

Grenzen der perzeptuellen Robustheit bei perspektivischer Verzerrung*

DIRK KERZEL und HEIKO HECHT

Universität Bielefeld und Zentrum für interdisziplinäre Forschung Universität Bielefeld

Bilder erscheinen auch dann nicht verzerrt, wenn der virtuelle Raum, der durch sie spezifiziert wird, eine affine Verzerrung erfährt. Dies ist der Fall, wenn ein Bild von der Seite betrachtet wird. Drei Hypothesen der Bildwahrnehmung versuchen, diese Robustheit der Perspektive zu erklären: (1) Array-Spezifität besagt, daß die Wahrnehmung des virtuellen Raumes durch die am Beobachtungspunkt gegebene optische Information determiniert wird. (2) Mit der Annahme eines Kompensationsmechanismus wird postuliert, daß die Ansicht vom korrekten Beobachtungspunkt unbewußt wiederhergestellt wird. (3) Die Indiskriminationshypothese besagt, daß das visuelle System eine affine Verzerrung gar nicht erst auflöst. Mittels der von Cutting (1987) entwickelten doppelten Projektionstechnik werden die Ansätze in drei Experimenten getestet. In Experiment I wird entgegen Cuttings Befunden gezeigt, daß die Probanden Information über die Neigung der Projektionsebene für eine grobe Kompensationsleistung nutzen und zudem Urteile der subjektiven Rigidität auf relative Bildgeschwindigkeiten und nicht auf eine Rekonstruktion des Objektes stützen. Die Grenzen der Kompensation sind jedoch schnell erreicht, wie Experiment II zeigt, in dem eine kontinuierliche Beobachterbewegung simuliert wurde. Experiment III zeigt, daß die Kompensation auf die primäre Projektionsebene beschränkt ist, da die Kompensationsleistung bei doppelter Projektion und geneigter primärer Projektionsebene stärker abfiel als bei einfacher Projektion. Somit erscheint für kontinuierlich bewegte Beobachter die Hypothese der Array-Spezifität am besten gestützt, während Kompensation nur bei statischen Bildern und auch nur unvollständig auftritt. Die Indiskriminationshypothese hat sich nicht bestätigt.

Schlagworte: Bildwahrnehmung — lineare Perspektive — perzeptuelle Verzerrung

* Die Autoren danken Michael Kubovy für interessante Diskussionshinweise, sowie zwei anonymen Gutachtern für ihre konstruktive Kritik des Manuskripts. Das Projekt wurde von einem Stipendium der Studienstiftung des Deutschen Volkes an den ersten Autor und einer Sachbeihilfe der Deutschen Forschungsgemeinschaft (He 2122/4-1) an den zweiten Autor gefördert.

Einleitung

Ein generelles Problem bei der Betrachtung linear-perspektivischer Bilder ist die Tatsache, daß die Bilder nur für einen Beobachtungspunkt geometrisch korrekt sind. An diesem Punkt laufen die projizierten Strahlen zusammen und bilden den Kompositionspunkt. In der Regel befindet sich der Beobachter an einem inkorrekten Beobachtungspunkt und besitzt kein explizites Wissen über den korrekten Beobachtungspunkt. Trotzdem erscheinen die Bilder meist nicht verzerrt. Diese Robustheit der Perspektive ist vielfach nachgewiesen (La Gournerie, 1859; Pirenne, 1970; Perkins, 1973; Kubovy 1986; Cutting, 1987), jedoch sind bestehende Erklärungsmodelle sehr widersprüchlich. Hypothesen zur Kompensation, Array-Spezifität und Indiskrimination werden im folgenden dargestellt und dann empirisch bewertet, indem Variablen wie die Zahl der Abbildungsebenen und die Position des Beobachters (real und virtuell) variiert werden.

Perspektivische Verzerrungen betreffen den durch die optische Projektion im Bild spezifizierten virtuellen Raum. Der virtuelle Raum entspricht dem dreidimensionalen Raum, welcher eine optische Struktur erzeugen würde, die derjenigen bei einer Betrachtung eines Bildes gleich ist. Am Kompositionspunkt eines Bildes sind virtueller und abgebildeter dreidimensionaler Raum identisch, d. h. die optische Struktur am Auge des Beobachters ist bei der Betrachtung des Bildes identisch mit derjenigen des entsprechenden realen dreidimensionalen Raumes (Rosinski & Farber, 1980). Der virtuelle Raumes erfährt bei einer lateralen oder orthogonalen Abweichung vom Kompositionspunkt eine affine Transformation (Cutting, 1987; siehe Abbildung 1)¹. Bei einer Bildbetrachtung von einem inkorrekten Beobachtungspunkt sollte daher ein affin verzerrter virtueller Raum wahrgenommen werden. Die eigene Introspektion spricht aber paradoxerweise gegen eine solche Behauptung: Bilder erscheinen auch von der Seite, Ferne, oder Nähe aus betrachtet nicht verzerrt. Dieser Umstand trifft auch auf animierte Bilder zu. So nimmt ein Kinobesucher selbst dann die im Film dargestellten räumlichen Relationen als unverzerrt wahr, wenn er die Kinoleinwand von einem Seitensitz oder einem sehr nahen oder fernen Beobachtungspunkt betrachtet. Sogar wenn er sich während des Films zu seinem Sitzplatz bewegt, bleibt eine subjektive Verzerrung des virtuellen Raumes aus. Der Anblick einer animierten Sequenz vom Seitensitz, ebenso wie der bei einer Bewegung durch das Kino wurde in unseren Experimenten durch die von Cutting (1987) entwickelte doppelte Projektionstechnik simuliert.

¹ Affine Transformationen sind solche Transformationen, bei denen parallele Linien generell parallel bleiben, während die Winkel zwischen sich schneidenden Linien generell verändert werden.

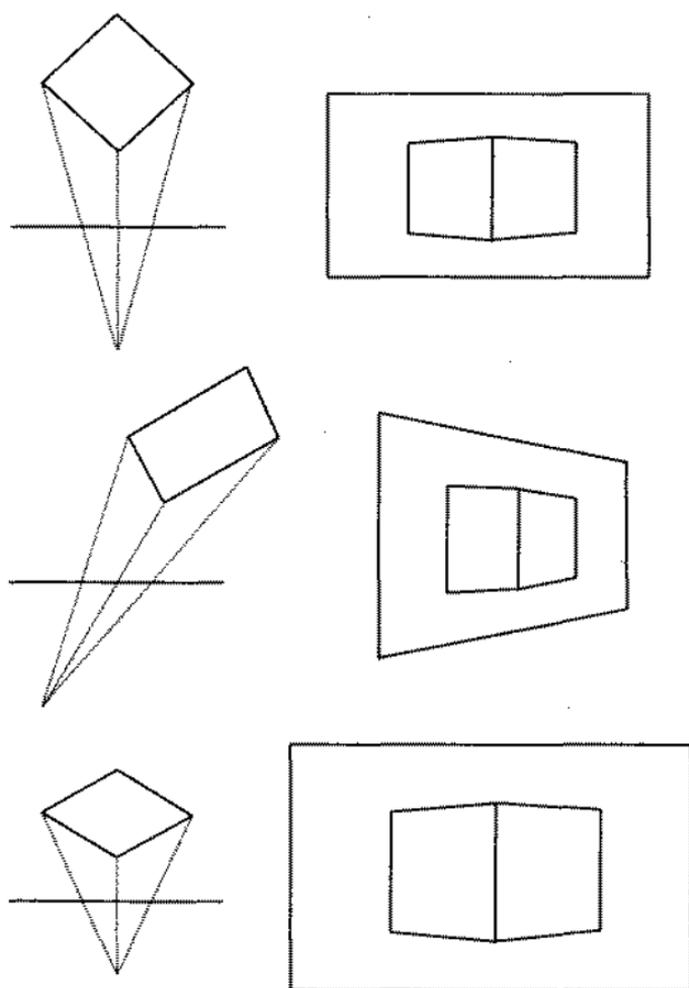


Abbildung 1: Rekonstruktive Geometrie bei der Betrachtung von Bildern. Links wird der virtuelle Raum bei der Betrachtung einer Projektion eines Quaders von verschiedenen Standpunkten gezeigt. Rechts wird die Ansicht des Bildes dargestellt. Oben wird das Bild vom Kompositionspunkt aus betrachtet. Es liegen keine Verzerrungen vor. In der Mitte wird eine Scherung des virtuellen Raumes gezeigt, die bei einer Betrachtung von der Seite auftritt. Unten wird die Kompression der Tiefe bei einem zu nahen Betrachtungspunkt demonstriert.

Drei Theorien der Bildwahrnehmung versuchen, den Widerspruch zwischen der perspektivisch verzerrten Darstellung und der erlebten Unverzerrtheit des Raumes unter Bezugnahme auf Information im optischen Array (Bengston, Stergios, Ward, & Jester, 1980; Gibson 1950, 1966, 1979;

Goldstein, 1979, 1987, 1988; Halloran, 1989), auf Kompensationsmechanismen (Kubovy, 1986; Perkins, 1973, Pirenne, 1970, Rosinski, Mulholland, Degelman, & Farber, 1980) oder auf Unschärfen des visuellen Systems (Cutting, 1987) zu lösen. Bisher wurden Kompensationsleistungen empirisch im wesentlichen für statische reale Projektionsebenen und statische Bilder belegt. Wir untersuchten in drei Experimenten, ob eine Kompensation der Neigung einer sich bewegenden Projektionsebene auftritt, da Bewegung in der Regel eine Verbesserung von Wahrnehmungsleistungen bewirkt (Gibson, 1979; Kaiser, Proffitt, Whelan & Hecht, 1992). Wir fanden aber, daß nur ein sehr grober Kompensationsmechanismus wirksam ist. Lokale optische Information determiniert die simulierte Bildwahrnehmung unabhängig von der Komplexität der dargestellten Situation. Für eine reale Projektionsebene, den Bildschirm, wird hingegen eine Kompensationsleistung bei animierten Stimuli nachgewiesen.

Die Hypothese der Array-Spezifität

Die aus Gibsons (1966, 1979) Ansatz der direkten Wahrnehmung abgeleitete Hypothese der Array-Spezifität besagt, daß die Wahrnehmung des virtuellen Raumes — ähnlich wie die Wahrnehmung der realen Umwelt — durch die am Beobachtungspunkt gegebene optische Information spezifiziert wird. Es folgt daraus, daß der Beobachter die Ansicht vom korrekten Beobachtungsstandpunkt nicht wiederherstellt und daher einen verzerrten virtuellen Raum wahrnimmt, unabhängig davon, ob Information über die Neigung der Projektionsebene vorliegt oder nicht. Das Paradox wird somit nicht als solches anerkannt, da eine seiner Vorannahmen in Frage gestellt wird. Ferner macht der Ansatz der Array-Spezifität die bisher ungeprüfte Vorhersage, daß die Komplexität des abgebildeten Raumes keinen Einfluß auf die Wahrnehmung hat. Für komplexe virtuelle Räume, die mehr als nur eine Projektion umfassen, wie z. B. Bilder von Bildern, sollte die Information im optischen Raum ebenso verfügbar sein wie für weniger komplexe Abbildungen. Wir prüften diese Hypothese in Experiment II und III, indem wir eine einfache und doppelte Projektion verglichen.

Ein partieller Beleg für die Hypothese der Array-Spezifität findet sich in Arbeiten Goldsteins (1979, 1987). Hauptbefund seiner Arbeit ist, daß die wahrgenommene räumliche Anordnung der Objekte im Bild über Veränderungen des Beobachtungspunktes hinweg relativ konstant bleibt. Im Gegensatz dazu variiert ein anderes Bildmerkmal mit dem Blickwinkel, nämlich die Orientierung, in die Objekte relativ zum Beobachter zu zeigen scheinen. Letzteres spricht für die Hypothese der Array-Spezifität, ebenso Ergebnisse, die darauf hinweisen, daß Bilder keine Sonderfunktion

besitzen. Bengston et al. (1980) fanden, daß ein vergrößerter Abstand der Kamera zu fotografierten Objekten und ein vergrößerter Abstand des Beobachters zum Bild einen ähnlichen reduzierenden Einfluß auf die wahrgenommene Tiefe in der Fotografie ausüben.

In den bisherigen Studien zur Überprüfung der Hypothese der Array-Spezifität war die Beobachterposition während eines Versuchsdurchganges fixiert. Unter ökologischen Bedingungen ist das aber eher die Ausnahme. Ein Museums- oder Kinobesucher verharret nur selten unbewegt an einer Stelle, sondern bewegt sich auf seinem Sitz, geht umher, etc. Es stellt sich die Frage, ob die Hypothese der Array-Spezifität auch bei einem bewegten Beobachter greift. In Experimenten II und III werden Daten dafür geliefert, daß auch bei der Simulation eines bewegten Beobachters Information im optischen Array die Wahrnehmung von Bildern bestimmt.

Pirenes Hypothese eines Kompensationsmechanismus

Pirene (1970) schlägt einen unbewußten intuitiven Prozeß der Kompensation (Pirene, 1970, S. 99) vor, der die Ansicht vom korrekten Beobachtungspunkt wiederherstellt. Pirene impliziert damit, daß der Beobachter nicht den am inkorrekten Beobachtungspunkt spezifizierten virtuellen Raum wahrnimmt, sondern den unverzerrten virtuellen Raum am Kompositionspunkt. Er ist der Ansicht, daß das Wissen des Beobachters über die Neigung der Projektionsebene die Basis dieses Kompensationsmechanismus ist. Beobachter sollten also bei sichtbarer Neigung der Projektionsebene in der Lage sein, korrekte Aussagen über den virtuellen Raum auch bei seitlicher Ansicht zu machen. Um diese Hypothese zu testen, manipulieren wir in Experiment I, ähnlich wie in vorangegangenen Studien (z. B. Cutting, 1987; Rosinski et al., 1980), die Sichtbarkeit der Projektionsebene. Ferner leitet sich aus der Annahme eines Rekonstruktionsmechanismus ab, daß die Kompensation einer geneigten Projektionsebene mit zunehmender Anzahl Projektionsebenen schlechter wird, da für jede Projektionsebene eine Kompensation vorgenommen werden muß. Diese Vorhersage kann direkt gegen die der Hypothese der Array-Spezifität getestet werden.

Eine Demonstration bildlicher Kompensation lieferten Rosinski et al. (1980). Sie zeigten ihren Probanden Fotografien von unterschiedlich geneigten, vertikal gestreiften Objekten. Die Neigung der Oberfläche der Fotografie war einmal sichtbar und einmal unsichtbar. Im Einklang mit der Hypothese eines Kompensationsmechanismus fanden sie, daß bei unsichtbarer Oberfläche der Fotografien der Zusammenhang zwischen eingeschätzter und tatsächlicher Neigung der Objekte in Abhängigkeit von

der Neigung der Projektionsebene variierte. Bei sichtbarer Projektionsebene war dies nicht der Fall, sondern die Neigung der Projektionsebene wurde berücksichtigt und kompensiert.

Durch eine Untersuchung von Halloran (1989) wurden die Ergebnisse der Studie von Rosinski et al. (1980) aber in Frage gestellt. Er eliminierte die zweidimensionalen Hinweisreize für die Einschätzung der Objektneigung und erweiterte den Bereich des Neigungswinkels der Bildebene auf 30° bis 150° . Durch diese Manipulation ergab sich ein klares Muster von phänomenaler Rotation bei einem Wechsel des Blickwinkels.

Weitere Belege für die Existenz eines Kompensationsmechanismus lieferte Perkins (1973). Seine Probanden sahen Bilder, die unter Blickwinkeln von 64° und 49° aufgenommen worden waren. Die Bilder stellten entweder Projektionen von Quadern oder von nicht rechtwinkligen Objekten dar. Aufgabe der Probanden war es, die Rechtwinkligkeit der abgebildeten Objekte einzuschätzen. Für einige Kombinationen von Bild und Blickwinkel ergab sich ein Konflikt zwischen der Interpretation der schrägen und der orthogonalen Ansicht des Bildes. Die Urteile hingen in fast allen Bedingungen signifikant mit der von der orthogonalen Projektion spezifizierten Rechtwinkligkeit zusammen.

Kubovy (1986) erweiterte die Hypothesen Pirennes durch die Annahme, daß eine Kompensation nur für die erste, sichtbar geneigte Projektionsebene erfolgt. Die Neigung der zweiten Projektionsebene ließe sich zwar prinzipiell rekonstruieren, diese Information wird aber aufgrund der Kapazitätsbeschränkungen nicht zur Kompensation genutzt. Diese Hypothese Kubovys wird in Experiment III wieder aufgegriffen und in Bezug auf eine reale primäre Projektionsebene (Bildschirm) und eine simulierte variable Projektionsebene getestet. In Experiment I zeigen wir jedoch zunächst, daß bei einer simulierten Bewegung des Beobachters eine grobe Kompensation der bewegungsinduzierten perspektivischen Verzerrungen eintritt, wenn Information über die Neigung der Projektionsebene gegeben wird.

Cuttings Indiskriminationshypothese

Cutting (1987) vertritt die Hypothese, daß das visuelle System affine oder perspektivische Verzerrungen, wie sie bei der Betrachtung von geneigten Bildern auftreten, nicht registriert und somit perspektivische Robustheit erzielt. Von der Seite betrachtete Bilder sehen also deshalb nicht verzerrt aus, weil das visuelle System die Verzerrungen nicht auflösen kann. Cutting (1987) führte zu diesem Phänomen eine Studie durch, mit der er die Richtigkeit seiner Hypothese für Projektionen von sich bewe-

genden Bildern überprüfte. Mit Computeranimationen wurde dabei die Perspektive eines Beobachters auf einem Seitensitz in der ersten Reihe eines Kinos simuliert. Cutting projizierte zunächst die Umrisse eines dreidimensionalen Quaders auf eine Projektionsebene A (siehe Abbildung 2), die dann auf einem Bildschirm (Projektionsebene B) abgebildet wurde. Cutting nennt diese Methode „doppelte Projektion“, da zwei Projektionsebenen verwendet werden. Dadurch wird zum einen die Situation eines Kinobesuchers simuliert, zum anderen erlaubt sie die Dissoziation von perspektivischer Verzerrung und der sichtbaren Neigung der Projektionsebene: Für den Beobachter bleibt die sichtbare Projektionsebene, der Bildschirm, während des Experiments ungeneigt.

Die Aufgabe des Beobachters bestand darin einzuschätzen, ob sich ein rotierender Quader verformte. Die Deformation konnte entweder affin oder nicht affin sein. Wichtig ist, daß es sich bei den affinen wie auch bei den nicht affinen Deformationen um sinusförmige Veränderungen der

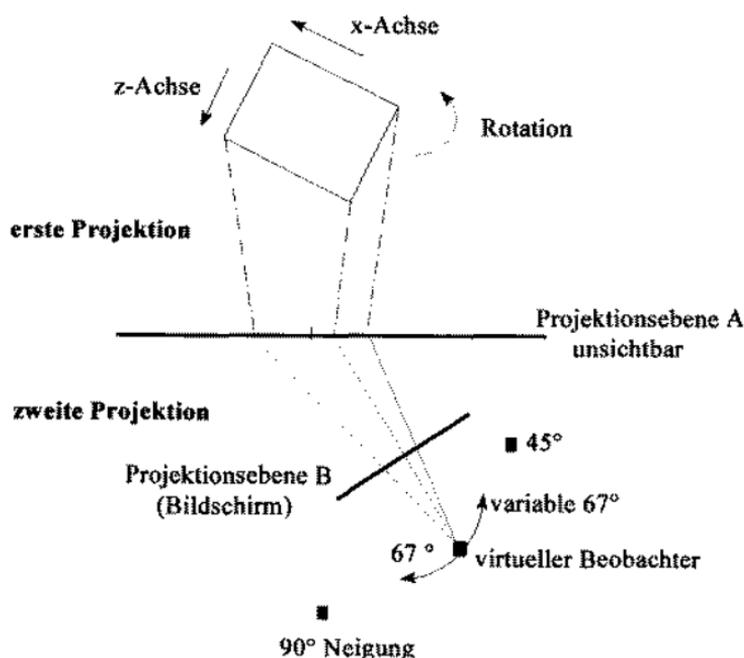


Abbildung 2: Schematische Darstellung der von Cutting (1987) verwendeten doppelten Projektionstechnik. Der Quader wird zuerst auf die simulierte Projektionsebene A und dann auf eine zweite Ebene (B) projiziert. In einigen Fällen entspricht Ebene B dem Bildschirm, in anderen wird zusätzlich eine Beobachterbewegung simuliert, die einer Rotation der ganzen Anordnung (A und B) entspricht.

Form des Quaders in beide Richtungen (Expansion und Kontraktion) handelte. Damit wurde neben der Form des Objektes auch die Richtung der Deformation während eines Versuchsdurchgangs geändert. Die affinen Deformationen wurden schlechter erkannt als die nicht affinen.

Als weiterer Faktor wurde der cineastische Beobachtungspunkt durch die Neigung der zweidimensionalen Projektionsebene A variiert (s. Abbildung 2). Diese Manipulation hatte keinen Einfluß auf die wahrgenommene Rigidität. Cutting schließt aus diesem Umstand, daß eine Kompensation der Neigung der Projektionsebene für die Wahrnehmung von animierten Objekten nicht notwendig ist, da diese Neigung nicht sichtbar war. Jedoch zeigt Cuttings zweites Experiment, daß sich bei extremer Neigung der Projektionsebene (45°) die wahrgenommene Rigidität verändert. Überraschenderweise nimmt die eingeschätzte Rigidität in dieser Bedingung zu. Cutting interpretiert diesen Befund nicht weiter. Ein weiteres Ergebnis seines zweiten Experiments ist die Abwesenheit eines Unterschieds zwischen einer Neigung der Projektionsebene von 90° , 67° und einer um 67° oszillierenden Bedingung. Cutting interpretiert diesen Null-effekt wiederum als Beweis dafür, daß eine Kompensation für die Bildschirmneigung nicht notwendig ist, um animierte Objekte wahrzunehmen.

In einem dritten Experiment manipulierte Cutting zusätzlich die Neigung des Bildschirms und kommt zu dem Ergebnis, daß Beobachter keinen Gebrauch von dieser sichtbaren Neigung machen. In unserem Experiment III zeigen wir, daß Beobachter die Neigung des Bildschirms sehr wohl berücksichtigen und sie bis zu 60° kompensieren können. Dieser Befund repliziert die Resultate Perkins (1973) für bewegte Bilder.

Eine Gemeinsamkeit der genannten Studien ist die Verwendung von unrealistischem Stimulusmaterial, zumeist Strichzeichnungen, die die Neigung der Projektionsebene höchstens andeuten. Inwiefern die vorliegenden Resultate sich auf andere Stimulussets verallgemeinern lassen, bleibt eine offene Frage. Es könnte daher sein, daß die Ergebnisse sich drastisch verändern, wenn realistischere Szenen, die Schattierungen und eine Oberflächentextur besitzen, dargeboten werden. Einer Verwendung solcher Stimulussets steht aber der damit verbundene größere Aufwand und eine schlechtere Kontrollierbarkeit gegenüber.

Struktur durch Bewegung

Norman und Todd (1993) zeigten, daß Beobachter den Beschleunigungsverlauf einzelner Bildpunkte, also zeitliche Information zweiter Ordnung, benutzen, um die Struktur eines Objektes anhand der Bewe-

gung eines zweidimensionalen Bildes zu beurteilen. Diese Befunde Norman und Todds zeigen, daß eine Rekonstruktion des virtuellen Raumes zur Einschätzung der Struktur durch Bewegung nicht nötig ist.

In Cuttings (1987) Studie standen die Geschwindigkeiten der Bildpunkte, die die verschiedenen Kanten des Quaders repräsentieren, ebenfalls als Hinweisreiz für die Rigiditätsurteile zur Verfügung. Bei einer Rotation ohne Deformation verlief die horizontale Geschwindigkeit sinusförmig und ohne Störungen. Wie Metzger (1934) gezeigt hat, erhöht sich durch einen größeren Abstand eines Punktes zur Rotationsachse die Geschwindigkeit des korrespondierenden Bildpunktes. Während einer sinusförmigen Expansion und Kontraktion sind die Bildgeschwindigkeiten also sowohl höher als auch niedriger als bei einer einfachen Rotation. Es liegt nahe zu vermuten, daß ein solcher Wechsel von einer zu hohen zu einer zu niedrigen Bildgeschwindigkeit ein sehr guter Hinweisreiz für eine Deformation des Quaders war. In Experiment I wird diese Annahme getestet. Falls ein Wechsel der Bildgeschwindigkeit auffällig sein sollte, dann müßte eine Expansion und Kontraktion besser diskriminiert werden als eine Expansion ohne Kontraktion. Bei alleiniger Expansion weichen die Bildgeschwindigkeiten durchgängig in eine Richtung von den Bildgeschwindigkeiten bei einer Rotation ohne Deformation ab.

Experiment I

Das erste Ziel dieses Experiments war, die Hypothese der Indiskrimination Cuttings (1987) der Hypothese des Kompensationsmechanismus (Pirrenne, 1970; Kubovy, 1986) gegenüberzustellen. Dazu wurde den Probanden entweder Information über die Neigung der Projektionsebene dargeboten oder nicht. Falls die Kompensation der Neigung der Projektionsebene zur Einschätzung der Rigidität von sich drehenden Quadern wichtig ist, dann sollte die Sichtbarkeit einen signifikanten Effekt auf die Urteile haben. Nur bei sichtbarer Projektionsebene ist eine Kompensationsleistung möglich.

Das zweite Ziel war es zu testen, ob die Befunde der Studie Cuttings auch durch Struktur durch Bewegung erklärt werden können und somit keinen überzeugenden Beleg für die Indiskriminationshypothese darstellen. Die Studie Norman und Todds (1993) zeigt, daß der Beschleunigungsverlauf der Bildpunkte von den Probanden zur Einschätzung der Rigidität verwendet wird. Dieses Ergebnis legt nahe, daß die Probanden in der Studie Cuttings (1987) eine ähnliche Strategie verfolgt haben konnten. Es erscheint weiterhin plausibel, daß der Wechsel von einer zu hohen zu einer zu niedrigen Bildgeschwindigkeit, wie sie durch eine Expansion und

darauf folgende Kontraktion des dreidimensionalen Objektes produziert wird, ein besonders salientes Merkmal einer Rotation mit Deformation ist. Um einen Vergleich von zu schneller, zu langsamer und zu schneller plus zu langsamer Bildgeschwindigkeit zu ermöglichen, wurde nur ein Ausschnitt der Rotation eines dreidimensionalen Quaders gezeigt.

Methode

Beobachter

Zehn Studenten der Universität Bielefeld (3 Männer, 7 Frauen) nahmen gegen Bezahlung an dem Experiment teil. Das Alter lag zwischen 21 und 37 Jahren mit einem Mittelwert von 27.1 Jahren. Alle Teilnehmer hatten normale oder korrigierte Sehschärfe.

Stimuli und Apparatur

Die Stimuli wurden mit einer Silicon Graphics Indigo2 Workstation erzeugt und auf einem 48 cm (diagonal) großen Bildschirm mit einer Auflösung von 1280×1048 Pixel dargeboten. Jedes Bild wurde für 27.8 msec (36 Bilder/Sekunde) gezeigt, so daß sich bei 180 Bildern eine Dauer von 5 sec pro Animationssequenz ergab.

Simuliert wurde ein dreidimensionaler Raum bestehend aus einer schwarzen Projektionswand und zwei begrenzenden grauen Wänden, einem orangen Fußboden und einer blauen Decke. Dieser Raum wird im folgenden simulierter Raum genannt, der nicht mit der durch die optische Projektion eines Bildes spezifizierten Szene, dem virtuellen Raum, zu verwechseln ist. Die Projektionswand im simulierten Raum entspricht der Projektionsebene A. Sie war 2.4 graphische Einheiten (ge, $1 \text{ ge} \approx 8$ Winkelgrad) hoch und 14 ge breit. Auf der Projektionswand wurden durch orange Linien die horizontalen und vertikalen Ränder eines zentrierten, rechteckigen, 2.6 ge breiten und 1.4 ge hohen Fensters begrenzt. Die Linien waren bis zum Ende der Projektionswand durchgezogen und boten damit starke Hinweisreize auf die Neigung der Wand durch linearperspektivische Verzerrung. In jedem Versuchsdurchgang waren im oberen und unteren Teil des Bildschirms Teile des Fußbodens und der Decke sichtbar. Bei einem Blickwinkel von 45° waren Teile der umliegenden grauen Wände zu sehen.

In diesen simulierten Raum wurde ein virtueller Beobachter (oft auch virtuelle Kamera genannt) plziert. Die optische Information, die dem virtuellen Beobachter an dieser Position zur Verfügung stand, wurde auf den Bildschirm, die Projektionsebene B, projiziert (siehe Abbildung 2). Der Blick des virtuellen Beobachters in diesem Raum war in allen Bedingungen auf das Zentrum des Fensters gerichtet. Der virtuelle Beobachter

befand sich auf derselben Höhe wie das Zentrum des Fensters. Sein Abstand zum Fenster betrug 7 ge. Die Rotationsachse des virtuellen Beobachters war die Vertikale durch das Zentrum des Fensters. Eine Rotation des virtuellen Beobachters ist projektiv äquivalent zu einer Rotation des simulierten Raumes um dieselbe Achse, aber in die entgegengesetzte Richtung. Der Effekt ist in beiden Fällen eine Neigung der Projektionsebene A.

Auf das Fenster der Projektionswand wurden die Umrisse eines rotierenden, rechteckigen Festkörpers projiziert. Dieser Quader wurde 7 ge von der Projektionswand entfernt plaziert. Verdeckte Seiten des Objekts wurden nicht gezeigt, die Farbe der Umrisse des Objekts war weiß. Die Größe des Quaders variierte, zugrunde lag aber ein Quader der Größe $1.3 \times 1.0 \times 1.0$ ge entlang der x, y und z Achse. Gleich lange Seiten wurden vermieden, damit die Längen der projizierten Seiten nicht die Basis für Rigiditätsurteile bilden konnten. Zu Beginn eines Versuchsdurchganges war der Quader um 45° im Uhrzeigersinn gedreht, um zweidimensionale Hinweisreize, die sich aus dem Verhältnis von Rahmen und projiziertem Objekt ergeben, zu eliminieren. Um die Schwierigkeit der Aufgabe handhabbar zu halten, wurde die Startposition des Quaders nicht variiert. Das Objekt wurde auf das Fenster in der Projektionswand projiziert und auf eine Größe von ca. 1 ge skaliert. Der Quader hatte eine maximale vertikale Kantenlänge von 8° . Zwei Seiten des Quaders waren während eines Versuchsdurchganges sichtbar. Die linke Seite repräsentierte eine Längsseite des Quaders, die rechte Seite die kleinere Kopfseite. Die kleinere Kopfseite war wegen ihrer größeren Nähe zur Projektionsebene B salienter, d. h. ihre Projektion veränderte sich stärker bei einer Rotation des Objektes. Der Quader drehte sich während eines Versuchsdurchganges um 22.5° gegen den Uhrzeigersinn, d. h. um 0.125° pro Bild.

Design

Das Design hatte vier Faktoren. Der erste Faktor war die *Information über die Neigung der Projektionsebene*. Bei sichtbarem Raum wurde Information über die Neigung der Projektionsebenen durch die linear-perspektivische Deformation der Rahmenlinien, des Fußbodens und der Decke, sowie das Sichtbarwerden der umliegenden Wände bereitgestellt. Bei unsichtbarem simulierten Raum waren nur die Umrisse der Projektion des Quaders sichtbar, der Rest des Bildschirms war schwarz. Dieser Faktor wurde geblockt variiert. Die Reihenfolge der Präsentation des simulierten Raumes wurde über die Probanden hinweg ausbalanciert. Die Hälfte der Probanden sah zuerst den simulierten Raum, dann einen schwarzen Hintergrund, bei der anderen Hälfte wurde diese Reihenfolge umgekehrt. Der zweite Faktor war der *Blickwinkel*, der hier als Winkel zwischen der virtuellen Projektionswand und Beobachter verstanden

wird. Der Blickwinkel wechselte zufällig zwischen 90° , 67° , 45° und variablen 67° . Zur Verringerung des Blickwinkels wurde der virtuelle Beobachter gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Bei variablem Winkel war der anfängliche Winkel zwischen Wand und Beobachter 78.25° und wurde während des Durchgangs kontinuierlich um 22.5° auf 55.75° reduziert, d.h. der virtuelle Beobachter näherte sich gegen den Uhrzeigersinn der virtuellen Wand. Der dritte Faktor war der *Typ der affinen Deformation*. Die Deformation wurde implementiert, indem von den negativen x- oder z-Koordinaten des Quaders der Deformationsbetrag subtrahiert wurde, und derselbe Betrag zu den positiven x- oder z-Koordinaten addiert wurde. Es gab vier verschiedene Arten von Deformationen. (a) Der Quader expandierte und kontrahierte sinusförmig entlang einer Achse. Dieser Deformationstyp entspricht der affinen Deformation Cuttings mit der Ausnahme, daß die Deformation symmetrisch in beide Richtungen einer Achse erfolgte und damit zwei Seiten des Quaders betraf. Der *Deformationsbetrag* berechnete sich hier folgendermaßen:

$$(1) \text{ def} = \text{amp} \times (\cos(2i) - 1) \times -.5$$

wobei def den Deformationsbetrag bezeichnet, amp die Amplitude der Deformation angibt und i die Nummer des Bildes im Verlauf der Animationssequenz repräsentiert. Bei 180 Bildern bedeutet das, daß der Quader während eines Durchgangs einmal maximal deformiert wurde und mit dem letzten Bild seine Ausgangsform zurück erhalten hat. (b) Der Quader expandierte sinusförmig mit dem gleichen Deformationsbetrag wie bei einer sinusförmigen Expansion und Kontraktion aber ohne Umkehr der Richtung:

$$(2) \text{ def} = \text{amp} \times (\cos(2i) - 1) \times -.5 \text{ für } i < 90$$

$$(3) \text{ def} = \text{amp} + \text{amp} \times (\cos(2i - 180) - 1) \times -.5 \text{ für } i \geq 90.$$

(c) Der Quader expandierte mit gleichbleibender Geschwindigkeit:

$$(4) \text{ def} = 2 \times \text{amp} \times i / 180.$$

Die maximale Deformation bei Expansion und Kontraktion war halb so groß wie bei alleiniger Expansion, so daß der absolute Deformationsbetrag in beiden Bedingungen gleich war. Die im Vergleich zu einer einfachen $\text{def} = \sin(i) \times \text{amp}$ kompliziert erscheinende Berechnung des Deformationsbetrags bei (b) und (c) wurde gewählt, damit während einer Animationssequenz ein kompletter Zyklus von 360° durchschritten wird. Dadurch sind die Geschwindigkeitsverläufe der Bildpunkte für die vier Deformationstypen maximal voneinander verschieden. (d) Der Quader verformte sich nicht, sondern blieb starr. In dieser Bedingung variierte die Größe der starren Objekte zufällig zwischen den maximalen Größen der sich verformenden Objekte. Damit wurde gewährleistet, daß die Probanden eine Unterscheidung zwischen starren und deformierten Objekten nicht aufgrund der absoluten Größe der Objekte vornahmen. Der vierte

Faktor war die Stärke der Deformation, die zwischen .24 ge und .48 ge bei alleiniger Expansion (c, d) und entsprechend .12 und .24 bei Expansion und Kontraktion (b) variierte. Die Stärke der Deformation wurde manipuliert durch die Variation des Parameters amp, der entweder die Werte .12 oder .24 annehmen konnte. Die Bedingungen, in denen amp = .12 und amp = .24 war, werden im folgenden schwache und starke Deformation genannt. Die Achse der Deformation (z- oder x-Achse der kanonischen Koordinaten des Quaders) wurde balanciert über alle Bedingungen.

Die Probanden sahen jeweils 128 Versuchsdurchgänge: 2 Information über die Neigung der Projektionsebene (Raum sichtbar oder nicht) \times 4 simulierte Blickwinkel (90°, 67°, 45°, variable 67°) \times 4 Deformationstypen (lineare Expansion, sinusförmige Expansion, Expansion und Kontraktion, keine Deformation) \times 2 Deformationsstärken (.12/.24 und .24/.48) \times 2 Replikationen.

Prozedur

Die Probanden saßen in einem abgedunkelten Raum ca. 55 cm vor dem Bildschirm. Kopfbewegungen wurden nicht eingeschränkt. Zu Beginn eines Versuchsdurchganges wurde die Szene ohne Bewegung dargestellt, um zu gewährleisten, daß die Probanden die Hinweise auf den Blickwinkel registrieren. Die Animation der Szene wurde durch einen Mausklick von den Probanden selbst ausgelöst. Wie bei Cutting (1987) schätzten die Probanden die Rigidität der Quader auf einer Skala von 1—9 ein. 1 bedeutete Sicherheit, daß keine Deformation vorlag, 9 bedeutete Sicherheit, daß eine starke Deformation vorlag, 5 zeigte Mangel an Sicherheit an.

Die Probanden sahen zu Beginn 8 Übungsdurchgänge mit allen Deformationstypen entlang der beiden Achsen bei ungeneigter Projektionsebene. Während der Übungsdurchgänge gab der Versuchsleiter (VL) Rückmeldungen und beantwortete Fragen.

Ergebnisse

Wie Abbildung 3 zu entnehmen, wurde die Information, die mit Sichtbarkeit der Projektionswand gegeben ist, kaum/nicht genutzt, d. h. es gab keinen Haupteffekt der Sichtbarkeit der simulierten Projektionsebene. Wie zu erwarten war, hatte die tatsächliche Deformation des Quaders einen Effekt auf die subjektive Verformung, $F(1, 9) = 10.51$, $p < .01$. Bei einer stärkeren Deformation ($M = 5.36$) war die subjektive Verformung höher als bei einer schwächeren Deformation ($M = 4.72$). Die Sichtbarkeit der Projektionsebene hatte keinen Einfluß auf die wahrgenommene Rigidität, $F(1, 9) = 4.21$, $p = .07$.

Es gab einen Effekt des Neigungswinkels der Projektionsebene A, $F(3, 27) = 3.57$, $p < .05$. Scheffé-Tests zeigen, daß die Rigiditätsurteile bei 45°

Neigung ($M=4.38$) signifikant niedriger waren als bei 90° ($M=5.12$) und variabler 67° Neigung ($M=5.5$, $p < .01$). Der Effekt der Neigung der Projektionsebene A wurde modifiziert durch eine Interaktion mit der Sichtbarkeit der simulierten Projektionsebene A, $F(3, 27) = 7.02$, $p < .01$. Die Rigiditätsurteile bei variabler 67° Neigung und unsichtbarer Projektionsebene ($M=6.45$) waren höher als mit sichtbarer Projektionsebene ($M=5.08$, $p < .01$), während es bei einem Blickwinkel von 90° , 67° und 45° keinen Unterschied machte, ob die Projektionsebene sichtbar war. Abbildung 3 zeigt die Mittelwerte.

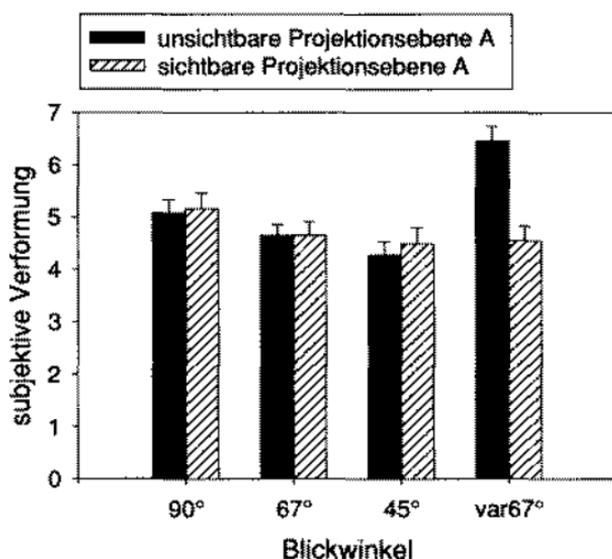


Abbildung 3: Durchschnittliche Rigiditätseinschätzungen als Funktion der Bildinformation über die Neigung der Projektionsebene und Sichtbarkeit der Projektionsebene in Experiment I. Die Skala erstreckte sich von 1 (keine subjektive Verformung) bis 9 (starke subjektive Verformung).

Die Stärke der Deformation und der Typ der Deformation interagierten signifikant, $F(2, 18) = 4.69$, $p < .05$. Die subjektive Verformung war bei einer Expansion und Kontraktion und starken Deformation ($M=6.48$) höher als bei sinusförmiger Expansion und Kontraktion und schwacher Deformation ($M = 5.26$, $p < .01$), während die Urteile bei linearer Expansion und sinusförmiger Expansion für die beiden Deformationsstärken nicht verschieden waren.

Der Typ der Deformation beeinflusste die wahrgenommene Rigidität, $F(3, 27) = 10.51$, $p < .01$. Die wahrgenommene Rigidität bei linearer Ex-

pansion ($M=4.52$), sinusförmiger Expansion und Kontraktion ($M=4.73$), und Rotation ohne Kontraktion ($M=4.53$) unterschieden sich nicht voneinander, waren aber signifikant von der Bedingung mit sinusförmiger Expansion und Kontraktion verschieden ($M=5.28$, $p < .01$).

Diskussion

Der Haupteffekt der Neigung der Projektionsebene ist auf eine höher eingeschätzte Rigidität mit kleineren Blickwinkeln zurückzuführen. Bei stärkerer perspektivischer Verzerrung sind die Objektdeformationen also schwerer zu erkennen. Dieses Ergebnis repliziert die Befunde aus Cuttings (1987) zweitem Experiment.

Die Interaktion der Information über die Neigung der Projektionsebene mit dem Neigungswinkel der Projektionsebene A geht im wesentlichen darauf zurück, daß die wahrgenommene Rigidität in der Bedingung mit variabler Neigung der Projektionsebene bei sichtbarem simulierten Raum höher eingeschätzt wurde als bei unsichtbarem Raum. Hier zeigt sich deutlich, daß die Probanden die Information über die Neigung der Projektionsebene zu einer Kompensationsleistung verwendeten. Im besonderen legt dieses Ergebnis die Vermutung nahe, daß aufgrund der sichtbaren Projektionsebene zwischen einer Verformung des Quaders und einer perspektivischen Verzerrung aufgrund der kontinuierlichen Neigung der Projektionsebene unterschieden werden konnte.

Der Haupteffekt des Deformationstyps zeigt, daß die sinusförmige Expansion und Kontraktion reliabel hervortritt, und zwar besonderes bei starken Deformationen. Der hauptsächliche Unterschied zwischen den Deformationstypen war, daß nur die sinusförmige Expansion und Kontraktion eine Umkehr der Deformationsrichtung aufwies. Ein variabler Deformationsverlauf bei einer unidirektionalen Deformation, wie er in der Bedingung mit sinusförmiger Expansion gegeben war, scheint hingegen nicht salient zu sein. Um Aufschluß darüber zu gewinnen, welche Information die Beobachter für ihre Urteile benutzt haben könnten, liegt es nahe, den horizontalen Geschwindigkeitsverlauf einzelner Bildpunkte auf Projektionsebene A zu betrachten. Wie Norman und Todd (1993) gezeigt haben, sind Beobachter sensibel für die relative Phasen der Geschwindigkeiten einzelner Bildpunkte sowie auch deren Beschleunigungsverlauf. Es ist daher möglich, daß unsere Beobachter die Geschwindigkeits- oder Beschleunigungsverläufe der Bildpunkte als Basis für ihre Einschätzungen benutzt haben. Viele der Probanden berichteten, daß sie besonders auf die ihnen zugewandte Kante des Quaders geachtet haben. Abbildung 4 zeigt die Geschwindigkeiten der dem Beobachter zugewandten Ecke bei einer Deformation entlang der x-Achse. Da der Quader nicht

um die z-Achse rotiert wurde, sind die horizontalen Bildgeschwindigkeiten der gesamten vertikalen Kante des Quaders gleich. Der Geschwindigkeitsverlauf bei einer Rotation ohne Deformation ist ungefähr linear, da nur ein kurzer Ausschnitt (22.5°) der Rotation gezeigt wurde.

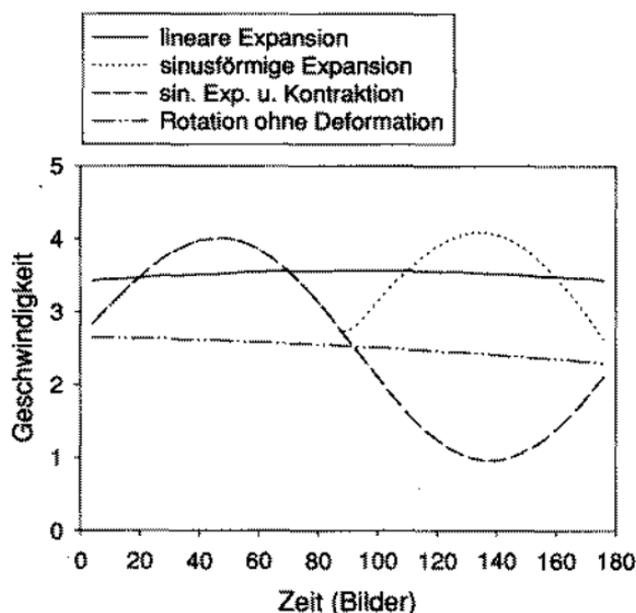


Abbildung 4: Momentane Geschwindigkeiten eines Bildpunktes entlang der x-Achse (willkürliche Einheiten) in Abhängigkeit vom Deformationstyp über den Verlauf einer Animationssequenz (180 Bilder) hinweg. Der Bildpunkt repräsentiert die Kante, die dem Beobachter zugewandt ist. Die Deformation erfolgt entlang der x-Achse. Für die anderen Kanten und bei Deformation entlang der z-Achse ergibt sich ein qualitativ ähnlicher Verlauf. Der Geschwindigkeitsverlauf der sinusförmigen Expansion und der sinusförmigen Expansion & Kontraktion ist bis zum 90. Bild identisch.

Abbildung 4 zeigt, daß der Geschwindigkeitsverlauf bei einer linearen Expansion dem bei einer Rotation ohne Deformation relativ ähnlich ist, während es große Unterschiede zwischen den sinusförmigen Deformationstypen und der Rotation ohne Deformation gibt. Eine Sensibilität für den Beschleunigungsverlauf hingegen hätte gleichermaßen eine Diskrimination der sinusförmigen Expansion wie auch der sinusförmigen Expansion und Kontraktion ermöglichen müssen, da die Beschleunigungsverläufe für diese Bedingungen — bis auf eine Umkehr des Vorzeichens ab dem 90. Bild — sehr ähnlich sind. Im Gegensatz zur sinusförmigen Expansion weicht die Geschwindigkeit des Bildpunktes bei einer sinusförmigen

gen Expansion und Kontraktion in beide Richtungen von der Geschwindigkeit bei einer Rotation ohne Deformation ab. Das heißt, daß die Geschwindigkeit des Bildpunktes während einer Animationssequenz sowohl langsamer als auch schneller als die Geschwindigkeit bei einer Rotation ohne Deformation war. Daraus kann geschlossen werden, daß die Beobachter nicht den Beschleunigungsverlauf, sondern den Geschwindigkeitswechsel von einer zu hohen zu einer zu niedrigen Geschwindigkeit bei der sinusförmigen Expansion und Kontraktion als Hinweisreiz nutzten. Insgesamt ist damit gezeigt, daß der Geschwindigkeitsverlauf bei den Rigiditätsurteilen das Muster der Resultate gut erklärt.

Eine Rekonstruktion der dreidimensionalen Struktur der Quader ist hingegen weniger plausibel, da die Probanden die anderen Deformationen (die doppelt so stark waren) nicht reliabel erkannt haben. Dieser Befund stellt die Folgerungen in Frage, die Cutting (1987) aus seinen Experimenten zog. Cutting legte den Nulleffekt der Neigung der Projektionsebene als Beweis für seine Indiskriminationshypothese aus. Seiner Meinung nach sollten Stimuli, die auf eine unsichtbare Projektionsebene abgebildet werden, an wahrgenommener Rigidität verlieren, wenn diese geneigt ist. Im Licht der vorliegenden Ergebnisse ist es aber plausibel anzunehmen, daß die wahrgenommene Rigidität nicht von der Neigung der Projektionsebene beeinflusst wurde, weil die Probanden keine Rekonstruktion des virtuellen Raumes vornahmen und somit auch die affinen Verzerrungen des virtuellen Raumes irrelevant waren.

Die Nutzung der Geschwindigkeitsänderung als Hinweisreiz für Deformation erklärt zudem, weshalb die eingeschätzte Rigidität mit stärkerer Neigung der Projektionsebene ansteigt. Durch den kleineren Blickwinkel verkürzt sich die Projektion des Quaders in der horizontalen Richtung. Diese Verkürzung ist der Kosinus der Winkeldifferenz zwischen dem Normalenvektor der Projektionsebene und dem Blickwinkel (Perkins, 1973). Bei einem Blickwinkel von 67° beträgt diese Verkürzung 7.6%, bei einem Blickwinkel von 45° schon 29.2%. Mit der horizontalen Verkürzung werden auch die Bildgeschwindigkeiten auf Projektionsebene B und damit auch das Ausmaß der Geschwindigkeitsänderung geringer und damit schwerer zu erkennen.

Die Ergebnisse von Experiment I lassen sich folgendermaßen zusammenfassen. Beobachter benutzen bei variabler Neigung der Projektionsebene Information über deren Neigung zurückgehen, um die Verzerrungen, die auf die Veränderung der Neigung von einer Deformation des abgebildeten Objekts zu unterscheiden. Die gute Diskrimination der sinusförmigen Expansion und Kontraktion läßt darauf schließen, daß die Probanden keine aktive Rekonstruktion des virtuellen Raumes vornehmen, sondern auf den Verlauf der Bildgeschwindigkeiten achten. Im fol-

genden soll geklärt werden, wie gut die Kompensationsleistung ist und ob die Komplexität der Simulation einen Einfluß hat.

Experiment II

Mit diesem Experiment wurden zwei Ziele verfolgt. Erstens sollte untersucht werden, wie gut Beobachter Informationen über die Neigung der Projektionsebene dazu verwenden, perspektivische Verzerrungen zu kompensieren. Da Studien mit statischen Reizen (z. B. Perkins 1973, 1972; Rosinski & Farber, 1978) die Wahrnehmungsleistung potentiell unterschätzen, wurde diese Frage für eine kontinuierliche Veränderung des Neigungswinkels gestellt. Ausgangspunkt dafür ist der Befund aus Experiment I, daß Probanden Information über die Projektionsebene bei deren kontinuierlicher Neigung zu einer Kompensationsleistung nutzten. Anstatt wie in Experiment I die Verformung eines sich rotierenden Quaders zu entdecken, sollten die Probanden in diesem Experiment die Rotation eines Quaders einschätzen, während sich der virtuelle Beobachter bewegte. Grund für diese Veränderung der abhängigen Variablen war die Notwendigkeit, auch bei einem dreidimensionalen Quader (s.u.) eine Aufgabe zu wählen, die Rückschlüsse auf die Kompensationsleistung der Probanden zuließ. Wie in Experiment I bestand die Bewegung des virtuellen Beobachters aus einer Rotation um eine Achse, die vertikal durch die Mitte des simulierten Fensters verlief. Durch diese Bewegung gab es zwei qualitativ unterschiedliche Arten von Transformationen der sichtbaren virtuellen Wand.

Die erste Transformation betrifft die projizierte Form der abgebildeten Objekte. Bei einer Annäherung des virtuellen Beobachters an die Projektionsebene verändert sich die vertikale Ausdehnung der virtuellen Projektionswand. Zudem ergibt sich eine horizontale Verkürzung der projizierten Form. Die zweite Art der Transformation betrifft die horizontale Geschwindigkeit der projizierten Bildpunkte. Bildpunkte auf Projektionsebene A, die simulierten Objektpunkten entlang der positiven x-Achse im Beobachterkoordinatensystem (rechts zur Blickrichtung) entsprechen, bewegen sich nach links, die auf der negativen x-Achse (links zur Blickrichtung) hingegen nach rechts.

Der abgebildete Quader erfährt dieselben perspektivischen Verzerrungen wie die virtuelle Wand. Durch eine Rotation des auf Projektionsebene A abgebildeten Quaders entstehen zusätzliche Verzerrungen, die die perspektivischen Transformationen aber entweder kompensieren oder verstärken können. Eine Rotation des Quaders in eine der Bewegung des Beobachters entgegengesetzte Richtung führt zu einer Verringerung der

horizontalen Verkürzung der salienten rechten Seite, während ihre Bildgeschwindigkeit auf Projektionsebene B dadurch erhöht wird. Eine Rotation in dieselbe Richtung wie die Bewegung des Beobachters führt zu einer Verstärkung der horizontalen Verkürzung der salienten rechten Seite, während die Geschwindigkeit der Bildpunkte dadurch verringert wird.

Aufgabe des Beobachters war es somit, die perspektivische Verzerrung des Quaders vor dem Hintergrund der linear-perspektivischen Verzerrung der virtuellen Wand zu „skalieren“, um die Rotation des Quaders richtig einschätzen zu können. Nur bei angemessener perspektivischer Transformation des Quaders (Form und Bildgeschwindigkeit) wird bei einer Rekonstruktion der orthogonalen Ansicht, d. h. bei einer Kompensation der Neigung der Projektionsebene, ein stationäres Objekt spezifiziert. Die gefundene Kompensation für bewegungsinduzierte perspektivische Verzerrungen in Experiment I läßt zunächst vermuten, daß die Probanden auch hier zu einer Kompensation und der damit verbundenen Einschätzung der relativen Form und Bildgeschwindigkeit in der Lage sind. Eine entgegengesetzte Vorhersage kann aus der Hypothese Kubovys (1986), daß Kompensation auf die primäre Projektionsebene beschränkt ist, abgeleitet werden. Da nicht die primäre Projektionsebene, also der Bildschirm, geneigt wird, sondern eine simulierte Projektionsebene, sollte eine Kompensation ausbleiben.

Zweitens sollte untersucht werden, ob die Genauigkeit der Urteile über den virtuellen Raum von der Komplexität der Simulation beeinflusst wird. Dazu wurde eine einfache Projektion mit einer doppelten verglichen. Falls eine Kompensation stattfindet und die Komplexität der Simulation verringert wird, indem nur eine Projektion vorgenommen wird, dann sollte die Kompensation leichter fallen und genauer sein. Im Gegensatz dazu macht die Hypothese der Array-Spezifität die Voraussage, daß die optisch verfügbare Information und nicht die Komplexität der Rekonstruktion entscheidend ist. Um diese Frage zu klären, wurde in einer weiteren Bedingung ein dreidimensionaler Quader an die Stelle des auf die virtuelle Leinwand projizierten Quaders gesetzt (siehe Abbildung 5). Dieser Quader wurde durch nur eine Projektion abgebildet und war damit ein dreidimensionales Objekt im simulierten Raum. Der doppelt projizierte Quader war hingegen ein Bild eines Quaders im simulierten Raum und nur im auf der Projektionsebene A abgebildeten virtuellen Raum ein dreidimensionales Objekt (vgl. Abbildung 2 mit Abbildung 5). Die Beobachter sollten einschätzen, ob dieser simulierte dreidimensionale Quader rotiert oder stationär bleibt. Dazu mußten die Beobachter Information, die die linear-perspektivische Verzerrung einer geneigten Wand im simulierten Raum bietet, nutzen, um die Position des virtuellen Beobachters relativ zu einem simulierten dreidimensionalen Objekt zu bestimmen.

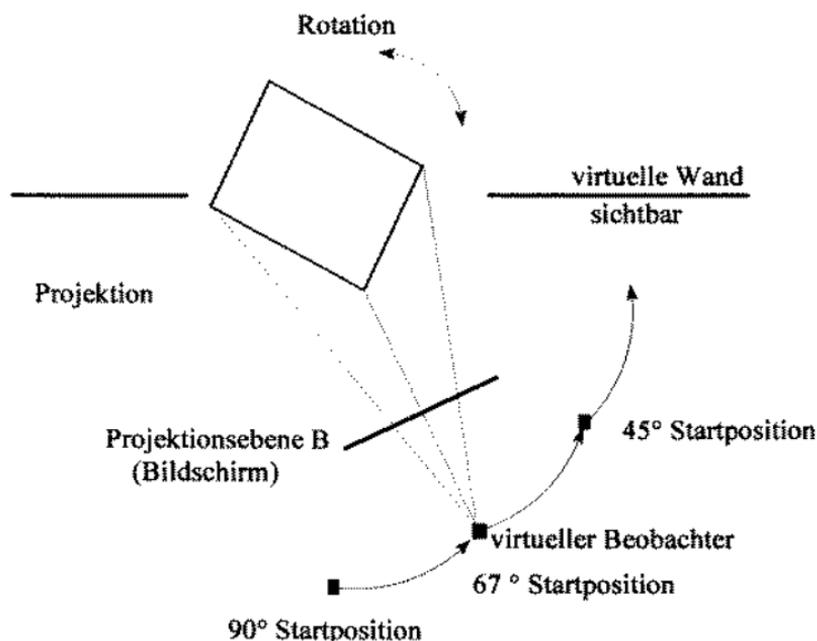


Abbildung 5: Einfache Projektion eines dreidimensionalen Quaders auf den Bildschirm. Der virtuelle Beobachter bewegt sich von drei Startwinkeln aus durch den simulierten Raum. Die Startposition von 90° entspricht einer orthogonalen Aufsicht, die die erste Projektion unverzerrt läßt.

Methode

Zehn Studenten der Universität Bielefeld (5 Männer, 5 Frauen) nahmen gegen Bezahlung an dem Experiment teil. Das Alter lag zwischen 21 und 34 Jahren mit einem Mittelwert von 27.1 Jahren. Alle Teilnehmer hatten normale oder korrigierte Sehschärfe. Sie hatten nicht an Experiment I teilgenommen.

Stimuli und Apparatur

Stimuli und Apparatur waren dieselben wie in Experiment I mit zwei Ausnahmen. Erstens wurden die Rotationsrichtung und das Ausmaß der Rotation variiert. Zweitens wurde eine weitere Art von Quader hinzugefügt. Außer dem doppelt projizierten Quader aus Experiment 1, also dem Bild eines Quaders im simulierten Raum, wurde in einer Bedingung an derselben Stelle im simulierten Raum ein dreidimensionaler Quader gezeigt (s. Abbildung 5). Als Rotationsachse des dreidimensionalen Quaders wurde die Vertikale durch den Mittelpunkt des Fensters gewählt. Auf der

Projektionsebene B, dem Bildschirm, war die perspektivische Verzerrung und die Größe für den dreidimensionalen Quader und das Bild des Quaders gleich. Um zu vermeiden, daß die dem Beobachter zugewandte vordere Kante des projizierten Quaders auf die vertikale Mittellinie des Fensters projiziert wurde, wurden zufällig Quader der Größe $1.6 \times 1.0 \times 1.0$ und $2.0 \times 1.0 \times 1.0$ verwendet. Da der Blick des virtuellen Beobachters bei der simulierten Bewegung auf den Mittelpunkt des Fensters gerichtet war, wäre eine auf die vertikale Mittellinie des Fensters projizierte Kante im Falle eines stationären Quaders unbewegt geblieben. Bei einer Rotation des Quaders hätte sie sich hingegen bewegt. Dies hätte einen eindeutigen zweidimensionalen Hinweisreiz auf die Bewegung des Quaders geliefert.

Design

Die Versuchspersonen sahen jeweils 54 Durchgänge für den dreidimensionalen Quader und das Bild des Quaders: 3 Startwinkel (90° , 67° , 45°) \times 3 Rotationsrichtungen (inkongruente, kongruente Rotation, keine Rotation) \times 3 Stärken der Rotation (5° , 10° , 15°) \times 2 Replikationen.

Der erste Faktor war der anfängliche Winkel des virtuellen Beobachters zur Wand. Der *Startwinkel* konnte entweder 90° , 67° oder 45° betragen. Wie in der variablen 67° -Bedingung von Experiment I wurde der Blickwinkel während der Animation kontinuierlich um 22.5° verringert. Die horizontale Verkürzung der simulierten Wand während einer Animationssequenz ist je nach Startwinkel verschieden. Da die Verkürzung als Kosinus des Winkels zwischen dem Normalenvektor zur simulierten Projektionsoberfläche und dem Blickwinkel variiert, beträgt die Verkürzung am Ende der Sequenz 7.6%, 29.3%, 61.7% jeweils bei einem Startwinkel von 90° , 67° und 45° . Bei einem Startwinkel von 90° ist die Verkürzung der Wand so gering, daß eine Rotation des Bildes des Quaders offensichtlich ist. Trotzdem wurde diese Bedingung aus Symmetriegründen auch für das Bild des Quaders gezeigt. Bei einem Startwinkel von 45° verdeckte im Laufe der Animationssequenz die rechte vertikale Rahmenlinie einen Teil des Quaders. Der zweite Faktor war die *Rotationsrichtung* des Quaders. Die Quader konnten entweder nicht, in dieselbe Richtung wie der virtuelle Beobachter oder in die entgegengesetzte Richtung rotieren. Die drei Bedingungen werden im folgenden keine Rotation, kongruente Rotation und inkongruente Rotation genannt. Als dritter Faktor wurde die *Stärke der Rotation* des Quaders zwischen 5° , 10° und 15° variiert. Der letzte Faktor betraf nur rotierende Objekte. Die Hälfte der Probanden sahen zuerst den dreidimensionalen Quader und dann ein Bild des Quaders, bei der anderen Hälfte wurde diese Reihenfolge umgekehrt.

Prozedur

Die Prozedur war wie in Experiment I mit folgenden Ausnahmen: Die Versuchspersonen sahen vor jedem Block 12 Übungsdurchgänge mit der Objektart des folgenden Blockes. Der VL gab während der Übungsdurchgänge Rückmeldungen und beantwortete Fragen. Es wurde betont, daß nicht die projizierte Bewegung des Quaders zu beurteilen war, sondern die Rotation des Quaders bzgl. seiner Raumkoordinaten.

Des weiteren wurde die Schätzskala modifiziert. Die Probanden schätzten die Rotation der Quader auf einer Skala von 1—9 ein. 1 bedeutete Sicherheit, daß keine Rotation vorlag, 9 bedeutete Sicherheit, daß eine starke Rotation vorlag, 5 zeigte Mangel an Sicherheit an.

Ergebnisse

Es wurden separate Varianzanalysen für den dreidimensionalen Quader und das Bild des Quaders durchgeführt. Die Reaktionen der Probanden wurden für jeden Objekttyp einer Varianzanalyse mit Meßwiederholung auf drei Faktoren unterworfen.

Bild des Quaders: Wie zu erwarten, war der Effekt der Rotationsstärke signifikant, $F(2, 18) = 109.73$, $p < .01$. Die geschätzte Rotation war bei einer tatsächlichen von 15° ($M=5.82$) bedeutsam höher als in Bedingungen mit einer Rotation von 10° ($M = 4.36$) und 5° ($M=3.8$), die sich nicht voneinander unterschieden. Die dreifache Interaktion von Rotationsstärke, Startwinkel und Rotationsrichtung wurde signifikant, $F(4, 36) = 6.02$, $p < .01$. Sie ist im wesentlichen dadurch bedingt, daß innerhalb des Startwinkels von 45° die kongruente Rotation um 15° , ($M=6.6$) signifikant verschieden war von der kongruenten Rotation um 5° , ($M=3.2$) und der inkongruenten Rotation um 5° ($M=2.75$), 10° ($M=2.6$) und 15° ($M=2.3$, $p < .01$). In den Bedingungen mit einem Startwinkel von 67° und 90° gab es keinen ähnlich markanten Unterschied.

Der Effekt des Startwinkels war signifikant, $F(2, 18) = 7.63$, $p < .01$. Bei einem Startwinkel von 90° ($M=4.81$) und 67° ($M=4.35$) waren die Rotationsurteile signifikant höher als bei einem Startwinkel von 45° ($M=3.48$, $p < .01$).

Die Rotationsrichtung übte einen signifikanten Einfluß auf die Rotationsurteile aus, $F(2, 18) = 34.97$, $p < .01$. Die Rotationsurteile waren bei einer kongruenten Rotation ($M=5.86$) höher als bei stationärem Objekt ($M=3.32$) sowie inkongruenter ($M=3.46$, $p < .01$) Rotation. Die zuletzt genannten Bedingungen unterschieden sich nicht.

Ferner gab es eine Interaktion des Startwinkels mit der Rotationsrichtung, $F(2, 16) = 12.73$, $p < .01$. Bei einem Startwinkel von 90° ergaben sich signifikant höhere Urteile für die kongruente Rotation als für das statio-

näre Objekt und die inkongruente Rotation ($M=6.83$ vs. $M=2.72$ und $M=4.89$), desgleichen bei 67° ($M=6.05$ vs. $M=2.95$ und $M=4.02$, $p < .01$). In der 45° Bedingung verschwand der Unterschied der kongruenten Rotation ($M=4.69$) zum stationären Objekt ($M=3.21$), nicht aber zur inkongruenten Rotation ($M=2.55$, $p < .01$).

Dreidimensionaler Quader: Der Effekt der Rotationsstärke war signifikant, $F(2, 18) = 18.1$, $p < .01$. Die Rotation um 15° ($M=5.23$) unterschied sich von der Rotation um 5° ($M=4.45$, $p < .01$). Die Rotation um 10° ($M=3.84$) unterschied sich weder von der 15° noch von der 5° Bedingung. Abbildung 6 zeigt die subjektiven Rotationsurteile als Funktion von Rotationsrichtungen und Objekttyp.

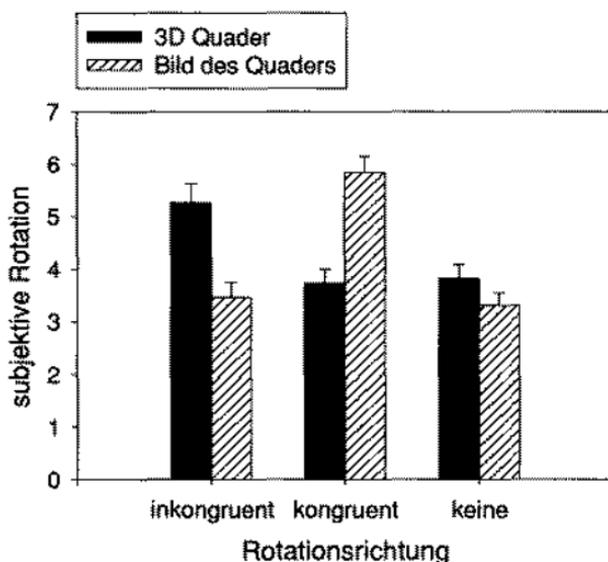


Abbildung 6: Mittlere Rotationsurteile als Funktion der Rotationsrichtung und des Objekttyps in Experiment II. Die Skala erstreckte sich von 1 (keine subjektive Rotation) bis 9 (starke subjektive Rotation).

Der Effekt des Startwinkels war nicht signifikant, $F(2, 18) = 3.29$, $p < .06$. Die Rotationsrichtung übte einen signifikanten Einfluß auf die Rotationsurteile aus, $F(2, 18) = 34.97$, $p < .01$. Die Urteile in der Bedingung mit einer inkongruenten Rotation ($M=5.28$, $p < .01$) waren signifikant höher als bei einer kongruenten Rotation ($M=3.74$) und einem stationären Objekt ($M=3.83$), die sich nicht voneinander unterschieden.

Ferner gab es eine Interaktion des Startwinkels mit der Rotationsrichtung, $F(4,36) = 12.88$, $p < .01$. Bei einem Startwinkel von 90° waren die Urteile bei einer inkongruenten Rotation ($M=6.35$) höher als bei einer

kongruenten ($M=3.31$) und keiner Rotation ($M=4.36$, $p < .01$). Bei 67° verhielt es sich ebenso ($M=6.21$ vs. $M=3.4$ und $M=3.7$, $p < .01$). Bei 45° verschwand dieser Unterschied ($M=3.27$ vs. $M=4.47$ und $M=3.41$).

Diskussion

Der Effekt der Rotationsstärke belegt, daß die Probanden gut zwischen den unterschiedlich starken Rotationen unterscheiden konnten. Der Effekt des Startwinkels für das Bild des Quaders zeigt, daß bei einem kleinen Startwinkel und damit bei starker perspektivischer Verzerrung die Rotation des Objektes schwerer zu erkennen war. Dies ist konsistent mit der größeren Schwierigkeit in Experiment I, Deformationen bei starker Neigung der Projektionsebene zu entdecken.

Die Interaktionen mit dem Startwinkel können als Artefakte der speziellen Stimuluskonfiguration aufgefaßt werden. Das unterschiedliche Ausmaß der horizontalen Verkürzung bei den verschiedenen Startwinkeln und die Überlappung von Rahmenlinie und dreidimensionalem Objekt in der 45° Bedingung erzeugten Asymmetrien, die die Interaktionen erklären können. Die dreifache Interaktion von Startwinkel, Rotationsstärke und Rotationsrichtung für das Bild des Quaders kann auf das extreme Ausmaß an Verzerrung in der 45° Bedingung zurückgeführt werden, da eine kongruente Rotation des Bildes um 15° die saliente rechte Seite so stark verkürzt, daß sie fast verschwindet. Die Interaktion von Startwinkel und Rotationsrichtung ist für das Bild des Quaders auf signifikant höhere Rotationsurteile bei einer inkongruenten Rotation mit einem Startwinkel von 90° und 67° und dem Verschwinden dieser Differenz bei 45° zurückzuführen. Wie Experiment I zeigt, mag dies in der Schwierigkeit begründet sein, bei einer extremen Verzerrung Unterschiede wahrzunehmen. Für den dreidimensionalen Quader ist die Interaktion von Startwinkel und Rotationsrichtung durch signifikant höhere Rotationsurteile bei einer kongruenten Rotation mit einem Startwinkel von 90° und 67° , und das Ausbleiben dieses Unterschieds bei 45° zu erklären. Hier liegt die Vermutung nahe, daß die Probanden das Fehlen einer Überlappung von Rahmenlinie und Objekt als Hinweis für eine kongruente Rotation genommen haben. Es ist anzunehmen, daß diese Hinweisreize bei unterschiedlichen Rotationsstärken verschieden gewirkt haben. Insgesamt erscheint jedoch eine inhaltliche Interpretation der Interaktionen mit dem Startwinkel nicht geboten.

Der Effekt der Rotationsrichtung ist von theoretischem Interesse und wird zunächst für das Bild des Quaders und dann für den dreidimensionalen Quader diskutiert. Die Urteile für das Bild des Quaders unterschieden sich nur bei einer kongruenten Rotation von den Urteilen bei einem sta-

tionären Objekt. Die inkongruente Rotation ist hingegen nicht von der Bedingung ohne Rotation verschieden. Dieser Umstand läßt sich durch die Analyse der Auswirkungen einer inkongruenten Rotation auf projizierte Information verstehen. Durch eine inkongruente Rotation wird die in der Ausgangsposition des Quaders saliente rechte Kopfseite weiter zur simulierten Projektionsebene gedreht. Die Projektion dieser Seite wird dadurch breiter und kompensiert die Verkürzung entlang der Horizontalen, die durch die Verkleinerung des Blickwinkels auftritt (s. Abbildung 7). Die Stimulussituation entspricht damit Beispielen aus der anamorphischen Kunst, wo ein verzerrtes Bild bei einer extremen Neigung

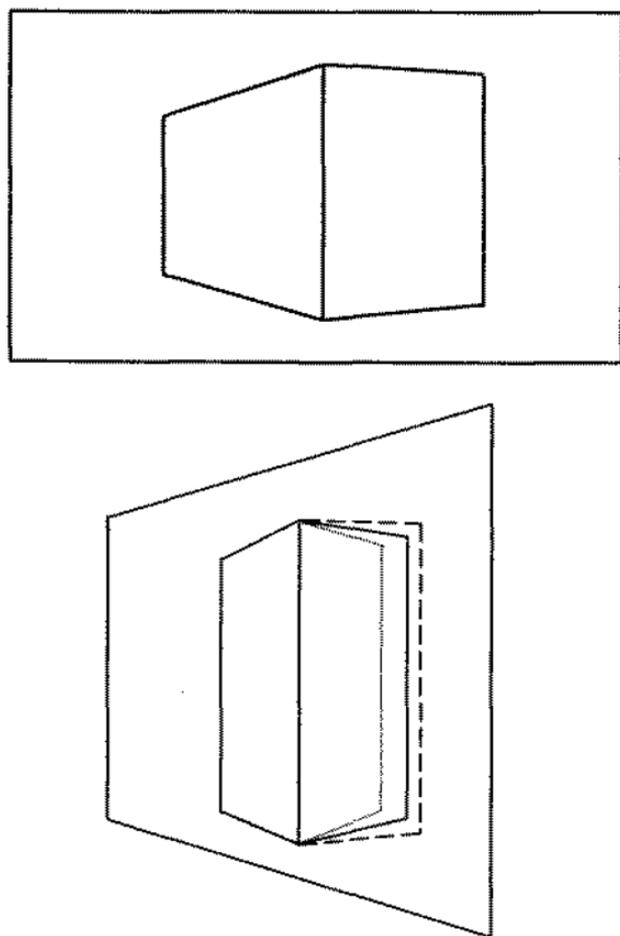


Abbildung 7: Oben die frontale Ansicht des abgebildeten Quaders, unten die Seitenansicht mit horizontaler Verkürzung. Unten ist ebenfalls der Einfluß einer inkongruenten (- - -) und einer kongruenten (...) Rotation auf die Form des abgebildeten Quaders dargestellt.

des Bildes unverzerrt erscheint (Gombrich, 1960, 1972). In diesem Falle bleiben bei einer inkongruenten Rotation die horizontalen Ausmaße der rechten sichtbaren Seite des Quaders auf der Projektionsebene B erhalten, allerdings ist die Bildgeschwindigkeit der Seite zu groß.

Es läßt sich für die Wahrnehmung des Bildes des Quaders folgern, daß nur lokale (Form-)Information für die Einschätzung der Rotation benutzt wird. Insbesondere wird der Kontext der perspektivischen Verzerrung (relative Bildgeschwindigkeiten) der Projektionsebene A nicht dazu benutzt, zu bestimmen, ob die Veränderung der Projektion des Quaders angemessen ist. Die Abhängigkeit der Urteile von lokaler Information im optischen Array spricht für die Hypothese der Array-Spezifität. Da es sich um eine simulierte Projektionsebene handelt, sind die Ergebnisse mit Kubovys Annahme vereinbar, daß Kompensation nur für die primäre Projektionsebene eintritt. Trotzdem ist die fehlerhafte Kompensation aus drei Gründen überraschend.

Erstens hat Perkins (1973) eine gute Kompensationsleistung bei statischen Bildern für Neigungen der Projektionsebene gefunden, die ebenso extrem waren (64° und 49° entsprechend unserem Maß) wie die hier verwendeten Neigungen der simulierten Projektionsebene (s. o.). Zweitens lag Information über die Veränderungen der Projektionsebene über die Zeit vor. Dieser Umstand sollte mit Gibson (1979) eine Extraktion von Invarianten über den Wechsel hinaus ermöglichen. Aufgrund dieser Invarianten sollte eine Diskrimination eines unveränderten Bildes von einem durch eine Rotation des abgebildeten Objektes veränderten Bildes möglich sein. Drittens wurde in Experiment I gefunden, daß die Beobachter bei einer variablen Neigung der Projektionsebene A Information über die Neigung der Projektionsebene zu einer Kompensationsleistung benutzten. Dies ist scheinbar ein Widerspruch zu den Ergebnissen dieses Experiments. Allerdings gibt es entscheidende Unterschiede zwischen den Stimuli und den Aufgaben in den beiden Experimenten. Bei einer Veränderung des Beobachtungspunktes in der variablen 67° Bedingung in Experiment I erfolgte eine perspektivische Transformation der Projektion des Quaders. Die Information über die Neigung der Projektionsebene wurde dazu verwendet, diese perspektivische Transformation des Stimulus bei variabler Neigung der Projektionsebene von einer Deformation des Objektes zu unterscheiden. Im vorliegenden Experiment bestand die Aufgabe der Probanden hingegen darin, die perspektivische Transformation des Stimulus auf seine Stimmigkeit mit der Transformation der Projektionsebene zu überprüfen. Dies erfordert eine feinere Differenzierung der Stimuli. Die unterschiedlichen Befunde lassen sich also erklären, wenn ein grob arbeitender Kompensationsmechanismus angenommen wird, der bei feineren Unterscheidungen versagt.

Der kongruent rotierende dreidimensionale Quader wurde nicht als stärker rotierend wahrgenommen als ein stationäres Objekt. Nur die inkongruente Rotation wurde erkannt. Hier ist es aufschlußreich, die Effekte einer Rotation des dreidimensionalen Objektes und einer Bewegung des virtuellen Beobachters genauer zu analysieren. Bezüglich der auf den Bildschirm projizierten Rotation des Quaders ist diese einer Rotation des virtuellen Beobachters um den Quader äquivalent. Bei einer gleichzeitigen Rotation von Beobachter und Quader kann sich der Quader entweder in dieselbe Richtung wie der Beobachter drehen, wodurch sich die projizierte Rotation vergrößert, oder in die entgegengesetzte Richtung, wodurch sich die projizierte Rotation verringert. Die Verzerrung der Wand spezifiziert aber, wie stark die (projizierte) Rotation des Quaders sein müßte, wenn der Quader stationär wäre. Bei einer zu großen projizierten Rotation liegt dementsprechend eine inkongruente Rotation vor, bei einer zu kleinen projizierten Rotation hingegen eine kongruente Rotation.

Die Ergebnisse sind mit einer Strategie konsistent, diejenigen Quader als stationär zu beurteilen, die sich auf dem Bildschirm nicht bewegen, d. h. bei denen eine geringe projizierte Rotation vorliegt. Damit erweisen sich die Beobachter als nicht in der Lage, die Hinweisreize über die relative Position zum Quader, die die perspektivische Verzerrung der Wand bietet, vollständig zur Einschätzung der Rotation des Quaders zu gebrauchen.

Insgesamt macht dieses Experiment deutlich, daß die Beobachter Informationen, die in der perspektivischen Verzerrung enthalten sind, nicht vollständig nutzen. Bei abgebildeten Quadern wurde in Bedingungen, in denen die projizierte Form des Quaders bewahrt wurde, eine geringe Rotation wahrgenommen. Bei den dreidimensionalen Objekten waren es diejenigen Bedingungen, die ein geringes Maß an projizierter Rotation aufweisen, in denen eine geringe Rotation wahrgenommen wurde. Die eingeschätzte Rotation war damit in beiden Fällen arrayspezifisch, d. h. lokale optische Information über die zu beurteilenden Objekte übte einen starken Einfluß auf die Urteile der Beobachter aus. Konsistent mit der Hypothese der Array-Spezifität beeinflusste die Komplexität der Simulation (einfache vs. doppelte Projektion) die Angemessenheit der Urteile nicht. Eine Rekonstruktion des virtuellen Raumes, die bei nur einer Projektion einfacher ist, hat damit nicht stattgefunden.

Experiment III

Mit diesem Experiment wurden zwei Ziele verfolgt. Erstens sollte die Hypothese Kubovys (1986), daß die Kompensationsleistung sich auf die Neigung der primären Projektionsebene beschränkt, getestet werden. Ex-

periment II stützt diese Annahme partiell, da eine Kompensation für eine sekundäre Projektionsebene, im gegebenen Fall die simulierte Projektionsebene, ausblieb. Es ist jedoch denkbar, daß eine weniger künstliche Umgebung die Kompensationsleistung verbessert. Bei einer Kinoleinwand sind ja ungleich mehr Hinweisreize über deren Neigung vorhanden als in unseren und Cuttings Simulationen. Um diese Hypothese zu testen, wurde die Neigung des Bildschirms zum Beobachter verändert. Vorhergehende Studien mit geneigten unbewegten Bildern haben gezeigt, daß eine Kompensation bei einer Neigung der Projektionsebene möglich ist (Perkins, 1973; Rosinski et al., 1980), aber bei größerer Neigung, ungefähr 30° , ausbleibt (Halloran, 1989). Hier wird eine Replikation dieser Befunde mit bewegten Bildern versucht. Cutting (1987) fand bereits für einfachere Reize, daß die Beobachter die Information über die Neigung des Bildschirms nicht benutzen. Wir erstrebten mit unseren komplexeren Reizen einen faireren Test der Hypothese. Die Logik war die folgende: Falls das visuelle System die Neigung des Bildschirms kompensiert, dann sollte die Wahrnehmung der auf dem Bildschirm präsentierten Stimuli unabhängig von dessen Neigung sein. Falls eine Kompensation ausbleibt, ist ein unterschiedlicher Wahrnehmungseindruck zu erwarten, so daß die präsentierten Stimuli anders eingeschätzt werden als bei orthogonaler Ansicht. Erwartet wird also bei einem Zusammenbruch der Kompensation eine Interaktion der Neigung des Bildschirms mit einem oder mehreren der anderen Faktoren.

Zweitens sollte die Hypothese Kubovys (1986), daß die Kapazität des Kompensationsmechanismus beschränkt ist, getestet werden. Diese Hypothese läßt sich eindeutig testen, indem wiederum ein dreidimensionaler mit einem abgebildeten Quader verglichen wird. Der Umstand, daß beim Bild des Quaders zwei, beim dreidimensionalen Quader aber nur eine Projektionsebene involviert ist, ist dafür maßgeblich. Somit wurde zusätzlich zum bisherigen Versuchsablauf eine Bedingung der realen Bildschirmneigung eingeführt.

Methode

Beobachter

Zehn Studenten der Universität Bielefeld (4 Männer, 6 Frauen) nahmen gegen Bezahlung an dem Experiment teil. Das Alter lag zwischen 19 und 36 Jahren mit einem Mittelwert von 28.2 Jahren. Alle Teilnehmer hatten normale oder korrigierte Sehschärfe. Sie hatten nicht an den vorherigen Experimenten teilgenommen.

Stimuli und Apparatur

Stimuli und Apparatur waren dieselben wie in Experiment II.

Design

Die Probanden sahen jeweils 72 Durchgänge: 2 Arten von Quadern (dreidimensional oder Bild) \times 3 Bildschirmneigungen \times 2 Startwinkel (90° , 67°) \times 3 Rotationsrichtungen (inkongruente, kongruente Rotation, keine Rotation) \times 2 Replikationen.

Es gab vier Faktoren von empirischem Interesse. Der erste Faktor war die *Art des betrachteten Objektes*. Dieser Faktor wurde geblockt variiert. Entweder wurde, wie in Experiment I, ein Quader auf das Fenster in der simulierten Wand projiziert oder es schwebte ein dreidimensionaler Quader gleicher Größe an derselben Stelle. Die Hälfte der Probanden sah zuerst den dreidimensionalen Quader und dann ein Bild des Quaders, bei der anderen Hälfte wurde diese Reihenfolge umgekehrt. Als zweiter Faktor wurde die *Neigung des Bildschirms* geblockt variiert. Die Neigung des Bildschirms ist die seitliche Neigung um die y-Achse, gemessen zur frontoparallelen Ebene. Die Probanden sahen die Stimuli zuerst auf einem ungeneigten Bildschirm (90°), dann auf einem Bildschirm mit einer Neigung von 60° und zuletzt mit einer Neigung von 30° . Der Bildschirm wurde entgegengesetzt zur Neigung der simulierten Projektionsebene rotiert, d. h. gegen den Uhrzeigersinn. Der dritte Faktor war der *Startwinkel*, d. h. der anfängliche Winkel des virtuellen Beobachters zur simulierten Wand. Dieser konnte entweder 90° oder 67° betragen. Der Blickwinkel wurde während der Animation kontinuierlich um 22.5° verringert. Der vierte Faktor war die *Rotationsrichtung* des Quaders. Es konnte keine Rotation, eine kongruente Rotation oder eine inkongruente Rotation gezeigt werden. In den zwei zuletzt genannten Bedingungen rotierten die Quader um 10° .

Prozedur

Die Prozedur war die gleiche wie in Experiment II mit der folgenden Ausnahme: Nach je 12 Versuchsdurchgängen unterbrach der VL die Stimuluspräsentation und drehte den Bildschirm.

Ergebnisse

Die Reaktionen der Probanden wurden einer Varianzanalyse mit Messwiederholung auf allen vier Faktoren unterworfen. Art des Objektes wurde als zusätzlicher Faktor mit berücksichtigt, um zu evaluieren, ob die Kompensation unterschiedlich gut für die einfache und doppelte Projektion gelang.

Die Neigung der simulierten Projektionsebene interagierte mit der Neigung des Bildschirms, $F(2, 18) = 6.99$, $p < .01$. Bei einer Bildschirmneigung von 30° waren die Rotationsurteile beim Startwinkel von 90° ($M =$

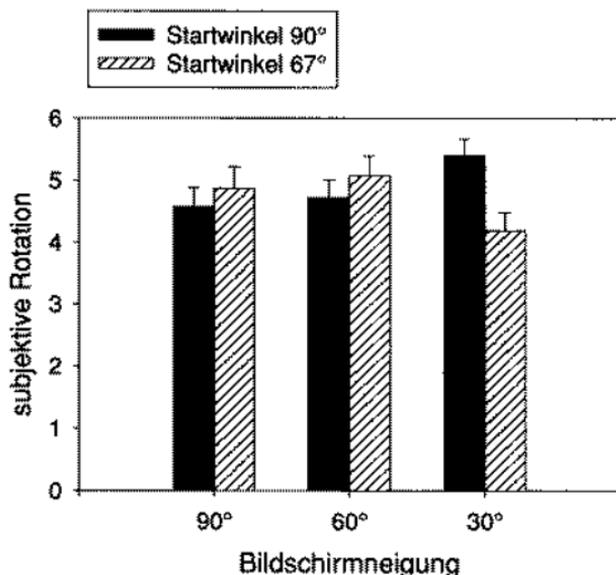


Abbildung 8: Mittlere Rotationsurteile als Funktion von Bildschirmneigung und Startwinkel in Experiment III.

5.83) höher als beim Startwinkel von 67° ($M=4.19$, $p < .01$). Innerhalb der Bildschirmneigung von 60° fand sich kein signifikanter Einfluß des Startwinkels ($M=4.88$ vs. $M=5.08$), auch nicht bei 90° Neigung ($M=4.58$ vs. $M=4.72$). Abbildung 8 zeigt die Mittelwerte.

Die Art des Objektes hatte keinen Haupteffekt auf die Rotationsurteile, $F(1, 9) = 1.34$, $p = .27$. Die Neigung des Bildschirms $F(1, 9) = .42$, $p = .67$ sowie die Neigung der simulierten Projektionsebene $F(1, 9) = .26$, $p = .56$ zeigten ebenfalls keine Haupteffekte, wohl aber die Rotationsrichtung, $F(1, 9) = 17.34$, $p < .01$. Die Urteile bei einem stationären Objekt ($M=3.83$) waren signifikant niedriger als bei einer inkongruenten ($M=5.4$) und kongruenten Rotation ($M=5.19$, $p < .01$). Dieser Effekt wurde wie in Experiment II durch eine Interaktion der Art des Objektes mit der Rotationsrichtung modifiziert $F(2, 18) = 28.99$, $p < .01$. Für das Bild des Quaders war die wahrgenommene Rotation bei kongruenter Rotation ($M=6.49$) bedeutsam höher als bei einer inkongruenten ($M=4.2$) und keiner ($M=3.39$, $p < .01$) Rotation. Die inkongruente Rotation unterschied sich nicht von einem stationären Objekt. Für den dreidimensionalen Quader ergaben sich höhere Urteile bei einer inkongruenten Rotation ($M=6.6$) als bei kongruenter ($M=3.9$) und keiner ($M=4.27$, $p < .01$) Rotation, die wiederum nicht voneinander verschieden waren.

Außerdem ergab sich eine dreifache Interaktion von Objektart, Neigung der simulierten Projektionsoberfläche und Rotationsrichtung, $F(2, 18) = 8$, $p < .01$. Innerhalb des Bildes waren die Urteile bei kongruenter Rotation sowohl bei 90° wie auch bei 67° von der inkongruenten und keiner Rotation verschieden ($M=6.8$ vs. $M=4.82$ und $M=3.12$ bei 90° , $M=6.18$ vs. $M=3.58$ und $M=3.67$ bei 67° , $p < .01$). Innerhalb des dreidimensionalen Quaders war der Unterschied zwischen kongruenter Rotation und inkongruenter sowie keiner Rotation erst bei 67° signifikant ($M=5.84$ vs. $M=4.14$ und $M=4.72$ bei 90° , $M=7.36$ vs. $M=3.66$ und $M=3.84$ bei 67° , $p < .01$).

Des weiteren wurde eine dreifache Interaktion der Art des Objektes, der Neigung des Bildschirms und der Rotationsrichtung signifikant, $F(4, 36) = 2.94$, $p < .05$. Innerhalb des dreidimensionalen Objektes waren die Urteile bei inkongruenter Rotation und 90° sowie 67° Bildschirmneigung höher als bei kongruenter Rotation und stationärem Objekt ($M=6.8$ vs. $M=3.82$ und $M=3.92$, $p < .01$ bei 90° ; $M=6.2$ vs. $M=4.0$ und 4.2 , $p < .01$ bei 67°). Bei 30° Bildschirmneigung verschwand der Unterschied zwischen der inkongruenten Rotation und dem stationären Objekt ($M=6.2$ vs. $M=4.74$) nicht aber zwischen inkongruenter Rotation und kongruenter Rotation ($M=6.2$ vs. $M=3.87$, $p < .01$). Innerhalb des dreidimensionalen Quaders waren die Rotationsurteile höher bei kongruenter Rotation als bei inkongruenter und keiner Rotation in der 90° und 60° -Bedingung ($M=6.9$ vs. $M=3.65$ und $M=3.27$, $p < .01$ bei 90° Bildschirmwinkel; $M=6.6$ vs. $M=4.98$ und $M=3.85$ bei 67° , $p < .01$). Bei einer Bildschirmneigung von 30° wurde der Unterschied zwischen kongruenter ($M=5.98$) und inkongruenter ($M=4.98$) nicht mehr signifikant, wohl aber der Unterschied zwischen kongruenter und keiner Rotation ($M=3.05$, $p < .01$). Getrennte Analysen zeigen, daß die Interaktion von Rotationsrichtung und Neigung des Bildschirms im Falle des Bildes tendenziell stärker war, $F(4, 36) = 2.31$, $p = .076$, als die Interaktion im Falle des dreidimensionalen Objektes, $F(4, 36) = 1.35$, $p = .26$. Die Mittelwerte für diese Interaktion sind in Abbildung 9a und b dargestellt.

Diskussion

Die Interaktion der Art des Objektes mit der Rotationsrichtung und die Interaktion von Objektart, Neigung der simulierten Projektionsoberfläche und Rotationsrichtung replizierte die Resultate aus Experiment II und wird daher nicht näher erörtert.

Aus der Interaktion von Objektart, Neigung des Bildschirms und Rotationsrichtung geht hervor, daß bis zu einer Neigung von 60° keine Veränderung des Antwortmusters aufgetreten ist. Erst bei einer Neigung von

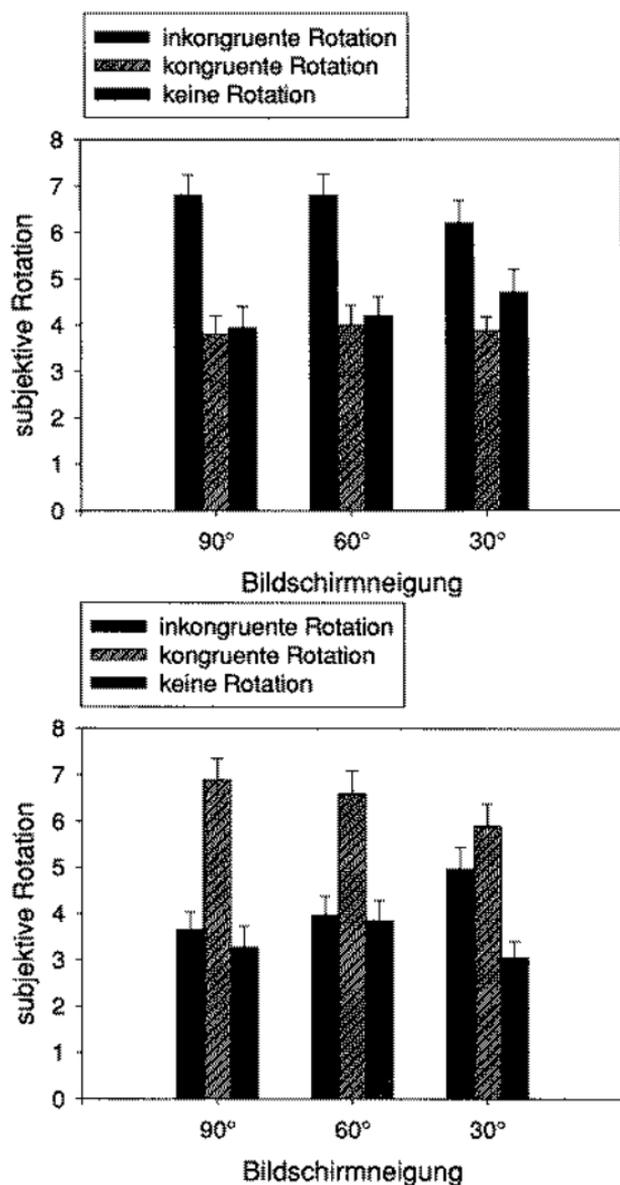


Abbildung 9: Mittlere Rotationsurteile als Funktion von Objekttyp, Rotationsrichtung und der Neigung des Bildschirms in Experiment III. In Abbildung 9a sind die Urteile für den dreidimensionalen Quader, in Abbildung 9b für das Bild des Quaders dargestellt.

30° ergaben sich Veränderungen und damit ein Zusammenbruch der Kompensation. Bis zu einer Bildschirmneigung von 60° tritt folglich eine

vollständige Kompensation ein. Kubovys (1986) Hypothese, daß eine Kompensation für die Neigung der primären Bildschirmenebene eintritt, wird durch diesen Befund gestützt. Ferner wird deutlich, daß Kompensation nicht nur auf statische Bilder beschränkt ist (Perkins, 1973; Rosinski et al., 1980), sondern — entgegen Cutting — auch bei bewegten Bildern stattfindet.

Die dreifache Interaktion der Art des Objektes, der Neigung des Bildschirms und der Rotationsrichtung spricht für die Hypothese Kubovys, daß Kompensation für eine erste Projektionsebene, insbesondere wenn diese real ist, geleistet werden kann. Aus den Mittelwertvergleichen wird deutlich, daß — wie auch bei der Interaktion von Bildschirmneigung und Blickwinkel — das Ergebnismuster sich erst bei 30° Bildschirmneigung verändert. Die Interaktion von Bildschirmneigung und Blickwinkel bildet den eingetretenen Kompensationsausfall für die beiden Objekttypen ab. Da diese Interaktion für das dreidimensionale Objekt schwächer war als für das Bild des Quaders, ist ein Beleg für die Hypothese gewonnen, daß der Kompensationsmechanismus einer Kapazitätsbeschränkung unterliegt. Bei erhöhter Komplexität, die hier durch die doppelte Projektionstechnik induziert wurde, bricht die Kompensation also schneller zusammen. Anders als beim Vergleich von einfacher und doppelter Projektion bei ungeneigtem Bildschirm in Experiment II, läßt sich hier ein Einfluß der Komplexität der simulierten Situation finden. Dies ist konsistent mit der Annahme eines auf reale Projektionsebenen beschränkten, aktiven Rekonstruktionsmechanismus, der bei zunehmender Anzahl der Projektionsebenen schlechter wird. Falls aber — wie in Experiment II — eine Kompensation ausbleibt und stattdessen eine Abhängigkeit von lokaler Information im optischen Array nachgewiesen werden kann, dann spielt die Komplexität der Simulation keine Rolle.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß eine Kompensation für die reale Bildschirmneigung und bewegten Bildern bis zu einem Neigungswinkel von 60° stattgefunden hat. Dieser Befund ist ähnlich dem Hallorans (1989), der eine Abhängigkeit der Bildwahrnehmung vom Beobachtungspunkt bei einer extremen Neigung der Projektionsebene von 30° fand. Der Zusammenbruch der Kompensation betraf die Bilder des Quaders besonders stark, was im Einklang mit Kubovys Annahme einer Kapazitätsbeschränkung des Kompensationsmechanismus ist. Der differentielle Kompensationsausfall wurde mit diesem Experiment für den Spezialfall belegt, in dem die erste Projektionsebene (der Bildschirm) statisch war, während die zweite Projektionsebene (simuliert) variabel war.

Schlußbemerkung

Die Hypothesen der Array-Spezifität, des Kompensationsmechanismus sowie der Indiskrimination versuchen auf unterschiedliche Weise zu erklären, warum Beobachter selbst bei großer Abweichung von Beobachtungs- und Kompositionspunkt bildhaft Dargestelltes unverzerrt wahrnehmen. Diese zunächst erstaunliche Fähigkeit läßt sich aufgrund der Ergebnisse mit relativ groben Strategien erklären. Nicht nur stößt die Kompensationsfähigkeit sehr schnell auf Grenzen, sie ist auch von der Aufgabe und der Art des Bildmaterials abhängig.

Die Indiskriminationshypothese hat sich als weitgehend unzutreffend erwiesen. Die besonders gute Erkennbarkeit der sinusförmigen Expansion und Kontraktion durch einen salienten Verlauf der Bildgeschwindigkeiten erklärt, warum Cutting (1987) in seinen Experimenten keinen Einfluß von Sichtbarkeit und Neigung der Projektionsebene ausmachen konnte. Eine aktive Rekonstruktion des virtuellen Raumes war in seinen Experimenten nicht nötig, da der Verlauf der Bildgeschwindigkeiten einen guten Hinweisreiz auf Objektdeformation darstellte. Der fehlende Einfluß von Sichtbarkeit und Neigung der Projektionsebene bedeutet also nicht, daß die Beobachter die affinen Verzerrungen des virtuellen Raumes nicht registriert haben. Ferner haben die Ergebnisse von Experiment I gezeigt, daß Beobachter sehr wohl dazu in der Lage sind, zwischen Verzerrungen, die auf die Neigung der Projektionsebene zurückgehen, und solchen, die von Deformationen des abgebildeten Objekts herrühren, zu unterscheiden.

Die Befundlage zur Kompensationshypothese ist weniger eindeutig. Für simulierte Objekte konnte in Experiment II und III keine Kompensation nachgewiesen werden. Die Urteile wurden durch lokale Hinweisreize bestimmt und die Komplexität der Simulation machte keinen Unterschied. Auch die Entdeckung von Objektdeformation (Experiment I) verweist eher auf die Verarbeitung lokaler Hinweisreize. Wenn man überhaupt von einer Kompensationsleistung sprechen will, dann ist sie für simulierte (virtuelle) Projektionsebenen sehr grobkörnig und nur dazu geeignet, zwischen verschiedenen Deformationstypen (perspektivische Verzerrung und Objektdeformation, siehe Experiment I) zu unterscheiden. Sie verschwindet ganz, wenn Beobachterbewegung simuliert wird und genauere Urteile über die Stimmigkeit der perspektivischen Verzerrung abgegeben werden müssen. Die zusätzliche dynamische Information machten sich die Beobachter nicht zunutze.

Andererseits konnte für eine reale Projektionsebene eine Kompensation bis zu 30° Neigung nachgewiesen werden. Dies ist im Einklang mit Befunden von Perkins (1973) und Halloran (1989) und verweist auf die Bedeutung ökologisch reichhaltiger Information in diesem Zusammen-

hang. Es bestätigt auch auf eindrucksvolle Weise die Vermutung Kubovys (1986), daß nur die Neigung der primären Projektionsebene kompensiert wird. Beobachter scheinen, so viel Hilfen man ihnen auch zukommen läßt, immer nur die Effekte einer primären Projektionsebene zu bewältigen.

Die Resultate sprechen am ehesten für die Hypothese der Array-Spezifität. Im Einklang mit deren Voraussagen beeinflusste die Komplexität der Simulation (einfache vs. doppelte Projektion) die Qualität der Urteile bei simulierten Objekten nicht. Ferner zeigten sich die Urteile in Experiment II und III stark von lokaler Information im optischen Array beeinflusst. Die Beobachter waren nicht in der Lage, die perspektivische Transformation des Quaders im Kontext der Transformation des gesamten simulierten Raumes zu sehen. Bei einer realen Projektionsebene trat zwar eine Kompensation bei 60° auf, bei 30° wurde aber wiederum nicht die frontale Ansicht hergestellt.

Es gibt jedoch einige Vorbehalte gegenüber den obigen Interpretationen, die sich auf die Besonderheit der Simulation und ihre potentielle Unterlegenheit im Vergleich mit realen Situationen beziehen. Unterschiede zwischen einer simulierten und einer realen Neigung der Projektionsoberfläche weisen darauf hin, daß reine Simulationsstudien die Kompensationsfähigkeit im Zweifel unterschätzen. Beobachter waren in Experiment III dazu in der Lage, Bildschirmneigungen bis zu 60° zu tolerieren, während diese Fähigkeit bei simulierter Neigung schon vorher zusammenbrach. Es wäre aber verfrüht zu schließen, daß Kompensation nur bei realen Projektionsebenen auftritt. Zum einen zeigt Experiment I, daß zumindest eine grobe Kompensation stattfindet, zum anderen wurde hier nur eine statische reale Projektionsebene untersucht. Eine Untersuchung von variablen realen Projektionsebenen steht noch aus, ist aber wünschenswert, weil so die Situation eines Kinobesuchers auf dem Weg zur ersten Reihe, Seitensitz, nicht nur simuliert, sondern tatsächlich hergestellt wird.

Eine offene Frage ist ebenfalls, inwiefern die vorliegenden Resultate sich auf andere Stimulussets verallgemeinern lassen. Die hier verwendeten Umrißfiguren wurden aus Gründen der Vergleichbarkeit gewählt. Umrißfiguren sind in der normalen Sehwelt selten anzutreffen. So zeigt eine Studie von Ryan und Schwarz (1956), daß die Wahrnehmungsleistung bei Umrißfiguren im Vergleich zu realistischen und karikierten Figuren schlechter ist. Es könnte daher sein, daß die Kompensationsleistung sich bei realistischeren Objekten verbessert. Realistischere Objekte würden z. B. Schattierungen und eine Oberflächentextur besitzen. Dieser Gedanke erscheint besonders plausibel, wenn man sich vor Augen führt, daß das visuelle System in der Evolution hauptsächlich mit realen Objekten kon-

frontiert war, und daß deshalb eine Optimierung für diesen Stimulustyp stattgefunden hat.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß Beobachter in simulierten Umwelten nur grobe Unterschiede zwischen verschiedenen Arten der Verzerrung (Objekt- vs. perspektivischer Deformation) erkennen, und keine rekonstruktive Kompensation der Neigung von Projektionsebenen vornehmen. Weiterhin spielte die Komplexität der Simulation (einfache vs. doppelte Projektion) nur eine geringe Rolle. In beiden Fällen dominierte lokale optische Information die Urteile der Probanden. Auch die üblicherweise mit bewegten Reizen verbundenen Vorteile übertragen sich nicht auf die bildhafte Projektion. Daß trotz Diskriminationsfähigkeit keine Rekonstruktion der Perspektive vorgenommen wird, spricht für ökonomische arraybezogene Strategien des visuellen Systems, die bei einfacher Projektion zu robusten Wahrnehmungen führen.

Summary

The limits of perceptual robustness in perspective distortion

Pictures often do not appear distorted even when viewed at oblique angles. Three hypotheses have been put forth to explain this robustness of virtual space toward affine transformations. First, array specificity holds that the perception of depicted space is fully specified by the information available at the point of observation. Second, the notion of a compensatory mechanism involves an unconscious recreation of the scene according to the original viewpoint. Third, the indiscrimination hypothesis denies the ability of the visual system to resolve or detect affine transformations up to a certain degree. Three experiments were conducted to investigate these claims. Using a double projection technique devised by Cutting (1987), Experiment 1 showed that observers are able to discriminate and compensate, to some degree, for affine transformations if information about the projection surface is available. However, observers relied on relative image velocities rather than reconstructing the object. In Experiment 2 additional observer motion was simulated. In single and double projection trials that required more difficult judgments of object rotation, compensation was poor and observers seemed to rely on local cues. Finally, real and simulated rotation of the projection surface revealed that observers are able to compensate for only one primary projection surface slant. The results reject the indiscrimination hypothesis and support the notion of array specificity.

Key words: Picture perception — linear perspective — perceptual distortion

Literatur

- Bengston, J. K., Stergios, J. C., Ward, J. L., & Jester, R. E. (1980). Optic array determinants of apparent distance and size in pictures. *Journal of Experimental Psychology*, 6, 751—759.
- Cutting, J. E. (1987). Rigidity in cinema seen from the front row, side aisle. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 323—334.
- Gibson (1950). The perception of visual surfaces. *American Journal of Psychology*, 63, 367—384.
- Gibson (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Goldstein, E. B. (1979). Rotation of objects in pictures viewed at an angle: Evidence for different properties of two types of pictorial space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 5, 78—87.
- Goldstein, E. B. (1987). Spatial layout, orientation relative to the observer, and perceived projection in pictures viewed at an angle. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 13, 256—266.
- Goldstein, E. B. (1988). Geometry or not geometry: Perceived orientation and spatial layout in pictures viewed at an angle. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14, 312—314.
- Gombrich, E. H. (1960). *Art and illusion*. Princeton: Princeton University Press.
- Gombrich, E. H. (1972). The "what and the how": Perspective representation and the phenomenal world. In R. Rudner & I. Scheffler, (Eds.), *Logic and art*. New York: Bobbs-Merrill.
- Halloran, T. O. (1989). Picture perception is array-specific: Viewing angle versus apparent orientation. *Perception & Psychophysics*, 45, 467—482.
- Kaiser, M. K., Proffitt, D. R., Whelan, S. M., & Hecht, H. (1992). Influence of animation on dynamical judgments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 669—690.
- Kubovy, M. (1986). *The psychology of perspective and Renaissance art*. Cambridge, GB: Cambridge University Press.
- La Gournerie, J. de (1859). *Traité de perspective linéaire contenant les tracés pour les tableaux plans et courbes, les bas-reliefs et les décorations théâtrales, avec une théorie des effets de perspective*. I vol. and I Atlas of Plates. Paris: Dalmont et Dunod; Mallet-Bachelier.
- Metzger, W. (1934). *Psychologie*. Darmstadt: Steinkopf.
- Norman, J. F., & Todd, J. T. (1993). The perceptual analysis of structure from motion for rotating objects undergoing affine stretching transformations. *Perception & Psychophysics*, 53, 279—291.
- Perkins, D. N. (1973). Compensating for distortion in viewing pictures obliquely. *Perception and Psychophysics*, 14, 13—18.
- Pirenne, M. H. (1970). *Optics, painting & photography*. Cambridge, GB: Cambridge University Press.
- Rosinski, R. R., & Farber, J. (1980). Compensation for viewing point in the perception of pictured space. In M. Hagen (Ed.), *The psychology of pictorial representation*. New York: Academic Press.
- Rosinski, R. R., Mulholland, T., Degelman, D., & Farber, J. (1980). Picture perception: An analysis of visual compensation. *Perception & Psychophysics*, 28, 521—526.
- Ryan, T. & Schwarz, C. (1956). Speed of perception as a function of mode of representation. *American Journal of Psychology*, 69, 60—69.