

# Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung

## Bausteine der Raumwahrnehmung

Der Raum und die Gegenstände darin dehnen sich in drei Dimensionen aus. Die Größe des Raums, seine Tiefe, ist die Ausdehnung zwischen den Objekten. Je nach dem, wie uns der Raum erscheint, verwenden wir die Attribute „ausgedehnt“, „weitläufig“, „unendlich“, „eng“ oder „gepresst“. Auf der Netzhaut in unseren Augen erscheint der Raum naturgemäß als nur zweidimensionale Abbildung. Da wir trotzdem Tiefe und Größe auffassen, muss unser visuelles System sie hinzufügen, also konstruieren. In der Photographie müssen wir ohne diese Konstruktionsmechanismen auskommen und können die Tiefe des Raums als 3. Dimension folgerichtig nicht direkt wiedergeben. Hilfestellung, um den Eindruck der Tiefe trotzdem zu transportieren, leistet die Einbeziehung jener Anhaltspunkte, die auch das visuelle System nutzt.

Zur Konstruktion räumlicher Tiefe vertraut unser Wahrnehmungsapparat nicht auf ein einzelnes Kriterium, wie die Zentralperspektive, sondern baut auf verschiedene Anhaltspunkte. Sie können wir unterteilen in die **binokularen Tiefenkriterien**, wie Stereoskopie, Konvergenz und Akkomodation,

Kriterium/ Entfernung	0-2 m	2-30 m	>30 m
Verdeckung	x	x	x
Relative Größe	x	x	x
Konvergenz und Akkomodation	x		
Bewegungsparallaxe	x	x	
Relative Höhe		x	x
Atmosphärische Perspektive			x

zu deren Nutzung beide Augen nötig sind und die auch mit nur einem Auge wahrnehmbaren **monokularen Tiefenkriterien**. Zu den letzteren zählen unter anderem die Verdeckung, die relative Größe und die atmosphärische Perspektive. Darüber hinaus sind noch **bewegungsinduzierte Tiefenkriterien**, wie die Bewegungsparallaxe und das fortschreitende Zu- und Aufdecken von Flächen, nachgewiesen. Sie nutzen unsere Bewegung relativ zu den Objekten im Raum und der große Physiologe Hermann von Helmholtz beschrieb schon 1867 eine Situation, in der die Bewegung des Beobachters die Tiefenwahrnehmung befördert: *„Wenn man zum Beispiel in einem dichten Walde still steht, ist es nur in undeutlicher und gröberer Weise möglich, das Gewirr der Blätter und Zweige, welches man vor sich hat, zu trennen und zu unterscheiden, wel-*

che diesem und jenem Baum angehören. ... So, wie man sich aber fortbewegt, löst sich alles voneinander, und man bekommt so gleich eine körperliche Raumschauung von dem walde, gerade so, als wenn man ein gutes stereoskopisches Bild desselben ansähe.“ (von Helmholtz 1867, S. 779-780). Im Hinblick auf ihre Wirksamkeit in den verschiedenen Entfernungsbereichen können wir diese Tiefenkriterien wie folgt kategorisieren:

### Stereoskopie

Unsere Augen sind nebeneinander versetzt und liefern uns zwei Bilder, die sich zwar in einem weitem Bereich überlappen, trotzdem aber leicht nach rechts und links versetzt sind. Diese zweidimensionalen Netzhautbilder verschmilzt das Gehirn zu einer einzigen Wahrnehmung, die uns durch die Verrechnung der geringfügigen Abweichungen zwischen den Bildern den Eindruck räumlicher Tiefe vermittelt. Dieses sogenannte **stereoskopische Sehen** gibt unserem Wahrnehmungsapparat die wichtigsten Hinweise auf die relativen Entfernungen zwischen den Objekten und bildet die Basis der Tiefenwahrnehmung. Da beide Augen am Zustandekommen der Stereoskopie beteiligt sind, wird sie auch als **binokulares Tiefenkriterium** bezeichnet.

Um uns das stereoskopische Sehen zu ermöglichen, orientiert sich das vi-

suelle System an den **korrespondierenden Netzhautpunkten**. Das sind jene Stellen auf jeder Netzhaut, die sich decken, wenn man beide Netzhäute übereinanderlegen würde und die mit der jeweils selben Stelle im visuellen Kortex verbunden sind. Stellen Sie sich, um es anschaulich zu machen, vor, Sie wären der Beobachter auf der Felsklippe am Nordrand des Grand Canyon in Abb. 26 und würden direkt auf den Punkt Y blicken. In diesem Fall liegen die Punkte X, Y und Z auf dem sogenannten **Horopter**, einem gedachten Kreis, der durch den

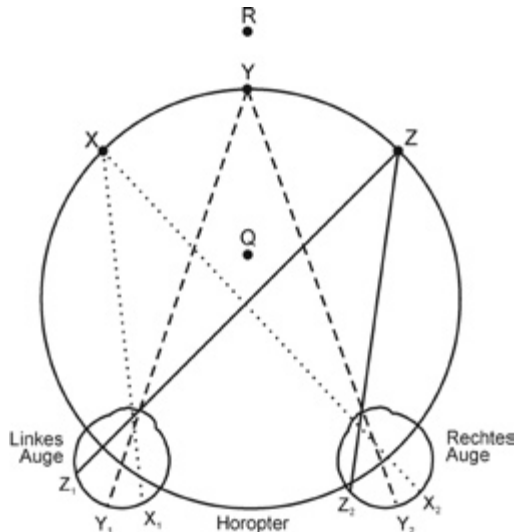


Abb. 25: Horopter schematisch

Das Objekt X fällt auf die korrespondierenden Netzhautpunkte B und B', das Objekt Z auf A und A', das Objekt Y auf die Fovea centralis F und F'.

## Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung



Abb. 26: Horopter praktisch

jeweiligen Fixationspunkt (der Punkt der angeschaut wird und auf den Bereich des schärfsten Sehens, die Fovea centralis, fällt) und durch die optischen Mittelpunkte beider Augen verläuft. Alle Punkte auf dem Horopter fallen immer auf **korrespondierende Netzhautpunkte**, alle Punkte davor und dahinter fallen immer auf **nicht-korrespondierende Netzhautpunkte**. Die zuletzt genannten, auch als **disparate Netzhautpunkte** bezeichnet, sind analog zum ersten Fall beim Überei-

inanderlegen der beiden Netzhäute nicht deckungsgleich. Die Punkte Q und R in Abb. 26 fallen also auf nicht-korrespondierende Netzhautpunkte. Auf sie kommt es an, wenn es um die Wahrnehmung von räumlicher Tiefe geht und deswegen wollen wir sie in Abb. 27 genauer betrachten.

Der Punkt R wird auf der Netzhaut in  $R_1$  und  $R_2$ , der Punkt Q in  $Q_1$  und  $Q_2$  abgebildet. Den Winkel zwischen  $R_1$  und  $R_2$  bzw. zwischen  $Q_1$  und  $Q_2$  nennen wir **Querdisparationswinkel** und

er bestimmt den folgenden allgemeinen Zusammenhang für die Wahrnehmung räumlicher Tiefe: Je größer der Querdisparationswinkel, desto weiter ist das Objekt vom Horopter entfernt. So weit so gut, aber daraus allein können wir noch keinen Rückschluss auf die genaue räumliche Anordnung der Objekte ziehen, wissen also nicht, ob sie vor oder hinter dem Horopter liegen. Aber wenn wir noch einmal genau auf die Abbildung schauen, sehen wir, daß die Bildpunkte von R weiter innen auf der Netzhaut liegen als die von Q und dies gestattet uns die Formulierung eines weiteren speziellen Zusammenhangs: Objekte, die vor dem Horopter liegen (hier Punkt Q) werden auf den äußeren Randbereichen der Netzhäute abgebildet. Die dabei entstehende Disparation wird **gekreuzte Disparation** genannt. Umgekehrt werden hinter dem Horopter liegende Punkte auf den inneren Teilen der Netzhäute abgebildet. Ihre **Disparation** wird als **ungekreuzt** bezeichnet.

Erst die Unterscheidung von gekreuzter und ungekreuzter Disparation gestattet dem visuellen System also einen Rückschluss darauf, ob etwas vor oder hinter einem fixierten Objekt liegt. Und erst mit diesen Angaben ist es in der Lage eine stereoskopische Wahrnehmung unserer Umgebung zu konstruieren.

Bei der in den vorangegangenen Kapiteln angesprochenen Spezialisierung unter den Nervenzellen wird es nicht überraschen, daß solche besonders sensibilisierten Neuronen auch bei der Wahrnehmung räumlicher Tiefe eine wichtige Rolle spielen. Tatsächlich finden wir auf neuronaler Ebene, wie verschiedene Tierversuche an Katzen und Affen nachgewiesen haben, im primären visuellen Kortex und den nachgeschalteten Verarbeitungsbereichen Nervenzellen, die auf Reize von zwei, durch jeweils einen bestimmten Querdisparationswinkel getrennten, Netzhautpunkten reagieren. Die Reizung

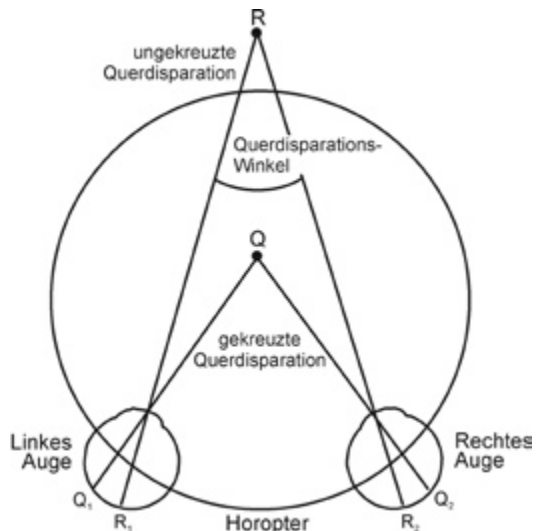


Abb. 27: Disparate Netzhautpunkte

# Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung

nur eines einzelnen Auges quittieren diese sogenannten **binokularen Neuronen** ohne Reaktion (H.B. Barlow, C. Blakemore & J.D. Pettigrew 1967 / D. H. Hubel & T.N. Wiesel 1970). Daß diese Neuronen tatsächlich etwas mit der Tiefenwahrnehmung zu tun haben, konnte durch Verhaltensexperimente bewiesen werden (R. Blake & H. Hirsch 1975). Die Wissenschaftler Blake und Hirsch entzogen Katzenjungen während der ersten Lebensmonate die Möglichkeit mit beiden Augen zu sehen. Statt dessen sahen die Tiere jeweils einen Tag lang abwechselnd mit dem rechten oder dem linken Auge. Ohne die normale beidäugige Reizung bilden die binokularen Neuronen in dieser prägenden Phase der Wahrnehmungsentwicklung aber keine Verknüpfungen zu anderen Nervenzellen und gehen zugrunde. Folgerichtig waren die Tiere nicht in der Lage stereoskopisch zu sehen.

Wenn unsere Augen also eine bestimmte Stelle im Raum auffassen, dann werden die binokularen Zellen, die optimal auf verschiedene Querdissparationswinkel ansprechen, von den in den jeweils richtigen Entfernungen liegenden Reizpunkten erregt und wir nehmen die Punkte als unterschiedlich weit entfernt wahr. Allerdings ist noch nicht geklärt, wie genau unser Wahrnehmungssystem diese einander entsprechenden Punkte ermittelt.

## Konvergenz und Akkommodation

Konvergenz und Akkommodation beruhen auf der Fähigkeit des visuellen Apparats, die Augenstellung und die Anspannung des Augenmuskels auszuwerten und werden daher auch als **okulomotorische Tiefenkriterien** bezeichnet. Durch sie gewinnen wir Informationen über die Entfernungverhältnisse der fixierten- und nichtfixierten Gegenstände, die uns weitere starke Anhaltspunkte zur Konstruktion räumlicher Tiefe vermitteln.

Wenn wir nahe Objekte anschauen, drehen sich die Augen nach innen, zur Nase hin und die Blickrichtungen beider Augen laufen sichtbar zusammen, wir sagen sie **konvergieren** und schneiden sich gerade in dem fixierten Punkt. Gleichzeitig verdickt sich die Augenlinse, um auf das Objekt scharf zu stellen. Dieses Fokussieren nennen wir **Akkommodation**. Beides können Sie spüren, wenn Sie einen Finger auf Armeslänge von sich weghalten, auf seine Spitze schauen und ihn dann auf Ihre Nase zu bewegen. Das einwärts Drehen der Augen und das Verdicken der Linse verursachen eine wachsende Spannung in den Augen.

Der Winkel, unter dem die beiden Sehachsen konvergieren, ist bei geringen Entfernungen groß und nimmt ab je weiter der Fixationspunkt entfernt ist.

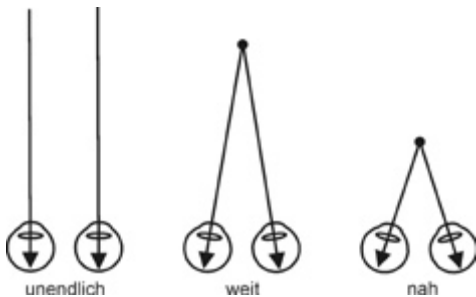


Abb. 28: Konvergenzwinkel

Konvergenzwinkel bei Einstellung der Augen auf unendlich (links), weit (mitte) und nah (rechts).

Bei der Einstellung auf „unendlich“ stehen die Augen parallel und der Winkelbetrag ist null. Aus der Registrierung und Verrechnung des Konvergenzwinkels kann das visuelle System die absolute Objektentfernung in einer trigonometrischen Berechnung bestimmen.

Die Akkommodation liefert dem Gehirn bei Distanzen unter drei Metern (bei größeren Distanzen sehen wir auch ohne Linsenveränderung scharf) effektive Anhaltspunkte zur Entfernungsbestimmung. Zum einen kann es aus dem Akkommodationszustand der Linse einen direkten Rückschluss auf die Objektentfernung ziehen. Zum anderen gewährt ihm die mit zunehmender Entfernung von der Fixationsebene ebenfalls zunehmende Unschärfe einen indirekten Rückschluss auf die Entfernungverhältnisse. Denn wenn wir in einem Moment ein Objekt scharf und

ein anderes unscharf sehen, müssen beide auf verschiedenen Entfernungsebenen liegen und entsprechend unterschiedlich weit von uns entfernt sein.

### Schärfe und Unschärfe

Wie wir im Abschnitt „Stereoskopie“ gelernt haben erscheinen uns die Objekte auf dem Horopter scharf, die vor- oder hinter ihm liegenden dagegen unscharf und verschwommen. Aus diesem Sachverhalt können wir lernen, daß es uns nicht möglich ist unterschiedlich weit voneinander entfernte Objekte gleichzeitig scharf zu sehen. Dies ist uns so alltäglich und geläufig, daß wir es kaum wahrnehmen, aber wenn Sie einmal bewußt darauf achten merken Sie schnell, daß sich aus der Verteilung von scharf und unscharf im Gesichtsfeld präzise Rückschlüsse auf die Verteilung der Gegenstände im Raum ziehen lassen.

Vollziehen Sie es einmal aktiv nach. Der Blick aus dem Fenster offenbart Ihnen bestimmt eine Vielzahl unterschiedlich weit voneinander entfernter Objekte, wie Häuser, Bäume, Sträucher und Menschen. Suchen Sie sich ein nicht zu weit von Ihnen und voneinander entferntes Paar aus das möglichst genau in einer Ebene liegt. Nun richten Sie den Blick zunächst auf das hintere der beiden, so daß Sie es scharf sehen. In dieser Konstellation wird Ihnen das



## Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung

vordere Objekt verschwommen und irgendwie transparent erscheinen. Damit meine ich, daß der Hintergrund ein wenig durchschimmert. Dann wechseln Sie den Fokus und schauen den vorderen Gegenstand „scharf“ an. Die Verschwommenheit und der Transparenz-Effekt wechseln nun nach hinten. Zuletzt versuchen Sie mal beide Objekte gleichzeitig scharf zu sehen. Bestimmt merken Sie schnell, daß das nicht möglich ist. Die Tiefenschärfe unserer Augen ist dafür bei kurzen und mittleren Entfernungen nicht

groß genug. Erst weit von uns entfernte Landschaftsteile können wir parallel scharf wahrnehmen.

Scharf und unscharf wahrgenommene Gegenstände in derselben Blickrichtung erlauben uns also den Schluß auf eine bestehende unterschiedliche Entfernung dieser Dinge und tragen dazu bei, den Eindruck räumlicher Tiefe entstehen zu lassen.

### Bewegungsparallaxe

Die **Bewegungsparallaxe** dient uns als Anhaltspunkt zur Wahrnehmung räumlicher Tiefe auf Grundlage der relativen Geschwindigkeit zwischen uns und den Gegenständen im Raum. Dieser Geschwindigkeitsunterschied ist besonders augenfällig, wenn wir aus dem Fenster eines sich bewegenden Fahrzeugs schauen. Nahe Gegenstände, wie die Leitplanken und die Begrenzungspfähle der Straße, ziehen verwischt an uns vorbei während sich die entfernt am Horizont gelegenen nur langsam bewegen. Daraus leitet sich folgendes Kriterium ab: Weit entfernte Objekte bewegen sich langsam, Gegenstände in unserer Nähe bewegen sich schnell. Warum sich das so verhält, erklärt sich recht schnell, wenn wir uns anhand von Abb. 29 verdeutlichen, was während einer Bewegung mit der Abbildung auf unserer Netzhaut passiert.

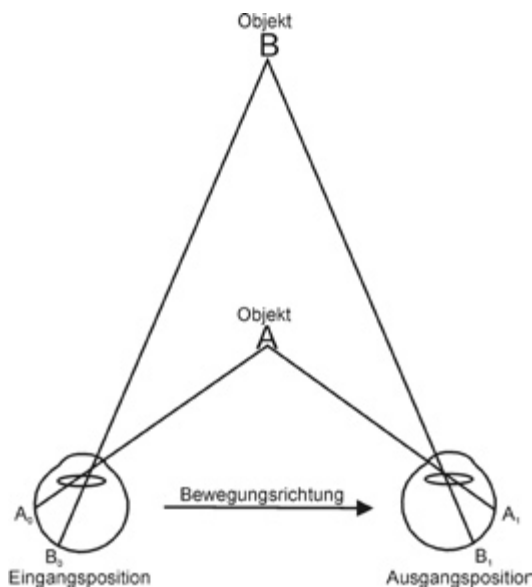


Abb. 29: Bewegungsparallaxe

Wir nehmen ein nahes Objekt A und ein entferntes Objekt B an und ein Auge, das sich aus der Ausgangsposition nach rechts in die Ausgangsposition verschiebt. In der Ausgangsposition werden A auf  $A_0$  und B auf  $B_0$  abgebildet. Am Ende der Bewegung verschieben sich diese Netzhautbilder auf  $A_1$  und  $B_1$ . Die Abbildung von A hat also einen relativ weiten Weg quer durch das Gesichtsfeld des Beobachters zurückgelegt, die Abbildung von B hat sich verglichen damit nur wenig bewegt. Nahe Objekte legen während einer Bewegung also größere Entfernungen auf der Netzhaut zurück als entferntere und da die Zeitspanne dazu für beide gleich lang, müssen sie das schneller tun. Daher rührt der Geschwindigkeitsunterschied, aus dem wir zurück auf die Entfernung schließen können.

### Fortschreitendes Zu- und Aufdecken von Flächen

Das Kriterium des **fortschreitenden Zu- und Aufdeckens** basiert darauf, daß wir zwei in unterschiedlicher Entfernung gelegene Flächen als relativ zueinander bewegt sehen, wenn wir selbst unsere Position anders als senkrecht zu ihnen verändern. Die Bewegung in die eine Richtung führt dazu, daß die nahegelegene Fläche die entferntere zudeckt, die Bewegung in die andere Richtung

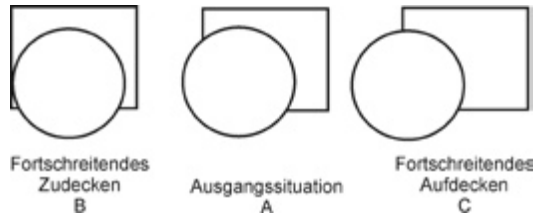


Abb. 30: Fortschreitendes Zu- und Aufdecken

Die Abbildung zeigt, daß ein Beobachter die hintere Fläche als bedeckter sieht, wenn er sich aus der Ausgangsposition A nach links bewegt (B) und als aufgedeckt, wenn er sich umgekehrt nach rechts bewegt (C).

bewirkt umgekehrt ihre Aufdeckung. Dieser Anhaltspunkt für räumliche Tiefe ist eng mit der Bewegungsparallaxe verwandt und ist an Kanten und Grenzflächen besonders effektiv.

### Verdeckung und Überschneidung

Wenn ein Gegenstand einen Anderen überschneidet und zum Teil verdeckt, nehmen wir diesen als weiter vorn liegend wahr. Bei dieser Betrachtung erhalten wir zwar keine nähere Information über die Entfernungen beider Gegenstände, können aber auf deren relative räumliche Position schließen. So führen **Verdeckung und Überschneidung** zu einer Tiefenwahrnehmung, die der Ausdehnung des verdeckten Objekts entsprechen. Wie sich der Eindruck von Raumtiefe aus



## Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung



Abb. 31: Verdeckung und Überschneidung

der Objektüberschneidung ergibt, erklärt sich bei Objekten, die uns bekannt sind, recht einfach: Wir wissen, wie sie vollständig aussehen und versuchen sie auf dieser Basis zu vervollständigen. Allerdings ergibt sich die Tiefenwahrnehmung auch bei gänzlich unbekanntem



Abb. 32: Chiaroscuro

Mustern und die Erklärung dafür steht noch aus. Wie schwierig es ist, Tiefe ohne dieses Kriterium zu konstruieren, können Sie an Abb. 31 ausprobieren. Im unteren Bildteil gibt es eine deutlich nachvollziehbare Verdeckung und Überschneidung und deswegen fällt es uns leicht die räumliche Anordnung der Elemente wahrzunehmen. Verdecken Sie aber diese untere Bildhälfte, schwindet der Eindruck, weil es plötzlich schwer wird festzustellen, welche Objekte des freien Abschnitts vor- bzw. hintereinander liegen.

### Relative Größe

Abb. 34 illustriert das Kriterium der relativen Größe. Obwohl die Graphik zweidimensional ist, verleitet uns der Größenunterschied der zwei Quadrate dazu anzunehmen, das kleine Objekt sei weiter entfernt als das große. Unter der Voraussetzung, daß die Dinge gleich groß sind, erscheint uns also ein kleineres Objekt weiter entfernt zu sein als ein größeres und daraus leitet das visuelle System den Eindruck räumlicher Tiefe ab.

### Schattenwurf

Schatten entstehen aus der Interaktion des Lichts mit den Gegenständen und Geländeformen um uns herum und liefern uns wichtige Hinweise auf das Vorhandensein von räumlicher

Ausdehnung und Tiefe. Grundsätzlich unterscheiden wir zwischen dem **Schlagschatten**, den ein Gegenstand auf seine Umgebung wirft und dem als **Chiaroscuro** bezeichneten hell-dunkel-Muster einer strukturierten Oberfläche. Schlagschatten nehmen wir häufig bewußt wahr, berücksichtigen sie als Anhaltspunkt für räumliche Tiefe aber nur dann, wenn wir es mit ausgedehnten Flächen zu tun haben. Das Chiaroscuro spielt dagegen eine große Rolle bei der eher unbewußten Wahrnehmung, da es eng mit den räumlichen Strukturen der Objektoberflächen zusammenhängt.

Aber bei genauerer Betrachtung sind Schatten viel weniger eindeutig, als sie uns in unserer alltäglichen Wahrnehmung erscheinen. Erhebungen und Vertiefungen erzeugen beide charakteristische Schattenbilder auf der jeweils lichtabgewandten- (Erhebungen) bzw. lichtzugewandten (Vertiefungen) Seite. Aus ihnen können wir in Kenntnis der Beleuchtungsverhältnisse darauf schließen, ob wir eine Erhebung oder eine Vertiefung vor uns haben. In vielen Fällen wissen wir jedoch nicht, aus welcher Richtung das Licht einfällt. In solchen Situationen entsteht trotzdem immer eine Wahrnehmung mit räumlicher Ausdehnung, die auf einer praktischen Vermutung unserer visuellen Intelligenz basiert. Im Englischen bezeich-

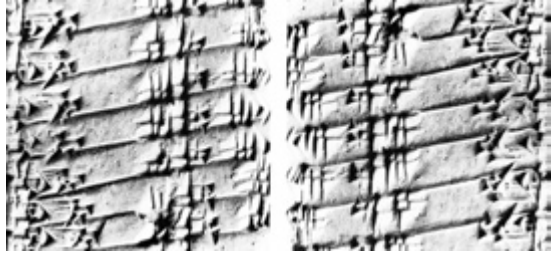


Abb. 33: Doppeldeutiger Schattenwurf

net man sowas als *educated guess*. Diese Vermutung basiert allem Anschein nach auf der Annahme einer über dem Kopf befindlichen Lichtquelle, solange wir keine definitiven anderen Anhaltspunkte besitzen. Das ergibt vor dem Hinter-

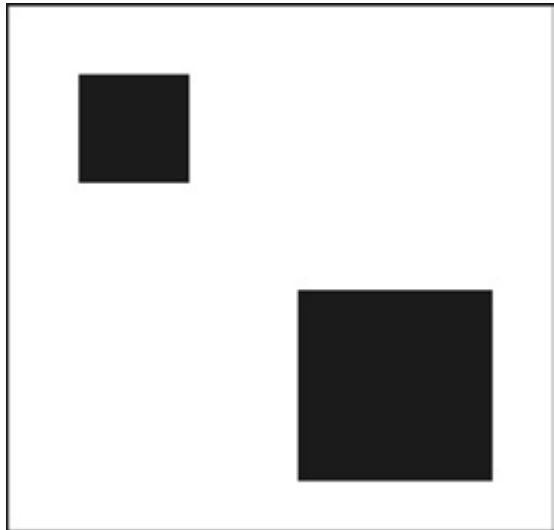


Abb. 34: Relative Größe

## Die Wahrnehmung des Raums und seiner Ausdehnung

grund unserer Entwicklungsgeschichte einen perfekten Sinn, denn die weitaus längste Zeit haben wir mit der Sonne als einziger Lichtquelle verbracht. Gerichtetes Licht aus künstlichen Quellen gibt es dagegen erst seit so kurzer Zeit, das es kaum Niederschlag in unserem visuellen System gefunden haben kann. Aus diesem Grund haben wir wohl gelernt im Zweifelsfall die Lichtrichtung „von oben“ anzunehmen und unsere Entscheidung, ob Erhebung oder Vertiefung, an ihr zu orientieren. Abb. 33 illustriert diesem Zusammenhang. Im Bildausschnitt links scheinen kleine Erhebungen hervorzuspringen. Auf der rechten Seite blicken wir dagegen auf Vertiefungen. In Wirklichkeit handelt es sich um eine einzige Aufnahme, die einmal richtig herum (rechts) und einmal um 180° gedreht (links) abgebildet ist. Wenn Sie das Buch auf den Kopf stellen, können Sie den Effekt nachvollziehen. Interessanter Weise bleibt der jeweilige Eindruck bestehen, obwohl Sie die Natur der Täuschung nun kennen. Das untermauert die Unabhängigkeit unsere visuellen Wahrnehmung von unserem Wissen.