

Entfernungswahrnehmung

Paul Natterer

Experimentelle Befunde der Wahrnehmungspsychologie zeigen, dass die Entfernungswahrnehmung nicht angeboren ist und nicht unmittelbar, d.h. ohne Hilfe weiterer Indizien, stattfindet (Rock: *Wahrnehmung. Vom visuellen Reiz zum Sehen und Erkennen*, Heidelberg 1985). Dies stimmt mit Berkeleys Auffassung überein. Nicht richtig ist dagegen die These Berkeleys, dass Entfernungswahrnehmung nicht durch Faktoren der geometrischen Optik vermittelt sind.

Das Hauptargument Berkeleys hierfür ist das fehlende Bewusstsein von solchen „Rechenoperationen“ in der Wahrnehmung. „Ich berufe mich auf jedermanns Erfahrung bezüglich der Frage, ob er beim Sehen eines Objektes dessen Entfernung durch die Größe eines Winkels berechnet ... oder ... an die ... Divergenz der Strahlen denkt. – Vergebens würde mir irgendjemand erzählen, daß ich gewisse Linien und Winkel wahrnehme ... solange ich mir selbst nicht einer solchen Sache bewußt bin“ (§ 12).

- Für die Neurowissenschaft und die Kognitionsforschung steht jedoch fest:

„Sehen ist ein konstruktiver Prozeß, für den das Gehirn komplexe Aktivitäten ausführen muß, um zwischen konkurrierenden Interpretationen der vieldeutigen visuellen Daten zu entscheiden. Diese Aktivitäten werden gelegentlich Berechnungen genannt, weil sie auf eine Repräsentation, eine Abbildung – im mathematischen Sinne – gewisser Aspekte der Außenwelt auf Teilstrukturen des Gehirns hinauslaufen“, und „größtenteils unbewußt geschehen und nur deren Ergebnis uns bewußt wird.“ (Crick/Koch: *Das Problem des Bewußtseins*. In: *Spektrum der Wissenschaft* 11, 1992, 146)

Zwei experimentelle Beweise für vorbewusste konstruktive Wahrnehmungsleistungen sind einmal die vorbewusste und z.T. sehr komplexe Ergänzung des sogenannten blinden Flecks trotz fehlenden visuellen Dateneingangs; und zum anderen das Phänomen der sog. binokularen (beidäugigen) Rivalität,

„wenn beide Augen unterschiedliche optische Reize empfangen, die sich auf denselben Teil des Gesichtsfeldes beziehen. [...] Wenn diese Signale sich nun [kognitiv] widersprechen, sieht man [bewusst] nicht beide überlagert, sondern immer abwechselnd das eine und das andere.“ (Crick/Koch 1992, 148–149)

- Selbst wenn man mit Berkeley äußere Wahrnehmungsobjekte und den physikalisch-physiologischen Apparat der Wahrnehmung nicht als hinreichende Ursache unserer bewussten Wahrnehmung akzeptiert, so handelt es sich doch bei diesen Faktoren um vorgegebene notwendige

Bedingungen unserer Wahrnehmungsprozesse bis zur Ebene von Begriffsbildung, Kognition und Sprache. Dies zeigen die Wahrnehmung beeinträchtigende Gehirnverletzungen und die neuronale Basis von Geisteskrankheiten unmissverständlich auf. Mit anderen Worten, Aufbau und Funktion der Wahrnehmung können an biochemischen und zellbiologischen Aufbau und Verhalten großer, wechselwirkender Gruppen aktiver Nervenzellen freigelegt und verfolgt werden.

- Zur Entfernungswahrnehmung hier ein Zitat von David Hubel, dem großen alten Mann der Neurowissenschaft [Hervorhebungen von mir, PN]:

„Zusammengefaßt hängt unsere Fähigkeit zur Tiefenwahrnehmung von fünf Prinzipien ab:

 1. Es gibt vielerlei Hinweise auf räumliche Tiefe, etwa die **Überschneidung** und **Verdeckung** von Objekten, die **Parallaxe**, die Drehung von Objekten, **Größenverhältnisse**, **Schattierung** und **Perspektive**. Der wohl wichtigste Faktor ist die **Stereopsis**.
 2. Beim Fixieren eines Punktes im Raum fallen dessen Bilder auf den beiden Netzhäuten auf die beiden Foveae. Jeder Punkt, den man als gleich weit entfernt beurteilt wie den fixierten Punkt, projiziert seine zwei Bilder auf korrespondierende Netzhautstellen.
 3. Die Stereopsis hängt von der einfachen geometrischen Tatsache ab, daß die beiden Bilder, die ein näherkommendes Objekt auf die Netzhäute projiziert, sich relativ zu den korrespondierenden Stellen nach außen verschieben.
 4. Der entscheidende Punkt bei der Stereopsis – eine biologische, an Testpersonen ermittelte Tatsache – ist folgender: Ein Objekt, dessen Bilder auf korrespondierende Stellen der beiden Retinae fallen, wird so wahrgenommen, als habe es dieselbe Entfernung wie der fixierte Punkt. Wenn die Bilder relativ zu den korrespondierenden Punkten nach außen verschoben sind, erscheint das Objekt als näher als der fixierte Punkt, und bei einer Verschiebung nach innen als weiter entfernt.
 5. Bei horizontalen Verschiebungen von mehr als etwa zwei Grad oder vertikalen Abweichungen um mehr als ein paar Bogenminuten sehen wir doppelt.“ (Hubel: *Auge und Gehirn. Neurobiologie des Sehens*, 2. Aufl. Heidelberg 1990, 156–157)
- Dieser Faktor wird in der einschlägigen Literatur auch gerne als **Disparität** (der Netzhautstellen) bezeichnet. Mit Hilfe eines künstlichen Disparität erzeugenden sogenannten Stereoskops läßt sich dessen Einfluß experimentell von jedem nachvollziehen: Zweidimensionale Figuren bzw. visueller Dateneingang wird „verräumlicht“.
- Dieser Sachverhalt wird auch durch die Entdeckung **tiefenempfindlicher, disparitätsempfindlicher binokularer** (das heißt auf Daten aus beiden Augen ansprechende) Detektorzellen in der primären Sehrinde bestätigt, die zugleich orientierungsspezifisch sind (das heißt nur auf einen Winkelbereich von je zehn Grad ihres rezeptiven Feldes auf der Netzhaut programmiert). Sie sind unterstrukturiert in **Fernzellen**, **Nahzellen** und **Korrespondenzzellen** und reagieren, das heißt „feuern“ nur bei gleichzeitigem Vorliegen dreier geometrischer Bedingungen im Dateneingang: korrespondierende Netzhautstellen in beiden Augen – dieselbe relative Distanz zum Fixationspunkt (näher/weiter/identisch) – dieselbe Orientierung der visuellen Reize im zugeordneten rezeptiven Feld. Dies ist die

experimentelle Bestätigung vorbewusster Rechenoperationen der Tiefenwahrnehmung.

- Berkeley erklärte die Entfernungs- und Raumwahrnehmung durch mit visuellen Eindrücken gewohnheitsmäßig verknüpfte Tastempfindungen der Augenmuskeln und durch empirische (Abbildungs-)Faktoren. Die hier in Rede stehenden Faktoren nennt man heute die **Konvergenztrias der Okulomotorik** (Augenmuskulatur): (1) **Konvergenz- und Divergenzbewegungen der Sehachsen** zur Nah- und Ferneinstellung; (2) **Akkommodation oder Nahfokussierung**: Kontraktion des sog. Ziliarmuskels um die Augenlinse, was vermehrte Krümmung (und damit Brechkraft) der Linse bewirkt; (3) **Pupillenverengung** zur Verbesserung des Tiefensehens und der optischen Abbildung.
- Diese Konvergenztrias steuert die Bewegungen der Augen, wenn sich die Sehachsen beider Augen relativ zueinander verschieben: „An jedem Auge sitzen sechs *äußere Augenmuskeln* [...] Es ist kein Zufall, daß an jedem Auge genau sechs solcher Muskeln ansetzen: Sie bilden drei Paare mit jeweils zwei einander entgegengewirkenden Muskeln und steuern so die Bewegungen des Auges innerhalb dreier senkrecht zueinander stehenden Ebenen. Beide Augen müssen einem Objekt mit einer Genauigkeit von wenigen Bogenminuten nachgeführt werden – sonst sähen wir doppelt!“ (Hubel a.a.O. 1990, 39, 43–44)
- Die Reichweite dieser Konvergenztrias in der Entfernungsbestimmung ist jedoch auf einen sehr eingeschränkten Nahbereich von 2–3 Metern beschränkt. Trotzdem verfügt sie über einen unbezahlbaren Vorzug: Mit ihr lässt sich wahrscheinlich allein die absolute Entfernung vom Subjekt zum visuellen Objekt bestimmen, wenn auch nur in der angegebenen kurzen Reichweite. Die Disparität oder Stereopsis dagegen kann nur die relative Entfernung der Objekte vom Fixationspunkt bestimmen.
- Die Wahrnehmungspsychologie macht daher für die in der Regel gegebene uneingeschränkte absolute Entfernungsorientierung in unserem Blickfeld das **Zusammenspiel** von **Konvergenz** (absolutes apriorisches Maß der Entfernung) mit **Stereopsis** (relatives apriorisches Maß der Entfernung) sowie Abbildfaktoren (empirisches Maß der Entfernung) verantwortlich.
- Die zweite hierhergehörige Leistung sind die gekoppelten Augenbewegungen der **Blickmotorik**, wenn sich beide Augen gemeinsam bewegen, um den Fixationspunkt zu verschieben. Man nennt sie beim freien Umherblicken oder Analysieren eines ruhenden Objekts **Sakkaden**. Gekoppelte Augenbewegungen dienen auch dem Verfolgen eines bewegten Objekts mit den Augen (gleitende Augenfolgebewegungen) oder treten als periodischer Wechsel beider Bewegungen auf. Zwischen den Sakkaden mit Längen zwischen 3 Winkelsekunden und 90° des Blickwinkels und einer Dauer zwischen 15 Millisekunden und 100 Millisekunden liegen Fixationsperioden von 0,15 – 2 Sekunden Dauer.

- Auch während der Fixationen sind die Augen nicht ruhig, sondern bewegen sich minimal in der Größenordnung von 1–3 Winkelsekunden und Frequenzen von 20–150 Hertz (**Mikrotremor** oder **Mikrosakkaden**). Dies ist eine notwendige Bedingung des Sehens, da ein optisch stabilisiertes Bild nach wenigen Sekunden verschwindet, wahrscheinlich weil die Photosensoren wegen des Dauerreizes abschalten (adaptieren).
- Die Steuerung der Augenmotorik und der Blickmotorik, meist in Verbindung mit Kopfbewegungen, ist eines der kompliziertesten Beispiele sensomotorischer Integration, bei der verschiedene motorische Programme im Hirnstamm sensorische Information aus dem visuellen System, dem Kleinhirn, dem Gleichgewichtssystem, der Tiefenwahrnehmung und dem Hörsystem verrechnen. Für Berkeley gilt bei diesen Faktoren freilich:

„Nicht, daß es da irgendeine natürliche und notwendige Verknüpfung gibt zwischen der Empfindung, die wir durch die Drehung der Augen wahrnehmen und der größeren oder geringeren Entfernung“, sondern der Geist hat es erst „durch beständige Erfahrung gefunden“ (§ 17).
- Dagegen zwingen wahrnehmungspsychologische Versuchsreihen mit neugeborenen Tierjungen und auch menschlichen Säuglingen zu dem Ergebnis, „daß die Fähigkeit zur Tiefenwahrnehmung angeboren ist [...] Entfernungen werden von Anfang an wahrgenommen“ (Rock, a.a.O. 1985). Ein Beleg hierfür ist der sogenannte *Looming*-Effekt – ein mittels einer Zoom-Linse rasch größer werdendes Muster auf einer Leinwand „auf Kollisionskurs“ zum Beobachter, das schon von Geburt an eine Abwehrreaktion auslöst.
- Nur sehr summarisch, wenn auch nicht ablehnend, erwähnt die *Theory* die sogenannten **Abbildfaktoren**: „die spezielle Anzahl, Größe, Art usw. der gegebenen Dinge“ (§ 28). Faktoren, die in der Wahrnehmungspsychologie mit den Begriffen: Perspektive – Schatten – Verdeckung – bekannte Größenverhältnisse abgedeckt werden. Sie sind für Berkeley, wie die augenmotorischen Faktoren auch, rein faktisch, aposteriorisch, empirisch. Heute weiß man dagegen, dass mindestens ein Abbildungsfaktor als Hinweis auf Tiefe angeboren ist: die Schattenbildung.
- Ein Spezialproblem bei der Raumwahrnehmung ist die Bewegungsparallaxe (Verschiebung der Objekte relativ zur Beobachterbewegung), die überraschenderweise im Gegensatz zur Bewegungsperspektive (Verschiebung eines Objekts relativ zu anderen Objekten) nicht als Informationsquelle für die räumliche Wahrnehmung genutzt wird.
- Auch die *Richtungswahrnehmung*, der neben der *Tiefe* zweite Aspekt der Raumwahrnehmung, zeigt experimentell eine angeborene Kooperation von Gesichtssinn und Körperwahrnehmung, und hier v.a. der augenmotorischen Selbstwahrnehmung. Es geht hierbei um die Bestimmung des Ortes der Gegenstände in Beziehung auf unseren Körper oder auch Kopf: oben – unten – rechts – links. Zu diesem Ineinandergreifen angeborener

und durch Erfahrung erlernter Indikatoren von Entfernung dieses Fazit:

„Die Wahrnehmungsforschung ist von von den Alternativen Nativismus [Angeborensein] oder Empirismus [Erworbensein] mit Ausschließlichkeitsanspruch auf beiden Seiten abgekommen. Anstatt global zu fragen, ob räumliche Wahrnehmung insgesamt erlernt oder gänzlich angeboren ist, untersucht man heute, ob dieser oder jener einzelne Mechanismus erlernt oder angeboren ist.“
(Rock a.a.O. 1985, 74)

- Im § 43 sagt Berkeley: „Farben, die das eigentümliche und unmittelbare Objekt des Gesichtssinnes sind“ befinden sich „nicht außerhalb des Geistes“, und werden nach Berkeley auch nicht räumlich wahrgenommen. Sie und die mit ihnen gegebenen „Vorstellungen von [sichtbarer] Ausdehnung, Gestalt und Bewegung“ oder sichtbarer Objekte sind nicht „außerhalb des Geistes ... in irgendeiner Entfernung“ (§ 50). Hauptargument ist die rapide Veränderung der visuellen Wahrnehmung bis zur totalen Unähnlichkeit bei Entfernung bzw. Annäherung: z.B. der Mond einerseits auf der Erde als die Wahrnehmung einer „kleinen runden, leuchtenden Fläche“ (§ 44), bei Annäherung „nichts dergleichen“, sondern etwa die Wahrnehmung einer endlosen grauen Kraterwüste.
- Diese These ist heute sowohl vom neurobiologischen wie wahrnehmungspsychologischen Befund her nicht haltbar. Denn: Als gleich ursprüngliches und gegenüber der Farbwahrnehmung sogar vorrangiges, und entwicklungsgeschichtlich auch früheres und grundlegendes Objekt des Gesichtssinnes müssen Form und Bewegung in Hell-Dunkel-Kontrasten gelten. Nicht Farben, sondern Kontraste, Kanten, Konturen, Balken, Schlitze, Kurven, Winkel, Bewegungen sind das Basismaterial des Sehens. Hier nur folgende Ergänzung zur lediglich nachgeordneten Bedeutung der Farbwahrnehmung:

„Unter den Wirbeltieren tritt der Farbensinn nur bei einzelnen Gruppen auf [...] Zu den Säugern mit schlechter oder fehlender Farbwahrnehmung zählen Mäuse, Ratten, Kaninchen, Katzen, Hunde [...] Was die niederen Wirbeltierklassen betrifft, ist das Farbsehen bei vielen Fisch- und Vogelarten hoch entwickelt, bei Reptilien und Amphibien aber wahrscheinlich nicht vorhanden oder nur schwach entwickelt. Viele Insekten, etwa Fliegen und Bienen, vermögen Farben wahrzunehmen.“
(Hubel a.a.O. 1990, 165)
- Berkeley behauptet ferner die Nichtvergleichbarkeit der visuellen Grössenwahrnehmung zur tatsächlichen Größenwahrnehmung der Erfahrung. Die Sache soll sich nach Berkeley so darstellen: „Nachdem ich lange Zeit hindurch erfahren habe, daß gewisse Vorstellungen, die durch den Tastsinn wahrnehmbar sind – wie Entfernung, tastbare Gestalt und Festigkeit – mit gewissen Vorstellungen des Gesichtssinnes verknüpft waren, schließe ich, wenn ich solche Vorstellungen des Sehens wahrnehme, sofort darauf, welche tastbaren Vorstellungen nach dem gewöhnlichen, normalen Lauf der Natur wahrscheinlich folgen werden.“ (§ 45)
- Der regelmäßige experimentelle Befund ist dagegen heute: „Der Gesichtssinn dominiert, so daß ein Objekt eher nach dem Aussehen beurteilt wird

als nach dem Tastbefund. Mehr noch: Das Sehen nimmt den Tastsinn für sich ein: Man fühlt ein Objekt so, wie man es sieht.“ (Rock a.a.O. 1985, 116)