gegen die Auffassung, daß euklidische Distanzen durch informelle Arithmetik aus einer Routenrepräsentation ermittelt wurden. Dagegen ist es vereinbar mit der Hypothese, daß die Distanzschätzungen durch *Mental-Scanning* auf einer mentalen Karte ausgeführt wurden, die Eigenschaften eines Koordinatensystems besitzt. Dieses Ergebnis ist also konsistent mit der Annahme einer Überblicksrepräsentation. Die Reaktionszeiten für Richtungsurteile ergaben weder Evidenz für eine Routenrepräsentation noch für eine Überblicksrepräsentation. Es gibt eine Vielzahl möglicher Gründe, warum Richtungsurteile anderen Gesetzmäßigkeiten als Distanzurteile folgen könnten. Die vorliegenden Ergebnisse geben jedoch keine Hinweise darauf, was die tatsächliche Ursache ist.

Experiment V sollte in erster Linie Auskunft darüber geben, ob sich Überblickswissen spontan entwickelt. In den Reaktionszeiten zeigte sich keine Evidenz für eine Routenrepräsentation, allerdings fanden sich auch nur spärliche Hinweise auf eine Überblicksrepräsentation. In vielen Aspekten sind die Ergebnisse mit keinem der beiden Modelle vereinbar. Die Frage, ob sich Überblickswissen spontan beim Erlernen Routen entwickelt, muß also weiterhin offen bleiben.

Beide Experimente verwendeten eine Form von Routenlernen, die sich deutlich von der Weise unterscheidet, wie wir Routen im Alltag erlernen. Damit stellt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse spezifisch für die verwendete Darbietungstechnik sind. Diese Frage läßt sich nur durch den Einsatz anderer Techniken für die Lernphase beantworten. Da die Experimente zwar für eine varianzanalytische Auswertung konzipiert waren, aber letztendlich nur die regressionsanalytische Auswertung zu verwertbaren Ergebnissen führte, sind die versuchsplanerischen Anforderungen, die an eine Lernkonfiguration gestellt werden, nicht sehr hoch. Damit kommen reale Umgebungen als Lernkonfigurationen in Betracht. Es wäre sicherlich wünschenswert, Experiment IV in einer realen Umgebung zu replizieren, um zu sehen, ob sich auch beim Abgehen von realen Routen Überblicksrepräsentationen entwickeln können.

10 Zusammenfassung und Resumee

Ausgangspunkt dieser Arbeit war die Fragestellung, wie Distanzen in räumlichen Anordnungen im Gedächtnis repräsentiert sind. Um diese Fragestellung bearbeiten zu können, sollte zunächst geklärt werden, wann man von einer mentalen Repräsentation sprechen kann und wann nicht. Dazu wurde eine Reihe von Ansätzen vorgestellt, in denen versucht wird, eine konsistente Definition mentaler Repräsentationen zu finden. Alle Versuche, eine naturalistische Definition für den Begriff der mentalen Repräsentation zu finden, stoßen jedoch auf Probleme. Die in der kognitiven Psychologie weitgehend akzeptierte Definition mentaler Repräsentationen über Isomorphismen ist zwar in vieler Hinsicht sehr vielversprechend, aber auch bei dieser Definition tauchen Probleme auf, die sich bisher einer Lösung widersetzen haben. Bei der Untersuchung mentaler Repräsentationen ist man demnach leider gezwungen, mit einem Repräsentationsbegriff zu arbeiten, der in mancher Hinsicht inkonsistent ist.

Da die Frage nach der Repräsentation von Distanzen ein Spezialfall der allgemeineren Frage nach der Repräsentation räumlicher Informationen ist, wurden Repräsentationstheorien räumlicher Informationen vorgestellt, die speziellen Bezug auf die Frage der Distanzrepräsentation nehmen. Die Repräsentationsannahmen lassen sich unter anderem den Dichotomien „bildhaft versus propositional“, „kategorial versus koordinatenbasiert“ und „egozentrisch versus allozentrisch“ zuordnen. Für die vorliegende Arbeit von besonderem Interesse sind die Unterscheidungen „implizit versus explizit“ und „abgeleitet versus primitiv“.

In der empirischen Untersuchung von Distanzrepräsentation lassen sich zwei Typen von Fragestellungen unterscheiden, die sich auch unter methodischen Gesichtspunkten differenzieren lassen. Meßtheoretische Fragestellungen beziehen sich auf das Verhältnis mental repräsentierter Distanzen untereinander. Insbesondere ist von Interesse, welchen Restriktionen mental repräsentierte Distanzen unterliegen, und ob man diese Restriktionen mit Hilfe eines axiomatischen Systems beschreiben kann. Für räumliche Urteile gilt, daß sie in vielfältiger Weise die Axiome der euklidischen Geometrie und sogar die sehr viel schwächeren Axiome einer Metrik verletzen. Das muß jedoch nicht notwendigerweise bedeuten, daß mentale Raumrepräsentationen nichteuklidisch oder sogar nichtmetrisch sind, da es sich bei den Verletzungen der Axiome um Wiedergabephänomene handeln könnte.

Die zweite Fragestellung bezieht sich auf das Verhältnis zwischen Distanzen in der Welt und ihrer mentalen Repräsentation. Die psychophysische Funktion, die physikalische Distanzen zu subjektiven Distanzen in Beziehung setzt, kann als Potenzfunktion beschrieben werden. Subjektive Distanzen sind jedoch auch von anderen Faktoren abhängig. Distanzen werden umso länger eingeschätzt, je mehr Merkmale sich auf dem einzuschätzenden Pfad befinden

und je stärker der Pfad segmentiert ist. Die Erklärungsmodelle für diese Effekte unterscheiden sich hinsichtlich des postulierten Repräsentationsformates für Distanzen.

Diese Repräsentationsannahmen wurden im Rahmen dieser Arbeit durch Reaktionszeitexperimente untersucht. Ein Überblick über Reaktionszeitstudien zur Untersuchung des räumlichen Gedächtnisses ergab, daß insbesondere Reaktionszeiten für Distanzurteile bisher kaum untersucht wurden. In der vorliegenden Arbeit wurden sie eingesetzt, um zwischen Modellen expliziter und impliziter Kodierung von Distanzen zu trennen. In einer ersten Serie von Experimenten wurden Repräsentationen von Pfadlängen nach dem Erlernen von Routen untersucht. Die Reaktionszeiten waren davon abhängig, wie lang der einzuschätzende Pfad war und wie viele Objekte sich auf ihm befanden. Die Ergebnisse sind am besten mit Thorndykes analogem Zeitmesser-Modell verträglich, nach dem Distanzen durch *Mental-Scanning* geschätzt werden.

Während im ersten Teil der Experimente die Repräsentation von Distanzen entlang einer Route und damit Routenwissen untersucht wurde, befaßt sich der zweite Teil mit der Repräsentation euklidischer Distanzen, das heißt mit Überblickswissen. In diesen Experimenten wurde die Hypothese getestet, daß sich beim Erlernen von Routen eine Repräsentationsform entwickeln kann, die unabhängig von der durch das Erlernen von Routen implizierten sequentiellen Struktur ist. Eine Bestandsaufnahme der empirischen Arbeiten zu diesem Thema ergab, daß die gängigen Kriterien zur Unterscheidung zwischen Routen- und Überblickswissen keine Aussagen über Repräsentationsformate zulassen. Nur wenige Experimente lassen Rückschlüsse auf Unterschiede in der Repräsentationsform zu. Die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Experimente verwenden Reaktionszeiten für Schätzungen euklidischer Distanzen, um zwischen Routen- und Überblicksrepräsentationen zu trennen. Wurden Routen mit dem Ziel gelernt, zu einem späteren Zeitpunkt euklidische Distanzen zu schätzen, so ergab sich ein positiver Zusammenhang der Reaktionszeit mit der euklidischen Distanz. Dieses Ergebnis stützt die These, daß beim Routenlernen Überblicksrepräsentationen entstehen können. Wurden die euklidischen Distanzen jedoch inzidentell gelernt, so ergab sich ein weniger konsistentes Bild. Es ergaben sich nur wenige Hinweise auf eine Überblicksrepräsentation, aber es wurden auch keine Hinweise auf eine Routenrepräsentation gefunden.

Betrachtet man die Ergebnisse aller Experimente im Überblick, so wird deutlich, daß die Hinweise auf eine imaginale Repräsentation von Distanzen überwiegen. Die Ergebnisse der Experimente I bis III sind weitgehend konsistent mit der These, daß Pfadlängen durch *Mental-Scanning* geschätzt werden. In den Experimenten IV und V ergeben sich Hinweise darauf, daß euklidische Distanzen durch einen ähnlichen Prozeß ermittelt werden. Mit dem in Kapitel 5 diskutierten Summationsmodell oder dem Modell reinen Abrufs können die Effekte nicht ohne Zusatzannahmen erklärt werden. Dieses Ergebnis gibt auch Hinweise in Bezug auf

die in Kapitel 4 diskutierte Frage, ob es sich bei den Verletzungen metrischer Axiome um Gedächtnis- oder Wiedergabephänomene handelt. Wären Distanzen asymmetrisch repräsentiert, würde das eine explizite Kodierung nahelegen. Keines der durchgeführten Experimente stützt jedoch die Vorstellung, daß alle Distanzen explizit kodiert sind und nur abgerufen werden müssen. Zumindest die Asymmetrien in Distanzurteilen scheinen daher eher Phänomene der Wiedergabeverzerrung zu sein.

Neben der Untersuchung der inhaltlichen Fragen sollten die durchgeführten Experimente dazu dienen, zu beurteilen, ob Reaktionszeiten für Distanzschätzungen ein geeignetes Maß zur Erfassung räumlicher Repräsentationen sind. Die Ergebnisse der Experimente zeigten, daß Reaktionszeiten für Distanzurteile durchaus sensibel für die räumliche Beziehung sind, in der die Objekte zueinander stehen, deren Distanz geschätzt werden soll. In allen fünf Experimenten fanden sich Unterschiede in den Reaktionszeiten für verschiedene Bedingungen, die auch statistisch abgesichert werden konnten. Die Grundvoraussetzung für den Einsatz von Reaktionszeiten für Distanzurteile als abhängige Variable ist damit erfüllt. Die Ergebnisse der Experimente haben jedoch auch gezeigt, daß sich unter zumindest scheinbar sehr ähnlichen Bedingungen zum Teil sehr unterschiedliche Resultate ergeben können.

Dies kann zum einen bedeuten, daß die Repräsentation von Distanzen von Faktoren abhängig ist, die im Lichte der geprüften Theorien irrelevant erscheinen. Zum anderen kann es jedoch auch bedeuten, daß Reaktionszeiten sensibel auf Aspekte der jeweiligen Raumrepräsentation reagieren, die nichts mit dem Format der Repräsentation zu tun haben. Ein Beispiel für solch einen Aspekt ist die unterschiedliche Salienz von Teilen des repräsentierten Raumes. Es ist sehr plausibel, daß die Repräsentation einer räumlichen Anordnung nicht völlig homogen in Bezug auf die Spurstärke der Enkodierung, die Genauigkeit der Enkodierung oder die Aktivität im Gedächtnis ist. Falls dies der Fall ist, wäre es nicht verwunderlich, wenn Reaktionszeiten für Distanzurteile sensibel auf solche Inhomogenitäten reagierten. Wenn eine Distanz zwischen Objekten abgefragt wird, auf die schnell zugegriffen werden kann, weil die Objekte über einen hohen Aktivierungsgrad im Gedächtnis verfügen und die räumliche Relation zwischen den Objekten relativ genau enkodiert ist, so resultiert daraus fast zwangsläufig, daß die Reaktionszeit kürzer ist als bei Objekten, für die das nicht der Fall ist.

Die Sensibilität der Reaktionszeiten für solche Einflußgrößen wäre weniger problematisch, wenn es gelänge, diese Einflußgrößen durch Techniken der experimentellen Kontrolle, wie Konstanthaltung, Randomisierung, oder Balancierung zu kontrollieren. Leider wirft dies Probleme auf, die zum einen mit der praktischen Beschränkung der Komplexität einer Stimulusanordnung, zum anderen mit den Restriktionen zu tun hat, die die Geometrie aufwirft. Könnte man eine Anordnung groß und komplex genug machen, daß für jede Kombination experimentell interessierender unabhängiger Variablen eine Vielzahl kritischer

Objektpaare zur Verfügung steht, so wäre eher damit zu rechnen, daß sich Unterschiede zwischen verschiedenen Bedingungen in anderen Variablen ausgleichen. Die Erlernbarkeit einer Anordnung für Versuchspersonen setzt jedoch enge Grenzen für die Komplexität einer Stimulusanordnung. Insbesondere wenn die Versuchspersonen Überblickswissen durch Routenlernen erwerben sollen, müssen die Anordnungen extrem einfach gehalten werden. Doch selbst wenn man die Komplexität der Anordnungen stark erhöhen könnte, wird es dennoch nicht möglich sein, andere räumliche Einflußfaktoren vollständig zu kontrollieren. Beispielsweise ist es nicht möglich, Pfade einer bestimmten Länge und mit einer bestimmten Anzahl von Objekten darauf beliebig in einer Anordnung zu plazieren, wenn die gesamte Anordnung einen geschlossenen Pfad ergeben soll und sie in einem euklidischen Raum darstellbar sein soll.

Reaktionszeiten für Distanzurteile sind damit zwar ein sensibles Maß für räumliche Relationen, aber es ist zu vermuten, daß sie ebenfalls sensibel auf Eigenschaften des Materials reagieren, die für den jeweiligen Gegenstand der Untersuchung nicht von Bedeutung und auch schwer zu kontrollieren sind. Deshalb kann es durchaus lohnend sein, Reaktionszeiten für Distanzurteile zum Test von Repräsentationshypothesen einzusetzen, aber es ist nötig, eine Vielzahl möglicher Störvariablen sehr genau zu kontrollieren, und die Ergebnisse sollten möglichst mit einer anderen Methode zusätzlich abgesichert werden.

In Bezug auf die inhaltlichen Ziele dieser Arbeit bleiben einige Fragen offen. Dies betrifft zum einen die Generalisierbarkeit der Ergebnisse. Wünschenswert wäre eine Vielzahl experimenteller Untersuchungen mit unterschiedlichen räumlichen Anordnungen, unterschiedlichen Modi des Erlernens und unterschiedlichen Prüfprozeduren. Zum anderen bleiben auch Fragen hinsichtlich der Interpretation der Ergebnisse offen. Die hier geschilderten Experimente unterscheiden sich in einer Vielzahl von Variablen, so daß es schwierig ist, die genaue Ursache für Unterschiede in den Ergebnissen auszumachen. Darüber hinaus sind die Resultate zumindest teilweise mit verschiedenen theoretischen Konzeptionen vereinbar. Zum Teil sind diese Probleme auf den Gegenstandsbereich zurückzuführen. Repräsentationsannahmen sind generell schwierig zu testen. Ein gutes Beispiel für die Probleme im Zusammenhang mit Repräsentationsannahmen liefert der als „Imagery Debatte“ bekannte Streit zwischen Vertretern analoger und propositionaler Repräsentationsannahmen. Zum einen müssen Annahmen über mentale Repräsentation sehr präzise und konkret formuliert werden, zum anderen sind sie erst in der Kombination mit einer Prozeßannahme überhaupt der empirischen Testung zugänglich. In der Regel lassen sich für experimentelle Befunde, die sich mit den Vorhersagen aus einer bestimmten Repräsentationsannahme decken, alternative Repräsentationsannahmen finden, die sich ebenfalls mit den Befunden decken. Das gilt auch für die Experimente, die im Rahmen dieser Arbeit berichtet wurden.

Aber diese Einschränkung gilt nicht nur für den Bereich der Repräsentationstheorien. Es wäre eine Illusion zu glauben, daß in anderen Bereichen der psychologischen Forschung oder der Wissenschaft allgemein bestimmte empirische Ergebnisse nur mit einer einzigen Theorie erklärt werden können. Die im Rahmen dieser Arbeit berichteten Experimente schließen gewisse Klassen von Hypothesen aus. Sie sind nicht nur mit einer einzigen Erklärung vereinbar, ihr Beitrag zum Verständnis räumlicher Repräsentationen besteht vielmehr darin, daß sie den Raum möglicher Erklärungen einengen. Es bleibt zu hoffen, daß künftige Forschung auf diesem Gebiet weiter dazu beiträgt, immer mehr Alternativhypothesen zu falsifizieren und somit immer mehr Restriktionen für Theorien mentaler Raumrepräsentation zu schaffen.

Literatur

- Acredolo, L. P. & Boulter, L. T. (1984). Effects of hierarchical organization on children's judgments of distance and direction. *Journal of Experimental Child Psychology*, 37, 409-425.
- Allen, G. L. (1981). A developmental perspective on the effects of "subdividing" macrospatial experience. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7, 120-132.
- Allen, G. L. (1982). The organization of route knowledge. *New Directions for Child Development*, 15, 31-39.
- Allen, G. L. (1988). The acquisition of spatial knowledge under conditions of temporospatial discontinuity. *Psychological Research*, 50, 183-190.
- Allen, G. L. & Kirasic, K. C. (1985). Effects of the cognitive organization of route knowledge on judgments of macrospatial distance. *Memory and Cognition*, 13, 218-227.
- Allen, G. L., Siegel, A. W. & Rosinski, R. R. (1978). The role of perceptual context in structuring spatial knowledge. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 4, 617-630.
- Allen, J. F. (1983). Maintaining knowledge about temporal intervals. *Communications of the ACM*, 26, 832-843.
- Anderson, J. R. (1978). Arguments concerning representations for mental imagery. *Psychological Review*, 85, 249-277.
- Baddeley, A. (1990). *Human memory: Theory and practice*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Baird, J. C., Merrill, A. A. & Tannenbaum, J. (1979). Cognitive representation of spatial relations: II. A familiar environment. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 92-98.
- Baird, J. C., Wagner, M. & Noma, E. (1982). Impossible cognitive spaces. *Geographic Analysis*, 14, 204-216.
- Baum, D. R. & Jonides, J. (1979). Cognitive maps: Analysis of comparative judgments of distance. *Memory and Cognition*, 7, 462-468.
- Bennett, A. T. D. (1996). Do animals have cognitive maps? *Journal of Experimental Biology*, 199, 219-224.

- Berendt, B. (1999). *Representation and processing of knowledge about distances in environmental spaces*. St. Augustin: infix-Verlag.
- Berendt, B. & Jansen-Osmann, P. (1997). Feature accumulation and route structuring in distance estimations - an interdisciplinary approach. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 279-296). Berlin: Springer.
- Birnbaum, M. H., Anderson, C. J. & Hynan, L. G. (1989). Two operations for "ratios" and "differences" of distances on the mental map. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 785-796.
- Borg, I. & Leutner, D. (1985). Measuring the similarity of MDS configurations. *Multivariate Behavioral Research*, 20, 325-334.
- Borg, I. & Staufenbiel, T. (1984). Zur Beziehung von optimalem Stress-Wert und richtiger Minkowski-Metrik. *Zeitschrift für Experimentelle und Angewandte Psychologie*, 31, 376-390.
- Briggs, R. (1973). On the relationship between cognitive and objective distance. In W. F. E. Preiser (Ed.), *Environmental design research* (Vol. 2, pp. 186-192). Stroudsburg, PA: Dowden, Hutchinson & Ross.
- Buchner, A., Faul, F. & Erdfelder, E. (1996). *G•Power: A priori, post-hoc, and compromise power analyses for the Macintosh*. Trier, Germany: University of Trier.
- Byrne, R. W. (1979). Memory for urban geography. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 147-154.
- Byrne, R. W. & Salter, E. (1983). Distances and directions in the cognitive maps of the blind. *Canadian Journal of Psychology*, 37, 293-299.
- Cadwallader, M. (1979). Problems in cognitive distance: Implications for cognitive mapping. *Environment and Behavior*, 11, 559-576.
- Campbell, J. (1993). The role of physical objects in spatial thinking. In N. Eilan & R. A. McCarthy (Eds.), *Spatial representation: Problems in philosophy and psychology* (pp. 65-95). Oxford: Blackwell Publishers.
- Cassirer, E. (1944/1990). *Versuch über den Menschen*. Frankfurt: Fischer.
- Chown, E., Kaplan, S. & Kortenkamp, D. (1995). Prototypes, location, and associative networks (PLAN): Towards a unified theory of cognitive mapping. *Cognitive Science*, 19, 1-51.

- Clayton, K. & Habibi, A. (1991). Contribution of temporal contiguity to the spatial priming effect. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 17, 263-271.
- Cohen, J. (1977). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Cohen, R., Baldwin, L. M. & Sherman, R. C. (1978). Cognitive maps of a naturalistic setting. *Child Development*, 49, 1216-1218.
- Cohen, R. & Schuepfer, T. (1980). The representation of landmarks and routes. *Child Development*, 51, 1065-1071.
- Cohen, R. & Weatherford, D. L. (1981). The effect of barriers on spatial representations. *Child Development*, 52, 1087-1090.
- Couclelis, H., Golledge, R. G., Gale, N. & Tobler, W. (1987). Exploring the anchor-point hypothesis of spatial cognition. *Journal of Environmental Psychology*, 7, 99-122.
- Cummins, R. (1996). *Representations, targets, and attitudes*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Curiel, J. M. & Radvansky, G. A. (1998). Mental organization of maps. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 202-214.
- Denis, M. & Zimmer, H. D. (1992). Analog properties of cognitive maps constructed from verbal descriptions. *Psychological Research*, 54, 286-298.
- Dretske, F. (1981). *Knowledge and the flow of information*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Dretske, F. (1988). *Explaining behavior: Reasons in a world of causes*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Drösler, J. (1966). Das beidäugige Raumsehen. In W. Metzger (Ed.), *Handbuch der Psychologie* (Vol. 1, pp. 590-615). Göttingen: Hogrefe.
- Erdfelder, E., Faul, F. & Buchner, A. (1996). G•Power: A general power analysis program. *Behavior Research Methods Instruments, & Computers*, 28, 1-11.
- Evans, G. W. & Pezdek, K. (1980). Cognitive mapping: Knowledge of real-world distance and location information. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6, 13-24.
- Fodor, J. A. (1987). *Psychosemantics: The problem of meaning in the philosophy of mind*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Fodor, J. A. (1991). Fodor's guide to mental representation: The intelligent auntie's vademecum. In D. G. John (Ed.), *The future of folk psychology: Intentionality and cognitive science*. (pp. 22-50). Cambridge: Cambridge University Press.
- Foley, J. E. & Cohen, A. J. (1984). Working mental representations of the environment. *Environment and Behavior*, 16, 713-729.
- Foley, J. M. (1980). Binocular distance perception. *Psychological Review*, 87, 411-434.
- Foos, P. W. (1982). Distance estimation and information load. *Perceptual and Motor Skills*, 54, 79-82.
- Gale, N., Golledge, R. G., Pellegrino, J. W. & Doherty, S. (1990). The acquisition and integration of route knowledge in an unfamiliar neighborhood. *Journal of Environmental Psychology*, 10, 3-25.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Giraud, M. D. & Pailhous, J. (1994). Distortions and fluctuations in topographic memory. *Memory and Cognition*, 22, 14-26.
- Golledge, R. G., Ruggles, A. J., Pellegrino, J. W. & Gale, N. D. (1993). Integrating route knowledge in an unfamiliar neighborhood: Along and across route experiments. *Journal of Environmental Psychology*, 13, 293-307.
- Gordon, A. D., Jupp, P. E. & Byrne, R. W. (1989). The construction and assessment of mental maps. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 42, 169-182.
- Hartley, A. A. (1977). Mental measurement in the magnitude estimation of length. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 3, 622-628.
- Heft, H. (1988). The vicissitudes of ecological phenomena in environment-behavior research: On the failure to replicate the "angularity" effect. *Environment and Behavior*, 20, 92-99.
- Herman, J. F., Miller, B. S. & Heins, J. A. (1987). Barriers and spatial representation: Evidence from children and adults in a large environment. *Merrill Palmer Quarterly*, 33, 53-68.
- Herman, J. F., Norton, L. M. & Klein, C. A. (1986). Children's distance estimates in a large-scale environment: A search for the route angularity effect. *Environment and Behavior*, 18, 533-558.
- Herman, J. F., Roth, S. F. & Norton, L. M. (1984). Time and distance in spatial cognition development. *International Journal of Behavioral Development*, 7, 35-51.

- Herrmann, T., Buhl, H. M. & Schweizer, K. (1995). Zur blickpunktbezogenen Wissensrepräsentation: Der Richtungseffekt. *Zeitschrift für Psychologie*, 203, 1-23.
- Hirtle, S. C. & Jonides, J. (1985). Evidence of hierarchies in cognitive maps. *Memory and Cognition*, 13, 208-217.
- Holding, C. S. (1992). Clusters of reference points in cognitive representations of the environment. *Journal of Environmental Psychology*, 12, 45-55.
- Holding, C. S. (1994). Further evidence for the hierarchical representation of spatial information. *Journal of Environmental Psychology*, 14, 137-147.
- Holding, C. S. & Holding, D. H. (1989). Acquisition of route network knowledge by males and females. *Journal of General Psychology*, 116, 29-41.
- Holyoak, K. J. & Mah, W. A. (1982). Cognitive reference points in judgments of symbolic magnitude. *Cognitive Psychology*, 14, 328-352.
- Hourihan, J. K. & Jones, L. E. (1979). Distance estimation and cognitive mapping: A multidimensional scaling analysis. *Irish Journal of Psychology*, 4, 79-94.
- Huttenlocher, J., Hedges, L. V. & Duncan, S. (1991). Categories and particulars: Prototype effects in estimating spatial location. *Psychological Review*, 98, 352-376.
- Johnson-Laird, P. N. & Byrne, R. M. J. (1991). *Deduction*. Hove: Lawrence Erlbaum Associates.
- Kant, I. (1781/1995). *Kritik der reinen Vernunft*. Stuttgart: Reclam.
- Kemp, S. (1988). Memorial psychophysics for visual area: The effect of retention interval. *Memory and Cognition*, 16, 431-436.
- Kerst, S. M. & Howard, J. H. (1978). Memory psychophysics for visual area and length. *Memory and Cognition*, 6, 327-335.
- Kirsh, D. (1990). When is information explicitly represented? In P. P. Hanson (Ed.), *Information, language, and cognition* (pp. 340-365). Cambridge, MA: MIT Press.
- Klatzky, R. L. (1998). Allocentric and egocentric spatial representations: Definitions, distinctions, and interconnections. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 1-17). Berlin: Springer.
- Knauf, M., Rauh, R., Schlieder, C. & Strube, G. (1998). Mental models in spatial reasoning. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary*

- approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 267-291). Berlin: Springer.
- Koenig, O., Reiss, L. P. & Kosslyn, S. M. (1990). The development of spatial relation representations: Evidence from studies of cerebral lateralization. *Journal of Experimental Child Psychology*, 50, 119-130.
- Kosslyn, S. M. (1994). *Image and brain: The resolution of the imagery debate*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Kosslyn, S. M. (1973). Scanning visual images: Some structural implications. *Perception and Psychophysics*, 14, 90-94.
- Kosslyn, S. M. (1976). Can imagery be distinguished from other forms of internal representation? Evidence from studies of information retrieval times. *Memory and Cognition*, 4, 291-297.
- Kosslyn, S. M. (1981). The medium and the message in mental imagery: A theory. *Psychological Review*, 88, 46-66.
- Kosslyn, S. M. (1988). Aspects of a cognitive neuroscience of mental imagery. *Science*, 240, 1621-1626.
- Kosslyn, S. M., Ball, T. M. & Reiser, B. J. (1978). Visual images preserve metric spatial information: Evidence from studies of image scanning. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 4, 47-60.
- Kosslyn, S. M., Holtzman, J. D., Farah, M. J. & Gazzaniga, M. S. (1985). A computational analysis of mental image generation: Evidence from functional dissociations in split-brain patients. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, 311-341.
- Kosslyn, S. M., Koenig, O., Barrett, A., Cave, C. B., Tang, J. & Gabrieli, J. D. E. (1989). Evidence for two types of spatial representations: Hemispheric specialization for categorical and coordinate relations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 723-735.
- Kosslyn, S. M., Pick, H. L. & Fariello, G. R. (1974). Cognitive maps in children and men. *Child Development*, 45, 707-716.
- Kosslyn, S. M., Pinker, S., Smith, G. E. & Shwartz, S. P. (1979). On the demystification of mental imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 2, 535-581.
- Kosslyn, S. M. & Pomerantz, J. R. (1977). Imagery, propositions, and the form of internal representations. *Cognitive Psychology*, 9, 52-76.

- Kuhn, T. S. (1976). *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*. Frankfurt: Suhrkamp.
- Kuipers, B. (1978). Modeling spatial knowledge. *Cognitive Science*, 2, 129-153.
- Laeng, B., Peters, M. & McCabe, B. (1998). Memory for locations within regions: Spatial biases and visual hemifield differences. *Memory & Cognition*, 26, 97-107.
- Lee, T. (1970). Perceived distance as a function of direction in the city. *Environment and Behavior*, 2, 40-51.
- Leibowitz, H. W., Guzy, L. T., Peterson, E. & Blake, P. T. (1993). Quantitative perceptual estimates: Verbal versus nonverbal retrieval techniques. *Perception*, 22, 1051-1060.
- Levine, M., Jankovic, I. N. & Palij, M. (1982). Principles of spatial problem solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111, 157-175.
- Levine, M., Marchon, I. & Hanley, G. L. (1984). The placement and misplacement of you-are-here maps. *Environment and Behavior*, 16, 139-157.
- Liben, L. S. (1988). Conceptual issues in the development of spatial cognition. In J. Stiles-Davis & M. Kritchevsky (Eds.), *Spatial cognition: Brain bases and development* (pp. 167-194). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Loomis, J. M., da Silva, J. A., Fujita, N. & Fukusima, S. S. (1992). Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 906-921.
- Maki, R. H. (1981). Categorization and distance effects with spatial linear orders. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 7, 15-32.
- Maki, R. H., Maki, W. S. & Marsh, L. G. (1977). Processing locational and orientational information. *Memory and Cognition*, 5, 602-612.
- Mallot, H. A., Gillner, S., van Veen, H. A. H. C. & Bühlhoff, H. H. (1998). Behavioral experiments in spatial cognition using virtual reality. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial Cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 447-467). Berlin: Springer.
- Mandler, J. M. (1988). The development of spatial cognition: On topological and euclidean representation. In J. Stiles-Davis & M. Kritchevsky (Eds.), *Spatial cognition: Brain bases and development* (pp. 423-432). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- McNamara, T. P. (1986). Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, 18, 87-121.

- McNamara, T. P. (1991). Memory's view of space. *The Psychology of Learning and Motivation*, 27, 147-186.
- McNamara, T. P. & Diwadkar, V. A. (1997). Symmetry and asymmetry of human spatial memory. *Cognitive Psychology*, 34, 160-190.
- McNamara, T. P., Halpin, J. A. & Hardy, J. K. (1992). Spatial and temporal contributions to the structure of spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18, 555-564.
- McNamara, T. P., Hardy, J. K. & Hirtle, S. C. (1989). Subjective hierarchies in spatial memory. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15, 211-227.
- McNamara, T. P. & LeSueur, L. L. (1989). Mental representations of spatial and nonspatial relations. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 41, 215-233.
- McNamara, T. P., Ratcliff, R. & McKoon, G. (1984). The mental representation of knowledge acquired from maps. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 723-732.
- Merrill, A. A. & Baird, J. C. (1979). Studies of the cognitive representation of spatial relations: III. A hypothetical environment. *Journal of Experimental Psychology: General*, 108, 99-106.
- Millikan, R. (1989). Biosemantics. *Journal of Philosophy*, 86, 281-297.
- Millar, S. (1994). *Understanding and representing space*. Oxford: Clarendon Press.
- Moar, I. & Bower, G. H. (1983). Inconsistency in spatial knowledge. *Memory and Cognition*, 11, 107-113.
- Moar, I. & Carleton, L. R. (1982). Memory for routes. *Quarterly Journal of Experimental Psychology: Human Experimental Psychology*, 34A, 381-394.
- Montello, D. R. (1991). The measurement of cognitive distance: Methods and construct validity. *Journal of Environmental Psychology*, 11, 101-122.
- Montello, D. R. (1992). The geometry of environmental knowledge. In A. U. Frank, I. Campari & U. Formentini (Eds.), *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space* (pp. 136-152). Berlin: Springer.

- Montello, D. R. (1997). The perception and cognition of environmental distance: Direct sources of information. In S. C. Hirtle & A. U. Frank (Eds.), *Spatial information theory: A theoretical basis for GIS*. Berlin: Springer.
- Montello, D. R. (1998). A new framework for understanding the acquisition of spatial knowledge in large-scale environments. In M. J. Egenhofer & R. G. Golledge (Eds.), *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems* (pp. 143-154). New York: Oxford University Press.
- Montello, D. R. & Pick, H. L. (1993). Integrating knowledge of vertically aligned large-scale spaces. *Environment and Behavior*, 25, 457-484.
- Mormann, T. (1997). Ist der Begriff der Repräsentation obsolet? *Zeitschrift für Philosophische Forschung*, 51, 349-366.
- Moyer, R. S. & Bayer, R. H. (1976). Mental comparison and the symbolic distance effect. *Cognitive Psychology*, 8, 228-246.
- Moyer, R. S., Bradley, D. R., Sorensen, M. H., Whiting, J. C. & Mansfield, D. P. (1978). Psychophysical functions for perceived and remembered size. *Science*, 200, 330-332.
- Moyer, R. S. & Dumais, S. T. (1978). Mental comparison. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Vol. 12, pp. 117-155). New York: Academic Press.
- Neisser, U. (1976). *Cognition and reality*. San Francisco: Freeman.
- Newcombe, N. & Liben, L. S. (1982). Barrier effects in the cognitive maps of children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology*, 34, 46-58.
- Nisbett, R. E. & Wilson, T. D. (1977). Telling more than we can know: Verbal reports on mental processes. *Psychological Review*, 84, 231-259.
- O'Keefe, J. (1993). Kant and the sea-horse: An essay in the neurophilosophy of space. In N. Eilan & R. A. McCarthy (Eds.), *Spatial representation: Problems in philosophy and psychology* (pp. 43-64). Oxford: Blackwell Publishers.
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1978). *The hippocampus as a cognitive map*. Oxford: Clarendon Press.
- O'Keefe, J. & Nadel, L. (1979). Precis of O'Keefe and Nadel's the hippocampus as a cognitive map. *Behavioral and Brain Sciences*, 2, 487-533.
- Orth, B. (1983). Grundlagen des Messens. In H. Feger & J. Bredenkamp (Eds.), *Enzyklopädie der Psychologie* (Vol. B-I-3: Messen und Testen, pp. 136-180). Göttingen: Hogrefe.

- Paivio, A. (1971). *Imagery and verbal processes*. New York: Holt, Rinehart, and Winston.
- Paivio, A. (1975). Perceptual comparisons through the mind's eye. *Memory and Cognition*, 3, 635-648.
- Palmer, S. E. (1978). Fundamental aspects of cognitive representation. In E. Rosch & B. Lloyd (Eds.), *Cognition and categorization* (pp. 259-303). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Pechmann, T., Reetz, H. & Zerbst, D. (1989). Problems in measurement of speech onset: The unreliability of voice keys. *Sprache & Kognition*, 8, 65-71.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1975). *Die Entwicklung des räumlichen Denkens beim Kinde*. Stuttgart: Klett.
- Piaget, J., Inhelder, B. & Szeminska, A. (1975). *Die natürliche Geometrie des Kindes*. Stuttgart: Klett.
- Pipkin, J. S. (1982). Some remarks on multidimensional scaling in geography. In R. G. Golledge & J. N. Rayner (Eds.), *Proximity and preference* (pp. 214-232). Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Poincaré, H. (1914). *Wissenschaft und Hypothese*. Leipzig: Teubner.
- Presson, C. C. & Hazelrigg, M. D. (1984). Building spatial representations through primary and secondary learning. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 10, 716-722.
- Putnam, H. (1997). *Für eine Erneuerung der Philosophie*. Stuttgart: Reclam.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). Validating computational models: A critique of Anderson's indeterminacy of representation claim. *Psychological Review*, 86, 383-394.
- Pylyshyn, Z. W. (1981). The imagery debate: Analogue media versus tacit knowledge. *Psychological Review*, 88, 16-45.
- Radvansky, G. A., Carlson Radvansky, L. A. & Irwin, D. E. (1995). Uncertainty in estimating distances from memory. *Memory and Cognition*, 23, 596-606.
- Ratcliff, R. & McKoon, G. (1981). Automatic and strategic priming in recognition. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 20, 204-215.
- Reichenbach, H. (1928/1977). *Philosophie der Raum-Zeit Lehre*. (Vol. 2). Braunschweig: Vieweg.

- Renz, J. & Nebel, B. (1998). Spatial reasoning with topological information. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 351-371). Berlin: Springer.
- Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83, 274-278.
- Richardson, A. E., Montello, D. R. & Mary, H. (in press). Spatial knowledge acquisition from maps and from navigation in real and virtual environments. *Memory and Cognition*.
- Rosch, E. (1975). Cognitive reference points. *Cognitive Psychology*, 7, 532-547.
- Roskos-Ewoldsen, B., McNamara, T. P., Shelton, A. L. & Carr, W. (1998). Mental representations of large and small spatial layouts are orientation dependent. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 215-226.
- Rothkegel, R., Wender, K. F. & Schumacher, S. (1998). Judging spatial relations from memory. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 79-105). Berlin: Springer.
- Ruddle, R. A., Payne, S. J. & Jones, D. M. (1997). Navigating buildings in "desk-top" virtual environments: Experimental investigations using extended navigational experience. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 3, 143-159.
- Sadalla, E. & Magel, S. (1980). The perception of traversed distance. *Environment and Behavior*, 12, 65-80.
- Sadalla, E. K., Burroughs, W. J. & Staplin, L. J. (1980). Reference points in spatial cognition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6, 516-528.
- Sadalla, E. K. & Montello, D. R. (1989). Remembering changes in direction. *Environment and Behavior*, 21, 346-363.
- Sadalla, E. K. & Staplin, L. J. (1980). An information storage model for distance cognition. *Environment and Behavior*, 12, 183-193.
- Sadalla, E. K., Staplin, L. J. & Burroughs, W. J. (1979). Retrieval processes in distance cognition. *Memory and Cognition*, 7, 291-296.
- Scheerer, E. (1993). Mentale Repräsentation in interdisziplinärer Perspektive. *Zeitschrift für Psychologie*, 201, 136-166.
- Schouten, J. A. (1924). *Raum, Zeit und Relativitätsprinzip*. Leipzig: Teubner.

- Schumacher, R. (1997). Philosophische Theorien mentaler Repräsentation. *Deutsche Zeitschrift für Philosophie*, 45, 785-815.
- Schweizer, K. (1997). *Räumliche oder zeitliche Wissensorganisation? Zur mentalen Repräsentation der Blickpunktsequenz bei räumlichen Anordnungen*. Bonn: Holos.
- Schweizer, K., Herrman, T., Janzen, G. & Katz, S. (1998). The route direction effect and its constraints. In C. Freksa, C. Habel & K. F. Wender (Eds.), *Spatial cognition - An interdisciplinary approach to representation and processing of spatial knowledge* (pp. 19-38). Berlin: Springer.
- Shelton, A. L. & McNamara, T. P. (1997). Multiple views of spatial memory. *Psychonomic Bulletin and Review*, 4, 102-106.
- Shemyakin, F. N. (1962). Orientation in space. In B. G. Ananyev (Ed.), *Psychological Science in the U.S.S.R.* (pp. 186-255). Washington, DC: Office of Technical Reports.
- Shepard, R. N. (1988). The role of transformations in spatial cognition. In J. Stiles-Davis, M. Kritchevsky & U. Bellugi (Eds.), *Spatial cognition: Brain bases and development*. (pp. 81-110). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Shepard, R. N. & Chipman, S. (1970). Second-order isomorphism of internal representations: Shapes of states. *Cognitive Psychology*, 1, 1-17.
- Sherman, R. C., Croxton, J. & Giovanatto, J. (1979a). Investigating cognitive representations of spatial relationships. *Environment and Behavior*, 11, 209-226.
- Sherman, R. C., Croxton, J. & Smith, M. (1979b). Movement and structure as determinants of spatial representations. *Journal of Nonverbal Behavior*, 4, 27-39.
- Sherman, R. C. & Lim, K. M. (1991). Determinants of spatial priming in environmental memory. *Memory & Cognition*, 19, 283-292.
- Sholl, M. J. (1987). Cognitive maps as orienting schemata. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13, 615-628.
- Siegel, A. W. & White, S. H. (1975). The development of spatial representations of large-scale environments. In H. W. Reese (Ed.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 10, pp. 9-55). New York: Academic.
- Stevens, E. & Galanter, E. H. (1957). Ratio scales and category scales for a dozen perceptual continua. *Journal of Experimental Psychology*, 54, 377-411.
- Stillings, N. A., Feinstein, M. H., Garfield, J. L., Rissland, E. L., Rosenbaum, D. A., Weisler, S. E. & Baker-Ward, L. (1991). *Cognitive science*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Suppes, P., Krantz, D. M., Luce, R. D. & Tversky, A. (1989). *Foundations of measurement, Vol. 2: Geometrical, threshold, and probabilistic representations*. San Diego, CA: Academic Press.
- Taylor, H. A., Naylor, S. J. & Chechile, N. A. (1999). Goal-specific influences on the representation of spatial perspective. *Memory & Cognition*, 27, 3009-3319.
- Thorndyke, P. W. (1981). Distance estimation from cognitive maps. *Cognitive Psychology*, 13, 526-550.
- Thorndyke, P. W. & Hayes-Roth, B. (1982). Differences in spatial knowledge acquired from maps and navigation. *Cognitive Psychology*, 14, 560-589.
- Tlauka, M. & Wilson, P. N. (1996). Orientation-free representations from navigation through a computer-simulated environment. *Environment and Behavior*, 28, 647-664.
- Tobler, W. R. (1976). The geometry of mental maps. In R. G. Golldge & G. Rushton (Eds.), *Spatial choice and spatial behavior* (pp. 69-81). Columbus: Ohio State University Press.
- Tolman, E. C. (1948). Cognitive maps in rats and men. *Psychological Review*, 55, 189-208.
- Touretzky, D. S. & Redish, A. D. (1996). Theory of rodent navigation based on interacting representations of space. *Hippocampus*, 6, 247-270.
- Tversky, A. (1977). Features of similarity. *Psychological Review*, 84, 327-352.
- Wagener, M. & Wender, K. F. (1985). Spatial representations and inference processes in memory for text. In G. Rickheit & H. Strohner (Eds.), *Inferences in text processing* (pp. 115-136). Amsterdam: North-Holland.
- Wagener-Wender, M. (1993). *Mentale Repräsentationen räumlicher Informationen*. Bonn: Holos.
- Wagener-Wender, M., Wender, K. F. & Rothkegel, R. (1997). Priming als Maß für das räumliche Gedächtnis. In C. Umbach, M. Grabski & R. Hörnig (Eds.), *Perspektive in Sprache und Raum* (pp. 11-34). Wiesbaden: Deutscher UniversitätsVerlag.
- Wender, K. F. & Wagener, M. (1990). Zur Verarbeitung räumlicher Informationen: Modelle und Experimente. *Kognitionswissenschaft*, 1, 4-14.
- Wender, K. F., Wagener-Wender, M. & Rothkegel, R. (1997). Measures of spatial memory and routes of learning. *Psychological Research*, 59, 269-278.
- Wiest, W. M. & Bell, B. (1985). Stevens's exponent for psychophysical scaling of perceived, remembered, and inferred distance. *Psychological Bulletin*, 98, 457-470.

Wilton, R. N. (1979). Knowledge of spatial relations: The specification of the information used in making inferences. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 31, 133-146.

Wilton, R. N. & Pidcock, B. (1982). Knowledge of spatial relations: Varying the precision with which locations must be specified. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34A, 515-528.

Woodworth, R. S. (1938). *Experimental psychology*. New York: Holt.