

Experiment des Monats

Wie sich optische Täuschungen, die den Eindruck schräger Linien erwecken, mit den Besonderheiten der visuellen Bildverarbeitung erklären lassen.

Von Jearl Walker

Ein Karo-Muster aus schwarzen und weißen Fliesen, die in versetzten Reihen angeordnet und durch schmale Fugen voneinander getrennt sind, narrt den naiven Betrachter (Bild 1): Die Fugenlinien scheinen reihenweise abwechselnd nach links oder rechts zusammenzulaufen, so daß der Eindruck entsteht, in der einen Reihe seien die Kacheln auf der rechten und in der nächsten auf der linken Seite breiter.

Diese optische Täuschung, auch Fliesentäuschung genannt, fiel Wahrnehmungsforschern in den siebziger Jahren an der Wand eines Cafés in Bristol (Großbritannien) auf. Im Jahre 1979 veröffentlichten dann Richard L. Gregory und Priscilla Heard von der Universität Bristol die erste eingehende Untersuchung darüber. Sie brachten dieses Muster mit einem in Verbindung, das schon 1897 der Psychologe Hugo Münsterberg beschrieben hatte.

Auch bei der Münsterberg-Täuschung scheinen die oberen und unteren Kanten von einzelnen Fliesen geneigt zu sein, und die Neigungsrichtung wechselt von Reihe zu Reihe; der Eindruck des Zusammenlaufens ist jedoch schwächer (Bild 2). Besonders auffällig ist, daß sich die weißen Rechtecke auf der einen Seite zu verbreitern scheinen.

In beiden Mustern ist die Neigung natürlich nur eingebildet: Keines enthält

irgendwelche schiefen Elemente. Man kann die Täuschung ausschalten, indem man die Reihen einzeln und möglichst nah an der Papieroberfläche entlangschaut.

Gregory und Priscilla Heard (sowie andere nach ihnen) stellten fest, daß die Fliesentäuschung am ausgeprägtesten ist, wenn zwischen den beiden Fliesensorten ein großer Helligkeitsunterschied besteht und wenn die Fugen schmal und von mittlerer Helligkeit sind. Sind die Fugen dagegen ebenso hell wie die hellen Fliesen, erscheint die Täuschung schwächer oder gar nicht; sind sie gar heller, tritt die Täuschung in keinem Fall auf. Stimmen die Fugen in der Helligkeit mit den dunklen Bereichen überein, erhält man die relativ schwache Münsterberg-Täuschung, während die Linien bei noch dunkleren Fugen überhaupt nicht mehr zusammenzulaufen scheinen.

Die Fliesen können auch farbig sein, doch müssen sich die Farben in der Helligkeit deutlich unterscheiden. Zwar setzt die Täuschung voraus, daß die Fliesen versetzt angeordnet sind — doch darf das nicht so weit gehen, daß ein Schachbrettmuster entsteht.

Gregory und seine Kollegin verglichen die Anordnung auch mit Mustern, die James Fraser zu Beginn dieses Jahrhunderts erfunden hat. Fraser demon-

strierte, daß eine schmale Reihe aus leicht schrägstehenden hellen und dunklen Linien den Eindruck einer insgesamt geneigten Reihe erzeugt. Man spricht von Seiltäuschung, weil jede Reihe aussieht wie ein Seil aus zwei verzwirnten Fasern (Bild 3).

Die Seiltäuschung konnte bis heute nicht zufriedenstellend erklärt werden. Vielleicht rührt sie daher, daß die für die Bestimmung kleinräumiger (lokaler) Orientierungen verantwortlichen Teile des Sehsystems das Wahrnehmen großräumiger (globaler) Orientierungen beeinflussen können. Dieser Effekt scheint sich beim Betrachten vieler kleiner, gleichartig geneigter Elemente zu verstärken.

Erste Erklärungen

Beruhet die Fliesentäuschung auf demselben Effekt? Wenn ja, was sind dann die örtlich geneigten Elemente? Der Versatz der schwarzen und weißen Fliesen in aneinandergrenzenden Reihen scheint zwar diesen Zweck zu erfüllen, aber die Fliesen sind zu groß. Außerdem bleibt unklar, warum die Fuge einen bestimmten Helligkeitskontrast beisteuern muß. Lange Zeit versuchten Forscher, eine lokale Neigung ausfindig zu machen, die das globale Zusammenlaufen der Reihen hervorrufen könnte.

In ihrem Artikel äußerten Gregory und Priscilla Heard die Vermutung, daß die lokale Neigung erzeugt werde, wenn das Sehsystem die Kanten einer Fuge erkenne. Das Auge führt immerfort schwache, ruckartige Bewegungen durch, um die Grenzlinien (von Wahrnehmungsforschern üblicherweise Kanten genannt) im Blickfeld über die Netzhaut zu verschieben, da die Lichtrezeptoren in der Netzhaut nur auf zeitliche Helligkeitsänderungen reagieren. Zum Ausgleich dafür muß irgendein Mechanismus die Lage der Grenzlinien gleichsam einfrieren, damit sich das Bild nicht mit den Augen mitbewegt.

Wo die Fuge Fliesen derselben Farbe (weiß oder schwarz) trennt, werden die Kanten an der richtigen Stelle fixiert. Separiert jedoch eine mittelhelle Fuge zwei in ihrer Helligkeit stark unterschiedliche Fliesen, könnte der Festhaltungemechanismus weniger genau arbeiten — mit dem Ergebnis, daß die Kanten leicht verschoben sind. Entlang einer Fuge nimmt das Sehsystem dann periodische Schwankungen in der Position der Fugenränder wahr, so daß die Fuge dem gedrehten Seil ähnelt.

Im Jahre 1979 erklärten Bernard Moulden und Judy Renshaw von der Universität Reading (Großbritannien) die Münsterberg-Täuschung mit einer

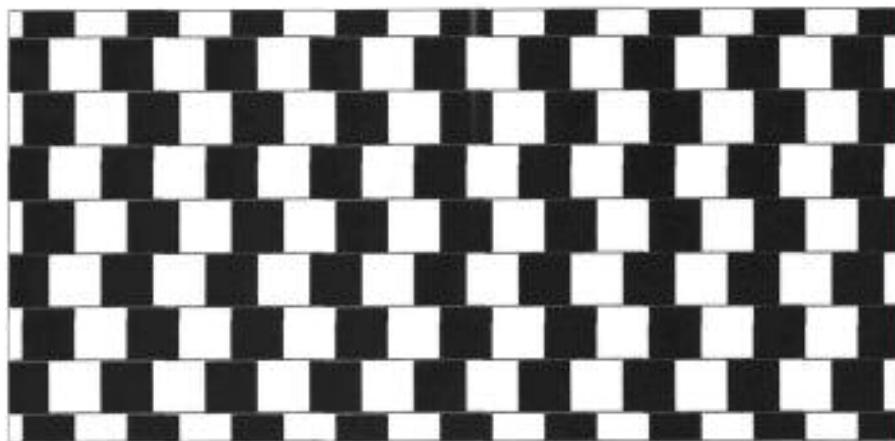


Bild 1: Die Fliesentäuschung.

Idee von Hermann von Helmholtz, einem der Pioniere der Sehforschung im 19. Jahrhundert. Grenzt eine leuchtend weiße Fläche an eine mattschwarze, scheint die Grenzlinie in Richtung auf die schwarze Fläche verschoben. Diese sogenannte Überstrahlung könnte die scheinbare senkrechte Verbreiterung am Ende einer weißen Fläche erklären, die an drei Seiten von schwarzen Kacheln umgeben ist. Das entgegengesetzte, oben und unten von weißen Fliesen flankierte Ende wirkt dagegen nicht verbreitert. Die periodische Verschiebung der Ober- und Unterkanten der weißen Fliesen erzeugt demnach eine örtliche Neigung.

Noch eine andere Erklärung veröffentlichte Mark E. McCourt von der Universität von Kalifornien in Santa Barbara im Jahre 1983. Sie beruht auf dem Effekt der Helligkeitsbeeinflussung. Danach läßt der Wechsel von hellen und dunklen Fliesen bei der Fliesentäuschung die scheinbare Helligkeit entlang den waagerechten Fugen variieren: Zwischen den dunklen Fliesen scheint die Fuge etwas heller und zwischen den hellen etwas dunkler zu sein. Der scheinbar dunklere Fugenabschnitt verbindet dann zwei dunkle Fliesen entlang einer Schräge und der scheinbar hellere zwei helle Fliesen entlang einer dazu parallelen Schräge. Wieder ähnelt die Fuge einem gedrehten Seil.

Dazu paßt, daß sich die Fliesentäuschung verstärkt, wenn man die Fugen in regelmäßigen Abständen dunkler und heller macht (Bild 4). Am stärksten wird die Illusion, wenn man die Fuge tatsächlich wie bei der Seiltäuschung mit leicht geneigten hellen und dunklen Linien ausfüllt.

Kantenerkennung im Rohbild

M. J. Morgan vom University College in London hat zusammen mit Moulden 1986 wohl die beste Erklärung für die Fliesentäuschung gefunden. Sie fußt auf einem Sehmodell, das im Verlauf der letzten 25 Jahre Schritt für Schritt erarbeitet worden ist. Besonderen Anteil daran hatte David Marr vom Massachusetts Institute of Technology (MIT). Zunächst will ich das Modell etwas vereinfacht skizzieren und mich dabei — unter Verzicht auf die mathematischen Einzelheiten — auf die Verarbeitung des gesehenen Bildes durch die Netzhaut konzentrieren, um danach auf die Täuschung zurückzukommen.

Nach Marr wird in den ersten Schritten des Sehvorgangs ein grober Aufriß des Gesehenen erstellt. Frei von allen Feinheiten enthält er nur Flecken, Linien, Begrenzungen und Kantenab-

schnitte, die die wirklichen Gegenstände grob umreißen. Zum Erstellen dieses Rohbildes werden im ersten Schritt der Bildverarbeitung durch Netzhaut und Gehirn die scharfen Helligkeitssprünge an den Kanten registriert.

Diese Verarbeitung beginnt in der Netzhaut mit der Absorption von Lichtquanten (Photonen) durch lichtempfindliche Zellen (Photorezeptoren), die daraufhin über bipolare Nervenzellen Signale an Nervenknottenzellen (Gan-

glienzellen) senden (Bild 5). Jede Ganglienzelle ist mit einer bestimmten Gruppe von lichtempfindlichen Zellen verbunden, die über einen kleinen Netzhautbereich verteilt sind und ihr rezeptives Feld bilden. (Bild 5 zeigt nur einen kleinen Teil der Photorezeptoren.) Das rezeptive Feld ist in Zentrum und Rand unterteilt, die auf Lichteinfall entgegengesetzt reagieren. Die Summe der von den lichtempfindlichen Zellen eines rezeptiven Feldes abgegebenen

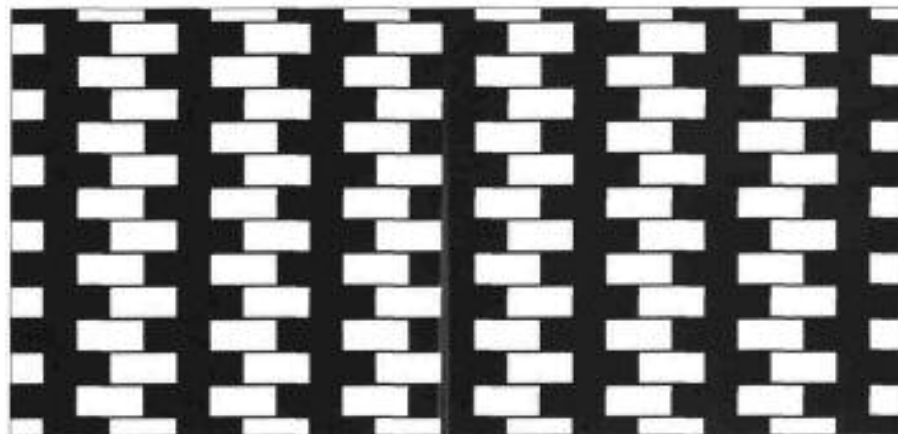


Bild 2: Die Münsterberg-Täuschung.

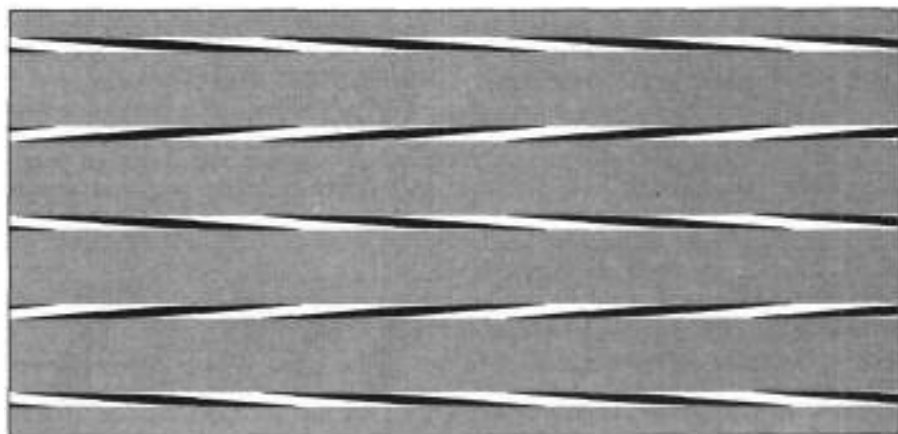


Bild 3: Die Seiltäuschung.

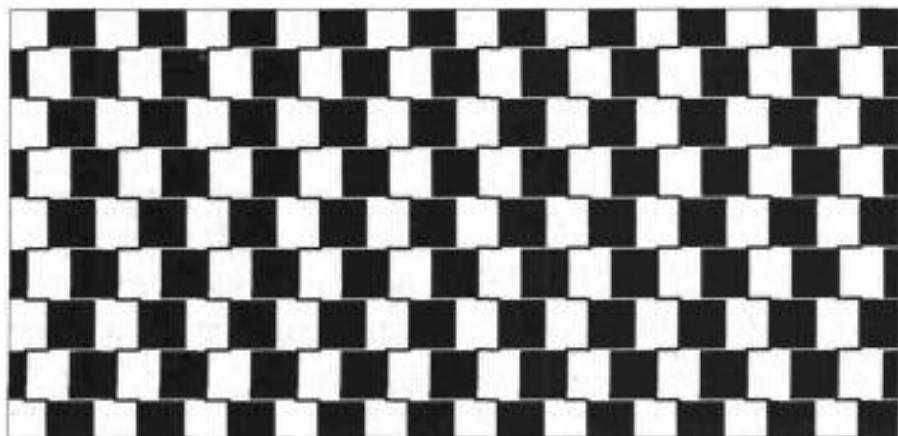


Bild 4: Eine Variante der Fliesentäuschung.

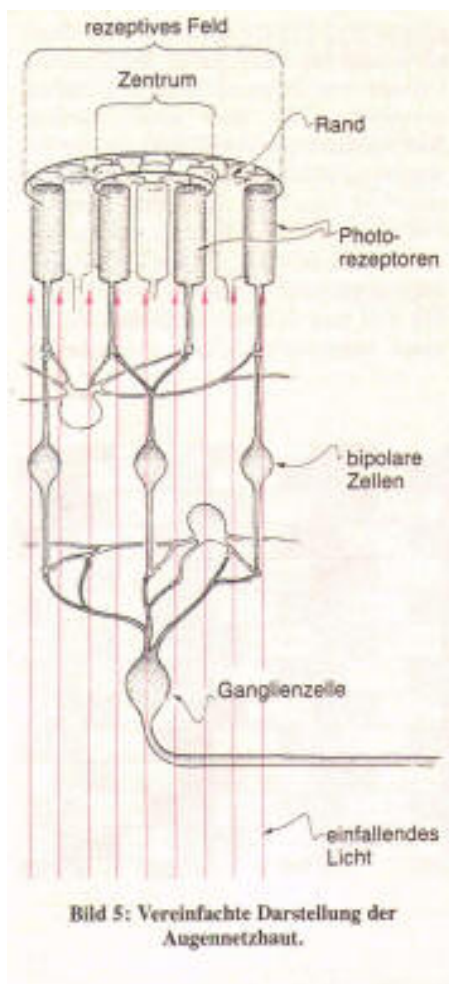


Bild 5: Vereinfachte Darstellung der Augennetzhaut.

Signale bestimmt die Antwort der zugehörigen Ganglienzelle.

Die Stärke dieser Antwort bemisst sich danach, wieviele Impulse pro Zeiteinheit die Ganglienzelle zum Gehirn schickt. Eine Ganglienzelle, deren rezeptives Feld nicht beleuchtet wird, feuert langsam, das heißt mit ihrer Ruhefrequenz. Fällt nun nur auf die mittleren lichtempfindlichen Zellen Licht, erhöhen bestimmte Ganglienzellen, die als EIN-Zentrum-Zellen bezeichnet werden, ihre Feuerrate, während die anderen — die AUS-Zentrum-Zellen — das Feuern ganz einstellen. Wird dagegen nur der Rand beleuchtet, geschieht das Umgekehrte: Eine EIN-Zentrum-Zelle schaltet ab, während eine AUS-Zentrum-Zelle schneller als im Ruhezustand Impulse abschickt. Werden Mitte und Rand gleich stark beleuchtet, feuern beide Arten von Ganglienzellen ungefähr so häufig oder etwas häufiger als im Ruhezustand.

Angenommen, die Grenzlinie zwischen einem hellen und einem dunklen Gebiet fällt auf die Netzhaut. Im gleichmäßig erleuchteten Gebiet auf der hellen Seite feuern dann sowohl EIN-Zentrum- als auch AUS-Zentrum-Zellen mit Ruhengeschwindigkeit oder etwas schneller. Ebenso geben auf der dunklen Seite beide Zellarten im Ruhetempo

ihre Impulse ab. Anders die Zellen auf der Kante.

Jede EIN-Zentrum-Zelle, deren rezeptives Feld in der Mitte heller beleuchtet ist als an einer Seite, feuert heftig — ebenso jede AUS-Zentrum-Zelle, deren rezeptives Feld an einer Seite mehr Licht empfängt als in der Mitte.

Die von beiden Zellarten ausgesandten Signale verlaufen im Sehweg zunächst getrennt, werden aber zusammengebracht, wenn es gilt, die Kanten in richtiger Orientierung in das Rohbild einzufügen. Sind an einer Stelle der Netzhaut die EIN-Zentrum-Zellen und unmittelbar daneben die AUS-Zentrum-Zellen aktiv, dann muß zwischen beiden eine Kante liegen — also wird eine Kante in das Rohbild aufgenommen.

Laut Marr ist das von einer Ganglienzelle abgegebene Signal ein Maß dafür, wie stark sich der Helligkeitsverlauf innerhalb des rezeptiven Feldes ändert, das heißt wie stark die Helligkeitskurve gekrümmt ist (das entspricht mathematisch der zweiten Ableitung). Bei einheitlich heller oder dunkler Beleuchtung oder bei gleichmäßiger Helligkeitsänderung feuern die Zellen mit ihrer Ruhefrequenz oder nur etwas schneller. Ändert sich jedoch der Helligkeitsverlauf jäh — wie an einer Kante —, sind die EIN-Zentrum-Zellen auf der hellen und die AUS-Zentrum-Zellen auf der dunklen Seite der Kante wesentlich aktiver (Bild 6 links).

Beim Anblick einer dunklen Linie werden also zwei Kanten wahrgenommen: Das Innere der Linie aktiviert AUS-Zentrum-Zellen, während direkt

neben der Linie EIN-Zentrum-Zellen angeregt werden. Beim Anblick einer hellen Linie ist das Anregungsmuster genau umgekehrt.

Entstehung der Fliesentäuschung

Morgan und Moulden wandten Marrs Modell nun auf die Fliesen- und die Münsterberg-Täuschung an. Betrachten wir die Fliesentäuschung bei mittlerer Helligkeit der Fugen. In diesem Fall erzeugen die gleichmäßig dunklen oder hellen Innenbereiche der Fliesen schwache Gangliensignale. Diese Bereiche sind in Bild 6 rechts unten grau dargestellt.

Stärkere Signale kommen dagegen von den Fliesenrändern und von den Fugen. Wo eine Fuge helle Fliesenbereiche voneinander trennt, regt ihre relative Dunkelheit AUS-Zentrum-Zellen an. Die Linie dieser Anregung setzt sich an den Kanten der Bilder dunkler Fliesen fort, wo ebenfalls starke Signale von AUS-Zentrum-Zellen auftreten. Die entsprechenden Bereiche sind in Bild 6 rechts unten schwarz gezeichnet.

Wo die Fuge dagegen dunkle Fliesenbereiche voneinander trennt, regt ihre relative Helligkeit EIN-Zentrum-Zellen an. Die Linie dieser Anregung setzt sich an den Kanten der Bilder heller Fliesen fort, die ebenfalls starke Signale von EIN-Zentrum-Zellen erzeugen. Die entsprechenden Stellen sind in Bild 6 rechts unten weiß gezeichnet.

Die Linien starker Aktivität von EIN-Zentrum- und AUS-Zentrum-Zellen

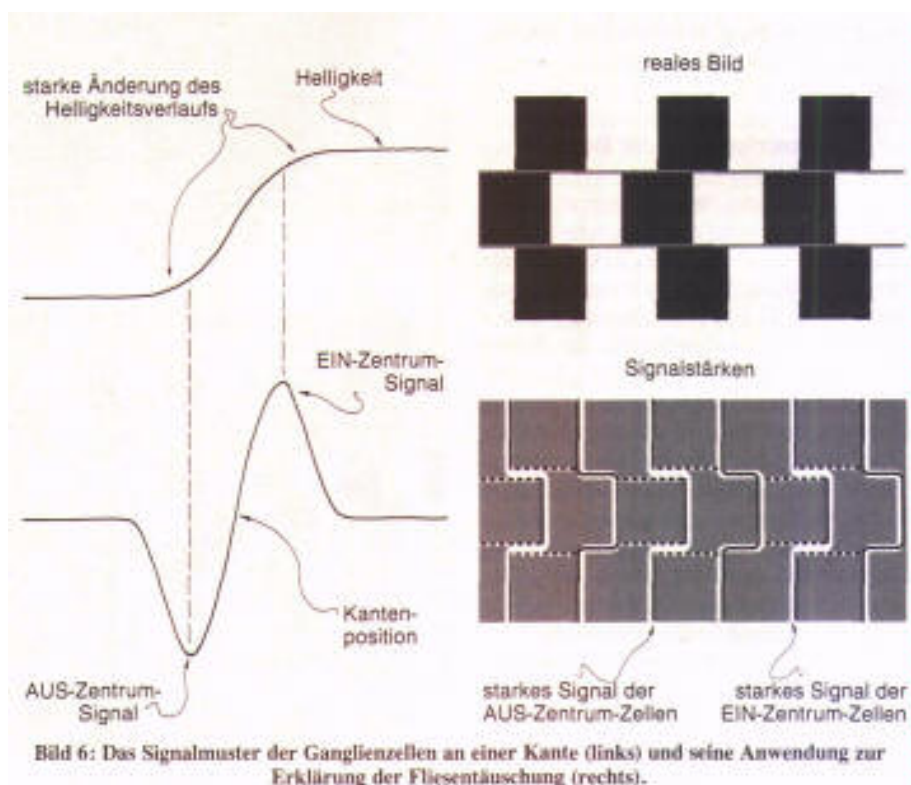


Bild 6: Das Signalmuster der Ganglienzellen an einer Kante (links) und seine Anwendung zur Erklärung der Fliesentäuschung (rechts).

bilden ein periodisches Muster mit zwei oder drei sich regelmäßig wiederholenden Stufen. Diese steigen nach rechts oder links an und erzeugen so den Eindruck einer leichten Schräge. Entsprechend liegen die in das Rohbild eingefügten Kanten entlang den Fugen leicht geneigt. Durch die Wiederholung wird aus dieser örtlichen Neigung eine globale - genau wie beim Seiltäuschungsmuster. Die Täuschung entsteht also nicht deswegen, weil es eine lokale Neigung im Bild selbst gäbe, sondern weil die verarbeiteten Signale das Rohbild der Fuge so aussehen lassen, als würde es von geneigten Elementen erzeugt.

Diese Erklärung scheint dem einen oder anderen vielleicht etwas weit hergeholt, aber mit ihr läßt sich die Abhängigkeit der optischen Täuschung von der Helligkeit der Fuge ziemlich gut nach vollziehen. Ist die Fuge nämlich genauso hell wie die hellen Fliesen, fehlt dort, wo sie helle Fliesen voneinander trennt, das Signal der AUS-Zentrum-Zellen, und die Ähnlichkeit zwischen dem resultierenden Aktivitätsmuster der Ganglienzellen und dem Seiltäuschungsmuster ist geringer. Eine noch hellere Fuge regt zwischen den hellen Fliesen sogar umgekehrt die EIN-Zentrum-Zellen an, so daß gar keine optische Täuschung entsteht.

Analog schwächt sich, wenn die Fuge genauso dunkel wie die dunklen Fliesen ist, der Eindruck des Zusammenlaufens ab oder verliert sich ganz, weil die EIN-Zentrum-Zellen an der Trennlinie zwischen den dunklen Fliesen stumm bleiben. Bei noch dunklerer Fuge werden statt dessen AUS-Zentrum-Zellen aktiviert, und die Täuschung bleibt in jedem Fall aus.

Verwandte optische Täuschungen

Die Überstrahlung bei der Münsterberg-Täuschung beruht vielleicht noch auf einem anderen Effekt, der ebenfalls bei der Kantenerkennung auftritt. Im Jahre 1984 äußerten Morgan, Moulden, G. Mather vom University College in London und R. J. Watt aus Reading die Vermutung, daß die Überstrahlung von einer nichtlinearen Antwort auf einfallendes Licht in einem der ersten Schritte des Sehvorgangs herrühre. Über den genauen Ort dieses Vorgangs schweigen sich die vier Wissenschaftler aus, aber zu denken wäre an die lichtempfindlichen Zellen, die bipolaren Nervenzellen oder ihre unzähligen Verbindungen.

Der Begriff „nichtlinear“ bedeutet, daß die Antwort des Sehsystems auf eine leichte Helligkeitsänderung vom

Absolutwert der Helligkeit abhängt. Dadurch ändert sich der Meßwert der Ganglienzelle für die Helligkeitsabstufung im rezeptiven Feld — mit dem Ergebnis, daß die Kante leicht in den dunklen Bereich verschoben zu sein scheint.

Es gibt mehrere Varianten der Münsterberg-Täuschung; zwei hat R. H. Day von der Monash-Universität in Clayton im australischen Bundesstaat Victoria 1978 veröffentlicht. Die eine ist eine auf drei Linien reduzierte Version der Täuschung, bei der die mittlere Linie gegenüber den beiden anderen geneigt zu sein scheint, während sie in Wahrheit genau parallel zu ihnen verläuft (Bild 7). In der zweiten Variante sind die Fliesen in den einzelnen Reihen unterschiedlich weit gegeneinander versetzt.

Außerdem hat Day eine unveröffentlichte Beobachtung von Gregory zu einer älteren Anordnung mitgeteilt, die die sogenannte Kindergarten-Täuschung hervorruft (Bild 8). Demnach erzeugt diese — anders als die ansonsten sehr ähnliche Münsterberg-Anordnung — auch dann noch die Illusion eines gewissen Zusammenlaufens, wenn man sie aus gleich hellen farbigen Fliesen aufbaut. Möglich also, daß bei der eindrucksvollen Kindergarten-Täuschung ein zusätzlicher Mechanismus mitwirkt.

Ein anderes Beispiel einer scheinbaren Konvergenz haben Steve P. Taylor und J. Margaret Woodhouse aus Cardiff in Wales 1980 veröffentlicht; es ist in Bild 9 gezeigt. Oben dient eine einzi-

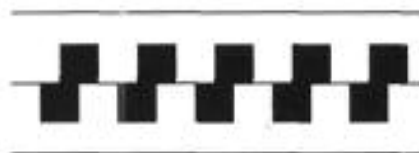


Bild 7: Vereinfachte Münsterberg-Täuschung.

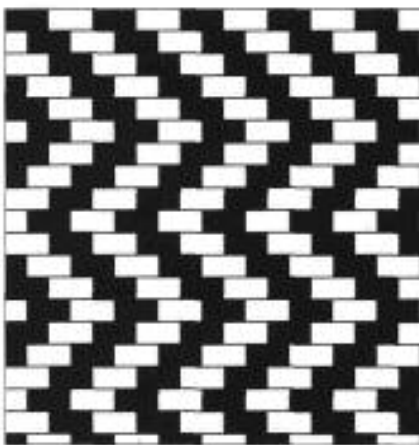


Bild 8: Die Kindergarten-Täuschung.

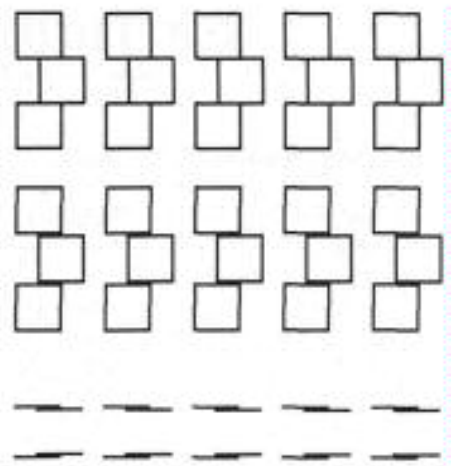


Bild 9: Die Taylor-Woodhouse-Täuschung.

ge Linie als Grenze zwischen zwei benachbarten Quadraten; in diesem Fall entsteht keine Täuschung. Besteht die Grenze jedoch aus zwei verschiedenen Linien, hat man den Eindruck des Zusammenlaufens (Mitte). Dasselbe gilt für eine Variante, bei der nur noch quasi die Grenzlinien übrig sind (unten); sie ähnelt dem Seiltäuschungsmuster, auch wenn sie keine unmittelbar geneigten Bestandteile aufweist.

Diese abgemagerten Muster erscheinen selbst dann als konvergierend, wenn sie übereinander oder wahllos verteilt auf einer Seite angeordnet sind. Im Jahre 1985 zeigte aber Paola Bresnan von der Universität Padua, daß der Eindruck des Zusammenlaufens verschwindet, wenn die Linien zu dünn oder zu dick sind.

Die Taylor-Woodhouse-Täuschung muß demnach damit zusammenhängen, in welcher Form die Linien in das Rohbild des Sehsystems eingetragen werden. Sind sie zu dünn, werden sie einfach gemeinsam als durchgehende, waagerechte Linie dargestellt. Sind sie zu dick, erscheinen sie detailliert mit ihren waagrecht orientierten Kanten im Rohbild. Bei mittlerer Dicke dagegen werden sie durch geneigte Streifen angenähert, die ihre grobe Form ohne Rücksicht auf die Einzelheiten wiedergeben. Später füttert das Sehsystem die Einzelheiten nach, so daß man schließlich sehr wohl die aufeinandergelegten Linien wahrnimmt — der Eindruck der Neigung aber bleibt.

Außer auf gekachelten Wänden kann man optischen Täuschungen bekanntlich auch in Graphiken und in moderner Kunst begegnen. Ich frage mich übrigens, wie oft wohl schon eine Graphik bewußt falsch gezeichnet oder eine Fliesenwand absichtlich schief konstruiert werden mußte, damit sie gerade aussah!