

UNTERSUCHUNGEN ZUR BEDEUTUNG MODALER UND AMODALER PERZEPTTE IN DER VISUELLEN WAHRNEHMUNG

DISSERTATION
ZUR ERLANGUNG DES DOKTORGRADES
DER MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHEN FAKULTÄT
DER CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL

VORGELEGT VON

TOM R. SCHERZER

KIEL, IM JUNI 2014

Gutachter: Prof. Dr. Rainer Mausfeld

Zweitgutachterin: Prof. Dr. Manuela Dittmar

Tag der Disputation: 27. Oktober 2014

Zum Druck genehmigt am: 27. Oktober 2014

„Man kann die Wahrheit nicht erzählen. [...] Alle Geschichten sind erfunden, Spiele der Einbildung, Entwürfe der Erfahrung, Bilder, wahr nur als Bilder. Jeder Mensch, nicht nur der Dichter, erfindet seine Geschichten – nur daß er sie, im Gegensatz zum Dichter, für sein Leben hält – anders bekommen wir unsere Erlebnismuster, unsere Ich-Erfahrung nicht zu Gesicht.“

MAX FRISCH (1960)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Ziele der Arbeit	9
2	Theoretischer Hintergrund	13
2.1	Das Fundamentalproblem der Wahrnehmungspsychologie	13
2.2	Theorieperspektiven der Wahrnehmungspsychologie	14
2.2.1	Klassische Perspektiven	15
2.2.2	Konstruktivistische Perspektiven	20
2.3	Perzeptuelle Vervollständigung	29
2.3.1	Phänomenologische Klassifikation perzeptueller Vervollständigungsphänomene	31
2.3.2	Modale Vervollständigung	33
2.3.3	Amodale Vervollständigung	39
2.3.4	Kritik an der Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung	50
3	Der Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung	57
3.1	Wahrnehmung von Bewegung	59
3.1.1	Darstellung von Bewegungsreizen	60
3.1.2	Wahrnehmung von diskreten Bewegungsreizen	61
3.2	Dynamische Maskierung diskreter Bewegungsreize	62
3.2.1	Experiment I	64
3.2.2	Experiment II	72
3.2.3	Experiment III	79
3.2.4	Diskussion	85
3.2.5	Zwischenfazit	88
3.3	Statische Maskierung diskreter Bewegungsreize	89
3.3.1	Experiment IV	89
3.3.2	Experiment V	94
3.3.3	Diskussion	99
3.4	Zusammenfassung und Diskussion	103
4	Der Einfluss von Verdeckung auf phänomenale Sichtbarkeit	107
4.1	Demonstration	108
4.2	Experiment VI	109
4.2.1	Methode	109
4.2.2	Ergebnisse	112
4.2.3	Diskussion	113
4.3	Experiment VII	115
4.3.1	Methode	115
4.3.2	Ergebnisse	118

4.3.3	Diskussion	120
4.4	Diskussion	120
4.4.1	Warum erfolgt eine partielle modale Ergänzung?	121
4.4.2	Bezug zum <i>Boundary Extension Effect</i>	130
4.4.3	Bezug zu visueller Persistenz	130
4.4.4	Bezug zum Anorthoskopischen Effekt	131
4.4.5	Bezug zu allgemeinen Theorieperspektiven der Wahrnehmung	132
5	Allgemeine Diskussion	135
5.1	Zusammenfassung	135
5.1.1	Der Einfluss von Verdeckung auf die Wahrnehmung von Bewegung	136
5.1.2	Der Einfluss von Verdeckung auf phänomenale Sichtbarkeit	138
5.2	Verbindung zwischen dem Glättungseffekt und dem Sichtbarkeitsparadoxon	140
5.3	Bezug der Befunde zu allgemeinen Theorien der Wahrnehmung	141
5.4	Fazit	142
5.5	Offene Fragen und Ausblick	142
	Literaturverzeichnis	145
A	Simulation mit einem raumzeitlichen Energiemodell	155
B	Daten	157
B.1	Ergebnisse des Experiments IV	157
B.1.1	Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der Messwerte je V_p und Bedingung	157
B.1.2	Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der aggregierten Messwerte je Bedingung	164
B.2	Ergebnisse des Experiments V	165
B.2.1	Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der Messwerte je V_p und Bedingung	165
B.2.2	Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der aggregierten Messwerte je Bedingung	169
C	Zusammenfassung	171
D	English Abstract	173
	Erklärung	175

Kapitel 1

Einleitung

Die Wahrnehmung unserer Umwelt ist eine erstaunliche Leistung des Gehirns. Es konstruiert aus vergleichsweise spärlichen Informationen, die im sensorischen Input verfügbar sind, reichhaltige, bedeutungshafte Perzepte (Mausfeld, 2010a, 2010b, 2011a). Einige der zentralen Fähigkeiten des Wahrnehmungssystems lassen sich am Beispiel der perzeptuellen Vervollständigung studieren, einem universellen Prinzip der *beständigen* und *vollständigen* Wahrnehmung der Dinge trotz fragmentierter, unvollständiger sensorischer Informationen. Diese Vervollständigungen bestehen aus der Tatsache, dass unter geeigneten Bedingungen eine Struktur wahrgenommen wird, die „vollständig und ohne Bruch ist, obwohl das System der korrespondierenden Reize Lücken enthält“ (Michotte, Thinès & Crabbé, 1991, S. 140). Sehr anschaulich zeigt sich dies am Phänomen der sog. *amodalen* Vervollständigung (ebd., S. 142 ff.), das darin besteht, dass Oberflächen oder Objekte als partiell verdeckt, aber dennoch vollständiges Ganzes wahrgenommen werden.

In Abbildung 1.1a sind mehrere graue Reizelemente dargestellt, die kleinteilig wirken und keine Bedeutung zu haben scheinen. Hingegen werden dieselben grauen Reizelemente in Abbildung 1.1b, in der Verdeckungshinweise durch eine Art Tintenklecks hinzugefügt wurden, viermal zum Buchstaben „B“ vervollständigt. Diese vervollständigten Bereiche sind weder hellgrau (wie die freiliegenden Bereiche) noch schwarz (wie der gleichzeitig wahrgenommene Tintenklecks im Vordergrund), aber dennoch perzeptuell präsent, gewissermaßen verdeckt sichtbar. Dieser perzeptuelle Eindruck wird als amodal bezeichnet und bezieht sich auf das Fehlen sensorischer Attribute wie Helligkeit, Farbe oder Textur in den verdeckten Bereichen eines Objekts (Michotte et al., 1991, S. 144). Amodale Vervollständigung ist dadurch charakterisiert, dass einerseits die perzeptuelle Vervollständigung über sensorisch gegebene Grenzen hinweg erfolgt (hier: über die Grenzen zwischen freiliegenden Buchstabenteilen und Tinten-

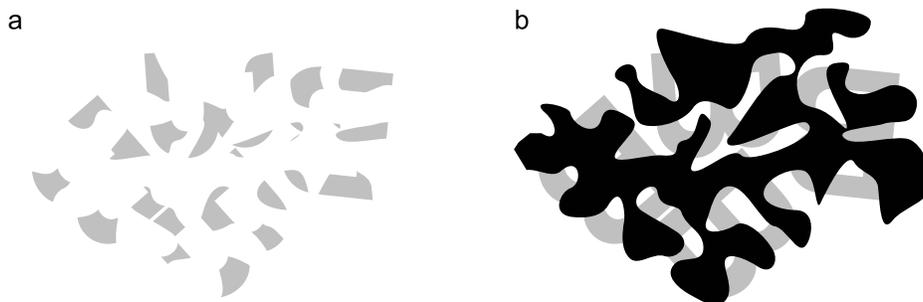


Abbildung 1.1: Amodale Vervollständigung bei Verdeckung. Während die hellgrauen Reizelemente in a kleinteilig wirken und selbst bei längerer Betrachtung keine Bedeutung zu haben scheinen, werden die identischen hellgrauen Reizelemente in b als vier Buchstaben „B“ wahrgenommen, die von einem schwarzen, tintenähnlichen Kleck teilweise verdeckt werden. [Adaptiert nach Bregman (1981, Abbildungen 4.4 und 4.5, S. 106 und 107).]

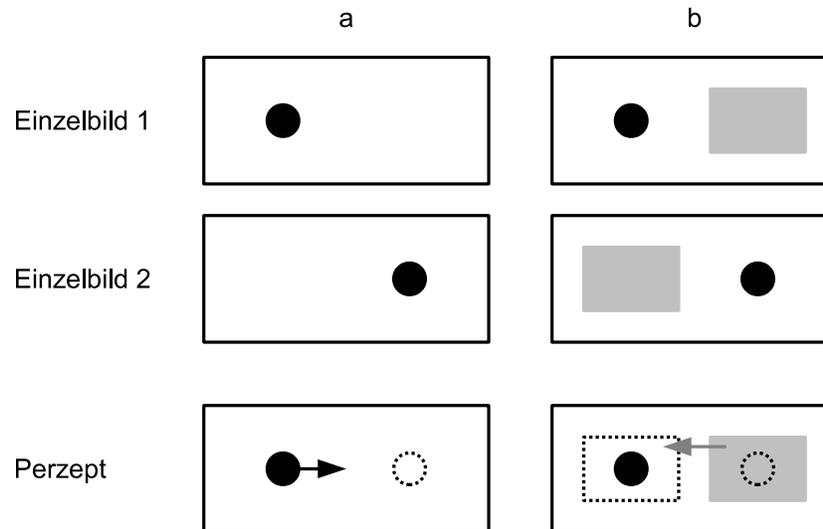


Abbildung 1.2: Scheinbewegung und Verdeckung. **a)** Ein runder Zielreiz wird alternierend an zwei unterschiedlichen Positionen dargeboten. Es wird typischerweise Scheinbewegung wahrgenommen. **b)** Ein-/Ausblendung eines größeren, rechteckigen Reizelements synchron mit dem Verschwinden/Erscheinen des Zielreizes. Nun wird nur mehr selten Scheinbewegung des Zielreizes wahrgenommen. Statt dessen scheinen zwei stationäre Scheiben abwechselnd von einem hin und her springenden Rechteck verdeckt zu werden. [Reize ähnlich denen in Sigman und Rock (1974), Experimente 1–3.]

klecks hinweg) und andererseits perzeptuelle Grenzen keine korrespondierende sensorische Grundlage haben (hier: die wahrgenommene Buchstabenform hinter dem Tintenklecks). Obwohl im Alltag nur selten bewusst wahrgenommen, ist partielle Verdeckung allgegenwärtig und tritt in natürlichen Szenen permanent auf. Das ist offensichtlich, wenn man berücksichtigt, dass jedes (undurchsichtige) Objekt mindestens seine eigene Rückseite verdeckt. Beispielsweise wird eine (undurchsichtige) Kugel als ganze Kugel wahrgenommen, obwohl nur die Hälfte ihrer Oberfläche direkt sichtbar ist.

Abbildung 1.1 demonstriert die wichtige Rolle der Wahrnehmung von Verdeckung bei der Szeneninterpretation. Zwar eliminiert *physikalische* (physico-geometrische) Verdeckung, also die Abschirmung des Auges vor Lichtstrahlen, die ein physikalischer Verdecker nicht transmittiert, Informationen über die abgeschirmten Bereiche des distalen Reizes, doch ausgehend von einem bestimmten sensorischen Input kann *perzeptuelle* Verdeckung, also die Identifizierung bzw. Deutung von Verdeckung in definierten Bereichen des Gesichtsfelds, zu einer stark veränderten Wahrnehmung der Gesamtszene führen und ihr dadurch eine neue oder überhaupt erst Bedeutung verleihen. Die perzeptuelle Vervollständigung der Buchstaben in Abbildung 1.1b setzt zunächst voraus, dass Teile des Reizes als Verdecker gedeutet werden. Dies ermöglicht dann die Identifizierung zusammengehöriger hellgrauer Elemente, die zu zusammengehörigen Einheiten vervollständigt werden, wodurch die Fragmente schließlich Bedeutung verliehen bekommen. Diese konstruktivistische Betrachtungsweise setzt implizit die theoretische Perspektive einer heuristischen, abduktionsbasierten Funktionsweise des Wahrnehmungssystems voraus. In Kapitel 2 werden zwei solche konstruktivistische Theorieperspektiven vorgestellt und gegen drei klassische Ansätze abgegrenzt.

Zahlreiche Studien zeigen, dass Verdeckungshinweise von einer Vielzahl visueller Prozesse genutzt werden (u. a. Kanizsa, 1979; Michotte et al., 1991; Nakayama, Shimojo & Silverman, 1989; Sekuler & Murray, 2001; Tse, 1999a). Den Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung (vgl. auch Burke, 1952; Wallach, 1935; Wertheimer, 1912) demonstriert auf eindrucksvolle Weise ein Experiment von Sigman und Rock (1974). Die Reize sind in Abbildung 1.2 illustriert: Wird ein Zielreiz alternierend an zwei unterschiedlichen Positionen dargeboten (a), entsteht bei geeigneten zeitlichen und räumlichen

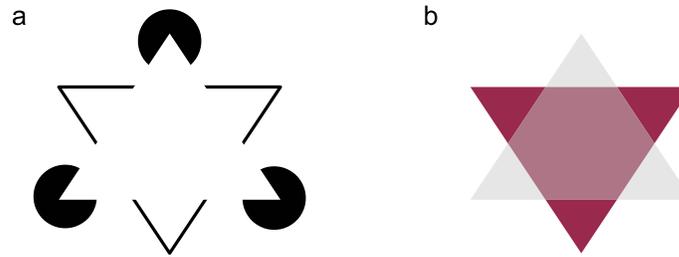


Abbildung 1.3: Modale Vervollständigung. **a)** Kanizsa-Dreieck (Kanizsa, 1979) mit sensorischer Qualität (weiße Oberfläche), das ohne korrespondierende physikalische Grenzen hervorgerufen wird. **b)** Vervollständigung zweier Dreiecke mit sensorischer Qualität (grau bzw. rötlich wahrgenommene Oberflächen) durch perzeptuelle Transparenz.

Parametern der Bewegungseindruck eines Objekts („Scheinbewegung“). Wird nun synchron mit dem Verschwinden des Zielreizes an dessen vorheriger Position ein größeres Reizelement eingeblendet, das undurchsichtig erscheint, und synchron mit dem Erscheinen des Zielreizes an dessen neuer Position ein ebensolches größeres Reizelement ausgeblendet (b), entsteht statt eines bewegten Objekts sehr häufig der Eindruck zweier beständiger, stationärer Objekte, die im Wechsel verdeckt und aufgedeckt werden und für die Dauer der Verdeckungsphasen jeweils amodal „sichtbar“ bleiben. Rock vertritt die (ebenfalls konstruktivistische) theoretische Perspektive, dass die Wahrnehmung häufig als Ergebnis eines Prozesses, der intelligentem Problemlösen ähnelt, aufgefasst werden kann. Demzufolge wäre in der Bedingung ohne Verdeckter der Eindruck von Scheinbewegung die Lösung des Problems, dass an alternierenden Positionen ein Zielreiz erscheint und verschwindet; da keine Hinweise vorhanden sind, die die Änderungen im Reiz anderweitig erklären könnten, wäre Bewegung die „plausibelste“ Lösung. Sind hingegen entsprechende Informationen verfügbar, auf die die sonst unerklärlichen Änderungen zurückgeführt werden könnten, würden andere Lösungen bevorzugt (Sigman & Rock, 1974, S. 9).

Dieser Befund und viele weitere zeigen, dass amodale Vervollständigung nicht nur bei räumlich partiell verdeckten Objekten auftritt, sondern auch bei kurzzeitig vollständig verdeckten Objekten. Diese werden als zwischenzeitlich verdeckte, aber dennoch beständige, also fortbestehende Entitäten wahrgenommen; analog zur amodalen Vervollständigung von räumlichen Lücken im Reiz (*Amodal Completion*) erfolgt hier also eine amodale Vervollständigung von zeitlichen Lücken, d. h. die Fortsetzung des perzeptuellen Eindrucks über zeitliche Lücken hinweg (*Amodal Integration*, nach Yantis, 1995, S. 182).

Michotte et al. (1991) stellten der amodalen Vervollständigung von verdeckten Objekten und Objektbereichen die *modale* Vervollständigung gegenüber, die dadurch charakterisiert ist, dass der perzeptuell vervollständigte Bereich visuelle Qualitäten wie Helligkeit, Farbe oder Textur aufweist. Eines der bekanntesten Beispiele ist das sog. Kanizsa-Dreieck (Kanizsa, 1979), das in Abbildung 1.3a dargestellt ist. Es wird üblicherweise ein aufrecht stehendes weißes Dreieck mit leuchtender Kontur wahrgenommen, dessen Fläche heller erscheint als der physikalisch identische weiße Hintergrund. Ein anderes Beispiel für modale Vervollständigung ist perzeptuelle Transparenz (Abbildung 1.3b), die zur Wahrnehmung einer vollständigen Oberfläche über physikalische Grenzen hinweg führt.

Die gängige Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung basiert auf dem qualitativ verschiedenartigen phänomenalen Eindruck, den ein direkt sichtbarer Bereich einer Szene verglichen mit einem (partiell) verdeckten Bereich üblicherweise hervorruft.

1.1 Ziele der Arbeit

Die traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung ist unter theoretischen und empirischen Gesichtspunkten problematisch. Die rein phänomenologisch motivierte Unterscheidung ist

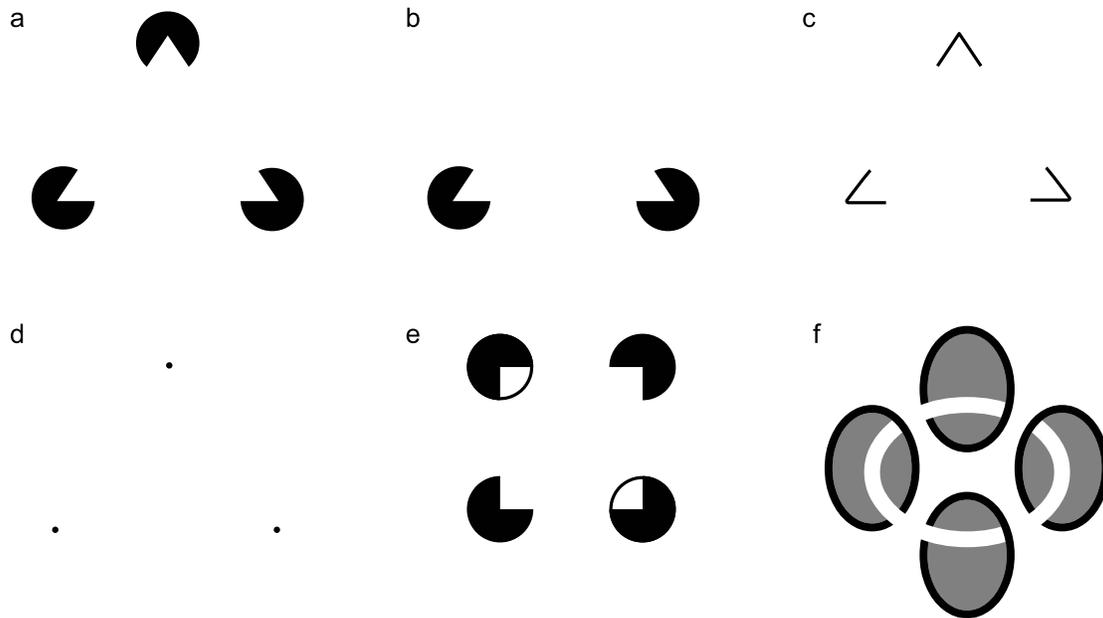


Abbildung 1.4: Modale oder amodale Vervollständigung? **a)** Kanizsa-Dreieck („illusionäres Dreieck“) wie in Abbildung 1.3a, dessen Oberfläche visuelle Qualitäten aufweist. **b)** Unvollständiges illusionäres Dreieck, dessen Kontur und Oberfläche mit zunehmendem Abstand von den induzierenden Elementen diffuser wird. **c)** Fast identisch mit a, jedoch nur angegedeutete Konturen eines Dreiecks, das im vervollständigten Bereich keine visuellen Qualitäten aufweist. Statt dessen wirkt es so, als werde die Oberfläche hinter einer auf dem Kopf stehenden Scheinfigur amodal ergänzt (vgl. aber Bobbitt, 1942, zitiert in Michotte et al., 1991, S. 142). **d)** Fast identisch mit c, jedoch nur drei Punkte, die als „virtuelles Dreieck“ (Kanizsa, 1987, S. 41 f.) gedeutet werden können. Obwohl eindeutig unverdeckt, werden der Oberfläche keine visuellen Qualitäten zugeordnet. Ebenso wenig wirkt die Oberfläche im klassischen Sinne amodal vervollständigt. **e)** Unmöglichkeitige Figur, die sowohl modal als auch amodal vervollständigt wird (sog. quasimodale Vervollständigung, nach Kellman et al., 1998). **f)** Quasimodale Vervollständigung mit Tiefeneindruck. [e und f adaptiert nach Kellman et al. (1998), Abbildungen 4 und 5, S. 861 und 862.]

zunächst atheoretisch, doch ein Problem ist das Fehlen einer präzisen Definition der Begriffe in einem theoretisch neutralen Sinne. Bereits die Beschränkung auf Qualitäten wie Helligkeit und Farbe zur Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung erscheint willkürlich, weil sie theoretisch unmotiviert ist bzw. allenfalls an sinnesphysiologische Vorstellungen anknüpft. Darüber hinaus verleitet die Charakterisierung von modaler und amodaler Vervollständigung, obwohl diese auf rein phänomenologischer Basis erfolgt, zur scheinbar selbstverständlichen und daher häufig implizit getroffenen, jedoch kritischen Annahme, dass modale Vervollständigung direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit repräsentiert und amodale Vervollständigung geometrisch-optische Unsichtbarkeit aufgrund eines verdeckenden Hindernisses. Aus empirischer Sicht ergibt sich das Problem, dass eine eindeutige Zuordnung von Wahrnehmungseindrücken zu einer der beiden phänomenologischen Klassen nicht immer ohne weiteres möglich ist. So gibt es Beobachtungen, die im strengen Sinne weder als modal noch als amodal einzustufen sind, ebenso wie Perzepte, die gewissermaßen in beide phänomenologischen Kategorien fallen (vgl. Abbildung 1.4).

Das Hauptziel dieser Arbeit ist die kritische Hinterfragung der Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung. Dies umfasst die Auseinandersetzung mit der gängigen Definition und Verwendung der Begriffe „modal“ und „amodal“ und deren theoretischer Bedeutung. Insbesondere wird im Verlauf der Arbeit die Angemessenheit der oben formulierten Annahme über die Kopplung von modaler/amodaler Vervollständigung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit/geometrisch-optische Unsichtbarkeit durch empirische Befunde und theoretische Überlegungen in Frage gestellt. So wird gezeigt,

dass die Wahrnehmung von Verdeckung nicht nur erheblichen Einfluss auf die *amodale* Vervollständigung von Objekten und auf die Interpretation der gesamten Szene hat, wie durch zahlreiche Beispiele aus der Literatur bekannt ist (Kanizsa, 1979; Michotte et al., 1991; Rock, 1981; Sigman & Rock, 1974; Yantis, 1995, u. v. m.), sondern unmittelbar auch auf *modale* Attribute der Wahrnehmung.

Modale Vervollständigung ist nicht auf statische Objekte oder Oberflächen beschränkt. Scheinbewegung, also die Interpolation von Bewegung zwischen zwei diskreten Darbietungspositionen eines Zielreizes (vgl. Abbildung 1.2a), stellt ebenfalls eine Art modaler Vervollständigung dar, in diesem Fall von Bewegung bzw. eines Bewegungspfades. Wie gleichförmig die wahrgenommene Bewegung ist, die durch solche diskreten Bewegungsreize hervorgerufen wird, hängt in erster Linie von deren räumlicher und zeitlicher Auflösung ab (Burr, 1979); je höher die Auflösung, desto glatter die Bewegungsinterpolation. Informelle Beobachtungen deuteten jedoch darauf hin, dass bei konstant gehaltener Auflösung eine qualitativ glattere Scheinbewegung wahrgenommen wird, wenn geeignete Verdeckungshinweise verfügbar sind („Glättungseffekt“).

Im ersten Teil dieser Arbeit wird der Glättungseffekt empirisch nachgewiesen und Verdeckung als kritischer Faktor identifiziert (Kapitel 3). Der Nachweis des verdeckungsabhängigen Glättungseffekts ist in mehrfacher Hinsicht von theoretischer Bedeutung: Erstens ergibt sich dadurch eine neue Perspektive auf den Prozess der Bewegungsinterpolation, weil rein lokale, reizbasierte Erklärungsansätze in Frage gestellt werden. Zweitens unterstützt der Befund die theoretische Position einer heuristischen, abduktionsbasierten Funktionsweise des Wahrnehmungssystems, denn ohne eine solche Annahme wäre der Glättungseffekt nur schwer erklärbar. Drittens erweitert der Effekt den Katalog der bekannten Einflüsse von perzeptueller Verdeckung auf die Deutung einer Szene, und zwar um ein spezifisches *modales* Attribut, nämlich das der Glattheit der Bewegungsinterpolation. Dadurch wird die oben beschriebene gängige Annahme, modale Vervollständigung sei eine mentale Repräsentation direkter geometrisch-optischer Sichtbarkeit – oder zumindest unmittelbar an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit gekoppelt –, grundsätzlich in Frage gestellt. Um diese Annahme aufrechtzuerhalten, müsste Scheinbewegung hinter einem Verdecker als eine Art amodaler Vervollständigung des Bewegungspfades aufgefasst werden. Diese Auffassung stünde allerdings im Widerspruch zur traditionell verwendeten Definition des Begriffs „amodal“ durch Michotte et al. (1991), der das Erleben von visuellen Qualitäten explizit ausschließt.

Die Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung bezogen Michotte et al. (1991) ursprünglich in erster Linie auf Oberflächen von Objekten. Weil damit keine Aussage über die Vervollständigung von Bewegung gemacht wird, wären die Befunde zum Glättungseffekt strenggenommen weder inkompatibel mit der traditionellen Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung von Oberflächen/Objekten noch mit der oben beschriebenen, häufig impliziten Gleichsetzung von modaler Vervollständigung mit direkter geometrisch-optischer Sichtbarkeit einerseits und von amodaler Vervollständigung mit geometrisch-optischer Verdeckung andererseits, solange diese Dichotomie auf Oberflächen/Objekte beschränkt bliebe.

Im zweiten Teil der Arbeit wird jedoch auch diese spezifischere, beschränkte Annahme kritisch überprüft (Kapitel 4). Ausgangspunkt ist die sog. Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer, 1999), die in der scheinbaren Vergrößerung des sichtbaren Bereichs eines partiell verdeckten Objekts besteht (Abbildung 1.5). Die Stärke der phänomenalen Expansion variiert mit der Stärke der Verdeckungshinweise und entsteht nicht durch eine bloße Skalierung der Figur, sondern durch die modale Ergänzung eines dünnen sichtbaren Streifens entlang der Verdeckungskante (Palmer, Brooks & Lai, 2007; Palmer & Schloss, 2009). Der Effekt ist in mehrfacher Hinsicht von theoretischem Interesse: Zum einen wird durch Verdeckung hier nicht nur eine amodale Vervollständigung, sondern auch eine partielle *modale* Ergänzung eines Objekts hervorgerufen. Zum anderen ist unklar, wo der ergänzte dünne Streifen perzeptuell lokalisiert sein sollte, ob also beispielsweise der Verdecker und/oder das Objekt selbst versetzt wahrgenommen werden, um Raum für den ergänzten Streifen zu schaffen. Palmer et al. (2007) spekulieren, dass das visuelle System – obwohl andere Alternativen logisch möglich wären – es „irgendwie fertigbringt“, dass das partiell verdeckte Objekt hinter dem Verdecker räumlich expandiert „gesehen“ wird, ohne dass die

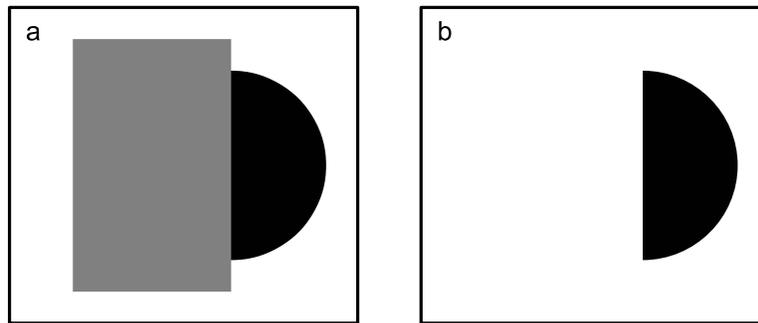


Abbildung 1.5: Die Verdeckungstäuschung. Der als sichtbar erlebte Bereich des partiell verdeckten Objekts ist größer (a) als bei einem physikalisch identischen, unverdeckten Objekt (b). [Adaptiert nach Kanizsa (1979).]

Position des Verdeckers davon beeinflusst würde.¹ Möglicherweise sei der wahrgenommene zusätzliche Streifen infolge der modalen Expansion in ähnlicher Weise „paradox“ wie andere bizarre Phänomene, zum Beispiel der Bewegungsnacheffekt; der Streifen sei „da, obwohl es keine wohldefinierte Position gibt, an der er lokalisiert ist“ (S. 669).

Mittels geeignet abgewandelter, dynamischer Reize wurde die spekulative Vermutung von Palmer und Kollegen empirisch überprüft. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das visuelle System unter bestimmten Voraussetzungen, insbesondere bei starken Verdeckungshinweisen, tatsächlich in der Lage ist, auch verdeckte Objektbereiche partiell mit modalen Eigenschaften auszustatten, wodurch diese Bereiche trotz evidenter Verdeckung gleichzeitig sichtbar wirken. Dies stünde allerdings im Widerspruch zur oben beschriebenen Annahme, dass modale Vervollständigung der mentalen Repräsentation von geometrisch-optischer Sichtbarkeit entspricht.

Welche Bedeutung und welchen funktionalen Nutzen könnte dann aber modale Vervollständigung, d. h. der phänomenale *Eindruck* von direkter Sichtbarkeit, für das Wahrnehmungssystem haben, wenn damit nicht direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit repräsentiert wird? Ist phänomenale Sichtbarkeit vielmehr ein durch explizite visuelle Modalitäten vermitteltes Produkt des perzeptuellen Systems – und wenn ja, zu welchem Zweck?

Diese und weitere offene Fragen werden in den Abschnitten 3.4 und 4.4 diskutiert, wo auch auf methodische und konzeptuelle Probleme eingegangen wird. Darüber hinaus werden dort die empirischen Befunde der Arbeit in Beziehung zu verwandten Phänomenen gesetzt und theoretische Implikationen diskutiert. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst, und es wird abschließend ein Ausblick mit möglichen Anknüpfungspunkten für weitergehende Untersuchungen gegeben.

¹Alle wörtlichen Zitate aus fremdsprachigen Quellen in dieser Arbeit sind eigene Übersetzungen des Autors.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

Lichtstrahlen, die aus der dreidimensionalen Umgebung auf die Rezeptoren der Netzhaut treffen, erzeugen eine zweidimensionale Projektion der Szene, die durch die Gesetze der Optik exakt festgelegt ist. Für jede beliebige Szene, also für jeden *distalen* Reiz, lässt sich deshalb bei wohldefinierten Beleuchtungsbedingungen für jede Beobachterposition und jeden Blickwinkel das projektive Abbild, das dem Wahrnehmungssystem als *proximaler* Reiz zur Verfügung steht, recht präzise ermitteln (Palmer, 1999, S. 23): Jeder Punkt in der (sichtbaren) Umgebung fällt in wohldefinierter Weise auf einen eindeutig bestimmten Punkt in der Netzhaut. Die Umkehrung, also die interne Rekonstruktion des distalen Reizes aus dem proximalen Reiz, ist insofern unmöglich, als jeder projizierte Punkt prinzipiell mit unendlich vielen Punkten in der Umgebung korrespondiert. In den Frühstadien der Erforschung der (visuellen) Wahrnehmung glaubte man daher, Aufgabe des Wahrnehmungssystems sei es, dieses Problem der unterspezifizierten Umkehrung (*Inverse Problem*) zu lösen, indem der Entstehungsprozess des projektiven Abbildes rückwärts durchlaufen wird, also die optischen Transformationen rückgängig gemacht werden, bis die ursprüngliche Szene wiederhergestellt ist. Gegen diese naive Vorstellung spricht, abgesehen von der mathematischen Unlösbarkeit des Problems, dass das Ziel der Wahrnehmung unklar bleibt und die Aufgabe des Wahrnehmungssystems somit unmotiviert ist. Die Bedürfnisse des Organismus, die die Wahrnehmung insbesondere im Hinblick auf eine erfolgreiche Interaktion mit der Umwelt beeinflussen könnten, bleiben unberücksichtigt. Aus der Unklarheit über das eigentliche Ziel der Wahrnehmung und über die Aufgabe des Wahrnehmungssystems heraus entwickelten sich verschiedene theoretische Ansätze, die unter Fokussierung auf unterschiedliche Aspekte zu erklären versuchen, wie die Wahrnehmung trotz des mathematisch unlösbaren Problems so funktionieren kann, wie sie funktioniert.

Nach der Formulierung des „Fundamentalproblems der Wahrnehmungspsychologie“ in Abschnitt 2.1 werden in Abschnitt 2.2 exemplarisch drei klassische Theorieperspektiven und zwei ausgewählte neuere, konstruktivistische Ansätze skizziert und anhand von einzelnen Beispielen – unter anderem perzeptuellen Vervollständigungsphänomenen – charakterisiert. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.3 ein Überblick über modale und amodale Vervollständigung, deren traditionelle Unterscheidung in dieser Arbeit unter theoretischen und empirischen Gesichtspunkten kritisch hinterfragt wird.

2.1 Das Fundamentalproblem der Wahrnehmungspsychologie

Mausfeld (2011b) bezeichnet die Frage, „wie ein biologisches System auf der Basis eines physikalischen Energiemusters als Input ein in bedeutungshaften Kategorien organisiertes Perzept als Output generieren kann“, als das „Fundamentalproblem der Wahrnehmungspsychologie“. Dieses Problem lässt sich in zwei eng miteinander verwandte Kernfragen aufspalten, mit denen sich alle Theorieperspektiven, die sich in der Geschichte der Wahrnehmungspsychologie finden, explizit oder implizit beschäftigen (zitiert aus Mausfeld, 2006, S. 98):

1. „Was befähigt uns, auf der Basis der vergleichsweise mageren Sinnesinformationen ein so reichhaltiges Wissen über die Welt zu erwerben, das weit über alles hinausgeht, was in den Sinnen gegeben ist?“ (Auch als *Poverty-of-Stimulus Problem* oder Platons Problem bekannt.)
2. „Wie können aus physikalischen Energiemustern, wie sie auf die Sinnesrezeptoren treffen, *bedeutungshafte Einheiten* entstehen; wie also kann ein biologisches System ‚*Bedeutung*‘ generieren?“

Die Herangehensweise zur Erforschung und Klärung dieser Kernfragen kann je nach theoretischer Perspektive äußerst unterschiedlich ausfallen. Dies wird unter anderem bei der Betrachtung von dynamischer perzeptueller Vervollständigung, die im Mittelpunkt dieser Arbeit steht, aus unterschiedlichen theoretischen Perspektiven deutlich, wie der folgende Abschnitt zeigen soll.

2.2 Theorieperspektiven der Wahrnehmungspsychologie

Seit den Anfängen der Antike entwickelte sich ein breites Spektrum theoretischer Zugangsweisen zur Wahrnehmung, innerhalb derer Antworten auf die obengenannten Kernfragen gesucht wurden (siehe Mausfeld, 2006, für eine Einführung). Palmer (1999) nennt drei Kriterien, die als grobe Charakterisierung verschiedener Theorieperspektiven der Wahrnehmungspsychologie herangezogen werden können (S. 47). Prinzipiell sind auch Positionen zwischen den jeweils beschriebenen beiden Extremen möglich.

1. Externalismus vs. Internalismus.¹ Steht die Betrachtung der äußeren Reizbedingungen im Vordergrund, um die Wahrnehmung zu verstehen, also die Analyse der Informationen im proximalen Reiz, die nach dieser Auffassung mit dem distalen Reiz aus der Umwelt korrespondieren? Oder liegt eine internalistische Perspektive zugrunde, die die Natur des Organismus gegenüber der Umwelt, die diesen umgibt, in den Vordergrund stellt?
2. Empirismus vs. Nativismus. Ist die Wahrnehmung das Ergebnis gesammelter Erfahrungen und erlernten Wissens durch die Interaktion mit der Umwelt? Oder sind keine spezifischen Erfahrungen nötig, die im Laufe des Lebens erst gesammelt werden müssen, weil der Organismus bereits von Geburt an über eine reichhaltige Grundausstattung und die erforderlichen neuronalen Mechanismen verfügt? Die spätere Ausbildung von Fähigkeiten eines Organismus erklärt sich aus einer nativistischen Perspektive nicht als Ergebnis von Lernen, sondern die hierfür notwendigen Strukturen sind bereits genetisch angelegt und entwickeln sich auf dieser Basis.
3. Atomismus vs. Holismus. Kann die Wahrnehmung des gesamten Gesichtsfelds vorhergesagt werden aus punktwisen oder lokalen Informationen, die einander nicht beeinflussen? Oder wird die Wahrnehmung eines Teils des Gesichtsfelds durch andere Teile stark beeinflusst, so dass lokale Informationen nicht „einfach zusammengefügt“ werden können, sondern global integriert werden müssen? Aus holistischer Perspektive organisiert das visuelle System die Reize so um, dass die Eigenschaften von ganzen Objekten oder sogar ganzen Szenen die von lokalen Regionen des Gesichtsfelds ersetzen.

Ein weiteres mögliches Unterscheidungsmerkmal verschiedener Theorieperspektiven ist laut Palmer (1999) methodischer Natur und bezieht sich auf die Frage, ob Wahrnehmung durch phänomenologische Beobachtungen der eigenen bewussten Erfahrung (Introspektion) oder durch Beobachtungen und objektive Messungen von Verhalten (Behaviorismus) erforscht werden sollte (S. 48).

In den folgenden Unterabschnitten wird eine Übersicht über drei klassische Theorieperspektiven der visuellen Wahrnehmungspsychologie – die strukturalistisch-elementaristische Perspektive, die Gestaltpsychologie und die ökologische Perspektive – sowie über zwei ausgewählte „moderne“, konstruktivistische Perspektiven gegeben.

¹Statt der hier verwendeten Antonyme stellt Palmer (1999) die Begriffe „Umwelt/Umgebung“ und „Organismus“ einander gegenüber.

2.2.1 Klassische Perspektiven

Die in diesem Abschnitt beschriebenen klassischen Theorieperspektiven der Wahrnehmungspsychologie gelten in dieser Form heutzutage als überholt. Sie sollen hier dennoch in aller Kürze vorgestellt werden, weil zum einen die beobachteten Schwächen dieser Perspektiven wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung neuer Perspektiven brachten und zum anderen einzelne Ideen von den modernen konstruktivistischen Ansätzen aufgegriffen und weiterentwickelt wurden.

2.2.1.1 Die strukturalistisch-elementaristische Perspektive

Die strukturalistisch-elementaristische, kurz: strukturalistische Perspektive, auch Assoziationslehre genannt, stellt den ersten psychologischen, systematisch-experimentellen Zugang zur Wahrnehmung dar und geht auf die philosophische Schule des Britischen Empirismus (Locke, Berkeley, Hume) zurück (Palmer, 1999, S. 48). Nach Mausfelds (2006) Darstellung der empiristischen Theorie des Geistes ist „der Geist leer bis auf sensorische Konzepte“; alle komplexeren Konzepte müssen „durch Erfahrung aus den Sinneskonzepten aufgebaut werden“. Die einzigen Elemente, die gemäß dieser Perspektive zur Erklärung von Wahrnehmungsleistungen herangezogen werden, sind „der sensorische Input sowie Mechanismen einer inputbasierten induktiven Inferenz“ (S. 99). Die strukturalistische Perspektive greift implizit die intuitive Vorstellung auf, die Aufgabe des Wahrnehmungssystems sei die Rekonstruktion der physikalischen Umgebung, um „Wissen“ über die Außenwelt zu erwerben (Mausfeld, 2002). Laut Palmer (1999) besteht aus strukturalistischer Sicht die Wahrnehmung aus unabhängigen lokalen Sinnesempfindungen und ist das Ergebnis eines Prozesses, in dem sensorische Atome – primitive, unzerrennliche Elementarempfindungen in einer bestimmten sensorischen Modalität – mit anderen sensorischen Atomen assoziiert und zu komplexeren Einheiten zusammengefügt werden. Solche Assoziationen, denen die Rolle von Induktionsmechanismen zukommt, entstehen durch wiederholte gemeinsame Vorkommen sensorischer Empfindungen in räumlicher und zeitlicher Nähe und sind prinzipiell auch modalitätsübergreifend möglich (S. 48). Rock (1983) ergänzt, dass es im strukturalistischen Sinne für jede unterschiedliche perzeptuelle Eigenschaft – im Visuellen zum Beispiel Farbe, Größe, Tiefe, Bewegung – einen korrespondierenden Reiz gibt, der das Sinnesorgan erreicht. Das Perzept ist demnach eine direkte Funktion des proximalen Reizes, und zur Erklärung der Wahrnehmung ist deshalb nichts weiter erforderlich, als die relevanten Reize und deren korrespondierende interne Repräsentationen zu isolieren. Es ist zwar unabhängig von der theoretischen Perspektive unzweifelhaft, dass jedes Perzept durch spezifische sensorische Reize determiniert ist, also gespeist wird, doch zeigen laut Rock zahlreiche bekannte Eigenschaften der Wahrnehmung – zum Beispiel perzeptuelle Vervollständigungsphänomene –, dass eine isolierte Betrachtung der Reize nicht zielführend sein kann (S. 28 f.).

Wird zum Beispiel ein visueller Reiz, etwa eine Linie oder Scheibe, kurzzeitig dargeboten und unmittelbar darauf ein identischer Reiz an einer anderen, nicht zu weit entfernten Position, so nimmt ein Beobachter nicht zwei Objekte wahr, die schnell hintereinander an zwei verschiedenen Orten erscheinen und verschwinden, sondern ein Objekt, das sich schnell von einem Ort zum nächsten bewegt (Wertheimer, 1912; siehe auch Abbildung 1.2a, S. 8). Aus strukturalistischer Sicht werden solche Beobachtungen der perzeptuellen Vervollständigung von Bewegung allerdings nicht als Produkt der Wahrnehmung, sondern als „trügerisches Produkt der unachtsamen Beurteilung“ des denkenden Beobachters, also als *Täuschungen* aufgefasst, weil sie zum einen nicht mit dem proximalen Reiz übereinstimmen und zum anderen der früher verbreiteten Auffassung widersprechen, perzeptuelles Erleben bestehe aus unabhängigen lokalen Sinneseindrücken (vgl. Köhler, 1969, S. 37 f.). Eine Theorie aber, die auf der lokalen Betrachtung von Reizen basiert, hält Rock (1983) für „vollkommen unangemessen“ (S. 29). Dies zeigten unter anderem zahlreiche Formen von Kontexteffekten und Konstanzleistungen des Gehirns (Ebbinghaus, 1885; Gelb, 1929; Gilchrist, Delman & Jacobsen, 1983; Mach, 1865, u. v. m.; siehe Adelson, 2000, für zahlreiche Beispiele).

Zusammenfassend kann der strukturalistische Ansatz als internalistisch und empiristisch charakteri-

siert werden, weil Wahrnehmung als das Ergebnis komplexer interner Assoziationsprozesse aufgefasst wird und der Geist/das Gehirn „nur über eine magere Grundausstattung an konzeptuellen Primitiva [verfügt]“ und „alle komplexeren Konzepte [...] induktiv aus der Erfahrung, d. h. durch Lernen, erworben werden [müssen]“ (Mausfeld, 2006, S. 100). Als besonders problematisch im Hinblick auf die in dieser Arbeit untersuchten Phänomene stellt sich die für die strukturalistische Perspektive charakteristische Fokussierung auf lokale Reizeigenschaften dar. Um die perzeptuellen Eindrücke angemessen beschreiben zu können, wäre eine vergleichsweise komplexe Integration dieser atomaren Sinnesempfindungen nötig, die mit dem Assoziationsprinzip schwer zu erklären wäre.

Laut Palmer (1999) stützt sich die strukturalistische Methodik auf trainierte Introspektion: Nach Auffassung der Strukturalisten sei es nämlich möglich, die elementaren Einheiten der Wahrnehmung durch sorgfältige Beobachtung der eigenen Eindrücke und Empfindungen zu entdecken, allerdings nur, wenn man zuvor durch einen qualifizierten Experten in der Methode der Introspektion trainiert worden sei. Boring (1953) wies kritisch darauf hin, dass dieses Training häufig starken Einfluss auf die erhaltenen Ergebnisse gehabt habe (zitiert in Palmer, 1999, S. 50).

2.2.1.2 Die Gestaltpsychologie

Historisch entwickelte sich die Gestaltpsychologie als Gegenbewegung zur strukturalistisch-elementaristischen Perspektive. Sie richtet sich gegen die atomistische und empiristische Auffassung und gegen die „mit einer solchen Auffassung einhergehende[n] Betonung einer gleichsam von unten nach oben fortschreitenden Analyse“ (Mausfeld, 2006, S. 101) ebenso wie gegen die Methode der trainierten Introspektion der Strukturalisten.

Die strukturalistische Auffassung, Phänomene wie beispielsweise Scheinbewegung seien kein Produkt der Wahrnehmung, sondern eine *Täuschung* im Denken des Beobachters, sieht der Gestaltpsychologe Köhler (1969) unter anderem durch folgenden Befund widerlegt (S. 38): Es ist bekannt, dass gewöhnliche, „reale“ Bewegungsreize nicht nur ein Bewegungserzept, sondern auch ein negatives Bewegungsnachbild erzeugen, wenn man nach einer gewissen Beobachtungsdauer den Blick auf einen stationären Reiz richtet oder die Augen schließt. Weil auch Scheinbewegung, die durch diskrete Bewegungsreize hervorgerufen wird und sich unter „optimalen“ Bedingungen im Eindruck nicht von realer Bewegung unterscheidet, negative Bewegungsnachbilder erzeugt (Exner, 1875, S. 163 f.; Wertheimer, 1912, S. 232 f.), sei laut Köhler erwiesen, dass diese ein perzeptueller Fakt sein müsse und nicht auf Einbildung beruhen könne. (Dazu später mehr.) Die Beobachtung einer Reihe weiterer Phänomene demonstriert zudem, dass Wahrnehmung nicht als einfaches Zusammenfügen lokaler sensorischer Atome zu komplexeren Einheiten verstanden werden könne, sondern die beteiligten Prozesse zur perzeptuellen Organisation miteinander interagieren müssten (S. 39 f.). Die Wahrnehmung von (Schein-)Bewegung kann hierbei als Beispiel dafür angeführt werden, dass eine solche Interaktion nicht auf das statische visuelle Feld beschränkt ist, sondern auch über dynamische Sequenzen von perzeptuellen Ereignissen hinweg erfolgen muss.

Gemäß dem gestaltpsychologischen Credo, das Ganze unterscheide sich von der Summe seiner Teile, hat die Wahrnehmung ihre eigene intrinsische Struktur, innerhalb derer das Wesen einzelner Elemente maßgeblich vom Ganzen bestimmt wird. Bekannte Gestaltprinzipien sind beispielsweise Nähe, Ähnlichkeit, Einfachheit, Symmetrie, Kontinuität („gute Fortsetzung“) und Geschlossenheit (Abbildung 2.1; vgl. auch Köhler, 1969, S. 56 ff.). Das gestaltpsychologische Prinzip der Geschlossenheit ist eng verwandt mit dem Prinzip der perzeptuellen Vervollständigung von räumlichen Objekten (vgl. Abbildung 1.3, S. 9, sowie Abschnitt 2.3), das im Zentrum der Untersuchungen dieser Arbeit steht.

Obwohl die Gestaltpsychologie primär auf die Erforschung der Struktur des proximalen Reizes und deren Auswirkungen auf die Gestaltbildung fokussiert ist, vertritt sie die Ansicht, Wahrnehmung werde durch angeborene interne Organisationsprinzipien bestimmt. Die Gestaltpsychologie formulierte die Doktrin des psychophysikalischen Isomorphismus, wonach das psychologische, perzeptuelle Erleben

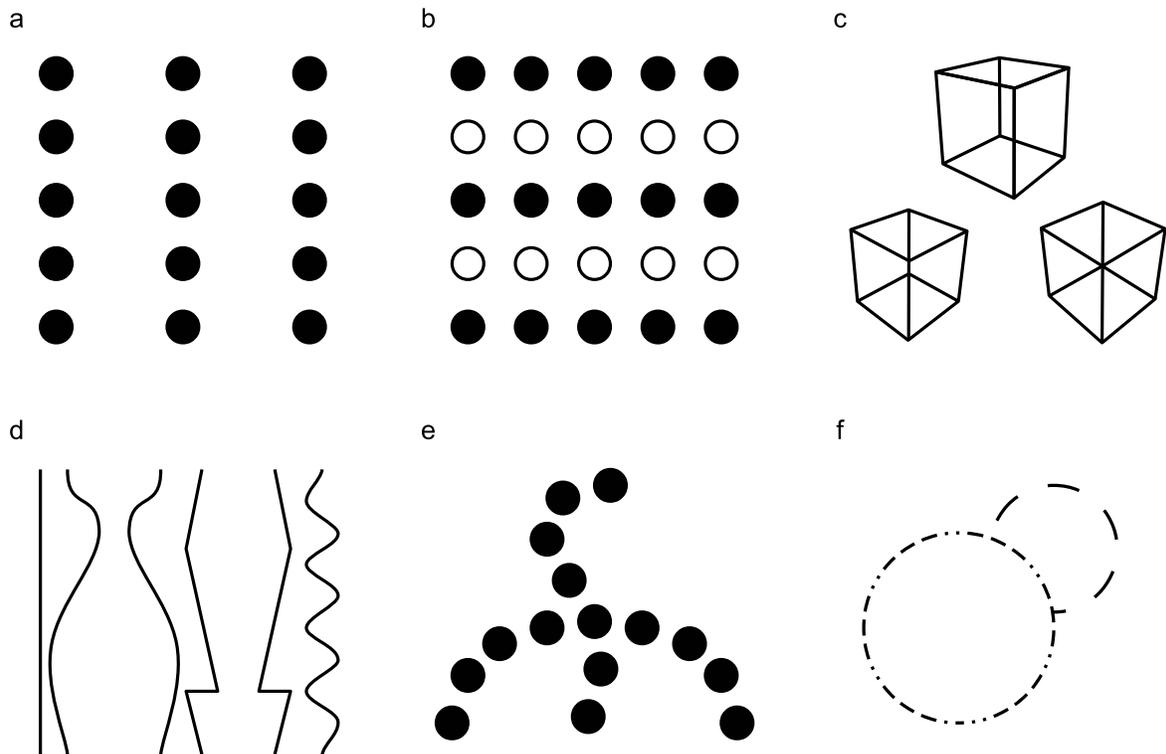


Abbildung 2.1: Prinzipien der Gestaltpsychologie (Beispiele). Aus der Anordnung und Beziehung der Teile zueinander ergeben sich Eigenschaften des Ganzen, die über die Eigenschaften der konstituierenden Teile weit hinausgehen. **a)** Das Prinzip der Nähe. Die Anordnung der scheibenförmigen Elemente führt zur Wahrnehmung von drei Linien mit eigenen Eigenschaften wie Länge und Orientierung, die nicht in den Elementen selbst enthalten sind. **b)** Das Prinzip der Ähnlichkeit. Obwohl alle Elemente gleich weit voneinander entfernt sind, werden schwarze und weiße Elemente jeweils perzeptuell gruppiert und bilden linienförmige Gestalten. **c)** Das Prinzip der Einfachheit. Bei uneindeutigen Reizen wird tendenziell die „einfachste“ Lösung bevorzugt. Projektionen eines Quaders werden beispielsweise entweder als dreidimensional (oben) oder als zweidimensional (unten) wahrgenommen, je nachdem, welche Lösung „einfacher“ ist. Die erkennbare Vermeidung des Wahrnehmungssystems von Deutungen, die auftretende Koinzidenzen in 2D-Projektionen nicht bzw. nur unter der Annahme einer spezifischen Beobachterposition erklären können, wird in der Wahrnehmungspsychologie als „Prinzip der generischen Ansicht“ bezeichnet. **d)** Das Prinzip der Symmetrie. Elemente, die zusammen symmetrische Figuren ergeben, werden tendenziell als einander zugehörig wahrgenommen. In diesem Beispiel dominiert dieses Prinzip über das Prinzip der Nähe. **e)** Das Prinzip der Kontinuität, auch „Prinzip der guten Fortsetzung“ genannt. Die Elemente bilden zwei unabhängige kurvenförmige Linien, die einander kreuzen. **f)** Das Prinzip der Geschlossenheit. Im Vordergrund wird trotz des unterbrochenen Umrisses ein Kreis wahrgenommen. Im Hintergrund wird ein partiell verdeckter Kreis wahrgenommen, der amodal vervollständigt wird.

in seiner strukturellen Charakteristik ähnlich oder gar identisch (isomorph) mit den zugrunde liegenden Vorgängen im Gehirn ist.² Nach Köhlers (1969) Auffassung sind die kausalen Mechanismen, die der Wahrnehmung zugrunde liegen, elektromagnetische Felder im Gehirn, die durch neuronale Aktivität aufgebaut werden und alle relevanten Eigenschaften der physikalischen Gestalten enthalten (S. 66, 95–120). Die Hypothese des psychophysikalischen Isomorphismus steht im Einklang mit der opponierten Farbtheorie von Hering (1878), wonach sich drei Paare von sog. „Urfarben“ (Rot und Grün, Blau und Gelb sowie Schwarz und Weiß) identifizieren lassen, die sich phänomenal gegenseitig ausschließen. Gemäß dem psychophysikalischen Isomorphismus der Gestaltpsychologie muss diesen Eindrücken eine ähnlich opponente Struktur in der neuronalen Verarbeitung von Farbe zugrunde liegen. Eine solche opponente Struktur konnte später von De Valois, Abramov und Jacobs (1966) bei Makaken im CGN nachgewiesen werden (zitiert in Palmer, 1999, S. 53).

Diese Hypothese des psychophysikalischen Isomorphismus lässt sich auch zur Erklärung des in der Einleitung vorgestellten Beispiels der Scheinbewegung heranziehen. Demnach rufen diskrete Bewegungsreize ein neuronales Aktivitätsmuster hervor, das dem Pfad der wahrgenommenen Bewegung in derselben Weise entspricht, wie es bei „realen“ Bewegungsreizen der Fall wäre. Infolgedessen wird laut Köhler nicht nur ein Bewegungseindruck hervorgerufen, der sich nicht von „realer“ Bewegung unterscheidet, sondern es entstehen auch dieselben negativen Bewegungsnachbilder wie bei „realer“ Bewegung.

Allerdings erweist sich die starke Fokussierung der Gestaltpsychologie auf die Gestaltbildung allein aus dem proximalen Reiz heraus als problematisch. Dies zeigt sehr anschaulich das in der Einleitung beschriebene Experiment von Sigman und Rock (1974). Wird ein Zielreiz (eine Scheibe) alternierend an zwei Positionen ein- und ausgeblendet (Abbildung 1.2a, S. 8), ruft dieser einen Scheinbewegungseindruck eines Objekts hervor. Wird synchron an der jeweils freien Position zusätzlich ein größeres Reizelement (ein Rechteck) ein- und ausgeblendet, ändert sich die Wahrnehmung der Szene oftmals erheblich: Statt einer bewegten Scheibe werden zwei stationäre Scheiben wahrgenommen, die abwechselnd von einem bewegten Rechteck verdeckt und wieder aufgedeckt werden (Abbildung 1.2b). Die Gestaltprinzipien versagen bei der Vorhersage dieser Beobachtung. Erstens dürfte sich die wahrgenommene Bewegung der Scheibe in der einen Bedingung nicht durch das Hinzufügen eines Rechtecks, das als unabhängige, eigenständige Gestalt wahrgenommen wird, in der anderen Bedingung verändern. Und zweitens unterscheiden sich in der zweiten Bedingung Scheibe und Rechteck nur in ihrer Größe und ihrer Form voneinander; beides sollte allerdings keinen Einfluss auf die wahrgenommene Scheinbewegung haben. Es wäre deshalb eine Scheinbewegung sowohl der Scheibe als auch des Rechtecks zu erwarten, die beide jeweils synchron ihre Positionen tauschen. Warum sollten zwei stationäre Scheiben, die abwechselnd verdeckt und wieder aufgedeckt werden, eine „einfachere“ Lösung sein? Diesem kritischen Einwand könnte ein Gestaltpsychologe prinzipiell mit einem Post-hoc-Argument begegnen, diese Lösung sei die „einfachste“ Deutung einer höheren Ordnung. Die hierfür notwendige Abstrahierung der Gestaltprinzipien ist jedoch im Rahmen der gestaltpsychologischen Theorie nicht explizit vorgesehen; sie ließe auch keine Vorhersagen der perzeptuellen Eindrücke in Abhängigkeit der Reizkonfiguration mehr zu, so dass ein solches Argument abzulehnen ist.

Auch die Hypothese des psychophysikalischen Isomorphismus wird unter anderem durch empirische Befunde aus den 1950er Jahren in Frage gestellt, die zeigen, dass die Unterbrechung oder Störung von elektrischen Feldern im Cortex von Affen das Perzept nicht bzw. nicht in dem Maße stört, wie von Köhlers Theorie der elektrischen Felder im Gehirn vorhergesagt (Lashley, Chow & Semmes, 1951; Sperry, Miner & Myers, 1955; zitiert in Palmer, 1999, S. 53).

Zusammenfassend lässt sich die Gestaltpsychologie als internalistisch und nativistisch beschreiben, weil Wahrnehmung nach dieser Perspektive durch interne, interagierende Organisationsprinzipien bestimmt wird und diese Prinzipien als angeboren angenommen werden. Charakteristisch ist die holistische

²Gemeint ist ein topologisch-funktionaler Isomorphismus, kein räumlich-topographischer.

Orientierung, wonach Teile des perzeptuellen Feldes nicht ohne andere Teile, die zur Gestaltbildung beitragen, verstanden werden können. Obwohl diese holistische Betrachtungsweise die Beschreibung vergleichsweise komplexer Reize ermöglicht, liegt die entscheidende Schwäche des gestaltpsychologischen Ansatzes darin, dass dieser ausschließlich reizorientiert ist und das Perzept stets als Folge von Transformationen des sensorischen Inputs aufgefasst wird. „Verdeckung“ beispielsweise wäre im gestaltpsychologischen Sinne kein Bestandteil der Grammatik des visuellen Systems. Auch vermag die Gestaltpsychologie nicht zu erklären, wie Bedeutung generiert wird.

Anders als der strukturalistische Ansatz, der auf die Methode der trainierten Introspektion setzt, basieren die Beobachtungen der Gestaltpsychologie auf naiver Introspektion und sind somit prinzipiell jedem auf einfache Weise und unmittelbar zugänglich.

2.2.1.3 Die ökologische Perspektive

James J. Gibson (1950, 1966, 1979) verstand seine sog. ökologische Perspektive (auch: ökologische Optik) als radikal anders im Vergleich zur strukturalistisch-elementaristischen Perspektive. Rock (1983) hingegen bezeichnet den ökologischen Ansatz als eine neue Auslegung des Strukturalismus, wenn man den Begriff „Reiz“ weiter fasst. Gibt man die naive Vorstellung auf, die wahrgenommene Größe eines Objekts korrespondiere mit dessen Ausdehnung im proximalen Reiz, und betrachtet statt dessen Merkmale höherer Ordnung wie die Verhältnisse und Beziehungen einzelner Reizelemente unter- und zueinander, so können einige Schwierigkeiten des strukturalistisch-elementaristischen Ansatzes überwunden werden (S. 29).

Ähnlich wie die Gestaltpsychologie rückt die ökologische Perspektive den holistischen Aspekt der Wahrnehmung in den Vordergrund. Allerdings werden die komplexen Wahrnehmungsleistungen weniger auf die interne Struktur des visuellen Systems als vielmehr auf die im proximalen Reiz verfügbare komplexe dynamische Struktur zurückgeführt. Laut Palmer (1999) lehnt die ökologische Perspektive daher die sonst gängige Vorstellung ab, dass die Struktur des Organismus als Basis für eine Theorie über die Wahrnehmung dienen muss; Wahrnehmung könne besser verstanden werden, wenn die Struktur der Umwelt ins Zentrum der Analyse gerückt werde (S. 53). Mausfeld (2006) charakterisiert Gibsons Perspektive ergänzend wie folgt: Nicht das retinale Bild, sondern die (dynamische) „optische Situation“ (*Optical Array*) der proximalen Stimulation bestimmt die Wahrnehmung maßgeblich. Alle Invarianzen, die für die Orientierung in der Umwelt benötigt und von einem aktiven Organismus erkundet und genutzt werden, liegen demnach im komplexen proximalen Reiz selbst und sind keine Zutat des Organismus. Die visuelle Wahrnehmung der Umgebung wird durch die verfügbaren optischen Informationen auf der Netzhaut eines aktiv explorierenden Organismus ohne vermittelnde Prozesse oder interne Repräsentationen bereits vollständig bestimmt. Laut Mausfeld glaubte Gibson, damit die erste Kernfrage der Wahrnehmungspsychologie, wie aus spärlichen sensorischen Informationen reichhaltige Perzepte erzeugt werden können, beantwortet zu haben (S. 104).

Nach Palmer (1999) ist der Vorschlag der „direkten Wahrnehmung“ (*Direct Perception*) der „bei weitem kontroverseste Aspekt“ in Gibsons Theorie (S. 54). Ullman (1980) führt zahlreiche theoretische Einwände gegen diese Vorstellung an und zeigt anhand einer Fallstudie des kinetischen Tiefeneffekts deren Defizite auf. Das relevante Problem bei der Wahrnehmung (beispielsweise von Struktur durch Bewegung) ist demnach nicht, *ob* die Informationen im visuellen Feld und die Wahrnehmung bewegter Objekte in Form von Invarianzen ausgedrückt werden können, sondern *welche* Informationen dies sind und wie diese vom visuellen System genutzt werden. Die Dekomposition der Wahrnehmung in einfache, voneinander getrennte Perzepte und die Suche nach Reizcharakteristika, die in angemessener Weise direkt vom Organismus registriert werden können, habe sich „nicht [als] sonderlich fruchtbar“ erwiesen (S. 25).

Auch die zweite Kernfrage, wie das Wahrnehmungssystem Bedeutung zu generieren imstande ist, sah Gibson gelöst, indem er „Bedeutung“ mit dem Aufforderungscharakter der Dinge der Welt (*Affor-*

dances im Sinne der „funktionalen Tönung“ nach Uexküll, 1920) gleichsetzt und somit als im Reiz verfügbar betrachtet. Mausfeld (2006) kritisiert, „[i]ndem Gibson ‚affordances‘ mit ‚meaning‘ identifiziert und so ‚Bedeutung‘ externalisiert, trivialisiert er eine Kernaufgabe der Wahrnehmungspsychologie, nämlich herauszufinden, auf Grund welcher Prinzipien das Wahrnehmungssystem [...] bedeutungshafte Einheiten generiert“ (S. 104).

Aus ökologischer Perspektive ist die traditionelle Laborforschung kritisch zu sehen, weil diese unter künstlichen Bedingungen erfolgt und isolierte, reduzierte, oftmals statische Reize verwendet. Dennoch muss eine Wahrnehmungstheorie auch die Wahrnehmung künstlich erzeugter Reize erklären können, beispielsweise Scheinbewegung, die unter stroboskopischen Bedingungen hervorgerufen wird. Diese hält Gibson (1954) allerdings nicht für problematisch, weil es in erster Linie nur auf ein passendes Verhältnis zwischen zeitlichem Intervall und räumlichem Abstand der Reizeinblendungen ankomme. Stroboskopische Stimulation unterscheide sich von sog. ‚realer‘ Stimulation nur darin, dass erstere diskontinuierlich und letztere kontinuierlich sei. Die Abfolge aber sei in beiden Fällen gleich und das Perzept daher ähnlich (S. 307).

Gibson, Kaplan, Reynolds und Wheeler (1969) unterscheiden für das Auftreten von perzeptueller Vervollständigung bei Verdeckung zwischen Objekten, die aus dem Sichtfeld verschwinden, und Objekten, die aufhören zu existieren, und ziehen aus ihren Ergebnissen die Schlussfolgerung, dass die Unterscheidung beider Fälle aus den verfügbaren optischen Informationen möglich ist (S. 113). Hierbei beschränken sie sich allerdings auf Fälle von kontinuierlich fortschreitender Verdeckung/Aufdeckung, wie sie in typischen natürlichen Situationen erfolgt. Es bleibt offen, wie beispielsweise plötzliche Verdeckung/Aufdeckung wie im Experiment von Sigman und Rock (1974, vgl. Abbildung 1.2b, S. 8) vom Wahrnehmungssystem zu erkennen wäre und wie die phänomenalen Eindrücke im Sinne der „direkten Wahrnehmung“ erklärt werden könnten.

Zusammenfassend lässt sich Gibsons ökologische Perspektive als externalistisch und holistisch charakterisieren, weil Wahrnehmung demnach nicht auf Prozessen einer internen Informationsverarbeitung basiert, sondern das Wahrnehmungssystem eine direkte Resonanz auf die Invarianzen im Reiz zeigt und dieser die Wahrnehmung direkt bestimmt (Mausfeld, 2006, S. 104). Hierbei wird die Komplexität der Reizstruktur vom Organismus aktiv erkundet und genutzt.

Die ökologische Perspektive setzt methodisch auf die Analyse des proximalen Reizes und der darin enthaltenen Invarianzen, die präzise Rückschlüsse auf die korrespondierenden distalen Reize zulassen sollen.

2.2.2 Konstruktivistische Perspektiven

Trotz der vergleichsweise spärlichen verfügbaren Informationen im sensorischen Reiz vermag das visuelle System mit erstaunlicher Sicherheit und Regelmäßigkeit die „richtigen“ Lösungen zu finden. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass weitere Informationsquellen, die über das retinale Bild hinausgehen, vom visuellen System genutzt werden; in irgendeiner Weise muss das Wahrnehmungssystem also Informationen hinzufügen, um die jeweils „passende“ der – aufgrund des Problems der unterspezifizierten Umkehrung (*Inverse Problem*) – prinzipiell unendlich vielen möglichen Lösungen auszuwählen. Eine konstruktivistische Position setzt zur Erklärung der Wahrnehmungsleistungen voraus, dass ein interner gestalterischer Prozess zwischen dem proximalen Reiz und dem Perzept eine Art Vermittlerrolle einnimmt, dass also „ein expliziter Mechanismus zwischen optisches Bild und bewusste Wahrnehmung tritt“ (Mausfeld, 2006, S. 101). Konstruktivistische Theorien unterscheiden sich durch diese Annahme in grundlegender Weise von sog. „Stimulus-Theorien“ (Rock, 1983, S. 31), zu denen die strukturalistisch-elementaristische und Gibsons ökologische Perspektive zu zählen sind, deren Erklärungen auf der Analyse und Transformation des Reizes basieren. Demgegenüber ließe sich die gestaltpsychologische Perspektive prinzipiell als konstruktivistisch charakterisieren, weil das Perzept demnach nicht auf einer einfachen Repräsentation des proximalen Reizes basiert, sondern durch spontane neuronale Interaktionen

gebildet wird. Allerdings sind diese im Vordergrund der Betrachtung stehenden internen, miteinander interagierenden Organisationsprinzipien stark reorientiert, beziehen sie sich doch primär auf verschiedene Regionen des proximalen Reizes bzw. deren korrespondierende neuronale Repräsentationen. Darin unterscheiden sich die als konstruktivistisch bezeichneten Perspektiven, in denen im allgemeinen nicht die Transformation des proximalen Reizes den theoretischen Kern ausmacht, von der Gestaltpsychologie; statt dessen wird der Reiz im konstruktivistischen Sinne vielmehr als Auslöser intern veranlagter Konzepte und Deutungen aufgefasst.

Es gibt eine Vielzahl von konstruktivistischen Theorien, unter anderem von Richard L. Gregory (1966), Julian Hochberg (1968), David Marr (1982), Irvin Rock (1983, 1997) und Donald D. Hoffman (1998), die sich in ihrer Perspektive mehr oder weniger stark unterscheiden und jeweils unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Die theoretische Perspektive, von der die Forschung in der hier vorliegenden Arbeit geleitet war, ist inspiriert durch die theoretische Rahmenvorstellung von Mausfeld (2010a, 2010b, 2011a), die eine komplexe interne Semantik und abduktive Mechanismen voraussetzt und im kommenden Unterabschnitt kurz vorgestellt wird. Die Konzeption der experimentellen Vorgehensweise und die Deutung der Ergebnisse dieser Arbeit – speziell in Kapitel 3 – ist zudem angelehnt an thematisch verwandte Experimente und Erklärungen von Rock (1983, 1997), dessen Theorie der indirekten Wahrnehmung daher im darauffolgenden Unterabschnitt etwas detaillierter zusammengefasst wird.

2.2.2.1 Mausfelds Perspektive der komplexen internen Semantik und abduktiven Inferenz

Mausfelds theoretische Vorstellung ist „aus der theoretischen Konvergenz von Wahrnehmungspsychologie, Ethologie, Linguistik und Entwicklungsforschung hervorgegangen“ (2011a, S. 19). Die so entstandene Perspektive betont die spezifische funktionale Architektur des Wahrnehmungssystems, das über eine komplexe interne Semantik und Mechanismen der abduktiven Inferenz verfügt (Mausfeld, 2010a, 2010b, 2011a). Die nachfolgenden zusammenfassenden Absätze basieren auf Mausfeld (2011a).

Komplexe interne Semantik. Das perzeptuelle System ist biologisch mit einem äußerst reichhaltigen System von komplexen Konzeptformen ausgestattet, mit denen die Außenwelt wahrgenommen wird. Beispiele für solche komplexen Konzeptformen sind „Oberfläche“, „physikalisches Objekt“, „intentionales Objekt“, „Ereignis“, „Nahrung“, „Feind“ u. v. m. Jede dieser Konzeptformen verfügt über proprietäre Typen von Parametern, Relationen und Transformationen, durch die ihre spezifischen Eigenschaften sowie ihre Beziehung zu anderen Konzeptformen bestimmt wird. In der Struktur dieser Konzeptformen ist die interne Semantik der Wahrnehmung codiert. Weil laut Mausfeld kein induktiv-inferentieller Mechanismus diese Konzeptformen aus den elementaren sensorischen Empfindungen ableiten kann, muss man davon ausgehen, dass diese zur biologischen Grundausstattung gehören und angeboren sind (S. 35–37).

Sensorischer Input als Auslöser. Der sensorische Input dient als Auslöser zur Aktivierung verschiedener Typen und Systeme von komplexen Konzeptformen. Mausfeld unterscheidet hierbei konzeptionell zwischen dem *Sensorischen System* und dem *Perzeptuellen System*: Im Sensorischen System wird physikalische Energie in neuronale Codes überführt und anschließend mittels Transformationen in ein für das Perzeptuelle System lesbares Datenformat umgewandelt, in dem alle computational relevanten Aspekte codiert sind. Die so transformierten Codes werden dem Perzeptuellen System über Schnittstellen zur Verfügung gestellt und dienen so als „Hinweise“ oder „Zeichen“ zur Aktivierung geeigneter komplexer Konzeptformen. Das unterscheidende Merkmal zwischen Sensorischem und Perzeptuellem System sind die zugrunde liegenden Datenformate; im Gegensatz zum Perzeptuellen System operiert das Sensorische System auf Basis elementarer physico-geometrischer Konzepte wie „Linie“, „Gradient“, „Textur“, „Kontur“ und „Luminanz“, die der Beschreibung des geometrisch organisierten sensorischen Inputs dienen (S. 36–38).

Abduktive Inferenzprozesse. Die Beziehung zwischen sensorischen Codes und komplexen Konzeptformen ist nicht uni-, sondern bidirektional: Enthalten die vom Perzeptuellen System für interpretative Systeme höherer Ordnung bereitgestellten Konzeptformen uninterpretierbare Elemente, weil Parameterwerte unspezifiziert sind und/oder interne Bedingungen (*Constraints*) verletzen, sind weitere Strukturbildungen mittels spezieller computationaler Prozesse erforderlich, die die sensorischen Codes gezielt, d. h. kontextabhängig, im Hinblick auf die benötigten Hinweise und gesuchten Informationen aktiv erkunden. Diese Vorgehensweise kann als abduktive Inferenz, ausgehend von den interpretativen Systemen, aufgefasst werden. Prinzipiell operiert das Perzeptuelle System jedoch routinemäßig mit unterspezifizierten Konzeptformen, und auch der Output des Perzeptuellen Systems, der nachfolgenden Verarbeitungssystemen über Schnittstellen zur Verfügung gestellt wird, muss nicht semantisch vollständig determiniert sein, sondern lediglich den semantischen Erfordernissen des jeweiligen interpretierenden Empfängersystems genügen (S. 43 f.).

Mausfelds theoretische Perspektive lässt sich als internalistisch charakterisieren, weil Wahrnehmung demnach auf der komplexen internen Semantik des Wahrnehmungssystems beruht, und als streng nativistisch, weil ein reichhaltiger Vorrat von komplexen Konzeptformen als biologisch vorgegeben angenommen wird, der nicht erlernt werden kann. Sie ist außerdem holistisch, weil eine komplexe Integration der im sensorischen Reiz verfügbaren – auch multimodalen – Informationen für die Wahrnehmung erforderlich ist.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass Mausfeld die komplexesten perzeptuellen Leistungen wie die Wahrnehmung unsichtbarer Objekteigenschaften (zum Beispiel Materialqualitäten; siehe Mausfeld, 2010b), intentionaler Objekteigenschaften (zum Beispiel „Werkzeug“) oder mentaler Zustände anderer erst durch die evolutionäre Entkopplung des perzeptuellen Outputs vom sensorischen Input und die Ausstattung des Perzeptuellen Systems mit proprietären Typen von Konzeptformen ermöglicht sieht (Mausfeld, 2011a, S. 42).

2.2.2.2 Rocks Theorie der indirekten Wahrnehmung: Wahrnehmung als Problemlöseprozess

Eine weitere konstruktivistische theoretische Perspektive stammt von Irvin Rock (1983, 1997), der – als Gegenentwurf zur „direkten Wahrnehmung“ der ökologischen Perspektive – den indirekten Charakter der Wahrnehmung hervorhebt. Rock (1997) vertritt folgende Auffassung: Obwohl Wahrnehmung direkt und unmittelbar erscheint, deuten zahlreiche Experimente darauf hin, dass ein bewusst erlebtes Perzept das Ergebnis einer komplexen Informationsverarbeitung ist, die oftmals aus mehreren aufeinanderfolgenden Verarbeitungsschritten besteht, welche unbewusst erfolgen. Nicht der proximale Reiz per se ruft demnach ein Perzept hervor, sondern der Reiz muss zunächst überhaupt erst Anlass zu einer bestimmten Wahrnehmung geben – sei es die Wahrnehmung von Orientierung, Nähe, Tiefe usw. –, bevor das endgültige Perzept auftreten kann. Dieses Perzept folgt am Ende einer Kette von Verarbeitungsschritten und ist daher indirekt (S. 9 f.). Beispielsweise hängt die wahrgenommene Helligkeit einer Oberfläche nicht nur von der Intensität des Lichts ab, das das Auge von dieser Oberfläche erreicht, sondern auch von der wahrgenommenen Orientierung der Oberfläche und von anderen sichtbaren Oberflächen; die wahrgenommene Größe eines Objekts hängt von der wahrgenommenen Distanz und dem visuellen Kontext ebenso ab wie von dessen retinaler Größe. Dem Beobachter aber ist nur die Helligkeit oder Größe bewusst, nicht die vorangegangenen Berechnungen der anderen Variablen, die schließlich zum endgültigen Perzept geführt haben (Bridgeman, 1998, in seiner Rezension von Rock, 1997).

Rocks Theorie knüpft explizit an Helmholtz' (1867) Vorstellung an, wonach die perzeptuelle Verarbeitung vom „Streben nach Bedeutung“ geleitet wird und auf Basis „unbewusster Schlüsse“ erfolgt, die durch frühere Erfahrungen vermittelt werden. Indem das Wahrnehmungssystem heuristische Annahmen trifft, können laut Helmholtz aus dem retinalen Bild Schlussfolgerungen über die Umgebung gezogen und so die Lücke zwischen sensorischem Input und perzeptuellem Output geschlossen werden. Dieser

Prozess perzeptueller Inferenz vollzieht sich demnach jedoch – anders als Inferenzprozesse im Denken oder Problemlösen – unbewusst.

Nach Rocks Ansicht besteht das Ziel der Wahrnehmung darin, zu einer internen Beschreibung (*Description*) der Objekte und Ereignisse der Außenwelt zu gelangen. Diese interne Beschreibung – Korrelat des Perzepts – wird vom proximalen Reiz ausgelöst und gestützt, muss also im Einklang mit dessen Eigenschaften stehen, ist aber keine direkte Kopie davon; die interne Beschreibung kann mehr oder weniger stark vom proximalen Reiz abweichen (vgl. Helmholtz' „Zeichentheorie“, beispielsweise skizziert in Mausfeld, 2006, S. 100).

Rocks theoretische Beiträge sind laut Stephen E. Palmer eine moderne Weiterentwicklung der Helmholtz'schen Perspektive und ebnen den Weg für computationale oder informationsverarbeitende Modelle der visuellen Wahrnehmung³. Obwohl im Kern konsistent mit der Helmholtz'schen Perspektive, unterscheidet sich Rocks Version jedoch in einem wichtigen Punkt: Laut Helmholtz wird das Problem des unterspezifizierten sensorischen Inputs (also das *Inverse Problem*) dadurch gelöst, dass das Wahrnehmungssystem auf Basis heuristischer Annahmen die „wahrscheinlichste“ der jeweils unzähligen möglichen Lösungen auswählt, die den betreffenden sensorischen Input hervorgerufen haben könnten. Dieser typischerweise als Likelihood-Prinzip bezeichnete Ansatz, der im sog. Bayes'schen Ansatz der Wahrnehmungstheorie zur Anwendung kommt (Mausfeld, 2006, S. 101), wirft allerdings schwierige konzeptionelle Fragen nach der inferentiellen Basis auf (vgl. Palmer, 1999, Fußnote 4, S. 57). Anders als Helmholtz vertritt Rock (1983) die Auffassung, das visuelle System löse das Problem des unterspezifizierten sensorischen Inputs, indem es Hypothesen bildet und prüft sowie Schlussfolgerungen nach heuristischen Prinzipien zieht. Er setzt explizit ein „Homunculus-Konzept“ voraus, wonach eine „vermittelnde Instanz“ des Geistes Zugriff auf den proximalen Reiz besitzt, den diese jeweils untersucht und dann, ähnlich einem denkenden Organismus, einzelne Aspekte auswählt, die die Objekte und Ereignisse der Außenwelt repräsentieren (S. 39).

Rock identifiziert vier unterschiedliche Arten von sog. „kognitiven Prozessen“⁴ der visuellen Wahrnehmung (Rock, 1983, S. 17): Gestaltbildung, Problemlösen, Bestimmung von Zusammenhängen im proximalen Reiz und unbewusste Schlüsse. Es sei vorab angemerkt, dass bei der Analyse konkreter Wahrnehmungsvorgänge eine strikte Trennung dieser Arten von Prozessen nicht immer möglich ist, weil die unterschiedlichen Arten von Prozessen einerseits in Teilen einander ähneln und andererseits oftmals gemeinsam beteiligt sind.

Gestaltbildung. Die perzeptuelle Bildung von Gestalten, d. h. die Wahrnehmung von Form, basiert auf einem „Prozess unbewusster interner Beschreibung“ des proximalen Reizes (siehe Rock, 1983, Kapitel 3, insbesondere S. 94–96). Laut Rock lässt sich die interne Beschreibung einer wahrgenommenen Form in den meisten Fällen lediglich auf die innere Geometrie des Reizmusters plus die Zuweisung von Kopf/Spitze, Fuß und Seiten zurückführen (siehe Beispiel in Abbildung 2.2). Das initiale Perzept, das dem proximalen Reiz ähnlich ist, nennt Rock „literales Perzept“ (*Literal Percept*), das als Ding „in der Welt“ wahrgenommen wird, aber „typischerweise zweidimensional“ erscheint (*Two-Dimensional World Mode*; S. 94). In solchen Fällen, in denen das Wahrnehmungssystem ohne oder mit nur wenigen Schlussfolgerungen zu einer internen Beschreibung des sensorischen Inputs gelangen kann, ist es laut Rock daher unangemessen, von Problemlösen oder Inferenz zu sprechen (S. 16).

Problemlösen. Eine andere Art von visuellem Prozess ist erforderlich, wenn aufgrund des proximalen Reizes potentiell mehrere perzeptuelle Lösungen in Frage kommen („qualitative Ambiguität“), weshalb etwas „Kreativität“ gefordert ist. Prozesse des Problemlösens generieren und prüfen Hypothesen und bringen so schließlich eine interne Beschreibung eines uneindeutigen Reizes hervor (siehe Rock, 1983,

³Stephen E. Palmer im Vorwort zu Rock (1997), S. XX.

⁴Rock (1983) weist darauf hin, dass er den Begriff „kognitive Theorie“ nicht im Sinne von Berkeley (1709) oder Titchener (1921) verwendet (S. 32).

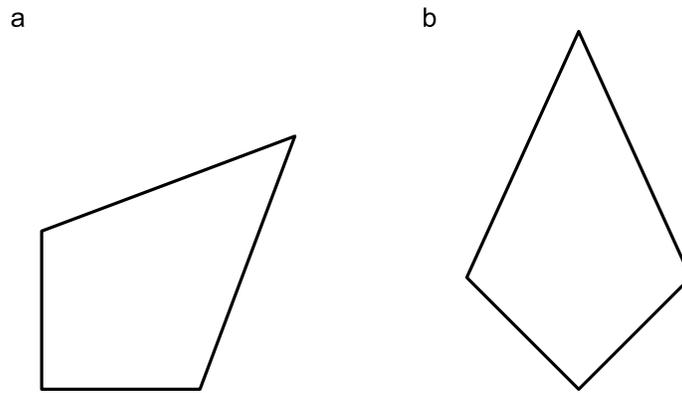


Abbildung 2.2: Zwei identische Figuren, die je nach Orientierung unterschiedlich aussehen (a vs. b). Nicht die Änderung der Orientierung im retinalen Bild führt zu einer Veränderung der wahrgenommenen Figur, sondern die veränderte Zuweisung von Kopf/Spitze und Fuß sowie linkem und rechtem Rand der Figur. [Nach Rock (1973), zitiert in Rock (1983, S. 49).]

Kapitel 4–7). Das perzeptuelle Problemlösen umfasst drei Schritte, und zwar 1. potentielle Lösungen zu finden, 2. potentielle Lösungen zu akzeptieren und 3. bestimmte Lösungen zu präferieren und auszuwählen. Charakteristisch für diese Art von Problemlösen ist, dass die Lösung häufig erst mit einiger Verzögerung perzeptuell verfügbar ist und das ursprüngliche, literale Perzept ablöst, d. h. ersetzt.

Perzeptuelles Problemlösen erfolgt beispielsweise bei Kippfiguren oder bei komplexeren diskreten Bewegungsreizen und spielt insbesondere auch eine große Rolle bei perzeptueller Vervollständigung. Der Prozess des Problemlösens ist daher von besonderer Bedeutung für diese Arbeit, so dass im folgenden die drei Schritte des Problemlösens skizziert und anschließend auf die bereits in der Einleitung kurz vorgestellte Studie von Sigman und Rock (1974) angewandt werden:

1. Schritt: Potentielle Lösungen finden. Rock unterscheidet in diesem ersten Schritt des Problemlösens zwei Arten von Lösungen:

- (a) Lösungen, auf die eindeutige, isolierbare Anhaltspunkte im literalen Perzept hindeuten („Lösung von unten“, datenbasiert; S. 102–110). Ein Beispiel für eine solche datenbasierte „Lösung von unten“ sind Scheinfiguren wie das in Abbildung 1.3a dargestellte Kanizsa-Dreieck (S. 9). Das literale Perzept besteht laut Rock in solchen Fällen sehr wahrscheinlich aus drei unvollständigen schwarzen Scheiben, und erst die Figur-Grund-Umkehrung führt – mit umso größerer Verzögerung, je schwächer die Hinweise im proximalen Reiz sind – zu dem Perzept der Scheinfigur. Diese Hypothese wird beispielsweise durch Anhaltspunkte wie die Unvollständigkeit der Scheiben (Hinweis auf Verdeckung) und die passende Ausrichtung der Kanten ausgelöst. Diese eigentlich kritischen Anhaltspunkte sind allerdings laut Rock prinzipiell entbehrlich, wenn das Perzept schon einmal ausgelöst wurde, bzw. wenn eine entsprechende Disposition für die Hypothese einer solchen Scheinfigur vorhanden ist.
- (b) Lösungen, auf die keine eindeutigen, isolierbaren Anhaltspunkte im literalen Perzept hindeuten müssen („Lösung von oben“, hypothesenbasiert; S. 111 f.). Ein Beispiel für eine solche hypothesenbasierte „Lösung von oben“ ist der kinetische Tiefeneffekt, der dadurch charakterisiert ist, dass die Wahrnehmung eines starren 3D-Objekts in Bewegung/Rotation der Wahrnehmung eines planaren 2D-Objekts, das fortwährend deformiert wird (literales Perzept), vorgezogen wird (Wallach & O’Connell, 1953).

2. Schritt: Potentielle Lösungen akzeptieren. Damit eine gefundene potentielle Lösung des Problems, was ein proximaler Reiz (bzw. das literale Perzept) repräsentieren könnte, akzeptiert wird, muss diese bestimmte Voraussetzungen erfüllen, andernfalls wird sie zurückgewiesen und verworfen. Anders als zum Beispiel in Träumen oder bei purer Einbildung sind perzeptuell konstruierte Eindrücke durch den proximalen Reiz und das literale Perzept bestimmt; die interne Beschreibung muss also dazu „passen“. Hierfür sind zwei Voraussetzungen zu erfüllen:

1. „Konformität“. Die Lösung muss vereinbar mit dem proximalen Reiz sein, also alles, was im proximalen Reiz vorhanden ist, rechtfertigen bzw. erklären können.
2. „Unterstützung“. Umgekehrt muss zugleich der proximale Reiz bzw. das dadurch erzeugte literale Perzept alles enthalten, was die Lösung impliziert/erfordert, diese also stützen. Das Fehlen (*Absence*) einer bestimmten Eigenschaft oder Komponente im Reiz bzw. im literalen Perzept kann ebenso wie das Vorhandensein (*Presence*) einer Eigenschaft, die der Lösung widerspricht (*Negative Evidence*), dazu führen, dass die Lösung zurückgewiesen und verworfen wird.

Die Prüfung dieser beiden Voraussetzungen wird weiter unten noch anhand des bereits bekannten Beispiels der Scheinbewegung unter Verdeckungseinflüssen verdeutlicht. Zahlreiche weitere Beispiele, die diese Voraussetzungen erfüllen bzw. nicht erfüllen, finden sich in Rock (1983, Kapitel 5).

Gemäß der Rock'schen Perspektive nimmt der proximale Reiz im Wahrnehmungsprozess also eine duale Rolle ein: Zum einen wird die Richtung der Suche nach einer Lösung dafür, was im proximalen Reiz abgebildet ist, vorgegeben, zum anderen sind im proximalen Reiz Hinweise für oder gegen potentielle perzeptuelle Lösungen enthalten. Man beachte an dieser Stelle die Parallelität zur Mausfeld'schen Perspektive, gemäß derer der proximale Reiz (repräsentiert durch sensorische Codes) ebenfalls in einer bidirektionalen Beziehung zur perzeptuellen Lösung (repräsentiert durch aktivierte komplexe Konzeptformen) steht.

3. Schritt: Lösungen präferieren und auswählen. Prinzipiell können mehrere potentielle Lösungen akzeptiert werden, wenn sie die beschriebenen Voraussetzungen erfüllen. Es stellt sich daher die Frage, nach welchen Kriterien eine Lösung einer anderen vorgezogen wird. Je nach theoretischer Perspektive gibt es auf diese Frage unterschiedliche Antworten, die einander nicht gegenseitig ausschließen müssen.

Rock befürwortet die Ansicht, dass die vermittelnde Instanz prinzipiell versucht, die Koinzidenz von Ereignissen bzw. das gemeinsame Auftreten von Reizänderungen, die scheinbar nicht in Bezug zueinander stehen, auf eine gemeinsame Ursache zurückzuführen und dadurch zu „erklären“. Allgemeiner formuliert – und somit auch auf statische Reizkonfigurationen anwendbar –, wird eine Lösung präferiert, wenn diese Lösung Erklärungen für ansonsten zufällige Koinzidenzen und unerklärte/implizite Regularitäten bieten kann („Prinzip der Koinzidenz-Begründung“ oder „Prinzip der singulären Erklärung“). Abbildung 1.3b (S. 9) zeigt ein Beispiel dafür, wie die Lösung eines (semi-)transparenten Dreiecks vor einem anderen Dreieck eine singuläre Erklärung für die Koinzidenz 1. der Kollinearität der Luminanzkanten und 2. der unterschiedlich eingefärbten Flächen bietet und deshalb nicht nur das gleichermaßen mögliche literale Perzept – drei hellgraue und drei dunkelrote Dreiecke und ein entsättigtes, rötliches Hexagon – aussticht⁵, sondern auch andere Lösungen, wie zum Beispiel die, dass ein undurchsichtiges, entsättigtes, rötliches Dreieck mit hellgrauen Ecken ein auf dem Kopf stehendes, dunkelrotes Dreieck verdeckt.⁶ Das Prinzip der generischen Ansicht (vgl. Abbildung 2.1c, S. 17) ist ein Spezialfall des hier beschriebenen Prinzips der Koinzidenz-Begründung bzw. der singulären Erklärung.

⁵Diese alternative Lösung enthält nämlich keine Begründung für die beobachtete Koinzidenz.

⁶Diese Lösung erklärt lediglich die kollineare Fortsetzung der Grenzlinien des „vorderen“ Dreiecks, nicht jedoch die beschriebene Koinzidenz.

Gemäß der Rock'schen Perspektive können auch frühere Eindrücke und Erinnerungen Einfluss auf die präferierte Lösung der vermittelnden Instanz haben. Dass hierfür nicht der Helmholtz'sche Likelihood-Ansatz mit der Gefahr eines Zirkelschlusses notwendig ist, zeigt Rocks (1983) Vorstellung des perzeptuellen „Lernens“ (S. 159 f.): 1. Man erhält zunächst gemäß gewissen allgemeinen Prinzipien der perzeptuellen Organisation eine bestimmte interne Beschreibung (die literale Lösung) eines proximalen Reizes. 2. Gewisse Prozesse führen zu perzeptueller Reorganisation, zum Beispiel bei der Umkehrung von Figur und Grund wie in Abbildung 1.3a (S. 9). 3. Dies führt zur Wiedererkennung und Identifizierung von bekannten internen Beschreibungen. 4. Hierdurch wird die Lösung, die das bekannte Perzept enthält, stabilisiert. Demnach wäre Vorerfahrung lediglich ein stabilisierender Faktor, der zur Präferenz einer Lösung gegenüber einer anderen beitragen kann.

Abschließend soll die Rock'sche Vorstellung des perzeptuellen Problemlösens exemplarisch auf die Reize des in der Einleitung beschriebenen Experiments zur Scheinbewegung von Sigman und Rock (1974) angewandt werden, um dieses praktisch zu illustrieren: Wird eine Scheibe alternierend links und rechts dargeboten, ruft sie bei geeigneten räumlichen und zeitlichen Parametern horizontale Scheinbewegung hervor (Abbildung 1.2a, S. 8). Der proximale Reiz ist per se unerklärlich; es sind zumindest keinerlei Hinweise darin enthalten, warum die Scheiben plötzlich verschwinden und erscheinen, wie es beispielsweise bei plötzlicher Verdeckung und Aufdeckung der Fall wäre. Allerdings wäre der Reiz ähnlich, würde ein stationäres Objekt plötzlich mit sehr hoher Geschwindigkeit von seinem ursprünglichen Aufenthaltsort zu einem anderen bewegt. Es wäre deshalb nicht unplausibel, anzunehmen, dass Scheinbewegung eine mögliche Lösung des durch den proximalen Reiz gegebenen „Problems“ sein könnte (Rock, 1983, S. 166). Diese Lösung ist grundsätzlich „akzeptabel“, weil sie die beiden Voraussetzungen („Konformität“ und „Unterstützung“, siehe oben) erfüllt:

- Konformität: Sehr schnelle, reale Bewegung eines Objekts zwischen zwei Orten ruft jeweils ein kurzes Erscheinen des Objekts an beiden Orten im proximalen Reiz hervor, so dass der proximale Reiz prinzipiell keine unerklärliche Stimulation hervorruft.
- Unterstützung: Der proximale Reiz bzw. das zugehörige literale Perzept unterstützt die Lösung. Dies mag zunächst widersprüchlich erscheinen, weil die Lücke zwischen den beiden Darbietungspositionen als klarer Hinweis gegen die Plausibilität der Deutung von Bewegung aufgefasst werden könnte. Allerdings weist Rock darauf hin, dass sehr schnelle, reale Bewegung eines Objekts zwischen zwei Orten kaum mehr als einen verschwommenen Eindruck erzeugt, und dass Scheinbewegung laut einer Studie von Kaufman, Cyrułnik, Kaplowitz, Melnick und Stoff (1971) gerade etwa ab der Schwelle zur Verschwommenheit auftritt (vgl. die dortige Tabelle auf S. 347), somit in gewisser Weise komplementär zu kontinuierlicher Bewegungswahrnehmung aufzufassen sei (ebd., S. 348). Wenn aber die räumlichen und zeitlichen Abstände zwischen den beiden Elementerscheinungen im proximalen Reiz bzw. im literalen Perzept denjenigen Abständen entsprechen, bei denen ein realer, schnell bewegter Reiz nur verschwommen wahrgenommen werden kann, stehe das Fehlen eines erkennbaren kontinuierlichen Bewegungspfades laut Rock (1983) nicht zwangsläufig im Widerspruch zur perzeptuellen Lösung in Form von Scheinbewegung (S. 166 f.).

Werden die Reize dahingehend abgeändert, dass zusätzlich an der jeweils unbesetzten Position ein größeres Rechteck eingeblendet wird, entsteht oftmals der Eindruck von horizontaler Scheinbewegung des Rechtecks, das eine von nun zwei stationären Scheiben alternierend verdeckt und aufdeckt (Abbildung 1.2b, S. 8). Obwohl die Darbietung der Scheibe in beiden Bedingungen identisch ist und die Reize im Vergleich zur vorherigen Bedingung einander nur durch das zusätzliche Rechteck an der jeweils unbesetzten Position unterscheiden, verändert sich die Wahrnehmung der Szene drastisch. Dieser auf den ersten Blick überraschende Befund lässt sich ebenfalls mit perzeptueller Problemlösung wie oben beschrieben erklären: Die Lösung ist gleichermaßen „akzeptabel“ wie die Lösung von Scheinbewegung in

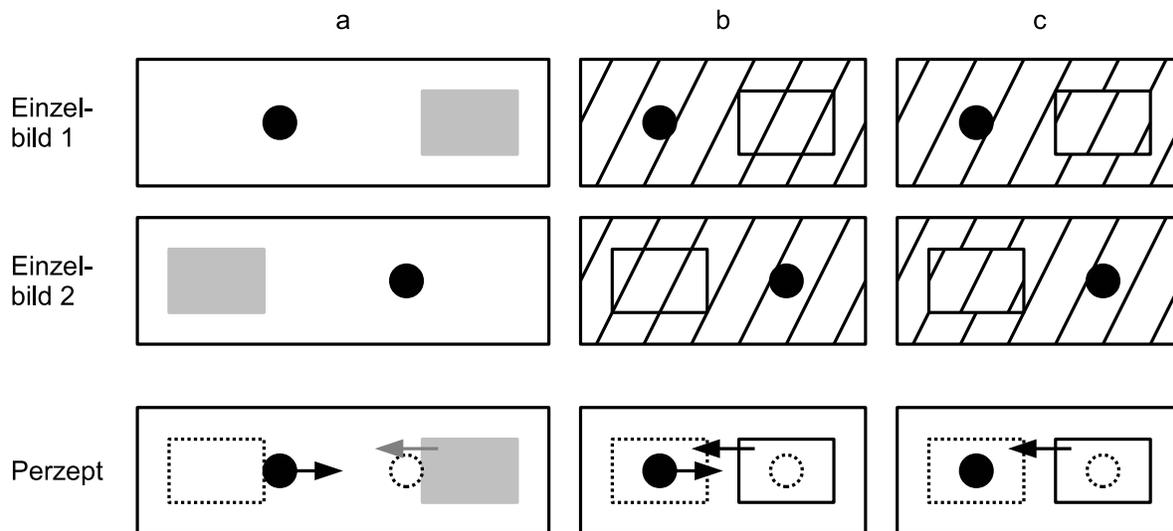


Abbildung 2.3: Abhängigkeit der Scheinbewegung von der Plausibilität für Verdeckung. **a)** Wird zusätzlich zu dem runden Zielreiz, der alternierend an zwei Positionen dargeboten wird und dadurch Scheinbewegung hervorruft, ein größeres, rechteckiges Reizelement *neben* den jeweils unbesetzten Positionen des Zielreizes dargeboten, wird häufig eine gegenläufige Scheinbewegung der Scheibe und des Rechtecks wahrgenommen. **b)** Wird nur der Umriss des rechteckigen Elements wahrgenommen, das somit durchsichtig erscheint, wird ebenfalls häufig eine gegenläufige Scheinbewegung der Scheibe und des Rechtecks wahrgenommen. **c)** Kontrollbedingung für (b), in der das Rechteck undurchsichtig wahrgenommen wird. In der Kontrollbedingung wird keine Scheinbewegung der Scheibe wahrgenommen (vgl. Abbildung 1.2b, S. 8). [Reize in a ähnlich denen in Ekroll und Borzikowsky (2010), Experiment 1a; Reize in b und c ähnlich denen in Sigman und Rock (1974), Experiment 3.]

der vorherigen Bedingung – Konformität gilt mit demselben Argument wie zuvor, diesmal angewandt auf beide Elemente, und die Unterstützung der Deutung durch das literale Perzept ist ebenso gegeben – und könnte insofern bevorzugt werden, als sie die mehrfache Koinzidenz plausibel begründen kann (Erscheinen/Verschwinden des Rechtecks aufgrund von Bewegung, Erscheinen/Verschwinden der Scheibe aufgrund von Aufdeckung/Verdeckung; S. 168 ff.).

Dieser und weitere experimentelle Befunde dieses Paradigmas unterstützen die theoretische Vorstellung, dass ein perzeptueller Prozess ähnlich intelligentem Problemlösen bei der Deutung visueller Szenen beteiligt ist (Abbildungen 2.3, 2.4; vgl. auch Sigman & Rock, 1974, und Ekroll & Borzikowsky, 2010).

Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse den weitreichenden Einfluss von Verdeckung und perzeptueller Vervollständigung auf die Wahrnehmung – in diesem Fall von Scheinbewegung. Der Einfluss von Verdeckung und perzeptueller Vervollständigung auf die Qualität und Interpolation von Scheinbewegung wird in Kapitel 3 untersucht, der Einfluss auf die phänomenale Sichtbarkeit in Kapitel 4.

Bestimmung von Zusammenhängen im proximalen Reiz. Das visuelle System interpretiert Beziehungen und Zusammenhänge im proximalen Reiz (bzw. im literalen Perzept) und bringt dadurch eine interne Beschreibung hervor, die phänomenal mit der Wahrnehmung von Objekten, Situationen oder Ereignissen korrespondiert (siehe Rock, 1983, Kapitel 8, insbesondere S. 201 f., 235–239).

Diese dritte der vier Arten von „kognitiven Prozessen“ hat mit dem Prozess des Problemlösens gemeinsam, dass die endgültige interne Beschreibung mit dem proximalen Reiz verträglich sein muss und durch diesen unterstützt werden muss. Anders als beim Problemlösen kommt aber bei der Interpretation von Beziehungen und Zusammenhängen nicht das Prinzip der singulären Erklärung, also die Erklärung von Koinzidenzen, ins Spiel. Anstatt eine Lösung zu suchen und auszuwählen, die schließlich das literale Perzept ablöst, scheint die vermittelnde Instanz in diesem Prozess eher von gewissen „Annahmen“ geleitet zu werden, die auf früheren Erfahrungen (aus dem täglichen Leben ebenso wie im evolutionären

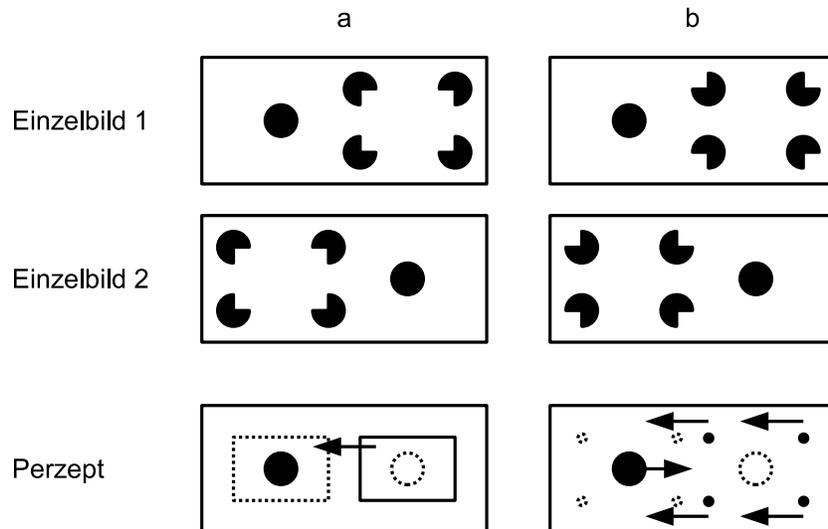


Abbildung 2.4: Abhängigkeit der Scheinbewegung von der Präsenz illusorärer Verdecke. **a)** Wird durch geeignete Hinweisreize ein Scheinverdecke wahrgenommen, wird keine Scheinbewegung der Scheibe wahrgenommen. **b)** Kontrollbedingung für a, in der keine Hinweisreize für einen Verdecke enthalten sind. In diesem Fall wird wieder Scheinbewegung der Scheibe wahrgenommen. [Reize ähnlich denen in Sigman und Rock (1974), Experiment 4.]

Sinne) basieren und zum endgültigen Perzept führen (S. 238).

Beispiele für diese Art von Prozess sind der Einfluss von Beleuchtungshinweisen auf die wahrgenommene Helligkeit von Oberflächen (z. B. Gilchrist, 1977), induzierte Bewegung (z. B. Duncker, 1929), die wahrgenommene Orientierung von Objekten bezüglich ihrer Umgebung (z. B. DiLorenzo & Rock, 1982) oder die Wahrnehmung von Größenverhältnissen in einer Szene (Rock & Ebenholtz, 1959).

Prozesse der Interpretation von Zusammenhängen im proximalen Reiz sind laut Rock (1983) – trotz der Unterschiede zum oben beschriebenen Prozess des Problemlösens – dennoch als eine Art von Problemlösen zu verstehen, weil computationale oder Inferenzprozesse beteiligt sind, die nicht nur auf den verfügbaren Reizinformationen basieren, sondern auch auf „Annahmen“, die zu einer eindeutigen Erklärung dieser Informationen beitragen. Zudem sei das „Bemühen“ erkennbar, eine intern konsistente Lösung herbeizuführen (S. 239).

Zusammengefasst bringen Prozesse zur Bestimmung von Zusammenhängen im proximalen Reiz eine „rationale“ Lösung hervor, die mit dem proximalen Reiz vereinbar ist und durch diesen unterstützt wird und die zusätzlich von gewissen „Annahmen“ oder bevorzugten Interpretationen abhängt.

Unbewusste Schlüsse. Die vierte und letzte Art von „kognitiven Prozessen“, der Prozess der deduktiven Ableitung einer Hypothese auf Basis von „unmittelbar bekannten“ Regeln und Prämissen (Beobachtungen), bezeichnet Rock in Anlehnung an Helmholtz (1867) als „unbewusste Schlüsse“ (siehe Rock, 1983, Kapitel 9, insbesondere S. 240–242, 272–282). In diese Kategorie fallen die zahlreichen Fälle von perzeptuellen Konstanzleistungen. Unbewusste Schlüsse erfordern – anders als Prozesse zur Interpretation von Zusammenhängen im proximalen Reiz – keine explizite Suche und Auswahl einer Lösung; sie basieren auch nicht auf „Annahmen“, sondern bilden Hypothesen (die endgültigen Perzepte) auf Basis von Regeln (bekannte Zusammenhänge) und Prämissen (Beobachtungen/proximaler Reiz). Beispielsweise sind im Fall von Größenkonstanz zwei Aspekte des proximalen Reizes besonders wichtig: der visuelle Winkel im retinalen Bild und Informationen über die Objektentfernung. Die vermittelnde Instanz „weiß“, dass diese beiden die wichtigsten Aspekte sind, und setzt sie daher in Beziehung zueinander.

Nach diesem Überblick über die von Rock (1983) identifizierten vier Arten von „kognitiven Prozessen“

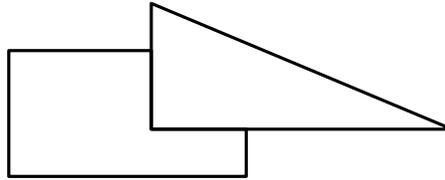


Abbildung 2.5: Literales Perzept (initiale Lösung; zweidimensional/flach): Eine dreieckige Figur, zusammengefügt mit einer L-förmigen Figur. Proximaler Modus (begleitend zur endgültigen Lösung; egozentrisch): Ein Rechteck, teilweise verdeckt, von dem ein L-förmiger Bereich sichtbar ist, und ein Dreieck. Perzept (bevorzugte, endgültige Lösung im Weltmodus; allozentrisch): Ein Rechteck, teilweise von einem Dreieck verdeckt.

der visuellen Wahrnehmung sei abschließend auf den dualen Charakter der Wahrnehmung hingewiesen (S. 254–282), der sich im Spannungsfeld zwischen „proximalem Modus“ (*Proximal Mode*) und „Weltmodus“ (*World Mode*) manifestiert und sich auch im Sichtbarkeitsparadoxon (Kapitel 4) zeigt. Der proximale Modus ist laut Rock ein ähnliches Konzept wie die literale Beschreibung/Lösung, denn beide korrespondieren eng mit dem proximalen Reiz. Allerdings spiegelt der proximale Modus den Blickwinkel des Beobachters wider und ist somit egozentrisch, während die literale Lösung denselben objektiven Charakter wie die bevorzugte, endgültige Lösung (das Perzept) besitzt. Am Beispiel des Rechtecks und des Dreiecks in Abbildung 2.5 wird dies deutlich: Die bevorzugte, endgültige Lösung (das Perzept) ist ein Rechteck, das von einem Dreieck teilweise verdeckt wird. Im proximalen Modus, der parallel zum Weltmodus der endgültigen Lösung eingenommen werden kann, wird außer dem Dreieck ebenfalls ein teilweise verdecktes Rechteck wahrgenommen – allerdings ein L-förmiger Bereich bewusst als sichtbar und der „komplementäre“ Bereich bewusst als unsichtbar/verdeckt. Die literale Lösung stimmt mit dem proximalen Reiz dahingehend überein, dass in beiden ein Dreieck mit einer L-förmigen Region zusammengefügt ist. Anders als der proximale Modus ruft die literale Lösung jedoch eine ausgeprägte zweidimensionale Wahrnehmung hervor. Sobald die bevorzugte Lösung eintritt, wird die literale Lösung nicht mehr unterstützt und schließlich durch die endgültige Lösung ersetzt (S. 260 f.).

Zusammenfassend lässt sich Rocks Perspektive als internalistisch beschreiben, weil Wahrnehmung als Ergebnis interner Prozesse ähnlich intelligentem Problemlösen aufgefasst wird. Sie ist überwiegend nativistisch, weil die hierfür erforderlichen Prinzipien als gegeben vorausgesetzt werden, allerdings ist auch das Konzept des perzeptuellen Lernens beispielsweise bei der Auswahl der bevorzugten Problemlösung oder bei der Bestimmung von Zusammenhängen im proximalen Reiz Teil der Theorie. Rocks Perspektive ist holistisch angelegt, weil der proximale Reiz bzw. das literale Perzept über größere räumliche und zeitliche Distanzen hinweg integriert wird, allerdings variiert der Grad der Komplexität je nach Art des Prozesses. Gestaltbildung ist beispielsweise stärker an lokalen Merkmalen des Reizes orientiert als der Prozess des Problemlösens. Besonders charakteristisch für die Rock'sche Perspektive ist der indirekte Charakter der Wahrnehmung, die als das Endprodukt komplexer interner Informationsverarbeitungsschritte betrachtet wird.

Rocks methodische Vorgehensweise basiert sowohl auf objektiven (behavioristischen) als auch auf subjektiven Kriterien (naive Introspektion).

2.3 Perzeptuelle Vervollständigung

Aus einer konstruktivistischen Perspektive wird das perzeptuelle Erleben durch (multi-)sensorische Informationen hervorgerufen, die auf komplexe Weise integriert und verarbeitet werden müssen. Aufgrund der physiologischen Beschaffenheit der Sinnesorgane können die verfügbaren Informationen allerdings von vornherein nur einen winzigen Ausschnitt der physikalischen Reizumgebung widerspiegeln. So ist beispielsweise das menschliche Auge in seinem räumlichen und zeitlichen Auflösungsvermögen be-

schränkt (Watson, Ahumada & Farrell, 1986): In räumlicher Hinsicht ist die Beschränkung auf die inhomogene Dichte und die Anordnung der unterschiedlichen Photorezeptortypen auf der Netzhaut (Hofer, Carroll, Neitz, Neitz & Williams, 2005), die im Blinden Fleck sogar gänzlich fehlen, zurückzuführen. Einschränkungen in zeitlicher Hinsicht ergeben sich beispielsweise dadurch, dass der Informationsstrom durch Lidschläge (Bentivoglio et al., 1997; Stern, Boyer & Schroeder, 1994) und Sakkaden (Smit, Gisbergen & Cools, 1987) mehrmals pro Minute jeweils für mehrere Dutzend Millisekunden unterbrochen wird. Weiterhin gehen durch die Projektion des dreidimensionalen Raumes auf die zweidimensionale Struktur der Netzhaut Tiefeninformationen verloren, was zum Problem der unterspezifizierten Umkehrung (*Inverse Problem*; siehe oben) führt. Und schließlich ist die Aufnahme visueller Informationen stets nur aus einem ganz spezifischen, dem sog. egozentrischen Blickwinkel möglich (Burgess, 2006).

Eine weitere Herausforderung stellt die Tatsache dar, dass physikalische Objekte sowohl lichtdurchlässig als auch lichtundurchlässig sein können. Die Lichtdurchlässigkeit von Objekten ist als physikalische Transluzenz bzw. physikalische Transparenz definiert.⁷ Mit perzeptueller Transparenz wird der phänomenale *Eindruck* der Lichtdurchlässigkeit eines Objekts bezeichnet. Die Wahrnehmung von Transparenz erfordert die Dekomposition eines farbigen Bildpunktes an einer bestimmten retinalen Position in unterschiedliche kausale Schichten, die explizit in derselben Blickrichtung repräsentiert sind. Physikalische und perzeptuelle Transparenz sind weitgehend voneinander entkoppelt; erstere ist weder eine notwendige noch eine hinreichende Voraussetzung für letztere (D’Zmura, Colantoni, Knoblauch & Laget, 1997; Faul, 1997). Für diese Arbeit spielt Transparenz jedoch nur eine untergeordnete Rolle und soll deshalb an dieser Stelle nur kurz erwähnt worden sein.

Die Undurchlässigkeit eines Objekts für Lichtwellen führt zu physikalischer Verdeckung durch das lichtundurchlässige Objekt, wodurch bestimmt wird, welche Teile einer Szene für den Beobachter prinzipiell sichtbar wären und welche partiell durch andere Teile verborgen sind. Physikalische Verdeckung von Teilen einer Szene ruft typischerweise den phänomenalen Eindruck von partieller Verdeckung des Hintergrunds hervor, im folgenden mit perzeptueller Verdeckung bezeichnet.⁸ Ähnlich wie physikalische und perzeptuelle Transparenz weitgehend voneinander entkoppelt sind, ist auch physikalische Verdeckung weder eine notwendige noch eine hinreichende Voraussetzung für perzeptuelle Verdeckung.

Dass die Konstruktion einer stabilen, konsistenten „inneren Realität“ trotz dieser physikalischen Rahmenbedingungen und der oben beschriebenen physiologischen Beschränkungen gelingt, ist der spezifischen Ausstattung und Funktionsweise des visuellen Systems zuzuschreiben (vgl. Abschnitt 2.2.2). Eine zentrale Eigenschaft ist die beständige Repräsentation von vollständigen Objekten trotz der oftmals nur stark fragmentiert verfügbaren sensorischen Informationen, beispielsweise bei partieller und/oder kurzzeitiger Verdeckung. Dieses Prinzip der perzeptuellen Vervollständigung (englisch: *Perceptual Completion*, vgl. z. B. Pessoa, Thompson & Noë, 1998) soll im Rahmen dieser Arbeit unter dem Gesichtspunkt des Einflusses von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung und auf phänomenale Sichtbarkeit näher untersucht werden. Das übergeordnete Ziel ist hierbei die kritische Hinterfragung der gängigen Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung (vgl. Unterabschnitt 2.3.4).

Der Begriff der perzeptuellen Vervollständigung wird in der Fachliteratur auf unterschiedliche Weise verwendet. Er bezeichnet im Bereich der visuellen Wahrnehmung 1. das universelle Prinzip einer beständigen, vollständigen Wahrnehmung der Dinge trotz fragmentierter und fehlender sensorischer Informationen (im visuellen Raum) und 2. Mechanismen der perzeptuellen Interpolation fehlender sensorischer Informationen. Als Ergebnis dieser Art von Interpolation entsteht ein phänomenaler Eindruck von Voll-

⁷Im Englischen wird zwischen transluzenten Objekten („transmitting and diffusing light so that objects beyond cannot be seen clearly“; Merriam-Webster Online, <http://www.merriam-webster.com>) und transparenten Objekten („having the property of transmitting light without appreciable scattering so that bodies lying beyond are seen clearly“; ebd.) unterschieden.

⁸Es wird hierbei von Objekten und Oberflächen ausgegangen, die Licht emittieren, reflektieren oder (ggf. gebrochen) transmittieren und dadurch „sichtbar“ werden. Auf den Sonderfall, dass Objekte von hinten angestrahlt werden und nur kraft ihrer Silhouette zu erkennen sind, soll im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. In diesem Fall könnte beispielsweise ein kleiner Gegenstand im Vordergrund von einem größeren Gegenstand im *Hintergrund* „verdeckt“ werden (Sorensen, 1999, S. 28).

ständigkeit trotz unvollständiger sensorischer Informationen.

Das Prinzip der perzeptuellen Vervollständigung fügt sich auf natürliche Weise in das Bild konstruktivistischer Theorievorstellungen ein. Allerdings bieten die vorgestellten Theorieperspektiven aufgrund ihres vergleichsweise hohen Abstraktionsgrades keine spezifischen Erklärungen für konkrete perzeptuelle Vervollständigungsphänomene. Es gibt zwar zahlreiche, oftmals aus phänomenologischen Beobachtungen heraus entwickelte Erklärungsansätze für einzelne Phänomene oder Gruppen ähnlicher Phänomene von perzeptueller Vervollständigung, jedoch sind diese oftmals theoretisch nur unzureichend eingebettet. Insbesondere ist bislang keine umfassende „Theorie der perzeptuellen Vervollständigung“ bekannt, die die verschiedenartigen Befunde systematisch integriert und in spezifischer Weise erklären könnte. Ein Grund hierfür könnte darin liegen, dass das Verständnis der perzeptuellen Vervollständigung von Objekten eng mit dem Verständnis der Objektwahrnehmung im allgemeinen zusammenhängt, die selbst nur teilweise verstanden ist. Ein weiterer Grund könnte in der konzeptionellen Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung liegen (vgl. Unterabschnitte 2.3.2 und 2.3.3), die zwar phänomenologisch nachvollziehbar ist, sich in der gegenwärtigen Form aber als theoretisch problematisch herausstellt (vgl. Unterabschnitt 2.3.4). Unabhängig davon ist in der Literatur umstritten, ob modale und amodale Vervollständigung auf einem gemeinsamen oder auf getrennten internen Verarbeitungsmechanismen beruhen. Für beide Positionen lassen sich entsprechende empirische Befunde anführen (vgl. z. B. Kellman & Shipley, 1991, sowie Anderson, 2007).

Immerhin gibt es empirische Hinweise darauf, dass bei einzelnen perzeptuellen Vervollständigungsphänomenen in frühen Stadien der visuellen Verarbeitung ein zum Perzept strukturell isomorphes, neuronales *Filling-In* im visuellen Cortex erfolgt. Pessoa et al. (1998) weisen jedoch darauf hin, dass dieser „empirische Isomorphismus“ weder Köhlers gestaltpsychologische Hypothese des psychophysikalischen, „analytischen Isomorphismus“ noch die Vorstellung des Cartesianischen Materialismus als theoretische Konzeption rechtfertigt (Pessoa et al., 1998, Abschnitt 8, S. 741–743). Ferner bietet allein der Nachweis des empirischen Isomorphismus selbst für die damit verbundenen perzeptuellen Vervollständigungsphänomene keine Erklärung, sondern verschiebt das Fundamentalproblem der Wahrnehmungspsychologie allenfalls von der perzeptuellen auf eine neuronale Ebene. Andere Vervollständigungsphänomene, bei denen kein empirischer Isomorphismus beobachtet werden kann, erfordern ohnehin einen anderen explanatorischen Zugang.

2.3.1 Phänomenologische Klassifikation perzeptueller Vervollständigungsphänomene

Als wichtiges Hilfsmittel zur Entwicklung eines theoretischen Verständnisses der Prinzipien perzeptueller Vervollständigung wird hier eine vorläufige Klassifikation der phänomenologischen Gemeinsamkeiten und Unterschiede bekannter Vervollständigungsphänomene versucht. In diesem Zusammenhang werden auch die konzeptionellen Schwierigkeiten der gängigen Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung problematisiert. Für eine phänomenologische Klassifikation kommen prinzipiell mehrere Kriterien in Frage (vgl. Wollschläger, 2006, S. 27), zum Beispiel:

- räumliche (statische) vs. raumzeitliche (dynamische) Vervollständigung,
- Vervollständigung im fovealen vs. peripheren Bereich des Gesichtsfelds,
- modale Vervollständigung von expliziten visuellen Qualitäten (wie z. B. Oberflächenhelligkeit und -farbe) vs. amodale Vervollständigung ohne diese Qualitäten,
- Vervollständigung von Formen vs. Oberflächen vs. Objekten mit Tiefe/Volumen,
- die Art der Vervollständigung, bezogen auf visuelle Merkmale wie Konturen, Farbe, Textur, Materialqualitäten, Tiefe oder Bewegung.

Pessoa et al. (1998) präsentieren in ihrem „Leitfaden über perzeptuelle Vervollständigung für die visuelle Wahrnehmungsforschung und die Philosophie der Wahrnehmung“ eine vielbeachtete Taxonomie perzeptueller Vervollständigungsphänomene. Diese basiert auf zwei Klassifikationskriterien, die nachfolgend kurz vorgestellt werden: 1. modale Vervollständigung vs. amodale Vervollständigung sowie 2. Vervollständigung von Konturen vs. Vervollständigung von Features.

Modale vs. amodale Vervollständigung. Wie bereits in der Einleitung beschrieben, ist modale Vervollständigung dadurch charakterisiert, dass vervollständigte Konturen bzw. Bereiche dieselben perzeptuellen Attribute (zum Beispiel Helligkeit und Farbe) besitzen wie die übrige Gestalt (vgl. beispielsweise das Kanizsa-Dreieck in Abbildung 1.3 auf S. 9). Amodale Vervollständigung beschreibt dagegen die perzeptuelle Vervollständigung wie bei einem partiell verdeckten Objekt, das in den vervollständigten Bereichen keine sog. visuellen Qualitäten wie beispielsweise Helligkeit und Farbe enthält; es wird dort *als verdeckt* wahrgenommen.

Vervollständigung von Konturen vs. Vervollständigung von Features. Die Unterscheidung zwischen der Vervollständigung von Konturen und der Vervollständigung von sonstigen Eigenschaften (*Features*) geht laut Pessoa et al. (1998, S. 728) auf Grossberg und Mingolla (1985) zurück, die als erste zwischen entsprechenden Vervollständigungssystemen unterschieden. Beispiele für diese Arten von Vervollständigung sind Scheinkonturen (Form) und Scheinfiguren (Oberflächen-Features). Verschiedene experimentelle Befunde deuten darauf hin, dass die fünf Features Helligkeit, Farbe, Textur, Bewegung und Tiefe modal vervollständigt werden können (Pessoa et al., 1998, S. 731 ff.).

Die beiden Klassifikationskriterien von Pessoa et al. (1998) bilden keine hierarchische Organisation, sondern stehen orthogonal zueinander und ergänzen einander somit. Die darauf basierende Taxonomie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern orientiert sich lediglich an „salienten Beispielen perzeptueller Vervollständigung“ (S. 726). Sie eignet sich aber als guter Einstieg für einen systematischen Überblick über die gängige Betrachtung unterschiedlicher perzeptueller Vervollständigungsphänomene, weshalb die Struktur der kommenden beiden Abschnitte an die vorgeschlagenen Klassifikationskriterien angelehnt ist, wobei zwischen modaler und amodaler Vervollständigung unterschieden wird und innerhalb der modalen Vervollständigung zwischen der Vervollständigung von Konturen und von Features.

An dieser Stelle sei kurz auf den Unterschied zwischen perzeptueller Vervollständigung und perzeptueller Fortsetzung/Ergänzung hingewiesen; ersteres ist ein Spezialfall von letzterem. Während die perzeptuelle Fortsetzung (ohne Vervollständigung) eher diffus und unspezifisch wirkt – beispielsweise hinsichtlich der Konturen einer Figur –, erzwingt die perzeptuelle Vervollständigung meist eine klare Form (Abbildung 2.6). Analog gilt dies für amodale Fortsetzung bzw. Vervollständigung.

Wie bereits in der Einleitung und weiter oben angekündigt, ist das Ziel dieser Arbeit die kritische Auseinandersetzung mit der in der Literatur allgegenwärtigen – und auch in dieser Taxonomie verwendeten – Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung. Im folgenden Abschnitt 2.3.2 wird daher eine Definition der modalen Vervollständigung in mehreren Schritten zu entwickeln versucht, die einerseits die phänomenologische Vielfalt abdeckt und andererseits die in der Literatur typische Verwendung des Begriffs präzisiert. Die Angemessenheit der Definition wird anhand von einigen ausgewählten Vervollständigungsphänomenen auf die Probe gestellt. In Abschnitt 2.3.3 wird amodale Vervollständigung definiert und anhand einiger Beispiele illustriert. Außerdem werden mögliche Einflussfaktoren und – soweit bekannt – mögliche zugrunde liegende Vervollständigungsmechanismen vorgestellt.⁹ In Abschnitt 2.3.4 wird dann die gängige Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung anhand einiger zuvor vorgestellter Phänomene kritisch hinterfragt, woraus sich die Motivation für den empirischen

⁹Für einen ausführlicheren Überblick über unterschiedliche Arten von perzeptuellen Vervollständigungsphänomenen seien die Arbeiten von Pessoa et al. (1998), Weil und Rees (2011) und Wollschläger (2006) empfohlen.

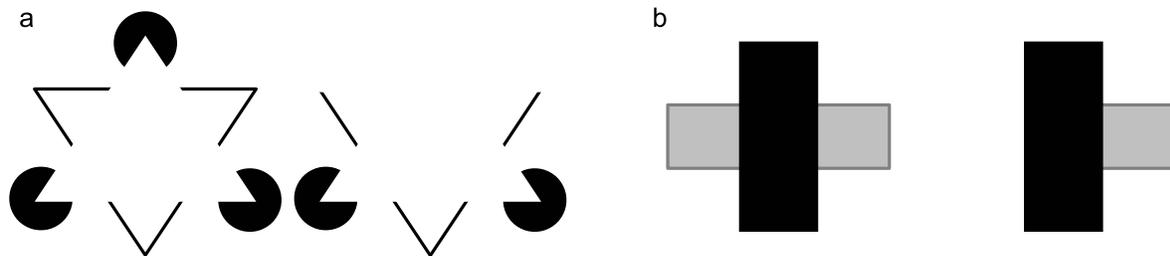


Abbildung 2.6: Perzeptuelle Vervollständigung vs. Fortsetzung/Ergänzung. **a)** Modale Vervollständigung eines aufrecht stehenden Kanizsa-Dreiecks, dessen Scheinkonturen zwischen induzierenden Elementen verlaufen (links), und modale Fortsetzung/Ergänzung einer ähnlichen Figur, deren Scheinkonturen nach oben hin unspezifischer und eher diffus erscheinen (rechts). **b)** Amodale Vervollständigung eines horizontalen grauen Balkens, dessen vervollständigte Konturen durch sichtbare Kanten auf gegenüberliegenden Seiten des Verdeckers induziert werden (links), und amodale Fortsetzung/Ergänzung eines grauen Elements, dessen Konturen hinter dem Verdeckter unspezifischer erscheinen und durch sichtbare Kanten auf derselben Seite des Verdeckers induziert werden (rechts).

rischen Teil dieser Arbeit ergibt (Kapitel 3 und 4). An diese Kritik wird in Abschnitt 4.4 und in der allgemeinen Diskussion (Kapitel 5) angeknüpft.

2.3.2 Modale Vervollständigung

Michotte und Burke (1951, zitiert in Michotte et al., 1991, S. 143) differenzieren in ihrer wegweisenden Arbeit zwischen modaler und amodaler Vervollständigung, die sich phänomenal stark voneinander unterscheiden. Bei modaler Vervollständigung enthalten die ergänzten Teile dieselben perzeptuellen Attribute (oder Modi), d. h. Helligkeit und Farbe, wie der Rest der Konfiguration, während dies bei amodaler Vervollständigung nicht der Fall ist. Diese Charakterisierung lässt sich in einem ersten Versuch einer Definition der modalen Vervollständigung wie folgt präzisieren:

DEFINITION. Modale Vervollständigung von Figuren (1. Fassung, vorläufig). Die visuelle Fortsetzung oder Vervollständigung einer Kontur oder Oberfläche heißt modal, wenn sie phänomenal dieselben qualitativen Attribute der visuellen Modalität wie die übrigen Teile der Figur enthält.^a

^aMichotte et al. (1991) weisen darauf hin, dass „modal“ im Helmholtz’schen Sinne gemeint ist und den „speziellen qualitativen Charakter“ beschreibt, „der zu jedem sensorischen Feld gehört“ (S. 141).

Solche qualitativen Attribute sind beispielsweise die Helligkeit, Farbe oder bei Oberflächen auch die Textur.

Eines der bekanntesten Beispiele für modale Vervollständigung ist das Kanizsa-Dreieck (Kanizsa, 1979), das mit heller Oberfläche und leuchtender Kontur vor einem ähnlichfarbigen Hintergrund erscheint, obwohl keine entsprechenden physikalischen Grenzen im proximalen Reiz vorhanden sind (Abbildung 2.7a). Die wahrgenommenen Umrisse des Dreiecks werden deshalb als illusionäre oder subjektive Konturen bzw. Scheinkonturen und das wahrgenommene Dreieck selbst als illusionäre oder subjektive Figur bzw. Scheinfigur bezeichnet. Modale Vervollständigung ist jedoch nicht auf Objekte beschränkt. Auch wenn Michotte und Burke (1951) ursprünglich mit dem Begriff der modalen Vervollständigung auf die Vervollständigung von Oberflächen abzielten, werden prinzipiell auch andere Arten von perzeptueller Interpolation, beispielsweise von Bewegung oder Tiefe, als Form von modaler Vervollständigung aufgefasst. In den folgenden Abschnitten sollen die unterschiedlichen Formen von modaler Vervollständigung vorgestellt werden.

2.3.2.1 Vervollständigung von Konturen

Eine Scheinkontur ist definiert als das Perzept einer klaren Grenze in Bereichen des Gesichtsfelds, ohne dass in deren korrespondierenden Regionen im proximalen Reiz ein Luminanzgradient vorhanden ist. Solche Konturen sind üblicherweise von modaler Art, also perzeptuell salient, sie scheinen zur Figur und nicht zum Grund zu gehören, und sie haben eine „reale“ phänomenale Präsenz (Leshner, 1995, S. 280). Selbiges gilt für durch Scheinkonturen selbst wiederum gebildete Scheinfiguren (siehe unten). Scheinkonturen werden üblicherweise durch Kanten oder Linien induziert.

Kanteninduzierte perzeptuelle Vervollständigung. Die Scheinkonturen des Kanizsa-Dreiecks sind ein Beispiel für kanteninduzierte Vervollständigung. Kanteninduzierte Scheinkonturen werden typischerweise durch feste, solide Elemente im proximalen Reiz induziert, die Kanten oder Lücken enthalten, welche lokal konsistent mit einer verdeckenden Figur mit derselben Luminanz wie der Hintergrund sind. Die Scheinkontur ist kollinear zu den induzierenden, verdeckungskonsistenten Kanten (Pessoa et al., 1998, S. 731). Im Kanizsa-Dreieck in Abbildung 2.7a sind die schwarzen „Pacmen“, die als partiell verdeckte Scheiben wahrgenommen werden, die induzierenden Elemente.

Linieninduzierte perzeptuelle Vervollständigung. Linieninduzierte Scheinkonturen können gewissermaßen als Grenzfall der kanteninduzierten Scheinkonturen aufgefasst werden, da die induzierenden Elemente in der Regel sehr dünne Linien sind, die so abgeschnitten sind, dass ihre Endpunkte konsistent mit einer dort kreuzenden Kontur mit ähnlicher Luminanz wie der Hintergrund (Abbildung 2.7b) oder mit einer verdeckenden Figur mit ähnlicher Luminanz wie der Hintergrund sind (c). In diesem Fall liegen die induzierenden Elemente nicht kollinear, sondern schräg oder auch orthogonal zur Scheinkontur. Anders als bei kanteninduzierter Vervollständigung ist die induzierende Strecke bei linieninduzierter Vervollständigung sehr gering (ein „Punkt“, d. h. der Endpunkt jeder induzierenden Linie). Linieninduzierte Scheinfiguren können selbst wiederum als kanteninduzierende Elemente fungieren (vgl. die drei linieninduzierten Scheiben in Tafel d, die das Scheindreieck induzieren).

Das Kriterium der Zuordenbarkeit. Voraussetzung für die Wahrnehmung von Scheinkonturen durch räumliche oder raumzeitliche Interpolation zwischen Kantenpaaren, die voneinander getrennt sind, ist das Kriterium der Zuordenbarkeit (*Relatability*, Kellman & Shipley, 1991, S. 174 ff.). Zuordenbarkeit kann als Formalisierung des „Gestaltgesetzes der guten Fortsetzung“ aufgefasst werden: Zwei Kanten gelten als zuordenbar, wenn ihre glatten, monotonen Fortsetzungen einander kreuzen. Eine Kante, die irgendwo endet, ist einer anderen Kante, die irgendwo endet, also zuordenbar, wenn beide Enden ohne Bruch, ohne Unstetigkeit miteinander verbunden werden können (Stetigkeitskriterium), und wenn die Verbindung kontinuierlich, ohne Richtungsumkehr und ohne Schleifen möglich ist (Monotoniekriterium). Abbildung 2.8 zeigt in jeder Tafel zwei Kantensegmente auf schwarzem Hintergrund. In a–c kreuzen die (linearen) Fortsetzungen der Kantensegmente einander (Stetigkeitskriterium) und bilden Schnittwinkel zwischen 90° und 180° (Monotoniekriterium); sie sind einander zuordenbar und bilden eine Scheinkontur einer durchgehenden Kante. In (d) und (e) ist der Schnittwinkel spitzer (Verletzung des Monotoniekriteriums) und es fällt schwer, eine fortgesetzte Kante wahrzunehmen. In (f) kreuzen die Fortsetzungen der Kantensegmente einander nicht (Verletzung des Stetigkeitskriteriums); eine perzeptuelle Vervollständigung beider Kantensegmente zu einer Kante misslingt.

Einflussfaktoren auf die Stärke von Scheinkonturen. Leshner (1995) nennt zahlreiche Faktoren, die die Stärke von Scheinkonturen beeinflussen können, und unterscheidet diese nach sog. Low- und High-Level-Faktoren. Die Low-Level-Faktoren sind mit konkreten geometrischen Begriffen zu beschreiben, ohne Bezug auf perzeptuelle Abstraktionen wie Vollständigkeit oder Tiefe zu nehmen, und umfassen

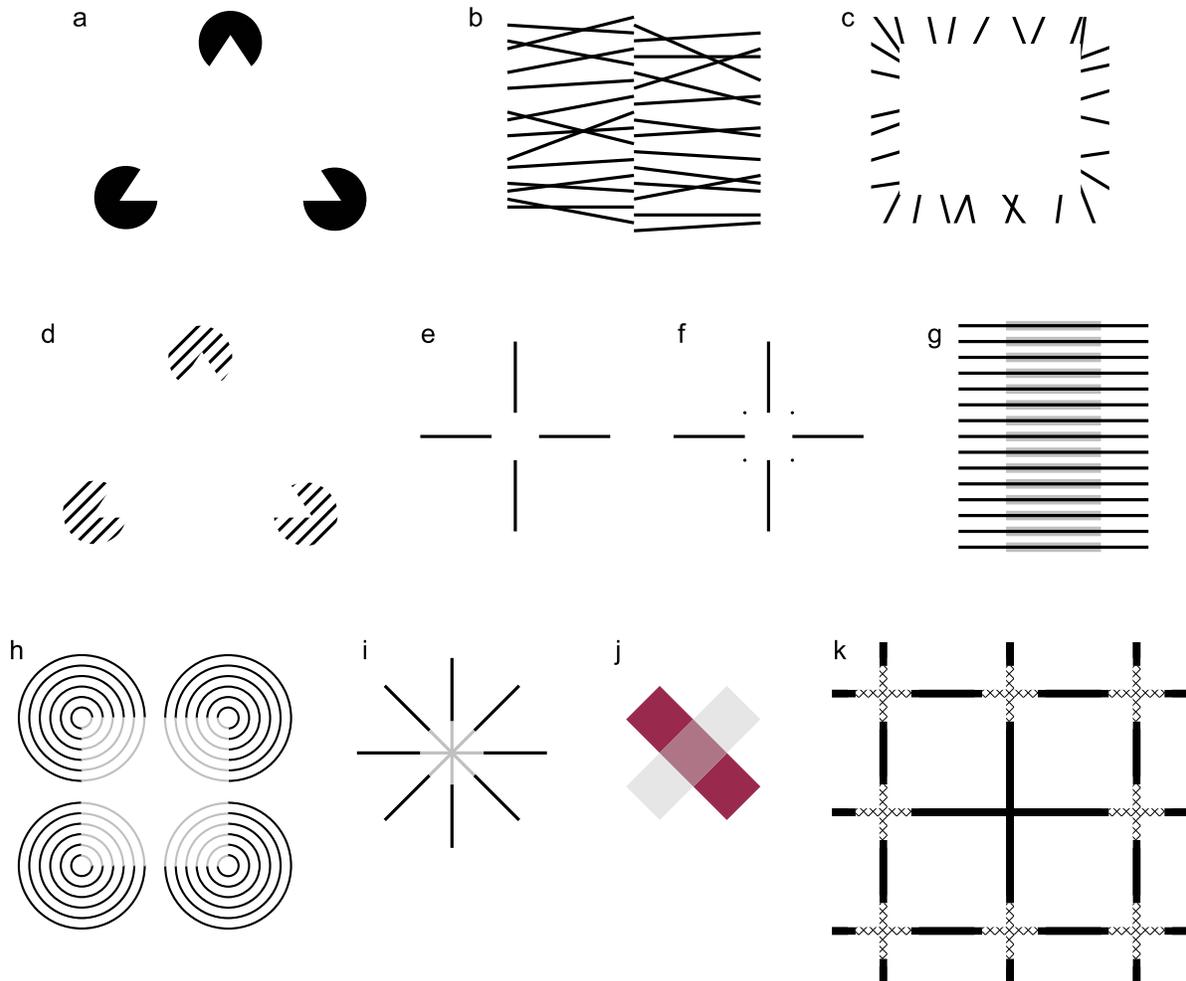


Abbildung 2.7: Formen von perzeptueller Vervollständigung. **a)** Kanizsa-Dreieck mit Scheinkonturen. **b)** Linieninduzierte illusionäre Kante. **c)** Linieninduziertes Scheinquadrat. **d)** Kanizsa-Dreieck, induziert durch linieninduzierte Kanten. **e, f)** Ehrenstein-Kreuz ohne und mit kleinen Anker-elementen. **g)** Flankeninduzierte Ausbreitung von Helligkeit (Farbe) und Bildung von Scheinfiguren. **h, i)** Ausbreitung von Helligkeit (Farbe) und Bildung von perzeptuell transparenten Scheinfiguren. **j)** Perzeptuelle Transparenz. **k)** Ehrenstein-Kreuze mit Textur-Ausbreitung (peripher).

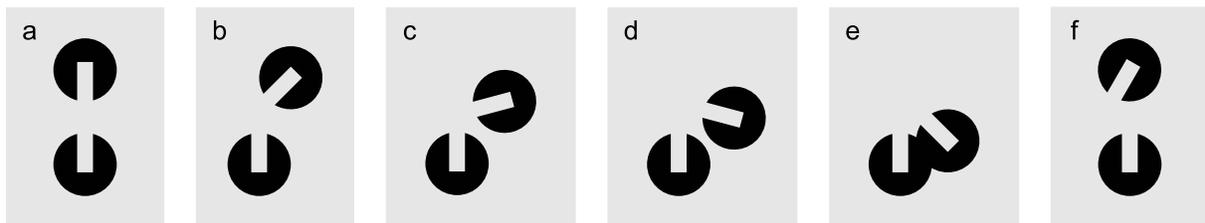


Abbildung 2.8: Variation des Schnittwinkels zwischen induzierenden Kantensegmenten von 180° bis unter 90° (a-e) und Darstellung zweier Kantensegmente, deren (lineare) Fortsetzungen einander nicht schneiden (f). Nur die Kantensegmente in a-c sind jeweils einander zuordenbar (nach Kellman & Shipley, 1991, S. 174 ff.) und bilden eine perzeptuell vervollständigte Kante.

beispielsweise die räumliche Ausdehnung und die räumliche Nähe der induzierenden Elemente, die Anzahl der Elemente, deren Luminanz, Kontrast und Ausrichtung, sowie mögliche kleine Ankerelemente (vgl. Abbildung 2.7e und f). High-Level-Faktoren sind beispielsweise der wahrgenommene Grad der Vollständigkeit der induzierenden Elemente, die wahrgenommene Tiefe der Figur oder der Einfluss von perzeptuellem Zustand, Aufmerksamkeit, Gedächtnis und Wiedererkennung. Die Stärke von Scheinkonturen wird zusätzlich durch Stereo- und Bewegungshinweise beeinflusst (S. 285 ff.).

Verallgemeinerung der Definition von modaler Vervollständigung. Einige Beispiele von Scheinkonturen zeigen, dass die obige erste Definition von modaler Vervollständigung zu eng gefasst ist, da sie Bezug auf die „übrigen Teile der Figur“ nimmt, die beispielsweise bei der linieninduzierten Vervollständigung von Konturen nicht vorhanden sind. Eine umfassendere Definition wäre insofern wünschenswert, als modal vervollständigte Figuren stets durch Scheinkonturen induziert werden. Es erfolgt daher an dieser Stelle der Versuch einer Verallgemeinerung der obigen Definition:

DEFINITION. Modale Vervollständigung von Figuren (2. Fassung, vorläufig). Die visuelle Fortsetzung oder Vervollständigung einer Kontur oder Oberfläche heißt modal, wenn sie phänomenal salient ist, zum Vordergrund gehört und eine „reale“ phänomenale Präsenz hat, d. h. wenn sie sämtliche kontur- bzw. oberflächenspezifischen qualitativen Attribute der entsprechenden perzeptuellen Kategorie spezifiziert.

2.3.2.2 Vervollständigung von Oberflächen

Wie in den oben erwähnten Beispielen schon angedeutet, werden aus Scheinkonturen häufig geschlossene Scheinfiguren mit illusionären Oberflächen gebildet, die mit unterschiedlichen visuellen Attributen wie Helligkeit/Farbe oder Textur ausgestattet sein können. Mindestens drei messbare perzeptuelle Eigenschaften werden laut Leshner (1995) typischerweise mit Scheinfiguren assoziiert, die gemeinsam auftreten können, aber nicht müssen: die wahrgenommene Stärke der Kontur, die wahrgenommene größere Helligkeit (oder Dunkelheit) der Figur im Vergleich zum Hintergrund und die wahrgenommene Tiefe der Figur (S. 283). In den folgenden Abschnitten werden einige Beispiele der modalen Vervollständigung unterschiedlicher visueller Attribute gegeben.

Helligkeit und Farbe. Abbildung 2.7a zeigt nicht nur Scheinkonturen, sondern sogar eine vollständige Scheinfigur in Form eines Dreiecks, das eine phänomenal sichtbare Oberfläche besitzt, die leuchtender erscheint als der physikalisch gleich helle Hintergrund. Ähnliche Perzepte lassen sich in analoger Weise mit farbigen Reizen herstellen. Neben dieser **kanteninduzierten** perzeptuellen Vervollständigung von undurchsichtigen Oberflächen ist es auch möglich, transparent, bisweilen glühend erscheinende Oberflächen durch die **Ausbreitung von Helligkeit/Farbe** zu erzeugen. Es finden sich in der Literatur zahlreiche Beispiele für den Neonfarben- und Wasserfarben-Effekt (siehe z. B. Bressan, Mingolla, Spillmann & Watanabe, 1997, für eine Zusammenfassung und Pinna & Grossberg, 2005, für eine Gegenüberstellung beider Phänomene), für den Craik-O'Brien-Cornsweet-Effekt (siehe z. B. Arend, Buehler & Lockhead, 1971) und für weitere verwandte Phänomene.

Ein Beispiel für die achromatische perzeptuelle Vervollständigung von Oberflächen ist in Abbildung 2.7g dargestellt, in dem die grauen Flanken entlang der schwarzen Linien ein perzeptuelles hellgraues Band induzieren. Tafel h zeigt ein Beispiel, in dem die Ausbreitung der Oberflächenfarbe innerhalb eines linieninduzierten Scheinquadrats erfolgt, das transparent erscheint, und i eine achromatische Version einer Ehrenstein-Figur, in deren Mitte eine transparente graue Scheibe wahrgenommen wird. Wenngleich das visuelle System Störungen wie zum Beispiel Deformationen oder Drehungen in solchen Ehrenstein-Figuren bis zu einem bestimmten Grad toleriert, ist der Effekt am stärksten, wenn die Linien und Segmente ununterbrochen, kollinear und gleich stark sind, und wird umso schwächer, je größer die

Abweichungen von diesen Idealbedingungen sind. Allerdings vermag das visuelle System sogar starke Abweichungen zu tolerieren, wenn durch den Reiz perzeptuelle Transparenz unterstützt wird (Bressan et al., 1997).

Einer von mehreren Vorschlägen zu den visuellen Mechanismen, die der perzeptuellen Vervollständigung von Oberflächen zugrunde liegen könnten, stammt von Pinna und Grossberg und wird als FACADE-Modell bezeichnet. Es sieht zwei komplementäre Prozesse vor, die parallel die Gruppierung von Objektgrenzen und die Vervollständigung von Oberflächen durchführen (siehe Pinna & Grossberg, 2005, S. 2216 ff., für eine detaillierte Beschreibung).

Transparenz. Die Wahrnehmung von Transparenz ist ein weiteres Beispiel für die perzeptuelle Vervollständigung von Oberflächen (Abbildung 2.7j). Perzeptuelle Transparenz erfordert die Dekomposition der Farbe eines jeden Bildpunktes in verschiedene Schichten, die in derselben Blickrichtung als hintereinander liegend repräsentiert werden (Wollschläger, 2006, S. 46), jede mit ihrer eigenen Form, Luminanz und Farbe (Michotte et al., 1991, S. 142; vgl. auch D’Zmura et al., 1997, Faul, 1997, Metelli, 1974). Perzeptuelle Transparenz kommt in natürlichen Szenen sehr häufig vor, beispielsweise bei Dunst oder Nebel; auch Reflexionen auf nassen oder feuchten Oberflächen (oder spiegelnden Materialien) führen zur Wahrnehmung von zwei oder mehr Objekten/Oberflächen am selben Bildpunkt, nämlich von reflektierender Oberfläche und reflektierter Szene (Wollschläger, 2006, S. 46). Voraussetzung für perzeptuelle Transparenz ist in jedem Fall die Erfüllung von figuralen und chromatischen Bedingungen (Metelli, 1974).

Textur. Watanabe und Cavanagh (1991, 1993) untersuchten in mehreren Experimenten, ob illusorische Oberflächen in ähnlicher Weise durch die Ausbreitung von Textur hervorgerufen werden können wie durch die Ausbreitung von Helligkeit/Farbe. Unter anderem verwendeten sie Reize wie in Abbildung 2.7k, die bei Fixation auf die Mitte acht schraffierte Scheinfiguren in Scheibenform mit entsprechenden Scheinkonturen hervorrufen. Anders als bei induzierenden (Neon-)Farben konnte der Effekt jedoch nicht bei fovealem, sondern nur bei peripherem Sehen beobachtet werden und war insgesamt eher schwach. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Toleranz für konfligierende positive Informationen bei perzeptueller Vervollständigung von Oberflächentexturen geringer ist als bei perzeptueller Vervollständigung von Oberflächenfarben und Konturen. Hierfür gibt es auch weitere Hinweise aus Untersuchungen zum Blinden Fleck und zu klinischen Skotomen (vgl. Wollschläger, 2006, S. 45 f.).

Es sei noch darauf hingewiesen, dass Watanabe und Cavanagh (1993) bei Ehrenstein-Figuren ähnlich der in Abbildung 2.7k nicht nur die Ausbreitung der Textur, sondern auch die Ausbreitung von Bewegung beobachteten, wenn die Textur innerhalb der Kreuze bewegt wurde, während die Kreuze selbst stationär blieben. Auch wenn es sich um eine Art Ausbreitung von Bewegung handelt, so ist diese letztlich perzeptuell an die Oberfläche gebunden, so dass das Phänomen als Form von perzeptueller Vervollständigung der Oberfläche aufgefasst werden kann.

2.3.2.3 Vervollständigung von Bewegung

Perzeptuelle Vervollständigung ist nicht auf Konturen und Oberflächen beschränkt, wie das Beispiel der Interpolation von Bewegung zeigt, also die perzeptuelle Vervollständigung oder Konstruktion eines Bewegungspfades. Die wohl bekannteste Form von perzeptueller Vervollständigung von Bewegung ist die sog. Scheinbewegung („Beta-Bewegung“, irrtümlich auch häufig als „Phi-Bewegung“ bezeichnet; vgl. Steinman, Pizlo & Pizlo, 2000), die durch Reizelemente induziert wird, die in aufeinanderfolgenden Einzelbildern an zwei unterschiedlichen räumlichen Positionen dargeboten werden (Abbildung 2.9). Weil solche diskreten Bewegungsreize – ggf. trotz erkennbarer Abweichung von kontinuierlichen Bewegungsreizen – den perzeptuellen Eindruck von Bewegung hervorrufen können, liegt es nahe, anzunehmen, dass Scheinbewegung auf denselben oder ähnlichen visuellen Mechanismen zur Bewegungskennung und

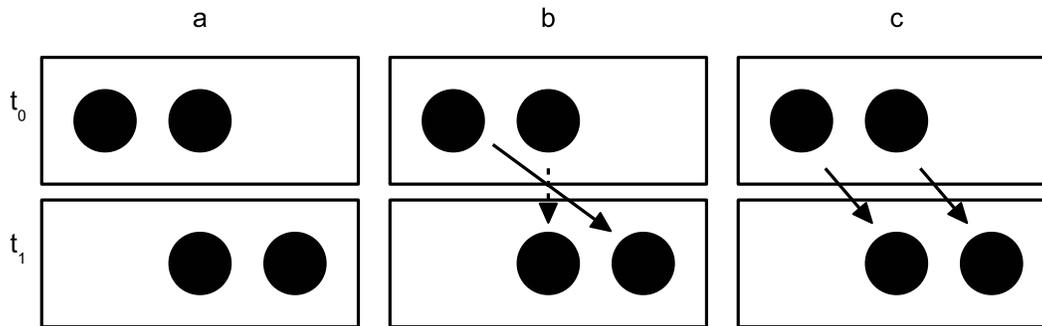


Abbildung 2.9: Scheinbewegung am Beispiel von Ternus-Reizen (Ternus, 1926). **a)** Ein Reiz, bestehend aus zwei Einzelbildern zu den Zeitpunkten t_0 (oben) und t_1 (unten). **b)** Mögliche Wahrnehmung: keine Bewegung der Scheibe in der mittleren Position und Bewegung der linken Scheibe von der linken auf die rechte Position („Elementbewegung“). **c)** Mögliche alternative Wahrnehmung: Bewegung beider Scheiben synchron um eine Position nach rechts („Gruppenbewegung“). Die Art der Bewegungswahrnehmung hängt vom Intervall zwischen der Einblendung zweier aufeinanderfolgender Einzelbilder ab; Elementbewegung dominiert bei Intervallen unterhalb von etwa 50 ms, Gruppenbewegung bei längeren Intervallen.

-verarbeitung basiert wie die Wahrnehmung von „optimaler“ Bewegung, wie sie bei kontinuierlichen Bewegungsreizen auftritt. Für nicht zu schnelle Bewegungsreize (Gepshtein & Kubovy, 2007) wirkt die korrespondierende Scheinbewegung umso ruckartiger, je geringer die räumliche und/oder zeitliche Auflösung der diskreten Bewegungsreize ist (Burr, 1979).

Ein einfacher Bewegungsdetektor ist der Reichardt-Detektor (Reichardt, 1957), der den Output zweier räumlich versetzter Rezeptiver Felder mit kurzem zeitlichen Abstand miteinander vergleicht (korreliert) und auf diese Weise Bewegungssignale anzeigen kann. Es gibt zudem Hinweise auf mindestens zwei Subsysteme, die bei der Analyse von Bewegungsreizen beteiligt sind (Braddick, 1974, 1980): eines für die Detektion von Bewegung über geringe räumliche Distanzen und kurze zeitliche Intervalle und eines für die Verarbeitung von Bewegung über größere räumliche Distanzen und/oder längere zeitliche Intervalle, die zusätzlich interpretative Prozesse voraussetzt – oder wie Rock (1997) es ausdrückt: einen direkten sensorischen Mechanismus und einen kognitiven Prozess für perzeptuelle Problemlösung (S. 225).

Fasst man die Interpolation von Bewegung als eine Art modaler Vervollständigung auf, sind die oben angebotenen Definitionen unzureichend, da sie sich auf konkrete Figuren mit sichtbaren Konturen bzw. Oberflächen beziehen. Eine Verallgemeinerung der Definition, die kompatibel mit dieser Auffassung wäre, könnte etwa wie folgt lauten:

DEFINITION. Modale Vervollständigung. Die visuelle Fortsetzung oder Vervollständigung eines perzeptuellen Aspekts heißt modal, wenn sie phänomenal salient ist, zum Vordergrund gehört und eine „reale“ phänomenale Präsenz hat, d. h. wenn sie sämtliche qualitativen Attribute des entsprechenden Aspekts der perzeptuellen Repräsentation spezifiziert.

So formuliert ist die Definition nicht nur auf konkrete geometrische Figuren anwendbar, sondern auch auf abstraktere perzeptuelle Aspekte wie (Schein-)Bewegung, die u. a. durch das qualitative Attribut der Glattheit charakterisiert ist.

2.3.2.4 Vervollständigung von Tiefe

Auch die wahrgenommene Tiefe unterliegt perzeptueller Vervollständigung. Ein Beispiel findet sich in Abbildung 2.10. Ein homogen schwarz gefärbtes Kreuz (wie in einer der drei oberen Tafeln) enthält keinerlei lokale Hinweise über die Tiefe des Überlappungsbereichs beider Balken in der Mitte. Bei

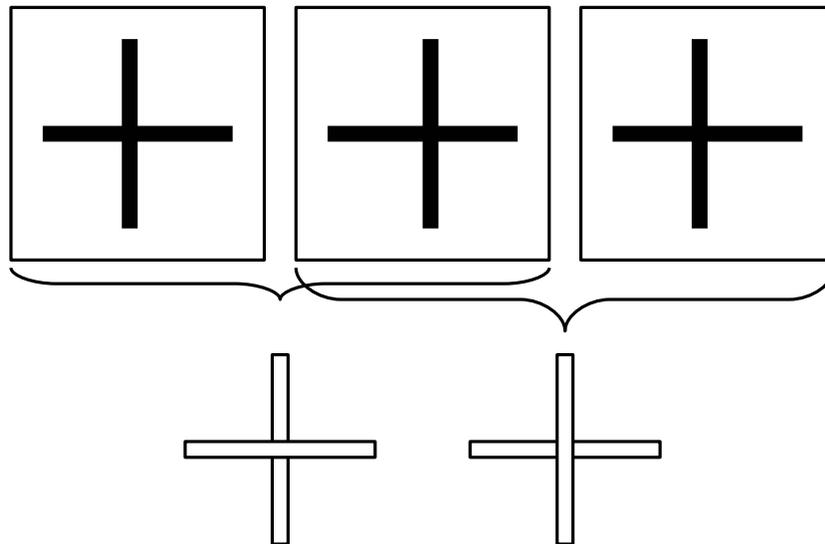


Abbildung 2.10: Perzeptuelle Vervollständigung von Tiefe. Werden die Figuren oben links und oben in der Mitte mit ungekreuzter Disparität fusioniert, erscheint der horizontale Balken vorne. Werden die Figuren oben in der Mitte und oben rechts mit ungekreuzter Disparität fusioniert, erscheint der vertikale Balken vorne. [Adaptiert nach Nakayama und Shimojo (1992, Abbildung 1A, S. 1357).]

Fusionierung je zweier Kreuze (links/Mitte oder Mitte/rechts) ergeben sich allerdings Tiefenhinweise durch Querdisparität, wodurch entweder der horizontale oder der vertikale Balken als näher, d. h. als vorne liegend wahrgenommen wird. Der Überlappungsbereich in der Mitte wird hierbei jeweils dem vorne liegenden Balken zugeschrieben, dessen perzeptuelle Tiefe dadurch für den Überlappungsbereich gewissermaßen übernommen wird (Nakayama & Shimojo, 1992).

2.3.3 Amodale Vervollständigung

Die im vorigen Abschnitt vorgestellten Beispiele haben gemeinsam, dass die perzeptuell vervollständigten Bereiche visuelle Qualitäten (Modi) wie Helligkeit, Farbe oder Textur enthalten, weshalb man von modaler Vervollständigung spricht. Demgegenüber wird, wie bereits erwähnt, die perzeptuelle Vervollständigung ohne visuelle Qualitäten als amodale Vervollständigung bezeichnet. Dieser Ausdruck geht ursprünglich auf Michotte und Burke (1951) zurück und war zur Abgrenzung von perzeptuellen Vervollständigungen, wie sie typischerweise hinter einem Verdeckter erfolgen (Abbildung 2.11a), von Vervollständigungen beispielsweise im Blinden Fleck oder hinter einer transparenten Schicht (Abbildung 2.7j) vorgeschlagen worden. Michotte et al. (1991) charakterisieren amodale Vervollständigung anhand mehrerer Beispiele wie folgt (S. 143 ff.):

- Die Lücke in der Stimulation der unteren (hinteren) Gestalt wird „irgendwie unwirksam“, weil zwei vollständige Gestalten wahrgenommen werden.
- Anders als bei modaler Vervollständigung hinter einem transparenten Filter kommt Transparenz der oberen (vorderen) Gestalt nicht in Frage; statt dessen ist trotz der Wahrnehmung zweier vollständiger Gestalten „ziemlich klar, dass die untere [Gestalt] im Kreuzungsbereich verborgen ist“.
- Der Eindruck der farblichen Fortsetzung hinter der verdeckenden Gestalt ist weniger überzeugend. Eher scheint es, als werde die Oberflächenfarbe „aufgrund der Einheit der Gestalt“ nachrangig als eine globale, „allgemeine Eigenschaft [der Gestalt] etabliert“.¹⁰

¹⁰Als Beweis dafür, dass es sich um eine „globale Eigenschaft des Ganzen und nicht um eine Vervollständigung, beschränkt

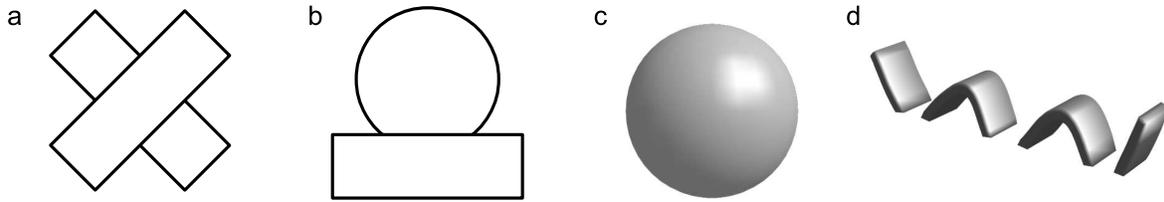


Abbildung 2.11: Beispiele für amodale Vervollständigung. **a)** Ursprungsbeispiel mit zwei Rechtecken nach Michotte und Burke (1951). Anders als perzeptuelle Transparenz (vgl. Abbildung 2.7j) führt perzeptuelle Verdeckung zu amodaler Vervollständigung, d. h. zur Vervollständigung ohne visuelle Qualitäten. **b)** Amodale Vervollständigung bei Verdeckung des Objektrandes. **c)** Selbstverdeckung einer amodal vollständig wahrgenommenen Kugel. **d)** Eine Art Schlange, amodal vervollständigt. [a adaptiert nach Michotte et al., 1991, Abbildung 3.1, S. 143; d adaptiert nach Tse, 1999b, Abbildung 24, S. 65.]

- Im Gegensatz zur Farbe können Form und Ausrichtung der Vervollständigung sogar „so präzise“ sein, dass die Beobachter „diese zu zeichnen imstande sind“.
- Es ist für das Auftreten von amodaler Vervollständigung nicht notwendig, dass eine Gestalt auf beiden Seiten hinter einem Verdeckter hervorrägt, sondern es kann bereits genügen, wenn eine Randseite verdeckt wird (wie zum Beispiel in Abbildung 2.11b).¹¹
- Auch bei dreidimensionalen Körpern tritt amodale Vervollständigung häufig auf, da diese ihre Rückseiten praktisch immer selbst verdecken und dennoch als räumliches Ganzes wahrgenommen werden (wie zum Beispiel in Abbildung 2.11c).
- Generell spielt die Prägnanz der Form für das Auftreten und die Stärke der amodalen Vervollständigung eine wesentliche Rolle.

Obwohl Michotte et al. (1991) mit dem Begriff der amodalen Vervollständigung den phänomenalen Eindruck *wie typischerweise* bei Vervollständigungen hinter einem undurchsichtigen Verdeckter umschrieben (S. 144), hat sich der Begriff in der Literatur als Beschreibung des perzeptuellen Eindrucks *von* verdeckten Objektbereichen durchgesetzt. Letztere Definition fällt jedoch mit ersterer zusammen, weil der phänomenale Eindruck *wie* bei Verdeckung letztlich die Wahrnehmung *von* Verdeckung selbst voraussetzt. Es ist geradezu unmöglich, sich typisch amodale Perzepte ohne Verdeckung überhaupt vorzustellen. Zwar hat die perzeptuelle Präsenz sog. „virtueller Konturen“ (Kanizsa, 1987, S. 41 f.) bzw. virtueller Figuren wie in Abbildung 1.4d (S. 10 in dieser Arbeit), anders als bei modalen Perzepten, laut Kanizsa (1987, S. 44) „nur amodalen Charakter“, doch unterscheidet sich dieser „amodale Charakter“ deutlich vom phänomenalen Eindruck bei amodaler Vervollständigung hinter einem Verdeckter, so dass diese Perzepte nicht unter die Definition von Michotte et al. (1991) fallen (vgl. auch Abschnitt 2.3.4).¹²

Exemplarisch für die Verwendung des Begriffs der amodalen Vervollständigung in der Fachliteratur sei hier die Definition aus der bekannten „Theorie der visuellen Interpolation in der Objektwahrnehmung“ von Kellman und Shipley (1991) zitiert, aus der die übliche Kopplung an Verdeckung explizit hervorgeht (S. 65):

auf den verborgenen Bereich“, handelt, wird eine durch einen Schirm partiell verdeckte Gestalt angeführt, die in den beiden sichtbaren Bereichen unterschiedlich homogen gefärbt ist und zweifarbig erscheint, ohne dass es möglich wäre, zu bestimmen, „an welcher Stelle hinter dem Schirm sich die Farbe ändert“.

¹¹Zur Abgrenzung der Phänomene wird in dieser Arbeit in solchen Fällen allerdings der Begriff der amodalen Fortsetzung oder Ergänzung verwendet (vgl. Abbildungen 2.6c und d auf S. 33).

¹²Anders als illusionäre Konturen/Figuren, die auch als Scheinkonturen/-figuren bezeichnet und modal vervollständigt werden, werden virtuelle Konturen/Figuren nicht modal vervollständigt, obwohl sie unverdeckt erscheinen.

“The perception of the occluded areas of objects was termed by Michotte et al. (1964) ‘amodal completion,’ using ‘amodal’ to refer to the absence of sensory aspects, e.g., brightness or color, in the parts of objects perceived to be behind other objects.”

In ähnlicher Weise charakterisiert Kanizsa (1985) amodale Vervollständigung und betont hierbei die „genuin *perzeptuelle Präsenz*“ trotz des Fehlens „chromatischer Attribute der visuellen Modalität“ (S. 29):

“[T]he continuation behind the covering surface, although it is *amodal*, that is, without the chromatic attributes of the visual modality, can be a genuinely *perceptual presence* [...]”

Positiv formuliert kann amodale Vervollständigung somit 1. als Spezialfall des Prinzips der perzeptuellen Vervollständigung bei wahrgenommener Verdeckung und 2. als Mechanismus zur perzeptuellen Interpolation fehlender sensorischer Informationen aufgrund von wahrgenommener Verdeckung aufgefasst werden. Das Ergebnis einer solchen Interpolation, intern beispielsweise die Repräsentation der Einheit und Form von Objekten über Lücken im Reiz hinweg, ruft einen phänomenalen Eindruck von Vollständigkeit trotz fehlender phänomenaler Qualitäten hervor; diese paradox anmutende Charakterisierung lässt sich im Grunde überhaupt nur greifen, wenn man sich vergegenwärtigt, dass Objektbereiche *als verdeckt* wahrgenommen werden können, und dass sich ein solcher Wahrnehmungseindruck typischerweise signifikant vom Wahrnehmungseindruck einer sichtbaren Oberfläche unterscheidet (vgl. auch Abschnitt 4.4 und die allgemeine Diskussion in Kapitel 5).

Angelehnt an die Definition von modaler Vervollständigung von Figuren lässt sich die amodale Vervollständigung von Figuren nun wie folgt definieren:

DEFINITION. Amodale Vervollständigung von Figuren. Die visuelle Fortsetzung oder Vervollständigung einer Figur hinter einem Verdeckter heißt *amodal*, wenn sie phänomenal bis auf farbliche und texturbezogene Attribute dieselben qualitativen Attribute der visuellen Modalität wie die übrigen Teile der Figur enthält.

In den folgenden Unterabschnitten werden empirische Beobachtungen zu statischer und dynamischer amodaler Vervollständigung vorgestellt; in den anschließenden Unterabschnitten wird ein Überblick über den aktuellen theoretischen Stand der Forschung gegeben.

2.3.3.1 Statische amodale Vervollständigung: Empirische Beobachtungen

Es gibt in der Literatur eine Vielzahl empirischer Befunde zu dieser spezifischen Form von visueller Vervollständigung. Bezogen auf die amodale Vervollständigung von statischen, zweidimensionalen Oberflächen lassen sich einige allgemeine Eigenschaften festhalten (Sekuler & Murray, 2001, S. 287):

1. Amodale Vervollständigung benötigt Zeit (vgl. zitierte Studien in Sekuler & Murray, 2001, S. 268). Die Dauer bis zur Verfügbarkeit einer amodalen Repräsentation ist abhängig vom Kontext und kann von Faktoren wie dem Verdeckungsgrad und (in-)konsistenten stereoskopischen Tiefenhinweisen beeinflusst werden. Die benötigte Zeit zur amodalen Vervollständigung variiert je nach Aufgabe und Kontext und liegt etwa im Bereich von 75 bis 200 ms (R. Murray, Sekuler & Bennett, 2001: Form-Diskrimination, 75 ms; Ringach & Shapley, 1996: Form-Diskrimination, 100 bis 120 ms; Sekuler & Palmer, 1992: Form-ableich nach Priming, 100 bis 200 ms).

2. Die Stärke der amodalen Vervollständigung variiert je nach Kontext. Beispielsweise kann amodale Vervollständigung durch Bewegungshinweise verstärkt werden (R. Murray et al., 2001), ebenso durch T-Kreuzungen (vgl. S. 44) oder stereoskopische Tiefenhinweise (vgl. das Random-Dot-Stereogramm in Nakayama et al., 1989, Abbildung 2, S. 57). Umgekehrt kann *durch* amodale Vervollständigung stereoskopische Tiefe interpoliert werden, selbst wenn keine direkten binokularen Korrespondenzen bestehen (Bacon & Mamassian, 2002).

3. Die wahrgenommene Form hängt vom Kontext ab. Außer der räumlichen Struktur im Reiz können auch frühere perzeptuelle Erfahrungen die Form der Vervollständigung beeinflussen, und je nach Kontext dominieren lokale oder globale Prozesse unterschiedlich stark. Beispiele für einen lokalen räumlichen Einflussfaktor sind Kanten und deren Anordnung zueinander (Zuordenbarkeit; vgl. S. 34 in diesem Kapitel) sowie Konvexität (Liu, Jacobs & Basri, 1999). Globale Modelle berücksichtigen dagegen auch Kontur- und Oberflächeneigenschaften des gesamten zu vervollständigenden Objekts (Sekuler & Murray, 2001, S. 278 ff.).

4. Amodale Vervollständigung kann die Leistung bei perzeptuellen Aufgaben verbessern, zum Beispiel bei visuellen Suchaufgaben (Rensink & Enns, 1998). Amodale Repräsentationen sind also nicht einfach Endprodukte von Wahrnehmungsprozessen, sondern stehen nachgelagerten Prozessen intern zur Weiterverwendung zur Verfügung.

2.3.3.2 Dynamische amodale Vervollständigung I: Der Tunneleffekt

Amodale Vervollständigung ist nicht auf statische Reize, d. h. auf räumliche Lücken, beschränkt. Wird ein Zielreiz beispielsweise kurzzeitig vollständig von einem weiter vorne befindlichen Element verdeckt, so wird die zeitliche Lücke oftmals perzeptuell überbrückt und das Objekt während seiner Verdeckung beständig und amodal vollständig wahrgenommen.

Ein Beispiel für amodale Vervollständigung über räumliche und zeitliche Lücken hinweg ist der sog. Tunneleffekt (Burke, 1952; Wertheimer, 1912), der den Einfluss von Verdeckung auf die Deutung einer dynamischen Szene zeigt und in einem engen Zusammenhang mit den empirischen Untersuchungen zum Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung in dieser Arbeit steht (Kapitel 3). Verschwindet ein mit konstanter Geschwindigkeit bewegtes Element hinter einem verdeckenden Schirm („Tunnel“), und erscheint kurz darauf auf der anderen Seite des Schirms ein ebensolches Element wieder, wird bei geeigneten räumlichen und zeitlichen Parametern (Geschwindigkeit des Elements, Länge des Tunnels, Dauer der Verdeckung, relative Lage des Ein- bzw. Austrittspunkts der Elemente in/aus dem Tunnel) eine kontinuierliche und gleichförmige Bewegung *eines* Objekts nicht nur während der sichtbaren Phasen, sondern auch während der Phase der Verdeckung – dann amodal fortgesetzt – wahrgenommen (Abbildung 2.12). Kann dagegen das plötzliche Verschwinden und Erscheinen zweier solcher Elemente nicht auf Verdeckung zurückgeführt werden, misslingt die perzeptuelle Verknüpfung der Elemente zu einem Objekt und es erfolgt keine amodale Fortsetzung und Bewegungsinterpolation während deren Abwesenheit (Scholl & Pylyshyn, 1999, S. 286).

Der Tunneleffekt zeigt, dass das Prinzip der amodalen Vervollständigung nicht nur bei partieller, sondern auch bei temporär vollständiger Verdeckung Anwendung findet. Darüber hinaus zeigt der Tunneleffekt, dass die Interpolation von Bewegungsreizen auch während der wahrgenommenen „amodalen Phase“ eines Objekts möglich ist, weshalb Burke (1952) vom „Sehen einer verborgenen Bewegung“ (S. 138) spricht, also letztlich von einer Art amodaler Wahrnehmung. Auf eine Verallgemeinerung der Definition amodaler Vervollständigung, die amodale Bewegungsinterpolation einschließt, soll jedoch verzichtet werden (vgl. hierzu Abschnitt 2.3.4 und die Einleitung zu Kapitel 3).

2.3.3.3 Dynamische amodale Vervollständigung II: Der Anorthoskopische Effekt

Ein weiterer Effekt von dynamischer amodaler Vervollständigung ist der Anorthoskopische Effekt, der im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen zum Einfluss von Verdeckung auf die phänomenale Sichtbarkeit steht (Kapitel 4). Wird eine Figur hinter einem verdeckenden Schirm mit einem schmalen stationären Spalt bewegt oder ein verdeckender Schirm mit einem schmalen Spalt vor einer stationären Figur (Abbildung 2.13), so wird die Figur unter gewissen Bedingungen als vollständige Einheit wahrgenommen, obwohl zu jedem einzelnen Zeitpunkt nur ein kleiner Ausschnitt sichtbar ist. Es wird also ein größerer Teil der Figur wahrgenommen, als tatsächlich jeweils im Spalt

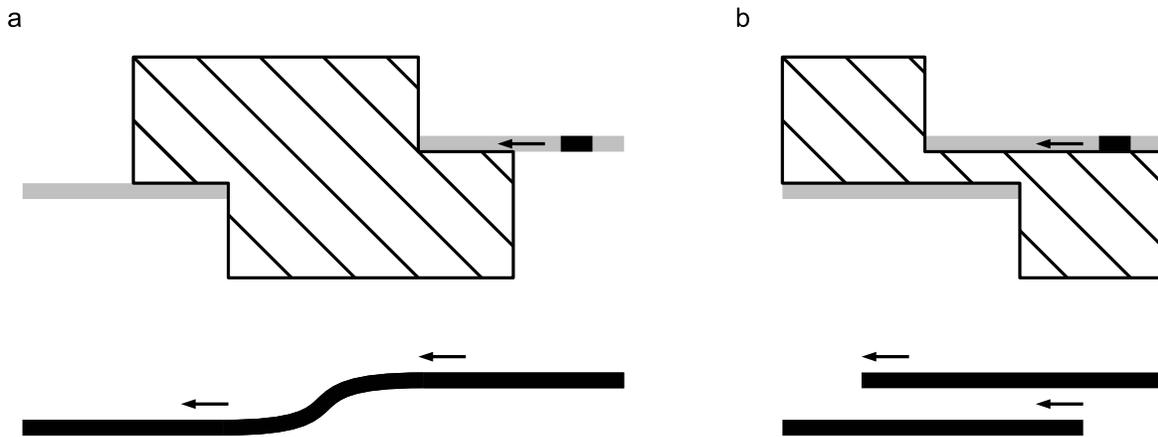


Abbildung 2.12: Der Tunneleffekt. **a)** Verschwindet ein kontinuierlich bewegter Zielreiz hinter einem verdeckenden Schirm („Tunnel“) und erscheint an anderer Stelle wieder (oben), so wird der Bewegungspfad bei geeigneten Parametern kontinuierlich interpoliert, also perzeptuell vervollständigt (unten). Das wahrgenommene Objekt erscheint während der verdeckten Phase beständig amodal vervollständigt. **b)** Bei „ungünstiger“ relativer Lage des Ein- und Austrittspunktes des Zielreizes in/aus dem Tunnel erfolgt keine Bewegungsinterpolation; statt dessen verschwindet ein Objekt hinter dem Schirm und ein zweites erscheint unabhängig davon. [Adaptiert nach Burke (1952, Abbildung 3, S. 135).]

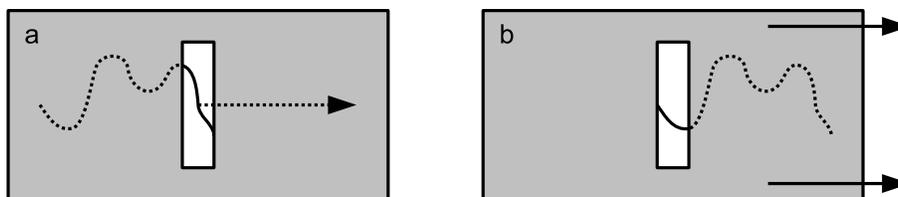


Abbildung 2.13: Der Anorthoskopische Effekt. **a)** Bewegung einer Figur hinter einem Verdeckter mit einem schmalen stationären Spalt („Figurbewegung“, auch *Aperture Viewing* genannt). **b)** Bewegung eines Verdeckers mit einem schmalen Spalt vor einer stationären Figur („Spaltbewegung“). In beiden Fällen wird typischerweise das vollständige Objekt wahrgenommen, wenn auch leicht entlang der Bewegungsachse komprimiert.

physikalisch sichtbar ist, wenn auch – je nach Geschwindigkeit und Spaltbreite – leicht entlang der Bewegungsachse komprimiert (Zöllner, 1862). Dieses Phänomen wird in Anlehnung an das von Plateau (1836, zitiert in Rock, 1983) entwickelte Anorthoskop zur Erzeugung optischer Zerrbilder als Anorthoskopischer Effekt bezeichnet. Zwischen den beiden Paradigmen „Figurbewegung“ (bei stationärem Spalt; auch *Aperture Viewing* genannt nach Hochberg, 1968) und „Spaltbewegung“ (bei stationärer Figur) wird trotz ihrer Ähnlichkeit in der Literatur unterschieden, da im zweiten Fall kein Bewegungsperzept der Figur hervorgerufen wird und sich die Eindrücke somit qualitativ unterscheiden.

Helmholtz (1867) und andere Forscher vermuteten, dass *Retinal Painting* für den Effekt verantwortlich sei. Die Retinal-Painting-Hypothese basiert auf der Annahme, die Einzelbilder würden sukzessive auf unterschiedliche Stellen der Netzhaut „geschrieben“ und dann auf der Netzhaut zu einem Gesamtbild vervollständigt. Im Fall der Spaltbewegung vor einer stationären Figur müsste der Beobachter hierfür die Augen unbewegt lassen, also den Spalt nicht verfolgen, im Fall der Figurbewegung dagegen die Augen möglichst synchron mit der Figur bewegen. Helmholtz spekulierte, dass die für den Effekt nötigen Augenbewegungen unbewusst geschehen und es zu entsprechenden Verzerrungen der Figur (im damaligen Figurbewegungsparadigma) kommt, wenn die Augenbewegung etwas verzögert und/oder zu langsam erfolgt. Unter rein physiologischen Gesichtspunkten wäre die Retinal-Painting-Hypothese prinzipiell möglich; *Retinal Painting* ließe sich physiologisch nämlich dadurch erklären, dass die Photorezeptoren der Netzhaut nach ihrer Aktivierung jeweils erst nach einer kurzen Verzögerung wieder vollständig entla-

den sind (Photorezeptor-Persistenz, vgl. Coltheart, 1980, S. 213 ff.) und deshalb jeweils kurzzeitig mehr auf der Netzhaut abgebildet wäre, als gleichzeitig im distalen Reiz vorhanden ist. Nach den Befunden von Parks (1965) können bei Spaltbreiten von nur 0,04 cm bis zu 2,5 cm breite Figuren wahrgenommen werden. Weil der Anorthoskopische Effekt jedoch auch bei zwei gleichzeitig entgegengesetzt bewegten Figuren und über einen zeitlichen Verlauf von 250 bis 500 ms auftreten kann, sei statt *Retinal Painting* ein postikonischer Speicher (Sperling, 1960) denkbar, in dem die Einzelbilder vervollständigt würden.

Eine Vielzahl von Befunden spricht allerdings gegen eine retinotopie Vervollständigung der einzelnen Bildfragmente (vgl. Morgan, Findlay & Watt, 1982). Aufzeichnungen der Augenbewegungen von Versuchspersonen zeigen, dass diese eher dazu tendieren, den Vordergrund zu verfolgen/fixieren, also bei Bewegung des Spalts die Augen mitzubewegen (Rock & Halper, 1969) und bei Bewegung der Figur den stationären Spalt zu fixieren (Rock, 1981). Außerdem tritt der Anorthoskopische Effekt auch bei retinaler Stabilisation auf (Fendrich, Rieger & Heinze, 2005), d. h. wenn der bewegte Zielreiz stets auf dieselbe retinale Region projiziert wird.

Wodurch aber wird die Integration der Figurfragmente zu einer perzeptuellen Einheit hervorgerufen? Experimente mit linienförmigen Figuren (wie in Abbildung 2.13a) deuten stark darauf hin, dass auch für den Anorthoskopischen Effekt die Wahrnehmung von Verdeckung ein kritischer Faktor ist (Rock & Sigman, 1973). Befinden sich links und rechts vom Spalt nämlich weitere Öffnungen im Schirm, durch die hindurch die erwartete Figur *nicht* sichtbar ist, tritt seltener perzeptuelle Vervollständigung auf als bei einem Schirm mit einem einzigen Spalt, der konsistent mit der Verdeckungsinterpretation ist. Gar keine perzeptuelle Vervollständigung wird wahrgenommen, wenn es starke lokale Indizien gegen die Verdeckungshypothese gibt: Besteht ein kleiner Abstand zwischen dem sichtbaren Ausschnitt der Figur und den Rändern des Spalts, werden auf und ab „tanzende“ Liniensegmente statt einer vollständigen, linienförmigen Figur wahrgenommen. Die im proximalen Reiz aneinandergrenzenden Kanten von Figur und Spalt stützen dagegen die Interpretation, dass Verdeckung vorliegt.

2.3.3.4 Verdeckungshinweise im Reiz: Die Zugehörigkeit von Kanten

Die partielle Versperrung des Blicks auf ein Objekt durch ein weiter vorne liegendes Objekt stellt das visuelle System vor die Herausforderung, dass zusammengehörige Bereiche des hinteren Objekts im proximalen Reiz räumlich oder – wie beim Anorthoskopischen Effekt – zeitlich voneinander getrennt sind und zu einer perzeptuellen Einheit vervollständigt werden müssen. Die Segmentierung einer Szene entlang von Kanten im proximalen Reiz erweist sich hier jedoch als kompliziert, da an der Grenze zwischen verdeckten und unverdeckten Regionen üblicherweise eine „unechte Kante“ entsteht, die nicht die Grenze des hinteren, sondern nur die des vorderen Objekts markiert und deshalb von den tatsächlichen Grenzen des hinteren Objekts unterschieden werden muss.

Shimojo, Silverman und Nakayama (1989) unterscheiden bei solchen Reizen zwischen 1. intrinsischen Kanten eines Objekts, die diesem inhärent sind, dessen Grenzen markieren und deshalb gültige Informationen über dessen Identität und Form enthalten, und 2. extrinsischen Kanten, die „zufällig“ durch die Versperrung durch ein anderes Objekt aus der aktuellen Beobachterposition heraus entstehen und keinen intrinsischen Bezug zum Objekt haben; ihre Position variiert in Abhängigkeit von der relativen Lage von Objekt, Beobachter und anderen Objekten in der dreidimensionalen Szene zueinander (S. 56). Zur Unterscheidung dieser beiden Fälle spricht man daher auch von der „Zugehörigkeit einer Kante“ (*Border Ownership* oder *Border Belongingness*; Nakayama & Shimojo, 1990, S. 912; diese Begriffe gehen zurück auf Koffka, 1935) zu dem einen oder anderen Objekt. Besonders anschaulich wird dies anhand der bekannten Vase von E. Rubin (1958) in Abbildung 2.14. Je nach Deutung der Szene wird die Kante einmal als der Vase und einmal als den Gesichtern zugehörig wahrgenommen.

Verdeckungs-Kreuzungen. Eckige Objektkonturen bilden häufig L-förmige Kreuzungen (*L-Junctions*) im projektiven Bild, durch die das Objekt vom jeweiligen Hintergrund abgesetzt wird (Abbil-

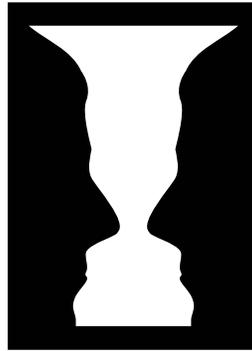


Abbildung 2.14: Weiße Vase auf schwarzem Grund oder zwei schwarze Gesichter auf weißem Grund? Je nach perzeptueller Deutung werden die Kanten als der Vase oder den beiden Gesichtern zugehörig zugeordnet. [Nach E. Rubin (1958).]

dung 2.15a, links eingekreist). Runde Konturen bilden allerdings keine sog. L-Kreuzungen (unten eingekreist), so dass L-Kreuzungen im proximalen Reiz keine notwendige Voraussetzung für Objektkonturen sind. Sie sind auch keine hinreichende Voraussetzung für Objektgrenzen, wie das Beispiel der Dreiecke in b zeigt, wo sich vier L-Kreuzungen zu einer X-Kreuzung mit unterschiedlichen angrenzenden Luminanzen verbinden.

Stärkere Hinweise auf Verdeckung und Tiefe und somit auf die Zugehörigkeit von Kanten bieten hingegen sog. T-Kreuzungen (*T-Junctions*; Abbildung 2.15a, oben in der Mitte eingekreist), wie bereits Helmholtz (1867) erkannte. Weil „generische“ 2D-Projektionen der partiellen Verdeckung eines Objekts durch ein anderes im proximalen Reiz T-Kreuzungen von Kanten bilden, die unter Veränderung des Blickwinkels invariant bleiben, ist es nicht unplausibel anzunehmen, dass das visuelle System diese Informationen nutzt (Kellman & Shipley, 1991, S. 169). T-Kreuzungen sind allerdings weder notwendig noch hinreichend für die Wahrnehmung von Verdeckung: Scheinfiguren wie in c enthalten keine bzw. nur subjektive T-Kreuzungen, und bestimmte Objekte bilden unter generischen Blickwinkeln T-Kreuzungen auch an Stellen, wo keine partielle Verdeckung vorkommt (d). Andererseits treten bei der Durchdringung bzw. Umschließung eines Objekts durch ein anderes an Schnittpunkten in gleicher Tiefenebene nicht unbedingt T-Kreuzungen auf (Tafel e, vgl. auch Tse & Albert, 1998, S. 456 f.), ebensowenig bei etlichen Fällen von Selbstverdeckung (f).

Weil Verdeckungs-Kreuzungen weder notwendige noch hinreichende Informationen über die Zugehörigkeit von Kanten enthalten, stellt sich die Frage, ob und wie diese Zuordnung aus dem Reiz heraus verlässlich möglich ist und wie die Interpolation von Kanten erfolgen kann. Diese Fragen versuchen Kellman und Shipley (1991) im Rahmen ihrer „Theorie zur visuellen Interpolation in der Objektwahrnehmung“ zu beantworten.

2.3.3.5 Kellman und Shipleys Theorie zur visuellen Interpolation und die Identitätshypothese

Kellman und Shipley entwickelten eine „Theorie zur visuellen Interpolation in der Objektwahrnehmung“ (1991), die im wesentlichen aus drei Kerngedanken besteht (S. 141): 1. Die Wahrnehmung von partiell verdeckten Objekten und von Scheinfiguren basiert auf einem gemeinsamen Prozess der perzeptuellen Interpolation von Kanten. 2. Die Gestaltbildung (*Unit Formation*) sowohl aus statischen als auch aus bewegten Informationen kann in einheitlicher Weise erklärt werden und basiert auf einem gemeinsamen oder zwei zumindest sehr nah verwandten Prozessen. 3. Die Mechanismen der Gestaltbildung nutzen grundlegende ökologische Regularitäten aus, insbesondere räumliche und raumzeitliche Unstetigkeiten an den Grenzen von projizierten Regionen im Reiz. Eine zentrale Rolle für diese Theorie spielt das Kriterium der Zuordenbarkeit (vgl. S. 34 in diesem Kapitel), das als wichtiger Faktor für die Verbindung von fragmentierten Bildbereichen und somit für die Vervollständigung von partiell verdeckten Objekten

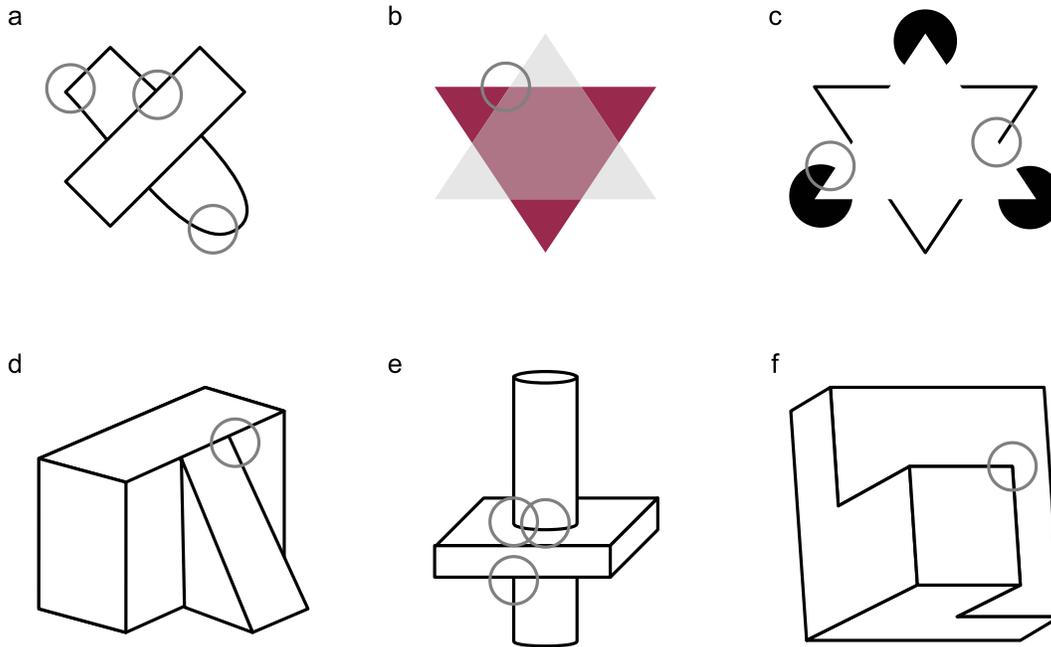


Abbildung 2.15: Verdeckungs-Kreuzungen im proximalen Reiz (grau eingekreist) sind häufig Hinweise auf Verdeckung: L-Kreuzungen können ein Objekt vor dem jeweiligen Hintergrund absetzen, T-Kreuzungen treten häufig bei der 2D-Projektion zweier Objekte auf, von denen eines das andere partiell verdeckt (a). L-Kreuzungen sind weder notwendig (a) noch hinreichend (b), T-Kreuzungen sind ebenfalls weder notwendig (c) noch hinreichend (d). Bei der Durchdringung bzw. Umschließung eines Objekts durch ein anderes treten nicht an allen Schnittpunkten T-Kreuzungen auf (e), auch gibt es Fälle von Selbstverdeckung ohne T-Kreuzungen (f). [d und f adaptiert nach Varley et al. (2005).]

wie auch von Scheinfiguren identifiziert und formalisiert wird.

Aus der Theorie lässt sich die umstrittene „Identitätshypothese“ ableiten, die postuliert, dass die modale und die amodale Vervollständigung von Konturen keine unterschiedlichen perzeptuellen Prozesse sind, sondern die Wahrnehmung von Kanten, für die keine korrespondierenden lokalen Informationen im Reiz enthalten sind, auf einem einzigen Gestaltbildungsprozess beruht, der dieselben modalen wie amodalen Konturen und Gestalten hervorbringt (Shipley & Kellman, 1992). Die unterschiedliche phänomenale Erscheinung von modal und amodal interpolierten Kanten hängt demnach nur von den wahrgenommenen Tiefenverhältnissen zwischen den interpolierten und den übrigen Oberflächen ab, wie eine Klasse von Beispielreizen zeigen soll (vgl. Abbildung 2.16).

Obwohl die Oberflächeneigenschaften keine Rolle bei der Bestimmung der Konturen spielen, spekulieren Kellman und Shipley (1991), dass es einen zum Vervollständigungsprozess von Konturen komplementären Prozess zur Vervollständigung von Oberflächen gibt, der die Bereiche zwischen den gebildeten Konturen verbindet (vgl. Abbildung 2.17a).

Eine weitere Phänomenklasse, die für die Plausibilität der Identitätshypothese spricht, bilden sog. spontane Split-Figuren (Koffka, 1935) wie in Abbildung 2.17b. Die homogene Fläche in der Mitte scheint Konturen zu enthalten, die der einen oder anderen Gestalt zugeordnet werden können – je nachdem, welche von beiden vorne (modal) oder hinten (amodal) wahrgenommen wird. Die Tiefenanordnung und somit der modale und amodale Charakter der Oberflächen in der Mitte ist bei Split-Figuren uneindeutig und kann zu bistabilen Perzepten führen, allerdings gibt es eine Tendenz dazu, kürzer interpolierte Konturen modal und längere amodal wahrzunehmen (Petter, 1956, zitiert in Anderson, Singh & Fleming, 2002, S. 183).

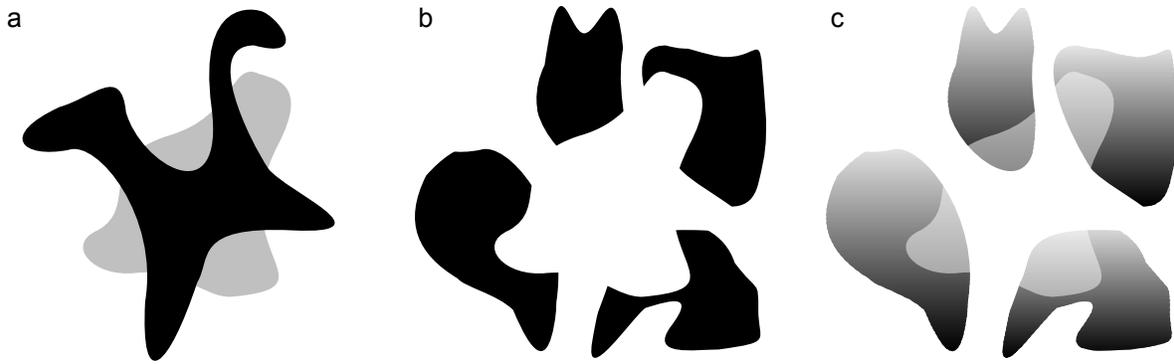


Abbildung 2.16: Äquivalente Darstellung der gleichen Figur als eine partiell verdeckte Gestalt (a), eine Scheinfigur (b) und eine transparente Scheinfigur (c). Die entsprechende Figur befindet sich im zentralen Bereich und enthält stets die gleichen physikalischen Kanten, die zwar durch unterschiedliche Luminanzen bestimmt sind, aber trotzdem in allen drei Fällen ähnlich interpoliert werden. [Adaptiert nach Shipley und Kellman (1992, Abbildung 1, S. 107).]

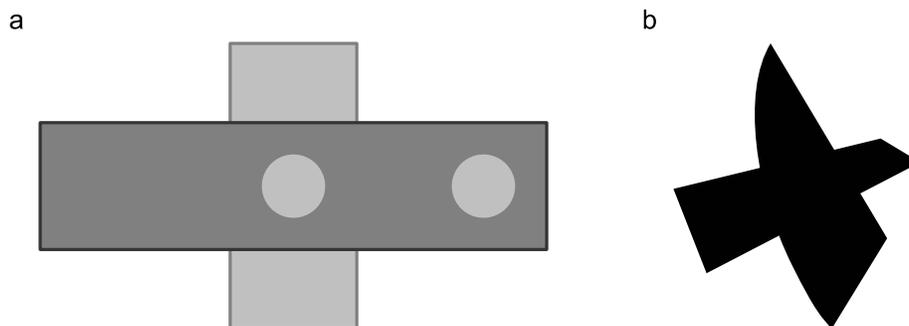


Abbildung 2.17: a) Vervollständigung von Oberflächen. Zwei identische Scheiben erscheinen unterschiedlich – als Loch oder als eigenständige Figur –, nach (Kellman & Shipley, 1991) je nachdem, ob sie innerhalb oder außerhalb der Grenzen liegen, die durch den vorgeschlagenen Gestaltbildungsprozess erzeugt werden. b) Beispiel einer spontanen Split-Figur. [Adaptiert nach Kellman und Shipley (1991, Abbildungen 12 und 49c, S. 161 und 213).]

Einwände gegen die Identitätshypothese. Die Identitätshypothese wird in der Literatur bis heute kontrovers diskutiert. Eine Vielzahl empirischer Beobachtungen deutet inzwischen darauf hin, dass sie in ihrer ursprünglichen Form nicht aufrechterhalten werden kann. In direktem Widerspruch zur Hypothese stehen beispielsweise Befunde von Singh (2004) sowie Anderson et al. (2002), die zeigen, dass je nach Art der Interpolation – modal oder amodal – nicht nur unterschiedliche Tiefen- und Luminanzverhältnisse wahrgenommen werden, sondern auch unterschiedliche Konturen bzw. Gestalten (Abbildung 2.18). Anderson (2007) lehnt die Identitätshypothese und die zugehörige Theorie über die dreidimensionalen Objektinterpolation aber nicht nur aus empirischen, sondern auch aus logischen Gründen ab. Keines der Phänomene, für deren Erklärung Kellman, Garrigan und Shipley (2005) argumentieren, die (Kanten-)Interpolation müsse der modalen oder amodalen Erscheinung einer Kontur oder Oberfläche vorausgehen, erfordere tatsächlich diese Reihenfolge; es sei daher nicht logisch zwingend, aus diesen Phänomenen Plausibilität für die Identitätshypothese abzuleiten (Anderson, 2007, S. 475 ff.).

Darüber hinaus gibt es Hinweise, dass unterschiedliche neuronale Mechanismen für modale und amodale Vervollständigung verantwortlich sind. Untersuchungen mit Split-Brain-Patienten deuten darauf hin, dass beide Hirnhemisphären gleichermaßen die Wahrnehmung von modalen Scheinkonturen unterstützen, amodale Vervollständigung jedoch überwiegend in der rechten Gehirnhälfte erfolgt. Corballis,

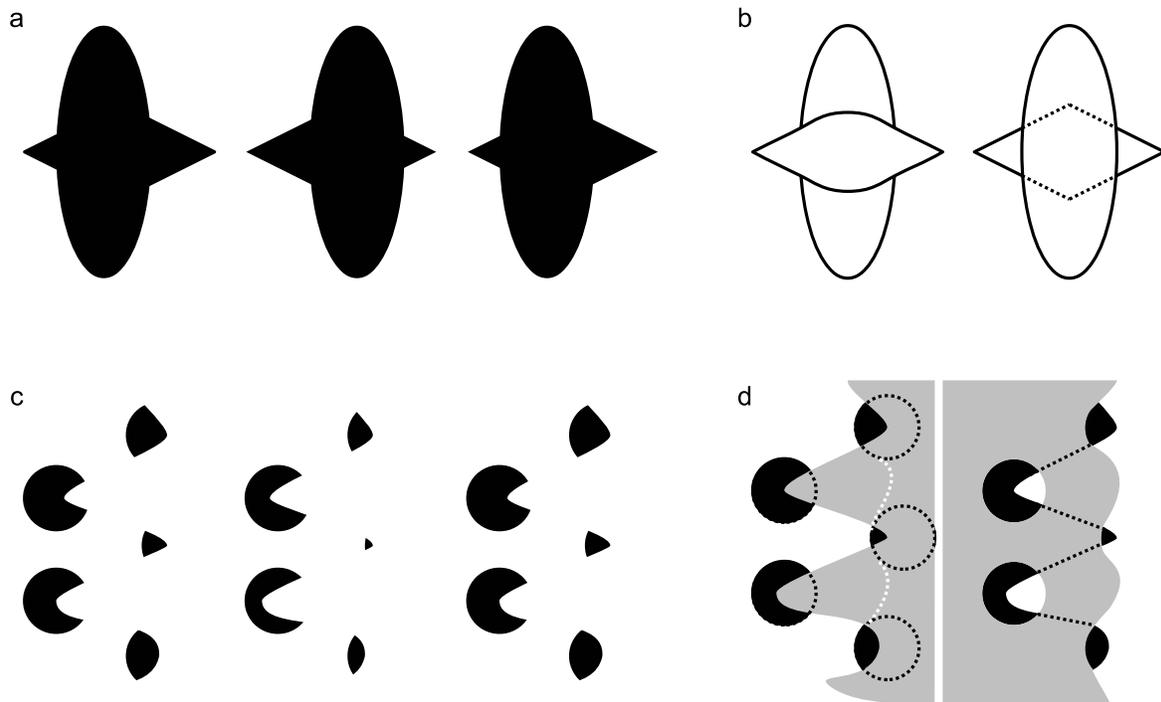


Abbildung 2.18: Unterschiedliche Konturen bzw. Gestalten je nach Art der perzeptuellen Vervollständigung. **a)** Bei Fusionierung der spontanen Split-Figuren mit ungekreuzter Disparität schwebt im linken Bild eine modal vervollständigte Raute vor einer Ellipse und im rechten Bild eine Ellipse vor einer amodal vervollständigter Raute. **b)** Perzept (schematisch): Die Kanten der modal vervollständigter Raute in a wirken weniger spitz als die der amodal vervollständigter Raute. **c)** Bei Fusionierung der Reize mit ungekreuzter Disparität werden im linken Bild andere schwarze und weiße Formen/Gestalten wahrgenommen als im rechten Bild. **d)** Perzept (schematisch): Im linken Bild des fusionierten Reizes in c werden hinter einer weißen Zickzack-Ebene typischerweise amodal vervollständigter entweder fünf schwarze Scheiben oder zwei schwarze Scheiben und eine schwarze Fläche (weiß gepunktet) wahrgenommen. Im rechten Bild des fusionierten Reizes in c wird dagegen eine weiße Schicht mit Löchern wahrgenommen, die typischerweise eine amodal vervollständigter schwarze Zickzack-Ebene partiell verdeckt. [a und b adaptiert nach Singh (2004, Abbildung 2, S. 457), c und d adaptiert nach Anderson et al. (2002, Abbildungen 19 und 20, S. 184 und 185).]

Fendrich, Shapley und Gazzaniga (1999) spekulieren, dass modale Vervollständigung durch frühe visuelle Prozesse hervorgerufen wird (vgl. auch Nieder, 2002), während amodale Vervollständigung einen höherstufigen Prozess widerspiegeln könnte. M. Murray, Foxe, Javitt und Foxe (2004) führen dagegen neurophysiologische Befunde an, die darauf hindeuten, dass beiden Arten von Vervollständigungen in den ersten 140 bis 238 ms ein gemeinsamer initialer Mechanismus zugrunde liegt, ehe ab etwa 240 ms signifikante Unterschiede in der neuronalen Aktivität auftreten.

Gegen die Identitätshypothese sprechen auch Befunde aus der Säuglingsforschung, die nahelegen, dass sich modale Vervollständigung nach etwa drei bis vier Monaten entwickelt, amodale Vervollständigung dagegen erst nach fünf bis sechs Monaten (Otsuka, Kanazawa & Yamaguchi, 2006). Weitere Argumente gegen die Identitätshypothese liefern unter anderem Palmer und Rock (1994) sowie Sekuler, Palmer und Flynn (1994), die die lokale Natur des Kriteriums der Zuordenbarkeit von Kanten als kritisch erachten.

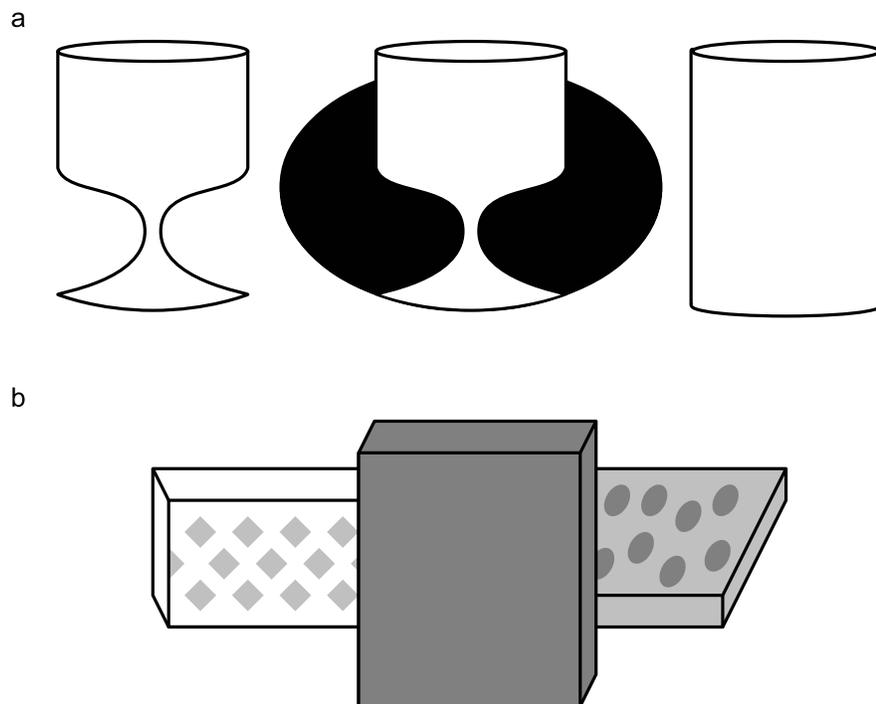


Abbildung 2.19: Die Zuordenbarkeit von Kanten ist weder notwendig noch hinreichend für amodale Vervollständigung. **a)** Uneindeutiges Perzept des mittleren Bildes je nach 2D- oder 3D-Interpretation des schwarzen Bereichs, wodurch die Wahrnehmung des weißen Objekts bestimmt wird: Im Falle der 2D-Interpretation wird ein weißes Gefäß (links) vor schwarzem Hintergrund wahrgenommen. Im Falle der 3D-Interpretation erfolgt die Vervollständigung einer umschließenden schwarzen „Schlange“ hinter einem Zylinder (rechts), ohne dass das Kriterium der Zuordenbarkeit erfüllt ist. **b)** Keine amodale Vervollständigung trotz Erfüllung des Kriteriums der Zuordenbarkeit. [a adaptiert nach Tse (1998, Abbildung 22, S. 989), b adaptiert nach Tse (1999b, Abbildung 3a, S. 43).]

2.3.3.6 Vervollständigung von Körpern statt Zuordenbarkeit von Kanten?

Die Zuordenbarkeit von Kanten und Oberflächen – wesentlicher Bestandteil der Theorie von Kellman und Shipley (1991) und der daraus abgeleiteten Identitätshypothese – ist laut Tse (1999b) weder notwendig noch hinreichend für die Vervollständigung von Objekten (vgl. Beispiele in Abbildung 2.19). Statt dessen würden vorläufige (*intermediate*) Repräsentationen von dreidimensionalen Körpern (*Volumes*) gebildet, die mittels Interpolation zu größeren Körpern vervollständigt würden (*Volume Completion*), ohne dass hierfür zuordenbare Kanten nötig wären. Es gebe mehrere Faktoren, von denen keiner allein notwendig für das Auftreten von amodaler Vervollständigung sei, die aber allesamt zur wahrgenommenen Stärke von amodaler Vervollständigung beitragen könnten, beispielsweise die Ähnlichkeit von Mustern oder Substanzen, die Nähe und die „vollständige Verschmelzungsfähigkeit“ (*Complete Mergeability*) von Körpern im Raum¹³ (vgl. Tse, 1999a, S. 52–54). Laut Tse (1999a) ist die Verschmelzungsfähigkeit – anders als die Zuordenbarkeit von Kanten – nicht im Bild direkt messbar, weil sie eine Beziehung zwischen Körpern und deren Oberflächen beschreibt, welche nicht direkt im Bild vorkommen, sondern erst auf Basis von Hinweisen im Reiz gebildet werden müssen (S. 170).

Kanten bieten demnach keine direkten Hinweise auf Verdeckung, sondern enthalten Hinweise für die Bildung von Körpern; die Zugehörigkeit von Kanten sei deshalb keinesfalls ein reizbasierter Hinweis für amodale Vervollständigung, sondern selbst erst spezifiziert, sobald Verdeckungsbeziehungen

¹³ „Verschmelzungsfähigkeit“ bedeutet, dass der Innenraum eines nicht-abgeschlossenen (*unbounded*) Körpers mit dem Innenraum eines anderen nicht-abgeschlossenen Körpers verbunden werden kann, so dass ein größerer, nicht-abgeschlossener oder abgeschlossener Körper entsteht (wie in Abbildung 2.15e auf S. 46).

zwischen Körpern bestimmt seien (Tse, 1999b, S. 54). Dies verdeutlicht auch die Abbildung 2.19a einer dreidimensionalen Version von Rubins Vase (E. Rubin, 1958), in der Vorder- und Hintergrund auf bistabile Weise wechseln: Jeder Wechsel in der Zuordnung von Figur und Grund führt nicht nur zu einer veränderten Verdeckungsbeziehung zwischen den Objekten, sondern auch zu unterschiedlichen Kantenzugehörigkeiten sowie darüber hinaus zu unterschiedlichen Objektformen und Tiefenverhältnissen. Weil diese verschiedenen Perzepte durch denselben Reiz ausgelöst werden, kann die Wahrnehmung von Verdeckung nicht allein auf Basis des Reizes, losgelöst von Aufmerksamkeits- oder kognitiven Einflüssen, hervorgerufen werden.

Tses (1999a, 1999b) Einwand, dass die Zuordenbarkeit von Kanten als Erklärung für die Interpolation weder notwendig noch hinreichend sei und diese statt dessen auf der Ebene von repräsentierten dreidimensionalen Körpern erfolge, begegnen Kellman, Guttman und Wickens (2001) mit dem Hinweis auf einen Vervollständigungsprozess von Oberflächen, der Teil der ursprünglichen Theorie (Kellman & Shipley, 1991) ist und ergänzend zum Kriterium der Zuordenbarkeit von Kanten zum Einsatz kommt. Dieser werde nicht nur durch eigene Befunde empirisch gestützt, sondern könne auch nahezu alle experimentellen Befunde von Tse richtig vorhersagen (S. 204). Obwohl Tses Vorstellung der vorläufigen Repräsentation von Körpern, die die perzeptuelle Interpolation beeinflusse, „faszinierend“ sei, sei es schwierig, eine mögliche Vervollständigung von Körpern auf Basis von Daten zu bewerten, die durch einen etablierten Vervollständigungsprozess für Oberflächen ebenfalls vorhergesagt würden, von dem bekannt sei, dass er auch in Situationen funktioniere, in denen die Wahrnehmung von Körpern nicht in Frage komme. Bislang gebe es jedenfalls keine objektiven Hinweise auf diese vorläufige Repräsentation von Körpern bzw. auf einen Prozess, der auf Basis solcher Repräsentationen operiere (Kellman et al., 2005, S. 587).

Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf der gängigen Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung und den damit verbundenen Problemen liegt, soll dieser kurze Überblick über bekannte Theorien der amodalen (und modalen) Vervollständigung von Oberflächen und Körpern an dieser Stelle genügen. Der interessierte Leser sei auf die zitierten Quellen, insbesondere auf die Abhandlung von Wollschläger (2006, Kapitel 3), verwiesen.

2.3.4 Kritik an der Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung

Es gibt keinen Zweifel an dem klaren phänomenalen Unterschied zwischen direkt sichtbaren und verdeckten Bereichen einer Oberfläche oder eines Objekts, jedoch ist die unmittelbar daran geknüpfte traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung unter empirischen und theoretischen Gesichtspunkten problematisch – und zwar unabhängig davon, welche der oben angebotenen Definitionen zugrunde gelegt wird. Ein Grund dafür liegt in der impliziten Annahme, auf der fast jede Definition von modaler bzw. amodaler Vervollständigung basiert, und zwar dass visuelle Qualitäten genau dann wahrgenommen werden, wenn keine Verdeckung wahrgenommen wird. Während modale Vervollständigung nämlich über das Vorhandensein visueller – oder farblicher – Qualitäten in den vervollständigten Bereichen definiert ist, wird amodale Vervollständigung über das Fehlen dieser Qualitäten (wie) bei wahrgenommener Verdeckung definiert (vgl. S. 40). So wären beide Begriffe nur dann frei von Überschneidungen und vollständig komplementär zueinander, wenn 1. visuelle Qualitäten niemals bei Verdeckung wahrgenommen würden, und wenn 2. bei freier Sicht stets visuelle Qualitäten wahrgenommen würden. Dass dies nicht immer der Fall ist, wird in den folgenden Unterabschnitten angedeutet und in der Diskussion aufgegriffen.

Im nächsten Unterabschnitt werden zunächst einige phänomenologische Beobachtungen und empirische Befunde vorgestellt, die demonstrieren, dass es Vervollständigungen gibt, die sich nicht eindeutig als modal oder amodal klassifizieren lassen. In den darauffolgenden beiden Unterabschnitten werden zwei theoretische Probleme aufgezeigt: zum einen die Beschränkung auf die qualitativen Attribute Helligkeit und Farbe als kritisches Unterscheidungsmerkmal zwischen modaler und amodaler Vervollständigung

von Figuren, zum anderen die gängige Annahme der Kopplung von modaler Vervollständigung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit und von amodaler Vervollständigung an geometrisch-optische Unsichtbarkeit aufgrund von Verdeckung.

2.3.4.1 Phänomenologische Beobachtungen und empirische Befunde

Einige phänomenologische Beobachtungen und empirische Befunde deuten – losgelöst von theoretischen Aspekten – auf die genannte Problematik in der Definition bzw. Verwendung der Begriffe „modale Vervollständigung“ und „amodale Vervollständigung“ hin.

Betrachtet man das Kanizsa-Dreieck in Abbildung 1.4a (S. 10), so weist dieses typische Merkmale einer modalen Vervollständigung auf, nämlich klare perzeptuelle Konturen ohne korrespondierende physikalische Kanten und eine im Vergleich zum physikalisch identischen Hintergrund hell leuchtende Oberfläche. In b hingegen wird die Kontur und Oberfläche nach oben hin vage und diffus; der Übergang zwischen modaler Vervollständigung (im unteren Bereich) und einer anderen – aber keineswegs typisch amodalen – perzeptuellen Qualität (im oberen Bereich) ist fließend. Wieder anders stellt sich die Situation in c dar, obwohl im Vergleich zu a lediglich die drei Scheibensegmente, nicht jedoch die „induzierenden Kanten“ entfernt wurden. Es wird abermals ein aufrecht stehendes Dreieck wahrgenommen, diesmal allerdings nur durch drei spitze Winkel angedeutet. Häufig hat man den Eindruck, eine nicht näher definierte Scheinfigur (eine Art weiteres Dreieck, das auf der Spitze steht?), deren drei Hauptkonturen senkrecht zu den drei schwarzen Winkeln verlaufen, verdecke das aufrecht stehende Dreieck. Der in diesem Fall hell leuchtende Innenteil gehört dann zur vorne liegenden Scheinfigur; die Konturen und die Oberfläche des hinten liegenden Dreiecks wirken amodal.

So gut sich die Eindrücke der Reize in a und c als Ergebnis von modaler bzw. amodaler Vervollständigung in die traditionelle Dichotomie einfügen, so schwierig gestaltet sich die Einordnung des Perzepts, das durch den Reiz in d – kaum verschieden vom Reiz in c – hervorgerufen wird. Die drei Punkte können aufgrund ihrer Anordnung als Eckpunkte eines Dreiecks gedeutet werden, das perzeptuell vervollständigt wird. Diese genuin visuelle Vervollständigung ist allerdings weder von typisch modaler noch von typisch amodaler Natur: Ohne die kanteninduzierenden Winkelspitzen wie in c entstehen offensichtlich keine Scheinkonturen einer verdeckenden (Schein-)Figur, so dass das Dreieck unverdeckt erscheint und keinen typisch amodalen Eindruck erzeugt. Jedoch enthalten weder dessen „imaginäre“ Konturen noch dessen Oberfläche visuelle Qualitäten wie Helligkeit oder Farbe, so dass auch kein modaler Eindruck entsteht. Obwohl keine perzeptuelle (!) Grenze zwischen Figur und Grund entsteht, wird unmittelbar eine visuelle Figur wahrgenommen, wenn auch weniger salient als bei typisch modaler oder typisch amodaler Vervollständigung.

Das visuelle Perzept einer solch physikalisch minimalistisch angedeuteten, „virtuellen“ Figur wie in d lässt sich prinzipiell nicht in das gängige dichotome Raster aus modaler und amodaler Vervollständigung zwängen. Die modale Vervollständigung einer Figur erzeugt im strengen Sinne (Definition, 1. Fassung, S. 33) ein Perzept, in dem die ergänzten Teile einer Figur dieselben visuellen Attribute wie die „übrigen Teile“ enthalten. In Figuren wie in d sind allerdings weder Konturen noch eine Oberfläche der „übrigen Gestalt“ erkennbar; es fehlt anscheinend an einem geeigneten „Anker“ für modale Vervollständigung. Das Perzept erfüllt aber ebensowenig die allgemeineren Definitionen (S. 36 und 38): Die figurale Vervollständigung ist weder phänomenal salient, noch besitzt sie eine „reale“ phänomenale Präsenz; vor allem aber enthält sie eigentlich kaum oder keine kontur- bzw. oberflächenspezifischen qualitativen Attribute der visuellen Modalität wie beispielsweise Helligkeit, Farbe oder Textur. Amodale Vervollständigung dagegen erfordert per Definition perzeptuelle Verdeckung, die durch solche Reize nicht hervorgerufen wird. Anders als bei amodal vervollständigten Figuren wirken die Konturen hier eher diffus, und auch die Oberfläche, wenn überhaupt eine wahrgenommen wird, macht keinen typisch amodalen Eindruck.

Weitere Fragen werfen sog. quasimodale Vervollständigungen auf: Reize wie in e und f erzeugen ein

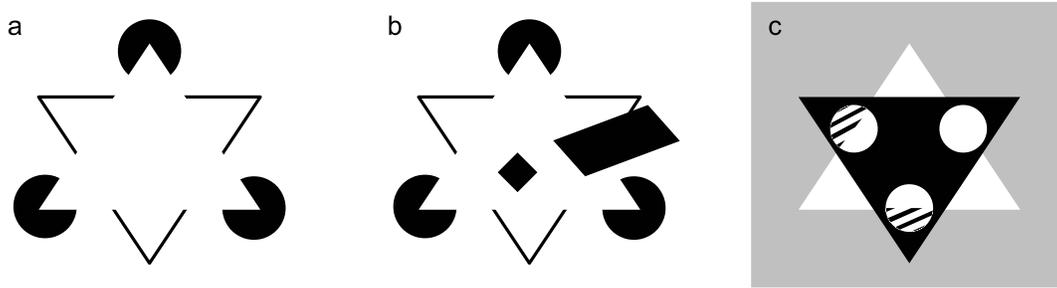


Abbildung 2.20: Interaktion von modaler und amodaler Vervollständigung. **a)** Kanizsa-Dreieck (eine Scheinfigur), modal vervollständigt. **b)** Kanizsa-Dreieck, modal vervollständigt, jedoch selbst wiederum teilweise von einem schrägen Element verdeckt und in diesem Bereich amodal vervollständigt. Man beachte die strukturelle Ähnlichkeit zu den quasimodalen Reizen in den Abbildungen 1.4e und f (S. 10) und die Verringerung der Strahlkraft der partiell verdeckten Scheinkontur in unmittelbarer Umgebung des verdeckten Bereichs. Die kleine Raute innerhalb der illusionären Oberfläche wird wie bei „realen“ Oberflächen entweder als Muster/Eigenschaft der Oberfläche oder als verdeckendes Element im Vordergrund wahrgenommen. **c)** Weißes Dreieck, amodal ergänzt. In der linken und unteren runden Öffnung des Verdeckers erfolgt eine modale Überbrückung der sonst amodalen Kontur durch induzierende Kanten. Ohne diese induzierenden Kanten (rechts) bleibt die Kontur dagegen amodal und es wird eine weiße Scheibe auf der Oberfläche des Verdeckers oder vor dem Verdeckter wahrgenommen.

Perzept, in dem die Konturen teilweise modal und teilweise amodal vervollständigt erscheinen (Kellman et al., 1998). Es erfolgt also eine Interpolation zwischen unterschiedlichen phänomenalen Ausprägungen von perzeptueller Vervollständigung. Dies ist insofern bemerkenswert, als der Reiz weder die Voraussetzungen für die modale noch für die amodale Vervollständigung von Kanten bietet: Modale Scheinkonturen werden üblicherweise zwischen je zwei kanteninduzierenden Elementen etabliert, amodale Konturen zwischen je zwei sichtbaren induzierenden Elementen an den (meist gegenüberliegenden) Rändern eines Verdeckers. Kellman et al. (1998) betrachten den empirischen Befund, dass eine Interpolation zwischen je einem induzierenden Element für Scheinkonturen und einem induzierenden Element für verdeckte Konturen erfolgt (Experimente 1–3, S. 861–866), als Indiz für die Korrektheit ihrer Identitätshypothese, also für die Existenz eines gemeinsamen Prozesses für modale und amodale Vervollständigung, der beide Arten von induzierenden Elementen im Reiz als Input akzeptiert. Daher seien die vervollständigten Grenzen und Figuren „weder streng modal noch amodal“; sie seien „beides, oder keines von beiden, oder vielleicht *quasimodal*“ (S. 861 f.). Ein ähnlicher Eindruck wird auch in den Abbildungen 2.20b und c erzeugt.

Die bisherigen Beispiele stehen im Konflikt mit der Definition der modalen und amodalen Vervollständigung von Figuren, die sich auf die visuellen Qualitäten von Konturen und Oberflächen bezieht. Doch auch die allgemeinere Definition des Begriffs der modalen Vervollständigung (S. 38), die beliebige Interpolationsprozesse umfasst, beispielsweise für Bewegung oder Tiefe, ist nicht frei von Widersprüchen. Dies zeigt recht anschaulich der Tunneleffekt (S. 42). Obwohl die Interpolation des Bewegungspfad während der „amodalen Phase“ erfolgt, ist anscheinend der Bewegungseindruck selbst, losgelöst vom bewegten Trägerobjekt, trotz Verdeckung eher modaler Natur, wie in Wertheimer (1912) auf Basis von Versuchspersonenaussagen angedeutet wird (S. 224 f.):

„Einigemal drückten sich Vpn. zuerst so aus: ‚ich *sehe* doch die Bewegung hinüber! Auch da, wo der Träger¹⁴ steht – aber der braune Träger ist ganz ruhig, klar da: es geht kein Streifen¹⁵ drüber weg, es sieht zuerst so aus, als ob ich sähe, die Bewegung ginge durch ein Tunnel?‘ Dann aber: ‚der exakte Tatbestand ist so: das Hinüber, die eindringliche Bewegung von *a* nach *b* ist klar und deutlich, kräftig da und völlig kontinuierlich, dabei geht dort nichts

¹⁴gemeint ist der Verdeckter, Anm. des Autors

¹⁵gemeint ist das bewegte Objekt, Anm. des Autors

von weißem hinüber und es geht nicht der Streifen hinüber.' Und ebenso: ‚auch links und rechts vom Träger bleibt der Grund völlig klar, es wischt nichts drüber weg‘, ‚weiß sehe ich bloß im Streifen der Anfangsstellung und im Streifen der Endlage des Hin und Her, dazwischen ist nur dieses merkwürdige Hinüber gegeben in dem Raum zwischen *a* und *b*.‘
 ‚Aber es ist gar kein Hinüber des Streifens da! Nur das Hinüber, eine starke Bewegung selbst – – !‘“

Ganz im Sinne der Definition modaler Vervollständigung ist die Bewegung also phänomenal salient und hat eine „reale“ phänomenale Präsenz, d. h., sie enthält sämtliche qualitativen Attribute der visuellen Modalität, die kontinuierliche Bewegung für gewöhnlich auch aufweist, wie beispielsweise die Klarheit des Bewegungspfades und die Glattheit der Bewegung selbst. Die Bewegung gehört aber nicht zum Vordergrund, sondern im Gegenteil zum Hintergrund, so dass die Definition der modalen Vervollständigung verletzt wird.

Zusammengefasst zeigen einige Beobachtungen und empirische Befunde im Zusammenhang mit fragmentierten statischen wie dynamischen Reizen, dass die strikte Zuordnung eines perzeptuellen Eindrucks, der durch eine Art visueller Interpolation hervorgerufen wird, gemäß den gängigen Definitionen von „modal“ und „amodal“ nicht immer eindeutig möglich ist.

2.3.4.2 Der willkürliche Fokus auf die visuellen Qualitäten Helligkeit und Farbe

Die ursprüngliche Unterscheidung zwischen modaler und amodaler Vervollständigung basiert auf der perzeptuellen Gegenwart bzw. Abwesenheit der Helligkeit und Farbe von Konturen und Oberflächen, wie sie typischerweise bei direkter Sichtbarkeit bzw. bei Verdeckung beobachtet werden kann. Dies geht aus der Definition (bzw. Charakterisierung) von amodaler Vervollständigung durch Michotte et al. (1991) hervor (S. 144):

“[C]ompletions that are ‘present’ in this manner¹⁶ should be termed ‘amodal’ to distinguish them from the previous kind¹⁷. Thus the term amodal has initially a purely negative significance, since it indicated the absence of visual qualities (luminance and color) from the completion of the figure. On the other hand, it should be stressed that the impression of the whole shape and the unbroken character of its contour is entirely compelling for the subjects. [...] In the case of continuity of color there is not so compelling an impression.”

Dieses spezifische Attribut der Helligkeit/Farbe (bzw. Textur) als Unterscheidungsmerkmal zieht sich bis heute durch alle gängigen Definitionen/Charakterisierungen amodaler Vervollständigung. Außerdem lassen sich in nahezu allen Definitionen die folgenden drei Merkmale finden: 1. Die Beschreibung erfolgt auf phänomenologischer Ebene. 2. Es wird Bezug auf geometrisch-optische Verdeckung genommen, indem der perzeptuelle Eindruck sinngemäß *als verdeckt* charakterisiert wird. 3. Verweise auf physikalische oder physiologische Kategorien werden vermieden.

Es ist allerdings aus phänomenologischer Sicht nicht nachvollziehbar, warum Helligkeit und Farbe als visuelle Qualitäten aufgefasst werden, die Vollständigkeit der Form und die Unversehrtheit der Kontur hingegen nicht – von Attributen anderer Aspekte wie Bewegung oder Tiefe ganz zu schweigen. Diese theoretisch unmotivierte, willkürlich erscheinende Fokussierung auf farbliche Attribute könnte ein Hinweis darauf sein, dass die vermeintlich rein phänomenologische Beschreibung doch an sinnesphysiologische Vorstellungen anknüpft. Anders als die Form und Kontur einer Oberfläche, die sich erst aus der Anordnung mehrerer einzelner Bildpunkte ergeben, können Helligkeit und Farbe als punktweise,

¹⁶bezogen auf einen partiell verdeckten Reiz wie in Abbildung 2.11a auf S. 40, Anm. des Autors

¹⁷modale Vervollständigungen, die dadurch charakterisiert sind, dass die Ergänzungen dieselben visuellen Qualitäten wie der Rest der Konfiguration enthalten, Anm. des Autors

lokal definierte Attribute aufgefasst werden, für die entweder eine physikalische Entsprechung im Reiz existiert (modale Wahrnehmung) oder nicht (amodale Wahrnehmung). Eine solch lokalistische Sicht widerspricht jedoch der phänomenologischen Erfahrung, dass die wahrgenommene Helligkeit und Farbe einer Fläche in hohem Maße vom Kontext abhängt (z. B. von der wahrgenommenen Beleuchtung; vgl. z. B. Adelson, 2000).

Unabhängig von diesem phänomenologischen Einwand stellt sich die Frage, welche theoretische Rechtfertigung die Unterscheidung von Perzepten anhand eines einzelnen, vermeintlich arbiträren phänomenologischen Attributs wie Helligkeit/Farbe hat, insbesondere vor dem Hintergrund, dass weitreichende Gemeinsamkeiten zwischen modaler und amodaler Vervollständigung bestehen, beispielsweise bezüglich der Einheit der Gestalt oder anderer qualitativer Attribute wie der Kontur oder Form.

Dass modale oder amodale Vervollständigung häufig als vermeintlich unabhängige Phänomene bzw. Prozesse betrachtet werden, könnte damit zusammenhängen, dass modale Vervollständigung häufig implizit als Repräsentation direkter geometrisch-optischer Sichtbarkeit aufgefasst wird und amodale Vervollständigung als Repräsentation geometrisch-optischer Verdeckung: Während direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit nämlich unter vermeintlich weniger erklärungsbedürftigen, „gewöhnlichen“ Sehbedingungen vorkommt, mag partielle oder temporäre Verdeckung den Anschein einer „speziellen“ Sehbedingung erwecken, die einen besonders ausgefeilten Vervollständigungsmechanismus erfordert. Diese implizite Annahme der Kopplung von modaler Vervollständigung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit und von amodaler Vervollständigung an Unsichtbarkeit aufgrund von Verdeckung wird im nächsten Abschnitt kritisch hinterfragt.

2.3.4.3 Die Kopplung von modaler/amodaler Vervollständigung an direkte Sichtbarkeit/Verdeckung

Modal vervollständigte Gestalten verfügen typischerweise über dieselben visuellen Qualitäten wie die „übrigen“ (also sichtbaren) Teile der Gestalt – bzw. über die visuellen Attribute, die eine entsprechende prototypische, sichtbare Gestalt charakterisieren (beispielsweise im Fall von Scheinbewegung bei diskreten Bewegungsreizen die Klarheit des Bewegungspfades und die Glattheit der Bewegung). Umgekehrt setzt amodale Vervollständigung, so wie der Begriff in der Fachliteratur verwendet wird, explizit Unsichtbarkeit aufgrund von partieller oder vorübergehender Verdeckung voraus. Zwar fehlt es amodal vervollständigten Konturen/Oberflächen an visuellen Qualitäten wie Helligkeit, Farbe und Textur, dennoch wirkt die Einheit der Figur und der ununterbrochene Charakter ihrer Kontur äußerst überzeugend.

Diese phänomenologische Charakterisierung verleitet zur scheinbar selbstverständlichen, jedoch unbewiesenen Annahme, dass modale Vervollständigung direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit repräsentiert¹⁸ und amodale Vervollständigung geometrisch-optische Unsichtbarkeit aufgrund eines verdeckenden Hindernisses. In den meisten Fällen mag es zwar zutreffen, dass geometrisch-optische Sichtbarkeit ein modales Perzept hervorruft und geometrisch-optische Unsichtbarkeit aufgrund von physikalischer Verdeckung ein amodales Perzept, jedoch gibt es auch Ausnahmen, beispielsweise die *modale* Vervollständigung von Bewegung hinter einem Verdecker (vgl. Tunneleffekt, S. 42).

Zweifel an der Kopplung oder Gleichsetzung von modaler/amodaler Vervollständigung mit geometrisch-optischer Sichtbarkeit/Unsichtbarkeit ruft aber auch die in der Einleitung beschriebene Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer, 1999) hervor, die darin besteht, dass von einem partiell verdeckten Objekt ein größerer Teil als direkt sichtbar wahrgenommen wird als von einem physikalisch identischen, unverdeckten Objekt (Abbildung 1.5, S. 12). Psychophysikalische Befunde zeigen, dass zum einen die Stärke der Verdeckungstäuschung von der Stärke der perzeptuellen Hinweise für Verdeckung abhängt, und zum anderen der Effekt nicht auf eine bloße Skalierung der Figur zurückzuführen ist, sondern durch eine modale Ergänzung eines dünnen Streifens entlang der Verdeckungskante hervorgerufen wird (Palmer et al., 2007; Palmer & Schloss, 2009). Palmer und Kollegen favorisieren als Erklärung

¹⁸Darunter fällt hier auch die Sichtbarkeit durch eine transparente Schicht hindurch.

die sog. *Partial-Modal-Completion Hypothesis*, wonach ein partiell verdecktes Objekt nicht nur amodal vervollständigt, sondern zusätzlich auch partiell modal ergänzt wird. Das Phänomen sei somit so allgegenwärtig wie partielle Verdeckung selbst, jedoch sei man sich dessen nicht bewusst, weil der Effekt nur in der relativ ungewöhnlichen Situation überhaupt zu erkennen sei, wenn ein physikalisch identischer, unverdeckter Vergleichsreiz zur Verfügung stehe (Palmer et al., 2007, S. 667 f.).

Eine im Zusammenhang mit der Verdeckungstäuschung und der Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung theoretisch interessante Frage ist, wo der modal ergänzte Streifen perzeptuell lokalisiert ist und ob der Verdecker entsprechend verschoben oder zur Kompensation kleiner wahrgenommen wird. Palmer et al. (2007) spekulieren, das visuelle System bringe es ähnlich wie bei unmöglichen Figuren „irgendwie“ fertig, ein konsistentes Gesamtbild zu erzeugen, indem der ergänzte Streifen an derselben Position wie der Verdecker sichtbar ist, ohne dass letzterer verschoben oder kleiner wahrgenommen wird. Dies bedeutete jedoch, dass ein geometrisch-optisch *unsichtbarer* Teil der Figur modal wahrgenommen würde, und widerspräche somit der traditionellen Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung. Zugleich erscheint der ergänzte Streifen, dem Wesen modaler Eindrücke entsprechend, direkt sichtbar, d. h., phänomenale und geometrisch-optische Sichtbarkeit wären in diesem Fall voneinander entkoppelt.

Welchen Nutzen hätte aber modale Wahrnehmung bzw. phänomenale Sichtbarkeit, also der *Eindruck* von direkter Sichtbarkeit, wenn dieser nicht verlässlich mit geometrisch-optischer Sichtbarkeit korrespondiert bzw. diese repräsentiert? Diese Frage und die generelle Kritik an der Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung motiviert die experimentellen Untersuchungen dieser Arbeit und bildet den Ausgangspunkt der damit verbundenen theoretischen Überlegungen.

Kapitel 3

Der Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung¹

Verschwindet ein kontinuierlich bewegtes Objekt hinter einem Schirm („Tunnel“) und erscheint kurz darauf auf der anderen Seite wieder, so wird unter geeigneten Reizbedingungen eine kontinuierliche Bewegung hinter dem Schirm wahrgenommen. Untersuchungen dieses sog. Tunneleffekts (Abschnitt 2.3.3.2) deuten darauf hin, dass ein kritischer Faktor für die Bewegungsinterpolation, also für die perzeptuelle Vervollständigung des Bewegungspfades, die Wahrnehmung eines funktionalen Verdeckers ist (Scholl & Pylyshyn, 1999). Schon Wertheimer (1912) dokumentierte, dass in solchen Situationen von einigen Versuchspersonen eine „eindringliche Bewegung“ *gesehen* wird, die als „klar und deutlich, kräftig“ und „völlig kontinuierlich“ beschrieben wird (S. 224 f.). Ein derartiger von visuellen Qualitäten geprägter Wahrnehmungseindruck müsste prinzipiell als modal aufgefasst werden, obwohl die Interpolation des Bewegungspfades während der „amodalen Phase“ erfolgt, d. h., während das bewegte Objekt selbst als verdeckt wahrgenommen wird und nur amodal fortbesteht. Untersuchungen von Burke (1952) brachten zusätzliche Erkenntnisse über den interpolierten Bewegungspfad „im Tunnel“ sowie über die wahrgenommene Kontinuität bzw. Diskontinuität der Bewegung in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern (wie der Geschwindigkeit des Zielreizes vor Ein- und Austritt in bzw. aus dem Tunnel, der Tunnellänge, der Dauer der Verdeckung sowie der relativen Lage des Eintritts- und Austrittspunkts des Zielreizes in bzw. aus dem Tunnel). Hinsichtlich der phänomenalen Qualität des Perzepts beschreibt Burke (1952) die Eindrücke der Versuchspersonen allerdings wie folgt (S. 121):

“The hidden phase of this movement assumes all of the characteristics of true, visible movement for its entire extent [...]. [...]

It is thought that the absence of sensory qualities justifies the use of the term ‘amodal data’ to describe the way in which the hidden movement phase makes itself known to the observer. These ‘amodal data’ form the bridge between the modal phases and become an integral part of the total sensory experience.”

Und weiter (S. 137 f.):

“All agree that the ‘hidden’ phase can not be described in terms of sensory qualities. They see neither the colour nor the form of the object during its course behind the tunnel. After the event they may succeed in imaging the trajectory as a clear or a dark line, but at the moment of perception there is nothing of this kind. [...]

¹Wesentliche Teile dieses Kapitels sind, direkt übersetzt oder sinngemäß, aus den vorab veröffentlichten Artikeln von Scherzer und Ekroll (2009, 2012) übernommen worden, ohne dass die entsprechenden Passagen nochmals explizit gekennzeichnet wurden. Auch zahlreiche Abbildungen wurden aus den genannten Artikeln, unverändert oder leicht verändert, ohne explizite Kennzeichnung übernommen.

All the foregoing facts point in the one direction. They lead us to affirm without any doubt, it seems to us, that there can be a phenomenal ‘presence’ of a movement which is without any discernible sensory quality (like the ‘reine Bewegung’ of Wertheimer).”

To designate this fact, Professor Michotte has suggested the term ‘amodal data of sensory experience,’ thus indicating the absence of any sensory modality (Helmholtz) [...]. [...]

This will help to understand the apparent paradox implied in [...] ‘seeing a hidden movement.’ ”

Diese Zitate sind in mehrfacher Hinsicht interessant und für diese Arbeit von Bedeutung. Drei Aspekte sollen hervorgehoben werden:

1. Die Bewegung während der Phase der Verdeckung wird so beschrieben, dass sie sämtliche Eigenschaften realer, sichtbarer Bewegung enthält.
2. Gleichzeitig wird die „verdeckte Bewegung“ als ohne erkennbare sensorische Qualität und somit als amodal charakterisiert.
3. Es wird der Begriff der „reinen Bewegung“ verwendet, der sich auf Wertheimers (1912) Beschreibung „reiner φ -Bewegung“ bezieht (§ 16, S. 221 ff.), die einen gestaltlosen Bewegungseindruck beschreibt (ebd., S. 223): „[E]s war einfach Bewegung da; nicht auf ein Objekt bezüglich.“

Die ersten beiden Punkte erscheinen widersprüchlich: Ist die verdeckte Bewegung prinzipiell nicht unterscheidbar von sichtbarer Bewegung, die man zweifelsohne als modal auffassen muss, erscheint es merkwürdig, verdeckte Bewegung als amodal zu bezeichnen. Hier scheint also ein anderer Fall vorzuliegen als bei der amodalen Vervollständigung von Figuren, wo sich der phänomenale Eindruck des verdeckten Teils drastisch von dem Eindruck des unverdeckten Teils unterscheidet. Burke steht hier vor dem Dilemma, dass sich der Bewegungseindruck unter Verdeckung nicht von einem modalen Bewegungseindruck ohne Verdeckung unterscheidet, dem bewegten Objekt aber sensorische Qualitäten fehlen, dieses also als amodal aufgefasst werden muss. Die dritte Bemerkung zeigt, dass Burke hier eine Ähnlichkeit mit Wertheimers φ -Phänomen sieht. Tatsächlich bestehen aber erhebliche Unterschiede zwischen beiden Beobachtungen, denn bei Wertheimers φ -Phänomen hat die *Bewegung selbst* einen vagen Charakter, während das vermeintliche Trägerobjekt unbewegt und klar sichtbar ist. Neuere Befunde legen zudem nahe, dass Wertheimers φ -Bewegung gar nicht objektlos ist, sondern dass es sich tatsächlich um die wahrgenommene Scheinbewegung eines schattenartigen Verdeckers handelt (*Shadow Motion*; nach Allport, 1968), so dass die Bezeichnung als reine, objektlose Bewegung auch dort unangemessen erscheint (Ekroll, Faul & Golz, 2008, S. 2).

Die empirische Evidenz für einen „amodalen Bewegungseindruck“ scheint also insgesamt ziemlich schwach. Auch aus theoretischer Sicht erscheint es fraglich, ob Bewegung überhaupt jemals „ohne sensorische Qualität“, also amodal sein kann, selbst wenn sie sich in manchen Fällen perzeptuell nicht eindeutig einem mit sensorischen Qualitäten ausgestatteten, d. h. modalen Trägerobjekt zuordnen lässt und/oder hinter einem Verdecker wahrgenommen wird. Außerdem ist Bewegung ohnehin stets durch komplexe visuelle Qualitäten wie Glattheit (bzw. Ruckartigkeit/Sprunghaftigkeit) gekennzeichnet, für die es überhaupt keine direkte sensorische Entsprechung geben kann. Im folgenden wird deshalb von der Arbeitshypothese ausgegangen, dass der Eindruck von Bewegung grundsätzlich modal ist, d. h. selbst dann, wenn das Trägerobjekt nur amodal besteht.

Für die Bewertung der Angemessenheit der Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung und der damit verbundenen Annahme der Kopplung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. geometrisch-optische Unsichtbarkeit ist die Klärung der Frage, ob Bewegung grundsätzlich nur modal oder bei Verdeckung auch amodal erscheinen kann, von großer theoretischer Bedeutung. Trifft die Hypothese tatsächlich zu, dass der Bewegungseindruck stets modal ist, also auch dann, wenn das Trägerobjekt

amodal ist, so bedeutete dies, dass die klassische Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung unvollständig ist. Eine alternative Deutung, die auch Burkes Befund erklären kann, ist, dass sich modale und amodale Eindrücke selektiv auf einzelne perzeptuelle Attribute beziehen können und daher ein modaler Bewegungseindruck grundsätzlich auch mit einem amodalen Objekteindruck kombinierbar ist.

In diesem Kapitel werden diese Fragen in mehreren Experimenten mit diskreten statt, wie bei Burke, mit kontinuierlichen Bewegungsreizen untersucht. Bei diskreten Bewegungsreizen kann Scheinbewegung auftreten, d. h. perzeptuelle Vervollständigung von Bewegung über räumliche und ggf. auch zeitliche Lücken hinweg (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Bei geeigneten Reizparametern ist Scheinbewegung kaum oder gar nicht von „optimaler“ Bewegung eines kontinuierlich bewegten Zielreizes unterscheidbar und wird deshalb üblicherweise als modal aufgefasst. (Schein-)Bewegung hinter einem Verdeckter müsste dann gemäß der traditionellen Annahme einer Kopplung von modalen und amodalen Perzepten mit geometrisch-optischer Sichtbarkeit bzw. Unsichtbarkeit zu einem amodalen Bewegungseindruck führen. Entgegen dieser Erwartung deuten informelle Beobachtungen aber darauf hin, dass auch in diesem Fall ein modaler Bewegungseindruck entsteht, wobei die interpolierte Bewegung nicht nur, wie bei Burke, alle Eigenschaften von unverdeckter Bewegung aufweist, sondern insofern sogar „besser“ ist, als sie glatter erscheint („Glättungseffekt“).

Zwar wäre es wünschenswert, den Effekt auch mit kontinuierlichen Bewegungsreizen wie bei Burke zu untersuchen, jedoch bricht bei solchen Reizen leider die Bewegungsinterpolation zusammen, wenn sich in der räumlichen Lücke kein funktionaler Verdeckter (Tunnel) befindet (Scholl & Pylyshyn, 1999, S. 286). Dies verhindert einen direkten Vergleich von unverdeckter und verdeckter Bewegung.

In den in diesem Kapitel beschriebenen Experimenten I–V wurde geprüft, ob die obengenannten informellen Beobachtungen unter kontrollierten Bedingungen und für unterschiedliche räumliche und zeitliche Reizparameter nachgewiesen werden können. Tatsächlich konnte der Glättungseffekt für diskrete Bewegungsreize empirisch nachgewiesen und Verdeckung als kritischer Faktor hierfür identifiziert werden. Dies bedeutet, dass die Qualität der wahrgenommenen Bewegung unmittelbar durch Verdeckung beeinflusst werden kann, was für den modalen Charakter des Bewegungseindrucks auch bei Verdeckung spricht. Dieser Befund lässt sich als Indiz für die Unangemessenheit der Annahme einer Kopplung von modaler und amodaler Wahrnehmung mit geometrisch-optischer Sichtbarkeit bzw. Unsichtbarkeit deuten. Der Glättungseffekt lässt sich außerdem in plausibler Weise innerhalb konstruktivistischer Theorienperspektiven erklären.

3.1 Wahrnehmung von Bewegung

Die Wahrnehmung von Bewegung wird häufig durch aufeinanderfolgende, räumlich versetzte Darbietungen eines Reizes, d. h. durch geeignete Luminanzveränderungen, hervorgerufen (sog. *First-Order Motion*, vgl. z. B. Lu & Sperling, 2001). Die wohl bekannteste Klasse von Bewegungsdetektoren bilden sog. Reichardt-Detektoren (Reichardt, 1957), die den Output zweier räumlich versetzter rezeptiver Felder mit kurzem zeitlichen Abstand miteinander vergleichen (korrelieren), und die Abwandlungen und Weiterentwicklungen dieser Detektoren (z. B. Adelson & Bergen, 1985; van Santen & Sperling, 1984, 1985). Weitere bekannte Detektoren sind beispielsweise *Directionally Selective Units*, die auf der Lokalisation von Nulldurchgängen im Output von speziellen Bildfiltern basieren (Marr & Ullman, 1981), und gradientbasierte Detektoren (Fennema & Thompson, 1979; Johnston, McOwan & Buxton, 1992, zitiert in Lu & Sperling, 2001; vgl. auch Borst, 2007).

Es gibt jedoch auch Reize, die einen Bewegungseindruck erzeugen, ohne gerichtete Bewegungsenergie zu enthalten (sog. *Second-Order Motion*), und die deshalb nicht von Reichardt- und ähnlichen Detektoren erkannt werden können (Chubb & Sperling, 1988). Zur Detektion solcher Bewegungsreize wurden in den letzten ca. 25 Jahren zahlreiche weitere Modelle vorgeschlagen (für einen Überblick vgl. Burr & Thompson, 2011). Eine intensive Debatte drehte sich um die Frage, ob beide Formen von Bewegungsreizen durch dasselbe System verarbeitet werden können, oder ob hierfür funktional verschiedene

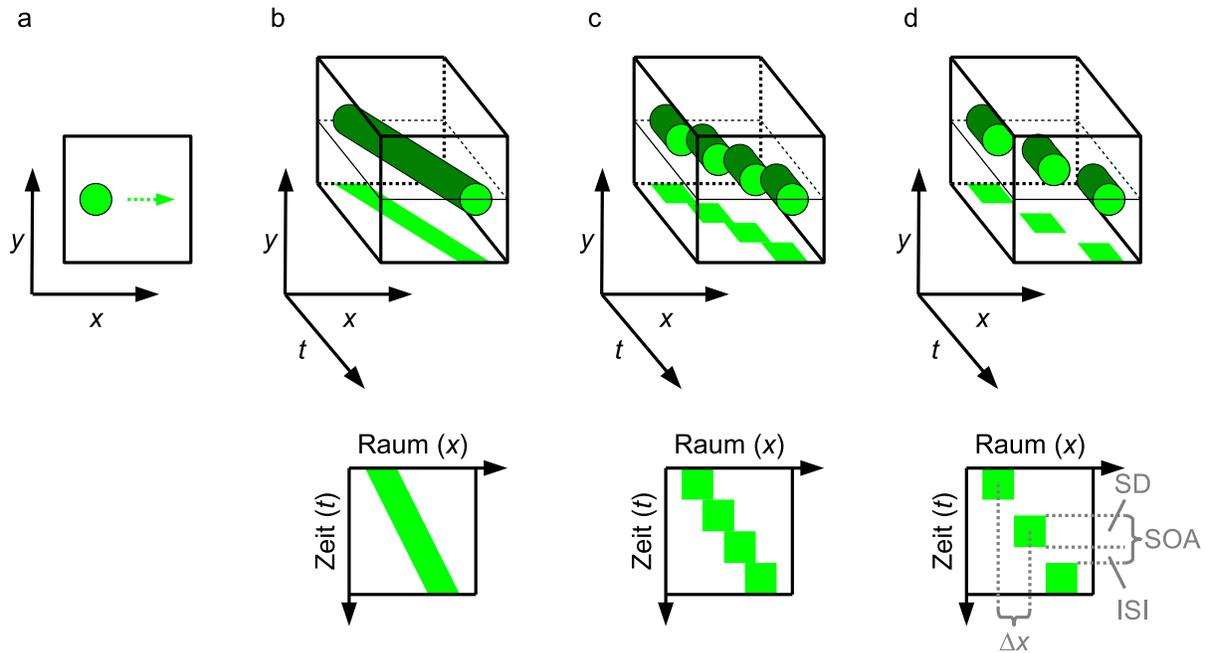


Abbildung 3.1: Konstruktion und Bedeutung von Raum-Zeit-Diagrammen. **a)** Skizze eines grünen Kreises, der sich auf einer Frontalebene (z. B. auf einem Computer-Bildschirm) von links nach rechts bewegt. **b)** Raumzeitliche Darstellung eines grünen Kreises, der sich kontinuierlich von links nach rechts bewegt, mit der Zeit als dritter Dimension (oben). Auf mittlerer Höhe der Frontalebene ist dünn eine orthogonale xt -Ebene angedeutet, die den grünen Kreis horizontal schneidet. Der Schnitt dieser Ebene mit dem Kreis entspricht dem auf den Boden gemalten grünen Streifen, den man sich auch als parallelen Schattenwurf vorstellen kann. Das zugehörige Raum-Zeit-Diagramm (unten) ist eine senkrechte Darstellung der Parallelprojektion des Reizes auf die xt -Ebene. **c)** Vier Einzelbilder/Standbilder (Frames) eines grünen Kreises an vier unterschiedlichen Positionen im Raum (oben) und das zugehörige Raum-Zeit-Diagramm (unten). Eine solche Serie von Frames stellt eine diskrete Abtastung eines kontinuierlichen Bewegungsreizes dar. (Kino-)Filme bestehen aus einer Vielzahl von Frames, von denen mehrere Dutzend pro Sekunde jeweils als kurzes Standbild dargeboten werden. **d)** Drei Frames eines grünen Kreises an drei unterschiedlichen Positionen im Raum, jeweils mit kurzen Pausen zwischen den einzelnen Standbildern (oben) und das zugehörige Raum-Zeit-Diagramm (unten). Zur Beschreibung der zeitlichen und räumlichen Parameter von diskreten Bewegungsreizen werden in der Literatur die gängigen Bezeichnungen SD (*Stimulus Duration*), ISI (*Inter-Stimulus Interval*), SOA (*Stimulus Onset Asynchrony*) und Δx verwendet (Definitionen im Text).

Systeme erforderlich sind. Aktuell deutet eine Vielzahl von Befunden auf mehrere unabhängige Low-Level-Mechanismen hin, die erst in Kombination miteinander zur Wahrnehmung von Bewegung führen (ebd., S. 1434 f.).

3.1.1 Darstellung von Bewegungsreizen

Zur Veranschaulichung von Bewegungsreizen haben sich sog. Raum-Zeit-Diagramme bewährt, die eine räumliche und eine zeitliche Dimension enthalten. In solchen Diagrammen wird auf zwei der drei Raumdimensionen verzichtet und lediglich das Geschehen einer räumlichen Dimension über die Zeit hinweg betrachtet. Abbildung 3.1 erklärt, wie Raum-Zeit-Diagramme konstruiert werden können und wie sie zu lesen sind. In a ist ein grüner Kreis (Zielreiz) skizziert, der sich von links nach rechts bewegt, und b zeigt eine raumzeitliche Darstellung eines Kreises in kontinuierlicher Bewegung (oben) sowie das zugehörige Raum-Zeit-Diagramm (unten). Zwar ist physikalische Bewegung stets kontinuierlich, doch zur Erforschung der Bewegungswahrnehmung werden häufig diskontinuierliche, d. h. diskrete Bewegungsreize betrachtet (siehe nächsten Abschnitt). c und d zeigen diskret abgetastete Versionen des

bewegten grünen Kreises (oben) und die zugehörigen Raum-Zeit-Diagramme (unten). Für solche diskreten Bewegungsreize haben sich in der Literatur einige gängige Bezeichnungen etabliert, die hier kurz definiert werden sollen:

- SD (*Stimulus Duration*): Dauer der Darbietung eines Zielreizes.
- ISI (*Inter-Stimulus Interval*): Dauer zwischen der Ausblendung und der nachfolgenden Einblendung eines Zielreizes, also zwischen dessen Verschwinden und Wiedererscheinen.
- SOA (*Stimulus Onset Asynchrony*): Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einblendungen eines Zielreizes, d. h. $SOA = SD + ISI$.
- Δx : Räumlicher Abstand zwischen den jeweiligen Referenzpunkten (z. B. Mittelpunkten) zweier sukzessiv dargebotener Zielreize.

3.1.2 Wahrnehmung von diskreten Bewegungsreizen

Diskrete Bewegungsreize in Form von geeigneten Sequenzen statischer Bilder können einen Eindruck von Objektbewegung hervorrufen, der sich nicht von der Wahrnehmung eines kontinuierlich bewegten Reizes unterscheidet. Dies ist trivial, solange die Unterschiede zwischen beiden Reiztypen unterhalb des raumzeitlichen Auflösungsvermögens des Wahrnehmungssystems, d. h. außerhalb des sog. *Window of Visibility* (Watson et al., 1986), liegen. Zahlreiche Beispiele aus der Literatur (z. B. Wertheimer, 1912) belegen jedoch, dass selbst solche Bewegungsreize, die klar als diskret erkennbar sind, einen Bewegungseindruck hervorrufen können, der sich allerdings merklich von dem eines „optimal“, d. h. kontinuierlich bewegten Objekts unterscheidet. Diese Interpolation von Bewegung zwischen zwei diskreten Darbietungspositionen eines Zielreizes wird als Scheinbewegung bezeichnet und stellt eine Art modaler Vervollständigung des Bewegungspfades dar. Früher wurde angenommen, dass optimaler Bewegung und Scheinbewegung unterschiedliche Prozesse zugrunde liegen (Braddick, 1974; Kolers, 1972), doch gibt es berechtigte Zweifel an dieser Vermutung. So zeigten Adelson und Bergen (1985), dass ihr raumzeitlicher Filter – wie auch das Modell von van Santen und Sperling (1985) – auf Bewegungsenergie innerhalb bestimmter raumzeitlicher Frequenzbänder reagiert (Adelson & Bergen, 1985, S. 285 und 297 f.) und somit nicht nur kontinuierliche, sondern auch diskrete Bewegungsreize detektieren kann, sofern die erforderliche Bewegungsenergie darin enthalten ist. Es wäre deshalb durchaus naheliegend, anzunehmen, dass diskrete und kontinuierliche Bewegungsreize trotz erkennbarer qualitativer Abweichungen auf denselben internen Verarbeitungsprozessen beruhen. Aus diesem Grund erscheint es prinzipiell lohnenswert, ein besseres Verständnis über die wahrgenommene Qualität von diskreten Bewegungsreizen in Abhängigkeit von der Art und Stärke von Sampling-Artefakten² zu erlangen, um daraus mögliche Rückschlüsse über die Mechanismen der Bewegungserkennung und -verarbeitung ziehen zu können. Ein offensichtlicher Zusammenhang besteht zwischen der Abtastfrequenz – und somit der Stärke der Sampling-Artefakte – einerseits und der Qualität bzw. Überzeugungskraft des Bewegungseindrucks andererseits: In Filmen mit (zu) niedriger Bildwiederholrate wirkt die Bewegung häufig ruckelig statt glatt (vgl. z. B. Adelson & Bergen, 1985, S. 294).

In welcher Weise das Verhältnis der räumlichen und zeitlichen Abstände zueinander die Stärke von Scheinbewegung beeinflusst, war lange Zeit Gegenstand kontroverser Debatten. Nach Kortes 3. Gesetz der Scheinbewegung erfordert die Vergrößerung der räumlichen Abstände zwischen zwei Reizdarbietungen eine korrespondierende Vergrößerung der zeitlichen Abstände, um die Stärke der Scheinbewegung konstant zu halten (Raum-Zeit-Kopplung; Korte, 1915). Demgegenüber deuten die Daten von Burt und Sperling (1981) darauf hin, dass eine Verringerung der räumlichen und zeitlichen Abstände unabhängig voneinander den Bewegungseindruck verbessern können (Raum-Zeit-Unabhängigkeit). Die Auflösung dieses vermeintlichen Widerspruchs liefern Gepshtein und Kubovy (2007), die zeigen, dass die

²d. h. die Abweichungen eines diskreten von einem kontinuierlichen Bewegungsreiz (Adelson & Bergen, 1985, S. 286)

Geschwindigkeit des Zielreizes kritisch dafür ist, ob der Stärkeindruck von Scheinbewegung von dem Verhältnis von räumlichem und zeitlichem Abstand abhängt (ab Geschwindigkeiten oberhalb von etwa $12^\circ/s$) oder nicht. In den Experimenten dieser Arbeit liegt die Geschwindigkeit des Zielreizes stets deutlich unterhalb der Schwelle von $12^\circ/s$, so dass eine Verringerung der räumlichen und/oder zeitlichen Abstände zu einem stärkeren Eindruck von Scheinbewegung führen sollte. Auch wäre bei diesen Geschwindigkeiten zu erwarten, dass die wahrgenommene Qualität der Scheinbewegung bei gleichbleibendem räumlichen Abstand zweier aufeinanderfolgender Reizelemente umso besser ist, je geringer die *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA), also das zeitliche Intervall zwischen den jeweiligen Einblendungen beider Elemente, ist (Burr, 1979).

3.2 Dynamische Maskierung diskreter Bewegungsreize

Die Wahrnehmung von Bewegung wurde oftmals unabhängig von anderen Aspekten der visuellen Wahrnehmung untersucht. Unter ökologischen Bedingungen ist Bewegung jedoch eng verknüpft mit Verdeckung, da Objekte in Bewegung kontinuierlich die Sicht auf dahinterliegende Objekte verdecken bzw. freigeben; umgekehrt verschwinden bzw. erscheinen Objekte in Bewegung in natürlichen Szenen häufig – partiell oder vollständig, vorübergehend oder dauerhaft – hinter anderen Objekten (Gibson, 1979).

Die Abbildungen 3.2a und 3.2d zeigen die Raum-Zeit-Diagramme von diskreten Bewegungsreizen vor einem texturierten Hintergrund. Beide Bewegungsreize können als diskret abgetastete Versionen der (identischen) kontinuierlichen Bewegungsreize in b bzw. e aufgefasst werden, jedoch ist in a die Abtastfrequenz nur halb so groß wie in d. Adelson und Bergen (1985) weisen darauf hin, dass der Unterschied zwischen diskreten und kontinuierlichen Bewegungsreizen, also die Sampling-Artefakte, zu einem „gestörten“ Bewegungseindruck³ in Form von Ruckeln oder Sprunghaftigkeit führen können, sofern die Unterschiede sensorisch vom Wahrnehmungssystem detektiert werden können. c und f zeigen jeweils die Differenz zwischen a und b bzw. zwischen d und e, wobei Abweichungen in Weiß bzw. Schwarz dargestellt sind. Versuchte das visuelle System also, den sensorischen Input in a zu „erklären“, indem der grüne Zielreiz einem Objekt in kontinuierlicher Bewegung zugeordnet würde, das im Idealfall den in b dargestellten sensorischen Input erzeugen sollte, so zeigten die weißen und schwarzen Bereiche in c die unerklärbaren Abweichungen durch die unerwartete An- bzw. Abwesenheit des grünen Zielreizes (analog für d–f). Ein Vergleich von c mit f offenbart, dass diese Sampling-Artefakte in f deutlich weniger ausgeprägt sind als in c, d. h., mit steigender Abtastfrequenz abnehmen.

Unter der Annahme, dass das bei Scheinbewegung häufig wahrgenommene Ruckeln und Flackern im wesentlichen von der Menge und Stärke der unerklärbaren Stimulation im Reiz abhängt, wären diese Störungen unmittelbar auf eine zu geringe raumzeitliche Abtastfrequenz, d. h. auf zu große räumliche und ggf. auch auf zu große zeitliche Lücken, zurückzuführen. Es könnten jedoch noch weitere Faktoren den Anteil der unerklärbaren Stimulation beeinflussen: Betrachtet man die beiden Sequenzen in Abbildung 3.3, in denen der grüne Zielreiz jeweils nur in jedem zweiten Einzelbild (Frame) dargeboten wird und sich in diskreten Schritten bewegt, so stellt man fest, dass die Unterbrechungen in der Sichtbarkeit des Zielreizes in der oberen Sequenz lokale Ereignisse sind, die nur den Zielreiz betreffen, während in der unteren Sequenz der Hintergrund und somit die gesamte Szene synchron mit dem Zielreiz verschwindet und wieder erscheint. Anders als in der oberen Sequenz (a) ließe sich das Verschwinden und Wiedererscheinen des Zielreizes in der unteren Sequenz (b) auf das plötzliche Erscheinen/Verschwinden einer Maske, die die gesamte Szene verdeckt, zurückführen, wodurch die sonst unerklärbare Abwesenheit des Zielreizes während des ISIs nicht mehr erklärungsbedürftig wäre und somit der Anteil an unerklärbarer Stimulation deutlich reduziert würde (vgl. die Abbildungen 3.2g, h und besonders i).

Im Einklang mit dieser Vorstellung steht die Beobachtung eines Glättungseffekts der Scheinbewegung bei synchroner Maskierung (vgl. die Demonstration 1 unter folgender Internet-Adresse: <http://>

³bezogen auf kontinuierliche, optimale Bewegung

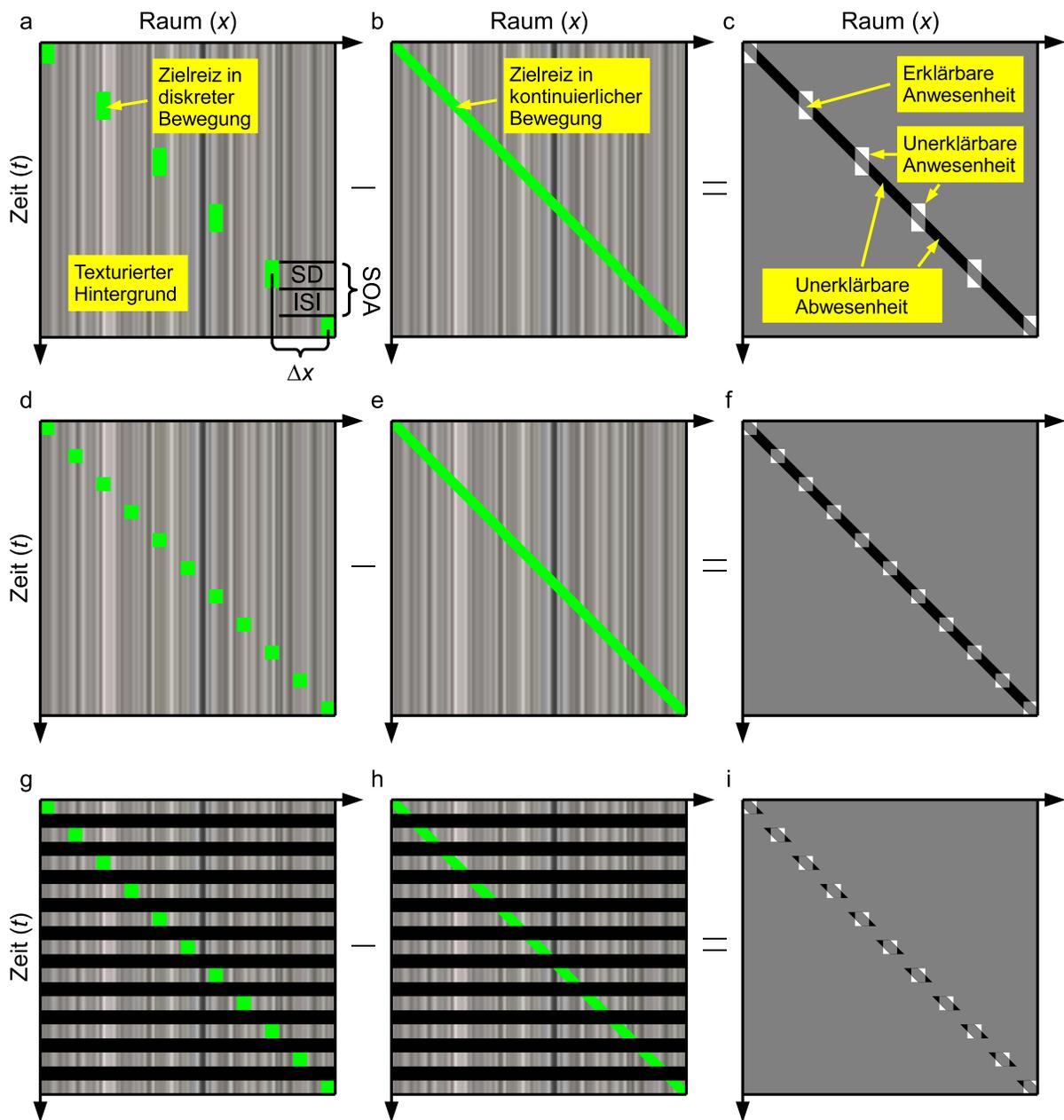


Abbildung 3.2: Raum-Zeit-Diagramme, adaptiert nach Adelson und Bergen (1985, Abbildung 4, S. 287). **a**) Ein grüner Zielreiz in diskreter Bewegung. Ein stationäres grünes Quadrat wird für die Dauer SD dargeboten, verschwindet dann für die Dauer ISI und erscheint dann an einer neuen Position, die relativ zur vorherigen Position horizontal um Δx verschoben ist, wieder. Die sog. *Stimulus Onset Asynchrony* ist definiert als $SOA = SD + ISI$. **b**) Ein grüner Zielreiz in kontinuierlicher, glatter Bewegung. **c**) Die Differenz zwischen dem diskreten und dem kontinuierlichen Bewegungsreiz, d. h. die Sampling-Artefakte: Weiße Bereiche zeigen eine positive Differenz („unerklärbare Anwesenheit“ des Zielreizes), schwarze Bereiche eine negative Differenz („unerklärbare Abwesenheit“ des Zielreizes) und graue Bereiche eine Null-Differenz. **d–f**) Diagramme analog zu a–c mit halbierten räumlichen (Δx) und zeitlichen Parametern (SD, ISI, SOA). Die somit vervierfachte raumzeitliche Abtastfrequenz führt zu geringeren Sampling-Artefakten. **g–i**) Diagramme analog zu d–f mit zyklischer Ein- und Ausblendung einer die gesamte Szene verdeckenden schwarzen Maske. Siehe Text für nähere Erläuterungen.

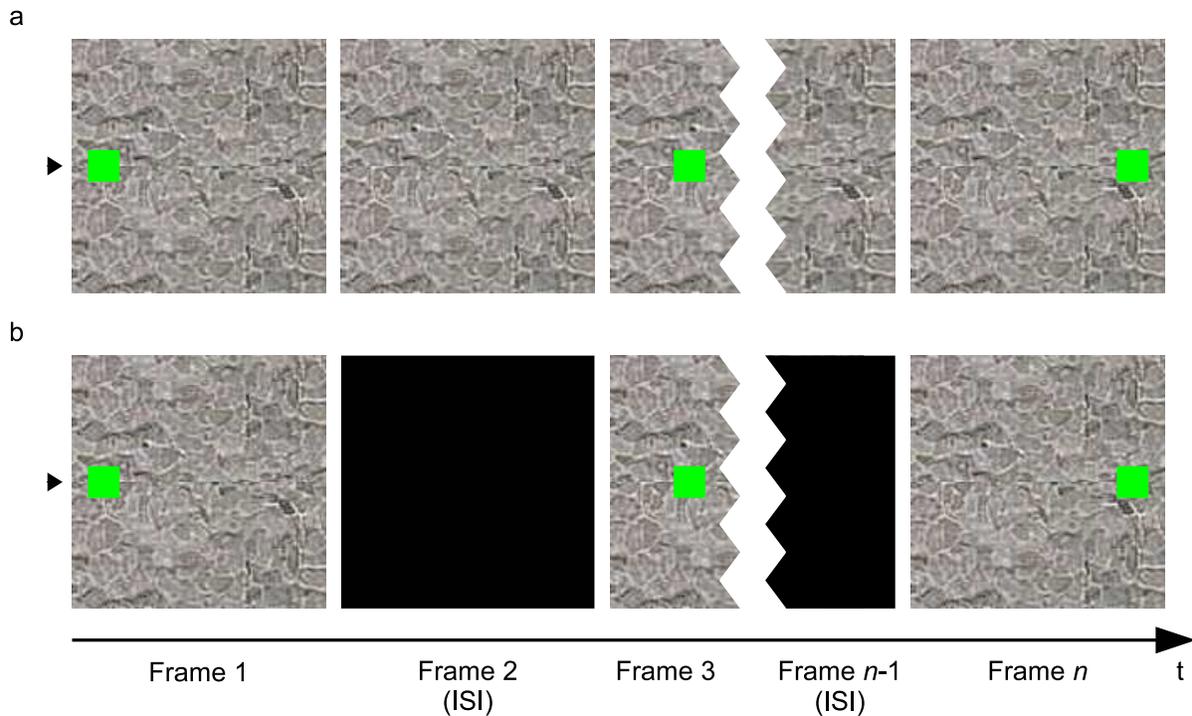


Abbildung 3.3: Sequenzen mit unverändertem Hintergrund (a) und mit maskiertem Hintergrund (b) während der ISIs.

www.uni-kiel.de/psychologie/psychophysik/demos/interpolation/#S1). Diesen Effekt machten sich beispielsweise bereits Blake, Ahlström und Alais (1999) zunutze, die in einem Priming-Experiment zwischen zwei eigentlich aufeinanderfolgenden Frames den Bildschirm löschten (maskierten), nur um „den Anschein von glatter Bewegung zu optimieren“ (ebd., Abbildung 1, S. 146). Über einen experimentellen Nachweis des Effekts war jedoch vor Beginn der Arbeit nichts bekannt.

3.2.1 Experiment I

In Experiment I sollte zunächst der experimentelle Nachweis des Glättungseffekts durch die dynamische Maskierung diskreter Bewegungsreize erbracht werden. Zusätzlich sollten die raumzeitlichen Abtastfrequenzen eingegrenzt werden, innerhalb derer der Effekt auftritt.

3.2.1.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Auf einem Computer-Bildschirm wurden Sequenzen eines von links nach rechts oder von rechts nach links in diskreten Schritten bewegten Zielreizes dargeboten (ähnlich den Sequenzen in Abbildung 3.3; im Experiment war der Hintergrund leicht rötlich), dem die Versuchspersonen mit ihrem Blick folgen sollten. Der Zielreiz wurde dabei jeweils für eine kurze Dauer (SD) an einer Position dargeboten, dann für eine kurze Dauer (ISI) ausgeblendet, anschließend an der nächsten Position erneut für die Dauer SD dargeboten usw. Die verwendeten Reize sind in Abbildung 3.4 in Form von Raum-Zeit-Diagrammen dargestellt. Nach Ablauf jeder Sequenz sollten die Versuchspersonen Angaben über die wahrgenommene Art der Bewegung und die Sichtbarkeit des Zielreizes in der abgelaufenen Sequenz machen.

Versuchsplan. Insgesamt wurden vier Faktoren variiert:

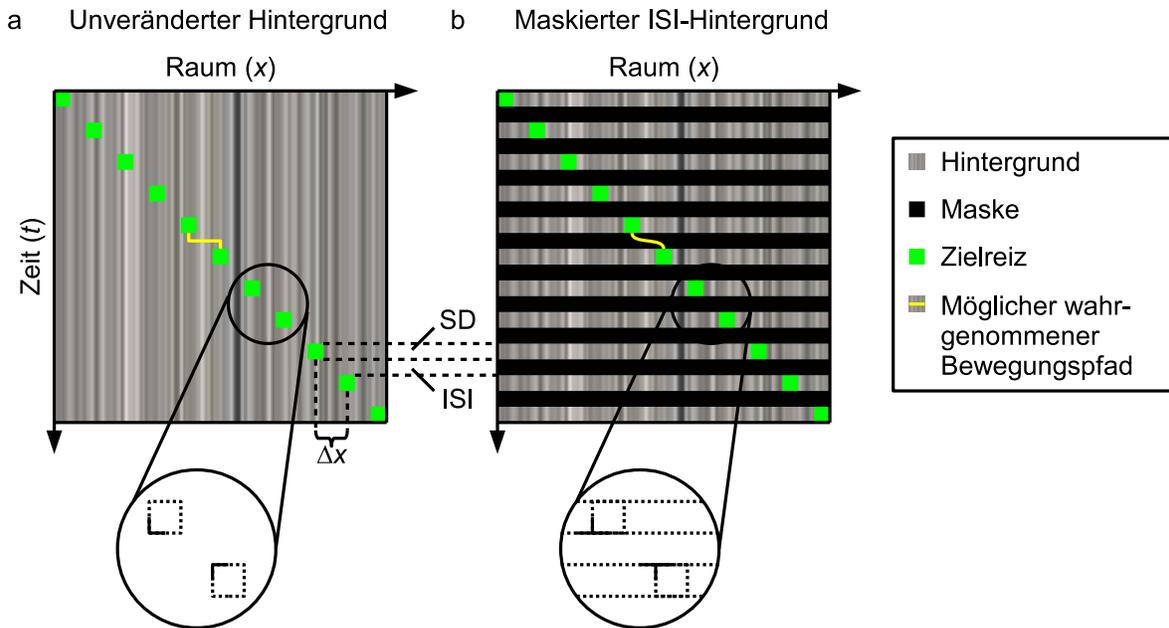


Abbildung 3.4: Raum-Zeit-Diagramme von Sequenzen aus Experiment I mit unverändertem Hintergrund (a) und mit maskiertem Hintergrund während des ISIs (b). Der Schnitt in diesem und allen weiteren Raum-Zeit-Diagrammen erfolgt stets entlang der xt -Ebene auf Höhe des bewegten Zielreizes (grün), angegeben durch die keilförmigen Markierungen links in Abbildung 3.3. Die Vergrößerungen zeigen schematisch die L-förmigen Nahtstellen (L-Kreuzungen) zwischen Zielreiz und Hintergrund in a und die T-förmigen Nahtstellen (T-Kreuzungen) zwischen Zielreiz und Maske in b.

1. Faktor „Maskierung“ (M). Während der Abwesenheit des Zielreizes (d. h. während des ISIs) blieb der Hintergrund („ISI-Hintergrund“) entweder unverändert oder wurde vollständig schwarz maskiert.
2. Faktor „Darbietungsdauer“ (SD). Die Darbietungsdauer des Zielreizes an einer Position wurde in fünf Stufen variiert: 47 ms, 141 ms, 235 ms, 329 ms, 424 ms.
3. Faktor „Inter-Stimulus-Intervall“ (ISI). Die Dauer zwischen zwei aufeinanderfolgenden Einblendungen des Zielreizes (ISI) wurde in fünf Stufen variiert: 47 ms, 141 ms, 235 ms, 329 ms, 424 ms.
4. Kontrollfaktor „Bewegungsrichtung“ (BR). Der Zielreiz wurde entweder von links nach rechts oder von rechts nach links bewegt. Diese Variation erfolgte nicht aus theoretischen Erwägungen, sondern diente lediglich dazu, mögliche Störeinflüsse durch richtungsspezifische Präferenzen, beispielsweise aufgrund der gängigen Leserichtung von links nach rechts, von vornherein ausschließen zu können.

Die unabhängigen Variablen M, SD, ISI und BR wurden vollständig gekreuzt, woraus sich $2 \times 5 \times 5 \times 2 = 100$ unterschiedliche Reizsequenzen ergaben.

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, nach Ablauf der Sequenz ihren spontanen visuellen Eindruck bezüglich der Art der Bewegung und der Sichtbarkeit des Zielreizes gemäß folgender Kategorien anzugeben:

1. Kriterium „Bewegung des Zielreizes“.
 - a) Kategorie „Konstante Geschwindigkeit“. Der Zielreiz wurde als glatt, mit konstanter Geschwindigkeit bewegt wahrgenommen.

- b) Kategorie „Kontinuierliche Be- und Entschleunigung“. Der Zielreiz wurde als glatt bewegt wahrgenommen, jedoch unter wiederholter Erhöhung und Verringerung der Geschwindigkeit. Kurze Stopps waren erlaubt, sofern diese „auf natürliche Weise“ in den Beschleunigungs-Entschleunigungs-Zyklus eingebettet erschienen.
- c) Kategorie „Ruckartige Sprünge“. Der Zielreiz wurde nicht als glatt bewegt entlang eines ununterbrochenen Bewegungspfades wahrgenommen. Statt dessen erschien es, als hätte der Zielreiz abrupte Sprünge vollzogen oder sei plötzlich ruckartig versetzt worden.

2. Kriterium „Sichtbarkeit des Zielreizes“.

- a) Kategorie „Dauerhafte Sichtbarkeit“. Der Zielreiz wurde als kontinuierlich sichtbar wahrgenommen und erschien während der gesamten Sequenz in konstanter Helligkeit und Farbe.
- b) Kategorie „Flackern“. Der Zielreiz wurde als kontinuierlich sichtbar wahrgenommen, jedoch unter schnellen Veränderungen seiner Helligkeit und/oder Farbe.
- c) Kategorie „Zwischenzeitliche Unsichtbarkeit“. Die Sichtbarkeit des Zielreizes war vorübergehend unterbrochen.

Das Kriterium der Sichtbarkeit wurde erhoben, um einen möglichen Zusammenhang zwischen der Bewegungsglattheit eines Objekts und der Objektpermanenz, die sich insbesondere aus dessen kontinuierlicher Sichtbarkeit ableiten ließe, herstellen zu können.

In Vorexperimenten war beobachtet worden, dass es durchaus möglich ist, den Zielreiz als zwischenzeitlich unsichtbar und dennoch als glatt bewegt wahrzunehmen (vgl. hierzu auch Burke, 1952, S. 137 f.). Dieses vermeintlich paradoxe Perzept ähnelt konzeptionell beispielsweise dem Eindruck einer im Dunkeln mit konstanter (oder nur graduell veränderter) Geschwindigkeit bewegten Glühbirne, die wiederholt ein- und ausgeschaltet wird.⁴

Hypothesen. Aus der obengenannten theoretischen Perspektive, die davon ausgeht, dass das Wahrnehmungssystem Interpretationen bevorzugt, die unerklärbare Reizeigenschaften minimieren, lassen sich folgende Hypothesen zum Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungsqualität ableiten:

1. Die Bewegung des Objekts wird bei maskiertem ISI-Hintergrund und geeigneten Parametern SD und ISI als weniger sprunghaft, d. h. als glatter wahrgenommen als bei unverändertem ISI-Hintergrund. Es ist also zu erwarten, dass das Urteil „Ruckartige Sprünge“ in der Bedingung mit maskiertem Hintergrund seltener genannt wird als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund.
2. Das Objekt erscheint bei maskiertem ISI-Hintergrund und geeigneten Parametern SD und ISI häufiger als dauerhaft sichtbar als bei unverändertem ISI-Hintergrund.

Darüber hinaus ergeben sich aus bekannten Gesetzmäßigkeiten der Scheinbewegung folgende Erwartungen, die nicht im Zusammenhang mit der Verdeckung/Maskierung der Szene stehen:

3. Die Bewegung des Objekts erscheint umso ruckartiger bzw. sprunghafter, je niedriger die raumzeitliche Auflösung des diskreten Bewegungsreizes, d. h. je höher die Darbietungsdauer SD und/oder das ISI ist (Burr, 1979).
4. Das bewegte Objekt erscheint bei unverändertem ISI-Hintergrund bei einer längeren Darbietungsdauer SD und kürzerem ISI häufiger als dauerhaft sichtbar, ohne zu flackern, als bei einer kürzeren Darbietungsdauer SD und längerem ISI.

⁴Auf diese Analogie wurden die Versuchspersonen im Rahmen der Instruktionen im Vorfeld des Experiments aufmerksam gemacht, um sie dafür zu sensibilisieren, dass solche Perzepte nicht per se unmöglich sind.

Versuchsaufbau. Die Sequenzen wurden auf einem CRT-Monitor mit einer Bildschirmdiagonalen von 21" bei einer Bildwiederholfrequenz von 85 Hz in einem abgedunkelten, nur schwach beleuchteten Raum dargeboten. Um den Bildschirm vom (schwachen) Umgebungslicht abzuschirmen und unerwünschte Reflexionen auszuschließen, befand sich der Bildschirm in einem Reduktionstunnel. Die Zeichenfläche für die Reizanzeige in der Mitte des Bildschirms war quadratisch und hatte bei einem Betrachterabstand von ca. 100 cm eine Seitenlänge von $10,7^\circ$ visuellem Winkel. Außerhalb der Zeichenfläche war der Bildschirmhintergrund schwarz (Luminanz $\leq 1 \text{ cd/m}^2$). Der Hintergrund der Zeichenfläche war leicht rötlich texturiert (vgl. Abbildung 3.3; Durchschnittsluminanz $\leq 13 \text{ cd/m}^2$) und blieb entweder während der gesamten Sequenz unverändert oder wurde jeweils während der Abwesenheit des Zielreizes ausgeblendet, so, als verdeckte eine homogene schwarze Maske, ununterscheidbar vom schwarzen Bildschirmhintergrund außerhalb der Zeichenfläche, die Hintergrundtextur während des ISIs. Die Kantenlänge a des bewegten grünen Zielreizes mit einer Luminanz von etwa 53 cd/m^2 betrug ca. $0,3^\circ$ Sehwinkel. Die Sprungweite Δx des Zielreizes (von Mittelpunkt zu Mittelpunkt) wurde so gewählt, dass dessen durchschnittliche Geschwindigkeit \bar{v} in allen Bedingungen gemäß der Gleichung $\bar{v} = \Delta x / (\text{SD} + \text{ISI})$ konstant bei $5,3a/s$ lag. Je nach SD und ISI ergaben sich somit Sprungweiten zwischen $0,5a$ und $4,5a$, und die Anzahl der diskreten Reizpositionen/Sprünge in einer Sequenz variierte entsprechend zwischen 9 und 75.

Versuchsdurchführung. Die Versuchspersonen sollten dem Zielreiz während einer Sequenz mit den Augen folgen und nach Ablauf der Sequenz ihr Urteil hinsichtlich ihres visuellen Eindrucks abgeben. Aus der Kombination der jeweils dreistufigen Bewertungskriterien „Bewegung“ und „Sichtbarkeit“ ergeben sich 3×3 Antwortmöglichkeiten, die den Versuchspersonen nach jeder Sequenz in Form einer Matrix dargeboten wurden. Aus dieser Matrix konnte dann die Zelle, die dem visuellen Eindruck am ehesten entsprach (z. B. „be-/entschleunigte Bewegung, Flackern“), mit den Pfeiltasten ausgewählt werden. Zusätzlich gab es noch die Auswahlmöglichkeit „Sonstiges“, falls keine der vorgegebenen 3×3 Antworten zutreffend erschien.

Es wurden pro Versuchsperson drei Datenblöcke mit den oben beschriebenen 100 unterschiedlichen Reizsequenzen, jeweils in pseudo-randomisierter Reihenfolge, an einem oder an zwei Terminen erhoben, d. h. jede der 100 Kombinationen der vier Faktoren M, SD, ISI und BR dreimal.⁵ Die Erhebung eines Datenblocks nahm etwa 15 bis 25 Minuten in Anspruch.

Im Vorfeld des Experiments erfolgten allgemeine Instruktionen, die Vorstellung der Kriterien und Antwortkategorien sowie ein Vorexperiment mit einigen Beispielsequenzen, in dem sich die Versuchspersonen mit den Reizen und der Steuerung vertraut machen konnten.

Versuchspersonen. Das Experiment wurde vom Autor (TS) und vom Leiter des Forschungsprojekts „Scheinbewegung“⁶ (VE), in dessen Rahmen das Experiment erfolgte, durchgeführt. Zusätzlich nahmen fünf Student/innen im Grundstudium der Psychologie teil, die naiv bezüglich der Fragestellung waren und für die Teilnahme sog. Versuchspersonenstunden, die im Rahmen des Grundstudiums abzuleisten waren, angerechnet bekamen. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen.

⁵Weil im ursprünglichen experimentellen Design zusätzlich die Variation der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Zielreizes vorgesehen war, wurden bei den ersten fünf Versuchspersonen im ersten Block insgesamt 196 Reizsequenzen dargeboten. Aus Zeitgründen wurde jedoch in der Folge auf die Variation der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Zielreizes verzichtet, so dass von den 196 Messungen im ersten Block schließlich nur 100 Messungen mit fixierter durchschnittlicher Geschwindigkeit berücksichtigt wurden. Der zweite und dritte Block umfasste bei den betroffenen Versuchspersonen – wie bei den übrigen Versuchspersonen – nur jeweils 100 Reizsequenzen wie beschrieben.

⁶gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft, EK 71/1-1

3.2.1.2 Ergebnisse

Einfluss des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Bewegungseindruck. Abbildung 3.5 zeigt die relativen Antworthäufigkeiten der Bewegungskategorien „Konstante Geschwindigkeit“ (oben), „Kontinuierliche Be- und Entschleunigung“ (Mitte) und „Ruckartige Sprünge“ (unten), jeweils aggregiert über die drei Sichtbarkeitskategorien. Jeder Graph enthält die Antworthäufigkeiten der entsprechenden Bewegungskategorie in Abhängigkeit vom ISI für die Bedingungen mit unverändertem und maskiertem ISI-Hintergrund bei fixierter Darbietungsdauer SD. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Daten sind:

1. Die Bewegung des Zielreizes wurde bei maskiertem ISI-Hintergrund seltener als ruckartig/sprunghaft bewertet als bei unverändertem ISI-Hintergrund, besonders bei längeren ISIs (untere Reihe). Dieses Ergebnis entspricht der Vorhersage der Hypothese 3.
2. Die Bewegung des Zielreizes wurde bei maskiertem ISI-Hintergrund häufiger als geglättet wahrgenommen als bei unverändertem ISI-Hintergrund, besonders bei längeren ISIs (obere und mittlere Reihe).
3. Bei einer kurzen Darbietungsdauer von $SD = 47$ ms wirkte sich diese Glättung vor allem dahingehend aus, dass die Geschwindigkeit des Objekts in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund häufiger als konstant bewertet wurde als in der Bedingung mit unverändertem ISI-Hintergrund (obere Reihe, Spalte 1). Bei längeren Darbietungsdauern von $SD \geq 141$ ms wirkte sich die Glättung dagegen vor allem dadurch aus, dass bei maskiertem ISI-Hintergrund häufiger eine be- und entschleunigte Bewegung als bei unverändertem ISI-Hintergrund wahrgenommen wurde (mittlere Reihe, Spalten 2–5).

Die beiden beschriebenen Einflüsse des ISI-Hintergrunds auf die wahrgenommene Bewegung können als komplementär aufgefasst werden, weil beide Effekte gleich stark sind (siehe auch Abbildung 3.6). Dies folgt auch unmittelbar aus der Tatsache, dass die Antwortmöglichkeit „Sonstiges“ praktisch nie von den Versuchspersonen ausgewählt wurde ($< 0,1\%$ aller Antworten) und sich daher die relativen Antworthäufigkeiten der drei Bewegungskategorien praktisch zu 100 % aufsummieren.

Einfluss des maskierten ISI-Hintergrunds auf die Sichtbarkeit. Abbildung 3.7 zeigt die relativen Antworthäufigkeiten der Sichtbarkeitskategorien „Dauerhafte Sichtbarkeit“ (oben), „Flackern“ (Mitte) und „Zwischenzeitliche Unsichtbarkeit“ (unten), jeweils aggregiert über die drei Bewegungskategorien. Jeder Graph enthält die Antworthäufigkeiten der entsprechenden Sichtbarkeitskategorie in Abhängigkeit vom ISI für die Bedingungen mit unverändertem und mit maskiertem ISI-Hintergrund bei fixierter Darbietungsdauer SD. Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Daten sind:

1. Der Zielreiz wurde bei maskiertem ISI-Hintergrund häufiger als dauerhaft sichtbar wahrgenommen als bei unverändertem ISI-Hintergrund (obere Reihe). Dieses Ergebnis entspricht der Vorhersage der Hypothese 2.
2. Der Zielreiz wurde bei maskiertem ISI-Hintergrund seltener als flackernd wahrgenommen als bei unverändertem ISI-Hintergrund (mittlere Reihe).

Auch diese beiden gemessenen Einflüsse des ISI-Hintergrunds auf die Sichtbarkeit des Objekts können als komplementär aufgefasst werden, weil beide Effekte etwa gleich stark sind (siehe auch Abbildung 3.8) und es kaum Unterschiede in den Antworthäufigkeiten der Sichtbarkeitskategorie „Zwischenzeitliche Unsichtbarkeit“ zwischen den Bedingungen mit unverändertem und mit maskiertem ISI-Hintergrund gibt.

Die Daten zeigen, dass sich ein maskierter ISI-Hintergrund sowohl auf die wahrgenommene Bewegung auswirkt, die als weniger ruckartig und statt dessen glatter empfunden wird, als auch auf die Sichtbarkeit

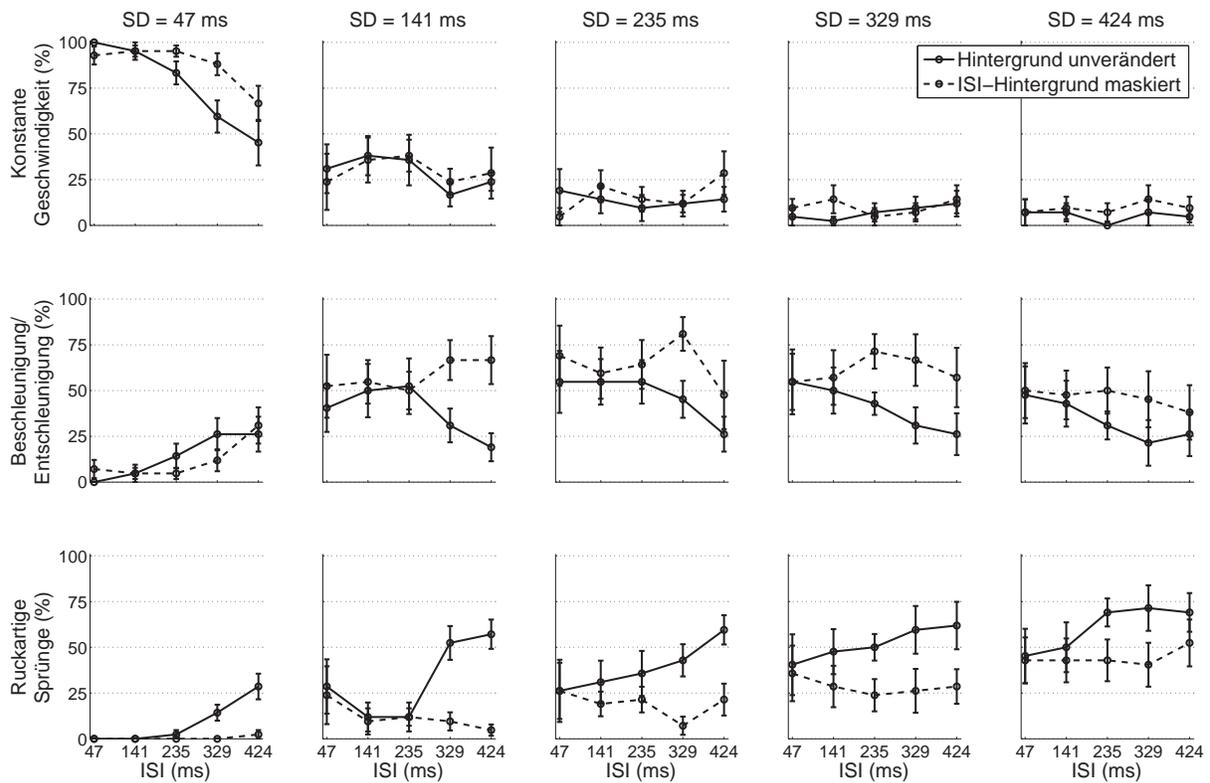


Abbildung 3.5: Ergebnisse des Experiments I nach Bewegungskategorien. Jede Reihe enthält die relative Antworthäufigkeiten einer Bewegungskategorie, jeweils aggregiert über die drei Sichtbarkeitskategorien, für die Bedingungen mit unverändertem und mit maskiertem ISI-Hintergrund. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

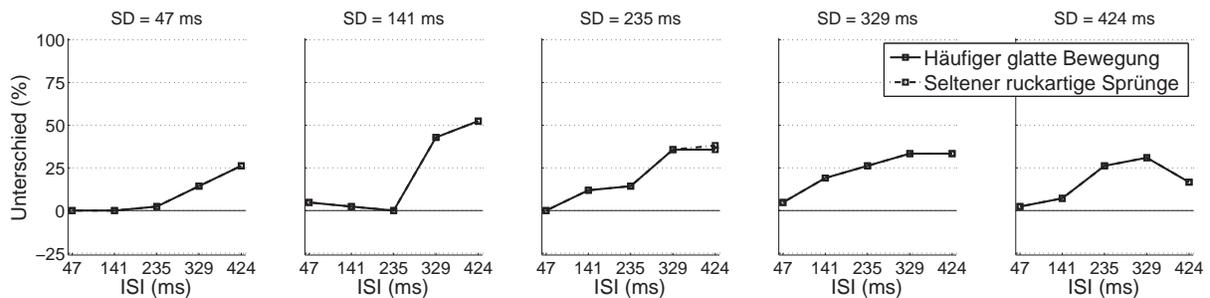


Abbildung 3.6: Komplementäre Einflüsse des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Bewegungseindruck. Bei längeren ISIs wurde häufiger eine glatte Bewegung des Zielreizes wahrgenommen (durchgezogene Linie; entspricht der Summe aus den jeweiligen Differenzen zwischen der gestrichelten und der durchgezogenen Linie in der oberen und in der mittleren Reihe der Abbildung 3.5), während der Eindruck von ruckartigen Sprüngen in praktisch identischem Maße seltener auftrat (gestrichelt-gepunktete Linie; hier meist verdeckt durch die durchgezogene Linie; entspricht der Differenz zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten Linie in der unteren Reihe der Abbildung 3.5).

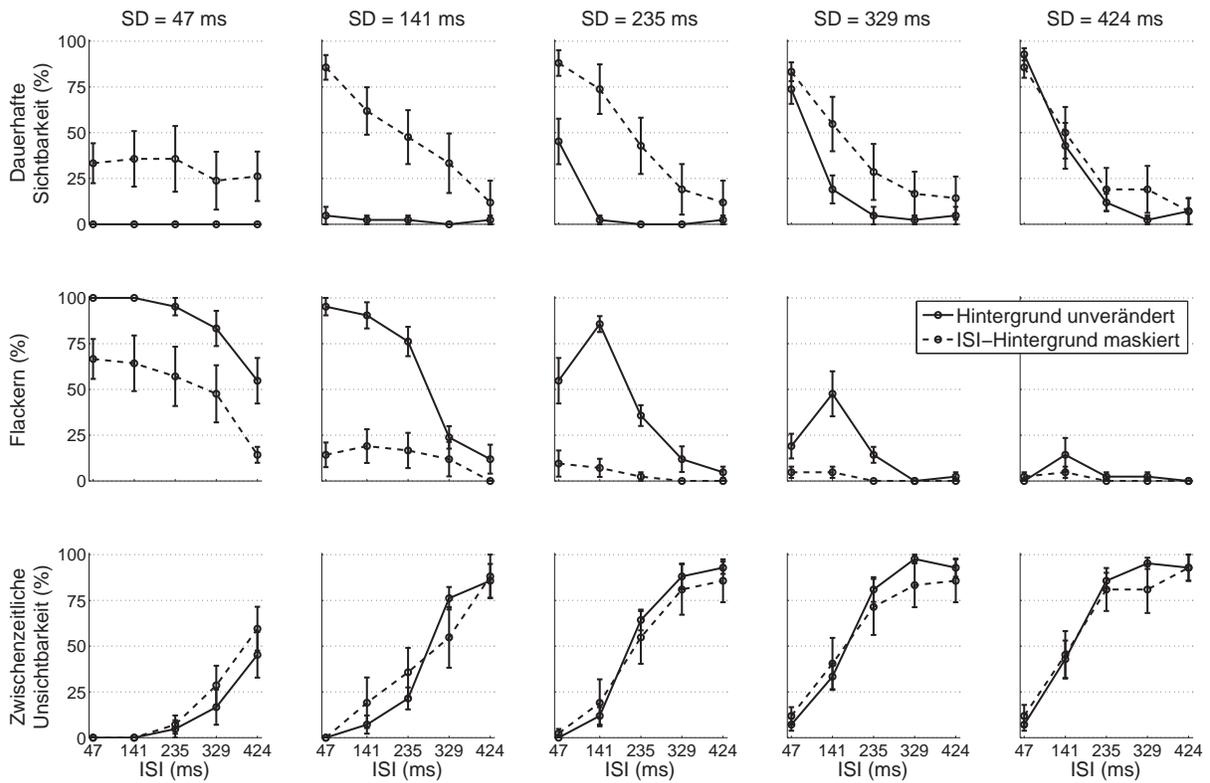


Abbildung 3.7: Ergebnisse des Experiments I nach Sichtbarkeitskategorien. Jede Reihe enthält die relativen Antworthäufigkeiten einer Sichtbarkeitskategorie, jeweils aggregiert über die drei Bewegungskategorien, für die Bedingungen mit unverändertem und mit maskiertem ISI-Hintergrund. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

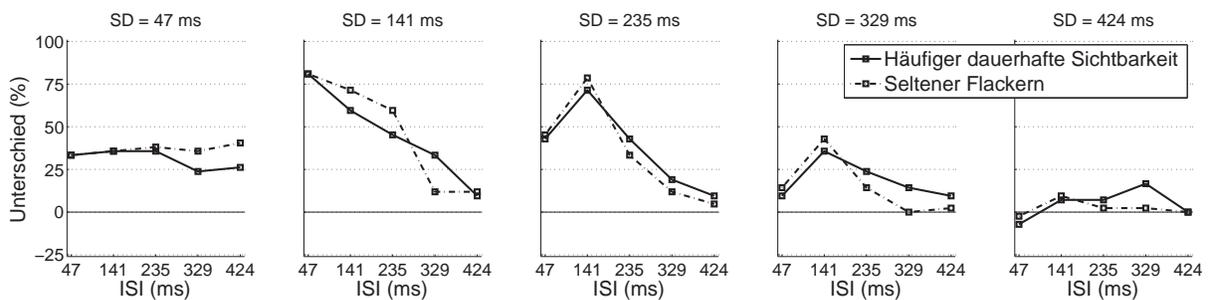


Abbildung 3.8: Komplementäre Einflüsse des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Sichtbarkeitseindruck. Das bewegte Objekt wurde häufiger als dauerhaft sichtbar wahrgenommen (durchgezogene Linie; entspricht der Differenz zwischen der gestrichelten und der durchgezogenen Linie in der oberen Reihe der Abbildung 3.7) und in etwa gleichem Maße seltener als flackernd (gestrichelt-gepunktete Linie; entspricht der Differenz zwischen der durchgezogenen und der gestrichelten Linie in der mittleren Reihe der Abbildung 3.7).

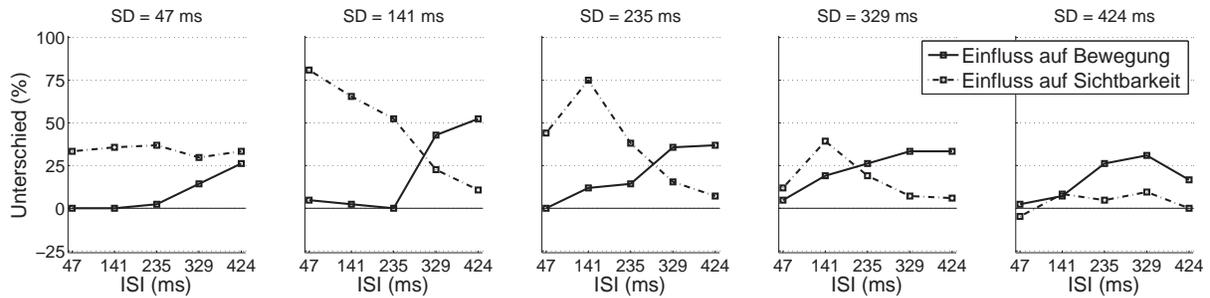


Abbildung 3.9: Der Einfluss des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Bewegungseindruck (durchgezogene Linie), definiert als der Mittelwert der Kurven in Abbildung 3.6, und auf den Sichtbarkeitseindruck (gestrichelt-gepunktete Linie), definiert als der Mittelwert der Kurven in Abbildung 3.8.

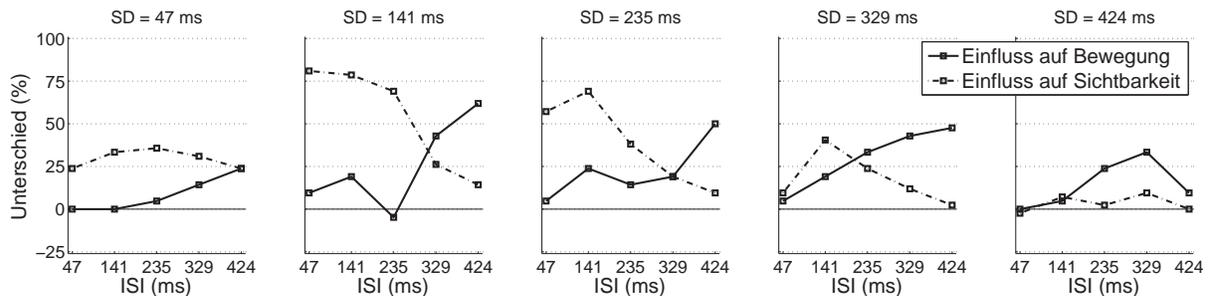


Abbildung 3.10: Der Einfluss des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Bewegungseindruck (durchgezogene Linie) und auf den Sichtbarkeitseindruck (gestrichelt-gepunktete Linie) für Sequenzen ausschließlich mit Bewegungsrichtung von links nach rechts. Die Berechnung des Einflusses folgt derselben Logik wie in Abbildung 3.9. Weitere Details im Text.

des bewegten Objekts, das seltener flackernd und häufiger dauerhaft sichtbar, von konstanter Helligkeit/Farbe erscheint (Abbildung 3.9). Der Einfluss auf den Bewegungseindruck tritt vor allem bei längeren ISIs auf, während der Einfluss auf den Sichtbarkeitseindruck bevorzugt bei kürzeren ISIs zu beobachten ist. Diese Beobachtungen entsprechen den Hypothesen 3 und 4.

Der Kontrollfaktor „Bewegungsrichtung“ (BR) hat erwartungsgemäß keinen entscheidenden Einfluss im Hinblick auf die Fragestellung. Die Abbildung 3.10 zeigt den Einfluss des maskierten ISI-Hintergrunds auf den Bewegungseindruck (durchgezogene Linie) und auf den Sichtbarkeitseindruck (gestrichelt-gepunktete Linie) des bewegten Objekts nur für Sequenzen mit Bewegungsrichtung des Zielreizes von links nach rechts. Der Vergleich mit Abbildung 3.9, in der die Einflüsse des maskierten ISI-Hintergrunds für alle Sequenzen dargestellt sind, offenbart nur geringe Unterschiede, die nicht zu anderen Schlussfolgerungen führen.

3.2.1.3 Diskussion

Das Experiment deutet darauf hin, dass die Wahrnehmung eines diskret bewegten, zyklisch ein- und ausgeblendeten Zielreizes von der Art des ISI-Hintergrunds abhängt. Wurde der Szenen-Hintergrund synchron mit der Ausblendung des Zielreizes maskiert und synchron mit dessen Einblendung wieder freigelegt, wurde die Bewegung als weniger ruckartig, d. h. glatter empfunden (Hypothese 1). Darüber hinaus erschien das bewegte Objekt seltener flackernd und statt dessen häufiger dauerhaft sichtbar (Hypothese 2).

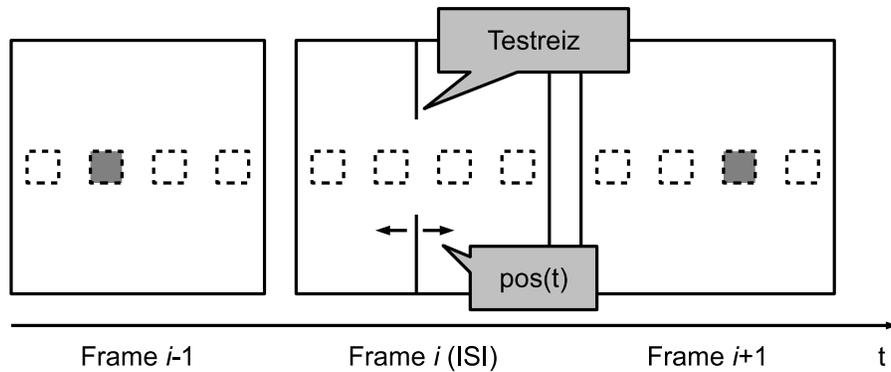


Abbildung 3.11: Schematische Darstellung der Reize in Experiment II. Der quadratische Zielreiz wurde in diskreten Schritten von links nach rechts bewegt. In jeder Sequenz blitzte kurzzeitig ein Testreiz in Form einer zweigeteilten vertikalen Linie auf, und die Versuchspersonen sollten dessen horizontale Position relativ zum Mittelpunkt des Zielreizes angeben. Je nach Antwort erschien der Testreiz in der nächsten Sequenz zum selben Zeitpunkt weiter links bzw. rechts, bis die Angaben der Versuchspersonen über die wahrgenommene Position des Testreizes hinreichend konvergierten, woraus sich die wahrgenommene Position des Zielreizes zu jedem der zwölf Messzeitpunkte und daraus wiederum dessen interpolierter Bewegungspfad ableiten ließ.

3.2.2 Experiment II

Die subjektiven Urteile der Versuchspersonen in Experiment I legen nahe, dass synchrone globale Veränderungen während des ISIs die Wahrnehmung eines diskret bewegten Zielreizes hinsichtlich dessen Bewegungsqualität und äußerer Erscheinung beeinflussen. Im folgenden Experiment sollte untersucht werden, ob der Glättungseffekt auch mit einer indirekten, objektiven Messmethode nachgewiesen werden kann.

3.2.2.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Es wurden ähnliche Reize wie in Experiment I verwendet. Anders als dort bestand die Aufgabe der Versuchspersonen jedoch darin, für jede Sequenz jeweils die wahrgenommene Position eines kurzzeitig aufblitzenden Testreizes in Form einer zweigeteilten vertikalen Linie relativ zur wahrgenommenen Position des Zielreizes zu unterschiedlichen Zeitpunkten anzugeben (Abbildung 3.11). Aus den so gewonnenen Daten ließ sich der (interpolierte) Bewegungspfad des Zielreizes rekonstruieren.

Versuchsplan. Es wurde nur der Faktor „Maskierung“ (M) wie in Experiment I variiert, d. h., der ISI-Hintergrund blieb entweder unverändert oder wurde vollständig maskiert. Die übrigen in Experiment I variierten Faktoren „Darbietungsdauer“ (SD), „Inter-Stimulus-Intervall“ (ISI) und „Bewegungsrichtung“ (BR) blieben in diesem Experiment konstant: SD = 235 ms; ISI = 329 ms; BR: von links nach rechts. Ein Darbietungszyklus umfasste somit insgesamt SD + ISI = 564 ms.

Ein Testreiz blitzte in jeder Sequenz zu einem von insgesamt zwölf festgelegten Zeitpunkten auf, die äquidistant über einen Darbietungszyklus des Zielreizes verteilt waren. Mittels einer adaptiven Doppel-Staircase-Prozedur wurde für jeden dieser Zeitpunkte die wahrgenommene Position des Testreizes relativ zum wahrgenommenen Mittelpunkt des Zielreizes ermittelt, woraus sich die wahrgenommene Position des Zielreizes zum jeweiligen Zeitpunkt ableiten und aus all diesen Daten der interpolierte Bewegungspfad rekonstruieren ließ.

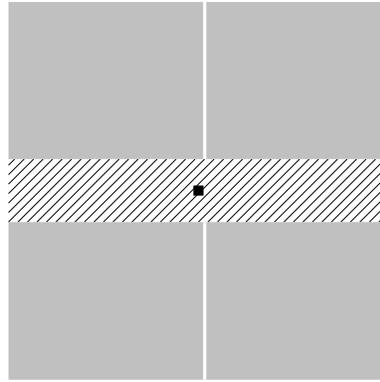


Abbildung 3.12: Maßstabsgetreue Illustration der Reize in Experiment II. Der grüne Zielreiz (hier: schwarz) wurde in einem horizontalen Streifen mit Höhe $6,25a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes) vor dem texturierten Hintergrund (hier: schraffiert) dargeboten. In der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund wurde während des ISIs nur dieser Streifen homogen schwarz gefüllt. Außerhalb des Streifens befanden sich in beiden Bedingungen dauerhaft zwei homogene graue Flächen, auf denen der zweigeteilte Testreiz (weiß) aufblitzte.

Hypothese. Die Bewegung des Objekts wird bei maskiertem ISI-Hintergrund als weniger sprunghaft, d. h. glatter wahrgenommen als bei unverändertem ISI-Hintergrund. Es ist zu erwarten, dass der aus den Positionsbestimmungen zu zwölf Zeitpunkten rekonstruierte Bewegungspfad bei maskiertem ISI-Hintergrund weniger starke Positionsänderungen (d. h. Geschwindigkeitsänderungen) über die Zeit aufweist als bei unverändertem ISI-Hintergrund.

Versuchsaufbau. Es wurde dieselbe Ausstattung (Raum, Geräte usw.) wie in Experiment I genutzt (siehe Abschnitt „Versuchsaufbau“ auf S. 67). Weil als Durchschnittsgeschwindigkeit \bar{v} des Zielreizes unverändert konstant $5,3a/s$ (a = Kantenlänge des Zielreizes) vorgesehen waren, ergab sich bei fester Darbietungsdauer D von 235 ms und festem ISI von 329 ms eine Sprungweite von $3a$ (von Mittelpunkt zu Mittelpunkt) je Schritt.

Einmal pro Sequenz wurde zu einem bestimmten Zeitpunkt während des 9. Darbietungszyklus', d. h. zwischen der 9. und 10. Einblendung des Zielreizes, ein Testreiz in Form eines zweigeteilten dünnen weißen vertikalen Streifens (Luminanz $\approx 78 \text{ cd/m}^2$) für 12 ms eingeblendet. Die Einblendung des Testreizes relativ zur 9. Einblendung des Zielreizes wurde in zwölf äquidistanten Schritten variiert (47 ms, 94 ms, ..., 564 ms), so dass der gesamte 9. Darbietungszyklus gleichmäßig abgedeckt wurde. Die Reize sind in Abbildung 3.12 illustriert. Zur Zeitersparnis wurden nur die ersten 13 der 18 für diese Parameterkombination in Experiment I dargebotenen Zyklen gezeigt.

Versuchsdurchführung. Nach Darbietung einer Sequenz sollten die Versuchspersonen angeben, ob der Testreiz links oder rechts des Mittelpunktes des wahrgenommenen Zielreizes aufgeblitzt war. Es wurde eine adaptive Doppel-Staircase-Prozedur verwendet, um die wahrgenommene horizontale Position des Testreizes, die der wahrgenommenen Position des (Mittelpunktes des) Zielreizes entsprach, zu ermitteln. Die Prozedur wurde so lange durchgeführt, bis sechs aufeinanderfolgende Urteile innerhalb eines Intervalls von ungefähr $0,3a$ lagen, wofür im Mittel ca. 30 Iterationen benötigt wurden.

Aus dem zweistufigen Faktor „Maskierung“ und den zwölf Messzeitpunkten ergaben sich 24 unterschiedliche Messwerte je Versuchsperson, die jeweils aus den im Rahmen der Staircase-Prozedur erhobenen Einzelmessungen ermittelt wurden und aus denen die beiden interpolierten Bewegungspfade für die Bedingung mit und ohne Maskierung des ISI-Hintergrunds rekonstruiert werden konnten.

Versuchspersonen. Es nahmen elf Student/innen im Grundstudium der Psychologie teil, die naiv bezüglich der Fragestellung waren und für die Teilnahme Versuchspersonenstunden (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“ auf S. 67) angerechnet bekamen. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen.

3.2.2.2 Ergebnisse

Die mittleren Einstellungen aller Versuchspersonen sind der Abbildung 3.13 zu entnehmen. In der Abbildung sind die wahrgenommenen räumlichen Positionen des Zielreizes gemäß den Einstellungen der Versuchspersonen in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Testreiz-Aufblitzens dargestellt. Beide Kurven sind einander ähnlich und liegen nahe der skizzierten linearen Interpolationslinie. Die Datenkurve für die Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) ist zwar etwas stärker gezackt, speziell zu Beginn des ISIs, allerdings sind die sichtbaren Unterschiede insgesamt gering. Bemerkenswerter ist jedoch die größere Variabilität zwischen den Versuchspersonen, die anhand der Fehlerbalken angedeutet wird.

Die größere intersubjektive Variabilität wird besonders anhand der Abbildung 3.14 deutlich, in der die Daten aller Versuchspersonen für beide Bedingungen separat dargestellt sind. Die Kurven für die Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) enthalten größere Sprünge und wirken insgesamt weniger glatt als die für die Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz).

Diese Beobachtung wird durch die Abbildung 3.15a gestützt, in der die diskreten 1. Ableitungen beider Kurven aus Abbildung 3.13 dargestellt sind, also die durchschnittliche Geschwindigkeit des Zielreizes zwischen je zwei Messzeitpunkten. Es wird deutlich, dass die mittlere wahrgenommene Geschwindigkeit während des ISIs in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) deutlich stärker schwankte als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz). In Abbildung 3.15b sind die Absolutbeträge der Veränderungen in der Geschwindigkeit dargestellt; diese fielen in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) deutlich stärker aus als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz). Um die statistische Signifikanz dieses Ergebnisses zu ermitteln, wurden die Differenzen der Absolutbeträge der Geschwindigkeitsänderungen zwischen beiden Bedingungen für alle zwölf Messzeitpunkte und alle elf Versuchspersonen gebildet. Der Mittelwert dieser Differenzen ist mit $2,7a/s^2$ ($a =$ Kantenlänge des Zielreizes) signifikant größer als $0a/s^2$ (einseitiger t-Test: $t(131) = 2,21; p = 0,014$).

Die Abbildung 3.16a zeigt explizit die größere intersubjektive Variabilität in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) gegenüber der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund. Die gemittelte Differenz zwischen den Standardfehlern von je zwei korrespondierenden Datenpunkten unterscheidet sich mit 0,66 signifikant von 0 (zweiseitiger t-Test: $t(11) = 3,11; p = 0,010$). Dies könnte darauf hindeuten, dass die visuelle Interpolation in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund prinzipiell weniger klar festgelegt ist im Vergleich zur Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund. In diesem Fall wäre in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund auch eine größere intrasubjektive Variabilität zu erwarten. Aufgrund der verwendeten Staircase-Prozedur liegen zwar keine Daten zur intrasubjektiven Variabilität vor, jedoch können aus der Anzahl der erforderlichen Einstellungsschritte bis zur Erfüllung des Konvergenzkriteriums ähnliche Rückschlüsse gezogen werden: Wie die Abbildung 3.16b zeigt, konvergierte die Staircase-Prozedur langsamer in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot; im Mittel 31,6 Einstellungsschritte) als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz; im Mittel 27,6 Einstellungsschritte). Um die statistische Signifikanz dieses Ergebnisses zu ermitteln, wurden die Differenzen zwischen der nötigen Anzahl an Einstellungsschritten in beiden Bedingungen für alle zwölf Messzeitpunkte und alle elf Versuchspersonen gebildet. Der Mittelwert dieser Differenzen unterscheidet sich mit 4,0 signifikant von 0 (zweiseitiger t-Test: $t(131) = 2,71; p = 0,0076$).

Die Ergebnisse des Experiments sind in Abbildung 3.17 zusammengefasst dargestellt:

1. Sowohl die mittlere von den Versuchspersonen wahrgenommene Geschwindigkeitsänderung als auch deren maximaler Absolutbetrag war in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund im Mittel größer als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (a und b). Dies sind Indizien

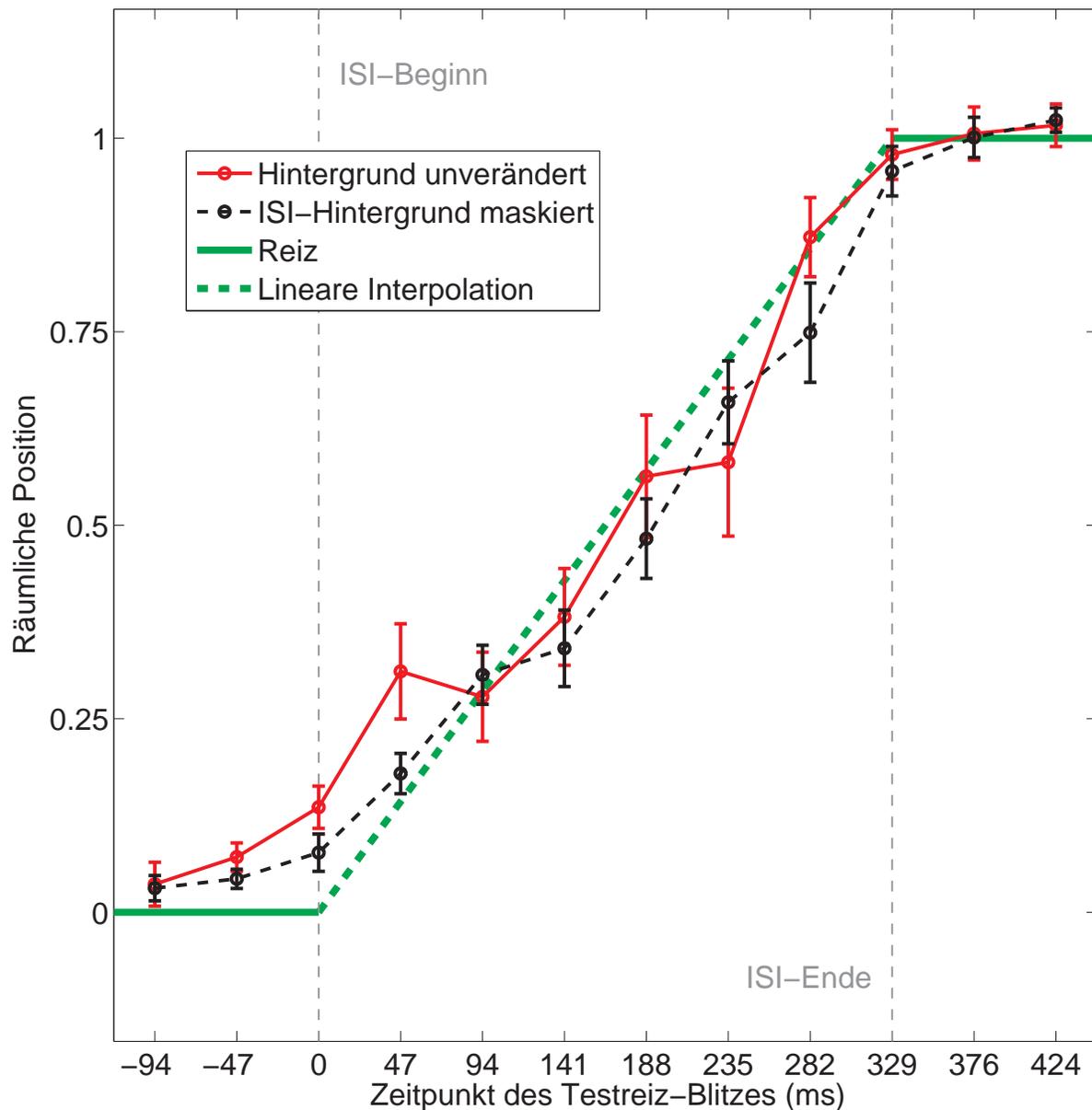


Abbildung 3.13: Ergebnisse des Experiments II. Es sind die räumlichen Positionen, gegen die die Staircase-Prozedur in den Bedingungen mit unverändertem Hintergrund (rot) und mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz) konvergierte, in Abhängigkeit vom Zeitpunkt des Aufblitzens des Testreizes – relativ zum ISI-Beginn im 9. Darbietungszyklus – dargestellt. Die tatsächlichen Positionen des Zielreizes sind als horizontale grüne Linien eingezeichnet und eine ideale lineare Interpolation während des ISIs als gestrichelte grüne Linie skizziert. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen. Die Datenpunkte zu den Zeitpunkten 376 ms und 424 ms wurden ursprünglich während der 9. Darbietung des Zielreizes erhoben (d. h. zu den Zeitpunkten -188 ms und -141 ms), sind jedoch zur besseren Übersichtlichkeit im 10. Darbietungszyklus dargestellt, d. h. um eine Sprungweite im Raum und um 564 ms in der Zeit verschoben. Dies sollte aufgrund der Periodizität des Reizes ohne weiteres möglich sein.

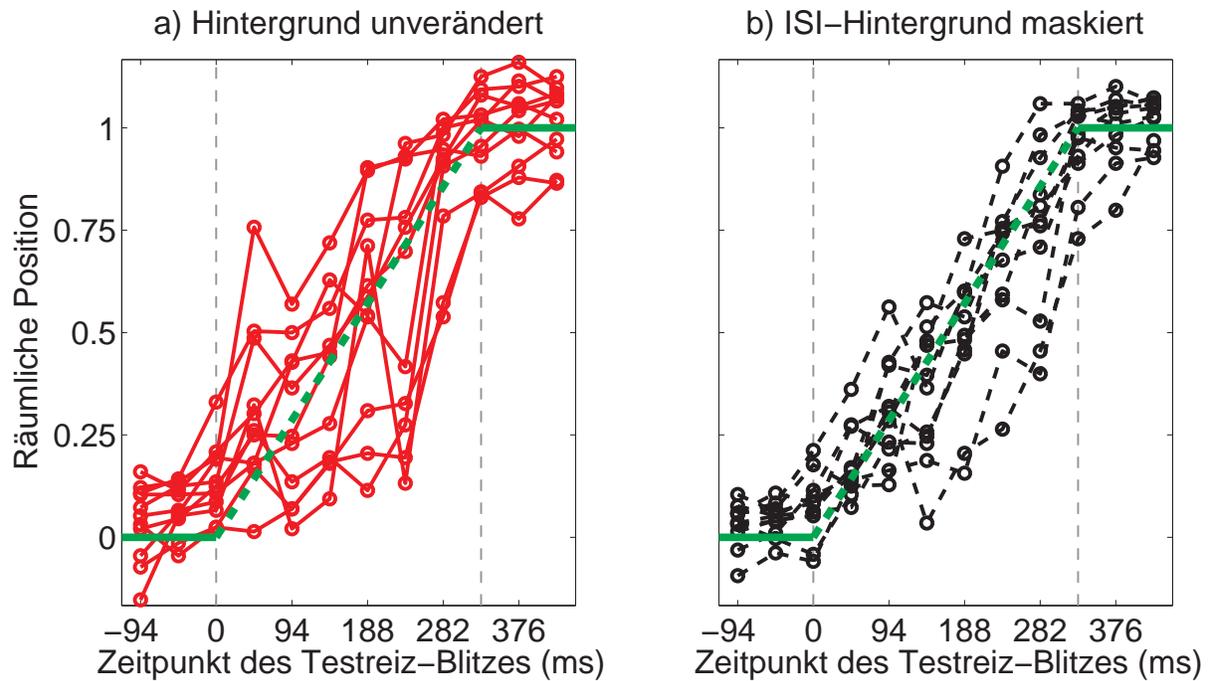


Abbildung 3.14: Ergebnisse des Experiments II. Daten aller Versuchspersonen für die Bedingungen mit unverändertem Hintergrund (a) und mit maskiertem ISI-Hintergrund (b). Konventionen wie in Abbildung 3.13.

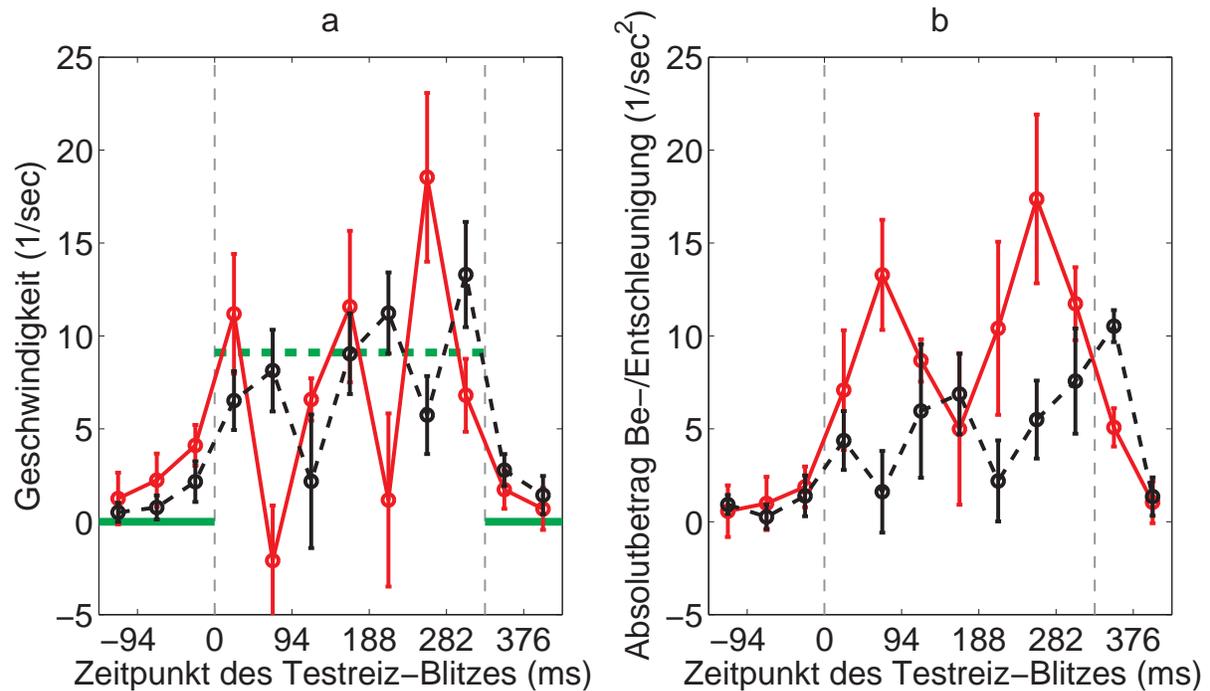


Abbildung 3.15: Ergebnisse des Experiments II. Die mittlere wahrgenommene Geschwindigkeit (a) und der mittlere Absolutbetrag der wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung (b) sind für die Bedingungen mit unverändertem Hintergrund (rot) und mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz) dargestellt. Die Daten sind aus den Kurven in Abbildung 3.13 abgeleitet. In a ist die tatsächliche Geschwindigkeit des Reizes außerhalb des ISIs als horizontale grüne Linie dargestellt ($0a/s$) (a = Kantenlänge des Zielreizes) und die Geschwindigkeit bei einer idealen Interpolation während des ISIs als horizontale gestrichelte grüne Linie ($\approx 9,1a/s$). Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

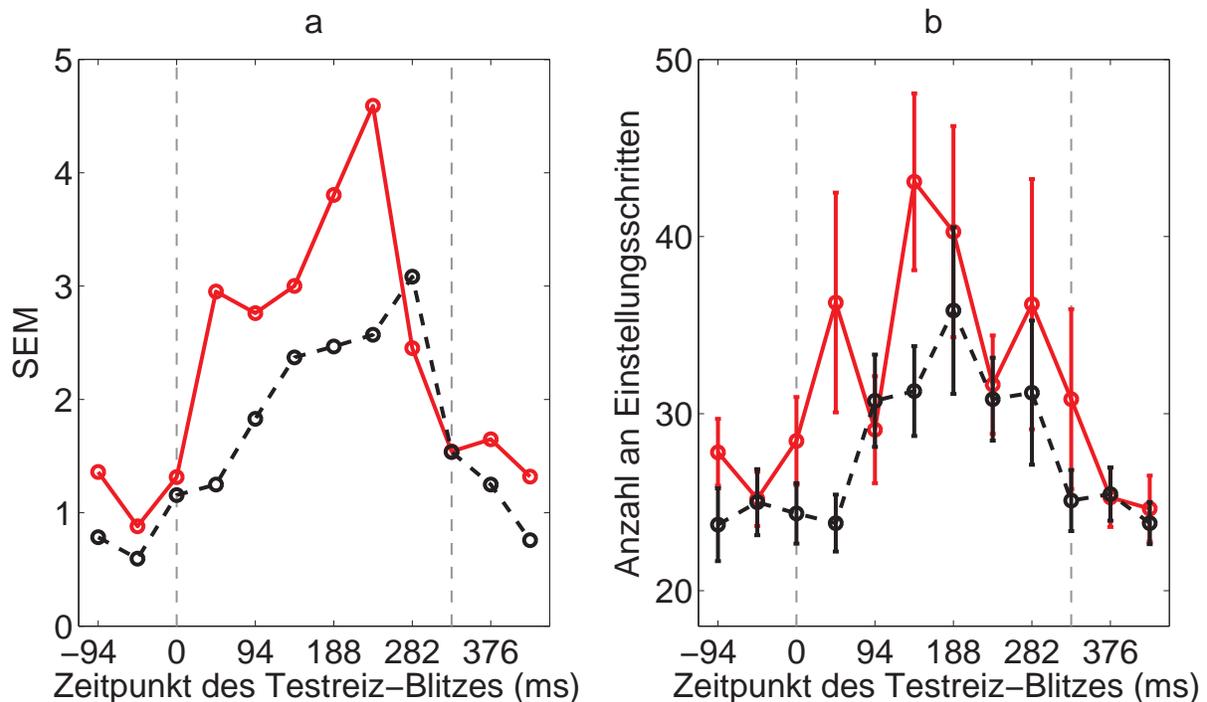


Abbildung 3.16: Ergebnisse des Experiments II. **a)** Die Standardfehler der Datenpunkte aus Abbildung 3.13 für die Bedingungen mit unverändertem Hintergrund (rot) und mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz). **b)** Die mittlere Anzahl an Einstellungsschritten in der Staircase-Prozedur bis zur Erfüllung des Konvergenzkriteriums. Aufgrund des Staircase-Designs waren mindestens 18 Schritte je Messzeitpunkt erforderlich. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

dafür, dass die Bewegung in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund insgesamt als ruckartiger wahrgenommen wurde.

- Die größere intersubjektive Variabilität (c) sowie die höhere Anzahl an nötigen Einstellungsschritten bis zur Erfüllung des Konvergenzkriteriums der Staircase-Prozedur (d) in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund gegenüber der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund deuten darauf hin, dass den Versuchspersonen die Aufgabe der „visuellen Interpolation“ in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund schwerer fiel als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund.

3.2.2.3 Diskussion

Die in der Abbildung 3.13 dargestellten interpolierten Bewegungspfade, die für beide untersuchten Bedingungen jeweils aus den gemittelten Daten über alle Versuchspersonen rekonstruiert wurden, unterscheiden sich auf den ersten Blick nur geringfügig. Die im vorigen Abschnitt vorgestellte detailliertere Datenanalyse deutet jedoch darauf hin, dass in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund – wie vorhergesagt – allgemein betragsmäßig größere Geschwindigkeitsänderungen als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund wahrgenommen wurden. Es ist deshalb nicht unplausibel, anzunehmen, dass die visuell interpolierte Bewegung den Beobachtern in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund weniger glatt bzw. ruckartiger erschien als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass die Unterschiede in den Absolutbeträgen der wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderungen zwischen beiden Bedingungen unter anderem auch darauf zurückzuführen sind, dass den Versuchspersonen die Aufgabe der „visuellen Interpolation“ in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund schwerer fiel als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund, wie die Daten

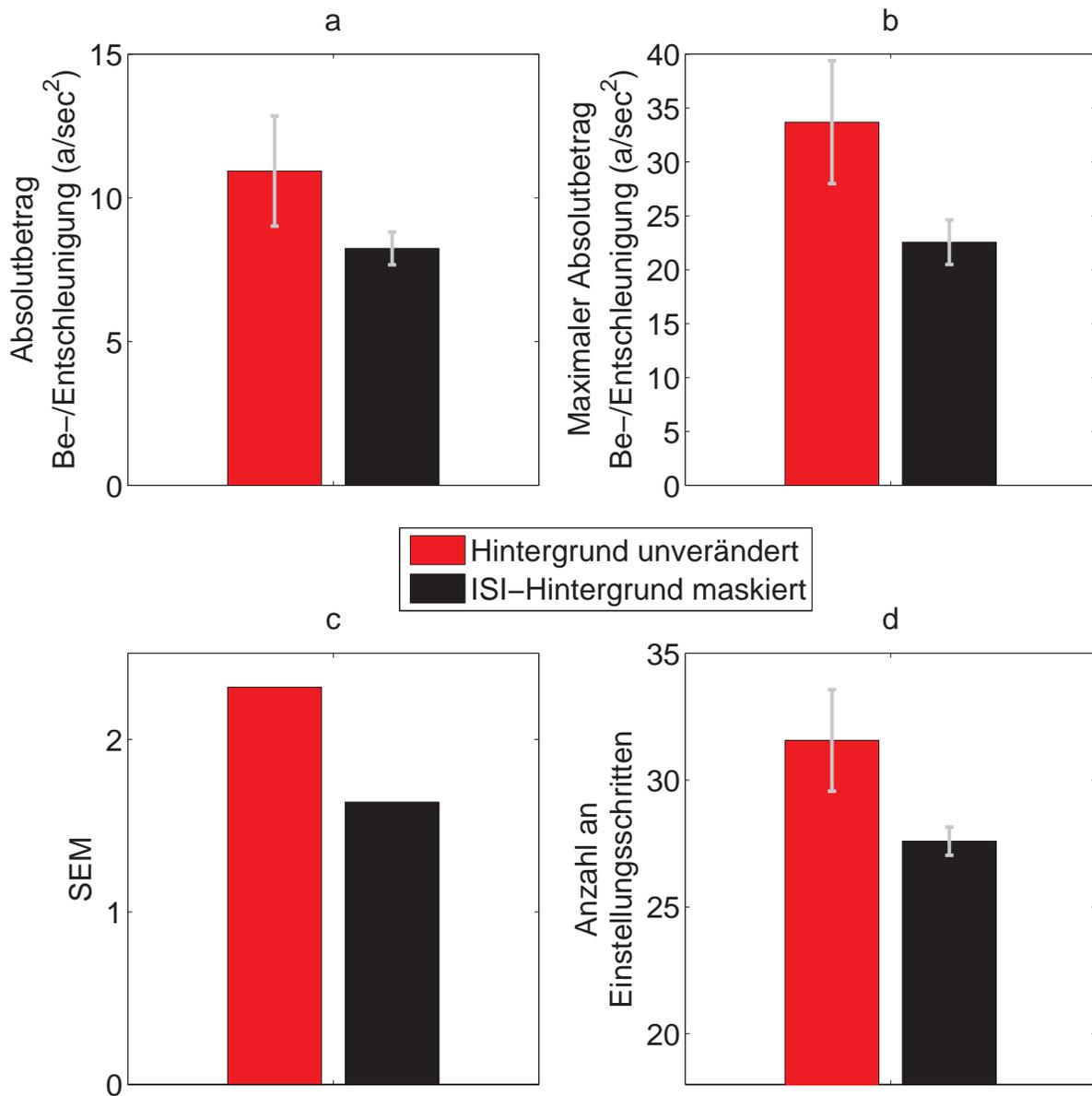


Abbildung 3.17: Zusammenfassung der Ergebnisse des Experiments II, jeweils für die Bedingung mit unverändertem Hintergrund (rot) und mit maskiertem ISI-Hintergrund (schwarz). **a)** Der Absolutbetrag der wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung, gemittelt jeweils über alle zwölf Messzeitpunkte der Testreiz-Einblendung und über alle elf Versuchspersonen. **b)** Der maximale Absolutbetrag der wahrgenommenen Geschwindigkeitsänderung, ermittelt für jede Versuchsperson und anschließend gemittelt. **c)** Der mittlere Standardfehler der je Bedingung zwölf Messzeitpunkte in Abbildung 3.13. **d)** Die Anzahl der nötigen Einstellungsschritte bis zur Konvergenz der Staircase-Prozedur, gemittelt jeweils über alle zwölf Messzeitpunkte und über alle Versuchspersonen. Die Fehlerbalken in a, b und d repräsentieren ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

in Abbildung 3.17d nahelegen.

Grundsätzlich erfordern Urteile über die Position eines diskret bewegten Reizes während dessen Abwesenheit (d. h. während des ISIs) eine raumzeitliche Interpolation, die in der Regel weniger glatt erfolgt als bei kontinuierlich-stetigen („natürlichen“) Bewegungsreizen. Es wäre deshalb zu erwarten, dass die Urteile präziser ausfallen, wenn eine stabile perzeptuelle Repräsentation des Bewegungspfades durch das visuelle System erzeugt wird (Burr, 1979, S. 836). Nach dieser Logik deuten die Ergebnisse des Experiments darauf hin, dass die Bewegungsinterpolation in den Experimentalbedingungen aufgrund der Maskierung des ISI-Hintergrunds erleichtert/verbessert wurde.

Eine mögliche Erklärung hierfür wäre eine je nach Bedingung veränderte Deutung der Szene durch das Wahrnehmungssystem: Während das Erscheinen/Verschwinden eines Zielreizes an unterschiedlichen Positionen im Raum – wie in der Experimentalbedingung mit unverändertem Hintergrund – vom Wahrnehmungssystem auch so gedeutet werden könnte, dass sich jedesmal ein neues Objekt „materialisiert“ und „dematerialisiert“, wäre bei gleichzeitigem Erscheinen/Verschwinden des Hintergrunds – wie in der Experimentalbedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund – die Annahme, dass ein und dasselbe Objekt kontinuierlich existiert und sich hinter einer Maske⁷ fortbewegt, nicht unplausibel. Die fortdauernde perzeptuelle Existenz des Objekts erfordert jedoch eine Art „amodaler“ Bewegungsinterpolation während der ISIs (vgl. „Tunneleffekt“; Burke, 1952, S. 138), die bei geeigneten raumzeitlichen Parametern ausgesprochen glatt erscheinen kann (ebd., Abbildung 1, S. 123). Demgegenüber wäre es kaum verwunderlich, dass die bei diskreten Bewegungsreizen auftretenden Sampling-Artefakte, die nicht auf Verdeckung/Maskierung zurückgeführt und somit kompensiert werden können, in eher ruckartig wahrgenommenen Bewegungen resultieren.

3.2.3 Experiment III

Die Ergebnisse der Experimente I und II sind konsistent mit der Hypothese, dass die Bewegungsinterpolation in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund, in der das zyklische Erscheinen/Verschwinden des Zielreizes auf Verdeckung zurückgeführt werden kann, wodurch eine „amodale“ Bewegungsinterpolation ermöglicht wird, besser ist als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund. Demzufolge wäre das Vorhandensein bzw. Fehlen von Verdeckungshinweisen der kritische Faktor für die Unterschiede zwischen den Bedingungen. Da dieser Faktor jedoch nicht isoliert auftritt, können mögliche Alternativerklärungen nicht von vornherein ausgeschlossen werden. Beispielsweise enthält lediglich die Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund globale Veränderungen im Reiz, also Veränderungen zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Frames, die nicht auf die unmittelbare Umgebung des bewegten Zielreizes beschränkt sind. Diese globalen Veränderungen könnten zu einer Verschiebung der Aufmerksamkeit vom bewegten Zielreiz hin zu anderen Bereichen der Szene führen, wodurch die Sampling-Artefakte möglicherweise weniger auffällig wären. Ein weiterer konfundierender Faktor in den ersten beiden Experimenten war, dass sich die Reize in den beiden Bedingungen während des ISIs in der mittleren Luminanz und im mittleren Kontrast unterschieden. Mit diesem dritten Experiment sollte versucht werden, zu bestimmen, welche dieser Reizvariablen – und welche möglichen anderen – den Glättungseffekt hervorrufen.

3.2.3.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Es wurden ähnliche Reize wie in Experiment I verwendet. Zusätzlich zu den in Experiment I verwendeten Hintergründen (3.18a und b) wurden drei weitere Hintergrundtypen zur Reizerzeugung herangezogen (3.18c–e). Jeder dieser fünf Typen konnte sowohl während der Darbietung des Zielreizes als auch während des ISIs als Hintergrund genutzt werden, woraus sich $5 \times 5 = 25$ mögliche Kombinationen ergaben, von denen alle untersucht wurden bis auf die Kombinationen c/d, d/c und c/e, e/c.

⁷oder während einer Phase der „Dunkelheit“

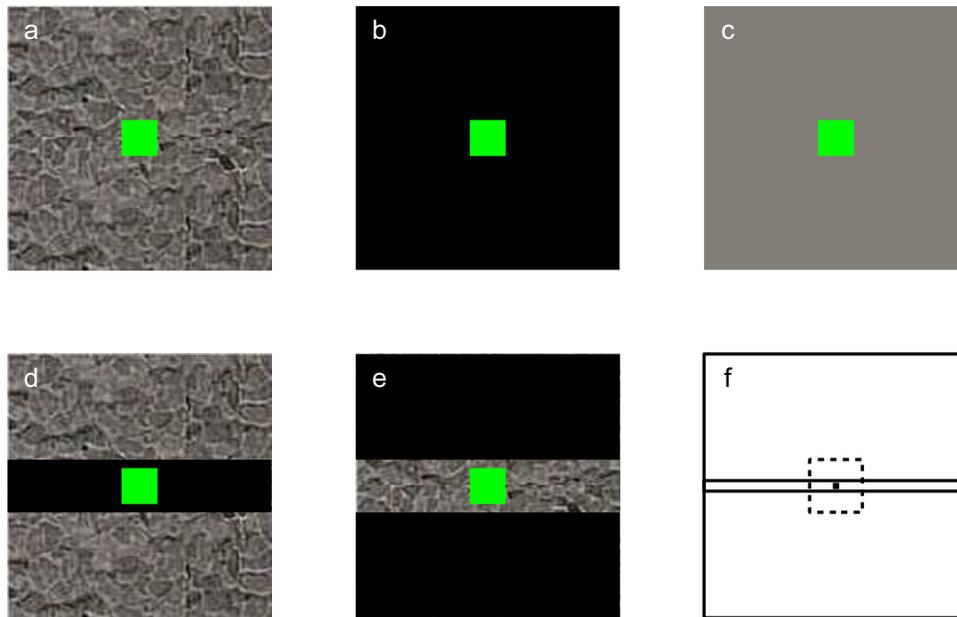


Abbildung 3.18: Reize in Experiment III. **a, b)** Texturierter und homogen schwarzer Hintergrund wie in Experiment I. **c)** Homogen grauer Hintergrund mit einer Luminanz, die der durchschnittlichen Luminanz des Hintergrunds in **a** entspricht. **d, e)** „Gestreifte“ Varianten der Hintergründe in **a** und **b** mit einer Streifenbreite von ca. $1,5a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes). **f)** Maßstabgetreue Skizze der Reize, die verdeutlichen soll, dass die Tafeln **a–e** nur einen Ausschnitt des eigentlichen Reizes zeigen (gestrichelt umrandetes Quadrat). Hinweis: Der grüne Zielreiz war während der ISIs nicht sichtbar.

Versuchsplan. Es wurden ausschließlich die Hintergründe während der Darbietung des Zielreizes sowie während des ISIs variiert, so dass sich die 21 unterschiedlichen Bedingungen allein anhand der jeweiligen Kombination der zwei verwendeten Hintergrundtypen (gemäß Abbildung 3.18a–e) beschreiben lassen. Wie in Experiment II wurde die Darbietungsdauer SD konstant bei 235 ms und das ISI konstant bei 329 ms gehalten. Die Bewegungsrichtung des Zielreizes war stets von links nach rechts. Jede Bedingung wurde zehnmal wiederholt, so dass insgesamt 210 Reizsequenzen – in pseudo-randomisierter Reihenfolge – zu absolvieren waren. Die Aufgabe der Versuchspersonen war dieselbe wie in Experiment I und bestand darin, nach Ablauf jeder Sequenz ihren Eindruck bezüglich der Kriterien „Bewegung des Zielreizes“ und „Sichtbarkeit des Zielreizes“ wiederzugeben.

Hypothese. Die Bewegung des Objekts wird als glatter bzw. weniger ruckartig wahrgenommen, wenn das Verschwinden/Erscheinen des Zielreizes plausibel auf Verdeckung zurückgeführt werden kann. Dies wäre in den Bedingungen a/b^8 , a/c , a/d , d/b und e/b sowie unter Umständen in den Bedingungen b/c und c/b zu erwarten.

Versuchsaufbau. Der Versuchsaufbau entsprach, abgesehen von den oben beschriebenen Abweichungen, dem in Experiment I.

Versuchsdurchführung. Die Versuchsdurchführung unterschied sich von der in Experiment I lediglich darin, dass die 210 Reizsequenzen in einem Block erhoben wurden.

⁸d. h. Hintergrund **a** während der Darbietung des Zielreizes und Hintergrund **b** während des ISIs; diese Bedingung entspricht der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund in Experiment I

Versuchspersonen. Zehn der elf Teilnehmer/innen des Experiments II nahmen an diesem Experiment teil.

3.2.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Die unterschiedlichen Reizbedingungen hatten praktisch keinen Einfluss auf die Dimension „Sichtbarkeit des Zielreizes“: Alle Versuchspersonen bis auf eine antworteten fast durchgängig, dass die Sichtbarkeit des Zielreizes zwischenzeitlich unterbrochen war. Die unterschiedlichen Reizbedingungen wirkten sich allerdings auf die wahrgenommene Bewegung des Zielreizes und somit auf die relativen Antworthäufigkeiten f_1 , f_2 , f_3 der Kategorien „Konstante Geschwindigkeit“, „Kontinuierliche Be-/Entschleunigung“ und „Ruckartige Sprünge“ aus. Speziell die Häufigkeit f_3 („Ruckartige Sprünge“) variierte stark und reichte je nach Bedingung von 10 % bis 65 %. Die Summe der Antworthäufigkeiten $f_1 + f_2$ der beiden anderen Antwortkategorien variierte entsprechend, da $f_1 + f_2 + f_3 \approx 1$ ⁹, allerdings variierte das Verhältnis $f_1/(f_1 + f_2)$ weniger stark und lag in allen Bedingungen zwischen 0,3 und 0,61. Die Häufigkeiten f_3 der Antwort „Ruckartige Sprünge“ sind in Abbildung 3.19 dargestellt. Die 21 Reizbedingungen sind nach der Antworthäufigkeit f_3 aufsteigend sortiert.

Die Bedingungen Nr. 2 und Nr. 18 sind Replikationen der maskierten ISI-Bedingung bzw. der Bedingung mit unverändertem Hintergrund in Experiment I, jeweils für die temporalen Parameter $SD = 235$ ms und $ISI = 329$ ms (vgl. Abbildung 3.5, untere Reihe, mittlere Spalte). In Experiment I sank die Häufigkeit der Antwort „Ruckartige Sprünge“ von 43 % auf 7 %, wenn der Hintergrund während des ISIs markiert wurde. Ein ähnlicher Rückgang (von 61 % auf 13 %) konnte auch in diesem Experiment beobachtet werden.

Im folgenden sollen verschiedene Alternativerklärungen für den Glättungseffekt diskutiert und deren Plausibilität auf Basis der erhobenen Daten eingeschätzt werden. Als Referenz dient hierbei die wahrgenommene Ruckartigkeit der Bewegung in der Bedingung Nr. 18.

Eingeschränkte Aufmerksamkeit durch synchrone Änderungen in Randregionen. Weil die Experimentalbedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund in Experiment I synchrone Änderungen des Hintergrunds enthielt, die in der Kontrollbedingung mit unverändertem Hintergrund nicht vorkamen, wäre es nicht unplausibel, anzunehmen, dass die Aufmerksamkeit in der Experimentalbedingung teilweise vom Zielreiz in Richtung der sich synchron ändernden Randregionen abgelenkt wurde. Yeshurun und Levy (2003) berichten von einem Experiment, in dem die Versuchspersonen die Qualität von diskreten Bewegungsreizen bewerten und deren Bewegungsrichtung angeben sollten. Wurden die Reize mit vorherigem Hinweis auf die folgende Bewegungsrichtung dargeboten, bewerteten die Versuchspersonen die Bewegungsqualität geringer und irrten häufiger in der Angabe der Bewegungsrichtung, als wenn kein Hinweis gegeben wurde. Die Autoren werten dies als Hinweis darauf, dass eine kurzzeitige Ablenkung der Aufmerksamkeit durch räumliche Störreize negative Auswirkungen auf die zeitliche Auflösung der Wahrnehmung haben kann. Es wäre möglich, dass auch in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund in den Experimenten I–III die Aufmerksamkeit für den diskreten Zielreiz verringert wurde und durch die verringerte zeitliche Auflösung die Unterschiede zu einem idealen, glatten Bewegungsreiz weniger auffielen, was eine bessere Bewegungsinterpolation zur Folge gehabt haben könnte.

Wäre dies die (alleinige) Erklärung für den hier beobachteten Glättungseffekt, hätte es signifikante Unterschiede in der wahrgenommenen Ruckartigkeit des Zielreizes geben müssen, je nachdem, ob die Randregionen unverändert blieben oder synchronen Änderungen unterworfen waren. Diese Unterschiede konnten allerdings nicht festgestellt werden, wie nachfolgende Vergleiche deutlich machen: Die Bedingungen Nr. 2 und 4 waren identisch bis auf synchrone Änderungen in den Randregionen, die nur die

⁹Wie in Experiment I wurde die Antwortmöglichkeit „Sonstiges“ vernachlässigbar selten (in weniger als 1 % der Fälle) ausgewählt.

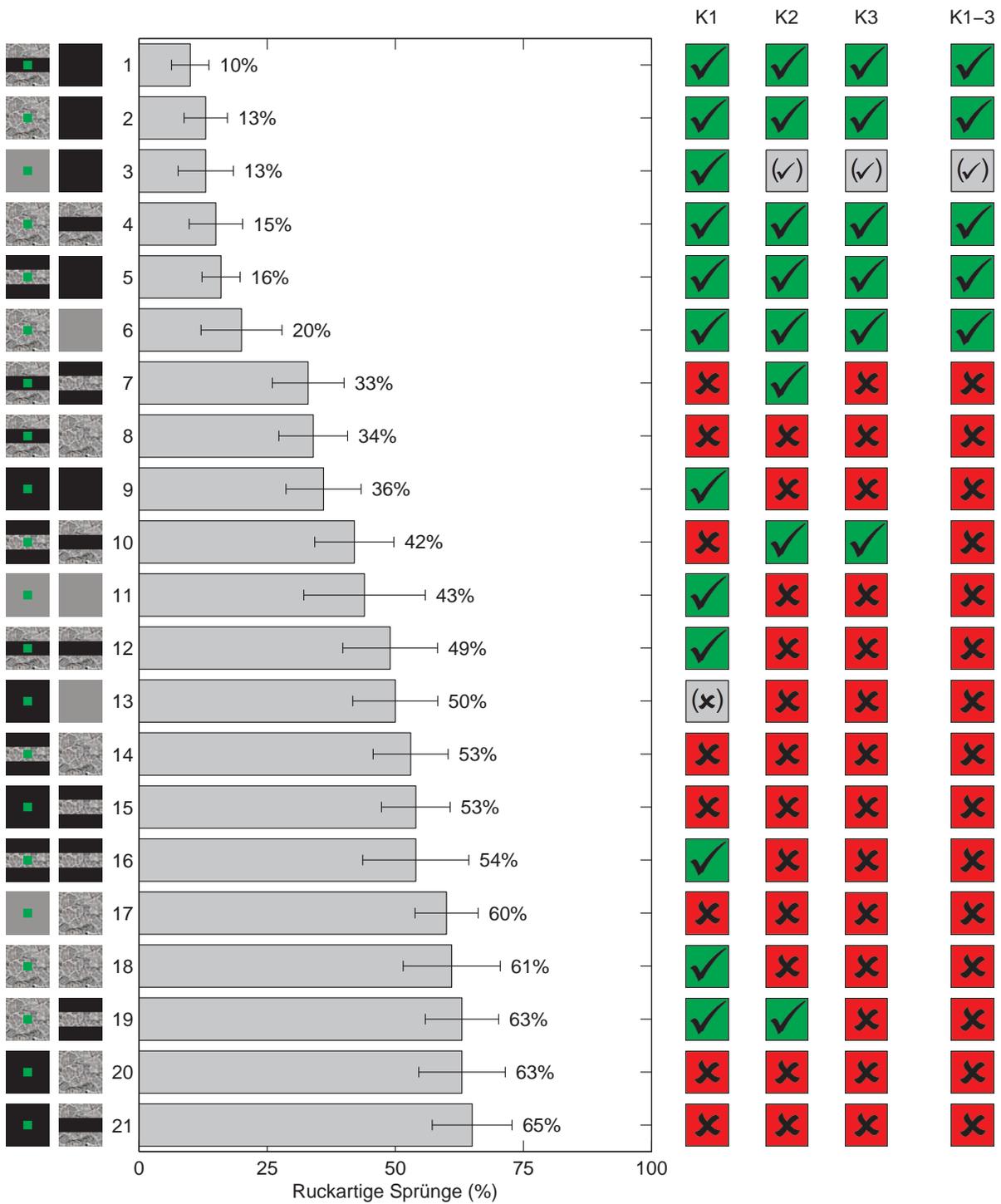


Abbildung 3.19: Häufigkeiten der Antwort „Abrupte Sprünge“ in Experiment III für alle 21 Reizbedingungen, die sich jeweils anhand von zwei Frames – während der Darbietung des grünen Zielreizes und während des ISIs – charakterisieren lassen (links). Die Bedingungen sind nach wahrgenommener Ruckartigkeit aufsteigend sortiert. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM. Die Symbole rechts geben an, ob die jeweilige Reizbedingung die Strukturkriterien K1, K2, K3 einzeln sowie K1–K3 sämtlich erfüllt (siehe S. 3.2.3.2).

Bedingung Nr. 2 enthielt; dennoch wurde die Bewegung in beiden Bedingungen als sehr glatt wahrgenommen. Auch die Bedingungen Nr. 18 und 19 waren identisch bis auf synchrone Änderungen in den Randregionen, die nur die Bedingung Nr. 19 enthielt; dennoch wurde die Bewegung in beiden Bedingungen als ruckartig wahrgenommen. Globale Änderungen in Regionen außerhalb des Bewegungspfades des Zielreizes sind deshalb weder notwendig noch hinreichend für die beobachteten Unterschiede hinsichtlich der wahrgenommenen Ruckartigkeit zwischen den verschiedenen Reizbedingungen.

Synchrone Änderungen entlang des Bewegungspfades. Synchrone Änderungen im Bereich des horizontalen Streifens, der in einigen Bedingungen den Bewegungspfad des Zielreizes umgab (Abbildung 3.18d und e), sind ebenfalls weder notwendig noch hinreichend für einen glatten Bewegungseindruck: Berücksichtigt man, dass die Bewegung in den Bedingungen Nr. 1 und 2 als sehr glatt wahrgenommen wurde, obwohl nur die letztere der beiden Bedingungen Änderungen entlang des Streifens um den Bewegungspfad des Zielreizes herum enthielt, wird deutlich, dass solche Änderungen nicht notwendig für den Glättungseffekt sein können. Sie können auch nicht hinreichend sein, wie die Bedingung Nr. 20 zeigt, die ein ruckartiges Bewegungserzept hervorrief, obwohl sie (unter anderem) Änderungen in der zentralen Region entlang des Bewegungspfades des Zielreizes enthielt.

Texturierter vs. homogener ISI-Hintergrund. Eine mögliche Erklärung für die wahrgenommenen Unterschiede hinsichtlich der Bewegungsqualität zwischen den Bedingungen wäre, dass visuelle Bewegung auf zwei Informationsquellen basiert, und zwar einerseits auf Positionssignalen relativ zum Hintergrund und andererseits auf reinen Bewegungssignalen. Diskrete Bewegungsreize könnten demnach als ruckartig wahrgenommen werden, wenn die Positionssignale die reinen Bewegungssignale – die zu einem glatten Bewegungserzept führen müssten – dominieren, und als glatter im umgekehrten Fall. Bei der Darbietung eines diskreten Bewegungsreizes vor einem konstanten, homogenen statt eines texturierten Hintergrunds gäbe es praktisch keine (relativen) Positionssignale, womit der Glättungseffekt in Experiment I erklärt werden könnte. Die Ergebnisse des Experiments III deuten jedoch darauf hin, dass die Homogenität der zentralen Region entlang des Bewegungspfades des Zielreizes während des ISIs allein keine hinreichende Bedingung für den Glättungseffekt sein kann, da die Bewegung in Bedingung Nr. 21 trotz des homogenen Streifens als stark ruckartig wahrgenommen wurde. Ebenso scheint die *globale* Homogenität des ISI-Hintergrunds nicht hinreichend für den Glättungseffekt zu sein, sonst wäre in Bedingung Nr. 13 ein glatteres Bewegungserzept zu erwarten gewesen.

Eine interessante Beobachtung ist allerdings, dass die sechs Bedingungen, in denen der Glättungseffekt am stärksten auftrat (Bedingungen Nr. 1–6), stets einen homogenen ISI-Hintergrund zumindest entlang des Streifens um den Bewegungspfad herum enthielten. Deshalb wäre es, obwohl ein möglicher Wettstreit zwischen relativen Positions- und reinen Bewegungssignalen nicht sämtliche Befunde dieses Experiments erklären kann, nicht unplausibel, anzunehmen, dass die wahrgenommene Ruckartigkeit von (diskreten) Bewegungssignalen dadurch zumindest beeinflusst wurde.¹⁰

Luminanz- und Kontrastunterschiede zwischen Zielreiz und ISI-Hintergrund. Ein Unterschied zwischen den beiden Bedingungen in Experiment I lag in der Luminanzdifferenz zwischen Zielreiz und ISI-Hintergrund, die in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund größer war als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund. Die Ergebnisse des Experiments III zeigen jedoch, dass unterschiedliche Luminanzdifferenzen keine entscheidende Bedeutung für den Glättungseffekt haben: Obwohl die Differenz zwischen der Luminanz des Zielreizes und der mittleren Luminanz des ISI-Hintergrunds in den Bedingungen Nr. 6 und 18 identisch war, wurde die Bewegung in der letzteren Bedingung dreimal so häufig als ruckartig wahrgenommen. Ähnliches gilt für die Bedingungen Nr. 2 und 21, in denen die

¹⁰Dieser Hinweis stammt von einem anonymen Gutachter des Manuskripts von Scherzer und Ekroll (2009).

Luminanzdifferenz – im Bereich des Bewegungspfades des Zielreizes – ebenfalls identisch war, jedoch die Bewegung in der letzteren Bedingung fünfmal so häufig als ruckartig wahrgenommen wurde.

Weil der Zielreiz stets homogen gefärbt war, traten Differenzen zweiter Ordnung (Kontrastunterschiede, sog. Kontrastkontraste) zwischen Zielreiz und ISI-Hintergrund immer dann auf, wenn der ISI-Hintergrund texturiert war. Die Ergebnisse des Experiments I könnten daher so gedeutet werden, dass fehlende Kontrastunterschiede den Glättungseffekt hervorriefen. Weil diese Kontrastunterschiede nur in Bedingungen mit homogenem ISI-Hintergrund (bezogen auf den Bereich des Bewegungspfades des Zielreizes) nicht auftraten, können prinzipiell dieselben Schlussfolgerungen wie im vorigen Abschnitt gezogen werden. Demzufolge wäre das Fehlen von Kontrastunterschieden zwischen Zielreiz und ISI-Hintergrund zwar keine hinreichende Bedingung für den Glättungseffekt, jedoch möglicherweise eine notwendige.

Hintergrundszene und Störungen der Sichtbarkeit. Zwei zyklisch alternierende Frames eröffnen dem Wahrnehmungssystem eine Vielzahl von Interpretationsmöglichkeiten. Eine mögliche Interpretation wäre zum Beispiel, dass zwei völlig unterschiedliche Szenen, die nichts miteinander zu tun haben, abwechselnd erscheinen und verschwinden. Alternativ könnte aber auch eines der beiden Frames als Hintergrundszene aufgefasst werden, deren Sichtbarkeit wiederholt durch einen externen Faktor gestört wird. Es ist anzunehmen, dass die Struktureigenschaften der beiden Frames bestimmen, ob eine solche Segmentierung erfolgt und welches der beiden Frames als Hintergrundszene und welches als Störung kategorisiert würde. Enthält beispielsweise ein Frame Struktur (hier meist: Textur), die im anderen Frame fehlt, ist es plausibel, anzunehmen, dass das erstere Frame eher als Szene kategorisiert wird und das letztere eher als Störung.

Wenn ein Zielreiz in demjenigen Frame enthalten ist, das eher als Hintergrundszene kategorisiert wird, könnte die Ein- und Ausblendung des Zielreizes auf die synchrone Aus- und Einblendung einer (globaleren) Störung zurückgeführt werden, die sich auf den Zielreiz und angrenzende Bildregionen auswirkt. Unter dieser Annahme würde die Alternativerklärung, dass sich der Zielreiz plötzlich „materialisiert“ bzw. „dematerialisiert“, überflüssig; statt dessen existierte das bewegte Objekt auch während der Störungen weiter und beanspruchte eine perzeptuelle Interpolation über die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken hinweg. Demzufolge müsste der Glättungseffekt auftreten, wann immer das ISI-Frame in charakteristischer Weise als Störung des Frames mit dem Zielreiz aufgefasst würde. Es ist nicht unplausibel, anzunehmen, dass hierfür folgende drei Kriterien erfüllt sein müssen:

1. Kriterium K1 („Kein Strukturgewinn“). Der ISI-Hintergrund enthält keine Struktur, die nicht schon im Hintergrund des Frames mit dem Zielreiz enthalten war.
2. Kriterium K2 („Strukturverlust“). Der Hintergrund im Zielreiz-Frame enthält Struktur, die nicht im ISI-Hintergrund enthalten ist.
3. Kriterium K3 („Zielreiz-Umschließung“). Der Strukturverlust (Kriterium K2) tritt in unmittelbarer Umgebung des Zielreizes auf.

Der Abbildung 3.19 ist zu entnehmen, dass diese Kriterien sämtlich in denjenigen Bedingungen erfüllt wurden, in denen der Glättungseffekt am stärksten auftrat (Bedingungen Nr. 1–6), und in keiner der übrigen Bedingungen, in denen die Bewegung teilweise deutlich häufiger als ruckartig beurteilt wurde. Die Daten bestätigen somit die Hypothese.

Abschließend sei zur Bedingung Nr. 3 noch folgendes angemerkt: Es mag auf den ersten Blick unverständlich erscheinen, warum die Kriterien K2 und K3 in der Bedingung Nr. 3 als erfüllt betrachtet werden, obwohl bereits das Frame mit dem Zielreiz keine Textur enthielt und folglich beim Wechsel zum ISI-Frame kaum Struktur verlieren konnte. Berücksichtigt man jedoch, dass der Bildschirm außerhalb der zentralen Zeichenfläche, innerhalb derer die eigentliche Szene dargeboten wurde, homogen

schwarz war, enthielt das Zielreiz-Frame mehr Struktur – nämlich neben dem kleinen grünen Zielreiz einen grauen Hintergrund in schwarzem Umfeld – als das ISI-Frame, in dem der Bildschirm vollständig schwarz war.

Zusammenfassung. Einige der beschriebenen Faktoren scheinen isoliert betrachtet die wahrgenommene Bewegungsqualität zu beeinflussen, die vergleichende Betrachtung verschiedener Konfigurationen zeigt jedoch, dass diese keine befriedigende Erklärung für den Glättungseffekt bieten. Dagegen scheint eine sich auf abstraktere Prinzipien beziehende Sichtweise, die auf der Einteilung der Szene in Vorder- und Hintergrund sowie auf der externen Störung der Sichtbarkeit der Szene basiert, die wesentlichen Beobachtungen in angemessener Weise erklären zu können. Gemäß dieser Sichtweise bestimmen die strukturellen Beziehungen zwischen dem Zielreiz-Frame und dem ISI-Frame, welches der beiden Frames durch das visuelle System als Szene und welches als Störung kategorisiert wird.

3.2.4 Diskussion

Die Experimente I–III deuten darauf hin, dass die perzeptuelle Interpolation eines diskret bewegten Zielreizes verbessert, d. h. geglättet werden kann, wenn der Hintergrund synchron mit den Ein- und Ausblendungen des Zielreizes in geeigneter Weise verändert wird.

In Experiment I wirkte sich die Verdeckung des ansonsten texturierten ISI-Hintergrunds mit einer schwarzen Maske sowohl auf die Sichtbarkeit als auch auf die Bewegungsqualität des Zielreizes aus, welcher dann weniger ruckelte und seltener flackerte und statt dessen glatter bewegt bzw. häufiger dauerhaft sichtbar erschien. Die Verringerung des Flackerns konnte vor allem bei kurzen ISIs (bis etwa 235 ms) beobachtet werden, während die Glättung der Bewegung eher bei längeren ISIs (ab etwa 329 ms) auftrat. Ob sich der positive Einfluss auf die Sichtbarkeit des Objekts in einer eher modalen oder amodalen Fortsetzung desselbigen manifestierte, lässt sich mit der verwendeten Methode nicht eindeutig klären. Die gewählten Kategorienbezeichnungen und die eigene Introspektion legen aber nahe, dass auch die Versuchspersonen mit dem Urteil der „dauerhaften Sichtbarkeit“ anstelle von „Flackern“ tatsächlich eine stabile modale Präsenz des verdeckten Objekts meinten. Weil die Bedingungen für modale Präsenz trotz Verdeckung und deren Bedeutung im folgenden Kapitel noch eingehend untersucht werden, soll in diesem Kapitel nicht näher darauf eingegangen und der Fokus primär auf den Glättungseffekt gerichtet werden.

In Experiment II wurde geprüft, ob der Glättungseffekt – anders als in Experiment I, in dem die Versuchspersonen subjektive Bewertungen hinsichtlich der Bewegungsqualität des Zielreizes abgaben – auch mit einer indirekten Messmethode nachgewiesen werden kann, bei der die wahrgenommene Position des Zielreizes zu einem bestimmten Zeitpunkt über die Position eines gleichzeitig dargebotenen Testreiz-Blitzes bestimmt wird. Die Datenanalyse zeigt, dass die betragsmäßigen Geschwindigkeitsänderungen in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund als signifikant größer als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund wahrgenommen wurden. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die wahrgenommene Bewegung in der letzteren Bedingung ruckartiger erschien. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass die Unterschiede zwischen den beiden untersuchten Bedingungen auf einen anderen Effekt zurückzuführen sind, nämlich auf eine größere Unsicherheit der Versuchspersonen bei der Interpolationsaufgabe in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund. Darauf deutet sowohl die größere Variabilität zwischen den Versuchspersonen als auch die Anzahl der notwendigen Schritte bis zur Erfüllung des Konvergenzkriteriums der Staircase-Prozedur hin, die in dieser Bedingung jeweils größer als in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund war. Eine Schwäche der verwendeten Messmethode könnte darin liegen, dass die Interpolationsaufgabe möglicherweise nicht allein auf Basis des unmittelbaren Wahrnehmungseindrucks, sondern auch auf Basis bewusster kognitiver Inferenzen erfolgte. Es wäre von vornherein nämlich durchaus plausibel, anzunehmen, dass der resultierende interpolierte Bewegungspfad in beiden Fällen ähnlich wäre. Allerdings wäre zugleich zu erwarten, dass die Interpolations-

tion präziser und zwischen den Versuchspersonen konsistenter ausfallen müsste, wenn sie auf Basis des unmittelbaren perzeptuellen Eindrucks statt auf Basis kognitiver Inferenzen erfolgte. Da die Präzision in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund höher war als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund, sind die Daten konsistent mit der Annahme, dass die Versuchspersonen in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund eher auf einen perzeptuellen Interpolationsmechanismus zur Bewältigung der Experimentalaufgabe zurückgreifen konnten als in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund, in der möglicherweise entsprechend verstärkt auf kognitive Inferenzprozesse zurückgegriffen wurde.

In Experiment III wurde untersucht, in welcher Weise der Glättungseffekt von den räumlichen Struktureigenschaften des Hintergrunds während der Darbietung des Zielreizes und während des ISIs abhängt. Die Erklärung, dass eingeschränkte Aufmerksamkeit durch Ablenkung aufgrund synchroner globaler Änderungen im Reiz den Glättungseffekt hervorrufen kann, wird nicht durch die Daten unterstützt. Ebenso wenig können einfache Reizvariablen wie die Homogenität des ISI-Hintergrunds sowie der Luminanzkontrast oder Differenzen zweiter Ordnung zwischen Zielreiz und ISI-Hintergrund den Glättungseffekt erklären. Die vielversprechendste Hypothese ist hier, dass der Glättungseffekt auftritt, wenn das ISI-Frame als externe Störung der Sichtbarkeit der eigentlichen Szene aufgefasst werden kann.

3.2.4.1 Lassen sich die Befunde durch Low-Level-Modelle erklären?

Zahlreiche Low-Level-Modelle der Bewegungsdetektion (vgl. Abschnitt 3.1) machen in erster Linie Vorhersagen darüber, *ob* Bewegung wahrgenommen wird, und nicht darüber, von welcher Qualität bzw. Glattheit diese ist. Prinzipiell lassen sich aus den Berechnungen von geeigneten Reichardt-ähnlichen Bewegungsdetektoren allerdings auch Vorhersagen über die Glattheit der Bewegung ableiten. So können beispielsweise raumzeitliche Energiemodelle (*Spatiotemporal Energy Models*, vgl. Adelson & Bergen, 1985), die sich auf Eigenschaften der Fourieranalyse raumzeitlicher Signale beziehen, nicht nur die Bewegung von kontinuierlichen wie diskreten Bewegungsreizen detektieren, sondern unterscheiden sich in ihren Ergebnissen auch je nach Abtastfrequenz der diskreten Bewegungsreize, woraus Vorhersagen über die mutmaßlich wahrgenommene Glattheit bzw. Ruckartigkeit der Reize möglich wären (ebd., S. 294 f.). Zwar trat der Glättungseffekt in den Experimenten I–III primär bei langen ISIs auf, welche vermutlich ohnehin außerhalb des temporalen Detektionsbereichs von Reichardt-ähnlichen Modellen liegen (vgl. z. B. van Doorn & Koenderink, 1982, S. 186), jedoch soll im folgenden mittels Simulation sowie anhand theoretischer Überlegungen verdeutlicht werden, dass der in den Experimenten beobachtete Glättungseffekt grundsätzlich nicht von solchen raumzeitlichen Energiemodellen vorhergesagt werden kann.

In der Abbildung 3.20 sind Beispielreize für beide Bedingungen aus Experiment I (a und b) und die korrespondierenden Simulationsergebnisse eines exemplarisch verwendeten raumzeitlichen Energiemodells zur Bewegungsdetektion (d und e) dargestellt (siehe Anhang A für Details). Anhand der Tafel f, die die Pixeldifferenz zwischen den beiden Simulationsergebnissen zeigt, wird deutlich, dass durch das Modell praktisch keine unterschiedlichen Vorhersagen über die Bewegung in beiden Bedingungen und somit auch nicht über die unterschiedlich wahrgenommene Bewegungsqualität gemacht werden.

Dies ist nicht verwunderlich, wenn man sich die allgemeine Funktionsweise der von Adelson und Bergen (1985) vorgeschlagenen raumzeitlichen Energiemodelle vor Augen führt: Weil die verwendeten richtungsselektiven Filter nahezu achsensymmetrisch – bezogen auf die Zeitachse als Symmetrieachse – arbeiten und die ISI-Maskierungen orthogonal dazu verlaufen (vgl. die horizontalen schwarzen Balken in der Abbildung 3.20b), verhält sich die ISI-Maskierung weitgehend neutral bezüglich der Output-Differenz von je zwei korrespondierenden links- und rechtssensitiven Filtern. Die Unterschiede zwischen den Bedingungen mit unverändertem und mit maskiertem ISI-Hintergrund können also nicht von raumzeitlichen Energiemodellen – und somit auch nicht von äquivalenten Reichardt-basierten Modellen (van Santen & Sperling, 1985; Watson et al., 1986) – vorhergesagt werden.

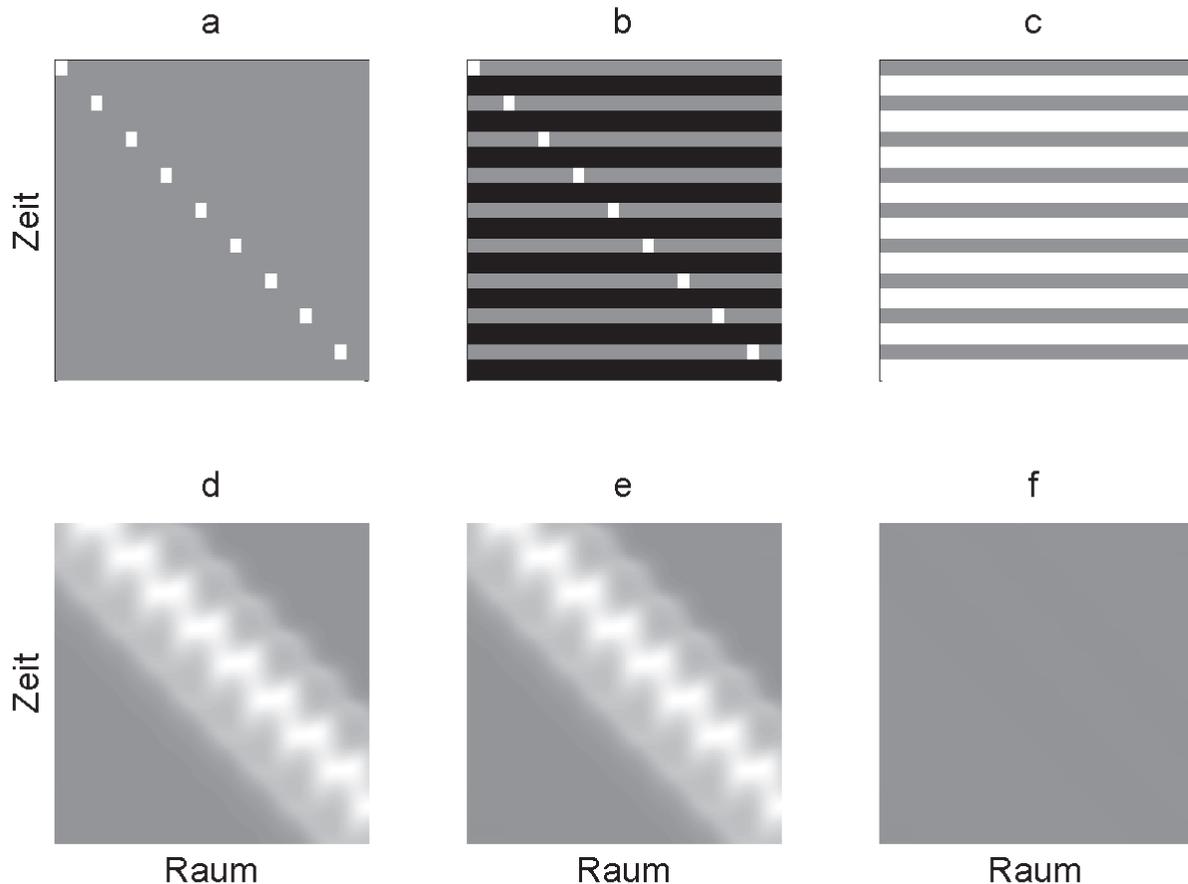


Abbildung 3.20: **a, b)** Raum-Zeit-Diagramme diskreter Bewegungsreize aus Experiment I (entsprechend der Bedingung mit unverändertem Hintergrund und der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund), die exemplarisch für die Simulation ausgewählt wurden ($SD = 235$ ms, $ISI = 329$ ms). **c)** Die Pixeldifferenz der beiden Raum-Zeit-Diagramme. Grau repräsentiert eine Differenz von Null. **d, e)** Die Simulationsergebnisse des raumzeitlichen Energiemodells, angewandt auf die Reize in a und b (siehe Text und Anhang A für Details). Grau repräsentiert keine detektierte Bewegung, Weiß repräsentiert detektierte Bewegung nach rechts. **f)** Die Pixeldifferenz der beiden Simulationsergebnisse. Grau repräsentiert eine Differenz von Null.

3.2.4.2 Die Bedeutung von Objektkantenzugehörigkeit in Raum und Zeit

Eine möglicherweise zielführendere Betrachtungsweise wäre, den Glättungseffekt als Ergebnis einer spezifischen Deutung des zyklischen Erscheinens und Verschwindens des Zielreizes durch das visuelle System aufzufassen. Das plötzliche Erscheinen und Verschwinden eines Zielreizes manifestiert jeweils Objektkanten in der zeitlichen Dimension („zeitliche Objektkante“), deren Zugehörigkeit maßgeblich die Interpretation der Szene bestimmen könnte. Aus der Literatur wohlbekannt sind bereits rein räumliche T-Kreuzungen und die Vorstellung der Objektkantenzugehörigkeit (vgl. Abschnitt 2.3.3.4), die sich als hilfreich für das Verständnis von amodaler Ergänzung im Raum erwiesen hat. Der wesentliche Gedanke ist dabei, dass eine Kante zwischen zwei Regionen im proximalen Reiz nur einem der zwei perzeptuellen Objekte, die zu den beiden Regionen im Reiz korrespondieren, zugeordnet werden kann, d. h., eine Kante im Reiz ist in aller Regel nur einem perzeptuellen Objekt zugehörig. Sobald jedoch eine Kante einem Objekt zugeordnet ist, gibt es kaum Anlass zu der Annahme, dass das andere Objekt zufällig ebenfalls exakt an dieser Stelle endet. Statt dessen erscheint es plausibler, anzunehmen, dass sich das eine Objekt hinter dem anderen weiter erstreckt. Die Zuordnung einer Kante zu einem Objekt bestimmt demnach unmittelbar, welches Objekt amodal hinter dem anderen fortgesetzt wahrgenommen wird.

Diese Logik könnte prinzipiell analog auf raumzeitliche Objektkanten und deren Zugehörigkeit im Raum angewandt werden, wenn das Erscheinen und Verschwinden des Zielreizes – wie in den Experimenten I–III – jeweils als raumzeitliche Kante aufgefasst würde: Würde eine Kante als dem Zielobjekt selbst zugehörig zugeordnet, wie es aufgrund der L-Kreuzungen in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund naheliegend wäre (vgl. Vergrößerung in Abbildung 3.4a, S. 65), deutete dies darauf hin, dass das Objekt „materialisiert“ bzw. „dematerialisiert“ würde. Würde eine Kante hingegen als einer Maske zugehörig zugeordnet, wie es aufgrund der T-Kreuzungen in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund naheliegend wäre (vgl. Vergrößerung in Abbildung 3.4b), deutete dies darauf hin, dass das Objekt vor dem Verschwinden der Maske bereits existierte und nur dessen Verdeckung aufgehoben würde, bzw. dass es nach dem Erscheinen der Maske fortexistierte und lediglich verdeckt würde, wodurch dessen Bewegung „amodal“ in Raum-Zeit interpoliert würde (Michotte et al., 1991). Solche raumzeitlichen T-Kreuzungen (Holcombe, 2002) könnten also in ähnlicher Weise auf die Bewegungswahrnehmung wirken wie rein räumliche T-Kreuzungen, wenn sie als lokale Hinweisreize für Verdeckung aufgefasst werden und somit Uneindeutigkeiten bezüglich der Zugehörigkeit zeitlicher Kanten zu Objekten auflösen.

Das in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund wahrgenommene zyklische Beschleunigen/Bremsen des Zielreizes stellte sich im Raum-Zeit-Diagramm als S-förmige Bewegungsinterpolation dar (gelbe Linie in Abbildung 3.4b). Hier zeigt sich eine gewisse Ähnlichkeit zu rein räumlicher Interpolation von kontinuierlichen Bewegungsreizen hinter einem Verdeckter (vgl. hierzu Burke, 1952, Abbildung 3A, S. 135). Diese Parallelität unterstützt die Annahme, dass den Interpolationsmechanismen im rein Räumlichen wie denen im Raumzeitlichen ähnliche Prinzipien zugrunde liegen könnten.

Aus dieser Perspektive wäre die kritische Variable, die die wahrgenommene Glattheit der Bewegungsinterpolation maßgeblich bestimmt, die zugeordnete Zugehörigkeit von raumzeitlichen Objektkanten. Die Daten, speziell aus Experiment III, deuten darauf hin, dass die strukturellen Beziehungen zwischen den Hintergründen der beiden alternierenden Frames die Zuordnung der Objektkantenzugehörigkeit beeinflussten. Enthielt der ISI-Hintergrund in unmittelbarer Umgebung des Zielreizes weniger Struktur als der Hintergrund während der Darbietung des Zielreizes, schienen die raumzeitlichen Objektkanten eher der ISI-Maske als dem Zielreiz zugehörig zugeordnet zu werden. Die Sinnhaftigkeit einer solchen Zuordnung ergäbe sich daraus, dass ein bestimmtes räumliches Muster, nämlich der texturierte Hintergrund, regelmäßig verschwindet und nach kurzer Zeit wiedererscheint, und dass daher die Annahme, es handele sich hierbei nicht um dieselbe Szene, hochgradig unplausibel wäre. Es bestünden vielmehr gute Gründe, das zwischenzeitliche Verschwinden auf einen externen Faktor wie Verdeckung/Maskierung zurückzuführen, womit auch das zyklische Erscheinen und Verschwinden des Zielreizes „erklärt“ wäre.

3.2.5 Zwischenfazit

Verdeckungshinweise können die Deutung einer Szene radikal ändern. Beispielsweise kann durch perzeptuelle Verdeckung der Eindruck von Bewegung unterdrückt (Sigman & Rock, 1974, Rock, 1997, S. 222 f.) oder hervorgerufen werden (Ramachandran, Inada & Kiama, 1986) oder die Bewegungsrichtung (z. B. Shimojo & Nakayama, 1990; Wallach, 1935) oder die Gruppierung von Elementen beeinflusst werden (Yantis, 1995). Die Ergebnisse der Experimente I–III deuten darauf hin, dass das Flackern und die Ruckartigkeit von diskreten Bewegungsreizen verringert wird, wenn die amodal fortdauernde Existenz des Objekts durch entsprechende Verdeckungshinweise unterstützt wird, und zeigen somit den Einfluss von Verdeckung auf einen weiteren Aspekt der Wahrnehmung, nämlich auf die wahrgenommene Qualität bzw. Glattheit von diskreten Bewegungsreizen.

Die vorliegenden Befunde scheinen mit Theorien und Modellen unvereinbar, die ausschließlich auf lokalen Reizmerkmalen basieren, und unterstützen theoretische Perspektiven, die die Wahrnehmung als Ergebnis heuristischer, abduktiver Prozesse auffassen, welche auch für die visuelle Bewegungsinterpo-

lation eine wichtige Rolle zu spielen scheinen. Darüber hinaus deuten die Befunde an, dass Verdeckung einen fördernden Einfluss auf das genuin modale Attribut der wahrgenommenen Glattheit von Bewegung ausüben kann.

3.3 Statische Maskierung diskreter Bewegungsreize

In den ersten drei Experimenten wurde der positive Einfluss dynamischer Maskierung in diskreten Bewegungsreizen auf die wahrgenommene Glattheit der Bewegungsinterpolation nachgewiesen. Dies lässt sich so deuten, dass der Glättungseffekt immer dann auftritt, wenn das Wahrnehmungssystem zeitliche Lücken im Reiz (ISIs) auf Verdeckung zurückführen kann. Trifft diese Deutung zu, so wäre es naheliegend, dass dieselben heuristischen Prinzipien ebenfalls zur Anwendung kommen, wenn rein *statische* Verdeckungshinweise *räumliche* Lücken zwischen aufeinanderfolgenden Positionen eines diskret bewegten Zielreizes erklären können. Auch in diesem Fall wäre also ein ähnlicher Glättungseffekt zu erwarten. Die Raum-Zeit-Diagramme solcher Reize mit statischen Verdeckungshinweisen wären strukturell im Prinzip lediglich transponierte Versionen der Raum-Zeit-Diagramme der in den vorherigen Experimenten verwendeten Reize, d. h. mit vertauschter räumlicher und zeitlicher Dimension.

Um diese Hypothese zu testen, wurden zwei weitere Experimente mit drei Typen von Reizen durchgeführt: 1. ohne statische Verdecker, die die räumlichen Lücken zwischen den Darbietungspositionen des Zielreizes erklären könnten, 2. mit statischen Verdeckern, die jeweils die Hälfte einer Lücke erklären könnten, und 3. mit statischen Verdeckern, die alle Lücken vollständig erklären könnten (Abbildung 3.21). In der Bedingung ohne Verdeckung wurde ein Zielreiz in diskreten Schritten vor einem Hintergrund dargeboten, so dass die Lücken zwischen aufeinanderfolgenden Darbietungspositionen unerklärt blieben (a). In der Bedingung mit partieller Verdeckung verdeckten schmale Streifen die Hälfte einer jeden Lücke und reduzierten so vermutlich die Menge der unerklärbaren Unterbrechungen im Pfad des Zielreizes (b). In der dritten Bedingung verdeckten breite Streifen die räumlichen Lücken vollständig und konnten auf diese Weise die Unterbrechungen im Pfad des Zielreizes möglicherweise ganz „erklären“ (c).

3.3.1 Experiment IV

3.3.1.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Es wurden ähnliche Reize wie in Experiment I verwendet; auch hier wurde das grüne Quadrat in diskreten Schritten über denselben texturierten Hintergrund wie in Experiment I bewegt. Anders als in Experiment I gab es jedoch keine Pause zwischen der Ausblendung des Zielreizes an der einen Position und dessen Einblendung an der darauffolgenden Position ($ISI = 0$ ms) und somit auch keine ISI-Maske, die die gesamte Szene wiederholt verdeckte. Statt dessen gab es drei Bedingungen, in denen die Lücken zwischen zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes entweder unverdeckt (Abbildung 3.21a), halb verdeckt (b) oder vollständig verdeckt waren (c). Nach Ablauf jeder Sequenz sollten die Versuchspersonen die Glattheit/Ruckartigkeit der Bewegung gemäß einer fünfstufigen Ordinalskala bewerten.

Versuchsplan. Insgesamt wurden drei Faktoren variiert:

1. Faktor „Verdeckung“ (V). Der Hintergrund in den Lücken zwischen je zwei Darbietungspositionen des Zielreizes war entweder unverdeckt, zur Hälfte verdeckt oder vollständig verdeckt (Abbildung 3.21).
2. Faktor „Darbietungsdauer“ (SD). Die Darbietungsdauer des Zielreizes an einer Position wurde in vier Stufen variiert: 47 ms, 94 ms, 141 ms, 188 ms. Weil es kein Inter-Stimulus-Intervall gab (ISI

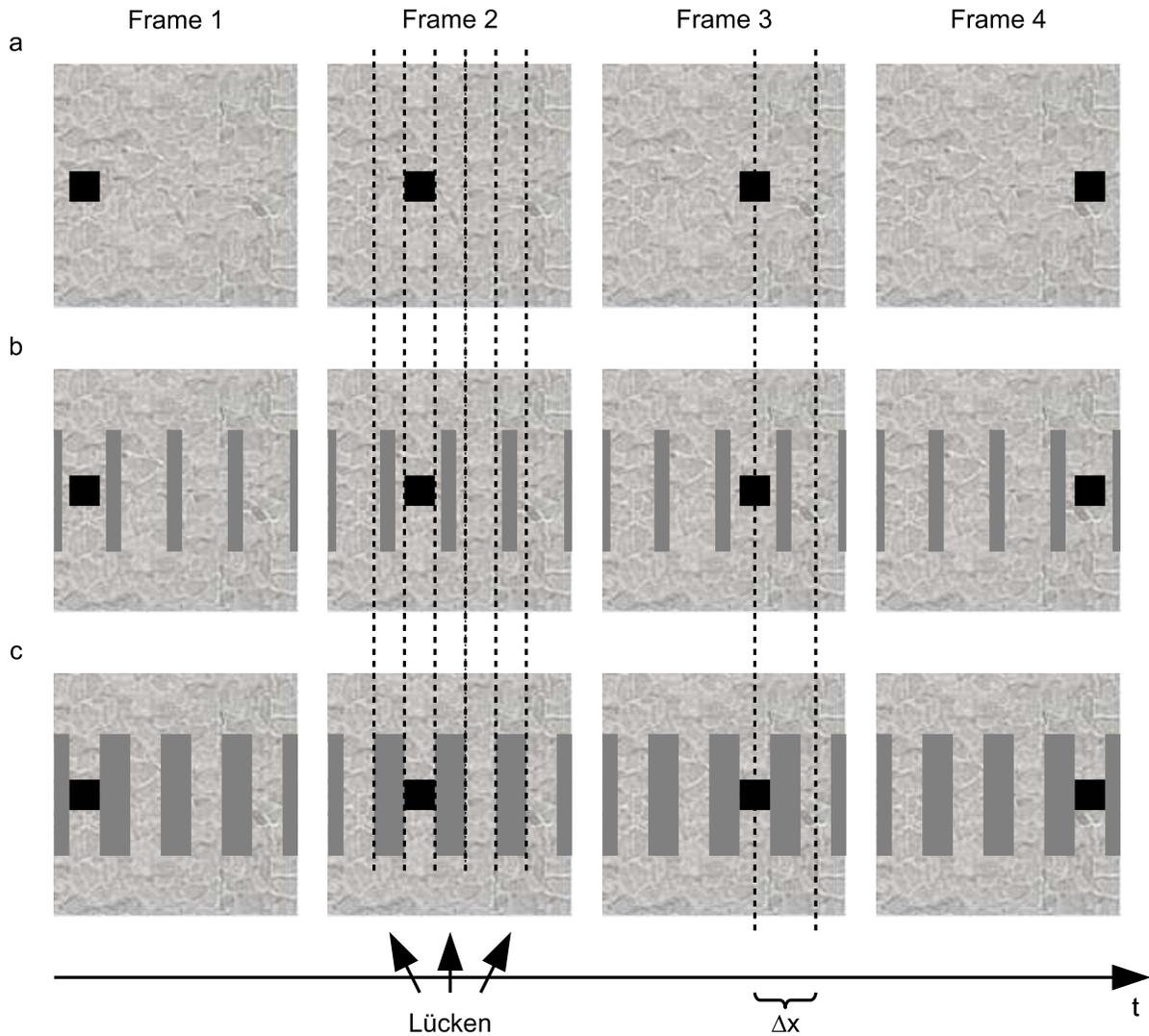


Abbildung 3.21: Diskrete Bewegungsreize in Experiment IV (Ausschnitt der Szene; nicht maßstabsgetreu). Ein quadratischer Zielreiz (schwarz) „bewegte“ sich von links nach rechts, d. h., er wurde in diskreten Schritten sukzessive versetzt. Drei Arten von Reizen wurden dargeboten: **a)** ohne Verdeckung, **b)** mit partieller Verdeckung und **c)** mit vollständiger Verdeckung (Füllung) der Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes. Im Experiment war – wie in Experiment I – der Zielreiz grün sowie der Hintergrund leicht rötlich und von stärkerem Kontrast als in dieser Abbildung.

= 0 ms), ist die Darbietungsdauer SD gleichbedeutend mit der *Stimulus Onset Asynchrony* (SOA).

3. Faktor „Lückenbreite“ (LB). Die Lückenbreite zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes betrug entweder $1a$, $2a$ oder $3a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes). Die Sprungweite Δx des Zielreizes, gemessen von Mittelpunkt zu Mittelpunkt, betrug dementsprechend $2a$, $3a$ bzw. $4a$.

Die unabhängigen Variablen V, SD und LB wurden vollständig gekreuzt, woraus sich $3 \times 4 \times 3 = 36$ unterschiedliche Reizsequenzen ergaben.

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, nach Ablauf der Sequenz ihren spontanen visuellen Eindruck der Bewegungsqualität gemäß den nachfolgenden Antwortkategorien K1–K5 anzugeben:

- Kategorie K1: Ruckartige Sprünge vor und zurück.
- Kategorie K2: Sprunghafte Vorwärtsbewegung mit kurzen Stopps.
- Kategorie K3: Recht glatte Vorwärtsbewegung mit kurzen Stopps.
- Kategorie K4: Recht glatte Vorwärtsbewegung, kontinuierlich.
- Kategorie K5: Sehr glatte Vorwärtsbewegung, kontinuierlich.

Die Antwortkategorien K1–K5 konstituierten somit eine ordinale „Glattheitsskala“ (1–5), in der höhere Werte einem glatteren Bewegungseindruck entsprachen. Eine zusätzliche Antwortkategorie – „Kein Bewegungseindruck“ – wurde von keiner Versuchsperson genutzt.

Hypothesen. Vor dem Hintergrund der hier zugrunde gelegten theoretischen Perspektive, die davon ausgeht, dass das Wahrnehmungssystem Interpretationen bevorzugt, die unerklärliche Reizeigenschaften minimieren, lassen sich folgende Hypothesen zum Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungsqualität ableiten:

1. Die Bewegung des Objekts wird in der Bedingung mit vollständig verdeckten Lücken als glatter, d. h. weniger ruckartig wahrgenommen als in der Bedingung mit unverdeckten Lücken.
2. Die wahrgenommene Bewegungsqualität in der Bedingung mit teilweise verdeckten Lücken sollte nicht besser als in der Bedingung mit vollständig verdeckten Lücken und nicht schlechter als in der Bedingung mit unverdeckten Lücken sein.

Darüber hinaus ergibt sich aus bekannten Gesetzmäßigkeiten der Scheinbewegung noch folgende Erwartung:

3. Die Bewegung des Objekts erscheint umso ruckartiger bzw. sprunghafter, je niedriger die räumliche und/oder zeitliche Auflösung des diskreten Bewegungsreizes, d. h., je höher die Sprungweite Δx (und somit die Lückenbreite LB) und/oder die Darbietungsdauer SD ist (Burr, 1979).

Versuchsaufbau. Es wurde dieselbe Ausstattung (Raum, Geräte etc.) wie in Experiment I verwendet (siehe Abschnitt 3.2.1.1 auf S. 67). Der Abstand der Versuchspersonen vom Bildschirm war in diesem Experiment etwas geringer als in den vorherigen Experimenten und lag bei ca. 80 cm, so dass die Kantenlänge a des Zielreizes diesmal etwa $0,35^\circ$ Sehwinkel betrug. Der Zielreiz bewegte sich vor demselben Hintergrund wie in Experiment I (Maße diesmal: ca. $13^\circ \times 13^\circ$ Sehwinkel) stets von links nach rechts. Wann immer er die Szene rechts verließ, erschien er links erneut, bis die Sequenz nach zehn Wiederholungen stoppte. Die in Abschnitt „Untersuchungsparadigma“ beschriebenen räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes waren je nach Bedingung entweder unverdeckt, dauerhaft zur Hälfte verdeckt oder dauerhaft vollständig verdeckt (Abbildung 3.21). Die Höhe der homogenen grauen Verdeckter betrug $4a$.

Versuchsdurchführung. Die Versuchspersonen sollten dem Zielreiz während einer Sequenz mit den Augen folgen und nach Ablauf der Sequenz die Bewegungsqualität des Zielreizes gemäß der im Abschnitt „Versuchsplan“ beschriebenen fünfstufigen Ordinalskala bewerten. Jede der 36 unterschiedlichen Sequenzen wurde von jeder Versuchsperson zehnmal bewertet. Die insgesamt 360 Sequenzen wurden in pseudo-randomisierter Reihenfolge dargeboten, aufgeteilt in drei Blöcke (zu je 120 Durchgängen), die jeweils ca. 15 bis 25 Minuten in Anspruch nahmen und zusammen an einem Termin erhoben wurden. Wie in den anderen Experimenten erfolgten im Vorfeld des Experiments allgemeine Instruktionen und einige Beispielsequenzen, damit sich die Versuchspersonen mit den Reizen und der Steuerung vertraut machen konnten.

Versuchspersonen. Am Experiment nahmen neun Student/innen im Grundstudium der Psychologie teil, die naiv bezüglich der Fragestellung waren und für die Teilnahme Versuchspersonenstunden (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“ auf S. 67) angerechnet bekamen. Alle Versuchspersonen waren normal-sichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen.

3.3.1.2 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3.22 zeigt, dass die mittleren Urteile der Versuchspersonen umso höher ausfielen, d. h., dass die Bewegung umso glatter wahrgenommen wurde, je vollständiger die Lücken verdeckt waren.¹¹ Generell wurde die glatteste Bewegung in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung und die ruckartigste Bewegung in der Bedingung ohne Verdeckung wahrgenommen. Der Unterschied war für jede einzelne der 4×3 Kombinationen aus SOA und Lückenbreite signifikant (einseitiger t-Test: $t(8) < -2,40$; $p < 0,05$). Die Beobachtungen entsprechen den Hypothesen 1 und 2 auf S. 91. Die Bewegungsqualität in der Bedingung mit partieller Verdeckung wurde, wie zu erwarten war, als besser/glatter als in der Bedingung ohne Verdeckung und als schlechter/ruckartiger als in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung beurteilt. Wie die Demonstration 1¹² zeigt, tritt der Glättungseffekt bei Verdeckung zusammen mit dem Eindruck eines amodal vervollständigten Objekts auf.

Es ist aus der Literatur bekannt, dass die wahrgenommene Glattheit von diskreten Bewegungsreizen mit abnehmender raumzeitlicher Abtastfrequenz beeinträchtigt wird (Burr, 1979, S. 836). Dieser Effekt ist auch in den vorliegenden Daten zu finden: Die Bewegungsqualität wurde mit zunehmender SOA und mit zunehmender Lückenbreite, d. h. mit abnehmender Abtastrate über Zeit und Raum, schlechter bewertet. Allerdings beeinträchtigte eine geringere Abtastrate über die Zeit nicht die Bewegungsqualität in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung der räumlichen Lücken, die möglicherweise als Erklärung für die Unterbrechungen im Bewegungspfad des Zielreizes herangezogen werden konnte. In der Bedingung mit partieller Verdeckung der Lücken, in der die Hälfte der Unterbrechungen im Bewegungspfad durch Verdeckung erklärt werden konnte, lag die mittlere Beurteilung der Bewegungsqualität zwischen den mittleren Beurteilungen in den Bedingungen mit vollständiger und ohne Verdeckung. Daraus ließe sich ableiten, dass der Effekt von Verdeckung auf die Glattheit diskreter Bewegungsreize nicht sprunghaft ab einer gewissen „Verdeckungsschwelle“ auftrat, sondern dass diese möglicherweise eher von den Lücken im Bewegungspfad, die nicht auf Verdeckung zurückgeführt werden konnten, abhing.

Diese Erklärung ist insofern noch unvollständig, als sie nicht die systematischen Unterschiede zwischen den verschiedenen SOA-Stufen berücksichtigt. Wie oben beschrieben, ist jedoch – unabhängig von Verdeckungshinweisen – davon auszugehen, dass die zeitliche Variable SOA einen Einfluss auf die wahrgenommene Bewegungsqualität hat. Es sollte deshalb überprüft werden, ob die Daten in ihrer Gesamtheit auf eine Kombination der zeitlichen Variable SOA und der räumlichen Variable „Größe der

¹¹Trotz der zugrunde liegenden Ordinalskala wurde hier der Mittelwert als Maß für die Glattheit der Bewegung herangezogen, weil sowohl die wiederholt erhobenen Messwerte je Sequenz und Versuchsperson als auch die Mittelwerte der Versuchspersonenurteile meist eine unimodale Verteilung bildeten. Zur ausführlichen Begründung siehe Anhang B.

¹²Internet-Adresse: <http://www.uni-kiel.de/psychologie/psychophysik/demos/interpolation/#S1>.

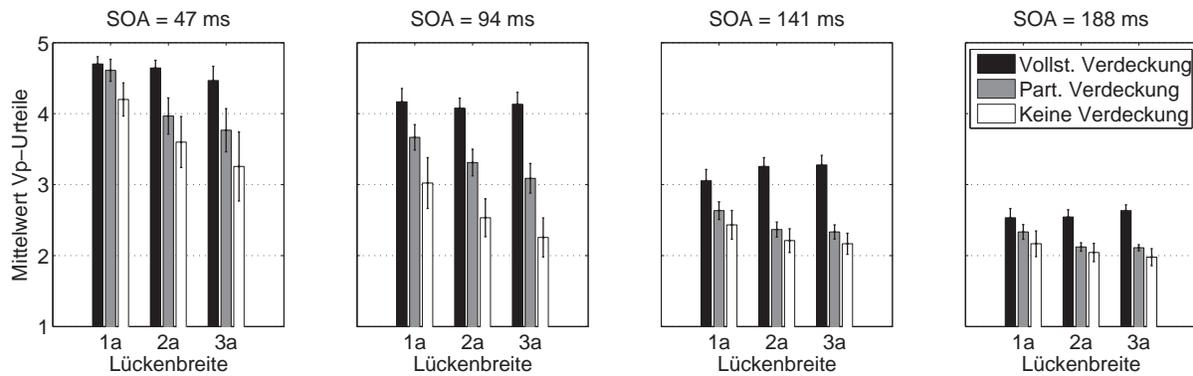


Abbildung 3.22: Ergebnisse des Experiments IV. Die Tafeln zeigen die mittlere Bewertung der Bewegungsqualität (1 = ruckartig; 5 = sehr glatt) durch die Versuchspersonen für unterschiedliche SOAs, Lückenbreiten zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes (angegeben als Vielfache der Kantenlänge a des Zielreizes) und Bedingungen (volle/partielle/keine Verdeckung). Die Daten zeigen den Glättungseffekt: Je größer der Verdeckungsanteil in den Lücken, desto glatter war die wahrgenommene Bewegung. Außerdem wurde die Bewegungsqualität mit zunehmender Lückenbreite als schlechter/ruckartiger wahrgenommen, es sei denn, die Lücken waren vollständig verdeckt (schwarze Balken). Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen. Außerdem zeigt sich eine zunehmende Beeinträchtigung der wahrgenommenen Bewegungsqualität mit wachsender SOA.

unerklärbaren Lücken im Bewegungspfad“ zurückgeführt werden können.

3.3.1.3 Modellierung

Abbildung 3.23 zeigt die Ergebnisse des Experiments (Balken) sowie die Vorhersagen eines Modells (Linien), das auf folgenden Annahmen basiert:

1. Bewegung wird als ruckartig wahrgenommen, wenn die SOA oder die Größe der unerklärbaren Lücken im Bewegungspfad – dies ist die Lückenbreite abzüglich der Breite des Verdeckers (so vorhanden) – „groß“ ist.
2. Die Wahrscheinlichkeit, einen diskreten Bewegungsreiz als diskontinuierlich, un stetig wahrzunehmen, ist eine monoton steigende Funktion f_z der zeitlichen Variable SOA sowie eine monoton

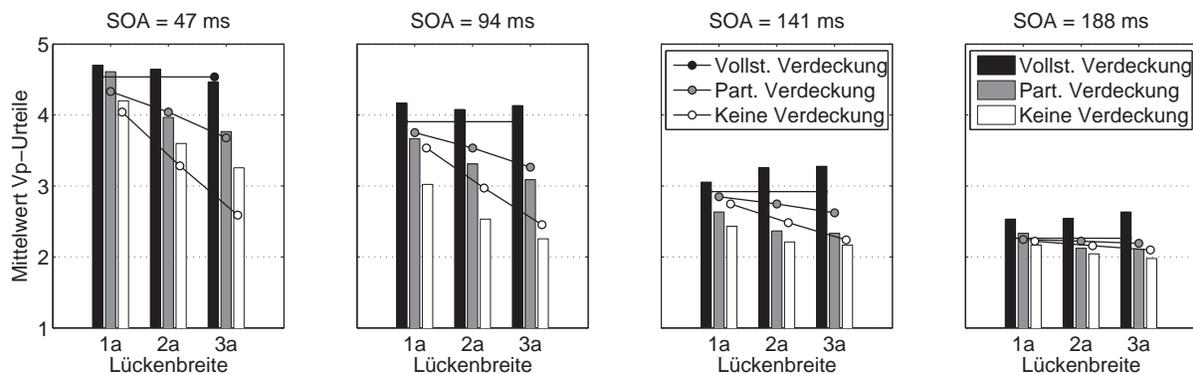


Abbildung 3.23: Dieselben Daten wie in Abbildung 3.22 (Balken) und die Vorhersagen des im Text beschriebenen Modells (Linien), das auf einer Kombination der beiden Variablen SOA und „Größe der unerklärbaren Lücken im Bewegungspfad“ basiert. Auf die Darstellung der Fehlerbalken wurde zugunsten einer besseren Lesbarkeit in dieser Abbildung verzichtet.

steigende Funktion f_r der räumlichen Variable „Größe der unerklärbaren Lücken im Bewegungspfad“.

Die Wahrscheinlichkeit P des Eintreffens mindestens eines der Ereignisse A oder B berechnet sich bekanntlich folgendermaßen:

$$P(A \vee B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B).$$

Daraus ergibt sich als Wahrscheinlichkeit $P(D)$, einen Bewegungsreiz als diskontinuierlich (D) zu klassifizieren:

$$P(D) = f_z + f_r - f_z \cdot f_r.$$

Die Bewertung G der Glattheit des Bewegungsreizes sollte gemäß der gewählten Ordinalskala (vgl. S. 91) positiv mit der Wahrscheinlichkeit $P(K)$, einen Bewegungsreiz als kontinuierlich (K) aufzufassen, korrelieren, wobei $P(K) = 1 - P(D)$. Für die Modellierung wurde unterstellt, dass der tatsächlich von den Versuchspersonen genutzte Bereich der „Glattheitskala“ die Wahrscheinlichkeiten $P(K)$ widerspiegelt. Seien u und o die unteren und oberen Grenzen des Bereichs der Skala, der tatsächlich von den Versuchspersonen genutzt wurde. Dann lässt sich die Bewertung der Glattheit G aus der Wahrscheinlichkeit $P(K)$ wie folgt ermitteln:

$$G = u + (o - u) \cdot P(K).$$

Bei der Modellanpassung wurden für f_z und f_r jeweils kumulative Gauß-Verteilungen angenommen, so dass das Modell neben den Parametern u und o zusätzlich die Mittelwerte μ_z und μ_r und die Standardabweichungen σ_z und σ_r der Gauß-Verteilungen als Parameter enthält. Die Modellvorhersage (Glattheit G) für eine gegebene SOA s und eine gegebene „Größe der unerklärbaren Lücken im Bewegungspfad“ g errechnet sich dann wie folgt:

$$G(s, g) = u + (o - u) \cdot \left[1 - \left(f_{z[\mu_z, \sigma_z]}(s) + f_{r[\mu_r, \sigma_r]}(g) - f_{z[\mu_z, \sigma_z]}(s) \cdot f_{r[\mu_r, \sigma_r]}(g) \right) \right].$$

$G(s, g)$ liefert eine Modellvorhersage für den Datenpunkt $X(s, g)$, wobei X das mittlere Urteil der Versuchspersonen angibt. Der Modellfehler in Abhängigkeit von s und g ist:

$$\Delta(s, g) = G(s, g) - X(s, g).$$

Es wurde ein iteratives Verfahren eingesetzt, um die Parameter μ und σ der Funktionen f_z und f_r zu bestimmen, für die die Summe der Fehlerquadrate $\sum_{s,g} \Delta(s, g)^2$ minimal ist. Es ergaben sich folgende Werte: $\mu_z \approx 119$ ms, $\sigma_z \approx 49$ ms, $\mu_r \approx 1,83a$, $\sigma_r \approx 1,37a$ ($a =$ Kantenlänge des Zielreizes).¹³ Die resultierenden kumulativen Gauß-Verteilungen f_z und f_r sind in Abbildung 3.24 dargestellt. Abbildung 3.23 vergleicht die entsprechenden Vorhersagen des Modells mit den Daten. Es zeigt sich, dass die Modellanpassung die wesentlichen Charakteristika der Daten angemessen abbildet. Dies spricht für die Plausibilität der eingangs genannten Annahmen, die der Modellierung zugrunde gelegt wurden.

3.3.2 Experiment V

Die Ergebnisse des Experiments IV zeigen, dass ein diskreter Bewegungsreiz glatter wahrgenommen wurde, wenn die räumlichen Lücken mit statischen Elementen, die als Verdeckter interpretiert werden konnten, gefüllt waren. Dies steht im Einklang mit der Annahme, dass Bewegung als glatter wahrgenommen wird, wenn Diskontinuitäten im Bewegungspfad, die sonst zu einem ruckartigen Bewegungseindruck führen, auf Verdeckung zurückgeführt werden können. Falls Verdeckungshinweise tatsächlich

¹³ μ_r und σ_r entsprechen bei einem Beobachterabstand von etwa 80 cm ungefähr $0,64^\circ$ bzw. $0,48^\circ$ Sehwinkel.

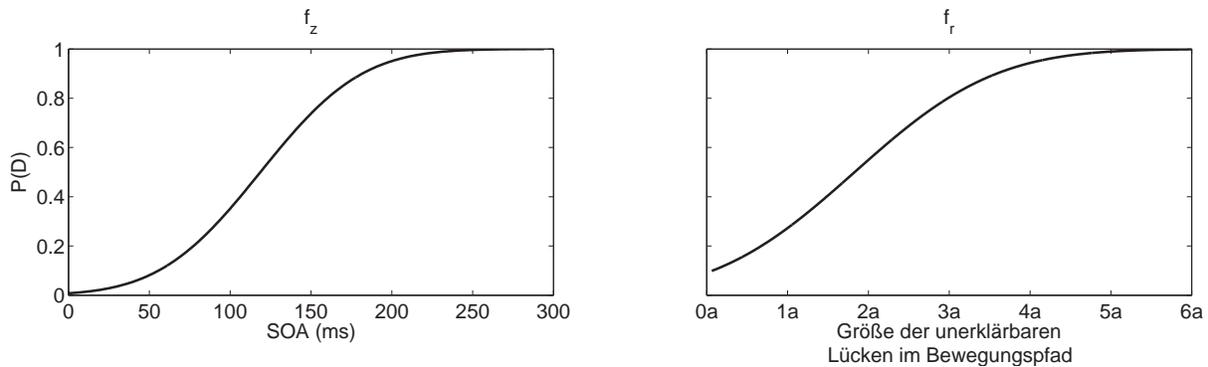


Abbildung 3.24: Modellfunktionen f_z und f_r . Siehe Text für Details. Eine Kantenlänge a des Zielreizes entsprach im Experiment IV bei einem Beobachterabstand von etwa 80 cm ca. $0,35^\circ$ Sehwinkel.

eine der Hauptursachen für den beobachteten Glättungseffekt sind, wäre zu erwarten, dass die wahrgenommene Glattheit durch zusätzliche binokulare Disparitäten, die entweder mit der Verdeckungsinterpretation konsistente oder damit inkonsistente Tiefenhinweise liefern, entsprechend beeinflusst werden kann. Um diese Vorhersage zu prüfen, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, in dem ähnliche Reize wie zuvor verwendet wurden, jedoch mit zusätzlichen binokularen Disparitäten.

3.3.2.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Es wurden dieselben drei Bedingungen wie im Experiment IV untersucht (volle, halbe oder keine Verdeckung der räumlichen Lücken). Zusätzlich wurden durch das Hinzufügen von relativer binokularer Disparität entweder zum Zielreiz (Bedingung „Zielreiz vorne“) oder zu den Verdeckern („Verdecker vorne“) Hinweise zur Tiefenkonfiguration der Szene gegeben, die entweder konsistent oder inkonsistent mit der Verdeckungsinterpretation waren. Anders als im vorigen Experiment war die Bewegungsrichtung vertikal – von oben nach unten – statt horizontal, damit horizontale binokulare Disparitäten hinzugefügt werden konnten. Wie im vorigen Experiment sollten die Versuchspersonen nach Ablauf jeder Sequenz die Bewegungsqualität bewerten.

Versuchsplan. Es wurden drei Faktoren variiert:

1. Faktor „Verdeckung“ (V) wie in Experiment IV (Lücken vollständig verdeckt, zur Hälfte verdeckt, nicht verdeckt).
2. Faktor „Disparität“ (D). Entweder wurde binokulare Disparität (Parallaxe) zum Zielreiz hinzugefügt („Zielreiz vorne“) oder zu den Verdeckern („Verdecker vorne“), oder alle Elemente der Szene hatten dieselbe binokulare Disparität (Bedingung „Null-Disparität“).
3. Faktor „Lückenbreite“ (LB). Die Lückenbreite zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes betrug wie im vorigen Experiment entweder $1a$, $2a$ oder $3a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes), wobei die Bewegungsrichtung in diesem Experiment vertikal – von oben nach unten – statt horizontal war. Die Sprungweite Δy von Mittelpunkt zu Mittelpunkt des Zielreizes betrug dementsprechend wie im vorherigen Experiment $2a$, $3a$ bzw. $4a$.

Der in Experiment IV variierte Faktor „Darbietungsdauer“ (SD) wurde in diesem Experiment konstant gehalten: $SD = 94$ ms. Für jede Lückenbreite LB gab es durch Kombination der Faktoren V und D $3 \times 3 - 1 = 8$ verschiedene Bedingungen – die Ausprägung „Verdecker vorne“ des Faktors D konnte nicht mit der Ausprägung „Keine Verdeckung“ des Faktors V kombiniert werden –, so dass es insgesamt 24 unterschiedliche Reizsequenzen gab (8 Verdeckungs-Disparitäts-Kombinationen \times 3 Lückenbreiten).

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand wie in Experiment IV darin, die Glattheit/Ruckartigkeit der Bewegung gemäß der auf S. 91 beschriebenen fünfstufigen Ordinalskala zu bewerten.

Hypothesen.

1. Die Bewegung des Objekts wird bei verdeckungskonsistenter Disparität (Bedingungen „Verdecker vorne“ und „Null-Disparität“) als weniger sprunghaft, d. h. glatter wahrgenommen als bei verdeckungsinkonsistenter Disparität (Bedingung „Zielreiz vorne“).

Wie in den Experimenten I und IV war auch in diesem Experiment zu erwarten, dass die wahrgenommene Qualität der Bewegung nicht nur von der Verdeckung/Maskierung der Szene abhängt, sondern auch von der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Bewegungsreize:

2. Die Bewegung des Objekts erscheint in Bedingungen ohne vollständige Verdeckung der Lücken sowie in der verdeckungsinkonsistenten Bedingung umso ruckartiger bzw. sprunghafter, je niedriger die räumliche Auflösung des diskreten Bewegungsreizes, d. h. je höher die Sprungweite Δy (und somit die Lückenbreite LB) ist.

Versuchsaufbau. Es wurden dieselbe Ausstattung (Raum, Geräte etc.) und ähnliche Reize wie im vorigen Experiment verwendet. Wie im Abschnitt „Versuchsplan“ beschrieben, verlief der Bewegungspfad des Zielreizes in diesem Experiment in vertikaler statt in horizontaler Richtung, wobei die Lückenbreiten LB und Sprungweiten Δy den Lückenbreiten LB und Sprungweiten Δx im vorigen Experiment entsprachen. Die je nach Bedingung zum Zielreiz oder zu den Verdeckern hinzugefügte horizontale Disparität betrug je Halbbild $1/8 a$ und somit insgesamt $1/4 a$ ($a =$ Kantenlänge des Zielreizes).

Versuchsdurchführung. Die Versuchspersonen sollten dem Zielreiz während einer Sequenz mit den Augen folgen und anschließend die Bewegungsqualität gemäß der auf S. 91 beschriebenen fünfstufigen Ordinalskala bewerten. Jede der 24 unterschiedlichen Reizsequenzen wurde von jeder Versuchsperson zehnmal bewertet. Die insgesamt 240 Sequenzen wurden in pseudo-randomisierter Reihenfolge dargeboten, aufgeteilt in zwei Blöcke (zu je 120 Durchgängen), die jeweils ca. 15 bis 25 Minuten in Anspruch nahmen und hintereinander an einem Termin erhoben wurden. Vor Beginn des Experiments erfolgten allgemeine Instruktionen und einige Beispielsequenzen, damit sich die Versuchspersonen mit den Reizen und der Steuerung vertraut machen konnten.

Versuchspersonen. Am Experiment nahmen neun Student/innen im Grundstudium der Psychologie teil, die nicht am vorherigen Experiment teilgenommen hatten und naiv bezüglich der Fragestellung waren. Die Teilnahme wurde mit Versuchspersonenstunden (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“ auf S. 67) vergütet. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen.

3.3.2.2 Ergebnisse und Diskussion

Vergleich mit Experiment IV. Die Reize in der Null-Disparitäts-Bedingung waren identisch mit den Reizen in Experiment IV, außer dass die Bewegungsrichtung vertikal statt horizontal verlief. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse der vergleichbaren Sequenzen beider Experimente in Abbildung 3.25 zeigt, dass die Versuchspersonenurteile ein ähnliches Muster aufweisen: In beiden Experimenten wurde die Bewegung in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung der Lücken jeweils als am glattesten beurteilt und die Bedingung ohne Verdeckung als am ruckartigsten (schwarze vs. weiße Balken). Ebenso verringerte sich die wahrgenommene Glattheit mit zunehmender Breite der Lücken mit Ausnahme der Bedingung, in denen die Lücken vollständig verdeckt waren (schwarze Balken). Allerdings fiel der Unterschied der mittleren Versuchspersonenurteile zwischen der Bedingung mit partieller Verdeckung der

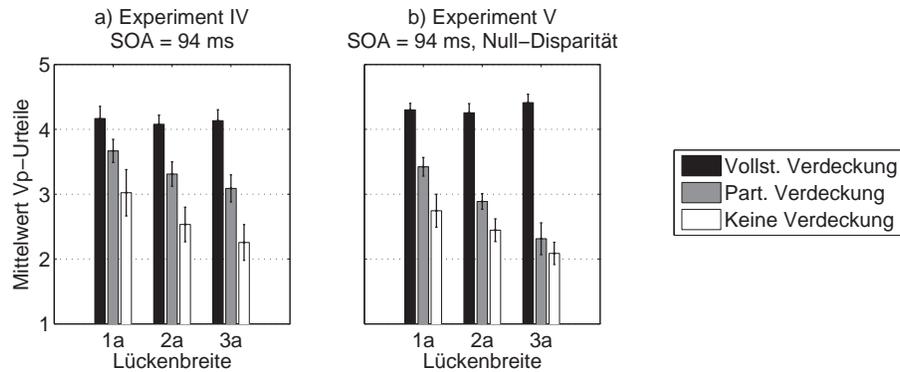


Abbildung 3.25: Ergebnisse der Null-Disparitäts-Bedingung des Experiments V (b) und der entsprechenden Bedingung des Experiments IV (a). Die Lückenbreiten sind als Vielfache der Kantenlänge a des Zielreizes angegeben. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM über alle Versuchspersonen.

Lücken (graue Balken) und der Bedingung ohne Verdeckung (weiße Balken) in Experiment V ab einer Lückenbreite von $2a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes) insgesamt etwas geringer aus als in Experiment IV.

Allgemeine Ergebnisse. Die Bedingung mit vollständiger Verdeckung der Lücken enthielt statische T-Kreuzungen, die im allgemeinen starke Hinweise auf Verdeckung enthalten (vgl. z. B. Metzger, 1936; Koenderink & van Doorn, 1976) und in diesem Experiment signalisierten, dass sich der Zielreiz hinter den Verdeckern bewegte. Das Hinzufügen von binokularer Disparität zu den Verdeckern, die dadurch im Vordergrund zu schweben schienen, sollte keinen Einfluss auf die wahrgenommene Bewegungsqualität haben, da die Reize in diesem Fall konsistent mit der Interpretation von Verdeckung waren. Im Gegensatz dazu wäre gemäß Hypothese 1 zu erwarten, dass das Hinzufügen von verdeckungsinkonsistenter binokularer Disparität, wodurch der Zielreiz dem Betrachter näher als die „Verdecker“ erschien, die wahrgenommene Glattheit der Bewegung beeinträchtigen sollte. Dass dies tatsächlich der Fall ist, kann anhand der Abbildung 3.26 nachvollzogen werden. Mit demselben Unimodalitätsargument wie im vorherigen Experiment sind die Ergebnisse als Mittelwerte über die mittleren Versuchspersonenurteile je Sequenz dargestellt (siehe Anhang B). Wie die Tafel a zeigt, sind zwischen den beiden verdeckungskonsistenten Bedingungen (Verdecker vorne und Null-Disparität; schwarze bzw. graue Balken) praktisch keine Unterschiede erkennbar, während die Bewegung in der verdeckungsinkonsistenten Bedingung mit dem Zielreiz vorne (weiße Balken) grundsätzlich als weniger glatt bewertet wurde.

Der Glättungseffekt wurde durch die verdeckungsinkonsistente Disparität jedoch nicht vollständig aufgehoben, denn die Bewertungen in der Bedingung mit dem Zielreiz vorne bei vollständiger Verdeckung der Lücken (weiße Balken in a) waren generell höher als in der Bedingung mit dem Zielreiz vorne ohne Verdeckung der Lücken (weiße Balken in c). Dies ist nicht überraschend, weil die neben den verdeckungsinkonsistenten Disparitätshinweisen weiterhin vorhandenen T-Kreuzungen starke Verdeckungshinweise boten (vgl. Shimojo & Nakayama, 1990). Gleiche Ergebnisse in den beiden genannten Bedingungen wären nur zu erwarten gewesen, wenn das Wahrnehmungssystem zur Tiefensegmentierung ausschließlich Disparitätssignale berücksichtigte und andere Signale wie T-Kreuzungen vollständig unberücksichtigt ließe. Die Tatsache, dass die Urteile der Versuchspersonen in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung niedriger ausfielen, wenn der Zielreiz vorne lag (weiße Balken niedriger als schwarze und graue Balken in a), ist ein Beleg für die prinzipielle Wirksamkeit verdeckungsinkonsistenter Disparitätsinformationen. Gemäß der Hypothese 2 wäre deshalb zu erwarten, dass die wahrgenommene Glattheit der Bewegung in dieser Bedingung (weiße Balken in a) ebenso mit zunehmender Lückenbreite abnimmt wie in den Bedingungen mit partieller und ohne Verdeckung (weiße Balken in b bzw. c). Dies war nicht der Fall.

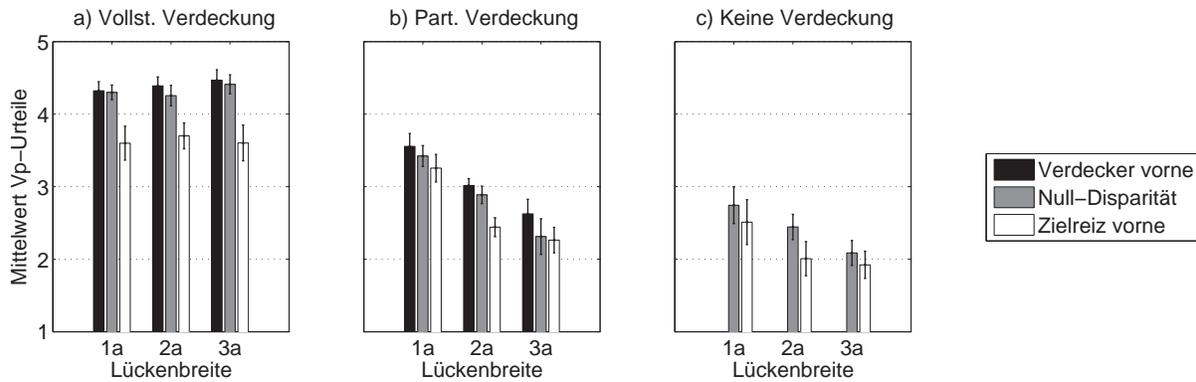


Abbildung 3.26: Ergebnisse des Experiments V. Je nach Bedingung gab es entweder keine binokulare Disparität (graue Balken), zusätzliche relative Disparität der Verdeckter (schwarze Balken) oder des Zielreizes (weiße Balken). Dargestellt sind die mittleren Urteile aller Versuchspersonen in den drei Verdeckungsbedingungen, d. h. mit vollständig verdeckten räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes (a), mit zur Hälfte verdeckten Lücken (b) oder mit unverdeckten Lücken (c). Die Ergebnisse sind ähnlich wie die Ergebnisse der korrespondierenden Bedingung (SOA = 94 ms) in Experiment IV. Wie in den vorigen Abbildungen sind die Lückenbreiten als Vielfache der Kantenlänge a des Zielreizes angegeben. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM über die Versuchspersonen.

In der Bedingung mit partieller Verdeckung der Lücken war zu erwarten, dass die Bewertung der Bewegungsglattheit niedriger ausfällt als in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung, weil nur die Hälfte der Lücken verdeckt und somit „erklärbar“ war. Dies war tatsächlich der Fall (vergleiche die Daten in b mit den korrespondierenden Bedingungen in a). Darüber hinaus war zu erwarten, dass die Bewegung bei verdeckungsinkonsistenter Disparität auch in der Bedingung mit partieller Verdeckung ruckartiger wahrgenommen wird als bei verdeckungskonsistenter Disparität. Auch dies war der Fall (vergleiche die weißen Balken mit den schwarzen und grauen Balken in b). Im Gegensatz zur Bedingung mit vollständiger Verdeckung enthielt die Bedingung mit partieller Verdeckung keine T-Kreuzungen, die als Verdeckungssignale hätten dienen können. Die dadurch auf monokularer Ebene erheblich schwächeren Verdeckungshinweise wirkten weniger restriktiv und ließen außer der Verdeckungsinterpretation grundsätzlich noch weitere Deutungen zu. Es war deshalb zu erwarten, dass Disparitätssignale, die auf Verdeckung hinweisen, zur Auflösung der Mehrdeutigkeiten im Reiz beitragen können und somit zu einem glatteren Bewegungssperzept als in der Null-Disparitäts-Bedingung führen. Auch diese Erwartung wurde durch die Daten bestätigt, wenngleich der Effekt vergleichsweise gering war (vergleiche die schwarzen mit den grauen Balken in b). Ein weiterer Unterschied zur Bedingung mit vollständiger Verdeckung, in der die räumlichen Lücken durch Verdeckung erklärbar waren, lag darin, dass in der Bedingung mit partieller Verdeckung die Hälfte der Lückenbreite unerklärbar blieb. Weil die Größe der Lücken und der in dieser Bedingung unerklärbare Bereich mit steigender Sprungweite Δy des Zielreizes zunahm, war anzunehmen, dass die Bewertung der Bewegungsglattheit mit steigender Sprungweite/Lückenbreite in der Bedingung mit partieller Verdeckung zunehmend schlechter ausfällt, während sie in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung unabhängig von der Sprungweite/Lückenbreite konstant bleiben sollte. Auch diese Annahme, konsistent mit Hypothese 2, traf zu (vgl. a und b).

Es mag überraschend erscheinen, dass die Urteile in der Bedingung mit partieller Verdeckung und verdeckungsinkonsistenter Disparität (weiße Balken in b) besser ausfielen als die korrespondierenden Bedingungen ohne Verdeckung (c). Man könnte allerdings anführen, dass die Reize auf monokularer Ebene – ungeachtet der verdeckungsinkonsistenten Disparitätssignale auf binokularer Ebene – in der Bedingung mit Hinweisen auf partielle Verdeckung eher eine Verdeckungsinterpretation hervorriefen als in der Bedingung ohne jegliche Verdeckungssignale.

Abschließend soll eine Beobachtung in der Bedingung ohne Verdeckung (c) nicht unerwähnt blei-

ben, die nicht ohne weiteres erklärt werden kann: Es ist unklar, weshalb die Bewegung in Sequenzen, in denen der Zielreiz durch relative binokulare Disparität vor dem Hintergrund „schwebte“ (weiße Balken), als weniger glatt wahrgenommen wurde als in Sequenzen, die keine relative binokulare Disparität enthielten.¹⁴ Dieser Effekt, der offensichtlich nicht im Zusammenhang mit Verdeckung steht, könnte durch einen unbekanntem Faktor hervorgerufen worden sein, der durch die Disparität des Zielreizes relativ zum Hintergrund beeinflusst wird. Es ist deshalb nicht ausgeschlossen, dass die Unterschiede je nach Disparität in den beiden Bedingungen mit vollständiger und mit partieller Verdeckung ebenfalls auf diesen unbekanntem Faktor zurückgeführt werden könnten. Allerdings kann dieser unbekanntem Faktor nicht die – zugegebenermaßen recht geringen – Unterschiede zwischen den beiden Bedingungen mit partieller Verdeckung erklären, in denen der Zielreiz dieselbe Disparität wie der Hintergrund hatte, also in den Bedingungen mit Verdeckter vorne und mit Null-Disparität. Es ist ebenso unklar, wie mit diesem unbekanntem Faktor die deutlichen Effekte der monokularen Verdeckungssignale, die sowohl in diesem als auch in Experiment IV zu beobachten waren, erklärt werden könnten.

3.3.2.3 Kontrollexperiment: Überprüfung der UV-Manipulation

Um sicherzustellen, dass die unterschiedlichen Disparitäten in Experiment V tatsächlich zu den jeweils gewünschten (Verdeckungs-)Interpretation führten, wurde ein zusätzliches Kontrollexperiment – unmittelbar vor Experiment V – durchgeführt, in dem eine kleine Teilmenge der Reize aus Experiment V dargeboten wurden (Faktor V: Lücken vollständig und teilweise verdeckt; Faktor D: wie in Experiment V; Faktor LB: konstant $2a$, a = Kantenlänge des Zielreizes; Faktor SD: konstant 94 ms). Es nahmen dieselben neun Versuchspersonen am Kontrollexperiment teil, die im Anschluss auch das Experiment V absolvierten. Ihre Aufgabe im Kontrollexperiment bestand darin, nach jeder Sequenz anzugeben, ob der Zielreiz sich vor oder hinter den Verdeckern, die in den Instruktionen neutral als „Balken“ bezeichnet wurden, bewegte.

Wie die Abbildung 3.27 zeigt, stehen die Urteile in der Bedingung mit partieller Verdeckung (rechts) in unmittelbarer Beziehung zu den relativen Disparitäten zwischen Zielreiz und den Verdeckern. Wenn es relative Disparitätssignale für vorne liegende Verdeckter gab, wurden diese stets als vorne liegend wahrgenommen. Gab es hingegen relative Disparitätshinweise dafür, dass der Zielreiz näher am Betrachter lag als der Rest der Szene, wurde der Zielreiz nahezu immer auch als vorne wahrgenommen. Bei relativer Null-Disparität wurde etwa in der Hälfte der Fälle der Zielreiz als vorne wahrgenommen und in der anderen Hälfte der Fälle die Verdeckter. Dieses Ergebnis ist nicht überraschend, wenn man berücksichtigt, dass die Reize in der Bedingung mit partieller Verdeckung keine monokularen Hinweise auf die relative Tiefe des Zielreizes gegenüber den Verdeckern enthielten.

Die Ergebnisse der Bedingung mit vollständiger Verdeckung sind ähnlich, zeigen jedoch eine stärkere Tendenz, dass die Verdeckter als vorne liegend wahrgenommen wurden, als in der anderen Bedingung (ausgenommen die Bedingung mit verdeckungskonsistenter Disparität, die in allen Fällen zu der Wahrnehmung von vorne liegenden Verdeckern führte). Diese stärkere Tendenz, die Verdeckter als vorne liegend wahrzunehmen, könnte auf die Verfügbarkeit monokularer T-Kreuzungen zurückgeführt werden, zumal T-Kreuzungen im Vergleich zu binokularer Disparität meist stärkere Verdeckungshinweise enthalten (Bacon & Mamassian, 2002; Nakayama et al., 1989).

3.3.3 Diskussion

3.3.3.1 Der Einfluss von Verdeckung auf die wahrgenommene Glattheit von Bewegung

In den Experimenten IV und V wurden Sequenzen mit einem in diskreten Schritten bewegten Zielreiz dargeboten und die Versuchspersonen gebeten, die wahrgenommene Glattheit der Scheinbewegung auf

¹⁴Eine ähnliche Beobachtung wurde kürzlich bereits von Kim, Feldman und Singh (2011, Abbildung 7a, S. 361) berichtet.

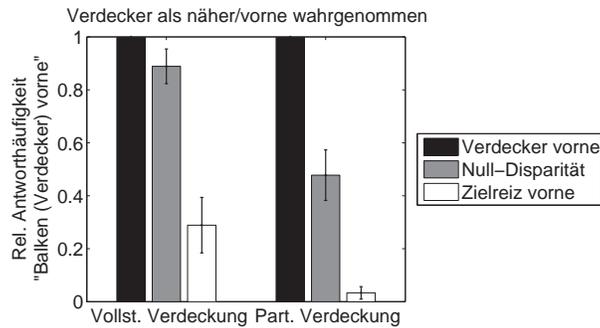


Abbildung 3.27: Ergebnisse des Zusatzexperiments vor Experiment V. Die Versuchspersonen waren gebeten worden, anzugeben, ob die Verdecker („Balken“) oder der Zielreiz („Quadrat“) als vorne/näher wahrgenommen wurde. In Bedingungen mit verdeckungskonsistenter Disparität (schwarze Balken) wurden die Verdecker sowohl in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung der Lücken (links) als auch in der Bedingung mit partieller Verdeckung (rechts) stets als vorne liegend wahrgenommen. In Bedingungen ohne relative Disparität zwischen den Halbbildern (graue Balken) wurden die Verdecker nahezu immer als vorne liegend wahrgenommen, wenn sie die Lücken vollständig verdeckten (links), aber nur in etwa der Hälfte der Fälle, wenn sie die Lücken nur zur Hälfte verdeckten (rechts). In Bedingungen mit verdeckungsinkonsistenter Disparität (weiße Balken) wurden die Verdecker etwa in einem Drittel der Fälle als vorne liegend wahrgenommen, wenn sie die Lücken vollständig verdeckten (links), aber fast gar nicht, wenn sie die Lücken nur zur Hälfte verdeckten (rechts). Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM über die Versuchspersonen.

einer fünfstufigen Skala von „sehr glatt“ bis „ruckartig“ anzugeben. Es wurden drei Typen von Reizen verwendet: 1. mit Verdeckern, die die räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes vollständig ausfüllten; 2. mit schmalere Verdeckern, die nur die Hälfte jeder Lücke füllten; 3. ohne Verdecker.

Experiment IV zeigt, dass die wahrgenommene Glätte von Bewegung nicht nur durch eine Verkleinerung der räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes verbessert werden kann, sondern auch durch das Hinzufügen von Verdeckern, die die Lücken teilweise oder vollständig ausfüllten. Die quantitative Modellierung deutet darauf hin, dass die partielle Verdeckung der räumlichen Lücken denselben Glättungseffekt hervorruft wie eine entsprechende Verkleinerung der Sprungweite des Zielreizes und somit der Lücken. Dies wird auch anhand der Abbildung 3.28 deutlich. Die Ergebnisse des Experiments IV sind deshalb kompatibel mit der Hypothese, dass Unterbrechungen im Bewegungspfad eines Zielreizes keine Beeinträchtigungen der wahrgenommenen Bewegungsglattheit hervorrufen, sofern das visuelle System diese auf Verdeckung zurückführen kann.

In Experiment V wurden binokulare Disparitätssignale verwendet, die je nach Bedingung konsistent oder inkonsistent mit der Verdeckungsinterpretation des Bewegungspfad des Zielreizes waren, um die Hypothese ausführlicher zu prüfen. Die Ergebnisse legen nahe, dass wahrgenommene Verdeckung tatsächlich die kritische Variable für den Glättungseffekt ist: Während verdeckungsinkonsistente Disparität den Effekt generell verringerte, verstärkte verdeckungskonsistente Disparität den Effekt, wenn nur schwache monokulare Verdeckungshinweise vorlagen (in der Bedingung mit partieller Verdeckung). Die Ergebnisse des Kontrollexperiment zur Prüfung der UV-Manipulation stützen die Hypothese ebenfalls. Allerdings kann ein Aspekt der Ergebnisse des Experiments V nicht durch die Hypothese erklärt werden, und zwar die Beobachtung, dass die wahrgenommene Bewegungsglattheit in der Bedingung mit vollständiger Verdeckung der räumlichen Lücken bei verdeckungsinkonsistenter Disparität nicht mit zunehmender Lückenbreite schwächer wurde (Abbildung 3.26a, weiße Balken).

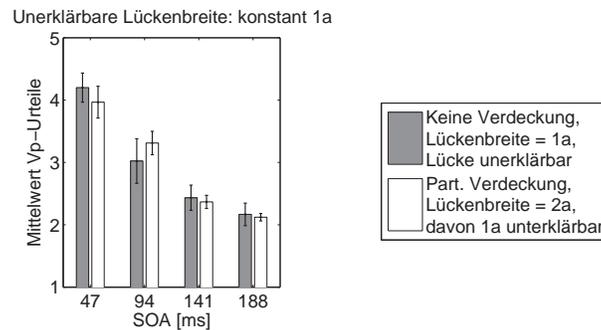


Abbildung 3.28: Vergleich der Ergebnisse des Experiments IV. Darstellung ausgewählter Bedingungen mit partieller Verdeckung der räumlichen Lücken (graue Balken) und ohne Verdeckung (weiße Balken), in denen die unerklärbare Größe der Lücken konstant $1a$ (a = Kantenlänge des Zielreizes) betrug. Dies war in der Bedingung mit halbverdeckten Lücken bei einer Gesamt-Lückenbreite von $2a$ der Fall, wovon eine Breite von $1a$ unverdeckt („unerklärbar“) blieb, und in der Bedingung ohne Verdeckung trivialerweise bei einer Lückenbreite von $1a$. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM über die Versuchspersonen.

3.3.3.2 Mögliche Erklärungen für den Glättungseffekt

Die aus der Literatur allgemein bekannte Tatsache, dass diskrete Bewegungsreize den Eindruck von glatter, kontinuierlicher Bewegung hervorrufen können, spricht für das Vorhandensein von visuellen Prozessen für raumzeitliche Interpolation (vgl. z. B. Burr, 1979; Burr & Morgan, 1997; Burr, Ross & Morrone, 1986a, 1986b; Nishida, 2011). Es erscheint deshalb naheliegend, anzunehmen, dass die wahrgenommene Glattheit den Output dieser visuellen Interpolationsmechanismen widerspiegelt.

Verdeckung als Erklärung für die Unterbrechungen im Bewegungspfad. Abbildung 3.29 illustriert eine Betrachtungsweise, die hilfreich für das Verständnis der vorliegenden Ergebnisse sein könnte. a zeigt das Raum-Zeit-Diagramm eines diskret bewegten Zielreizes (schwarz) an vier Stationen (Frames). b zeigt das Raum-Zeit-Diagramm derselben Sequenz, überlagert mit einem Objekt in glatter linear-kontinuierlicher Bewegung. Die Unterschiede zwischen dem Objekt in idealer, kontinuierlicher Bewegung und dem tatsächlichen Zielreiz können als Sampling-Artefakte aufgefasst werden und sollten die wahrgenommene Glattheit der Bewegung beeinträchtigen (Adelson & Bergen, 1985). c zeigt, dass bei geeigneten Verdeckungshinweisen ein (Groß-)Teil dieser Unterschiede vom visuellen System auf Verdeckung zurückgeführt werden könnte. Dementsprechend wäre zu erwarten, dass auch die Bewegung gleichförmiger, glatter wirkt, wenn die räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes verdeckt zu sein scheinen.¹⁵ Es ist zu beachten, dass die in c dargestellte Interpolation mit einem bewegten Objekt einhergeht, das breiter als der tatsächlich in jedem Frame dargebotene Zielreiz erscheint (in bezug auf die anderen Szenenelemente). In Sequenzen mit Verdeckern zwischen den Lücken ist die Breite des bewegten Objekts nicht eindeutig bestimmt, weil dieses sich potentiell hinter den Verdeckern weiter erstrecken kann. Nimmt man an, dass die Breite vom Wahrnehmungssystem aus der Geschwindigkeit der linear interpolierten Bewegung sowie der tatsächlichen Darbietungsdauer des Zielreizes je Station (d. h. der Dauer eines Frames) errechnet würde, erhielte man die Situation wie in c dargestellt, in der die Breite des perzeptuellen Objekts die tatsächliche Breite des Zielreizes übertrifft.

Visuelle Persistenz. Eine etwas andere Erklärung für den Glättungseffekt könnte auf visueller Persistenz und rein räumlicher amodaler Fortsetzung (im Gegensatz zu raumzeitlicher amodaler Fortsetzung,

¹⁵Die Analogie der Argumentation zu der Argumentation in Abschnitt 3.2 sollte an dieser Stelle ebenso erwähnt und deutlich werden wie die Ähnlichkeit der Abbildungen 3.2g, h (S. 63) und 3.4b (S. 65) mit der Abbildung 3.29c, die im wesentlichen eine raumzeitlich transponierte Version der vorherigen Raum-Zeit-Diagramme ist. Mehr dazu weiter unten.

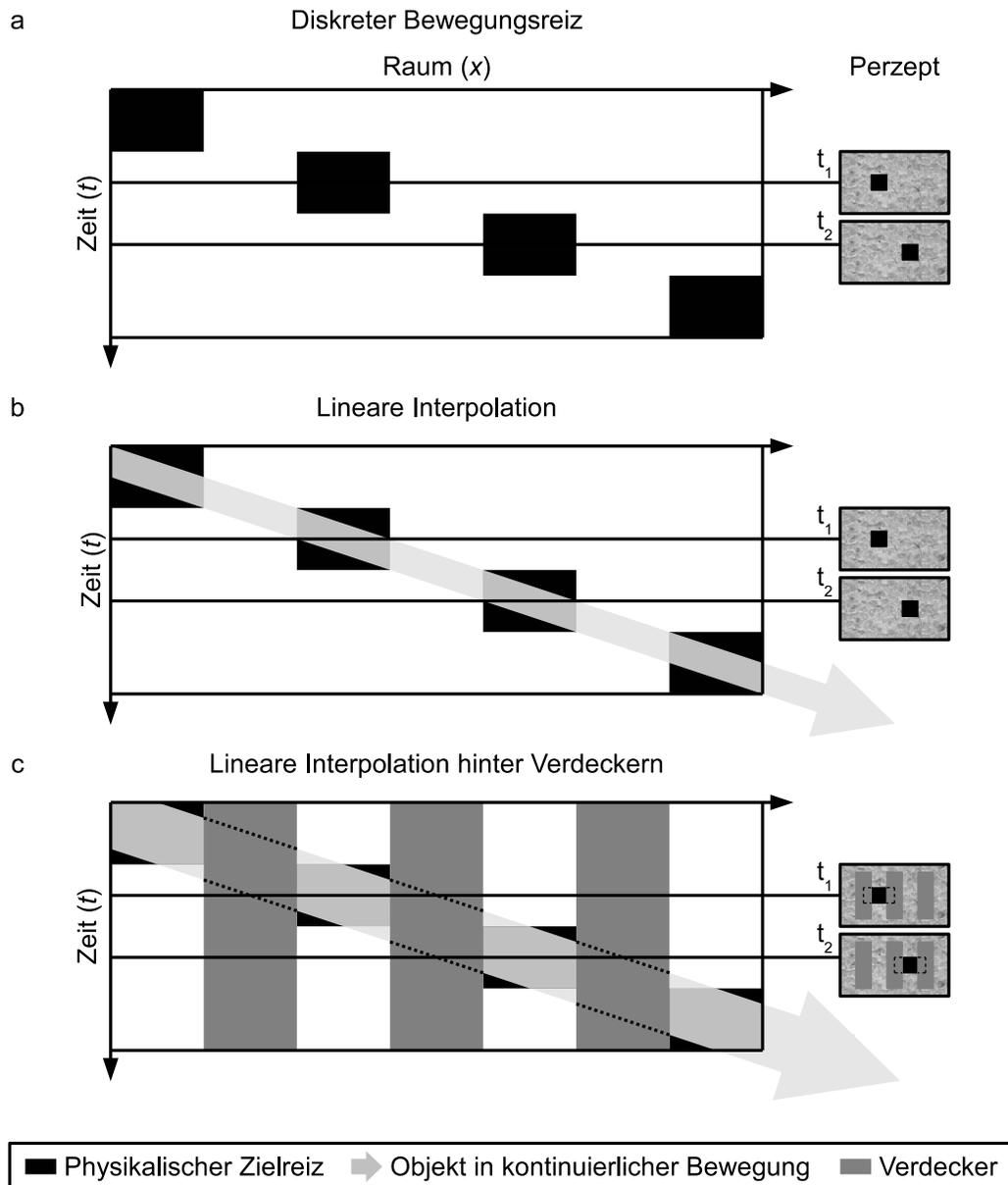


Abbildung 3.29: a) Raum-Zeit-Diagramm eines Zielreizes in diskreter Bewegung (schwarz; vier Frames). Die kleinen Nebenbilder in der Spalte „Perzept“ rechts zeigen die typischen Perzepte zu zwei Zeitpunkten t_1 (Frame 2) und t_2 (Frame 3). b) Derselbe Bewegungsreiz wie in a. Das diagonale hellgraue Band mit Pfeilspitze repräsentiert ein gleich breites Objekt in glatter, kontinuierlich-linearer Bewegung (ideale Interpolation). c) Derselbe diskrete Bewegungsreiz wie in a und b, jedoch mit Verdeckern (dunkelgrau), die die räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes ausfüllen und somit „erklärbar“ machen. Weil die tatsächliche Breite des bewegten Objekts aufgrund der Verdeckern unspezifiziert ist, wäre es nicht unplausibel, anzunehmen, dass diese aus der Geschwindigkeit der linear interpolierten Bewegung und der tatsächlichen Darbietungsdauer des Zielreizes je Station ermittelt wird. Die geschätzte Breite des bewegten Objekts wäre dann größer als in der Bedingung ohne Verdeckern, wie durch die gestrichelten Umrisse in den Nebenbildern in der Spalte „Perzepte“ in c angedeutet.

die in der obigen Erklärung zugrunde gelegt wird) basieren, wie die Abbildung 3.30 illustriert. Aus der Literatur ist das Phänomen der visuellen Persistenz bekannt, das sich daran zeigt, dass visuelle Reize mehrere hundert Millisekunden länger wahrgenommen werden können, als sie im sensorischen Input verfügbar sind (Coltheart, 1980). Nimmt man beispielsweise an, die Dauer der visuellen Persistenz betrage die Hälfte der Anzeigedauer des Zielreizes ($1/2$ SD, hier wegen $ISI = 0$ ms identisch mit $1/2$ SOA), so variierte die Anzahl der gleichzeitig wahrgenommenen Elemente zwischen einem Element für die Hälfte der Zeit (beispielsweise zu den Zeitpunkten t_1 und t_3 in Tafel a) und zwei Elementen für die andere Hälfte der Zeit (beispielsweise zum Zeitpunkt t_2). Variierte die Anzahl der wahrgenommenen Elemente in dieser Weise, wäre dies selbstverständlich inkompatibel mit der Deutung eines einzigen glatt bewegten Objekts. Würde die Annahme des visuellen Systems über die Anzahl der Objekte auf Basis der sensorischen Informationen kontinuierlich verändert, wäre es denkbar, dass wiederholt unterschiedliche Interpolationsversuche, passend zur jeweils gerade aktuellen Deutung, ausgelöst und abgebrochen werden (vgl. z. B. Moore & Enns, 2004, S. 869 f.). Dies bedeutete, dass anstelle einer stabilen Deutung als Resultat eines einzigen Interpolationsprozesses eine instabile Abfolge einander widersprechender Interpretationen aufträte, die vermutlich zu einem instabilen und eher sprunghaft-ruckartigen Bewegungsperzept führte. Füllen dagegen Verdeckter die räumlichen Lücken (Abbildung 3.30b), ist die Variation in der Anzahl der phänomenal sichtbaren Elemente bzw. Elementteile kompatibel mit der Deutung eines einzigen, hinter den Verdeckern bewegten Objekts: Die beiden zum Zeitpunkt t_2 phänomenal sichtbaren Elementteile könnten durch rein räumliche amodale Ergänzung als Teile des gleichen Objekts, das in der Mitte verdeckt ist, gedeutet werden. Im Gegensatz zu Sequenzen ohne Verdeckter wäre in diesem Fall eine konsistente visuelle Interpolation möglich, die auf der Annahme eines einzigen bewegten Objekts beruht, was erklären könnte, weshalb die Bewegung glatter erscheint.

Es ist allerdings zu vermuten, dass visuelle Persistenz nur bei kurzen Darbietungsdauern eines Zielreizes von bis zu etwa 150 bis 200 ms auftritt¹⁶ (siehe z. B. Coltheart, 1980, S. 206), und tatsächlich zeigten informelle Beobachtungen der in den Experimenten verwendeten Reizsequenzen, dass nur bei kürzeren SOAs mehrere Objekte gleichzeitig wahrgenommen wurden. Es ist deshalb anzunehmen, dass visuelle Persistenz und rein räumliche amodale Fortsetzung zwar zum Glättungseffekt bei niedrigeren SOAs beigetragen haben können, der Glättungseffekt bei höheren SOAs jedoch nicht darauf zurückgeführt werden kann. Auch ist unklar, inwieweit der beobachtete Glättungseffekt in der Bedingung mit partieller Verdeckung der räumlichen Lücken durch visuelle Persistenz erklärt werden könnte.

Augenbewegungen. Es wäre grundsätzlich denkbar, dass Augenbewegungen einen Einfluss auf die wahrgenommene Qualität und Glattheit der Bewegung in den Experimenten hatten. Churchland, Chou und Lisberger (2003) fanden heraus, dass die Glattheit der Augenbewegungen von Rhesusaffen, die einem Zielreiz folgten, durch Verdeckungshinweise positiv beeinflusst werden konnte. Weil auch die Versuchspersonen in den Experimenten IV und V gebeten worden waren, dem Zielreiz mit den Augen zu folgen, erscheint die Vermutung, dass glattere Augenbewegungen ein Grund für den Glättungseffekt gewesen sein könnten, nicht unplausibel. Somit demonstrieren sowohl die Befunde von Churchland et al. (2003) als auch die hier dokumentierten Beobachtungen, dass Verdeckungshinweise die Qualität der Bewegungsinterpolation verbessern können.

3.4 Zusammenfassung und Diskussion

Die Experimente I–V deuten darauf hin, dass die Bewegung eines diskret bewegten Zielreizes als besser, d. h. als glatter und weniger ruckartig interpoliert wahrgenommen wird, wenn die räumlichen und/oder zeitlichen Lücken/Unterbrechungen zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Darbietungen auf Verdeckung zurückgeführt werden können und nicht als unerklärbare inhärente Eigenschaften des Zielreizes

¹⁶In den Experimenten IV und V war die Darbietungsdauer wegen $ISI = 0$ ms identisch zur SOA.

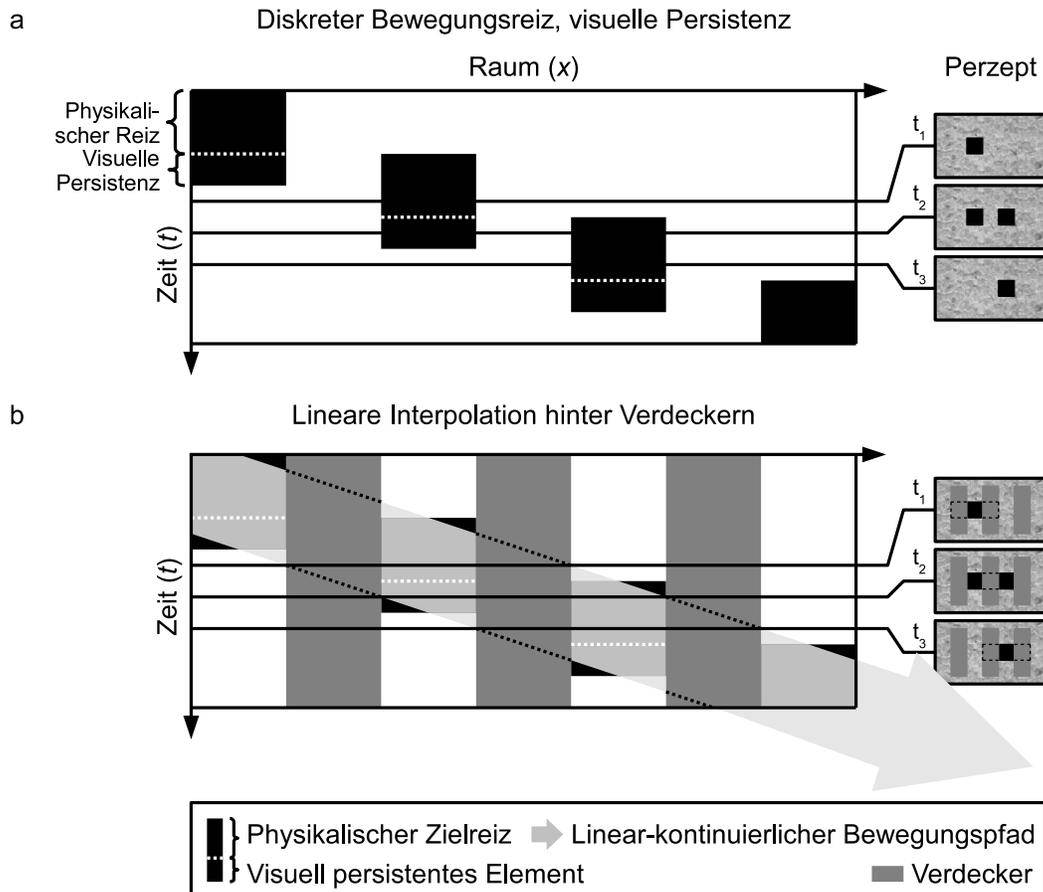


Abbildung 3.30: a) Raum-Zeit-Diagramm eines Zielreizes in diskreter Bewegung wie in Abbildung 3.29a. Der schwarze Bereich oberhalb der weiß gestrichelten Linie repräsentiert jeweils den physikalischen Zielreiz in einem Frame, während der Bereich unterhalb der weiß gestrichelten Linie mögliche visuelle Persistenz (hier beispielhaft mit einer Dauer von $1/2$ SOA) illustriert. Die kleinen Nebenbilder in der Spalte „Perzept“ rechts zeigen die typischen Perzepte zu drei Zeitpunkten t_1 (Frame 2), t_2 und t_3 (jeweils Frame 3). Die Anzahl der gleichzeitig wahrgenommenen Elemente variiert zwischen einem und zwei. b) Derselbe Bewegungsreiz wie in a, jedoch mit Verdeckern (dunkelgrau), die die räumlichen Lücken zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes ausfüllen (vgl. Abbildung 3.29c). Das diagonale hellgraue Band mit Pfeilspitze repräsentiert ein entsprechendes Objekt in gleichförmiger, linearer Bewegung (ideale Interpolation). Obwohl der lineare Interpolationspfad ein einzelnes bewegtes Objekt repräsentiert, erwartete man, zum Zeitpunkt t_2 zwei Teile davon gleichzeitig wahrzunehmen.

aufgefasst werden (müssen). Die Befunde stützen daher die hier eingenommene Sichtweise über die Bedeutung von amodalen Repräsentationen (d. h. hier: Repräsentationen von verdeckten Objekten) in der visuellen Wahrnehmung, die zuvor schon in anderen Domänen der Wahrnehmung nachgewiesen wurde (vgl. z. B. Bregman, 1981; C. T. Miller, Dibble & Hauser, 2001; G. A. Miller & Licklider, 1950; Ögmen, 2007). Dieser Effekt ist kein singulärer Befund unter spezifischen Bedingungen, sondern lässt sich mit verschiedenen Reizvarianten und über weite Bereiche der charakteristischen räumlichen und zeitlichen Parameter von Scheinbewegung (SOA, SD, ISI, Δx) nachweisen.

Es lassen sich drei wesentliche Erkenntnisse zusammenfassen:

1. Lokale, reizbasierte Modelle können die Befunde nicht erklären.
2. Unter der Annahme, dass das Wahrnehmungssystem abduktive Schlüsse auf Basis interner Heuristiken zieht, könnten die Perzepte plausibel erklärt werden.
3. Die Wahrnehmung von Verdeckung ist ein wesentlicher Einflussfaktor für das modale Attribut der wahrgenommenen Glattheit von interpolierter Bewegung.

Diese Erkenntnisse sollen nachfolgend kurz erläutert werden.

Lokale, reizbasierte Modelle können die Befunde nicht erklären. Es wurde gezeigt, dass die Ergebnisse der Experimente I–III nicht allein mit lokalen Hinweisen im Reiz erklärt werden können, auf die sich beispielsweise Reichardt-ähnliche Detektormodelle ausschließlich beziehen (vgl. Abschnitt 3.2.4 und Anhang A). Dasselbe Argument gilt auch für die in den Experimenten IV und V verwendeten Reize, die nur räumliche Lücken und keine zeitlichen Unterbrechungen zwischen je zwei Darbietungen des bewegten Elements enthielten (Abschnitt 3.3) und in gewisser Weise als komplementär zu den Reizen in den Experimenten I–III (Abschnitt 3.2) aufgefasst werden können. Die Raum-Zeit-Diagramme der Reizsequenzen in den Experimenten IV und V sind nämlich im wesentlichen raumzeitlich transponierte Versionen der Raum-Zeit-Diagramme der Experimente I und II, die sich durch Vertauschung der räumlichen und der zeitlichen Dimension herstellen lassen.

Interne Heuristiken und abduktives Schließen. Der Befund, dass die Bewegungsinterpolation durch geeignete Verdeckungshinweise glatter erscheint, deutet darauf hin, dass das visuelle System imstande ist, den während der „amodalen Phase“ unterbrochenen Bewegungspfad perzeptuell zu ergänzen/vervollständigen und als kontinuierlich zu repräsentieren. Diese Beobachtung fügt sich in die empirische Befundlage und in das theoretische Bild ein, wonach eine enge Verknüpfung zwischen Bewegung und Verdeckung besteht, die vom visuellen System in mannigfaltiger Weise ausgenutzt wird: Schon Wallach (1935) wies darauf hin, dass Verdeckungshinweise vom Wahrnehmungssystem zur Bestimmung der Bewegungsrichtung eines unterspezifizierten Reizes herangezogen werden können, beispielsweise bei der Lösung des Apertur-Problems (vgl. hierzu z. B. Anderson, 1999; Duncan, Albright & Stoner, 2000; Shimojo et al., 1989).

Aus Experimenten von Sigman und Rock (1974) ist bekannt, dass zwei alternierend dargebotene Zielreize einen Bewegungseindruck hervorrufen können, der durch das synchrone Ein- und Ausblenden eines Verdeckungsreizes an der jeweils unbesetzten „Position“ unterbunden wird. Statt dessen werden in letzterem Fall zwei stationäre Objekte wahrgenommen, die von einem hin und her springenden Verdeckter zyklisch auf- und zugedeckt werden (vgl. Abbildung 1.2, S. 8). Die Ähnlichkeit dieser Reize mit den in den Experimenten I–V verwendeten Reizen ist offensichtlich. In beiden Fällen wäre es nicht unplausibel, anzunehmen, dass das Wahrnehmungssystem das „überraschende“ kontinuierliche Erscheinen und Verschwinden des Zielreizes durch abduktives Schließen auf Verdeckung zurückführt, um die Reizsituation gemäß interner Heuristiken „bestmöglich“ zu erklären (vgl. auch Rock, 1997, S. 222 f.);

hier also durch eine Minimierung der unerklärlichen Abweichungen des proximalen Reizes von einem ideal-kontinuierlichen Bewegungsreiz, also durch Glättung der perzeptuellen Bewegung.

In ähnlicher Weise ließe sich auch ein verwandter Befund von Kim et al. (2011, Experiment 1, S. 4–6) erklären, der zeigt, dass eine ansonsten geradlinige Scheinbewegung zwischen zwei Reizelementen häufiger durch eine kurvenförmige Scheinbewegung ersetzt wird, wenn es Hinweise auf einen kurvenförmigen Verdeckter gibt, hinter dem die Bewegung erfolgen könnte.

Modale Attribute bei amodaler Vervollständigung. Die Tatsache, dass dem Bewegungseindruck eines zwischenzeitlich verdeckten, amodal vervollständigten Objekts das Attribut der Glattheit zugeschrieben wird, deutet darauf hin, dass nicht ausschließlich unverdeckte, sondern auch verdeckte Objekte phänomenal modale Attribute aufweisen können. Diese Deutung des Bewegungseindrucks als modal wird insbesondere dadurch gestützt, dass in den Experimenten IV und V eine phänomenale Modulation der wahrgenommenen Glattheit durch Variation des Grades der Verdeckung möglich war. Die Befunde stehen in engem Zusammenhang mit dem Tunneleffekt (vgl. hierzu Burke, 1952; Wertheimer, 1912). Die abweichende Deutung Burkes, dass in den amodalen Phasen des Trägerobjekts tatsächlich der Eindruck reiner, gestaltloser Bewegung entsteht, wird durch die vorliegenden Befunde zwar nicht direkt widerlegt, erscheint aber zumindest unplausibel, wenn – wie anzunehmen – in beiden Fällen dieselben Wahrnehmungsprozesse beteiligt sind.

Die Experimente I–V liefern also empirische Hinweise darauf, dass Verdeckung selbst ein wesentlicher Einflussfaktor für die Interpolationsgüte von Bewegung ist, die sich als wahrgenommene Glattheit, ein genuin modales Attribut von Bewegung, zeigt. Die enge Verknüpfung von Verdeckung mit diesem speziellen *modalen* Attribut der Bewegungswahrnehmung wird in Kapitel 5 erneut aufgegriffen und die traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung vor dem Hintergrund der Ergebnisse der Experimente kritisch diskutiert.

Kapitel 4

Der Einfluss von Verdeckung auf phänomenale Sichtbarkeit¹

Im vorigen Kapitel wurde unter anderem gezeigt, dass genuin modale Attribute der Wahrnehmung wie die wahrgenommene Qualität von Bewegung, z. B. deren Glattheit, auch mit verdeckten Objekten assoziiert sein können und sogar *durch* Verdeckung moduliert werden können. Traditionell werden modale Perzepte als Repräsentationen geometrisch-optisch direkt sichtbarer Bereiche aufgefasst und amodale Perzepte als Repräsentationen geometrisch-optischer Bereiche, die infolge von Verdeckung unsichtbar sind. Wie bereits in den Kapiteln 1 und 2 thematisiert, ist diese dichotome Unterteilung in modale und amodale Perzepte sowohl aus phänomenologischer Sicht (vgl. Abbildung 1.4 auf S. 10) als auch aus theoretischer Sicht (vgl. Abschnitt 2.3.4) problematisch. Auch die Befunde in Kapitel 3 legen nahe, dass modale Attribute wie die Glattheit der Bewegung auch mit verdeckten Objekten assoziiert werden können. Das Beispiel in Abbildung 1.4d deutet sogar darauf hin, dass *unverdeckte* Objekte in einer *amodalen* Weise vervollständigt werden können. In diesem Kapitel soll nun komplementär dazu gezeigt werden, dass auch *verdeckte* Objektbereiche partiell *modal* vervollständigt werden können.

Ausgangspunkt ist die Verdeckungstäuschung von Kanizsa (1979, vgl. auch Abbildung 1.5 auf S. 12), in der der als sichtbar erlebte Bereich des partiell verdeckten Objekts (a) größer ist als bei einem physikalisch identischen, unverdeckten Objekt (b). Nach Palmer et al. (2007) und Palmer und Schloss (2009) ließe sich der Effekt mit der sog. *Partial-Modal-Completion Hypothesis* erklären, wonach ein partiell verdecktes Objekt nicht nur amodal vervollständigt, sondern zusätzlich auch partiell modal ergänzt wird, so dass das verdeckte Objekt wahrgenommen wird, „als ob es weniger verdeckt wäre, als es tatsächlich ist“ (Palmer & Schloss, 2009, S. 1083). Die experimentellen Befunde von Palmer und Kollegen sprechen klar für die *Partial-Modal-Completion Hypothesis*, so dass sie aus empirischen Gründen ernstgenommen werden muss.

Aus theoretischer Sicht ergeben sich jedoch weitere Fragen: Wie schon in Abschnitt 2.3.4.3 angesprochen, ist unklar, wo der modal ergänzte Streifen perzeptuell lokalisiert sein sollte. Palmer et al. (2007) spekulieren, dass das visuelle System es ähnlich wie bei „unmöglichen Figuren“² „irgendwie“ fertigbringt, ein perzeptuell konsistentes Gesamtbild zu erzeugen, für das es keine physikalisch mögliche Entsprechung gäbe, indem der ergänzte Streifen an derselben Position sichtbar wäre wie der Verdecker. Informelle Beobachtungen deuten darauf hin, dass Palmer und Kollegen mit dieser Annahme richtig liegen könnten. Der modale Charakter des ergänzten Streifens implizierte im traditionellen Sinne allerdings,

¹Wesentliche Teile dieses Kapitels sind, direkt übersetzt oder sinngemäß, aus dem Manuskript von Scherzer und Ekroll mit dem Titel „Partial modal completion under occlusion: What do modal and amodal percepts represent?“ übernommen worden, ohne dass die entsprechenden Passagen nochmals explizit gekennzeichnet wurden. Auch zahlreiche Abbildungen wurden aus dem genannten Manuskript, unverändert oder leicht verändert, ohne explizite Kennzeichnung übernommen. Das Manuskript wurde am 26. März beim *Journal of Vision* zur Veröffentlichung eingereicht und befindet sich zur Zeit im Review-Prozess.

²wie z. B. dem Penrose-Dreieck (Penrose & Penrose, 1958)



Abbildung 4.1: Bildschirmfoto einer Demonstration der dynamischen Version der Verdeckungstäuschung. Siehe Text für Details.

dass ein geometrisch-optisch *unsichtbarer* Teil der Figur paradoxerweise perzeptuell *sichtbar* wäre. Der Verweis von Palmer und Kollegen darauf, dass das visuelle System „gleichermaßen bizarre Ergebnisse bei anderen Täuschungen“ (ebd., S. 669) hervorbringen kann, ist aus theoretischer Sicht unbefriedigend, weil dadurch das Paradoxon nicht erklärt wird.

Darüber hinaus ist die *Partial-Modal-Completion Hypothesis* insofern unvollständig, als sie keine Aussage darüber macht, *warum* ein Teil des Hintergrunds als verdeckt (amodal vervollständigt) und ein anderer Teil als sichtbar (modal ergänzt) wahrgenommen wird.

In diesem Kapitel soll eine dynamische „Täuschung“ untersucht werden, die der statischen Verdeckungstäuschung konzeptionell ähnlich ist, allerdings einen stärkeren Effekt als diese hervorrufen kann und die paradoxe Erscheinungsweise der Verdeckungstäuschung in direkter Weise greifbar macht. Im Rahmen der Diskussion wird dann versucht, eine logisch konsistente und vollständige theoretische Erklärung für die phänomenologische Befundlage zu entwickeln, die das Paradoxon auflöst. Grob skizziert, ist dies möglich, indem die obengenannte, häufig stillschweigend getroffene, implizite Annahme, modale Perzepte repräsentierten geometrisch-optisch direkt sichtbare Bereiche und amodale Perzepte geometrisch-optisch unsichtbare Bereiche, aufgegeben wird und man statt dessen annimmt, dass die modale Qualität eines Perzepts die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise hinsichtlich qualitativer Attribute der visuellen Szene repräsentiert. Diese Idee wird in der Diskussion noch ausführlich erklärt.

4.1 Demonstration

Abbildung 4.1 zeigt ein Bildschirmfoto einer einfachen Demonstration der dynamischen Version der Verdeckungstäuschung, die unter folgender Internet-Adresse betrachtet werden kann: <http://www.uni-kiel.de/psychologie/psychophysik/demos/paradoxon>. Auf der linken Seite rotiert ein halber Kreissektor vor einem ringförmigen Streifen im Hintergrund. Zu jedem Zeitpunkt beträgt der physikalische Mittelpunktswinkel sowohl des Kreissektors als auch des sichtbaren Streifenabschnitts jeweils 180° , d. h., beide Elemente bilden jeweils einen Halbkreis. Wie man auf Basis der Literatur über amodale Vervollständigung annehmen kann, wird der partiell verdeckte Streifen perzeptuell zu einem vollen Streifen (Ring) amodal vervollständigt. Die in diesem Fall interessante Beobachtung ist allerdings, dass zu jedem Zeitpunkt deutlich mehr als die tatsächlich sichtbaren 180° des Streifens als direkt sichtbar (modal) wahrgenommen werden. Gleichzeitig wird der verdeckende Kreissektor ungefähr „veridikal“ wahrgenommen; der Mittelpunktswinkel des wahrgenommenen Kreissektors beträgt also ca. 180° . Zusammengenommen implizieren diese beiden Beobachtungen, dass mehr als 360° gleichzeitig als direkt sichtbar wahrgenommen werden. Diese Beobachtung, die im folgenden als „Sichtbarkeitsparadoxon“ bezeichnet wird, kann als analog zu dem „bizarren“ Perzept der modalen Ergänzung in Palmer et al. (2007, S. 669) aufgefasst

werden.

Ein Vorteil dieses dynamischen Reizes gegenüber dem statischen Reiz, den Palmer und Kollegen untersuchten, ist, dass die Existenz des Paradoxons direkt demonstriert werden kann: Durch die kreisförmige räumliche Anordnung wird das Paradoxon unmittelbar sichtbar, wenn eine perzeptuelle Expansion des Streifens im Hintergrund ohne eine korrespondierende Verringerung der Ausmaße des Kreissektors wahrgenommen wird. Ein zweiter Vorteil liegt darin, dass der Effekt in diesem dynamischen Reiz stärker und überzeugender auftritt als in der statischen Verdeckungstäuschung. Dadurch sollte es leichter möglich sein, das Paradoxon quantitativ nachzuweisen. Außerdem kann der Effekt in diesem Fall nicht so leicht als reines Artefakt aufgefasst und ignoriert werden.

Der Reiz auf der rechten Seite der Demonstration ist identisch mit dem auf der linken Seite, außer dass der rotierende Kreissektor fehlt. Der sichtbare Streifenabschnitt, der auf der linken Seite als Teil eines stationären, vollständigen Streifens (Rings) hinter einem Verdeckter wahrgenommen wird, wird nun als bogenförmiger Streifen wahrgenommen, der sich auf einem ringförmigen Pfad bewegt. Es ist aus der Literatur bekannt, dass das Hinzufügen von Verdeckungshinweisen, die Änderungen im Reiz, welche ansonsten zu einem Bewegungseindruck führen, erklären könnten, den Bewegungseindruck aufheben kann (Ekroll & Borzikowsky, 2010; Shimojo & Nakayama, 1990; Sigman & Rock, 1974, vgl. auch Kapitel 1 und 2). Es ist daher nicht überraschend, dass der sichtbare Streifenabschnitt als bewegt wahrgenommen wird, wenn der verdeckende rotierende Kreissektor fehlt. Hierbei sollte allerdings berücksichtigt werden, dass durch das Entfernen des sichtbaren rotierenden Kreissektors nicht *alle* im Reiz vorhandenen Verdeckungshinweise entfernt werden: Insbesondere das dynamische Hinzufügen und Entfernen an den beiden Enden des Streifens könnte in Kombination mit der stationären Textur als Verdeckungshinweis aufgefasst werden, denn ebenso wie der Reiz auf der linken Seite ist auch der Reiz auf der rechten Seite kompatibel mit der Existenz einer rotierenden halben Kreisscheibe, nur dass diese im letzteren Fall dieselbe Farbe wie der Hintergrund hätte.³ Somit sollte gemäß der Hypothese, dass die perzeptuelle Expansion des Streifens im linken Reiz durch Verdeckungshinweise hervorgerufen wird, die perzeptuelle Expansion des bogenförmigen Streifens im rechten Reiz weniger stark sein – könnte aber dennoch auftreten. Dazu passend ist eine solche Expansion des bogenförmigen Streifens im rechten Reiz durchaus erkennbar, wenn auch weniger stark als die Expansion des als sichtbar wahrgenommenen ringförmigen Streifens im linken Reiz.

4.2 Experiment VI

Das Ziel des ersten Experiments war die Prüfung und Quantifizierung der informellen Beobachtungen, insbesondere sollte die Existenz des „Sichtbarkeitsparadoxons“ nachgewiesen werden, also die Expansion des als direkt sichtbar wahrgenommenen ringförmigen Streifenabschnitts ohne korrespondierende perzeptuelle Verringerung des Ausmaßes des verdeckenden rotierenden Kreissektors. Zudem sollte geprüft werden, ob auch ohne sichtbaren Verdeckter eine perzeptuelle Expansion des bogenförmigen Streifens hervorgerufen wird, und ob diese geringer als in der Bedingung mit sichtbarem Verdeckter ausfällt.

4.2.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Auf einem Computer-Bildschirm wurden dynamische Sequenzen, wie in Abbildung 4.2 illustriert, dargeboten. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, entweder die wahrgenommene Größe des Kreissektors oder die des sichtbaren Streifenabschnitts mit den entsprechenden Größen in einem Vorgabereiz abzugleichen. Durch die getrennte Erhebung der beiden Größen

³Eine auf diese Weise wahrgenommene Bewegung eines illusionären Verdeckers (Kanizsa, 1979) in Verbindung mit dynamischen Verdeckungshinweisen wurde bereits in anderen Studien über Scheinbewegung beobachtet (Petersik & McDill, 1981) und könnte im Zusammenhang mit dem φ -Phänomen stehen (Ekroll et al., 2008; Steinman et al., 2000; Wertheimer, 1912).

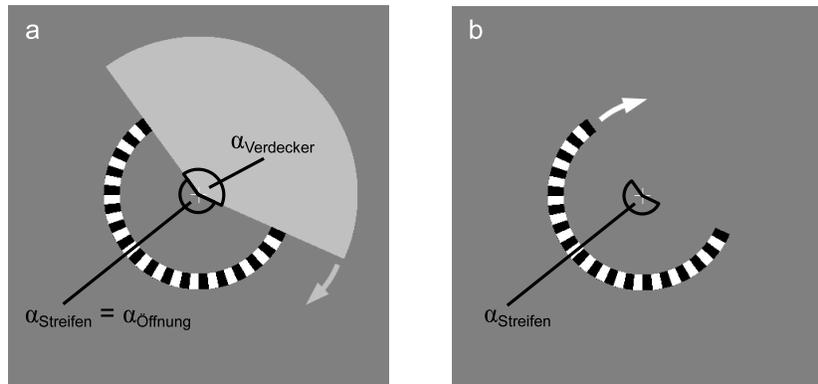


Abbildung 4.2: Reize aus Experiment VI. **a)** In der Experimentalbedingung rotierte ein grauer Kreissektor mit Mittelpunktswinkel $\alpha_{\text{Verdecker}}$ vor einem stationären, ringförmigen Streifen im Uhrzeigersinn. Der Mittelpunktswinkel $\alpha_{\text{Verdecker}}$ des Kreissektors wurde von Sequenz zu Sequenz variiert (hier: 150°); entsprechend variierte auch der komplementäre Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}}$ des Verdeckers, der zugleich mit dem Mittelpunktswinkel des unverdeckten Streifenabschnitts, α_{Streifen} , übereinstimmte (hier: 210°). **b)** In der Kontrollbedingung wurde der Kreissektor entfernt, so dass nur ein bogenförmiger Streifen sichtbar war, der nun als bewegt entlang eines ringförmigen Pfades wahrgenommen wurde. Die Länge des Streifens (bzw. sein Mittelpunktswinkel α_{Streifen}) wurde wie in der Experimentalbedingung von Sequenz zu Sequenz variiert.

bestand die Möglichkeit, dass sich die eingestellten Mittelpunktswinkel der beiden Elemente zu mehr als 360° addieren, was auf das Auftreten des Sichtbarkeitsparadoxons hinwies.

Versuchsplan. In der Experimentalbedingung rotierte ein hellgrauer Kreissektor (Verdecker), dessen Fläche einen Mittelpunktswinkel von $\alpha_{\text{Verdecker}}$ aufwies und dessen Öffnung somit einen komplementären Winkel von $\alpha_{\text{Öffnung}}$ hatte, vor einem stationären, schwarz-weißen Streifen (Hintergrund), dessen unverdeckter Bereich einen Mittelpunktswinkel von $\alpha_{\text{Streifen}} = \alpha_{\text{Öffnung}}$ hatte (Abbildung 4.2a). In der Kontrollbedingung wurde der Kreissektor entfernt, so dass nur der schwarz-weiße Streifenabschnitt (Hintergrund) übrigblieb, der nun als bewegter, bogenförmiger Streifen erschien (b).

In der Experimentalbedingung wurde die Größe des Mittelpunktswinkels des Kreissektors, $\alpha_{\text{Verdecker}}$, in vier Stufen variiert: 30° , 150° , 210° und 330° . Der Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}}$ des Verdeckers variierte somit in komplementärer Weise. Winkelgrößen, die dem Vielfachen eines Viertelkreises entsprechen, wurden bewusst vermieden, da Abweichungen von diesen ausgezeichneten Winkeln leicht erkannt werden können und die Einstellungen durch die Versuchspersonen deshalb möglicherweise anfällig für kognitive Kompensationsmechanismen gewesen wären. Der unverdeckte Bereich des schwarz-weißen Streifens im Hintergrund variierte gemäß der Beziehung $\alpha_{\text{Streifen}} = \alpha_{\text{Öffnung}} = 360^\circ - \alpha_{\text{Verdecker}}$ in vier korrespondierenden Stufen. In der Kontrollbedingung wurde die Länge des bogenförmigen Streifens, d. h. die Größe des Mittelpunktswinkels α_{Streifen} , in denselben vier Stufen wie in der Experimentalbedingung variiert.

Die Aufgabe der Versuchspersonen in der Experimentalbedingung bestand entweder darin, die Größe eines statischen Kreissektors durch Anpassen des Mittelpunktswinkels $\beta_{\text{Verdecker}}$ so einzustellen, dass diese möglichst genau der wahrgenommenen Größe des Kreissektors im dynamischen Vorgabereiz entsprach, oder die Länge eines statischen Streifenabschnitts durch Anpassen des Mittelpunktswinkels β_{Streifen} so einzustellen, dass diese möglichst genau der wahrgenommenen Größe des *sichtbaren* Streifenabschnitts im dynamischen Vorgabereiz entsprach. In der Kontrollbedingung sollte die Länge eines statischen bogenförmigen Streifens durch Anpassen des Mittelpunktswinkels β_{Streifen} so eingestellt werden, dass diese der wahrgenommenen Länge des bewegten Streifens im Vorgabereiz entsprach.

Hypothese. Aus den informellen Beobachtungen und deren theoretischer Deutung ergibt sich die Erwartung, dass die Summe der eingestellten Mittelpunktswinkel in der Experimentalbedingung größer als 360° ist und dies auf eine Überschätzung der Länge des unverdeckten Streifenabschnitts zurückzuführen ist. In der Kontrollbedingung ohne verdeckenden Kreissektor ist eine akkurate(re) Einstellung der Streifenlänge zu erwarten. Diese Hypothese lässt sich wie folgt formalisieren:

1. In der Experimentalbedingung:

- $\beta_{\text{Streifen}} > \alpha_{\text{Streifen}}$ und
- $\beta_{\text{Verdecker}} \approx \alpha_{\text{Verdecker}}$, so dass
- $\beta_{\text{Streifen}} + \beta_{\text{Verdecker}} > 360^\circ$.

2. In der Kontrollbedingung: $\beta_{\text{Streifen}} \approx \alpha_{\text{Streifen}}$. Möglicherweise tritt auch in der Kontrollbedingung eine Überschätzung der Streifenlänge auf, weil dort nicht sämtliche Verdeckungshinweise vollständig eliminiert werden können (vgl. Abschnitt 4.1). Es wäre jedoch zu erwarten, dass die Überschätzung in der Kontrollbedingung zumindest geringer ausfällt als in der Experimentalbedingung.

Versuchsaufbau. Es wurde dieselbe Ausstattung (Raum, Geräte etc.) wie in den vorherigen Experimenten genutzt (siehe Abschnitt „Versuchsaufbau“ auf S. 67). Die dynamischen Reize wurden auf dunkelgrauem Hintergrund mit einem weißen Fixationskreuz in der Mitte dargeboten. Der Beobachterabstand zum Monitor betrug ca. 80 cm. Der Kreissektor mit einem Durchmesser von ca. 9° Sehwinkel war hellgrau in der Experimentalbedingung und dunkelgrau – wie der Hintergrund und damit unsichtbar – in der Kontrollbedingung und rotierte mit einer Geschwindigkeit von 0,94 Umdrehungen pro Sekunde. Der innere Durchmesser des schwarz-weißen Streifens betrug etwa $4,5^\circ$ Sehwinkel bei einer Streifenbreite von ca. $0,5^\circ$ Sehwinkel. Der Streifen war in beiden Bedingungen stationär und bestand aus 60 abwechselnd schwarzen und weißen Segmenten mit gleicher, konstanter Breite.

Versuchsdurchführung. Vor dem Beginn jeder Sequenz gab eine Texteinblendung an, ob die Fläche des Kreissektors („Scheibe“; nur in der Experimentalbedingung) oder die Länge des Streifens/Streifenabschnitts („Streifen“; in beiden Bedingungen) durch Anpassen des jeweiligen Mittelpunktswinkels eingestellt werden sollte. Dann startete die Animation. Per Tastendruck konnte die Animation gestoppt werden und nur das einzustellende Element blieb unbewegt sichtbar, wobei dessen Orientierung erhalten blieb. Der einzustellende Mittelpunktswinkel β wich zu Beginn einer jeden Einstellungssequenz vom Mittelpunktswinkel α im Vorgabereiz zufällig um $\pm\delta$ ab, wobei δ wiederum zufällig zwischen 10° und $22,5^\circ$ lag. Mittels der Pfeiltasten konnte β – und somit die Größe bzw. Länge des Elements – verändert werden. Die Versuchspersonen wurden darum gebeten, mehrfach zwischen dem animierten Vorgabereiz und dem statischen Vergleichsreiz hin und her zu schalten, bis sie mit ihrer Einstellung zufrieden waren.

Insgesamt gab es zwölf Kombinationen aus unterschiedlichen Aufgaben und Reizen: 2 Aufgaben \times 4 Variationen der Mittelpunktswinkel in der Experimentalbedingung plus 1 Aufgabe \times 4 Variationen der Mittelpunktswinkel in der Kontrollbedingung. Jede Kombination wurde zehnmal wiederholt und die 120 resultierenden Reizsequenzen in pseudo-randomisierter Reihenfolge dargeboten.

Versuchspersonen. Am Experiment nahmen 13 Student/innen der Universität Kiel teil, die naiv bezüglich der Fragestellung waren und für die Teilnahme Versuchspersonenstunden (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“ auf S. 67) angerechnet bekamen. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen. Die Daten einer Versuchsperson, die in der Experimentalbedingung offensichtlich das amodale Perzept des vollständigen Hintergrundstreifens statt des direkt sichtbaren Streifenabschnitts abglich, wurden nicht berücksichtigt.

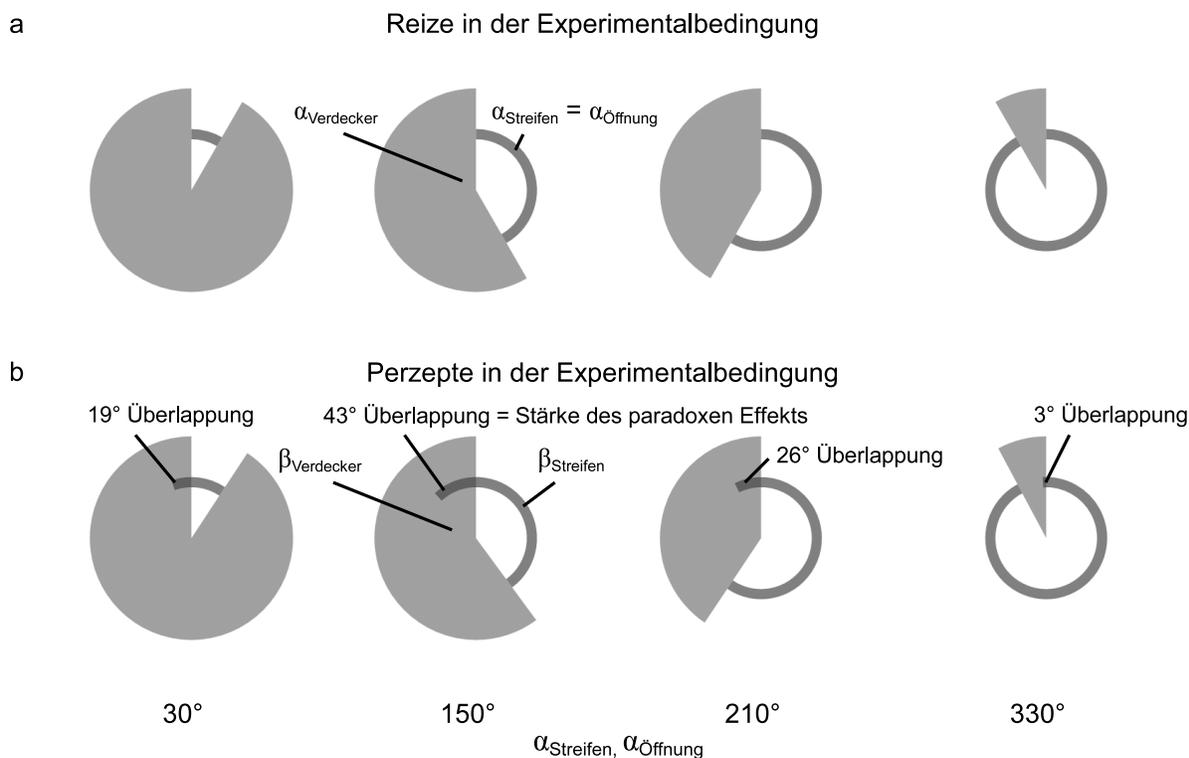


Abbildung 4.3: Reize und zugehörige Perzepte in der Experimentalbedingung. **a)** Skizze der tatsächlichen Ausmaße α der Reizelemente. **b)** Visualisierung der Perzepte β gemäß den mittleren Einstellungen aller Versuchspersonen. In dieser Darstellung sind Kreissektor und Streifen willkürlich so ausgerichtet, dass der Überlappungsbereich asymmetrisch auf eine Seite der Öffnung beschränkt ist. Wie die Überlappung insgesamt tatsächlich phänomenal aufgeteilt ist, kann anhand der Einstellungen der Versuchspersonen nicht bestimmt werden, aber auf Basis informeller Beobachtungen ist anzunehmen, dass die Expansion des Streifens im Hintergrund überwiegend an der „hinteren“ Grenze der Öffnung erfolgt, also dort, wo der Streifen kurz zuvor tatsächlich geometrisch-optisch sichtbar war.

4.2.2 Ergebnisse

Die mittleren Einstellungen der Versuchspersonen in der Experimentalbedingung offenbaren das Sichtbarkeitsparadoxon (Abbildung 4.3): Während die Größe des verdeckenden Kreissektors recht akkurat eingestellt wurde, (-4° bis 6° Abweichung zwischen den Mittelpunktswinkeln $\beta_{\text{Verdecker}}$ und $\alpha_{\text{Verdecker}}$), wurde der sichtbare Bereich des Streifens, β_{Streifen} , um bis zu 36° überschätzt (Spalte 2). Dementsprechend überschreitet die Summe der eingestellten Winkel $\beta_{\text{Verdecker}}$ und β_{Streifen} 360° in allen vier Winkelbedingungen (um 3° bis 43° ; im Mittel um 23°). Der Effekt war hochsignifikant in jeder Bedingung (einseitiger t-Test: $t(11) < -3,10$; $p < 0,01$) außer in der Bedingung mit $\alpha_{\text{Streifen}} = \alpha_{\text{Öffnung}} = 330^\circ$ (Spalte 4). Betrachtet man die Demonstration (vgl. Abschnitt 4.1), ist sogar davon auszugehen, dass das tatsächliche Ausmaß des paradoxen Effekts noch größer ist, als die Messwerte anzeigen. Dass die Daten nicht unbedingt immer das unmittelbare Perzept wiedergeben, legen Aussagen einzelner Versuchspersonen im Rahmen von informellen Nachbesprechungen nahe, in denen sie angaben, sich bei der Einstellung des sichtbaren Streifenabschnitts auch an der sichtbaren Öffnung des Kreissektors orientiert zu haben.

In Abbildung 4.4 sind die Ergebnisse der Experimentalbedingung aus Abbildung 4.3 zusammen mit den Ergebnissen der Kontrollbedingung als Balkendiagramm dargestellt. Die weißen Balken zeigen die Differenz $\beta_{\text{Streifen}} - \alpha_{\text{Streifen}}$ zwischen dem eingestellten und dem tatsächlichen Mittelpunktswinkel des sichtbaren Streifenabschnitts für alle Stufen von $\alpha_{\text{Öffnung}}$ in der Experimentalbedingung. Analog zeigen die grauen Balken die Differenz $\beta_{\text{Verdecker}} - \alpha_{\text{Verdecker}}$ zwischen dem eingestellten und dem tatsächlichen

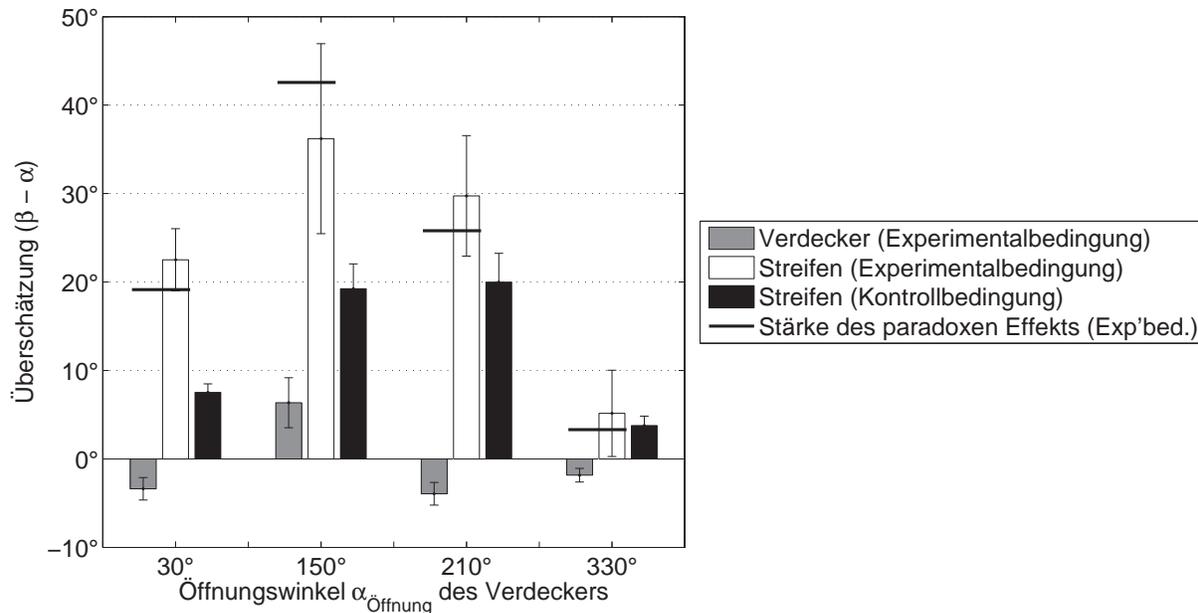


Abbildung 4.4: Ergebnisse des Experiments VI. Die Balken zeigen jeweils die Differenz zwischen dem eingestellten und dem tatsächlichen Mittelpunktswinkel ($\beta - \alpha$) in Grad. Die Tatsache, dass die teilweise deutliche Überschätzung der sichtbaren Streifenabschnitte in der Experimentalbedingung (weiße Balken) nicht durch die – recht akkurat – geschätzte Größe des verdeckenden Kreissektors (graue Balken) kompensiert wurde, weist auf das Vorliegen des Sichtbarkeitsparadoxons hin (die Summe der Mittelpunktswinkel beider Elemente in der Experimentalbedingung, hier dargestellt als schwarze horizontale Linien, entspricht den Überlappungsbereichen in Abbildung 4.3b) – außer in der Bedingung mit $\alpha_{\text{Streifen}} = \alpha_{\text{Öffnung}} = 330^\circ$. Die Kontrollbedingung zeigt, dass die Länge des dort bewegt erscheinenden bogenförmigen Streifens (schwarze Balken) zwar auch ohne verdeckenden Kreissektor überschätzt wurde, jedoch nur etwa halb so stark wie in der Experimentalbedingung. Die Fehlerbalken entsprechen ± 1 SEM, bezogen auf die Mittelwerte der Versuchspersonen.

Mittelpunktswinkel des rotierenden Kreissektors. Die Summe beider Balken, hier dargestellt als schwarze horizontale Linie, repräsentiert die Stärke des paradoxen Effekts (vgl. auch die Überlappungsbereiche in Abbildung 4.3b). Die schwarzen Balken zeigen den Überschätzungseffekt der Streifenlänge in der Kontrollbedingung ohne verdeckenden Kreissektor, in der der Effekt im Mittel nur etwa halb so stark wie in der Experimentalbedingung auftrat. Dies deutet darauf hin, dass die Expansion des als sichtbar wahrgenommenen Streifenabschnitts in der Experimentalbedingung nicht primär auf visuelle Persistenz (Coltheart, 1980) zurückgeführt werden kann, deren Auftreten nicht von der An- oder Abwesenheit eines Verdeckers abhängen sollte.

4.2.3 Diskussion

Die Ergebnisse dieses Experiments deuten darauf hin, dass die Expansion des als sichtbar wahrgenommenen Streifenabschnitts mit der Wahrnehmung von Verdeckung verbunden ist: In der Kontrollbedingung, in der der zuvor sichtbare verdeckende Kreissektor (aber nicht alle Hinweise auf Verdeckung, vgl. Abschnitt 4.1) fehlte, fiel die Expansion des als sichtbar wahrgenommenen ringförmigen Streifenabschnitts (d. h. die Überschätzung bei der Einstellung seines Mittelpunktswinkels) geringer aus als in der Experimentalbedingung. Von größerer Bedeutung ist aus theoretischer Sicht aber der Befund, dass die perzeptuelle Vergrößerung des sichtbaren Ringabschnitts in der Experimentalbedingung (repräsentiert durch einen „zu groß“ eingestellten Mittelpunktswinkel) nicht mit einer entsprechenden Verringerung des Mittelpunktswinkels des verdeckenden Kreissektors einhergeht. Das Sichtbarkeitsparadoxon scheint also ein reales Phänomen zu sein, das eine umfassende theoretische Erklärung erfordert.

4.2.3.1 Anmerkungen zur Methode

Dieses Experiment diente in erster Linie dem Nachweis der Existenz des Sichtbarkeitsparadoxons, d. h. der Verifikation der eingangs formulierten Hypothese. Aufgrund der verwendeten Methode sind jedoch einige Einwände gegen den Befund selbst und gegen die gezogenen Schlüsse möglich:

1. Es wäre möglich, dass der Einfluss der Verdeckungshinweise auf die perzeptuelle Expansion des Streifenabschnitts in der Experimentalbedingung indirekter Natur ist. Das Entfernen des sichtbaren Verdeckers führte in der Kontrollbedingung zur Wahrnehmung von Bewegung des bogenförmigen Streifens, wie auch zu erwarten war, wenn man frühere Arbeiten über den Einfluss von Verdeckungshinweisen auf die Wahrnehmung von Bewegung berücksichtigt (vgl. z. B. Ekroll & Borzikowsky, 2010; Shimojo & Nakayama, 1990; Sigman & Rock, 1974). Dies kann anhand der Demonstration leicht nachvollzogen werden. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die unmittelbare Ursache für die unterschiedlich starke perzeptuelle Expansion des Streifens eher im Zusammenhang mit der unterschiedlichen Aktivierung von Bewegungsmechanismen als mit den unterschiedlich starken Verdeckungshinweisen in beiden Bedingungen steht.
2. Man könnte argumentieren, dass die logisch inkompatiblen Messungen der Mittelpunktswinkel von Kreissektor und Streifen, die das Sichtbarkeitsparadoxon ausmachen, auf Gedächtniseffekte zurückzuführen sind, weil die Messungen nacheinander vorgenommen wurden. Informelle Beobachtungen der Demonstration deuten allerdings darauf hin, dass dies nicht der Fall ist, da anscheinend gleichzeitig zwei inkompatible Perzepte visuell präsent sein können: die Sichtbarkeit des rotierenden Kreissektors ungefähr in Form einer Halbkreisscheibe und gleichzeitig die Sichtbarkeit von deutlich mehr als der Hälfte des ringförmigen Streifens im Hintergrund. Es ist allerdings denkbar, dass das gut dokumentierte Phänomen der *Boundary Extension* (Intraub & Bodamer, 1993; Intraub & Richardson, 1989; Intraub, 2010), das strukturelle Ähnlichkeiten mit der statischen Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007) und mit dem hier vorgestellten dynamischen Sichtbarkeitsparadoxon aufweist und auf einen Gedächtniseffekt zurückgeführt wird, ebenfalls zu dem hier gemessenen Effekt beiträgt.
3. Obwohl die verwendete Abgleichaufgabe, einen statischen Vergleichsreiz entsprechend der Wahrnehmung des dynamischen Vorgabereizes einzustellen, zur Messung der wahrgenommenen Länge des partiell verdeckten Streifens in der Experimentalbedingung naheliegend und einfach erscheint, kann diese Aufgabe schwierig zu bewältigen sein, wie informelle Vorexperimente zeigten. Dies könnte im Zusammenhang mit der bekannten Beobachtung stehen, dass ein Urteil über die Form von Bereichen des Gesichtsfelds, die als (Hinter-)Grund gedeutet werden, erheblich schwerer fällt als eines über die Form von Bereichen, die als Gestalt gedeutet werden (Kanizsa, 1979; Koffka, 1935; E. Rubin, 1958; N. Rubin, 2001). Es ist deshalb davon auszugehen, dass die Versuchspersonen – mit dieser subjektiv schwierigen Aufgabe konfrontiert – ihre Strategie zur möglichst „korrekten“ Einstellung des Vergleichsreizes umkehrten, indem sie sich an der wahrgenommenen Größe der Öffnung der rotierenden Scheibe orientierten statt an der Länge des Streifenabschnitts, der durch die Öffnung hindurch tatsächlich als sichtbar wahrgenommen wurde. Darüber hinaus ist die verwendete Methode anfällig dafür, dass die paradoxe Natur des Perzepts direkt erschlossen wird, was ebenfalls dazu geführt haben könnte, dass die Versuchspersonen sich lieber auf kognitive Strategien als auf ihr Perzept verließen, um möglichst „korrekte“, d. h. konsistente Antworten geben zu können. Mit diesem Problem könnte auch der Befund zusammenhängen, dass das Sichtbarkeitsparadoxon in der Bedingung mit der größten Öffnung im rotierenden Kreissektor (330°) kaum auftrat (vgl. Abbildung 4.4): Wäre der paradoxe Sichtbarkeitseffekt in dieser Bedingung etwa genauso stark wie in den anderen Bedingungen (nämlich in Form eines um ungefähr 30° „zu groß“ eingestellten Mittelpunktswinkels des Streifens), hätten die Versuchspersonen einen mehr oder weniger vollständigen Ring als Vergleichsreiz einstellen müssen, was offensichtlich logisch

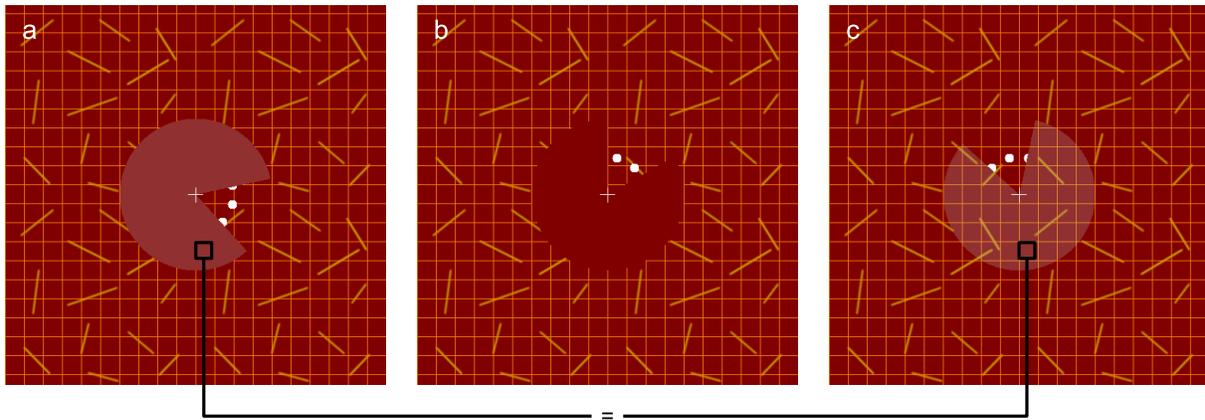


Abbildung 4.5: Reize aus Experiment VII, in dem drei Verdeckertypen zum Einsatz kamen. **a)** Undurchsichtiger „realer“ Verdeckter. **b)** Undurchsichtiger illusionärer Verdeckter in der Farbe des Hintergrunds, der durch die abgeschnittenen weißen Punkte und die unterbrochene Textur im Hintergrund induziert wurde. **c)** Semi-transparenter Kreissektor. Obwohl der gemusterte Hintergrund durch den Kreissektor wie durch eine Filterfolie hindurchschimmerte, waren die weißen Punkte im Hintergrund immer nur in der Öffnung des Kreissektors sichtbar, so als ob dieser undurchsichtig gewesen wäre. Die lokalen physikalischen Farbinformationen sind identisch in den beiden schwarz umrandeten Quadraten in a und c. Der Öffnungswinkel der Kreissektoren beträgt in dieser Abbildung exemplarisch 60° .

inkonsistent mit dem klaren Perzept eines 30° abdeckenden Kreissektors gewesen wäre. Zwar sind die angeführten Punkte insofern unproblematisch, als sie lediglich zu konservativeren Schätzungen über das Ausmaß des paradoxen Sichtbarkeits-effekts führten, jedoch wären alternative Messmethoden, mittels derer diese möglichen „Messfehler“ verhindert oder zumindest verringert werden könnten, wünschenswert.

- Die Ergebnisse der Experimentalbedingung weisen eine Asymmetrie zwischen den Urteilen über die wahrgenommene Größe des verdeckenden Kreissektors einerseits und den Urteilen über die wahrgenommene Länge des als direkt sichtbar wahrgenommenen Streifenabschnitts andererseits auf: Während ein größerer Teil des partiell verdeckten Streifens als sichtbar wahrgenommen wurde, als tatsächlich auf dem Bildschirm dargestellt war, wurde die Größe des verdeckenden Kreissektors von den Versuchspersonen überwiegend akkurat eingestellt, wie gemäß der Annahme, dass die modale Expansion auf Verdeckungshinweise zurückzuführen ist, zu erwarten ist. Weil allerdings der Kreissektor im Vordergrund und der Streifen im Hintergrund unterschiedlich eingefärbt waren, ist nicht auszuschließen, dass die Asymmetrie in irgendeiner Weise mit der Farbe der Reizelemente statt mit der Unterscheidung zwischen verdeckendem und verdecktem Objekt im Zusammenhang steht.

4.3 Experiment VII

Um die oben angeführten möglichen Einwände aufzugreifen, wurde ein zweites Experiment mit einem abgewandelten Paradigma durchgeführt.

4.3.1 Methode

Untersuchungsparadigma. Es wurden ähnliche Reize wie in der Experimentalbedingung in Experiment VI verwendet, allerdings unterschieden sich diese in mehreren Details (Abbildung 4.5):

1. Die sensorischen Hinweise auf Verdeckung wurden variiert und die wahrgenommene Bewegung des Streifens verringert. Letzteres wurde erreicht, indem der verdeckende Kreissektor nun vor einem texturierten Hintergrund rotierte, auf dem anstelle des ringförmigen Streifens zwölf isolierte weiße Punkte ringförmig und äquidistant zueinander angeordnet waren, die (zumeist) als unbewegt wahrgenommen wurden. Die Hinweise auf Verdeckung wurden variiert, indem in diesem Experiment drei verschiedene Kreissektoren als Verdeckertypen eingesetzt wurden: undurchsichtige „reale“ Verdecker wie in Experiment VI (Abbildung 4.5a), undurchsichtige illusionäre (Kanizsa-) Verdecker (b; vgl. Kanizsa, 1979) sowie semi-transparente Verdecker mit widersprüchlichen Verdeckungshinweisen (c). Der Kanizsa-Verdecker wurde gewählt, um die Farbunterschiede zwischen Kreissektor und Hintergrund zu eliminieren bzw. zu minimieren (vgl. Punkt 4). Die rein subjektive Kontur des illusionären Kreissektors entstand in dieser Bedingung allein durch modale Vervollständigung, die durch das Verschwinden und Erscheinen der weißen Punkte und der Textur im Hintergrund induziert wurde (Kanizsa, 1979). Der semi-transparente Kreissektor, erzeugt mit der üblichen Methode des Alpha-Blendings (vgl. Foley, Dam, Feiner & Hughes, 1996; Metelli, 1974), wurde verwendet, um die Hinweise auf Verdeckung durch die Hinweise auf eine transparente Schicht, durch die der Hintergrund durchschimmerte, zu reduzieren. Die Hinweise auf Verdeckung waren in dieser Bedingung jedoch nicht vollständig eliminiert, da die weißen Punkte innerhalb der Öffnung des rotierenden Kreissektors trotz der wahrgenommenen Transparenz dynamisch verschwanden und wiedererschienen – ganz wie in den anderen Bedingungen mit einem undurchsichtigen Verdecker. Haben die Verdeckungshinweise maßgeblichen Einfluss auf die Stärke des paradoxen Sichtbarkeitseffekts, wäre daher zu erwarten, dass dieser in der Transparenz-Bedingung mit schwächeren, widersprüchlichen Verdeckungshinweisen weniger stark als in der Bedingung mit konsistenten Verdeckungshinweisen auftritt.
2. Gedächtniseffekte wurden minimiert, indem die Einstellungen durch die Versuchspersonen, anders als in Experiment VI, simultan zur laufenden Animation erfolgten.
3. Es kam eine andere Messmethode zum Einsatz: Die Versuchspersonen sollten entweder wie in Experiment VI die wahrgenommene Größe des Kreissektors durch Anpassung des Mittelpunktswinkels einstellen („Abgleichaufgabe“) oder die Anzahl der durch die Öffnung des Kreissektors gleichzeitig sichtbaren weißen Punkte angeben („Zählaufgabe“), woraus sich der wahrgenommene Öffnungswinkel des Kreissektors indirekt ermitteln ließ (vgl. Abschnitt „Versuchsaufbau“). Diese indirekte Methode hatte zwei Vorteile gegenüber der Abgleichaufgabe in Experiment VI: Zum einen schien die Zählaufgabe natürlicher und weniger verwirrend zu sein.⁴ Zum anderen wurde dem Beobachter die paradoxe Natur des Perzepts durch die Zählaufgabe weniger offensichtlich, so dass anzunehmen ist, dass die Versuchspersonen nicht oder seltener kognitive Kriterien anwandten, um möglichst konsistent in ihrem Antwortverhalten zu sein.
4. Die Farbunterschiede zwischen Verdecker und Hintergrund waren in der Bedingung mit dem Kanizsa-Verdecker minimal (vgl. Abbildung 4.5b).

Versuchsplan. Es wurden zwei Faktoren variiert:

1. Faktor „Verdeckertyp“ (VT). Es wurden undurchsichtige „reale“, undurchsichtige illusionäre und semi-transparente Kreissektoren verwendet (vgl. Abbildung 4.5). Die Bedingung mit semi-transparentem Kreissektor enthielt widersprüchliche und somit im Vergleich zu den anderen Bedingungen mutmaßlich schwächere Verdeckungshinweise.

⁴Diese Beobachtung mag überraschen und neue interessante theoretische Fragen zur Phänomenologie des Perzepts selbst aufwerfen, auf die an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen werden soll.

2. Faktor „Öffnungswinkel“ (ÖW). Der Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}}$ der Kreissektoren⁵ wurde in zwei Stufen variiert: 30° und 60°. Die Öffnungswinkel wurden bewusst so gering gewählt, dass jederzeit nur eine kleine Anzahl an Punkten gleichzeitig sichtbar war, die noch unmittelbar und ohne zu zählen zuverlässig benannt werden konnte („Subitizing“; vgl. Kaufman, Lord, Reese & Volkmann, 1949).

Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand entweder wie in Experiment VI darin, die Größe eines statischen Kreissektors durch Anpassen des Mittelpunktswinkels $\beta_{\text{Verdecker}}$ so einzustellen, dass diese möglichst genau der wahrgenommenen Größe des Kreissektors im dynamischen Vorgabereiz entsprach, oder die Anzahl der durch die Öffnung des Kreissektors gleichzeitig sichtbaren weißen Punkte anzugeben, woraus sich der wahrgenommene Öffnungswinkel ermitteln ließ. Es war möglich, Zwischenschritte wie „1–2 Punkte“, „2–3 Punkte“ usw. einzustellen, die als 1,5 Punkte, 2,5 Punkte usw. gewertet wurden.

Hypothese. Ist das Sichtbarkeitsparadoxon tatsächlich auf Verdeckung zurückzuführen, so ist zu erwarten, dass der paradoxe Effekt in den beiden Bedingungen mit undurchsichtigem Kreissektor stärker auftritt als in der Bedingung mit semi-transparentem Kreissektor und widersprüchlichen Verdeckungshinweisen. Zwischen der Bedingung mit undurchsichtigem „realen“ Verdecker und der Bedingung mit undurchsichtigem illusionären Verdecker sollte es keinen nennenswerten Unterschied geben, da die Verdeckungshinweise in beiden Bedingungen als ähnlich überzeugend einzuschätzen sind. Wie in Experiment VI ist außerdem zu erwarten, dass das Paradoxon jeweils durch eine Überschätzung der Anzahl der gleichzeitig durch die Öffnung des Kreissektors sichtbaren Punkte bei zugleich akkurater Einschätzung der Größe des Kreissektors zustande kommt und nicht durch eine Überschätzung der Größe des Kreissektors.

Versuchsaufbau. Es wurde dieselbe Ausstattung (Raum, Geräte etc.) wie in den vorherigen Experimenten genutzt (siehe Abschnitt „Versuchsaufbau“ auf S. 67). Der ringförmige Streifen in Experiment VI wurde durch zwölf weiße Punkte ersetzt, die auf einer Kreisbahn mit einem inneren Durchmesser von knapp 1,5° Sehwinkel äquidistant angeordnet waren. Jeder weiße Punkt hatte einen Durchmesser von $\frac{1}{24}$ des Gesamtumfangs der Kreisbahn (also 15° von 360°), ebenso betrug der Abstand zwischen je zwei weißen Punkten $\frac{1}{24}$ des Kreisbahnumfangs. Die Strecke von $\frac{1}{24}$ des Kreisbahnumfangs entsprach dabei einem visuellen Winkel von ca. 0,3°. Der geringe Punktabstand wurde gewählt, um die Zählaufgabe zu erleichtern. Für die Kreissektoren genügte in diesem Experiment ein Durchmesser von ca. 4,5° Sehwinkel. Der Bildschirmhintergrund war wie in Experiment VI dunkelgrau, jedoch wurde in diesem Experiment die Animation (der Vorgabereiz) im linken Bildschirmbereich in einem quadratischen Ausschnitt mit einer Kantenlänge von etwa 11° Sehwinkel vor einem dunkelroten Hintergrund mit orangefarbenem Gitter und willkürlich verstreuten gelben Liniensegmenten sowie mit einem weißen Fixationskreuz in der Mitte dargeboten (Abbildung 4.5). Die Farbe des Kreissegments war rubinrot in der Bedingung mit „realem“ Verdecker (a), dunkelrot wie der Hintergrund in der Bedingung mit illusionärem Verdecker (b) sowie semi-transparent in der dritten Bedingung (c), in der die lokale Oberflächenfarbe des Kreissektors (vor dunkelrotem Hintergrund) identisch mit der lokalen Oberflächenfarbe des Kreissektors in der Bedingung mit „realem“ Verdecker war (schwarze Quadrate in den Tafeln a und c). Im rechten Bildschirmbereich konnte je nach Aufgabe entweder die Einstellung der Größe des Kreissektors anhand eines statischen Vergleichsreizes, der durch einen weißen Umriss dargestellt war, vorgenommen werden (Abbildung 4.6) oder die Anzahl der gleichzeitig sichtbaren weißen Punkte eingestellt werden.

Versuchsdurchführung. Anders als in Experiment VI startete jede Sequenz unmittelbar ohne vorherige Texteinblendung. Sollte die wahrgenommene Größe des Kreissektors im dynamischen Vorgabereiz

⁵ $\alpha_{\text{Öffnung}} = 360^\circ - \alpha_{\text{Verdecker}}$

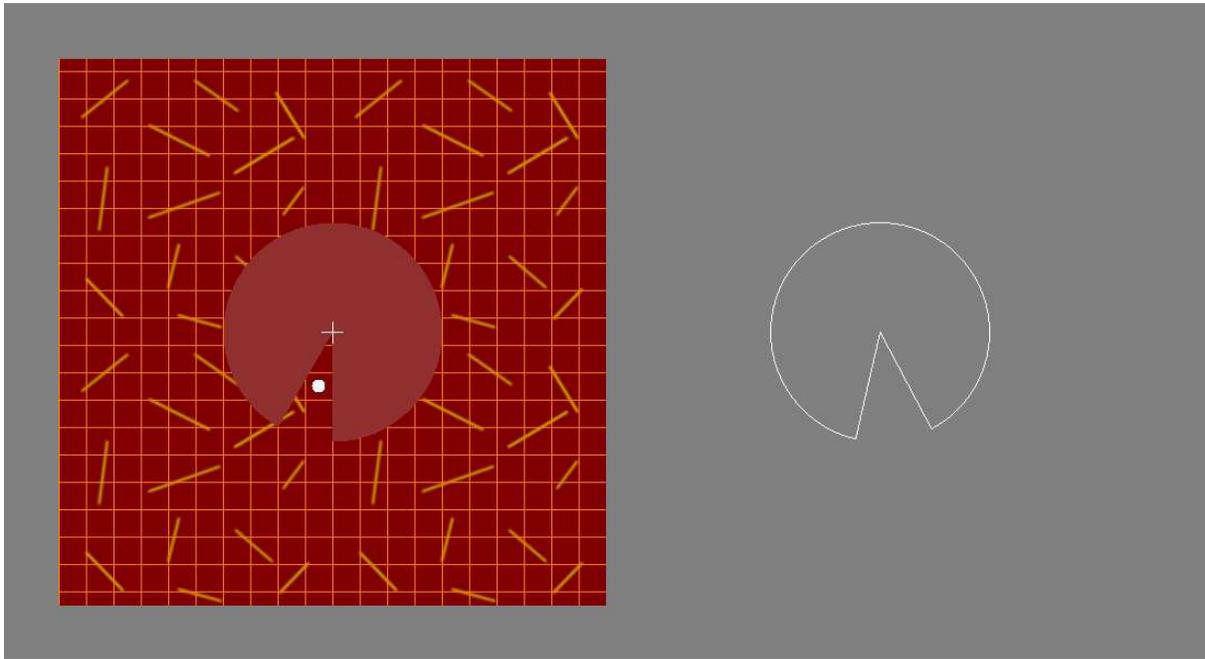


Abbildung 4.6: Bildschirmfoto aus Experiment VII. Links wurde die Animation dargeboten (dynamischer Vorgabereiz), hier die Bedingung mit einem undurchsichtigen „realen“ Verdeckter mit einem Öffnungswinkel von 30° , rechts erfolgten simultan die Einstellungen durch die Versuchspersonen je nach Aufgabe entweder anhand eines statischen Vergleichsreizes zur Einstellung der wahrgenommenen Größe des Kreissektors („Abgleichaufgabe“) oder durch Auswahl des passenden Antworttextes („Zählaufgabe“). Hier dargestellt ist die Abgleichaufgabe.

gemessen werden, wurde ein als weiße Kontur dargestellter Vergleichsreiz dargeboten, dessen Mittelpunktswinkel mittels Pfeiltasten verstellbar war, während gleichzeitig die Animation links weiterlief (Abbildung 4.6). Der initiale Öffnungswinkel $\beta_{\text{Öffnung}}$ des Vergleichsreizes wurde per Zufall auf $\alpha_{\text{Öffnung}} \pm 30^\circ$ bis 60° gesetzt, betrug jedoch stets mindestens 5° . Sollte hingegen die wahrgenommene Anzahl der in der Öffnung des Kreissektors gleichzeitig sichtbaren Punkte eingestellt werden, erschien im rechten Bildschirmbereich eine entsprechende Textanzeige („Anzahl: 1“, „Anzahl: 1–2“, „Anzahl: 2“ usw.). Die Einstellung erfolgte auch in diesem Fall mit den Pfeiltasten.

Insgesamt gab es zwölf Kombinationen aus unterschiedlichen Aufgaben und Reizen: 2 Aufgaben \times 3 Verdeckertypen \times 2 Öffnungswinkel. Jede Kombination wurde zehnmal wiederholt und die 120 resultierenden Reizsequenzen in pseudo-randomisierter Reihenfolge dargeboten.

Versuchspersonen. Am Experiment nahmen zwölf Student/innen im Grundstudium der Psychologie teil, die naiv bezüglich der Fragestellung waren und für die Teilnahme Versuchspersonenstunden (siehe Abschnitt „Versuchspersonen“ auf S. 67) angerechnet bekamen. Alle Versuchspersonen waren normalsichtig oder verfügten über entsprechende Sehhilfen. Die Daten von drei Versuchspersonen, die in bestimmten Bedingungen von einem Bewegungseindruck der weißen Punkte in der Öffnung des Kreissektors berichteten, die die ringförmig angeordneten Punkte mithin also nicht als stationär wahrnahmen, wurden ignoriert, um die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Bedingungen im Hinblick auf die Fragestellung sicherzustellen.

4.3.2 Ergebnisse

Abbildung 4.7a zeigt die Anzahl der Punkte, die als direkt sichtbar wahrgenommen wurden, für verschiedene Öffnungswinkel (linke bzw. rechte Balkengruppe) für jede Reizbedingung. Die Balken stellen die

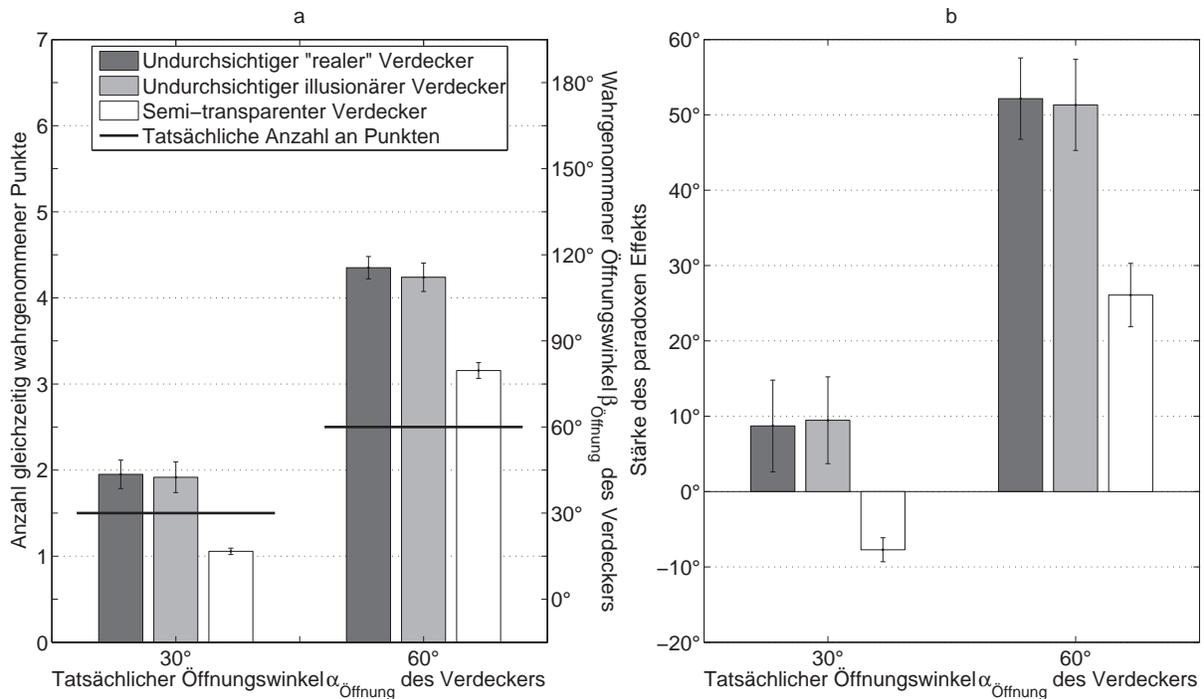


Abbildung 4.7: Ergebnisse des Experiments VII. **a)** Die Balken zeigen jeweils den Mittelwert der angegebenen Anzahl der gleichzeitig sichtbaren weißen Punkte für die drei Verdeckertypen und für die beiden im Experiment verwendeten Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}}$. Der daraus abgeleitete wahrgenommene Öffnungswinkel $\beta_{\text{Öffnung}}$ ist in 30°-Schritten auf der rechten Ordinate aufgetragen (siehe Text). Die schwarzen horizontalen Linien zeigen jeweils die mittlere Anzahl der tatsächlich sichtbaren Punkten im Reiz. **b)** Die mittlere Stärke des paradoxen Effekts je Bedingung, berechnet als Differenz des Mittelwerts der eingestellten Größe des Kreissektors $\beta_{\text{Verdeckter}}$ (nicht in der Abbildung dargestellt) und des Mittelwerts des eingestellten Öffnungswinkels $\beta_{\text{Öffnung}}$, der sich aus der Anzahl der als gleichzeitig sichtbar eingestellten Punkte errechnet lässt (siehe Text).

Mittelwerte über alle Versuchspersonen dar, und die schwarzen horizontalen Linien geben die über die Zeit gemittelte Anzahl der tatsächlich am Bildschirm vorhandenen Punkte an. Drei allgemeine Trends sind erkennbar: Erstens wurden mehr Punkte als gleichzeitig sichtbar wahrgenommen, wenn der verdeckende Kreissektor undurchsichtig war, als wenn dieser semi-transparent erschien. Zweitens sind die Ergebnisse in den Bedingungen mit realem und illusionärem Verdeckter im wesentlichen identisch. Und drittens wurde die Anzahl der gleichzeitig sichtbaren Punkte in der Bedingung mit größerem Öffnungswinkel von $\alpha_{\text{Öffnung}} = 60^\circ$ stärker überschätzt als in der Bedingung mit kleinerem Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}} = 30^\circ$.

Der mittlere eingestellte Öffnungswinkel des Kreissektors $\beta_{\text{Öffnung}}$ stimmte überwiegend mit dem tatsächlichen Öffnungswinkel $\alpha_{\text{Öffnung}}$ überein und wich in keiner Bedingung um mehr als -6° bzw. 5° ab (nicht abgebildet).⁶ Diese kleinen Abweichungen sind in Abbildung 4.7b bei der Berechnung der Stärke des paradoxen Sichtbarkeitseffekts berücksichtigt. Zur Ermittlung des wahrgenommenen Öffnungswinkels $\beta_{\text{Öffnung}}$ wurde die mittlere Anzahl der wahrgenommenen Punkte N herangezogen. Die Überlegung hierbei war, dass bei einem Öffnungswinkel von 30° physikalisch jeweils für die Hälfte der Zeit genau ein weißer Punkt in der Öffnung vollständig sichtbar war (da der Mittelpunktabstand zwischen je zwei weißen Punkten 30° entlang der Kreisumlaufbahn entsprach und der Durchmesser der weißen Punkte je

⁶Die Abweichung $\beta_{\text{Öffnung}} - \alpha_{\text{Öffnung}}$ betrug 3° („realer“ Verdeckter), 1° (illusionärer Verdeckter) und -6° (semi-transparenter Verdeckter) in der Bedingung mit $\alpha_{\text{Öffnung}} = 30^\circ$ sowie 5° („realer“ Verdeckter), 3° (illusionärer Verdeckter) und -6° (semi-transparenter Verdeckter) in der Bedingung mit $\alpha_{\text{Öffnung}} = 60^\circ$.

15° betrug) und für die andere Hälfte der Zeit zwei weiße Punkte jeweils abgeschnitten sichtbar waren, deren Flächen sich zu einem ganzen Punkt addierten. Im Mittel waren objektiv also 1,5 Punkte gleichzeitig sichtbar. Bei einem Öffnungswinkel von 45° wären objektiv stets zwei Punkte gleichzeitig sichtbar, bei einem Öffnungswinkel von 60° waren objektiv im Mittel 2,5 Punkte gleichzeitig sichtbar usw. Daraus lässt sich folgende Formel für die mittlere Anzahl N_α der objektiv gleichzeitig sichtbaren Punkte ableiten: $N_\alpha = (\alpha_{\text{Öffnung}} + 15^\circ)/30^\circ$ für $\alpha_{\text{Öffnung}} > 0^\circ$.⁷ Durch Ersetzung von $\alpha_{\text{Öffnung}}$ durch $\beta_{\text{Öffnung}}$ (eingestellter Öffnungswinkel) und N_α durch N_β (mittlere Anzahl der als gleichzeitig sichtbar eingestellten Punkte) sowie anschließende Umformung ergibt sich: $\beta_{\text{Öffnung}} = (N_\beta - 1/2) \cdot 30^\circ$. Die Formel setzt $N_\beta > 1/2$ voraus. Diese Bedingung wird erfüllt, weil jede Versuchsperson stets angab, mindestens einen weißen Punkt wahrzunehmen.

4.3.3 Diskussion

Auch in Experiment VII konnte das Sichtbarkeitsparadoxon beobachtet werden. Zusätzlich zeigen die Ergebnisse, dass der paradoxe Sichtbarkeitseffekt deutlich schwächer ausfiel, wenn die Interpretation, dass die Punkte hinter dem Kreissektor fortbestehen, durch Hinweise auf Transparenz des „Verdeckers“ widersprüchlich erschien. Dies deutet darauf hin, dass das Sichtbarkeitsparadoxon tatsächlich auf visuelle Vervollständigung im Zusammenhang mit Verdeckung zurückzuführen ist. Die Ähnlichkeit der Ergebnisse zwischen den Bedingungen mit „realem“ und mit illusionärem Verdecker stützen diese Deutung. Auch die Beobachtung, dass der paradoxe Sichtbarkeitseffekt in der Bedingung mit kleinem Öffnungswinkel des rotierenden Kreissektors ($\alpha_{\text{Öffnung}} = 30^\circ$) erheblich schwächer ausfiel als in der Bedingung mit großem Öffnungswinkel ($\alpha_{\text{Öffnung}} = 60^\circ$), ist kompatibel mit der Vorstellung, dass der Effekt durch Mechanismen zur Repräsentation des partiell verdeckten Hintergrunds hervorgerufen wird: In der Bedingung mit kleinem Öffnungswinkel des Kreissektors sind weniger Informationen über den Hintergrund verfügbar als in der Bedingung mit großem Öffnungswinkel, so dass die vorhandene Basis für eine modale Extrapolation in ersterer Bedingung vermutlich schwächer als in letzterer Bedingung ist.

4.4 Diskussion

Die Demonstration (vgl. Abschnitt 4.1) und die Experimente VI und VII dokumentieren eine dynamische Täuschung, die der statischen Verdeckungstäuschung (vgl. Abschnitte 1.1 und 2.3.4.3 sowie Abbildung 1.5) in mindestens zweierlei Hinsicht ähnlich ist: Zum einen sind beide Täuschungen durch die perzeptuelle Expansion einer Region, die an eine als Verdecker interpretierbare Region angrenzt, gekennzeichnet. Zum anderen deuten sowohl die aktuellen Befunde als auch die Untersuchungen zur statischen Verdeckungstäuschung (Palmer et al., 2007; Palmer & Schloss, 2009) darauf hin, dass die perzeptuelle Expansion in kritischer Weise von den sensorischen Hinweisen auf Verdeckung abhängt. Passend dazu trifft die *Partial-Modal-Completion Hypothesis* von Palmer und Kollegen nicht nur auf die wesentlichen Beobachtungen im Zusammenhang mit der statischen Verdeckungstäuschung zu, sondern lässt sich auch auf die hier untersuchte dynamische Täuschung erfolgreich anwenden. Die Beobachtung, dass die partielle modale Ergänzung, die das Sichtbarkeitsparadoxon hervorruft, hier stärker auftritt als in den Untersuchungen von Palmer und Kollegen, könnte mit der Dynamik der hier verwendeten Reize zusammenhängen, die vermutlich stärkere sensorische Hinweise auf die Fortsetzung der partiell verdeckten Oberfläche und deren Eigenschaften (wie Luminanz und Farbe) enthalten als die statischen Reize von Palmer und Kollegen. Die hier präsentierten Befunde können daher als unterstützendes Argument für die *Partial-Modal-Completion Hypothesis* aufgefasst werden, die somit auch außerhalb des spezifischen Kontexts der statischen Verdeckungstäuschung Anwendung finden kann. Dies passt auch zu der Ver-

⁷Strenggenommen müsste der additive Summand 14° betragen. Zur besseren Verständlichkeit wurde jedoch $15^\circ = 30^\circ/2$ gewählt, da diese Ungenauigkeit vernachlässigbar ist.

mutung von Palmer et al. (2007), die Verdeckungstäuschung sei ein „sehr allgemeines Phänomen, das immer dann auftritt, wenn ein Objekt oder eine Oberfläche als durch eine gemeinsame Kante partiell verdeckt wahrgenommen wird“ (S. 667).

Wie bereits in der Einleitung und in Abschnitt 2.3.4.3 beschrieben, führt die *Partial-Modal-Completion Hypothesis* allerdings unweigerlich zu der Frage, wie bzw. wo Raum für die modale Expansion im Gesichtsfeld geschaffen werden kann. Während amodal vervollständigte Objektbereiche in natürlicher Weise hinter einem Verdecker lokalisiert sind, wird für modal ergänzte Bereiche Raum im visuellen Feld benötigt, was scheinbar eine entsprechende perzeptuelle Verschiebung der umliegenden Bereiche erfordern würde. Allerdings spekulieren Palmer et al. (2007) mit Bezug auf die statische Verdeckungstäuschung, „dass es das visuelle System in irgendeiner Weise fertigbringt, das partiell verdeckte Objekt als räumlich senkrecht zur verdeckenden Kante fortgesetzt zu sehen“ (S. 669), ohne dass die Position des Verdeckers davon beeinflusst wird.⁸ Die hier präsentierten Befunde deuten stark darauf hin, dass dies tatsächlich der Fall ist, und bestätigen somit die Vermutung von Palmer und Kollegen. Dementsprechend muss das Sichtbarkeitsparadoxon als reales Phänomen aufgefasst werden, das eine substantielle theoretische Erklärung erfordert. Eine zweite Frage, die durch die *Partial-Modal-Completion Hypothesis* aufgeworfen wird, betrifft die Erklärung des Phänomens selbst: Zwar wird die Hypothese durch die empirischen Befunde darin bestätigt, dass ein Teil der perzeptuellen Vervollständigung des partiell verdeckten Objekts als modal statt amodal wahrgenommen wird, jedoch fehlt es an einer Erklärung dafür, warum eine partielle modale Ergänzung erfolgt.

4.4.1 Warum erfolgt eine partielle modale Ergänzung?

Die Existenz des Sichtbarkeitsparadoxons zeigt, dass die statische Verdeckungstäuschung mehr als nur ein verblüffendes visuelles Phänomen ist. In ähnlicher Weise wie Eschers berühmte Zeichnungen und andere bekannte sog. unmögliche Figuren wie beispielsweise das Penrose-Dreieck (Penrose & Penrose, 1958) rufen die hier präsentierten Reize ein Perzept hervor, dessen interne Struktur inkompatibel mit jeder denkbaren Interpretation ist, die mit der realen Welt konsistent wäre (Huffman, 1971). Wie die Abbildung 4.8 schematisch illustriert, bedeutet die modale Expansion des Streifens im Hintergrund, dass dieser an bestimmten Stellen im Gesichtsfeld als direkt sichtbar und zugleich als durch den rotierenden Kreissektor verdeckt wahrgenommen wird. Im folgenden Unterabschnitt soll versucht werden, eine Erklärung für diese scheinbar paradoxe Beobachtung zu geben.

4.4.1.1 Versuch einer theoretischen Auflösung des Paradoxons

Ein Schlüssel zur Auflösung des Sichtbarkeitsparadoxons könnte darin liegen, die häufig stillschweigend getroffene, scheinbar selbstverständliche Annahme zu hinterfragen, dass verdeckte Bereiche einer visuellen Szene durch amodale Perzepte und unverdeckte Bereiche durch modale Perzepte repräsentiert werden. Die statische Verdeckungstäuschung und insbesondere das hier präsentierte dynamische Sichtbarkeitsparadoxon demonstrieren eindrücklich, dass diese Annahme keine Allgemeingültigkeit besitzen kann, da bei diesen Phänomenen ein verdeckter Bereich einer visuellen Szene durch ein modales Perzept repräsentiert wird. Dies stimmt im wesentlichen mit der Vorhersage der *Partial-Modal-Completion Hypothesis* überein.

Gibt man diese Annahme jedoch auf, stellt sich unmittelbar die Frage, warum dann einige Perzepte als modal wahrgenommen werden und andere nicht. In diesem Abschnitt wird eine mögliche Antwort auf diese Frage gegeben: Würden visuelle Perzepte immer dann als modal empfunden, wenn hinreichend schlüssige sensorische Hinweise auf bestimmte Attribute der visuellen Szene verfügbar sind, und umgekehrt als amodal, wenn dies nicht der Fall ist, so ließe sich das Sichtbarkeitsparadoxon auflösen.

⁸Der interessierte Leser möge in diesem Zusammenhang auch die Gedanken von MacLeod und Willen (1995) über die phänomenologische Realität des visuellen Raums beachten, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

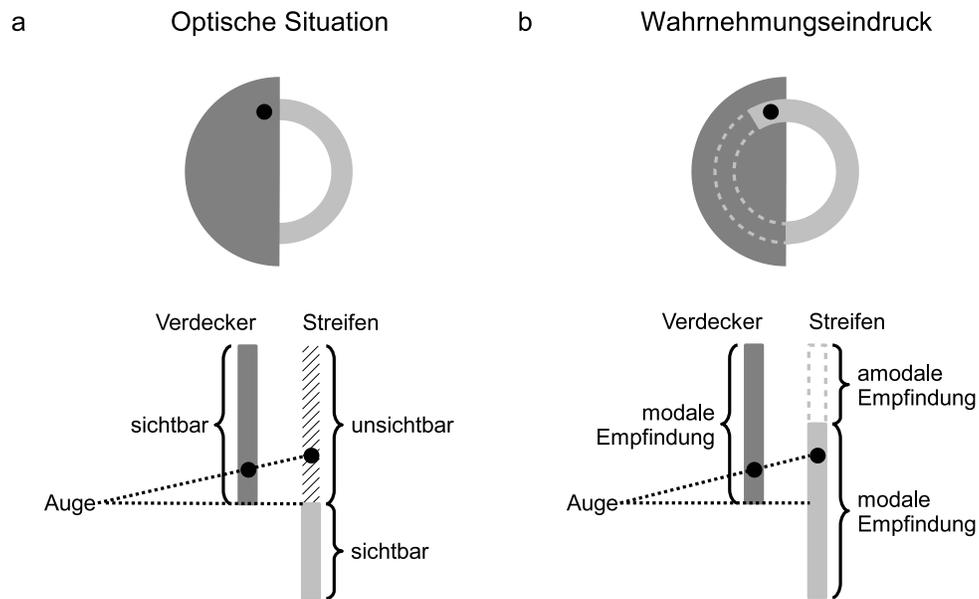


Abbildung 4.8: Schematische Struktur des Reizes (a) und des dadurch ausgelösten Sichtbarkeitsparadoxons (b). **a)** Rein optisch ist der Streifen im Hintergrund überall dort unsichtbar (gestreift), wo dieser durch den Kreissektor – hier eine halbe Kreisscheibe – verdeckt ist (dunkelgrau). **b)** Perzeptuell werden Teile des Streifens als direkt sichtbar empfunden (modales Perzept; hellgrau) und Teile als verdeckt (amodales Perzept; gestrichelter Umriss). Der Verdecker (dunkelgrau) und Teile des Streifens (hellgrau) werden beide als direkt sichtbar empfunden (wie durch die schwarzen Punkte auf der schwarz gestrichelten Sichtlinie dargestellt), obwohl sie hintereinander liegen. Dies bedeutet, dass Teile des Streifens im Hintergrund als direkt sichtbar und gleichzeitig als verdeckt wahrgenommen werden.

HYPOTHESE. Bedeutung modaler und amodaler Perzepte. Modale Empfindungen bestimmter Attribute einer Szene (beispielsweise der Kontur, Form, Oberflächenhelligkeit oder Oberflächenfarbe von Objekten) repräsentieren überzeugende und schlüssige sensorische Hinweise auf diese Attribute. Amodale Empfindungen repräsentieren weniger deutliche sensorische Hinweise.

In vielen Fällen macht diese Hypothese dieselben Vorhersagen wie die traditionelle Annahme, dass modale und amodale Perzepte geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. Unsichtbarkeit repräsentieren, und zwar allein schon deshalb, weil die sensorischen Hinweise, die unverdeckte Regionen einer visuellen Szene betreffen, normalerweise erheblich deutlicher und überzeugender sind als sensorische Hinweise bezüglich verdeckter Regionen. Unter bestimmten Bedingungen, wie sie beispielsweise bei der statischen Verdeckungstäuschung und noch stärker beim dynamischen Sichtbarkeitsparadoxon vorzufinden sind, wären jedoch gemäß dieser Hypothese die verfügbaren sensorischen Hinweise bezüglich qualitativer Attribute von verdeckten Regionen einer Szene ähnlich überzeugend und schlüssig wie sonst nur von unverdeckten Regionen. Unter dieser Annahme wäre es nicht überraschend, dass diese Bereiche als direkt sichtbar (modal) wahrgenommen werden, obwohl sie geometrisch-optisch verdeckt sind. Bezogen auf Abbildung 4.8 hieße dies, dass in dem dargestellten Überlappungsbereich von Verdecker und modal wahrgenommenem Streifen die sensorischen Hinweise auf den farblichen Charakter des optisch verdeckten Streifenabschnitts so überzeugend und schlüssig, ja geradezu zwingend sind, dass sie eine modale Empfindung trotz gleichzeitig wahrgenommener Verdeckung hervorrufen.

Die hier vorgestellte Hypothese ist kompatibel mit dem Befund von Palmer et al. (2007), dass die Stärke der Verdeckungstäuschung mit der „Stärke der Hinweise auf Verdeckung“ variiert (S. 650). Die Stärke der Hinweise auf Verdeckung wäre gemäß der obigen Hypothese allerdings nicht per se die kriti-

sche Variable, sondern eher die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise, die für perzeptuelle Inferenzen/ Interpretationen bezüglich geometrisch-optisch unsichtbarer Regionen einer Szene verfügbar wären. Es ist hierbei unbestritten, dass die Schlüssigkeit von sensorischen Hinweisen hinsichtlich unsichtbarer Regionen unmittelbar mit der Stärke der Hinweise auf Verdeckung verknüpft wäre.

Obwohl die obige Hypothese recht kontraintuitiv erscheinen mag, sollte sie deshalb ernstgenommen werden, weil sie nach aktuellem Kenntnisstand den einzigen logisch konsistenten Ansatz zur Erklärung des Sichtbarkeitsparadoxons darstellt. Es sollte jedoch hervorgehoben werden, dass die Hypothese unmittelbar zwei Fragen aufwirft, die in den folgenden beiden Abschnitten behandelt werden:

1. Ab wann sind sensorische Hinweise „hinreichend schlüssig“, so dass sie eine modale statt amodale Empfindung hervorrufen?
2. Kann in einem bestimmten Bereich des Gesichtsfelds ein Attribut des Wahrnehmungseindrucks als modal und ein anderes Attribut zugleich als amodal empfunden werden?

4.4.1.2 Die Dichotomie der Variable „modal vs. amodal“ – Die Kontinuitätshypothese

Gemäß der obigen Hypothese ist die phänomenale Unterscheidung zwischen der modalen und amodalen Wahrnehmung eines visuellen Attributs von der Schlüssigkeit der zugrunde liegenden sensorischen Hinweise auf dessen konkrete Ausprägung abhängig. Dies scheint zu implizieren, dass eine Art Schwelle existieren muss, oberhalb derer die sensorischen Hinweise überzeugend genug sind, um ein modales statt amodales Perzept hervorzurufen. Eine solche Annahme müsste nicht nur theoretisch motiviert werden, sondern es wäre außerdem notwendig, präzise zu beschreiben, wie sich ein kritischer Schwellwert quantitativ ermitteln ließe und von welchen Aspekten des sensorischen Reizes dieser abhängig wäre. Eine vorläufige Spekulation auf Basis des Bayes'schen Ansatzes der Wahrnehmungstheorie wäre, dass ein Perzept als modal empfunden wird, wenn die A-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle möglichen Interpretationen eines gegebenen Inputs einen hinreichend schmalen Gipfel besitzt, der eine einzelne Interpretation erheblich plausibler macht als alle anderen.

Die Notwendigkeit einer solchen dichotomen Unterscheidung zwischen modalen und amodalen Perzepten ergibt sich allerdings nur, wenn man Sichtbarkeit als dichotome Variable voraussetzt. Dies ist eine natürliche Annahme, wenn man phänomenale Sichtbarkeit mit direkter geometrisch-optischer Sichtbarkeit, die ja dichotom ist, gleichsetzt. Wird phänomenale Sichtbarkeit jedoch, wie hier vorgeschlagen, an eine kontinuierliche Variable gekoppelt, nämlich an die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise, fällt diese Notwendigkeit weg. In diesem Fall erscheint es möglich, dass auch die phänomenologische Variable „modal vs. amodal“ kontinuierlich ist.

4.4.1.3 Unterschiedliche Sichtbarkeit unterschiedlicher visueller Attribute – Die Hypothese der attributbezogenen Sichtbarkeit

Weil zum einen gemäß der obigen Hypothese modale und amodale visuelle Empfindungen an die Schlüssigkeit der zugrunde liegenden sensorischen Hinweise und nicht an die Sichtbarkeit oder Verdeckung von Regionen der visuellen Szene gekoppelt sind und zum anderen die sensorischen Hinweise für unterschiedliche perzeptuelle Attribute eines Objekts (wie Einheit, Kontur, Form, Oberflächentextur oder Oberflächenfarbe) an ein und derselben Stelle im visuellen Feld unterschiedlich schlüssig und überzeugend sein können, wäre es möglich, dass einzelne Attribute, die sich auf eine verdeckte Region beziehen, als phänomenal deutlich und klar spezifiziert erscheinen, d. h., als sichtbar empfunden werden, während zugleich andere Attribute, die sich auf dieselben Region beziehen, nicht oder nur schwach spezifiziert erscheinen, d. h., als unsichtbar bzw. nur vage sichtbar empfunden werden.

Diese Vorstellung könnte Klarheit in die oftmals verwirrende Phänomenologie im Zusammenhang mit amodaler Vervollständigung bringen. Wie bereits bereits in den Abschnitten 2.3.3 und 2.3.4 beschrieben, wird amodale Vervollständigung in der gängigen Literatur üblicherweise sinngemäß durch einen

„überzeugenden Eindruck der ganzen Form“ trotz der „Abwesenheit visueller Qualitäten“ (Michotte et al., 1991, S. 144) oder durch eine „genuin *perzeptuelle Präsenz*“ trotz des Fehlens „chromatischer Attribute der visuellen Modalität“ (Kanizsa, 1985, S. 29) charakterisiert. Doch welche Bedeutung hat der Begriff „perzeptuelle Präsenz“ im phänomenologischen Sinne? Ist nicht der Begriff der „perzeptuellen Präsenz“ in Abwesenheit von „visuellen Qualitäten“ ein Widerspruch in sich? Warum werden im Fall von amodaler Vervollständigung Kontur und Form als völlig überzeugend empfunden, die Oberflächenfarbe hingegen nicht? Und warum werden Luminanz und Farbe, nicht jedoch Kontur und Form als visuelle Qualitäten aufgefasst? Wie in Abschnitt 2.3.4.2 thematisiert, könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die rein phänomenologische Charakterisierung modaler und amodaler Perzepte letztlich doch an sinnesphysiologische Vorstellungen anknüpft. So ließe sich zumindest erklären, weshalb Luminanz und Farbe üblicherweise als „visuelle Qualitäten“ aufgefasst werden, Kontur und Form hingegen nicht. Es ist nämlich nicht ersichtlich, auf welcher phänomenologischen oder gar theoretischen Motivation diese Unterscheidung basiert. Aus phänomenologischer Sicht erschiene es im Prinzip vernünftiger, Kontur und Form genauso wie Luminanz und Farbe als „visuelle Qualitäten“ aufzufassen, die als modal oder amodal, d. h. als sichtbar oder unsichtbar empfunden werden können.

Gemäß der obigen Hypothese ist es möglich, diese wichtigen Beobachtungen in einer theoretischen Sprache zu formulieren, die die genannten Probleme zu vermeiden hilft. Beispielsweise könnte die Beobachtung, dass in vielen bekannten Fällen von amodaler Vervollständigung die Kontur und Form eines Objekts im Gegensatz zu dessen Luminanz und Farbe deutlich und als „visuell präsent“ wahrgenommen wird, so beschrieben werden, dass die perzeptuellen Attribute „Objektkontur“ und „Objektform“ klar spezifiziert sind und deshalb *modal*, d. h. sichtbar erscheinen, während die perzeptuellen Attribute „Oberflächenluminanz“ und „Objektfarbe“ nicht oder nur partiell spezifiziert sind und dementsprechend *amodal*, d. h. unsichtbar bzw. vage erscheinen. Die unterschiedliche Spezifität der verschiedenen perzeptuellen Attribute wäre dann darauf zurückzuführen, dass die sensorischen Hinweise hinsichtlich der Attribute „Objekteinheit“, „Objektkontur“ und „Objektform“ im Fall von amodaler Vervollständigung üblicherweise schlüssiger als die sensorischen Hinweise hinsichtlich der Attribute „Objektfarbe“ und „Objekttextur“ wären.

Folgt man dieser Vorstellung, bliebe allerdings die Frage offen, weshalb sich die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise je nach Attribut unterscheidet. Zwar ist prinzipiell die phänomenale Sichtbarkeit der Oberflächenfarbe oder -textur ohne phänomenale Sichtbarkeit der Kontur und Form des zugehörigen Objekts nur schwer vorstellbar, letztere also wahrscheinlich Voraussetzung für erstere, allerdings stellt dies keine Erklärung dafür dar, weshalb in Fällen von amodaler Vervollständigung im traditionellen Sinne nicht auch die Oberflächenfarbe oder -textur als sichtbar wahrgenommen werden sollte. Schließlich wäre auch die Annahme, dass die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise hinsichtlich der Fortsetzung dieser Oberflächeneigenschaften eines partiell verdeckten Objekts ähnlich stark einzuschätzen ist wie hinsichtlich der Fortsetzung der Objektkontur und -form, nicht unplausibel. Aus phänomenologischen Beobachtungen heraus lässt sich lediglich die Spekulation ableiten, dass eine Diskrepanz zwischen den Bewertungsmaßstäben der Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise auf unterschiedliche Attribute durch das Wahrnehmungssystem besteht, d. h., dass Attribute wie Kontur und Form leichter als perzeptuell verlässlich eingestuft werden als Attribute wie Farbe oder Textur. Dies könnte damit zusammenhängen, dass grundlegende Farbinformationen prinzipiell punktweise aus lokal eng begrenzten Reizinformationen gewonnen werden können und deren perzeptuelle Wahrnehmung daher möglicherweise an eine starke Konformität mit dem Reiz und Unterstützung durch den Reiz (Rock, 1983) gekoppelt ist. Demgegenüber erfordert die Konstruktion der Kontur und Form eines Objekts ohnehin die Integration von Informationen aus voneinander entfernten Reizregionen und basiert – gerade auch im Hinblick auf vollständige Objektrepräsentationen im dreidimensionalen Raum trotz allgegenwärtiger Selbstverdeckung – stets auf teilweise komplexen Inter- und Extrapolationen in perzeptuellen Bereichen, die zwar konform mit den korrespondierenden Reizregionen sind, aber nicht unmittelbar durch den Reiz selbst in den entsprechenden Regionen gestützt werden.



Abbildung 4.9: Virtuelle Figuren, deren perzeptuelle Präsenz „nur amodalen Charakter“ hat (Kanizsa, 1987, S. 44). **a)** Punkte, die durch eine offene, gekrümmte Linie verbunden sind. **b)** Punkte, die durch eine geschlossene Kontur verbunden sind. [Adaptiert nach Kanizsa (1987, Abbildungen 4.1a und 4.3, S. 41 und 42).]

4.4.1.4 Verwandte phänomenologische Beobachtungen

Wie durch die statische Verdeckungstäuschung angedeutet und durch die hier präsentierten Befunde bestätigt, können partiell verdeckte Objekte nicht nur amodal vervollständigt, sondern auch (partiell) modal ergänzt werden. In komplementärer Weise können unverdeckte Bereiche einer visuellen Szene nicht nur modal, sondern auch in „amodaler Weise“ vervollständigt werden. In der Literatur wird amodale Vervollständigung zwar stets mit Bezug auf eine konkrete Verdeckungssituation verwendet (vgl. S.40), tatsächlich gibt es aber Reize ohne jegliche Verdeckungshinweise, die Perzepte von „nicht-modalen“ Vervollständigungen hervorrufen können: Die Punkte in Abbildung 4.9 werden spontan in Gestalten mit wohldefinierter Form gruppiert und wahrgenommen als verbunden durch eine offene, gekrümmte Linie (a) bzw. durch eine geschlossene Kontur (b). Kanizsa (1987) bezeichnet die entstehenden Figuren als „virtuelle Linien“ (S. 41 f.), deren perzeptuelle Präsenz „nur amodalen Charakter“ hat (S. 44). In dieser Hinsicht unterscheiden sich solche virtuellen Figuren phänomenal vollkommen von modal vervollständigten Figuren wie beispielsweise illusionären Konturen oder Oberflächen (Kanizsa, 1979), die „perzeptuell salient“ sind und eine „reale phänomenologische Präsenz“ besitzen (Leshner, 1995, S. 280). Im Sinne Rocks (1983) ließe sich im Fall von virtuellen Figuren von fehlender Unterstützung durch den Reiz sprechen, die eine entsprechende phänomenale Qualität verhindert (vgl. Abschnitt 2.2.2.2). Gleichzeitig unterscheidet sich allerdings der „amodale Charakter“ virtueller Figuren phänomenal ebenso deutlich von amodal vervollständigten, partiell verdeckten Objekten. Daher lässt sich der phänomenale Charakter „nicht-modal“ vervollständigter, virtueller Figuren weder als modal noch als amodal im traditionellen Sinne bezeichnen.

Dies zeigt, dass die traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung nicht alle Fälle perzeptueller Vervollständigung abdeckt: Weder scheinen Perzepte von „amodalem Charakter“ notwendigerweise mit verdeckten Regionen einer Szene zu korrespondieren, noch scheinen umgekehrt „modale Perzepte“ notwendigerweise mit geometrisch-optischer Sichtbarkeit zu korrespondieren. Gemäß der obigen Hypothese ließe sich der „amodale Charakter“ der Reize in Abbildung 4.9 jedoch einfach verstehen, wenn man davon ausgeht, dass die sensorischen Hinweise hinsichtlich der Kontur und Form der unverdeckten virtuellen Figuren – wie im Fall von amodaler Vervollständigung hinter einem Verdeckter – schlüssig sind, wohingegen nur schwache sensorische Hinweise hinsichtlich ihrer Oberflächenfarbe verfügbar sind.

Die vorgestellten Befunde und Beispiele sind konsistent mit der Vorstellung, dass der phänomenale Eindruck von Sichtbarkeit statt an geometrisch-optische Sichtbarkeit eher an die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise hinsichtlich bestimmter Aspekte einer visuellen Szene gekoppelt ist. Die Vermutung, dass der Übergang zwischen phänomenal sichtbarem und phänomenal unsichtbarem Erleben eher kontinuierlich als abrupt verläuft, ist konsistent mit Beobachtungen sog. quasimodaler Vervollständigungen (vgl. Kellman et al., 1998) und unscharfer illusionärer Figuren wie den in Abbildung 4.10 dargestellten. In beiden Reizen können bestimmte Regionen weder mit Gewissheit als modal noch mit Gewissheit als

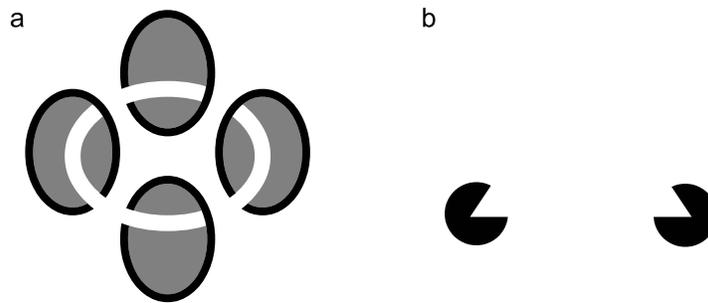


Abbildung 4.10: a) Ein sog. quasimodales Perzept, in dem sich modal und amodal vervollständigte Konturen verbinden. Während oben rechts eine amodale und unten links eine modale Vervollständigung der weißen, ringförmigen Röhre erfolgt, tritt oben links und unten rechts eine sog. quasimodale Vervollständigung auf, d. h., ein Teil des vervollständigten Bereichs erscheint illusionär wie bei typischen Kanizsa-Figuren und ein Teil verdeckt. b) Ein Kanizsa-artiges illusionäres „Dreieck“, das jedoch nur durch zwei statt durch drei schwarze Kreissektoren induziert wird. [a adaptiert nach Kellman et al. (1998, Abbildung 4, S. 861).]

amodal klassifiziert werden.

Die ringförmige Röhre in a wird oben rechts amodal und unten links modal vervollständigt, allerdings verbinden sich oben links und unten rechts sowohl modal als auch amodal vervollständigte Konturen. Kellman et al. (1998) konstatieren, auf solche Weise vervollständigte Figuren seien „weder strikt modal noch amodal. Sie sind beides, oder nichts von beidem, oder vielleicht quasimodal“ (S. 862). Gemäß der Kontinuitätshypothese wären die sensorischen Hinweise bezüglich der Röhrenkontur und -form überzeugend und deshalb phänomenal wohlspezifiziert, während die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise bezüglich der farblichen Qualität der Oberfläche je nach räumlicher Position kontinuierlich variiert und somit auch die Stärke der phänomenalen Spezifikation dieses Attributs entsprechend variiert. Unter dieser Voraussetzung wäre es plausibel, anzunehmen, dass das perzeptuelle Erleben von „Sichtbarkeit“ kontinuierlich variiert, d. h., dass einige Regionen als direkt sichtbar empfunden werden, einige als verdeckt und andere wiederum als „vage sichtbar“.

Das illusionäre „Dreieck“ in b zeigt in der Nähe der induzierenden schwarzen Kreissektoren die typische Charakteristik modaler Vervollständigung wie die ausgeprägte, helle, beinahe leuchtende Kontur und die weiße Oberflächenfarbe. Obwohl die Figur zwar geschlossen und konvex erscheint, wird dessen Kontur mit zunehmendem Abstand von den induzierenden Elementen immer unschärfer, d. h. deren Verlauf ungenauer. Mit Hilfe der Hypothese der attributbezogenen Sichtbarkeit lässt sich das Perzept jedoch geeignet charakterisieren: Während die Attribute der Objekteinheit sowie der Oberflächen- und Konturfarbe aufgrund schlüssiger zugrunde liegender sensorischer Hinweise phänomenal klar spezifiziert sind, wird die phänomenale Spezifikation von Attributen wie Objektkontur und Oberflächenfarbe mit zunehmendem Abstand von den induzierenden Elementen kontinuierlich schwächer. Diese spekulativen Annahmen sind selbstverständlich weit davon entfernt, eine theoretisch umfassende Erklärung für die phänomenologischen Beobachtungen zu bieten, aber die grundlegende Vorstellung wäre prinzipiell kompatibel mit bestehenden Theorien visueller Vervollständigung (z. B. Anderson et al., 2002; Kellman & Shipley, 1991; Singh, 2004; Tse, 1999a, 1999b).

4.4.1.5 Quellen für die Schlüssigkeit sensorischer Hinweise

Wesentlicher Bestandteil der oben beschriebenen theoretischen Auflösung des Sichtbarkeitsparadoxons ist der Bezug zur Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise, die bestimmte Attribute der visuellen Szene betreffen, und die damit verbundene Annahme, dass die Stärke der erlebten phänomenalen Sichtbarkeit

diese Schlüssigkeit in gewisser Weise repräsentiert. Im Fall des Sichtbarkeitsparadoxons wären demzufolge – bezogen auf den Streifen (Experiment VI) bzw. die kreisförmig angeordneten Punkte (Experiment VII) im Hintergrund – die sensorischen Hinweise schlüssig und überzeugend

- hinsichtlich der Objekteinheit,
- hinsichtlich der Attribute Objektkontur und Objektform für die tatsächlich sichtbaren, für die partiell modal ergänzten und für die amodal vervollständigten Bereiche, sowie
- hinsichtlich des Attributs der Objektfarbe für die tatsächlich sichtbaren und für die partiell modal ergänzten Bereiche (hellgrauer Bereich in Abbildung 4.8b).

Generell ist anzunehmen, dass die perzeptuelle Lösung mit dem Reiz konform sein und durch diesen unterstützt werden muss (Rock, 1983; vgl. auch Abschnitt 2.2.2.2), doch wirft die Idee der Schlüssigkeit sensorischer Hinweise als Determinante des Eindrucks von phänomenaler Sichtbarkeit die Frage auf, wie die Stärke der Schlüssigkeit aus dem Reiz abgeleitet werden kann bzw. von welchen Reizmerkmalen sie konkret abhängt. Die Beantwortung dieser Frage ist aufgrund der großen Rätsel, welche das Prinzip der perzeptuellen Vervollständigung der Wahrnehmungsforschung nach wie vor aufgibt, im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, zumal in erster Linie nur die Idee vorgestellt werden soll, dass die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise und nicht etwa geometrisch-optische Sichtbarkeit der eigentlich kritische Faktor für phänomenale Sichtbarkeit ist. Es soll aber zumindest ein Weg skizziert werden, wie man sich dieser Frage nähern könnte, und zwar indem man die relevanten visuellen Attribute in zwei Gruppen einteilt und unabhängig voneinander im Lichte bekannter Theorien der visuellen Vervollständigung betrachtet:

1. Für die Attribute **Objekteinheit**, **Objektkontur** und **Objektform**, deren perzeptuelle Präsenz (vulgo: „Sichtbarkeit“) bei geeigneten Verdeckungshinweisen gerade amodale Vervollständigung im traditionellen Sinne charakterisiert, wäre prinzipiell beispielsweise ein Rückgriff auf die Theorien von Kellman und Shipley (1991), Sekuler et al. (1994) oder Tse (1999a) möglich. Diese beschreiben mehr oder weniger konkret, welche Reizmerkmale eine Verdeckungsinterpretation und somit amodale Vervollständigung auslösen können. Gemäß der obigen Hypothese wäre dann lediglich der Zwischenschritt zu ergänzen, dass solche Reizmerkmale eigentlich nur schlüssige Hinweise für die Fortsetzung der Kontur und/oder Form eines Objekts beinhalten und dadurch mittelbar perzeptuelle „Sichtbarkeit“ dieser spezifischen visuellen Attribute trotz Verdeckung hervorrufen. Diese attributbezogene Sichtbarkeit manifestiert sich dann im typischen Perzept eines im traditionellen Sinne amodal vervollständigten Objekts.

Dass die Schlüssigkeit der Hinweise für die Einheit eines Objekts und die Fortsetzung von Objektkonturen und Objektformen im Sinne der obigen Hypothese nicht allein an Verdeckung gekoppelt sein kann, zeigen die Beispiele virtueller Figuren (vgl. Abbildung 4.9). Die Faktoren, die solche virtuellen Linien hervorrufen, lassen sich beispielsweise aus einer gestaltpsychologischen Sicht wie folgt beschreiben laut (Kanizsa, 1987, S. 42):

“They are the result of unification processes, which follow the general principles of figural grouping discovered by Wertheimer (1923) just by using dot patterns. It would be easy to show that they occur between some specific dots but not between others, because the former but not the latter instantiate those conditions of proximity, similarity, good continuation, and closure that represent the organizational factors of our visual experience.”

Folgt man dieser Perspektive, spricht im Prinzip nichts dagegen, anzunehmen, dass die genannten allgemeinen Gruppierungsprinzipien nicht direkt den Vereinigungsprozess auslösen, sondern

eigentlich nur ausdrücken, wann die Hinweise hinsichtlich der genannten Attribute im Reiz schlüssig sind, wodurch wiederum ein solcher oder ähnlicher Vereinigungsprozess ausgelöst würde. Damit ließe sich die phänomenale „Sichtbarkeit“ der Attribute auch im Sinne der obigen Hypothese erklären.

2. Für die Attribute **Oberflächentextur** sowie **Kontur- und Oberflächenfarbe/-luminanz**, deren perzeptuelle Vervollständigung in Regionen ohne undurchsichtigen Verdecker wie beispielsweise bei der Wahrnehmung von Transparenz oder von illusionären (Kanizsa-)Figuren (vgl. hierzu den Abschnitt 2.3.2) traditionell als modale Vervollständigung bezeichnet wird, lässt sich die obige Hypothese direkt in bekannte Theorien modaler Vervollständigung einbetten, wenn man annimmt, dass modale Vervollständigung im traditionellen Sinne schlüssige Hinweise für die Fortsetzung der entsprechenden Attribute repräsentiert.

Werden diese Attribute dagegen trotz Verdeckung partiell modal ergänzt, wie im Falle des Sichtbarkeitsparadoxons, wäre ein geeigneter Extrapolationsprozess notwendig, der durch entsprechend schlüssige Hinweisreize ausgelöst werden müsste. Ein möglicher solcher Prozess wäre der von Kellman und Shipley (1991) skizzierte, zur amodalen Vervollständigung von Konturen möglicherweise komplementäre *Surface Spreading Mechanism* (S. 210–214). Die Autoren konstatieren allerdings, dass es insgesamt an Untersuchungen zu den „Regeln der Vervollständigung von Oberflächen sowohl im modalen als auch im amodalen Fall“ mangelt (S. 213). Die Beschreibung des Mechanismus ist dementsprechend sehr allgemein gehalten. Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung eines solchen Mechanismus wäre jedoch aufgrund der Befundlage die Annahme nicht unplausibel, dass die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise für eine Fortsetzung von Oberflächenattributen wie Textur, Farbe und Luminanz unter anderem mit der Stärke geeigneter Verdeckungshinweise korrespondiert.

Dass wiederum weder die virtuelle Kontur in Abbildung 4.9a noch die Oberfläche der virtuellen Figur in b phänomenal sichtbare Farbe, Luminanz bzw. Textur besitzt, wäre darauf zurückzuführen, dass die Voraussetzungen für eine traditionelle modale Vervollständigung nicht erfüllt sind. Selbst wenn man beispielsweise den Kreis in b partiell verdeckte, erfolgte lediglich eine im traditionellen Sinne amodale Vervollständigung, da eine Extrapolation von entsprechenden Kontur- bzw. Oberflächeneigenschaften deren phänomenale Präsenz in den angrenzenden Bereichen voraussetzt. Diese ist hier aber nirgends gegeben.

Abschließend sei noch angemerkt, dass sensorische Hinweise hinsichtlich bestimmter visueller Attribute nicht auf den retinalen Input beschränkt sind. So zeigen verschiedene Befunde, dass beispielsweise propriozeptive Signale ebenfalls eine wichtige Quelle nicht-visueller sensorischer Hinweise sind, die die visuelle Präsenz beeinflussen können (Carlson, Alvarez, Wu & Verstraten, 2010; Dieter, Hu, Knill, Blake & Tadin, 2014; Hogendoorn, Kammers, Carlson & Verstraten, 2009; Ritchie & Carlson, 2010).

4.4.1.6 Die Rolle der Hintergrundstruktur

Obwohl die Verdeckungstäuschung und der paradoxe Sichtbarkeitseffekt phänomenologische Parallelen aufweisen und in kritischer Weise mit der Wahrnehmung von Verdeckung verknüpft sind, ist ein Unterschied festzustellen, der die Frage nach der Rolle der Hintergrundstruktur aufwirft. Die statische Verdeckungstäuschung erfordert eine im traditionellen Sinne *räumliche amodale* Ergänzung bzw. Vervollständigung eines partiell sichtbaren Hintergrundobjekts, und es ist anzunehmen, dass dieser Prozess durch Verdeckungshinweise in Kombination mit den geometrisch-optisch sichtbaren Bereichen des Hintergrundobjekts, die an den Verdecker angrenzen, ausgelöst wird. Hierbei wird offensichtlich auch ein partiell modaler Eindruck hervorgerufen, so dass man davon ausgehen kann, dass ohne amodale Vervollständigung auch keine partielle modale Ergänzung erfolgte (siehe auch Abbildung 4.11). Dagegen

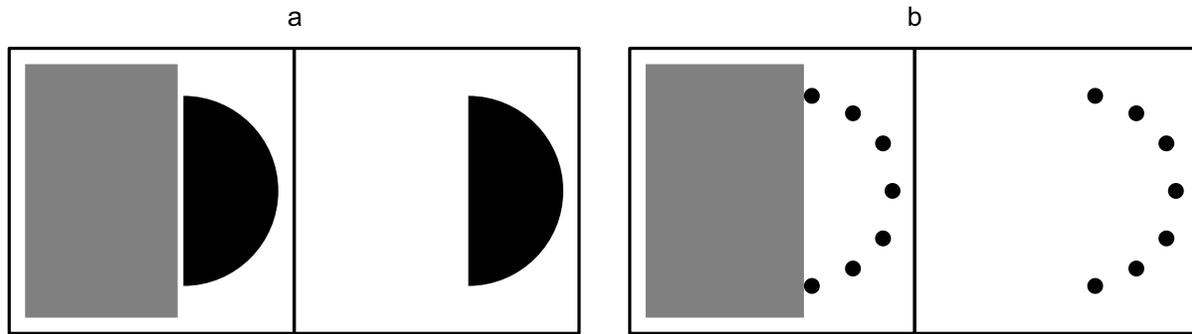


Abbildung 4.11: Keine Verdeckungstäuschung. Ohne amodale Vervollständigung erfolgt auch keine partielle modale Ergänzung.

ist beim dynamischen Sichtbarkeitsparadoxon anzunehmen, dass dieses nicht in erster Linie auf die partielle modale Ergänzung von ansonsten amodal vervollständigten Objekten zurückzuführen ist. Zwar legen die Befunde zur Verdeckungstäuschung nahe, dass in Experiment VI auch amodale Vervollständigung zum paradoxen Sichtbarkeitseffekt beigetragen hat, doch deuten informelle Beobachtungen auf eine Asymmetrie in der Fortsetzung des Hintergrunds hin. Anscheinend werden überwiegend diejenigen Teile als sichtbar und zugleich als verdeckt erlebt, die kurz zuvor tatsächlich noch geometrisch-optisch unverdeckt waren (vgl. Abbildung 4.3). Diese Beobachtung wiederum lässt vermuten, dass in erster Linie eine *zeitliche modale* Fortsetzung der kurz zuvor geometrisch-optisch sichtbaren Bereiche des Hintergrunds erfolgt (also eine Art perzeptueller Persistenz), die ebenfalls durch Verdeckungshinweise, die ja ein Fortbestehen des Hintergrunds erst plausibel machen, hervorgerufen wird. Für diese Hypothese der zeitlichen modalen Fortsetzung sprechen insbesondere die Befunde des Experiments VII, in dem der Verdeckter vor isolierten Punkten im Hintergrund rotierte, die keine räumliche amodale Ergänzung bzw. Vervollständigung hervorrufen konnten. Dennoch trat auch dort das Sichtbarkeitsparadoxon auf.

Die Gemeinsamkeit zwischen der Verdeckungstäuschung und dem Sichtbarkeitsparadoxon scheint deshalb in abstrakterer Weise in der Rolle der perzeptuellen Verdeckung zu bestehen, die offenbar sowohl die Plausibilität für räumliche Ergänzungen bzw. Vervollständigungen als auch die Plausibilität für zeitliche Fortsetzungen erhöht und deshalb dazu passende Perzepte begünstigt. Eine Hintergrundstruktur, die eine räumliche amodale Ergänzung/Vervollständigung hervorruft, ist also notwendig für das Auftreten der statischen Verdeckungstäuschung, nicht aber für das Auftreten des Sichtbarkeitsparadoxons, wengleich man annehmen kann, dass der Effekt dadurch noch verstärkt wird.

4.4.1.7 Phänomenale Schrumpfung

Ein ungeklärtes Rätsel, das unmittelbar im Zusammenhang mit der Verdeckungstäuschung und daher auch mit dem Sichtbarkeitsparadoxon steht, ist die Beobachtung, dass ein partiell verdecktes Objekt in vielen Fällen (wenn auch nicht immer) in seiner Gesamtheit phänomenal schrumpft, obwohl zugleich eine partielle modale Expansion wahrgenommen wird (Abbildung 4.12). Vezzani (1999) vertritt auf Grundlage zahlreicher Beobachtungen und Studien die Auffassung, dass der Schrumpfungseffekt nicht mit amodaler Vervollständigung zusammenhängt, sondern auf bestimmte geometrisch-optische Täuschungen zurückzuführen ist, ohne dass der Effekt dadurch erklärt werden könne (S. 937 ff. und S. 946). Die hier vorgestellte Hypothese liefert für den Schrumpfungseffekt ebenfalls keine Erklärung. Sie macht jedoch auch keine Aussage über die wahrgenommene Gesamtgröße eines partiell verdeckten Objekts, sondern sagt lediglich vorher, dass unter geeigneten Bedingungen ein amodal vervollständigter/fortgesetzter Bereich partiell modal erscheint.

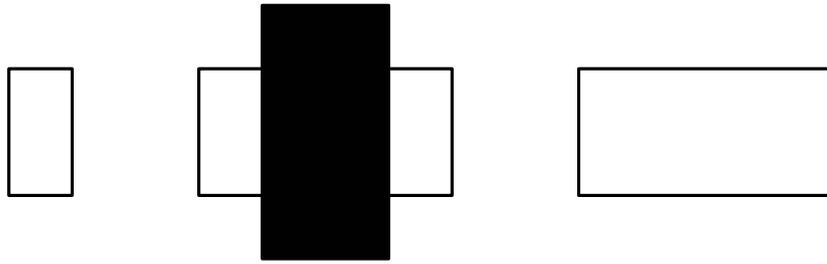


Abbildung 4.12: Das partiell verdeckte Rechteck schrumpft (Kanizsa, 1979), aber dessen modal sichtbaren Teile werden vergrößert wahrgenommen (Kanizsa & Luccio, 1978). [Adaptiert nach Vezzani (1999, Abbildung 1a, S. 935).]

4.4.2 Bezug zum *Boundary Extension Effect*

Sowohl die statische Verdeckungstäuschung als auch deren dynamische Version, die in dieser Arbeit untersucht wurde, haben gewisse Ähnlichkeiten zum *Boundary Extension Effect*. Dieser Effekt besteht darin, dass Versuchspersonen, die darum gebeten werden, ein zuvor dargebotenes Bild aus dem Gedächtnis nachzuzeichnen, systematisch dazu neigen, Teile der Szene als direkt sichtbar darzustellen, die im Originalbild verdeckt oder nicht enthalten waren (Intraub & Bodamer, 1993; Intraub & Richardson, 1989). Auch bei einer abgewandelten Methode, die darin besteht, dass Versuchspersonen beim Betrachten einer Testszene angeben müssen, ob ihnen zuvor ein größerer oder kleinerer Ausschnitt derselben Szene als Vorgabereiz dargeboten wurde, ist die Tendenz erkennbar, den sichtbaren Ausschnitt der Vorgabereize zu überschätzen. Anders allerdings als die statische und die hier präsentierte dynamische Verdeckungstäuschung, die in natürlicher Weise als rein perzeptueller Effekt aufzufassen ist, wird der *Boundary Extension Effect* einem Gedächtniseffekt zugeschrieben. Dennoch könnten beide Phänomene enger miteinander verwandt sein als bisher angenommen. So haben laut Intraub (2010) die Beobachter „keine Schwierigkeit damit, den aktuell dargebotenen visuellen sensorischen Input von der amodal wahrgenommenen Fortsetzung von Objekten und Oberflächen hinter den Sichtgrenzen zu unterscheiden“, während der Reiz sichtbar ist. Sie meinen sich aber fälschlicherweise daran zu erinnern, „hinter die Sichtgrenzen gesehen zu haben“, sogar wenn der sichtbare Reiz nur „für weniger als $1/20$ Sekunde unterbrochen wird, ehe er zum Test wiedererscheint (d. h. *Boundary Extension*; Intraub & Dickinson, 2008)“ (S. 240).

Der Schluss von Intraub und Dickinson (2008), dass es sich bei der *Boundary Extension* um einen reinen Gedächtniseffekt handelt, scheint allerdings nicht gerechtfertigt, denn die Befunde von Palmer und Kollegen (Palmer et al., 2007; Palmer & Schloss, 2009) sowie die hier präsentierten sprechen dafür, dass perzeptuelle Prozesse und Gedächtnisprozesse sehr ähnliche Effekte hervorrufen können.⁹ Deshalb ist es durchaus möglich, dass auch beim *Boundary Extension Effect* ein Sichtbarkeitsparadoxon ähnlich dem hier präsentierten beteiligt ist und den Effekt beeinflusst. Der Einfluss perzeptueller Prozesse könnte konkret darin bestehen, dass bereits ein „falscher“ modaler Eindruck abgespeichert wird, so dass die Abweichung der Reproduktion vom Originalbild dann nicht allein an einer falschen bzw. verlorengegangenen Quellenzuordnung im Gedächtnis beim Abruf der Informationen (Intraub, 2010) läge.

4.4.3 Bezug zu visueller Persistenz

Die perzeptuelle Expansion des Streifens im Hintergrund in Experiment VI (bzw. analog dazu die Wahrnehmung von mehr Punkten im Hintergrund, als tatsächlich gleichzeitig sichtbar sind, in Experiment VII) könnten auf eine Art visuelle Persistenz zurückgeführt werden (Coltheart, 1980): Wenn der visuelle Eindruck des Streifens bzw. der Punkte im Hintergrund nach dessen/deren objektivem Verschwinden infolge

⁹Dies ist nicht verwunderlich, wenn man sich die enge Verbindung zwischen Gedächtnis- und perzeptueller Verarbeitung vergegenwärtigt (Bartlett, 1932).

von Verdeckung oder Löschung noch einige Zeit andauert, sollte dies natürlicherweise zu einer perzeptuellen Expansion des Streifens (bei Reizen wie in Experiment VI) bzw. zur Wahrnehmung einer erhöhten Anzahl an Punkten (bei Reizen wie in Experiment VII) führen. Verschiedene Beobachtungen deuten allerdings darauf hin, dass zwischen dieser phänomenal sichtbaren Persistenz und einfacher neuronaler Persistenz (z. B. durch einfache temporale Integration, Trägheit der Rezeptoren oder positive Nachbilder) keine einfache Verknüpfung bestehen kann. Erstens wäre nur schwer zu erklären, weshalb träge Rezeptorreaktionen zu einer perzeptuellen Expansion des Streifens bzw. zu einer höheren Anzahl an wahrgenommenen Punkten im Hintergrund, nicht aber zu einer perzeptuellen Expansion des Verdeckers im Vordergrund führen sollten. Zweitens wäre zu erwarten, dass jede Form von perzeptueller Persistenz des Streifens bzw. der Punkte im Hintergrund aufgrund von trägen Rezeptorreaktionen *vor* dem Verdecker sichtbar werden müsste. Informelle Beobachtungen deuten jedoch darauf hin, dass dies nicht der Fall ist (vgl. die Demonstration, Abschnitt 4.1). Drittens wäre unklar, wie Verdeckungshinweise, die in den Experimenten einen klaren Einfluss auf die phänomenale Verlängerung des Streifens bzw. auf die phänomenale Persistenz der Punkte im Hintergrund hatten, einen kausalen Einfluss auf die Trägheit der Rezeptorreaktionen haben könnten. Einfache neuronale Persistenz als Erklärung für die präsentierten Beobachtungen erscheint deshalb nicht sonderlich vielversprechend.

Im Gegensatz dazu könnten allerdings die hier präsentierten Beobachtungen möglicherweise nützlich für das Verständnis psychophysikalischer Experimente zur Erforschung visueller Persistenz sein. In zahlreichen Untersuchungen zur visuellen Persistenz wurden ähnliche Reize und Aufgaben wie in den hier durchgeführten Experimenten verwendet, um die Dauer der visuellen Persistenz zu schätzen (Coltheart, 1980). Der hier dokumentierte Einfluss von Verdeckungshinweisen legt nahe, dass auch die Ergebnisse früherer Studien über visuelle Persistenz durch implizite Verdeckungshinweise beeinflusst worden sein könnten, auch wenn dies von den Experimentatoren nicht beabsichtigt war.

Die hier präsentierten Befunde sind in gewisser Weise komplementär zu den Beobachtungen von Burr (1980), dass phänomenale visuelle Persistenz durch Bewegungshinweise reduziert werden kann. Betrachtet man die gut dokumentierte komplementäre Beziehung zwischen Bewegungs- und Verdeckungshinweisen (Anderson & Sinha, 1997; Ekroll & Borzikowsky, 2010; Gibson et al., 1969; Sigman & Rock, 1974; Yantis, 1995), überrascht es vielleicht nicht, dass Verdeckungshinweise einen gegenteiligen Effekt auf phänomenal sichtbare Persistenz auszuüben scheinen. Wenn das objektive Verschwinden eines Reizelements an einer bestimmten Position des visuellen Feldes durch dessen Bewegung an einen anderen Ort hervorgerufen wird, wäre es für das visuelle System wenig nützlich, eine persistente Repräsentation des Elements an der vorherigen Position aufrechtzuerhalten. Wenn das Verschwinden hingegen auf Verdeckung zurückzuführen ist, wäre eine solch persistente Repräsentation u. U. besonders nützlich. Wie die Befunde andeuten, wird diese persistente Repräsentation anscheinend sogar als phänomenal spezifiziert und sichtbar (d. h. als modal in der traditionellen Terminologie) erlebt, obwohl das repräsentierte Reizelement gleichzeitig als verdeckt wahrgenommen wird.

4.4.4 Bezug zum Anorthoskopischen Effekt

In den hier vorgestellten Experimenten wurden stationäre Hintergrundelemente (der ringförmige Streifen in Experiment VI bzw. die ringförmig angeordneten Punkte in Experiment VII), die durch eine Öffnung in einem rotierenden Kreissektor, d. h. durch einen sich bewegenden „Schlitz“, gesehen wurden, als Zielreiz verwendet („Schlitzbewegung“). Erste informelle Beobachtungen des Sichtbarkeitsparadoxons, die die hier präsentierten Experimente motivierten, wurden jedoch im Zusammenhang mit dem Anorthoskopischen Effekt gemacht, bei dem ein bewegter Zielreiz durch einen stationären Schlitz betrachtet wird („Figurbewegung“). Unabhängig vom verwendeten Paradigma ist der Anorthoskopische Effekt dadurch bemerkenswert, dass weitaus größere Teile des Zielreizes gleichzeitig sichtbar erscheinen, als es die Breite des Schlitzes eigentlich zulassen sollte (Anstis & Atkinson, 1967; Aydın, Herzog & Ögmen, 2009; Fendrich et al., 2005; Haber & Nathanson, 1968; Morgan et al., 1982; Wollschläger,

2006; Wollschläger & Faul, 2006). In den hier vorgestellten Experimenten wurden Reize mit Schlitzbewegung statt mit Figurbewegung verwendet, weil dadurch tendenziell stabilere Perzepte hervorgerufen werden konnten. Weil die ursprünglichen, wenn auch informellen Beobachtungen des hier dokumentierten Sichtbarkeitsparadoxons jedoch mit Reizen gemäß dem Figurbewegungsparadigma gemacht wurden, ist davon auszugehen, dass das Sichtbarkeitsparadoxon auch im Zusammenhang mit dem Anorthoskopischen Effekt auftritt.

Eine längere und ausführliche Diskussion in der Literatur zum Anorthoskopischen Effekt beschäftigte sich mit der Frage, ob dieser durch einfaches *Retinal Painting* erklärt werden könnte, oder ob ausgefeiltere perzeptuelle Prozesse daran beteiligt sein müssen. Die Retinal-Painting-Hypothese besagt im wesentlichen, dass der Effekt auf Augenbewegungen und Persistenz auf Rezeptorebene zurückzuführen ist: Werde die hinter dem Verdecker bewegte Figur mit den Augen verfolgt, würden sukzessiv deren jeweils sichtbaren Ausschnitte auf benachbarte Positionen der Netzhaut projiziert, was zu einer „retinalen Bemalung“ mit der vollständigen Figur führte. Wird zusätzlich eine entsprechende Persistenz der Rezeptoren angenommen, wäre zwischenzeitlich die vollständige Figur (oder zumindest größere Teile, als es die Breite des Schlitzes eigentlich ermöglichte) auf der Netzhaut „sichtbar“. Auf Basis der aktuellen Literatur zum Anorthoskopischen Effekt kann mit ziemlicher Sicherheit davon ausgegangen werden, dass *Retinal Painting* tatsächlich in einigen Fällen eine Rolle für den Effekt spielt. Es wird aber ebenso deutlich, dass mit *Retinal Painting* keineswegs alle einschlägigen Befunde befriedigend erklärt werden können (vgl. u. a. Fendrich et al., 2005; Rock & Sigman, 1973; Rock, 1981). Es ist deshalb davon auszugehen, dass auch aufwendigere perzeptuelle Prozesse an dem Phänomen beteiligt sind. Damit im Einklang stehen die hier präsentierten Befunde; wie bereits in Abschnitt 4.4.3 erklärt, lassen sich diese nicht auf *Retinal Painting* bzw. einfache neuronale Persistenz allein zurückführen. Allerdings können Erscheinungsformen von *Retinal Painting* leicht bei schnelleren Rotationsgeschwindigkeiten des Verdeckers beobachtet werden. In den hier vorgestellten Experimenten wurden bewusst vergleichsweise niedrige Rotationsgeschwindigkeiten gewählt, um einen Einfluss von *Retinal Painting*, soweit möglich, auszuschließen.

Abschließend soll noch kurz ein vermeintlicher Widerspruch im Zusammenhang mit dem Anorthoskopischen Effekt diskutiert werden, der durch die hier vorgestellte Hypothese aufgelöst werden könnte. Gemäß der Retinal-Painting-Hypothese wäre beim Anorthoskopischen Effekt ein *modales* Perzept des vervollständigten Hintergrundelements *vor* dem Verdecker zu erwarten, da eine Art „Nachbild“ den jeweils aktuell auf die Netzhaut projizierten Reiz überlagern müsste. Demgegenüber wäre unter der Annahme, dass aufwendigere visuelle Prozesse den Effekt hervorrufen bzw. maßgeblich beeinflussen, eher von einem *amodalen* Eindruck der vervollständigten Figur *hinter* dem Verdecker auszugehen. Paradoxerweise entspricht beides in gewisser Weise dem phänomenalen Eindruck, der im Zusammenhang mit dem Anorthoskopischen Effekt hervorgerufen wird. Geht man allerdings von der Richtigkeit der obigen Hypothese aus, wäre es aufgrund der schlüssigen sensorischen Hinweise hinsichtlich der Eigenschaften der verdeckten Figur nicht unplausibel, anzunehmen, dass das Sichtbarkeitsparadoxon auch in Verbindung mit dem Anorthoskopischen Effekt auftritt, wodurch sich die widersprüchlich anmutende Beobachtung dadurch erklären ließe, dass eine partielle modale Ergänzung des ansonsten amodal vervollständigten Zielreizes erfolgt. Diese Teile hätten dann durchaus eine *modale* Erscheinungsform bei gleichzeitig wahrgenommener Verdeckung. Darüber hinaus wäre diese modale Erscheinungsform nicht unbedingt ein Indiz für *Retinal Painting* im Zusammenhang mit dem Anorthoskopischen Effekt. Vielmehr wäre davon auszugehen, dass der Effekt – wie auch das Sichtbarkeitsparadoxon – auf komplexeren visuellen Verarbeitungsprozessen und internen Repräsentationen von Verdeckung beruht.

4.4.5 Bezug zu allgemeinen Theorieperspektiven der Wahrnehmung

Vielen aktuellen Theorien und Forschungsarbeiten über visuelle Wahrnehmung liegt die Annahme zugrunde, die Aufgabe des visuellen Systems bestehe darin, dem Organismus eine interne Repräsentation

der Außenwelt zur Verfügung zu stellen, die trotz der gegebenen Ambiguitäten im sensorischen Input so veridikal wie möglich ist. Gemäß dieser allgemeinen Perspektive entstehen visuelle Täuschungen, weil sich die visuellen Mechanismen zur Rekonstruktion der Außenwelt auf fehleranfällige Heuristiken stützen müssen, um die zahlreichen grundlegenden Ambiguitäten im sensorischen Input bestmöglich auflösen zu können. Die Erforschung visueller Täuschungen wird, abgesehen von ihrer Faszination aus alltagspsychologischer Sicht, allgemein als wichtig erachtet, um Erkenntnisse über die zugrunde liegenden Heuristiken des Wahrnehmungssystems zu gewinnen. Mit dieser „Standard-Perspektive“ lassen sich viele visuelle Täuschungen zwar prinzipiell in natürlicher Weise erklären, jedoch ist unklar, wie die phänomenale Existenz unmöglicher Figuren wie beispielsweise des Penrose-Dreiecks erklärt werden könnte (Hochberg, 2003; Huffman, 1971; Penrose & Penrose, 1958). Anders als zahlreiche klassische visuelle Täuschungen, die darin bestehen, dass ein nicht-veridikales Perzept hervorgerufen wird, ist die interne Struktur unmöglicher Figuren inkompatibel mit jeder Interpretation, die mit der realen Welt konsistent wäre. Das Sichtbarkeitsparadoxon ist deshalb in analoger Weise als unmögliche Figur aufzufassen.

Eine weitere Beobachtung zeigt, dass die Standard-Perspektive nicht mit dem Sichtbarkeitsparadoxon verträglich ist: Gemäß dieser Perspektive treten Täuschungen auf, weil das visuelle System Ambiguitäten im visuellen Input nicht in allen Fällen korrekt auflösen kann. Somit treten beispielsweise Größentäuschungen auf, weil die Größe des distalen Objekts durch die Größe seiner retinalen, d. h. geometrisch-optischen Projektion nicht spezifiziert ist. Eine vergleichbare Ambiguität besteht allerdings nicht hinsichtlich geometrisch-optischer Verdeckung, die eine dichotome Variable ist; ein Ausschnitt einer visuellen Szene wird genau dann auf die Netzhaut projiziert, wenn sie aus der Beobachterposition unverdeckt ist. Es wäre deshalb aus der Standard-Perspektive kaum nachvollziehbar, warum das visuelle System eine solche Sichtbarkeitstäuschung hervorbringen sollte, in der „der Zielreiz wahrgenommen wird, als wäre er weniger verdeckt, als er tatsächlich ist“ (Palmer & Schloss, 2009, S. 1083).

Gibt man jedoch die Vorstellung auf, die Aufgabe des perzeptuellen Systems sei eine möglichst veridikale Rekonstruktion der physikalischen Eigenschaften der Außenwelt (mit allen daran anknüpfenden Implikationen), und nimmt statt dessen die funktionalistische Perspektive ein, das Wahrnehmungssystem biete dem Organismus lediglich eine geeignete Schnittstelle zur Interaktion mit der Umwelt (Hoffman, 2009; Hoffman, Singh & Mark, 2013; Koenderink, 2011; Mark, Marion & Hoffman, 2010; Singh & Hoffmann, 2012; Uexküll, 1909), so lässt sich das Sichtbarkeitsparadoxon in natürlicher Weise verstehen. Dieser alternativen theoretischen Idee zufolge müssen die Attribute des perzeptuellen Erlebens den physikalischen Attribute der Außenwelt prinzipiell genauso wenig ähneln wie die Icons auf dem Desktop eines Computer-Bildschirms den internen (physikalischen) Zuständen des Computers (Hoffman, 2009); es wäre demnach nicht anzunehmen, dass die interne Struktur unserer perzeptuellen Welt die Struktur der Außenwelt widerspiegelt. Aus einer solchen Perspektive enthalten unmögliche Figuren wie das Sichtbarkeitsparadoxon keine logischen Inkonsistenzen. Sie können im Gegenteil sogar als empirische Evidenz für diese Perspektiven, die in der Tradition der Helmholtz'schen Zeichentheorie stehen (vgl. z. B. Mausfeld, 2006, S. 100), aufgefasst werden. Wie die oben formulierte Hypothese über die Bedeutung modaler und amodaler Perzepte an diese Theorievorstellungen anknüpft, wird noch in der allgemeinen Diskussion im Abschnitt 5.3 ausgeführt werden.

Kapitel 5

Allgemeine Diskussion

5.1 Zusammenfassung

Es ist aus der Literatur bekannt, dass die Wahrnehmung von Verdeckung amodale Vervollständigung und Fortsetzung von Objekten hervorrufen und einen erheblichen Einfluss auf die Interpretation einer gesamten Szene haben kann (z. B. Kanizsa, 1979; Michotte et al., 1991; Rock, 1983; vgl. auch Abschnitt 2.3.3). Perzeptuelle Vervollständigungen unverdeckter Regionen des Gesichtsfelds, die visuelle Qualitäten enthalten, werden demgegenüber üblicherweise als modale Vervollständigungen bezeichnet (vgl. Abschnitt 2.3.2). Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist die kritische Hinterfragung der Dichotomie von modalen und amodalen Wahrnehmungseindrücken, die häufig als Repräsentation direkter geometrisch-optischer Sichtbarkeit einerseits bzw. geometrisch-optischer Unsichtbarkeit aufgrund von Verdeckung andererseits aufgefasst werden. Diese Dichotomie und die häufig implizite Kopplung an geometrisch-optische Sichtbarkeit/Unsichtbarkeit wird in Abschnitt 2.3.4 aus drei Gründen als problematisch bewertet:

1. Es gibt phänomenologische Beobachtungen und empirische Befunde, die zeigen, dass sich bestimmte Perzepte nicht eindeutig als modal oder amodal charakterisieren lassen (vgl. insbesondere Abschnitt 2.3.4.1). Die aufgeführten Beispiele deuten darauf hin, dass die Definitionen bzw. die gängigen Vorstellungen der Begriffe der modalen und amodalen Vervollständigung nicht nur unvollständig, sondern auch inkonsistent sind.
2. Die ursprüngliche Dichotomie beider Formen von perzeptueller Vervollständigung basiert auf dem rein phänomenologischen Kriterium der sog. phänomenalen Präsenz, worin sich modale und amodale Perzepte qualitativ stark voneinander unterscheiden. Phänomenale Präsenz wird dabei durch sog. visuelle Qualitäten vermittelt, die bei Objekten typischerweise mit Oberflächeneigenschaften wie Farbe oder Textur gleichgesetzt werden (vgl. z. B. Kanizsa, 1979; Michotte et al., 1991). Der Fokus auf diese spezifischen visuellen Attribute erscheint jedoch aus phänomenologischer Sicht ungerechtfertigt, weil beispielsweise der überzeugende phänomenale Eindruck einer amodal vervollständigten Kontur demgemäß nicht als „phänomenal präsent“ aufzufassen wäre. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach der theoretischen Motivation für die Gleichsetzung von visuellen Qualitäten mit farblichen Oberflächenattributen. Diese könnte ein Hinweis darauf sein, dass die vermeintlich rein phänomenologische Beschreibung eigentlich an sinnesphysiologische Vorstellungen anknüpft (vgl. Abschnitt 2.3.4.2).
3. Die häufig implizite Kopplung von modalen und amodalen Vervollständigungen an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. Verdeckung ist aufgrund von phänomenologischen Beobachtungen und empirischen Befunden fragwürdig (vgl. Abschnitt 2.3.4.3): Einerseits können auch bei Verdeckung modale Attribute wahrgenommen und davon beeinflusst werden (z. B. die Qualität

der Bewegung beim Tunneleffekt; vgl. Wertheimer, 1912) oder partielle modale Vervollständigungen erfolgen (z. B. bei der Verdeckungstäuschung; vgl. Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007). Andererseits können auch unverdeckte Objekte einen *amodalen* Charakter besitzen (z. B. virtuelle Linien/Figuren; vgl. Kanizsa, 1987).

Die Unangemessenheit der genannten Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung im traditionellen Sinne sollte in dieser Arbeit durch theoretische Überlegungen und daran anknüpfende empirische Untersuchungen aufgezeigt werden. Der experimentelle Fokus lag hierbei auf dem Nachweis des Einflusses von perzeptueller Verdeckung nicht nur auf amodale, sondern auch auf explizit *modale* Attribute der Wahrnehmung. Dieser Einfluss sollte anhand von zwei Phänomenen nachgewiesen werden: zum einen anhand des zuvor nur informell beobachteten „Glättungseffekts“, der darin besteht, dass Verdeckung die wahrgenommene Glattheit von Scheinbewegung beeinflusst (Kapitel 3), zum anderen anhand des zuvor ebenfalls nur informell beobachteten „Sichtbarkeitsparadoxons“, das den Einfluss von Verdeckung auf die phänomenale Sichtbarkeit demonstriert (Kapitel 4).

5.1.1 Der Einfluss von Verdeckung auf die Wahrnehmung von Bewegung

Zahlreiche Studien zeigen, dass die Wahrnehmung von Verdeckung und die Wahrnehmung von Bewegung sehr eng aneinander gekoppelt sind und in vielfältiger und komplexer Weise miteinander interagieren (z. B. Flombaum & Scholl, 2006; McDermott & Adelson, 2004a, 2004b; McDermott, Weiss & Adelson, 2001; Michotte et al., 1991; Scholl & Pylyshyn, 1999; Shimojo & Nakayama, 1990; Shimojo et al., 1989). Wichtige Befunde zum Einfluss von Verdeckung auf die Bewegungswahrnehmung stammen u. a. aus Studien von Wertheimer (1912) und Burke (1952) zum sog. Tunneleffekt (vgl. Abschnitt 2.3.3.2). Darin wird gezeigt, dass auch bei Verdeckung eine kontinuierliche Bewegung wahrgenommen werden kann.

Im ersten empirischen Teil der Arbeit wurde der Fokus auf die systematische Untersuchung des Einflusses von Verdeckung auf die Interpolationsgüte (d. h. hier: auf die wahrgenommene Glattheit) von Bewegung in Abhängigkeit von Verdeckungshinweisen gerichtet (Kapitel 3). In den hierfür durchgeführten Experimenten I–V wurden diskrete Bewegungsreize verwendet, die in Abhängigkeit von den gewählten räumlichen und zeitlichen Parametern eine mehr oder weniger ruckartig wirkende Scheinbewegung hervorriefen. Scheinbewegung wird als eine Form der modalen Vervollständigung aufgefasst und auf dieselben oder ähnliche perzeptuelle Mechanismen wie die Wahrnehmung von kontinuierlicher Bewegung zurückgeführt (vgl. Abschnitt 2.3.2.3). Dabei ist bekannt, dass der entstehende Bewegungseindruck bei nicht zu schnell bewegten diskreten Zielreizen (Gepshtein & Kubovy, 2007) prinzipiell umso ruckartiger ist, je größer der räumliche und ggf. auch zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Reizdarbietungen ist (Adelson & Bergen, 1985, S. 286 ff.).

Die im Vergleich zu „optimaler“ Bewegung beeinträchtigte Interpolationsgüte lässt sich im Sinne der konstruktivistischen Perspektive Rocks (1983), Wahrnehmung sei mit intelligentem Problemlösen vergleichbar, mit der mangelnden Konformität des proximalen Reizes mit einer kontinuierlichen Bewegung erklären (vgl. Abschnitt 2.2.2.2), da die Sampling-Artefakte der Deutung eines einzigen, kontinuierlich existierenden und kontinuierlich bewegten Objekts widersprechen. Statt dessen käme eine andere Deutung in Frage, die mit dem proximalen Reiz verträglich wäre und durch diesen unmittelbar gestützt würde, nämlich die des plötzlichen Verschwindens eines Objekts an einem und des plötzlichen Entstehens/Erscheinens eines (möglicherweise anderen) Objekts an einem anderen Ort. Bei einer solchen Deutung wäre eine Beeinträchtigung der Bewegungsinterpolation oder auch das Fehlen jeglicher Art von Bewegung nicht verwunderlich. Aus einer solchen Perspektive lässt sich die Vorhersage ableiten, dass eine (bessere) Bewegungsinterpolation beobachtet werden müsste, wenn die beschriebene Deutung eines einzigen, kontinuierlich existierenden und bewegten Objekts mit dem proximalen Reiz konform wäre und durch diesen gestützt würde.

5.1.1.1 Experimente

In einer Serie von insgesamt fünf Experimenten wurde die Hypothese geprüft, dass die Beeinträchtigung der Interpolation von diskreten Bewegungsreizen, die sich in einem ruckartigen Bewegungseindruck äußert, (ganz oder teilweise) kompensiert werden kann („Glättungseffekt“), wenn die räumlichen und ggf. auch zeitlichen Lücken im Bewegungspfad auf Verdeckung zurückgeführt werden können, also eine „amodale“ Vervollständigung/Fortsetzung des Objekts ermöglichen, und nicht als unerklärbare inhärente Eigenschaften des Zielreizes gedeutet werden müssen.

In den ersten drei Experimenten wurden dynamische Sequenzen verwendet, die räumliche und zeitliche Lücken im Bewegungspfad zwischen je zwei aufeinanderfolgend dargebotenen Positionen des Zielreizes enthielten. In Experiment I wurden diese Lücken in der Experimentalbedingung mittels Maskierung der gesamten Szene überbrückt, so dass die räumlich und zeitlich unterbrochene Darbietung des Zielreizes auf Verdeckung zurückgeführt werden konnte. In der Kontrollbedingung erfolgte keine Maskierung der Szene. Die Versuchspersonen sollten u. a. die Art der Bewegung (ruckartig, beschleunigt/gebremst, konstant) bewerten. Übereinstimmend mit der obengenannten Hypothese wurde der Bewegungseindruck, speziell bei größeren räumlichen und zeitlichen Lücken, als weniger ruckartig angegeben, wenn die Lücken auf Verdeckung zurückgeführt werden konnten. Ähnliche Ergebnisse lieferte auch eine objektive Messung zur Rekonstruktion der Bewegungsinterpolation in Experiment II. In Experiment III wurden durch gezielte Reizmanipulationen verschiedene Alternativerklärungen geprüft. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Glättungseffekt zwar durch mehrere Faktoren begünstigt werden kann, die kritische Variable jedoch die Zuschreibung von Verdeckung als Ursache für die Lücken im Bewegungspfad des Zielreizes ist.

Anders als in den Experimenten I–III, in denen dynamische Hinweisreize für Verdeckung dargeboten wurden, sollte zur Stärkung der „Verdeckungshypothese“ mit den Experimenten IV und V geprüft werden, ob bereits statische Verdeckungshinweise den Glättungseffekt hervorrufen können. Hierzu wurden ähnliche Reize wie in den Experimenten I–III verwendet, jedoch gab es in den Experimenten IV und V nur räumliche und keine zeitlichen Lücken im Bewegungspfad des Zielreizes, die je nach Bedingung nicht, teilweise oder ganz mit einem statischen Verdecker gefüllt waren. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, die Bewegungsqualität auf einer fünfstufigen Ordinalskala von ruckartig bis glatt/kontinuierlich zu bewerten. Hypothesenkonform fiel die Bewertung in Experiment IV besser aus, wenn die Lücken im Bewegungspfad auf die Präsenz von Verdeckern zurückgeführt und dadurch „erklärt“ werden konnten, als wenn die Lücken teilweise unverdeckt waren. Noch schlechter wurde die Bewegungsqualität in den Bedingungen ohne Verdeckung eingestuft. Darüber hinaus deutet die im Abschnitt 3.3.1.3 durchgeführte quantitative Modellierung darauf hin, dass die Verdeckung von räumlichen Lücken einen ähnlich positiven Effekt auf die Bewegungsinterpolation haben könnte wie die Verringerung des räumlichen Abstands zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Zielreizdarbietungen (kompensatorische Verdeckungswirkung). In Experiment V wurden durch Variation der binokularen Disparität zudem verdeckungskonsistente und -inkonsistente Tiefeninformationen hinzugefügt, die den Effekt in hypothesenkonformer Weise verstärkten bzw. abschwächten.

5.1.1.2 Deutung

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die obige Hypothese zutrifft. Insbesondere räumliche Lücken können im Hinblick auf die wahrgenommene Glattheit der Bewegung durch geeignete Verdeckungshinweise anscheinend sogar nahezu vollständig kompensiert werden (Experimente IV und V). Es ist schwer vorstellbar, wie dieser Effekt allein mit den gängigen Reichardt-basierten Modellen der Bewegungsdetektion (vgl. Abschnitt 3.1) bzw. allein auf Basis von Transformationen des sensorischen Inputs erklärt werden könnte, ohne ein perzeptuelles Konzept von Verdeckung miteinzubeziehen. Für eine bestimmte Klasse raumzeitlicher Energiemodelle der Bewegungswahrnehmung (nach Adelson & Bergen, 1985) kann exemplarisch anhand der Überlegungen in Abschnitt 3.2.4.1 sowie anhand von Simulations-

ergebnissen (Anhang A) nachvollzogen werden, warum diese keine Vorhersage der Befunde ermöglichen. Vielmehr ist anzunehmen, dass perzeptuelle Konzepte wie Objektidentität, Objektkontinuität und Kausalität für die Wahrnehmung bzw. Interpolation von Bewegung eine wichtige Rolle spielen. Die Ergebnisse sind kompatibel mit den in Abschnitt 2.2.2 vorgestellten konstruktivistischen Perspektiven und unterstützen insbesondere die in diesem Zusammenhang bedeutsame Annahme, dass das erkenntniserweiternde Schlussverfahren der Abduktion (Peirce, 1935, zitiert in Wirth, 1998) eine zentrale Rolle im Wahrnehmungsprozess spielt.

Hinsichtlich der übergeordneten Fragestellung der Arbeit, die sich mit der (Un-)Angemessenheit der traditionellen Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung und deren Kopplung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. Verdeckung befasst, ist festzuhalten, dass Verdeckung anscheinend einen direkten Einfluss auf die wahrgenommene Glattheit von Bewegung, also auf ein *genuin* modales Attribut der Wahrnehmung, haben kann. Diese Beobachtung wirft grundlegende Fragen auf, die im Abschnitt 5.2 unter Einbezug der Befunde zum Sichtbarkeitsparadoxon diskutiert werden sollen.

5.1.2 Der Einfluss von Verdeckung auf phänomenale Sichtbarkeit

Die traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung geht auf Michotte et al. (1991) zurück und zielte ursprünglich in erster Linie auf die Unterscheidung zwischen perzeptuellen Vervollständigungen von Objektoberflächen mit visuellen Qualitäten wie Farbe und Textur (modal) und ohne solche Qualitäten (amodal) ab, wenngleich Burke (1952) auch das „Sehen einer verborgenen Bewegung“ (S. 138) beim Tunneleffekt als eine Art amodaler Wahrnehmung auffasst. Unabhängig davon beschränkt sich die Dichotomie von modaler und amodaler Vervollständigung aber oftmals nur auf unverdeckte bzw. verdeckte Objektoberflächen, so dass die Befunde zum Glättungseffekt diese eingeschränkte Unterscheidung nicht unmittelbar in Frage stellen. Ausgehend von Beobachtungen zum Anorthoskopischen Effekt (Abschnitt 2.3.3.3) und zur sog. Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer, 1999) scheint es jedoch möglich, dass ein partiell verdecktes Objekt nicht nur amodal vervollständigt, sondern auch partiell modal ergänzt wird, d. h., dass auch verdeckte Bereiche phänomenal direkt sichtbar erscheinen (*Partial-Modal Completion Hypothesis*, Palmer et al., 2007). Unklar ist dabei allerdings, wo der partiell vervollständigte Bereich im Gesichtsfeld lokalisiert ist. Außerdem erklärt die *Partial-Modal Completion Hypothesis* nicht, *warum* ein Teil des ansonsten amodal vervollständigten Bereichs modal erscheint.

Im zweiten empirischen Teil der Arbeit wurde deshalb der Einfluss von Verdeckung auf die phänomenale Sichtbarkeit von partiell verdeckten Objekten untersucht. Die trivial anmutende Beziehung zwischen geometrisch-optischer Sichtbarkeit/Verdeckung von Objekten einerseits und phänomenaler Sichtbarkeit/Unsichtbarkeit von Objekten andererseits erweist sich bei näherer Betrachtung nämlich insofern als problematisch, als es informellen Beobachtungen zufolge durchaus möglich zu sein scheint, Bereiche von Objekten als direkt sichtbar und gleichzeitig als verdeckt wahrzunehmen. Dieses „Sichtbarkeitsparadoxon“ stünde im klaren Widerspruch zur Kopplung von modaler und amodaler Wahrnehmung an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. Verdeckung.

5.1.2.1 Experimente

In zwei Experimenten wurde die Hypothese geprüft, dass aufgrund von geometrisch-optischer Verdeckung unsichtbare Bereiche von Objekten nicht nur amodal vervollständigt, sondern auch partiell modal ergänzt und somit als direkt sichtbar wahrgenommen werden können, wenn im proximalen Reiz geeignete Verdeckungshinweise enthalten sind. Zur Untersuchung dieser Hypothese wurde in Experiment VI als Vorgabebereiz eine undurchsichtige Kreisscheibe mit einem ausgeschnittenen Kreissektor („Öffnung“) dargeboten, die vor einem ringförmigen Streifen rotierte. Je nach Größe der Öffnung ruft ein solcher Reiz im allgemeinen ein mehr oder weniger starkes amodales Perzept eines vollständigen, teilweise verdeckten ringförmigen Streifens hervor, von dem ein Teil durch die Öffnung direkt (modal) sichtbar ist. Durch die Dynamik des Kreissektors im Vordergrund wird ähnlich wie beim Anorthoskopischen

Effekt (mit bewegtem Schirm vor stationärer Hintergrundfigur) innerhalb einer Umdrehung jeder Bereich des Streifens im Hintergrund einmal kurzzeitig freigelegt und ist dann durch die Öffnung in der Kreisscheibe geometrisch-optisch sichtbar. Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, separat das wahrgenommene Ausmaß der Kreisscheibe und die wahrgenommene Länge des als direkt sichtbar wahrgenommenen Streifenabschnitts in einem statischen Vergleichsreiz mit dem dynamischen Vorgabe-reiz abzugleichen. Die Ergebnisse deuten auf die Existenz des Sichtbarkeitsparadoxons hin: Während das Ausmaß des Verdeckers recht akkurat eingestellt wurde, wurde die Länge des Streifenabschnitts, der als gleichzeitig durch die Öffnung im Kreissektor sichtbar wahrgenommen wurde, deutlich überschätzt („Expansionseffekt“). Dies legt den Schluss nahe, dass gewisse Bereiche des Streifens als verdeckt und gleichzeitig als sichtbar wahrgenommen wurden. In einer Kontrollbedingung ohne Verdecker (genaugenommen mit einem Verdecker in der Hintergrundfarbe) fiel die Überschätzung der Länge des sichtbaren Streifenabschnitts nur etwa halb so groß aus wie in der Experimentalbedingung, was auf die schwächeren sensorischen Verdeckungshinweise zurückgeführt werden kann.

Weil das Entfernen der verdeckenden Kreisscheibe in der Kontrollbedingung jedoch auch dazu führte, dass sich der sichtbare Abschnitt des ringförmigen Streifens, der in der Experimentalbedingung noch als Teil eines vollständigen, stationären Streifens wahrgenommen wurde, in der Kontrollbedingung selbst zu bewegen schien, wäre es möglich, dass der je nach Bedingung unterschiedlich starke Expansionseffekt ursächlich nicht von der Wahrnehmung von Verdeckung, sondern von der Wahrnehmung von Bewegung abhängt. Um die Verdeckungsinterpretation als kritischen Faktor für das beobachtete Phänomen zu isolieren, wurde daher in Experiment VII zusätzlich zu der Bedingung mit undurchsichtigem Kreissektor u. a. auch eine Bedingung mit einem semi-transparenten Kreissektor untersucht. Während erstere Bedingung starke Verdeckungshinweise enthielt, waren die sensorischen Hinweise auf Verdeckung in der letzteren Bedingung widersprüchlich (und der Reiz insgesamt physikalisch unmöglich): Zwar schimmerte der Hintergrund durch die semi-transparente Oberfläche des Kreissektors hindurch, wodurch überhaupt erst der Transparenzeindruck entstand, nicht jedoch die Figur im Hintergrund, so als würde diese durch den Kreissektor trotz Transparenz verdeckt und als wäre sie deshalb nur in der Öffnung sichtbar. In der Bedingung mit verdeckendem Kreissektor trat das Sichtbarkeitsparadoxon in ähnlicher Weise wie in Experiment VI auf. In der Bedingung mit semi-transparentem Kreissektor war der Expansionseffekt dagegen schwächer, so dass auch die Stärke des paradoxen Sichtbarkeitseffekts geringer war.

5.1.2.2 Deutung

Die beiden Experimente zeigen, dass das Sichtbarkeitsparadoxon ein reales Phänomen ist, und stellen die häufig implizit getroffene Annahme, phänomenale Sichtbarkeit (d. h. ein modales Perzept) repräsentiere direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit und phänomenale Verdeckung (d. h. ein amodales Perzept) repräsentiere geometrisch-optische Verdeckung, in Frage. Der Widerspruch der Aussage, bestimmte Bereiche eines Objekts könnten als verdeckt und gleichzeitig als direkt sichtbar wahrgenommen werden, ließe sich jedoch auflösen, wenn man phänomenale Sichtbarkeit als Repräsentation der Schlüssigkeit und Klarheit der sensorischen Hinweise für eine spezifische perzeptuelle Deutung auffasst, also als eine Art Maß für die Verlässlichkeit der Deutung (vgl. Abschnitt 4.4.1). Diese Hypothese erklärte, weshalb verdeckte Regionen nicht nur amodal vervollständigt, sondern auch partiell modal ergänzt werden können, und beantwortete auch die Frage, wo diese partiell modal ergänzten Bereiche im Gesichtsfeld lokalisiert wären, nämlich an *derselben* Position wie Teile des Verdeckers.

Der beobachtete Einfluss von wahrgenommener Verdeckung auf die partielle modale Ergänzung von Objekten ergibt sich aus der naheliegenden Annahme, dass die Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise im Hinblick auf Oberflächeneigenschaften wie Farbe und Textur nicht nur von den tatsächlich sichtbaren Bereichen eines Objekts abhängt, sondern maßgeblich auch von Verdeckungshinweisen, die eine geeignete Fortsetzung plausibel machen (vgl. Abschnitt 4.4.1.1) – ähnlich wie bei der traditionellen amodalen Vervollständigung der Kontur und Form eines partiell verdeckten Objekts.

In vielen Fällen macht die obengenannte Hypothese, die geometrisch-optische von phänomenaler Sichtbarkeit entkoppelt, dieselben Vorhersagen wie die Annahme, beides sei aneinander gekoppelt, weil die sensorischen Hinweise, die unverdeckte Regionen einer visuellen Szene betreffen, normalerweise erheblich deutlicher und überzeugender sind als sensorische Hinweise bezüglich verdeckter Regionen. Die Unterschiede werden nur in bestimmten Situationen wie im Fall der Verdeckungstäuschung oder noch deutlicher im Fall des Sichtbarkeitsparadoxons erkennbar. In den Abschnitten 4.4.1.2 und 4.4.1.3 wurde darüber hinaus diskutiert, warum phänomenale Sichtbarkeit prinzipiell auch als kontinuierliche statt als dichotome Variable (modal vs. amodal) denkbar wäre, die zudem für jedes Attribut eines perzeptuellen Objekts (wie Kontur, Form, Farbe, Textur) unterschiedlich belegt sein könnte. Speziell der Nutzen einer solchen attributbezogenen Betrachtung der phänomenalen Sichtbarkeit wird auch im folgenden Abschnitt deutlich.

5.2 Verbindung zwischen dem Glättungseffekt und dem Sichtbarkeitsparadoxon

Der in Kapitel 3 untersuchte Glättungseffekt von Scheinbewegung und das in Kapitel 4 untersuchte Sichtbarkeitsparadoxon weisen als Gemeinsamkeit den Einfluss von Verdeckung auf eine jeweils modale Art der Vervollständigung bzw. Ergänzung auf; in ersterem Fall auf die wahrgenommene Glattheit von Bewegung hinter einem Verdecker und in letzterem Fall auf die visuelle Qualität von verdeckten Bereichen einer Objektoberfläche. Der Glättungseffekt besteht darin, dass die Bewegung eines vorübergehend verdeckten Objekts visuelle Qualitäten enthalten kann und deshalb nicht wie das Trägerobjekt selbst als amodal, sondern als modal zu bezeichnen ist. In ähnlicher Weise besteht das Sichtbarkeitsparadoxon darin, dass ein vorübergehend verdeckter Bereich der Oberfläche eines amodal vervollständigten Objekts partiell visuelle Qualitäten enthalten kann und deshalb nicht wie die übrigen verdeckten Bereiche als amodal, sondern als modal zu bezeichnen ist. Die Befunde zum Glättungseffekt sind somit konsistent mit den Befunden zum Sichtbarkeitsparadoxon und stützen daher auch die dazu angestellten theoretischen Überlegungen (Abschnitt 4.4), die in der Hypothese über die Bedeutung modaler und amodaler Perzepte zusammengefasst sind (S. 122).

Im Sinne dieser Überlegungen lassen sich die phänomenologischen Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Glättungseffekt in konsistenter Weise beschreiben und deuten, ohne in ähnliche Widersprüche wie Burke (1952) bei der Beschreibung und Deutung des phänomenologisch ähnlichen Tunneleffekts zu geraten. Der Widerspruch in Burkes Darstellung besteht in erster Linie darin, dass der Bewegungseindruck einerseits als ununterscheidbar von realer, sichtbarer Bewegung – und somit implizit als modal – charakterisiert wird (ebd., S. 121), Burke aber andererseits konstatiert, die phänomenale Präsenz der Bewegung sei ohne erkennbare sensorische Qualität und die Wahrnehmung deshalb als amodal aufzufassen (ebd., S. 138). Aufgrund der strukturellen Ähnlichkeit der Reize wäre davon auszugehen, dass ähnliche Beobachtungen auch im Zusammenhang mit dem Glättungseffekt gemacht werden müssten. Tatsächlich wirkt die Bewegung sichtbar, also modal, obwohl das Trägerobjekt selbst zwischenzeitlich als verdeckt, also amodal wahrgenommen wird. Dennoch erscheint es unangemessen, deshalb die Bewegung selbst als amodal zu bezeichnen: Ähnlich wie die Kontur und Form des bewegten Objekts hinter der Maske bzw. hinter dem Verdecker klar sichtbar vervollständigt wird, gilt dies auch für die Bewegung selbst, die trotz Verdeckung klar sichtbar ist. Alle diese Attribute – inklusive der wahrgenommenen Glattheit der Bewegung – sind phänomenal sichtbar, also modal. Im Gegensatz dazu ist die Oberflächenfarbe des Objekts in den verdeckten Phasen nicht sichtbar, weshalb man traditionell von amodaler Objektvervollständigung spricht, obwohl man präziser von amodaler Vervollständigung der Oberflächenfarbe bei gleichzeitig modaler Vervollständigung der Kontur, Form und Bewegung des Objekts sprechen sollte.

Gemäß der obigen Hypothese, dass modale Empfindungen bestimmter Attribute nicht deren geometrisch-optische Sichtbarkeit, sondern überzeugende sensorische Hinweise und eine hohe Verlässlichkeit

der perzeptuellen Deutung repräsentieren, lässt sich der Glättungseffekt dann wie folgt deuten: Die dynamische Reizsituation mit Verdeckungshinweisen legt die Lösung eines fortdauernd bestehenden Objekts in Bewegung hinter einem Verdecker nahe (vgl. auch Rocks Theorieperspektive von Wahrnehmung als Prozess ähnlich intelligentem Problemlösen; Abschnitt 2.2.2.2). Lediglich die zu schwachen sensorischen Hinweise bzw. die zu geringe Verlässlichkeit der perzeptuellen Deutung hinsichtlich des Attributs der Oberflächenfarbe, für die möglicherweise strengere Maßstäbe als für Attribute wie Kontur und Form gelten (vgl. S. 124), verhindern die phänomenale Sichtbarkeit der Oberfläche.

5.3 Bezug der Befunde zu allgemeinen Theorien der Wahrnehmung

Die Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Glättungseffekt und dem Sichtbarkeitsparadoxon fügen sich in den Rahmen konstruktivistischer Theorieperspektiven der visuellen Wahrnehmung ein (vgl. Abschnitt 2.2.2). In beiden Fällen erfolgt eine modale Vervollständigung bzw. Ergänzung, die durch Verdeckung ausgelöst bzw. in ihrer Qualität durch Verdeckung moduliert wird. Zur Erklärung der Befunde scheint es unumgänglich, ein internes Konzept von Verdeckung vorauszusetzen, das durch die Reize aktiviert wird und die komplexen Mechanismen perzeptueller Informationsverarbeitung maßgeblich beeinflusst. Die Befunde stützen die konstruktivistische Vorstellung einer abduktiven Funktionsweise des Wahrnehmungssystems. Damit lässt sich der Glättungseffekt wie folgt deuten: Enthält die perzeptuelle Deutung des Reizes uninterpretierbare Elemente, die beispielsweise aufgrund der Lücken im Bewegungspfad bei diskreten Bewegungsreizen auftreten können, und werden somit interne Voraussetzungen für eine perzeptuelle Deutung (hier: Bewegung) verletzt, könnte eine aktive Erkundung des Reizes nach Erklärungsmöglichkeiten erfolgen. Lässt sich dann per abduktiver Inferenz eine passende Erklärung für die uninterpretierbaren Elemente finden, beispielsweise durch die Deutung der Lücken im Bewegungspfad als durch Verdeckung verursacht, wird die mit der Reizsituation konsistente perzeptuelle Deutung bevorzugt (Bewegung eines zwischenzeitlich verdeckten Objekts). Lässt sich dagegen keine passende Erklärung finden, muss das Wahrnehmungssystem mit gewisser Vagheit operieren. Im Fall von Scheinbewegung wäre anzunehmen, dass sich diese Vagheit dann in Form eines unklaren Bewegungseindrucks, mangelnder Objektkontinuität und daraus resultierend ggf. in sprunghaft-ruckartig wahrgenommener Bewegung äußert.

In ähnlicher Weise lassen sich auch die Beobachtungen im Zusammenhang mit dem Sichtbarkeitsparadoxon mit abduktiver Inferenz deuten, da auch dort Verdeckung als Erklärung für das Verschwinden bzw. Fehlen sensorischer Informationen herangezogen werden kann, wodurch die Plausibilität für das (Fort-)Bestehen des Hintergrunds hinter dem Verdecker erheblich steigt. Wie eine Umwandlung von sensorischen Informationen in eine Art bedeutungshafter Repräsentationen mit Hilfe abduktiver Prozesse prinzipiell möglich wäre, zeigt in exemplarischer Weise Shanahan (2005) in seiner formalen Theorie der Roboter-Wahrnehmung.

Die vorgeschlagene Auflösung des Paradoxons, die in der zentralen Hypothese über die Bedeutung modaler und amodaler Perzepte formuliert ist (S. 122), knüpft zudem in zweifacher Hinsicht direkt an funktionalistisch-konstruktivistische Theorievorstellungen an (Hoffman, 2009; Uexküll, 1909), wonach das perzeptuelle Erleben keine möglichst veridikale Rekonstruktion der physikalischen Attribute der Außenwelt ist bzw. eine solche repräsentiert, sondern eine abstrakte Konstruktion des Wahrnehmungssystems ist mit dem Ziel, eine möglichst nützliche Schnittstelle zur Interaktion mit der Umwelt zu bieten:

1. Die Idee, dass die phänomenologische Variable „modal vs. amodal“ nicht die scheinbar korrespondierende physikalische Variable „direkt sichtbar vs. verdeckt“ repräsentiert, sondern die Schlüssigkeit und Eindeutigkeit der sensorischen Hinweise hinsichtlich der perzeptuellen Deutung, knüpft an die Vorstellung beliebig abstrakter, „nicht-veridikaler“ mentaler Repräsentationen an (vgl. Helmholtz' Zeichentheorie, skizziert in Mausfeld, 2006, S. 100).
2. Folgt man der Vorstellung, dass phänomenale Sichtbarkeit nicht geometrisch-optische Sichtbarkeit

repräsentiert, sondern dann vorliegt, wenn die sensorischen Hinweise hinsichtlich einer bestimmten perzeptuellen Deutung schlüssig und eindeutig sind, dann könnte umgekehrt phänomenale Sichtbarkeit als Maß für die Verlässlichkeit der Deutung aufgefasst werden. Der damit verbundene Fokus auf die perzeptuelle Deutung statt auf die physikalischen Reizbedingungen steht im Einklang mit dem Kerngedanken funktionalistischer Ansätze, dass maximale (physikalische) Veridikalität nicht grundsätzlich das beste Kriterium für eine erfolgreiche adaptive Interaktion mit der Umwelt sein muss.

5.4 Fazit

Die traditionelle Dichotomie von modaler und amodaler Wahrnehmung und die damit verbundene, häufig stillschweigend getroffene Annahme, modale Perzepte repräsentierten direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit und amodale Perzepte geometrisch-optische Verdeckung, wird in dieser Arbeit kritisch hinterfragt. Phänomenologische Beobachtungen und die vorgestellten empirischen Befunde deuten darauf hin, dass phänomenale Sichtbarkeit zwar häufig an direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit gekoppelt ist, letztere jedoch weder notwendig noch hinreichend für erstere ist. So zeigen die Experimentalergebnisse den Einfluss von Verdeckung auf genuin modale Attribute der Wahrnehmung, hier exemplarisch auf die Glattheit von verdeckter Bewegung („Glättungseffekt“) und auf die partielle phänomenale Sichtbarkeit von verdeckten Objektbereichen („Sichtbarkeitsparadoxon“). Umgekehrt deuten phänomenologische Beobachtungen darauf hin, dass Perzepte von „amodalem Charakter“ auch ohne Verdeckungseinflüsse möglich sind.

Die hier vorgeschlagenen Erklärungsansätze zum Glättungseffekt und zum Sichtbarkeitsparadoxon stützen sich auf konstruktivistische Theorieperspektiven, die abduktive Inferenzprozesse als essentiell voraussetzen (Hoffman, 2009; Mausfeld, 2011a; Rock, 1983). Aus diesen theoretischen Vorstellungen und aus den empirischen Befunden wird die Hypothese über die Bedeutung modaler und amodaler Perzepte abgeleitet, dass phänomenale Sichtbarkeit keine direkte geometrisch-optische Sichtbarkeit repräsentiert, sondern die Schlüssigkeit der zugrunde liegenden sensorischen Hinweise, und somit als eine Art Maß für die Verlässlichkeit der perzeptuellen Deutung dienen könnte. An diese zentrale Hypothese knüpft die spekulative Kontinuitätshypothese an, wonach phänomenale Sichtbarkeit keine dichotome Variable sein muss, sondern der Übergang zwischen modalen und amodalen Perzepten prinzipiell auch kontinuierlich verlaufen könnte, sowie die Hypothese der attributbezogenen Sichtbarkeit, dass unterschiedliche visuelle Attribute wie Objektkontur, Objektform, Oberflächenfarbe oder die Glattheit von Bewegung unterschiedliche phänomenale Sichtbarkeiten aufweisen können.

Mit Hilfe dieser Hypothesen lassen sich paradoxe Beobachtungen wie beispielsweise der Charakter der verdeckten Bewegung beim Tunneleffekt (Burke, 1952) oder die partiell modale Ergänzung bei der Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007) in konsistenter Weise erklären. Prinzipiell erscheint es vielversprechend, bisher nicht oder nur unzureichend erklärte visuelle Phänomene im Zusammenhang mit Verdeckung, insbesondere in Kombination mit Bewegung, unter Berücksichtigung der hier vorgestellten Befunde und Hypothesen neu zu überdenken.

5.5 Offene Fragen und Ausblick

Sowohl der Glättungseffekt als auch das Sichtbarkeitsparadoxon sind in kritischer Weise an die Wahrnehmung von Verdeckung gebunden. Obwohl es zahlreiche Studien über die amodale Vervollständigung von Objekten sowie über Objektbewegung hinter einem Verdeckter gibt, ist bis heute nicht vollständig verstanden, welche unterschiedliche Arten von Hinweisen im Reiz zur Wahrnehmung von Verdeckung führen können und welche Mechanismen in welcher Weise bei der perzeptuellen Vervollständigung von Objekten, Oberflächen oder anderen phänomenalen Empfindungen wie beispielsweise Bewegung betei-

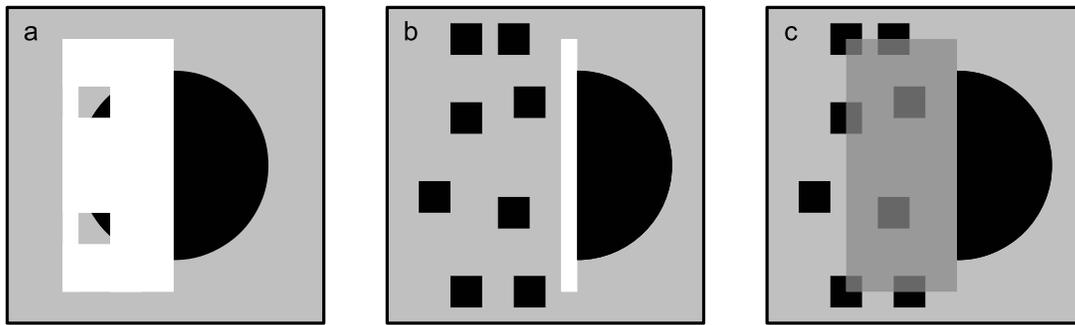


Abbildung 5.1: Denkbare Variationen der Stärke der Verdeckungshinweise, die durch stereoskopische Reize mit konsistenten und inkonsistenten binokularen Disparitäten zusätzlich variiert werden könnte. Hängt die Stärke der Verdeckungstäuschung von der Stärke der Verdeckungshinweise ab, wäre zu erwarten, dass der Effekt in a größer ist als in uneindeutigeren Situationen wie in b und c.

ligt sind; dies betrifft insbesondere die vermutlich komplexe Interaktion zwischen Reizhinweisen (wie beispielsweise lokalen T-Kreuzungen) einerseits und perzeptuellen Repräsentationen von Figur, Grund und Verdeckungsbeziehungen andererseits.

Im Zusammenhang mit dem Glättungseffekt wurden in der Diskussion des Experiments III mögliche Reizkriterien genannt, die auf Verdeckung hinweisen und die beobachteten Unterschiede zwischen den Bedingungen erklären könnten (Abschnitt 3.2.3.2). Ob diese Kriterien auch in anderen Reizsituationen gelten, wäre empirisch zu untersuchen. Unabhängig davon stützen die Befunde der Experimente I–V zwar die vorgestellten Hypothesen und Deutungen, jedoch könnte es noch weitere, bisher unbekannte Einflussfaktoren auf den Glättungseffekt geben, wie insbesondere die Ergebnisse des Experiments V andeuten.

Auch bezüglich des Sichtbarkeitsparadoxons und dessen Deutung in Kapitel 4 bleiben offene Fragen. In den Experimenten VI und VII ging es primär zunächst darum, den paradoxen Effekt empirisch nachzuweisen und zu quantifizieren sowie die Rolle, die Verdeckung dabei spielt, zu untersuchen. Die Befunde deuten zwar stark darauf hin, dass die klassische Vorstellung der Kopplung von modaler und amodaler Wahrnehmung an geometrisch-optische Sichtbarkeit bzw. Verdeckung zumindest in dieser strengen Form unangemessen ist, jedoch ist die daraus abgeleitete Hypothese über die Bedeutung von modalen und amodalen Perzepten (Abschnitt 4.4.1.1) spekulativ. Dies trifft in besonderem Maße auf die Kontinuitätshypothese zu (Abschnitt 4.4.1.2), für die es nur schwache empirische und phänomenologische Indizien gibt (vgl. z. B. Kellman et al., 1998), die prinzipiell aber auch andere Deutungen zulassen. Eine intensive theoretische Auseinandersetzung mit diesen Hypothesen und deren empirische Prüfung steht noch aus; besonders letzteres erfordert zuvor eine Konkretisierung und Quantifizierung der Begriffe „Schlüssigkeit der sensorischen Hinweise“ und „Verlässlichkeit der perzeptuellen Deutung“.

Eine Möglichkeit, sich diesem Problem empirisch zu nähern, wäre beispielsweise die Untersuchung der Stärke der Verdeckungstäuschung in Abhängigkeit von der Stärke der Verdeckungshinweise (Abbildung 5.1). Hierfür bieten sich neben rein visuellen beispielsweise haptisch-visuelle Reize an; die Aufgabe der Versuchsperson könnte dann darin bestehen, den sichtbaren Bereich einer *realen* Kreisscheibe anhand von geeigneten Schablonen zu bestimmen, wobei der tatsächlich geometrisch-optisch sichtbare Bereich der Kreisscheibe in mehreren Stufen variiert würde. Die Einschätzungen der Versuchspersonen könnten wiederum mit deren Einschätzungen in einer zweiten Bedingung verglichen werden, in der die partiell verdeckte Kreisscheibe zusätzlich mit den Händen betastet werden dürfte (Abbildung 5.2). Aufgrund der bekannten Fähigkeit der multimodalen Integration des sensorischen Inputs durch das Wahrnehmungssystem (vgl. z. B. Falchier, Clavagnier, Barone & Kennedy, 2002) wäre es nicht unplausibel, anzunehmen, dass der sichtbare Bereich der Kreisscheibe in der zweiten, haptisch-visuellen Bedingung als größer eingeschätzt wird als in der ersten, rein visuellen Bedingung.

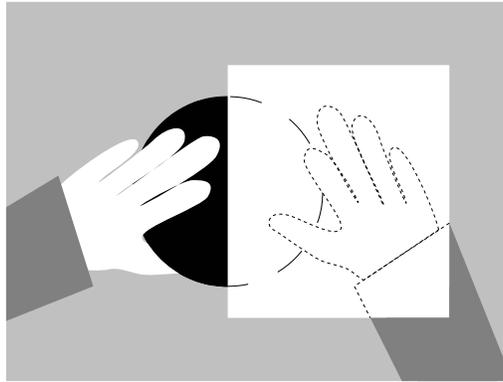


Abbildung 5.2: Denkbarer haptisch-visueller Reiz.

Im Gegensatz zu den bislang empirisch wenig gesicherten Hypothesen über die Bedeutung modaler und amodaler Perzepte und über die Kontinuität von phänomenaler Sichtbarkeit wird die Hypothese der attributbezogenen Sichtbarkeit (vgl. Abschnitt 4.4.1.3) durch zahlreiche phänomenologische Beobachtungen – nicht nur im Hinblick auf amodale Vervollständigung (Michotte et al., 1991) und Bewegung (Wertheimer, 1912) – gestützt. Diese Hypothese könnte sich insofern als besonders hilfreich erweisen, als sie prinzipiell auf die phänomenale Sichtbarkeit beliebiger visueller Attribute, die über die Eigenschaften von Objekten und Oberflächen weit hinausgehen, angewandt werden kann und eine konsistente Beschreibung von ansonsten schwierig einzuordnenden Beobachtungen ermöglicht, nicht nur im Hinblick auf den Tunneleffekt (Burke, 1952) oder die Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007), sondern möglicherweise auch hinsichtlich der zahlreichen widersprüchlichen Befunde zum Anorthoskopischen Effekt (Helmholtz, 1867; Hochberg, 1968; Parks, 1965; Rock, 1981; Rock & Sigman, 1973; Zöllner, 1862) und verwandter Phänomene.

Zu guter Letzt bleibt festzuhalten, dass die Frage nach der Bedeutung modaler und amodaler Perzepte für den Organismus, die durch die beobachtete Entkopplung von modalen/amodalen Perzepten und geometrisch-optischer Sichtbarkeit/Verdeckung drängender wird, als sie es bisher war, zum jetzigen Zeitpunkt kaum beantwortet werden kann. Die aus der zugrunde liegenden konstruktivistischen Theoriperspektive und aus den Befunden abgeleiteten Hypothesen sind noch sehr skizzenhaft und empirisch nur schwach gestützt, bieten aber einen Ausgangspunkt für weitere empirische Forschungen zur Bedeutung modaler und amodaler Perzepte. Im konstruktivistischen Sinne lassen sich beispielsweise amodale Eindrücke als uninterpretierbare bzw. perzeptuell nicht vollständig spezifizierte Elemente auffassen. Umgekehrt wären demnach modale Eindrücke, die sich auf einzelne Attribute wie beispielsweise die Form und Kontur oder Bewegung eines Objekts beziehen und unabhängig von anderen Attributen wie beispielsweise der Oberflächenfarbe sind, perzeptuell vollständig spezifiziert. Über die Bedeutung der korrespondierenden phänomenalen Eindrücke kann auf Basis der aktuellen Befundlage aus wahrnehmungspsychologischer Sicht jedoch nur spekuliert werden. Haben *Qualia* eine funktionale Bedeutung für den Organismus und wenn ja, welche? Oder sind sie nur ein phänomenal erlebtes „Nebenprodukt“ interner Verarbeitungsprozesse des Wahrnehmungssystems? Diese Fragen, mit denen sich auch die Philosophie des Geistes beschäftigt, erscheinen aus wahrnehmungspsychologischer Perspektive nicht minder aktuell und wichtig.

Literaturverzeichnis

- Adelson, E. H. (2000). Lightness perception and lightness illusions. In M. Gazzaniga (Hrsg.), *The New Cognitive Neurosciences* (2. Aufl., S. 339–351). Cambridge, MA: MIT Press.
- Adelson, E. H. & Bergen, J. R. (1985). Spatiotemporal energy models for the perception of motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2 (2), 284–299.
- Allport, D. A. (1968). Phenomenal simultaneity and the perceptual moment hypothesis. *British Journal of Psychology*, 59 (4), 395–406.
- Anderson, B. L. (1999). Stereoscopic occlusion and the aperture problem for motion: A new solution. *Vision Research*, 39 (7), 1273–1284.
- Anderson, B. L. (2007). The demise of the identity hypothesis and the insufficiency and nonnecessity of contour relatability in predicting object interpolation: Comment on Kellman, Garrigan, and Shipley (2005). *Psychological Review*, 114 (2), 470–487.
- Anderson, B. L., Singh, M. & Fleming, R. (2002). The interpolation of object and surface structure. *Cognitive Psychology*, 44 (2), 148–190.
- Anderson, B. L. & Sinha, P. (1997). Reciprocal interactions between occlusion and motion computations. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94 (7), 3477–3480.
- Anstis, S. M. & Atkinson, J. (1967). Distortions in moving figures viewed through a stationary slit. *The American Journal of Psychology*, 80 (4), 572–585.
- Arend, L., Buehler, J. & Lockhead, G. (1971). Difference information in brightness perception. *Perception & Psychophysics*, 9 (3), 367–370.
- Aydın, M., Herzog, M. H. & Ögmen, H. (2009). Shape distortions and gestalt grouping in anorthoscopic perception. *Journal of Vision*, 9 (3), Art. 8.
- Bacon, B. & Mamassian, P. (2002). Amodal completion and the perception of depth without binocular correspondence. *Perception*, 31 (9), 1037–1046.
- Bartlett, F. C. (1932). *Remembering: A study in experimental and social psychology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bentivoglio, A. R., Bressman, S. B., Cassetta, E., Carretta, D., Tonali, P. & Albanese, A. (1997). Analysis of blink rate patterns in normal subjects. *Movement Disorders*, 12 (6), 1028–1034.
- Berkeley, G. (1709). *An essay towards a new theory of vision*. Dublin: Aaron Rhames.
- Blake, R., Ahlström, U. & Alais, D. (1999). Perceptual priming by invisible motion. *Psychological Science*, 10 (2), 145–150.
- Bobbitt, J. M. (1942). An experimental study of the phenomenon of closure as a threshold function. *Journal of Experimental Psychology*, 30 (4), 273–294.
- Boring, E. G. (1953). A history of introspection. *Psychological Bulletin*, 50 (3), 169–189.
- Borst, A. (2007). Correlation versus gradient type motion detectors: The pros and cons. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 362 (1479), 369–374.
- Braddick, O. J. (1974). A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, 14 (7), 519–527.
- Braddick, O. J. (1980). Low-level and high-level processes in apparent motion [and discussion]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290 (1038), 137–151.
- Bregman, A. S. (1981). Asking the “what for” question in auditory perception. In M. Kubovy &

- J. R. Pomerantz (Hrsg.), *Perceptual organization* (S. 99–118). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Bressan, P., Mingolla, E., Spillmann, L. & Watanabe, T. (1997). Neon color spreading: A review. *Perception*, 26 (11), 1353–1366.
- Bridgeman, B. (1998). Simple conscious percepts require complex unconscious processing. *PSYCHE*, 4 (6).
- Burgess, N. (2006). Spatial memory: How egocentric and allocentric combine. *Trends in Cognitive Sciences*, 10 (12), 551–557.
- Burke, L. (1952). On the tunnel effect. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 4, 121–138.
- Burr, D. C. (1979). Acuity for apparent vernier offset. *Vision Research*, 19 (7), 835–837.
- Burr, D. C. (1980). Motion smear. *Nature*, 274 (5752), 164–165.
- Burr, D. C. & Morgan, M. (1997). Motion deblurring in human vision. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 264 (1380), 431–436.
- Burr, D. C., Ross, J. & Morrone, M. (1986a). Seeing objects in motion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 227 (1247), 249–265.
- Burr, D. C., Ross, J. & Morrone, M. (1986b). Smooth and sampled motion. *Vision Research*, 26 (4), 643–652.
- Burr, D. C. & Thompson, P. (2011). Motion psychophysics: 1985–2010. *Vision Research*, 51 (13), 1431–1456.
- Burt, P. & Sperling, G. (1981). Time, distance, and feature trade-offs in visual apparent motion. *Psychological Review*, 88 (2), 171–195.
- Carlson, T. A., Alvarez, G., Wu, D. & Verstraten, F. A. (2010). Rapid assimilation of external objects into the body schema. *Psychological Science*, 21 (7), 1000–1005.
- Chubb, C. & Sperling, G. (1988). Drift-balanced random stimuli: A general basis for studying non-Fourier motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 5 (11), 1986–2007.
- Churchland, M. M., Chou, I.-H. & Lisberger, S. G. (2003). Evidence for object permanence in the smooth-pursuit eye movements of monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 90 (4), 2205–2218.
- Coltheart, M. (1980). Iconic memory and visible persistence. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 27 (3), 183–228.
- Corballis, P. M., Fendrich, R., Shapley, R. M. & Gazzaniga, M. S. (1999). Illusory contour perception and amodal boundary completion: Evidence of a dissociation following callosotomy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11 (4), 459–466.
- De Valois, R. L., Abramov, I. & Jacobs, G. H. (1966). Analysis of response patterns of LGN cells. *Journal of the Optical Society of America*, 56 (7), 966–977.
- Dieter, K. C., Hu, B., Knill, D. C., Blake, R. & Tadin, D. (2014). Kinesthesia can make an invisible hand visible. *Psychological Science*, 25 (1), 66–75.
- DiLorenzo, J. R. & Rock, I. (1982). The rod-and-frame effect as a function of the righting of the frame. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 8 (4), 536–546.
- Duncan, R. O., Albright, T. D. & Stoner, G. R. (2000). Occlusion and the interpretation of visual motion: Perceptual and neuronal effects of context. *The Journal of Neuroscience*, 20 (15), 5885–5897.
- Duncker, K. (1929). Über induzierte Bewegung. *Psychologische Forschung*, 12 (1), 180–259.
- D’Zmura, M., Colantoni, P., Knoblauch, K. & Laget, B. (1997). Color transparency. *Perception*, 26 (4), 471–492.
- Ebbinghaus, H. (1885). *Über das Gedächtnis. Untersuchungen zur experimentellen Psychologie*. Leipzig: Duncker & Humblot.
- Ekroll, V. & Borzиковsky, C. (2010). The role of occlusion cues in apparent motion. *Perception*, 39 (12), 1606–1623.
- Ekroll, V., Faul, F. & Golz, J. (2008). Classification of apparent motion percepts based on temporal factors. *Journal of Vision*, 8 (4), Art. 31.

- Exner, S. (1875). Über das Sehen von Bewegungen und die Theorie des zusammengesetzten Auges. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathem.-naturwis. Classe*, 72, 156–191.
- Falchier, A., Clavagnier, S., Barone, P. & Kennedy, H. (2002). Anatomical evidence of multimodal integration in primate striate cortex. *The Journal of Neuroscience*, 22 (13), 5749–5759.
- Faul, F. (1997). *Theoretische und experimentelle Untersuchung chromatischer Determinanten perzeptueller Transparenz*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Fendrich, R., Rieger, J. W. & Heinze, H.-J. (2005). The effect of retinal stabilization on anorthoscopic percepts under free-viewing conditions. *Vision Research*, 45 (5), 567–582.
- Fennema, C. & Thompson, W. (1979). Velocity determination in scenes containing several moving objects. *Computer Graphics and Image Processing*, 9 (4), 301–315.
- Flombaum, J. & Scholl, B. (2006). A temporal same-object advantage in the tunnel effect: Facilitated change detection for persisting objects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32 (4), 840–853.
- Foley, J., Dam, A. van, Feiner, S. & Hughes, J. (1996). *Computer graphics: Principles and practice*, in C. Addison-Wesley.
- Gelb, A. (1929). Die “Farbenkonstanz” der Sehdinge. In A. Bethe, G. Bergmann, G. Embden & A. Ellinger (Hrsg.), *Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie* (S. 594–678). Berlin: Springer.
- Gepshtein, S. & Kubovy, M. (2007). The lawful perception of apparent motion. *Journal of Vision*, 7 (8), Art. 9.
- Gibson, J. J. (1950). *The perception of the visual world*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1954). The visual perception of objective motion and subjective movement. *Psychological Review*, 61 (5), 304–314.
- Gibson, J. J. (1966). *The senses considered as perceptual systems*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gibson, J. J., Kaplan, G. A., Reynolds, H. N. & Wheeler, K. (1969). The change from visible to invisible. *Perception & Psychophysics*, 5 (2), 113–116.
- Gilchrist, A. L. (1977). Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement. *Science*, 195 (4274), 185–187.
- Gilchrist, A. L., Delman, S. & Jacobsen, A. (1983). The classification and integration of edges as critical to the perception of reflectance and illumination. *Perception & Psychophysics*, 33 (5), 425–436.
- Gregory, R. L. (1966). *Eye and brain: The psychology of seeing*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Grossberg, S. & Mingolla, E. (1985). Neural dynamics of perceptual grouping: Textures, boundaries, and emergent segmentations. *Perception & Psychophysics*, 38 (2), 141–171.
- Haber, R. N. & Nathanson, L. S. (1968). Post-retinal storage? Some further observations on Parks’ camel as seen through the eye of a needle. *Perception & Psychophysics*, 3 (5), 349–355.
- Helmholtz, H. v. (1867). *Handbuch der physiologischen Optik* (Bd. 1). Hamburg, Leipzig: Voss.
- Hering, E. (1878). *Zur Lehre vom Lichtsinne: Sechs Mitteilungen an die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften in Wien*. Wien: Carl Gerold’s Sohn.
- Hochberg, J. (1968). In the mind’s eye. In R. N. Haber (Hrsg.), *Contemporary theory and research in visual perception* (S. 309–331). New York, NY: Holt, Rinehart & Winston.
- Hochberg, J. (2003). Acts of perceptual inquiry: Problems for any stimulus-based simplicity theory. *Acta Psychologica*, 114 (3), 215–228.
- Hofer, H., Carroll, J., Neitz, J., Neitz, M. & Williams, D. (2005). Organization of the human trichromatic cone mosaic. *The Journal of Neuroscience*, 25 (42), 9669–9679.
- Hoffman, D. D. (1998). *Visual intelligence: How we create what we see*. New York, NY: W. W. Norton & Company.
- Hoffman, D. D. (2009). The interface theory of perception: Natural selection drives true perception

- to swift extinction. In S. Dickinson, M. Tarr, A. Leonardis & B. Schiele (Hrsg.), *Object categorization: Computer and human vision* (S. 148–165). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Hoffman, D. D., Singh, M. & Mark, J. (2013). Does evolution favor true perceptions? In *Proceedings of SPIE* (Bd. 8651, S. 865104).
- Hogendoorn, H., Kammers, M. P., Carlson, T. A. & Verstraten, F. A. (2009). Being in the dark about your hand: Resolution of visuo-proprioceptive conflict by disowning visible limbs. *Neuropsychologia*, 47 (13), 2698–2703.
- Holcombe, A. O. (2002). *Spatiotemporal conditions for the perception of occlusion and transparency*. Poster abstract. (9th Joint Symposium on Neural Computation, May 18, 2002, Caltech, Pasadena)
- Huffman, D. A. (1971). Impossible objects as nonsense sentences. *Machine Intelligence*, 6 (1), 295–323.
- Intraub, H. (2010). Rethinking scene perception: A multisource model. In B. Ross (Hrsg.), *The Psychology of Learning and Motivation* (Bd. 52, S. 231–264). Burlington, VT: Academic Press.
- Intraub, H. & Bodamer, J. (1993). Boundary extension: Fundamental aspect of pictorial representation or encoding artifact? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 19 (6), 1387–1397.
- Intraub, H. & Dickinson, C. (2008). False memory 1/20th of a second later what the early onset of boundary extension reveals about perception. *Psychological Science*, 19 (10), 1007–1014.
- Intraub, H. & Richardson, M. (1989). Wide-angle memories of close-up scenes. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 15 (2), 179–187.
- Johnston, A., McOwan, P. & Buxton, H. (1992). A computational model of the analysis of some first-order and second-order motion patterns by simple and complex cells. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 250 (1329), 297–306.
- Kanizsa, G. (1979). *Organization in vision: Essays on Gestalt perception*. New York, NY: Praeger.
- Kanizsa, G. (1985). Seeing and thinking. *Acta Psychologica*, 59 (1), 23–33.
- Kanizsa, G. (1987). Quasi-perceptual margins in homogeneously stimulated fields. In S. Petry & G. E. Meyer (Hrsg.), *The perception of illusory contours* (S. 40–49). New York, NY: Springer.
- Kanizsa, G. & Luccio, R. (1978). Espansione di superficie da completamento amodale. In *Reports from the Institute of Psychology*. Trieste, Italy: University of Trieste.
- Kaufman, E. L., Cyrulnik, I., Kaplowitz, J., Melnick, G. & Stoff, D. (1971). The complementarity of apparent and real motion. *Psychologische Forschung*, 34 (4), 343–348.
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W. & Volkman, J. (1949). The discrimination of visual number. *The American Journal of Psychology*, 62 (4), 498–525.
- Kellman, P. J., Garrigan, P. & Shipley, T. F. (2005). Object interpolation in three dimensions. *Psychological Review*, 112 (3), 586–609.
- Kellman, P. J., Guttman, S. E. & Wickens, T. D. (2001). Geometric and neural models of object perception. In T. F. Shipley & P. J. Kellman (Hrsg.), *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision* (S. 183–245). Oxford, UK: Elsevier Science.
- Kellman, P. J. & Shipley, T. F. (1991). A theory of visual interpolation in object perception. *Cognitive Psychology*, 23, 141–221.
- Kellman, P. J., Yin, C. & Shipley, T. F. (1998). A common mechanism for illusory and occluded object completion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24 (3), 859–869.
- Kim, S.-H., Feldman, J. & Singh, M. (2011). Curved apparent motion induced by amodal completion. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 74 (2), 350–364.
- Koenderink, J. J. (2011). Vision as a user interface. In *Proceedings of SPIE* (Bd. 7865, S. 786504).
- Koenderink, J. J. & van Doorn, A. (1976). The singularities of the visual mapping. *Biological Cybernetics*, 24 (1), 51–59.
- Koffka, K. (1935). *Principles of Gestalt psychology*. New York, NY: Harcourt, Brace & Co.

- Köhler, W. (1969). *The task of Gestalt psychology*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Kolers, P. A. (1972). *Aspects of motion perception*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Korte, A. (1915). Kinematoskopische Untersuchungen. *Zeitschrift für Psychologie*, 72, 193–296.
- Lashley, K. S., Chow, K. & Semmes, J. (1951). An examination of the electrical field theory of cerebral integration. *Psychological Review*, 58 (2), 123–136.
- Leshner, G. (1995). Illusory contours: Toward a neurally based perceptual theory. *Psychonomic Bulletin & Review*, 2 (3), 279–321.
- Liu, Z., Jacobs, D. & Basri, R. (1999). The role of convexity in perceptual completion: Beyond good continuation. *Vision Research*, 39 (25), 4244–4257.
- Lu, Z.-L. & Sperling, G. (2001). Three-systems theory of human visual motion perception: Review and update. *Journal of the Optical Society of America A*, 18 (9), 2331–2370.
- Mach, E. (1865). Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, mathem.-naturwis. Classe*, 52, 303–322.
- MacLeod, D. I. A. & Willen, J. D. (1995). Is there a visual space? In R. D. Luce, M. D’Zmura, D. Hoffman, G. J. Iverson & A. K. Romney (Hrsg.), *Geometric representations of perceptual phenomena: Papers in honor of Tarow Indow on his 70th birthday* (S. 47–60). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mark, J. T., Marion, B. B. & Hoffman, D. D. (2010). Natural selection and veridical perceptions. *Journal of Theoretical Biology*, 266 (4), 504–515.
- Marr, D. (1982). *A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman.
- Marr, D. & Ullman, S. (1981). Directional selectivity and its use in early visual processing. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 211 (1183), 151–180.
- Mausfeld, R. (2002). The physicalist trap in perception theory. In D. Heyer & R. Mausfeld (Hrsg.), *Perception and the physical world* (S. 75–112). Chichester: Wiley.
- Mausfeld, R. (2006). Wahrnehmungspsychologie: Geschichte und Ansätze. In J. Funke & P. A. Frensch (Hrsg.), *Handbuch der Allgemeinen Psychologie: Kognition* (S. 97–107). Göttingen: Hogrefe.
- Mausfeld, R. (2010a). Intrinsic multiperspectivity: On the architectural foundations of a distinctive mental capacity. In P. A. Frensch & R. Schwarzer (Hrsg.), *Cognition and Neuropsychology: International Perspectives on Psychological Science* (Bd. 1, S. 95–116). East Sussex: Psychology Press.
- Mausfeld, R. (2010b). The perception of material qualities and the internal semantics of the perceptual system. In L. Albertazzi, G. J. Van Tonder & D. Vishwanath (Hrsg.), *Perception beyond inference: The information content of visual processes* (S. 159–200). Cambridge, MA: MIT Press.
- Mausfeld, R. (2011a). Intrinsic multiperspectivity: Conceptual forms and the functional architecture of the perceptual system. In W. Welsch, W. J. Singer & A. Wunder (Hrsg.), *Interdisciplinary Anthropology* (S. 19–54). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Mausfeld, R. (2011b). Wahrnehmungspsychologie. In A. Schütz, H. Selg, M. Brand & S. Lautenbacher (Hrsg.), *Psychologie. Eine Einführung in ihre Grundlagen und Anwendungsfelder*. Stuttgart: Kohlhammer.
- McDermott, J. & Adelson, E. H. (2004a). Junctions and cost functions in motion interpretation. *Journal of Vision*, 4 (7), 552–563.
- McDermott, J. & Adelson, E. H. (2004b). The geometry of the occluding contour and its effect on motion interpretation. *Journal of Vision*, 4 (10), 944–954.
- McDermott, J., Weiss, Y. & Adelson, E. H. (2001). Beyond junctions: Nonlocal form constraints on motion interpretation. *Perception*, 30 (8), 905–923.
- Metelli, F. (1974). The perception of transparency. *Scientific American*, 230 (4), 90–98.
- Metzger, W. (1936). *Gesetze des Sehens*. Frankfurt am Main: W. Kramer.

- Michotte, A. E. & Burke, L. (1951). Une nouvelle énigme dans la psychologie de la perception: Le 'donné amodal' dans l'expérience [Ein neues Rätsel der Wahrnehmungspsychologie: Das amodal Gegebene im sensorischen Erleben]. In *Proceedings of the 13th international congress of psychology* (S. 179–180).
- Michotte, A. E., Thinès, G. & Crabbé, G. (1991). Amodal completion of perceptual structures. In G. Thinès, C. Alan & G. Butterworth (Hrsg.), *Michotte's experimental phenomenology of perception* (S. 140–167). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates. (Original: Les compléments amodaux des structures perceptives, 1964, *Studia Psychologica*, Louvain: Publications Universitaires.)
- Miller, C. T., Dibble, E. & Hauser, M. D. (2001). Amodal completion of acoustic signals by a nonhuman primate. *Nature Neuroscience*, 4 (8), 783–784.
- Miller, G. A. & Licklider, J. (1950). The intelligibility of interrupted speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 22, 167–173.
- Moore, C. M. & Enns, J. T. (2004). Object updating and the flash-lag effect. *Psychological Science*, 15 (12), 866–871.
- Morgan, M., Findlay, J. & Watt, R. (1982). Aperture viewing: A review and a synthesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 34 (2), 211–233.
- Murray, M., Foxe, D. M., Javitt, D. C. & Foxe, J. J. (2004). Setting boundaries: Brain dynamics of modal and amodal illusory shape completion in humans. *The Journal of Neuroscience*, 24 (31), 6898–6903.
- Murray, R., Sekuler, A. & Bennett, P. (2001). Time course of amodal completion revealed by a shape discrimination task. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8 (4), 713–720.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. (1990). Toward a neural understanding of visual surface representation. In T. Sejnowski, E. R. Kandel, C. F. Stevens & J. D. Watson (Hrsg.), *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology* (Bd. 55, S. 911–924). New York, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. (1992). Experiencing and perceiving visual surfaces. *Science*, 257 (5075), 1357–1363.
- Nakayama, K., Shimojo, S. & Silverman, G. H. (1989). Stereoscopic depth: Its relation to image fragmentation, grouping, and the recognition of occluded objects. *Perception*, 18 (1), 55–68.
- Nieder, A. (2002). Seeing more than meets the eye: Processing of illusory contours in animals. *Journal of Comparative Physiology A*, 188 (4), 249–260.
- Nishida, S. (2011). Advancement of motion psychophysics: Review 2001–2010. *Journal of Vision*, 11 (5), Art. 11.
- Öğmen, H. (2007). A theory of moving form perception: Synergy between masking, perceptual grouping, and motion computation in retinotopic and non-retinotopic representations. *Advances in Cognitive Psychology*, 3 (1-2), 67–84.
- Otsuka, Y., Kanazawa, S. & Yamaguchi, M. K. (2006). Development of modal and amodal completion in infants. *Perception*, 35 (9), 1251–1264.
- Palmer, S. (1999). *Vision science: Photons to phenomenology*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Palmer, S., Brooks, J. L. & Lai, K. S. (2007). The occlusion illusion: Partial modal completion or apparent distance? *Perception*, 36 (5), 650–669.
- Palmer, S. & Rock, I. (1994). Rethinking perceptual organization: The role of uniform connectedness. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1 (1), 29–55.
- Palmer, S. & Schloss, K. B. (2009). Stereoscopic depth and the occlusion illusion. *Attention, Perception & Psychophysics*, 71 (5), 1083–1094.
- Parks, T. E. (1965). Post-retinal visual storage. *The American Journal of Psychology*, 78 (1), 145–147.
- Peirce, C. S. (1935). *Collected papers of Charles Sanders Peirce* (Bde. I–VI; C. Hartshorne & P. Weiß, Hrsg.). Cambridge, MA: Harvard University Press.

- Penrose, L. S. & Penrose, R. (1958). Impossible objects: A special type of visual illusion. *British Journal of Psychology*, 49 (1), 31–33.
- Pessoa, L., Thompson, E. & Noë, A. (1998). Finding out about filling-in: A guide to perceptual completion for visual science and the philosophy of perception. *Behavioral and Brain Sciences*, 21 (6), 723–748.
- Petersik, J. T. & McDill, M. (1981). A new bistable motion illusion based upon ‘kinetic optical occlusion’. *Perception*, 10 (5), 563–572.
- Petter, G. (1956). Nuove ricerche sperimentali sulla totalizzazione percettiva. *Rivista di psicologia*, 50 (3), 213–227.
- Pinna, B. & Grossberg, S. (2005). The watercolor illusion and neon color spreading: A unified analysis of new cases and neural mechanisms. *Journal of the Optical Society of America A*, 22 (10), 2207–2221.
- Plateau, J. (1836). Anorthoskop. *Bulletin de l'Académie de Bruxelles*, III, 7 und 364.
- Ramachandran, V. S., Inada, V. & Kiama, G. (1986). Perception of illusory occlusion in apparent motion. *Vision Research*, 26 (10), 1741–1749.
- Reichardt, W. (1957). Autokorrelations-Auswertung als Funktionsprinzip des Zentralnervensystems (bei der optischen Wahrnehmung eines Insektes). *Zeitschrift für Naturforschung*, 12b (7), 448–457.
- Rensink, R. A. & Enns, J. T. (1998). Early completion of occluded objects. *Vision Research*, 38 (15), 2489–2505.
- Ringach, D. L. & Shapley, R. (1996). Spatial and temporal properties of illusory contours and amodal boundary completion. *Vision Research*, 36 (19), 3037–3050.
- Ritchie, J. B. & Carlson, T. (2010). Mirror, mirror, on the wall, is that even my hand at all? Changes in the afterimage of one's reflection in a mirror in response to bodily movement. *Neuropsychologia*, 48 (5), 1495–1500.
- Rock, I. (1973). *Orientation and form*. New York, NY: Academic Press.
- Rock, I. (1981). Anorthoscopic perception. *Scientific American*, 244 (3), 145–153.
- Rock, I. (1983). *The logic of perception*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Rock, I. (1997). *Indirect perception*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Rock, I. & Ebenholtz, S. (1959). The relational determination of perceived size. *Psychological Review*, 66 (6), 387–401.
- Rock, I. & Halper, F. (1969). Form perception without a retinal image. *The American Journal of Psychology*, 82 (4), 425–440. (Zitiert nach Rock, 1983.)
- Rock, I. & Sigman, E. (1973). Intelligence factors in the perception of form through a moving slit. *Perception*, 2 (3), 357–369.
- Rubin, E. (1958). Figure and ground. In D. C. Beardslee & M. Wertheimer (Hrsg.), *Readings in perception* (S. 194–203). New York, NY: Van Nostrand. (Original: Visuell wahrgenommene Figuren, 1915, Kopenhagen: Gyldenalske Boghandel.)
- Rubin, N. (2001). Figure and ground in the brain. *Nature Neuroscience*, 4 (9), 857–858.
- Scherzer, T. R. & Ekroll, V. (2009). Intermittent occlusion enhances the smoothness of sampled motion. *Journal of Vision*, 9 (10), Art. 16.
- Scherzer, T. R. & Ekroll, V. (2012). Occlusion improves the interpolation of sampled motion. *Vision Research*, 62, 17–25.
- Scholl, B. J. & Pylyshyn, Z. W. (1999). Tracking multiple items through occlusion: Clues to visual objecthood. *Cognitive Psychology*, 38 (2), 259–290.
- Sekuler, A. & Murray, R. (2001). Amodal completion: A case study in grouping. In T. F. Shipley & P. J. Kellman (Hrsg.), *From fragments to objects: Segmentation and grouping in vision* (S. 265–293). Oxford, UK: Elsevier Science.
- Sekuler, A. & Palmer, S. (1992). Perception of partly occluded objects: A microgenetic analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 121 (1), 95–111.

- Sekuler, A., Palmer, S. & Flynn, C. (1994). Local and global processes in visual completion. *Psychological Science*, 5 (5), 260–267.
- Shanahan, M. (2005). Perception as abduction: Turning sensor data into meaningful representation. *Cognitive Science*, 29 (1), 103–134.
- Shimojo, S. & Nakayama, K. (1990). Amodal representation of occluded surfaces: Role of invisible stimuli in apparent motion correspondence. *Perception*, 19 (3), 285–299.
- Shimojo, S., Silverman, G. H. & Nakayama, K. (1989). Occlusion and the solution to the aperture problem for motion. *Vision Research*, 29 (5), 619–626.
- Shipley, T. F. & Kellman, P. J. (1992). Perception of partly occluded objects and illusory figures: Evidence for an identity hypothesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18 (1), 106–120.
- Sigman, E. & Rock, I. (1974). Stroboscopic movement based on perceptual intelligence. *Perception*, 3 (1), 9–28.
- Singh, M. (2004). Modal and amodal completion generate different shapes. *Psychological Science*, 15 (7), 454–459.
- Singh, M. & Hoffmann, D. D. (2012). Natural selection and shape perception: Shape as an effective code for fitness. In S. J. Dickinson & Z. Pizlo (Hrsg.), *Shape perception in human and computer vision: An interdisciplinary perspective*. New York, NY: Springer.
- Smit, A., Gisbergen, J. van & Cools, A. (1987). A parametric analysis of human saccades in different experimental paradigms. *Vision Research*, 27 (10), 1745–1762.
- Sorensen, R. (1999). Seeing intersecting eclipses. *The Journal of Philosophy*, 96 (1), 25–49.
- Sperling, G. (1960). The information available in brief visual presentations. *Psychological Monographs: General and Applied*, 74 (11), 1–29.
- Sperry, R., Miner, N. & Myers, R. (1955). Visual pattern perception following subpial slicing and tantalum wire implantations in the visual cortex. *Comparative and Physiological Psychology*, 48 (1), 463–469.
- Steinman, R. M., Pizlo, Z. & Pizlo, F. J. (2000). Phi is not beta, and why Wertheimer's discovery launched the Gestalt revolution. *Vision Research*, 40 (17), 2257–2264.
- Stern, J. A., Boyer, D. & Schroeder, D. (1994). Blink rate: A possible measure of fatigue. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society*, 36 (2), 285–297.
- Ternus, J. (1926). Experimentelle Untersuchungen über phänomenale Identität. *Psychologische Forschung*, 7, 81–136.
- Titchener, E. B. (1921). *A textbook of psychology*. New York, NY: Macmillan.
- Tse, P. U. (1998). Illusory volumes from conformation. *Perception*, 27 (8), 977–992.
- Tse, P. U. (1999a). Complete mergeability and amodal completion. *Acta Psychologica*, 102 (2), 165–201.
- Tse, P. U. (1999b). Volume completion. *Cognitive Psychology*, 39 (1), 37–68.
- Tse, P. U. & Albert, M. K. (1998). Amodal completion in the absence of image tangent discontinuities. *Perception*, 27 (4), 455–464.
- Uexküll, J. v. (1909). *Umwelt und Innenwelt der Tiere*. Berlin: Springer.
- Uexküll, J. v. (1920). *Theoretische Biologie*. Berlin: Gebrüder Paetel.
- Ullman, S. (1980). *Against direct perception* (A. I. Memo 574). Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, Artificial Intelligence Laboratory.
- van Doorn, A. & Koenderink, J. J. (1982). Temporal properties of the visual detectability of moving spatial white noise. *Experimental Brain Research*, 45 (1), 179–188.
- van Santen, J. P. H. & Sperling, G. (1984). Temporal covariance model of human motion perception. *Journal of the Optical Society of America A*, 1 (5), 451–473.
- van Santen, J. P. H. & Sperling, G. (1985). Elaborated reichardt detectors. *Journal of the Optical Society of America A*, 2 (2), 300–320.

- Varley, P. A. C., Martin, R. R. & Suzuki, H. (2005). Frontal geometry from sketches of engineering objects: Is line labelling necessary? *Computer-Aided Design*, 37 (12), 1285–1307.
- Vezzani, S. (1999). Shrinkage and expansion by amodal completion: A critical review. *Perception*, 28 (8), 935–947.
- Wallach, H. (1935). Über visuell wahrgenommene Bewegungsrichtung. *Psychologische Forschung*, 20, 325–380.
- Wallach, H. & O'Connell, D. N. (1953). The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, 45 (4), 205–217.
- Watanabe, T. & Cavanagh, P. (1991). Texture and motion spreading, the aperture problem, and transparency. *Perception & Psychophysics*, 50 (5), 459–464.
- Watanabe, T. & Cavanagh, P. (1993). Transparent surfaces defined by implicit X junctions. *Vision Research*, 33 (16), 2339–2346.
- Watson, A., Ahumada, A. J. & Farrell, J. E. (1986). Window of visibility: A psychophysical theory of fidelity in time-sampled visual motion displays. *Journal of the Optical Society of America A*, 3 (3), 300–307.
- Weil, R. & Rees, G. (2011). A new taxonomy for perceptual filling-in. *Brain Research Reviews*, 67 (1), 40–55.
- Wertheimer, M. (1912). Experimentelle Studien über das Sehen von Bewegung. *Zeitschrift für Psychologie*, 61, 11–265.
- Wertheimer, M. (1923). Untersuchungen zur Lehre von der Gestalt. II. *Psychologische Forschung*, 4 (1), 301–350.
- Wirth, U. (1998). What is abductive inference? In P. Bouissac (Hrsg.), *Encyclopedia of Semiotics*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Wollschläger, D. (2006). *Dynamic surface completion: The joint formation of color, texture, and shape*. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- Wollschläger, D. & Faul, F. (2006). Dynamic texture spreading: Probing the mechanisms of surface interpolation. *Spatial Vision*, 19 (2), 193–218.
- Yantis, S. (1995). Perceived continuity of occluded visual objects. *Psychological Science*, 6 (3), 182–186.
- Yeshurun, Y. & Levy, L. (2003). Apparent motion is less apparent with attention. *Journal of Vision*, 3 (9), 168.
- Zöllner, F. (1862). Über eine neue Art anorthoskopischer Zerrbilder. *Annalen der Physik*, 193 (11), 477–484.

Anhang A

Simulation mit einem raumzeitlichen Energiemodell

Die Kernidee der von Adelson und Bergen (1985) vorgeschlagenen raumzeitlichen Energiemodelle zur Bewegungsdetektion ist die Summation der Ergebnisse von raumzeitlich orientierten separablen Filtern, die bis auf relative Verschiebungen der räumlichen Zentren ihrer rezeptiven Felder sowie unterschiedliche zeitliche Verzögerungen identisch sind. Als räumliche Impulsantwort dienen Gabor-ähnliche Funktionen, als zeitliche Impulsantwort mehrstufige Tiefpass-Filter mit geringer Inhibition. Weil ein einzelner separabler Filter nicht richtungssensitiv sein kann, ist zur Richtungsdetektion eine Kombination aus mindestens zwei separablen Filtern notwendig, die entsprechend aufeinander abgestimmt sein müssen. Adelson und Bergen (1985, S. 291 f.) schlagen die Kombination von zwei separablen Filterpaaren zur Konstruktion von sog. Quadratur-Paaren vor, die für beide räumlichen Richtungen sensitiv sind. Als räumliche Impulsantwort werden die 2. und 3. Ableitung einer Gauß'schen Normalverteilung vorgeschlagen und als zeitliche Impulsantwort lineare Filter der Form

$$f(t) = (kt)^n \exp(-ktt)[1/n! - (kt)^2/(n+2)!]$$

für $n = 3$ und $n = 5$. Die Produkte je einer räumlichen und einer zeitlichen Impulsantwort ergeben nach Watson et al. (1986) insgesamt vier raumzeitliche Impulsantworten, von denen je zwei geeignet miteinander addiert oder subtrahiert werden, woraus letztlich zwei Paare L, R von je zwei richtungsselektiven Filtern l_1, l_2 bzw. r_1, r_2 entstehen (vgl. Adelson & Bergen, 1985, Abbildung 10, S. 292). Die Filter l_1 und l_2 sind um etwa 90° phasenverschoben und sensitiv für linksgerichtete Bewegung; analog die Filter r_1, r_2 für rechtsgerichtete Bewegung. Die resultierenden Filter L und R werden als Quadratur-Paare bezeichnet, weil sie aus der Quadratsumme der konstituierenden Impulsantworten l_1, l_2 bzw. r_1, r_2 gebildet werden. Durch Differenzbildung der Outputs zweier opponenter Filter L und R kann schließlich die detektierte Netto-Bewegungsrichtung berechnet werden.

In der Simulation der beiden Bedingungen aus Experiment I wurde als Normalverteilung die Standard-Normalverteilung verwendet und die Filter wurden in Raum und Zeit geeignet skaliert, so dass die diskrete Bewegung in der Bedingung mit unverändertem Hintergrund für die Parameter $SD = 235$ ms und $ISI = 329$ ms (Abbildung 3.20a) gut detektiert wurde (Abbildung 3.20d, S. 87). Wie die Abbildung 3.20e zeigt, wurde mit diesen Filtern auch die Bewegung in der Bedingung mit maskiertem ISI-Hintergrund (Abbildung 3.20b) gut detektiert.

Die raumzeitlichen Energiemodelle sind aus funktionaler Sicht nahezu identisch mit elaborierten Reichardt-Detektoren von van Santen und Sperling (1985) und daher in fast allen Situationen gegenseitig austauschbar (Adelson & Bergen, 1985, S. 297 f.). Weil diese Modelle qua Konstruktion keine Vorhersagen über den in den Experimenten I–III beobachteten Glättungseffekt erlauben (vgl. S. 86), ist davon auszugehen, dass es mit Reichardt-ähnlichen Detektor-Modellen generell nicht möglich ist, die Befunde dieser Experimente zu erklären.

Anhang B

Daten

B.1 Ergebnisse des Experiments IV

B.1.1 Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der Messwerte je Vp und Bedingung

Tabelle B.1: Ergebnisse des Experiments IV. Variiert wurde die Darbietungsdauer (SD), die Sprungweite Δx , die hier als Vielfaches der Kantenlänge a des grünen Zielreiz-Quadrates angegeben ist, und der Grad der Verdeckung der Lücke zwischen je zwei aufeinanderfolgenden Positionen des Zielreizes (vgl. Abschnitt 3.3.1). Aufgelistet sind die jeweiligen Antworthäufigkeiten nach Kategorien (K1–K5) und der daraus errechnete gewichtete Mittelwert (MW). Die Spalte „Unimodalität?“ bezieht sich auf die Häufigkeitsverteilung der Antworten (siehe Text).

Vp	Bedingung			MW	Häufigkeiten					Unimodalität?
	SD [ms]	$\Delta x [a]$	Verdeckung		K1	K2	K3	K4	K5	
1	47	2	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
1	47	2	halb	5.0	0	0	0	0	10	ja
1	47	2	-	4.8	0	0	0	2	8	ja
1	47	3	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
1	47	3	halb	4.8	0	0	0	2	8	ja
1	47	3	-	3.4	1	3	0	3	3	nein
1	47	4	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
1	47	4	halb	3.7	0	4	0	1	5	nein
1	47	4	-	1.2	8	2	0	0	0	ja
1	94	2	voll	4.2	0	0	0	8	2	ja
1	94	2	halb	3.8	0	0	2	8	0	ja
1	94	2	-	3.4	0	1	4	5	0	ja
1	94	3	voll	4.2	0	0	0	8	2	ja
1	94	3	halb	3.5	0	0	5	5	0	ja
1	94	3	-	2.7	0	5	3	2	0	ja
1	94	4	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
1	94	4	halb	3.4	0	0	6	4	0	ja
1	94	4	-	1.6	4	6	0	0	0	ja
1	141	2	voll	3.2	0	0	8	2	0	ja
1	141	2	halb	3.2	0	0	8	2	0	ja
1	141	2	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
1	141	3	voll	3.2	0	0	8	2	0	ja
1	141	3	halb	2.8	0	2	8	0	0	ja
1	141	3	-	2.2	0	8	2	0	0	ja
1	141	4	voll	3.7	0	0	3	7	0	ja
1	141	4	halb	2.5	0	5	5	0	0	ja
1	141	4	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
1	188	2	voll	3.2	0	1	6	3	0	ja
1	188	2	halb	2.8	0	3	6	1	0	ja

1	188	2	-	2.4	0	6	4	0	0	ja
1	188	3	voll	2.8	0	2	8	0	0	ja
1	188	3	halb	2.3	0	7	3	0	0	ja
1	188	3	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
1	188	4	voll	3.0	0	1	8	1	0	ja
1	188	4	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
1	188	4	-	1.8	2	8	0	0	0	ja
2	47	2	voll	4.4	0	0	1	4	5	ja
2	47	2	halb	3.8	0	0	2	8	0	ja
2	47	2	-	2.9	2	0	5	3	0	nein
2	47	3	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
2	47	3	halb	3.5	0	0	5	5	0	ja
2	47	3	-	3.2	1	1	3	5	0	ja
2	47	4	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
2	47	4	halb	3.7	0	1	2	6	1	ja
2	47	4	-	3.4	1	0	3	6	0	schwach
2	94	2	voll	4.1	0	0	1	7	2	ja
2	94	2	halb	3.3	0	0	7	3	0	ja
2	94	2	-	1.0	10	0	0	0	0	ja
2	94	3	voll	3.6	1	0	1	8	0	schwach
2	94	3	halb	2.8	2	1	4	3	0	schwach
2	94	3	-	1.2	9	0	1	0	0	schwach
2	94	4	voll	3.3	0	1	5	4	0	ja
2	94	4	halb	2.3	1	5	4	0	0	ja
2	94	4	-	1.0	10	0	0	0	0	ja
2	141	2	voll	2.3	0	7	3	0	0	ja
2	141	2	halb	2.4	0	6	4	0	0	ja
2	141	2	-	1.5	5	5	0	0	0	ja
2	141	3	voll	3.1	0	1	7	2	0	ja
2	141	3	halb	2.1	0	9	1	0	0	ja
2	141	3	-	1.7	4	5	1	0	0	ja
2	141	4	voll	2.7	0	3	7	0	0	ja
2	141	4	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
2	141	4	-	1.7	3	7	0	0	0	ja
2	188	2	voll	2.3	0	7	3	0	0	ja
2	188	2	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
2	188	2	-	1.8	2	8	0	0	0	ja
2	188	3	voll	2.3	0	7	3	0	0	ja
2	188	3	halb	2.1	1	7	2	0	0	ja
2	188	3	-	1.5	5	5	0	0	0	ja
2	188	4	voll	2.7	0	4	5	1	0	ja
2	188	4	halb	2.1	0	9	1	0	0	ja
2	188	4	-	1.7	3	7	0	0	0	ja
3	47	2	voll	4.9	0	0	0	1	9	ja
3	47	2	halb	5.0	0	0	0	0	10	ja
3	47	2	-	4.4	0	0	0	6	4	ja
3	47	3	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
3	47	3	halb	4.6	0	0	1	2	7	ja
3	47	3	-	4.2	0	0	2	4	4	ja
3	47	4	voll	4.7	0	0	0	3	7	ja
3	47	4	halb	4.4	0	0	0	6	4	ja
3	47	4	-	4.4	0	0	0	6	4	ja
3	94	2	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
3	94	2	halb	4.5	0	0	0	5	5	ja
3	94	2	-	3.8	0	0	2	8	0	ja
3	94	3	voll	4.8	0	0	0	2	8	ja
3	94	3	halb	4.3	0	0	0	7	3	ja

3	94	3	-	3.3	0	0	7	3	0	ja
3	94	4	voll	4.9	0	0	0	1	9	ja
3	94	4	halb	4.1	0	0	0	9	1	ja
3	94	4	-	3.1	0	0	9	1	0	ja
3	141	2	voll	4.0	0	0	3	4	3	ja
3	141	2	halb	3.0	0	0	10	0	0	ja
3	141	2	-	2.6	0	4	6	0	0	ja
3	141	3	voll	3.9	0	0	3	5	2	ja
3	141	3	halb	2.5	0	5	5	0	0	ja
3	141	3	-	2.6	0	4	6	0	0	ja
3	141	4	voll	3.9	0	0	2	7	1	ja
3	141	4	halb	2.8	0	2	8	0	0	ja
3	141	4	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
3	188	2	voll	2.6	0	4	6	0	0	ja
3	188	2	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
3	188	2	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
3	188	3	voll	3.0	0	1	8	1	0	ja
3	188	3	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
3	188	3	-	2.2	0	8	2	0	0	ja
3	188	4	voll	2.8	0	2	8	0	0	ja
3	188	4	halb	2.3	0	7	3	0	0	ja
3	188	4	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
4	47	2	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
4	47	2	halb	5.0	0	0	0	0	10	ja
4	47	2	-	4.9	0	0	0	1	9	ja
4	47	3	voll	4.4	0	1	1	1	7	ja
4	47	3	halb	2.8	4	1	1	1	3	nein
4	47	3	-	1.7	8	0	0	1	1	schwach
4	47	4	voll	3.4	2	2	1	0	5	nein
4	47	4	halb	2.0	6	2	0	0	2	nein
4	47	4	-	1.2	8	2	0	0	0	ja
4	94	2	voll	4.4	1	0	0	2	7	schwach
4	94	2	halb	4.2	0	0	2	4	4	ja
4	94	2	-	4.2	0	0	0	8	2	ja
4	94	3	voll	4.4	0	0	1	4	5	ja
4	94	3	halb	3.6	1	1	1	5	2	ja
4	94	3	-	2.2	6	0	0	4	0	nein
4	94	4	voll	4.5	0	0	0	5	5	ja
4	94	4	halb	3.4	1	1	1	7	0	ja
4	94	4	-	1.6	8	0	0	2	0	nein
4	141	2	voll	3.1	0	0	9	1	0	ja
4	141	2	halb	2.4	0	6	4	0	0	ja
4	141	2	-	3.2	1	0	5	4	0	schwach
4	141	3	voll	2.8	0	4	4	2	0	ja
4	141	3	halb	2.3	0	8	1	1	0	ja
4	141	3	-	2.7	1	2	6	1	0	ja
4	141	4	voll	3.2	0	0	8	2	0	ja
4	141	4	halb	2.1	0	9	1	0	0	ja
4	141	4	-	1.6	6	2	2	0	0	ja
4	188	2	voll	2.7	0	3	7	0	0	ja
4	188	2	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
4	188	2	-	2.6	1	2	7	0	0	ja
4	188	3	voll	2.8	0	2	8	0	0	ja
4	188	3	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
4	188	3	-	2.2	3	2	5	0	0	schwach
4	188	4	voll	2.4	0	7	2	1	0	ja
4	188	4	halb	1.9	2	7	1	0	0	ja

4	188	4	-	1.7	5	3	2	0	0	ja
5	47	2	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	47	2	halb	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	47	2	-	4.9	0	0	0	1	9	ja
5	47	3	voll	4.9	0	0	0	1	9	ja
5	47	3	halb	4.8	0	0	0	2	8	ja
5	47	3	-	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	47	4	voll	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	47	4	halb	4.8	0	0	1	0	9	schwach
5	47	4	-	4.7	0	1	0	0	9	schwach
5	94	2	voll	4.8	0	0	0	2	8	ja
5	94	2	halb	4.0	0	0	1	8	1	ja
5	94	2	-	4.0	0	0	1	8	1	ja
5	94	3	voll	4.3	0	0	0	7	3	ja
5	94	3	halb	3.8	0	0	2	8	0	ja
5	94	3	-	3.7	0	1	2	6	1	ja
5	94	4	voll	4.3	0	0	0	7	3	ja
5	94	4	halb	3.7	0	1	1	8	0	ja
5	94	4	-	3.6	0	0	4	6	0	ja
5	141	2	voll	3.2	0	0	8	2	0	ja
5	141	2	halb	2.9	0	3	5	2	0	ja
5	141	2	-	3.0	0	0	10	0	0	ja
5	141	3	voll	3.7	0	0	5	3	2	ja
5	141	3	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
5	141	3	-	2.9	0	2	7	1	0	ja
5	141	4	voll	3.1	0	0	9	1	0	ja
5	141	4	halb	2.5	0	5	5	0	0	ja
5	141	4	-	2.8	0	2	8	0	0	ja
5	188	2	voll	2.9	0	1	9	0	0	ja
5	188	2	halb	2.7	0	3	7	0	0	ja
5	188	2	-	2.8	0	2	8	0	0	ja
5	188	3	voll	2.5	0	5	5	0	0	ja
5	188	3	halb	2.5	0	5	5	0	0	ja
5	188	3	-	2.1	0	9	1	0	0	ja
5	188	4	voll	2.4	0	6	4	0	0	ja
5	188	4	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
5	188	4	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
6	47	2	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
6	47	2	halb	4.5	0	0	1	3	6	ja
6	47	2	-	3.8	0	1	2	5	2	ja
6	47	3	voll	4.5	0	0	1	3	6	ja
6	47	3	halb	3.6	1	1	1	5	2	ja
6	47	3	-	2.8	2	2	3	2	1	ja
6	47	4	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
6	47	4	halb	4.0	0	0	3	4	3	ja
6	47	4	-	2.3	6	0	0	3	1	nein
6	94	2	voll	4.3	0	0	1	5	4	ja
6	94	2	halb	3.4	0	0	6	4	0	ja
6	94	2	-	3.0	0	2	6	2	0	ja
6	94	3	voll	4.1	0	0	1	7	2	ja
6	94	3	halb	3.0	0	1	8	1	0	ja
6	94	3	-	2.1	4	2	3	1	0	schwach
6	94	4	voll	4.1	0	0	1	7	2	ja
6	94	4	halb	2.8	2	2	3	2	1	ja
6	94	4	-	1.8	5	3	1	1	0	ja
6	141	2	voll	3.3	0	1	5	4	0	ja
6	141	2	halb	2.6	0	4	6	0	0	ja

6	141	2	-	2.4	1	4	5	0	0	ja
6	141	3	voll	3.3	1	0	5	3	1	schwach
6	141	3	halb	2.4	0	6	4	0	0	ja
6	141	3	-	2.2	0	8	2	0	0	ja
6	141	4	voll	3.5	0	1	3	6	0	ja
6	141	4	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
6	141	4	-	2.2	2	5	2	1	0	ja
6	188	2	voll	2.7	0	5	3	2	0	ja
6	188	2	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
6	188	2	-	2.4	0	7	2	1	0	ja
6	188	3	voll	2.7	0	3	7	0	0	ja
6	188	3	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
6	188	3	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
6	188	4	voll	2.9	0	3	5	2	0	ja
6	188	4	halb	2.1	1	7	2	0	0	ja
6	188	4	-	2.2	1	6	3	0	0	ja
7	47	2	voll	4.4	0	0	1	4	5	ja
7	47	2	halb	4.4	0	0	0	6	4	ja
7	47	2	-	4.4	0	0	0	6	4	ja
7	47	3	voll	4.6	0	0	0	4	6	ja
7	47	3	halb	4.4	0	0	1	4	5	ja
7	47	3	-	4.6	0	0	0	4	6	ja
7	47	4	voll	4.9	0	0	0	1	9	ja
7	47	4	halb	4.8	0	0	1	0	9	schwach
7	47	4	-	4.9	0	0	0	1	9	ja
7	94	2	voll	3.4	0	1	4	5	0	ja
7	94	2	halb	3.8	0	0	2	8	0	ja
7	94	2	-	3.4	0	0	6	4	0	ja
7	94	3	voll	3.4	0	1	4	5	0	ja
7	94	3	halb	3.2	0	2	5	2	1	ja
7	94	3	-	3.0	1	1	5	3	0	ja
7	94	4	voll	3.9	0	0	1	9	0	ja
7	94	4	halb	3.2	1	1	4	3	1	ja
7	94	4	-	2.7	2	2	3	3	0	ja
7	141	2	voll	2.9	0	1	9	0	0	ja
7	141	2	halb	2.8	0	2	8	0	0	ja
7	141	2	-	2.8	0	2	8	0	0	ja
7	141	3	voll	3.1	0	1	7	2	0	ja
7	141	3	halb	2.9	0	2	7	1	0	ja
7	141	3	-	2.3	1	5	4	0	0	ja
7	141	4	voll	2.8	0	3	6	1	0	ja
7	141	4	halb	2.7	1	3	4	2	0	ja
7	141	4	-	2.6	1	2	7	0	0	ja
7	188	2	voll	2.2	1	6	3	0	0	ja
7	188	2	halb	2.7	1	2	6	1	0	ja
7	188	2	-	2.5	2	1	7	0	0	schwach
7	188	3	voll	2.2	1	6	3	0	0	ja
7	188	3	halb	2.2	2	4	4	0	0	ja
7	188	3	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
7	188	4	voll	2.5	0	5	5	0	0	ja
7	188	4	halb	2.2	0	9	0	1	0	schwach
7	188	4	-	2.2	1	6	3	0	0	ja
8	47	2	voll	4.8	0	0	0	2	8	ja
8	47	2	halb	4.8	0	0	0	2	8	ja
8	47	2	-	4.3	0	0	0	7	3	ja
8	47	3	voll	4.8	0	0	1	0	9	schwach
8	47	3	halb	4.2	0	2	0	2	6	nein

8	47	3	-	4.6	0	0	0	4	6	ja
8	47	4	voll	4.5	1	0	0	1	8	schwach
8	47	4	halb	3.7	1	2	0	3	4	nein
8	47	4	-	4.4	1	0	0	2	7	schwach
8	94	2	voll	4.0	0	0	2	6	2	ja
8	94	2	halb	2.8	0	3	6	1	0	ja
8	94	2	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
8	94	3	voll	3.9	0	0	2	7	1	ja
8	94	3	halb	2.4	0	6	4	0	0	ja
8	94	3	-	2.9	0	1	9	0	0	ja
8	94	4	voll	4.0	0	0	3	4	3	ja
8	94	4	halb	2.5	0	6	3	1	0	ja
8	94	4	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
8	141	2	voll	2.7	0	3	7	0	0	ja
8	141	2	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	141	2	-	2.2	0	8	2	0	0	ja
8	141	3	voll	2.8	0	2	8	0	0	ja
8	141	3	halb	2.1	0	9	1	0	0	ja
8	141	3	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	141	4	voll	3.1	0	4	1	5	0	nein
8	141	4	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	141	4	-	2.1	0	9	1	0	0	ja
8	188	2	voll	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	2	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	2	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	3	voll	2.1	0	9	1	0	0	ja
8	188	3	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	3	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	4	voll	2.3	0	8	1	1	0	ja
8	188	4	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
8	188	4	-	2.0	0	10	0	0	0	ja
9	47	2	voll	4.2	0	0	1	6	3	ja
9	47	2	halb	4.0	0	0	1	8	1	ja
9	47	2	-	3.4	0	0	6	4	0	ja
9	47	3	voll	4.0	0	0	1	8	1	ja
9	47	3	halb	3.0	0	0	10	0	0	ja
9	47	3	-	2.9	0	1	9	0	0	ja
9	47	4	voll	3.5	0	1	4	4	1	ja
9	47	4	halb	2.8	0	3	6	1	0	ja
9	47	4	-	2.8	0	2	8	0	0	ja
9	94	2	voll	3.3	0	0	7	3	0	ja
9	94	2	halb	3.2	0	1	6	3	0	ja
9	94	2	-	1.7	6	1	3	0	0	nein
9	94	3	voll	4.0	0	0	1	8	1	ja
9	94	3	halb	3.2	0	0	8	2	0	ja
9	94	3	-	1.7	6	1	3	0	0	nein
9	94	4	voll	3.6	0	0	4	6	0	ja
9	94	4	halb	2.4	0	6	4	0	0	ja
9	94	4	-	2.4	1	5	3	1	0	ja
9	141	2	voll	2.8	1	1	7	1	0	ja
9	141	2	halb	2.4	1	5	3	1	0	ja
9	141	2	-	1.5	7	1	2	0	0	schwach
9	141	3	voll	3.4	0	1	4	5	0	ja
9	141	3	halb	2.0	1	8	1	0	0	ja
9	141	3	-	1.3	7	3	0	0	0	ja
9	141	4	voll	3.5	0	0	5	5	0	ja
9	141	4	halb	2.0	1	8	1	0	0	ja

9	141	4	-	1.8	5	2	3	0	0	schwach
9	188	2	voll	2.2	0	8	2	0	0	ja
9	188	2	halb	2.2	0	8	2	0	0	ja
9	188	2	-	1.0	10	0	0	0	0	ja
9	188	3	voll	2.5	0	5	5	0	0	ja
9	188	3	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
9	188	3	-	1.4	6	4	0	0	0	ja
9	188	4	voll	2.7	0	3	7	0	0	ja
9	188	4	halb	2.0	0	10	0	0	0	ja
9	188	4	-	1.5	5	5	0	0	0	ja

Jede Sequenz wurde den Versuchspersonen insgesamt zehnmal dargeboten, so dass je Bedingung und Versuchsperson zehn Messwerte vorliegen, die jeweils eine Häufigkeitsverteilung über die vorgegebenen Kategorien K1–K5 bilden (Tabelle B.1). Zur weiteren Analyse und zur besseren Vergleichbarkeit der Daten wurde ein Maß benötigt, das die Verteilungen in geeigneter Weise in Form einer Kennzahl für die wahrgenommene Glattheit/Ruckartigkeit der Bewegung zusammenfasst. Obwohl die Kategorien K1–K5 eine Ordinalskala (1–5) konstituieren, wurde nicht der Modus oder der Median als Maß herangezogen, weil beide aufgrund der groben Einteilung der Kategorien teilweise substantielle Unterschiede unsichtbar werden ließen. Es wurde daher statt dessen für jede Bedingung der mit den Antworthäufigkeiten gewichtete Mittelwert einer Versuchsperson gebildet. Dies ist damit zu rechtfertigen, dass von 324 Häufigkeitsverteilungen (9 Versuchspersonen \times 36 Bedingungen) ein Großteil (290, dies entspricht 90 %) unimodal nach untenstehender Definition ist und man annehmen kann, dass der Mittelwert einer unimodalen Verteilung über die hier vorliegende grobe Ordinalskala eine präzisere Aussage über die Lage der präferierten Kategorie(n) ermöglicht als der Modus oder Median, welche dazu tendieren, feine Unterschiede in den Daten zu nivellieren.

DEFINITION. Die Funktion $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$ heißt unimodal, wenn sie ausgehend von ihrem Maximum $y_{max} := f(x_{max})$ in beide Richtungen monoton fällt, d. h., wenn die beiden folgenden Bedingungen gelten:

$$\forall x \in \mathbb{Z} : x \leq x_{max} - 1 \Rightarrow f(x) \leq f(x + 1)$$

$$\forall x \in \mathbb{Z} : x \geq x_{max} + 1 \Rightarrow f(x) \geq f(x + 1)$$

Hinweis: Es wird keine strenge Monotonie vorausgesetzt, insbesondere ist das Maximum nicht notwendigerweise eindeutig, jedoch sind mehrere Maxima, falls sie vorkommen, stets benachbart.

Ein weniger strenges Kriterium, das eine gewisse Toleranz bezüglich vereinzelter Fehleingaben oder leichten Unsicherheiten der Versuchspersonen besitzt, hier als „schwache Unimodalität“ bezeichnet, erfüllen für den Parameter $d = 1$ sogar 310 der 324 Häufigkeitsverteilungen (96 %).

DEFINITION. Sei $d \in \mathbb{N}_0$. Die Funktion $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$ mit globalem Maximum $y_{max} := f(x_{max})$ heißt schwach unimodal, wenn jedes lokale Maximum $y_{max}^* := f(x_{max}^*)$ um maximal d größer ist als jedes (lokale) Minimum $y_{min}^* := f(x_{min}^*)$, das zwischen x_{max}^* und x_{min}^* liegt, d. h., wenn die folgenden beiden Bedingungen gelten:

$$\forall x_1, x_2 \in \mathbb{Z} : x_1 \leq x_2 \wedge x_2 \leq x_{max} - 1 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2) + d$$

$$\forall x_1, x_2 \in \mathbb{Z} : x_1 \geq x_2 \wedge x_2 \geq x_{max} + 1 \Rightarrow f(x_1) \leq f(x_2) + d$$

Hinweise: Unimodalität ist ein Spezialfall der schwachen Unimodalität mit $d = 0$. Schwach unimodale Verteilungen mit $d > 0$ können gemäß der allgemeinen Sprechweise bi- oder gar multimodal sein, jedoch

für verhältnismäßig kleine d (bezogen auf den Bildbereich von f) außer dem globalen Maximum mit nur schwach ausgeprägten lokalen Maxima.

B.1.2 Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der aggregierten Messwerte je Bedingung

Tabelle B.2: Aggregierte Ergebnisse des Experiments IV. Spalten analog zu Tabelle B.1, wobei die Spalte MW_{MW} die Mittelwerte der neun Vp-Mittelwerte je Bedingung (Spalte „MW“ in Tabelle B.1) enthält und die Ermittlung der Häufigkeiten durch Rundung der neun Vp-Mittelwerte und durch anschließende Zuordnung in die entsprechenden Kategorien erfolgte. Hierdurch kann es zu Abweichungen zwischen den Mittelwertmitteln MW_{MW} und den gewichteten Mittelwerten der aufgeführten Häufigkeitsverteilungen, welche für die Prüfung auf Unimodalität herangezogen wurden, kommen.

Bedingung			MW_{MW}	Häufigkeiten					Unimodalität?
SD [ms]	Δx [a]	Verdeckung		K1	K2	K3	K4	K5	
47	2	voll	4.7	0	0	0	3	6	ja
47	2	halb	4.6	0	0	0	3	6	ja
47	2	-	4.2	0	0	2	4	3	ja
47	3	voll	4.6	0	0	0	2	7	ja
47	3	halb	4.0	0	0	2	4	3	ja
47	3	-	3.6	0	1	4	1	3	nein
47	4	voll	4.5	0	0	1	1	7	ja
47	4	halb	3.8	0	1	1	5	2	ja
47	4	-	3.3	2	1	2	2	2	schwach
94	2	voll	4.2	0	0	2	5	2	ja
94	2	halb	3.7	0	0	4	4	1	ja
94	2	-	3.0	1	1	4	3	0	ja
94	3	voll	4.1	0	0	1	7	1	ja
94	3	halb	3.3	0	1	4	4	0	ja
94	3	-	2.5	1	3	4	1	0	ja
94	4	voll	4.1	0	0	1	5	3	ja
94	4	halb	3.1	0	2	5	2	0	ja
94	4	-	2.3	1	4	3	1	0	ja
141	2	voll	3.1	0	1	7	1	0	ja
141	2	halb	2.6	0	4	5	0	0	ja
141	2	-	2.4	0	4	5	0	0	ja
141	3	voll	3.3	0	0	7	2	0	ja
141	3	halb	2.4	0	6	3	0	0	ja
141	3	-	2.2	1	5	3	0	0	ja
141	4	voll	3.3	0	0	5	4	0	ja
141	4	halb	2.3	0	5	4	0	0	ja
141	4	-	2.2	0	6	3	0	0	ja
188	2	voll	2.5	0	4	5	0	0	ja
188	2	halb	2.3	0	6	3	0	0	ja
188	2	-	2.2	1	5	3	0	0	ja
188	3	voll	2.5	0	3	6	0	0	ja
188	3	halb	2.1	0	8	1	0	0	ja
188	3	-	2.0	1	6	2	0	0	ja
188	4	voll	2.6	0	3	6	0	0	ja
188	4	halb	2.1	0	9	0	0	0	ja
188	4	-	2.0	0	8	1	0	0	ja

Die Tabelle B.2 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen der jeweils neun Vp-Mittelwerte je Bedingung fast durchgängig unimodal sind. Die Aggregation der Daten erfolgte deshalb mit demselben Argument wie in Abschnitt B.1.1 durch Mittelwertbildung.

B.2 Ergebnisse des Experiments V

B.2.1 Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der Messwerte je Vp und Bedingung

Tabelle B.3: Ergebnisse des Experiments V. Spalten analog zu Tabelle B.1, wobei die Spalte „Vorne“ angibt, ob der Zielreiz, der Verdeckter oder keines der beiden Elemente dem Betrachter durch eine größere Querdisparität näher, d. h. vorne erschien. Weil die Bewegungsrichtung des Zielreizes in diesem Experiment vertikal statt horizontal war, wird die Sprungweite mit Δy bezeichnet.

Vp	Bedingung				MW	Häufigkeiten					Unimodalität?
	SD [ms]	Δy [a]	Verdeckung	Vorne		K1	K2	K3	K4	K5	
1	94	2	voll	Verdeckter	4.2	0	0	0	8	2	ja
1	94	2	voll	-	4.5	0	0	0	5	5	ja
1	94	2	voll	Zielreiz	3.8	0	0	3	6	1	ja
1	94	2	halb	Verdeckter	3.0	0	1	8	1	0	ja
1	94	2	halb	-	2.8	0	3	6	1	0	ja
1	94	2	halb	Zielreiz	2.9	0	2	7	1	0	ja
1	94	2	-	-	2.6	2	0	8	0	0	nein
1	94	2	-	Zielreiz	2.6	0	4	6	0	0	ja
1	94	3	voll	Verdeckter	4.4	0	0	0	6	4	ja
1	94	3	voll	-	4.4	0	0	0	6	4	ja
1	94	3	voll	Zielreiz	3.2	0	3	2	5	0	schwach
1	94	3	halb	Verdeckter	2.9	0	3	5	2	0	ja
1	94	3	halb	-	2.6	0	5	4	1	0	ja
1	94	3	halb	Zielreiz	2.3	0	7	3	0	0	ja
1	94	3	-	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
1	94	3	-	Zielreiz	2.1	1	7	2	0	0	ja
1	94	4	voll	Verdeckter	4.4	0	0	0	6	4	ja
1	94	4	voll	-	4.6	0	0	0	4	6	ja
1	94	4	voll	Zielreiz	3.1	0	3	3	4	0	ja
1	94	4	halb	Verdeckter	2.6	0	5	4	1	0	ja
1	94	4	halb	-	1.9	1	9	0	0	0	ja
1	94	4	halb	Zielreiz	2.1	0	9	1	0	0	ja
1	94	4	-	-	2.6	0	6	2	2	0	ja
1	94	4	-	Zielreiz	2.4	0	6	4	0	0	ja
2	94	2	voll	Verdeckter	4.4	0	0	1	4	5	ja
2	94	2	voll	-	4.6	0	0	0	4	6	ja
2	94	2	voll	Zielreiz	4.5	0	0	0	5	5	ja
2	94	2	halb	Verdeckter	4.0	0	0	2	6	2	ja
2	94	2	halb	-	3.8	0	0	3	6	1	ja
2	94	2	halb	Zielreiz	4.0	0	0	1	8	1	ja
2	94	2	-	-	3.6	0	0	4	6	0	ja
2	94	2	-	Zielreiz	3.6	0	0	4	6	0	ja
2	94	3	voll	Verdeckter	4.5	0	0	0	5	5	ja
2	94	3	voll	-	4.2	0	0	0	8	2	ja
2	94	3	voll	Zielreiz	4.1	0	0	0	9	1	ja
2	94	3	halb	Verdeckter	3.1	0	0	9	1	0	ja
2	94	3	halb	-	3.4	0	0	6	4	0	ja
2	94	3	halb	Zielreiz	2.7	0	3	7	0	0	ja
2	94	3	-	-	2.7	0	3	7	0	0	ja
2	94	3	-	Zielreiz	2.4	0	6	4	0	0	ja
2	94	4	voll	Verdeckter	4.6	0	0	0	4	6	ja
2	94	4	voll	-	4.8	0	0	0	2	8	ja
2	94	4	voll	Zielreiz	4.8	0	0	0	2	8	ja
2	94	4	halb	Verdeckter	2.9	0	3	5	2	0	ja
2	94	4	halb	-	2.6	0	4	6	0	0	ja
2	94	4	halb	Zielreiz	2.6	0	5	4	1	0	ja

2	94	4	-	-	2.3	0	7	3	0	0	ja
2	94	4	-	Zielreiz	2.5	1	4	4	1	0	ja
3	94	2	voll	Verdecker	3.9	0	0	2	7	1	ja
3	94	2	voll	-	4.0	0	0	1	8	1	ja
3	94	2	voll	Zielreiz	3.4	0	0	6	4	0	ja
3	94	2	halb	Verdecker	3.0	0	0	10	0	0	ja
3	94	2	halb	-	3.3	0	0	7	3	0	ja
3	94	2	halb	Zielreiz	3.2	0	1	6	3	0	ja
3	94	2	-	-	3.2	0	0	8	2	0	ja
3	94	2	-	Zielreiz	2.9	0	2	7	1	0	ja
3	94	3	voll	Verdecker	4.0	0	0	2	6	2	ja
3	94	3	voll	-	3.8	0	0	2	8	0	ja
3	94	3	voll	Zielreiz	3.6	0	0	4	6	0	ja
3	94	3	halb	Verdecker	3.2	0	0	8	2	0	ja
3	94	3	halb	-	3.0	0	2	6	2	0	ja
3	94	3	halb	Zielreiz	2.4	0	7	2	1	0	ja
3	94	3	-	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
3	94	3	-	Zielreiz	2.1	0	9	1	0	0	ja
3	94	4	voll	Verdecker	4.7	0	0	0	3	7	ja
3	94	4	voll	-	4.2	0	0	2	4	4	ja
3	94	4	voll	Zielreiz	3.1	0	0	9	1	0	ja
3	94	4	halb	Verdecker	2.7	0	3	7	0	0	ja
3	94	4	halb	-	2.4	0	6	4	0	0	ja
3	94	4	halb	Zielreiz	2.6	0	5	4	1	0	ja
3	94	4	-	-	2.3	0	7	3	0	0	ja
3	94	4	-	Zielreiz	2.3	0	7	3	0	0	ja
4	94	2	voll	Verdecker	4.5	0	0	1	3	6	ja
4	94	2	voll	-	4.1	0	0	1	7	2	ja
4	94	2	voll	Zielreiz	3.8	0	0	2	8	0	ja
4	94	2	halb	Verdecker	3.4	0	0	6	4	0	ja
4	94	2	halb	-	3.4	0	0	6	4	0	ja
4	94	2	halb	Zielreiz	3.3	0	0	7	3	0	ja
4	94	2	-	-	2.7	1	3	4	2	0	ja
4	94	2	-	Zielreiz	2.7	0	5	3	2	0	ja
4	94	3	voll	Verdecker	4.2	0	0	1	6	3	ja
4	94	3	voll	-	4.1	0	0	1	7	2	ja
4	94	3	voll	Zielreiz	3.4	0	0	6	4	0	ja
4	94	3	halb	Verdecker	2.8	0	2	6	0	0	ja
4	94	3	halb	-	2.9	0	2	6	1	0	ja
4	94	3	halb	Zielreiz	2.4	0	5	3	0	0	ja
4	94	3	-	-	2.3	0	7	3	0	0	ja
4	94	3	-	Zielreiz	1.7	4	4	1	0	0	ja
4	94	4	voll	Verdecker	4.3	0	0	1	5	4	ja
4	94	4	voll	-	3.9	0	0	3	5	2	ja
4	94	4	voll	Zielreiz	2.6	0	3	5	0	0	ja
4	94	4	halb	Verdecker	-	1	0	1	0	0	-
4	94	4	halb	-	-	0	2	2	0	0	-
4	94	4	halb	Zielreiz	2.7	0	2	4	0	0	ja
4	94	4	-	-	1.8	3	5	1	0	0	ja
4	94	4	-	Zielreiz	1.3	7	3	0	0	0	ja
5	94	2	voll	Verdecker	4.9	0	0	0	1	9	ja
5	94	2	voll	-	4.8	0	0	0	2	8	ja
5	94	2	voll	Zielreiz	4.3	0	0	1	5	4	ja
5	94	2	halb	Verdecker	3.7	0	0	5	3	2	ja
5	94	2	halb	-	3.7	0	1	2	6	1	ja
5	94	2	halb	Zielreiz	3.5	0	2	2	5	1	ja
5	94	2	-	-	1.5	7	2	0	1	0	schwach

5	94	2	-	Zielreiz	1.3	7	3	0	0	0	ja
5	94	3	voll	Verdecker	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	94	3	voll	-	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	94	3	voll	Zielreiz	4.3	0	1	1	2	6	ja
5	94	3	halb	Verdecker	2.7	1	3	4	2	0	ja
5	94	3	halb	-	2.2	3	4	2	0	1	schwach
5	94	3	halb	Zielreiz	2.0	3	5	1	1	0	ja
5	94	3	-	-	1.7	6	1	3	0	0	nein
5	94	3	-	Zielreiz	1.2	8	2	0	0	0	ja
5	94	4	voll	Verdecker	5.0	0	0	0	0	10	ja
5	94	4	voll	-	4.7	0	1	0	0	9	schwach
5	94	4	voll	Zielreiz	4.3	0	1	2	0	7	nein
5	94	4	halb	Verdecker	1.5	5	5	0	0	0	ja
5	94	4	halb	-	1.5	5	5	0	0	0	ja
5	94	4	halb	Zielreiz	1.8	4	5	0	1	0	schwach
5	94	4	-	-	1.3	7	3	0	0	0	ja
5	94	4	-	Zielreiz	1.2	8	2	0	0	0	ja
6	94	2	voll	Verdecker	4.1	0	0	0	9	1	ja
6	94	2	voll	-	4.0	0	0	2	6	2	ja
6	94	2	voll	Zielreiz	3.8	0	0	2	8	0	ja
6	94	2	halb	Verdecker	4.0	0	0	1	8	1	ja
6	94	2	halb	-	3.8	0	1	1	7	1	ja
6	94	2	halb	Zielreiz	3.6	0	0	4	6	0	ja
6	94	2	-	-	3.1	0	1	7	2	0	ja
6	94	2	-	Zielreiz	3.1	0	1	7	2	0	ja
6	94	3	voll	Verdecker	4.3	0	0	0	7	3	ja
6	94	3	voll	-	3.9	0	1	0	8	1	schwach
6	94	3	voll	Zielreiz	3.8	0	0	2	8	0	ja
6	94	3	halb	Verdecker	3.4	0	0	6	4	0	ja
6	94	3	halb	-	3.3	0	2	3	5	0	ja
6	94	3	halb	Zielreiz	3.0	0	1	8	1	0	ja
6	94	3	-	-	3.2	0	1	6	3	0	ja
6	94	3	-	Zielreiz	3.0	0	1	8	1	0	ja
6	94	4	voll	Verdecker	3.8	0	1	0	9	0	schwach
6	94	4	voll	-	4.2	0	0	1	6	3	ja
6	94	4	voll	Zielreiz	3.9	0	0	3	5	2	ja
6	94	4	halb	Verdecker	3.2	0	1	7	1	1	ja
6	94	4	halb	-	3.7	0	0	4	5	1	ja
6	94	4	halb	Zielreiz	2.9	0	3	5	2	0	ja
6	94	4	-	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
6	94	4	-	Zielreiz	2.5	0	5	5	0	0	ja
7	94	2	voll	Verdecker	4.8	0	0	0	2	8	ja
7	94	2	voll	-	4.2	0	0	1	6	3	ja
7	94	2	voll	Zielreiz	3.6	0	0	4	6	0	ja
7	94	2	halb	Verdecker	4.5	0	0	0	5	5	ja
7	94	2	halb	-	4.0	0	0	2	6	2	ja
7	94	2	halb	Zielreiz	3.9	0	0	2	7	1	ja
7	94	2	-	-	3.8	0	1	2	5	2	ja
7	94	2	-	Zielreiz	3.6	0	0	4	6	0	ja
7	94	3	voll	Verdecker	4.8	0	0	1	0	9	schwach
7	94	3	voll	-	4.8	0	0	0	2	8	ja
7	94	3	voll	Zielreiz	4.3	0	0	2	3	5	ja
7	94	3	halb	Verdecker	3.4	0	0	7	2	1	ja
7	94	3	halb	-	3.0	0	3	5	1	1	ja
7	94	3	halb	Zielreiz	2.9	0	3	5	2	0	ja
7	94	3	-	-	3.0	0	2	6	2	0	ja
7	94	3	-	Zielreiz	3.0	0	1	8	1	0	ja

7	94	4	voll	Verdecker	4.7	0	0	1	1	8	ja
7	94	4	voll	-	4.7	0	0	1	1	8	ja
7	94	4	voll	Zielreiz	4.1	0	1	2	2	5	ja
7	94	4	halb	Verdecker	3.3	0	2	4	3	1	ja
7	94	4	halb	-	2.5	0	5	5	0	0	ja
7	94	4	halb	Zielreiz	2.4	0	7	2	1	0	ja
7	94	4	-	-	2.7	0	5	3	2	0	ja
7	94	4	-	Zielreiz	2.2	0	8	2	0	0	ja
8	94	2	voll	Verdecker	3.8	0	0	3	6	1	ja
8	94	2	voll	-	4.0	0	0	1	8	1	ja
8	94	2	voll	Zielreiz	2.1	3	3	4	0	0	ja
8	94	2	halb	Verdecker	3.3	0	0	7	3	0	ja
8	94	2	halb	-	3.1	0	0	9	1	0	ja
8	94	2	halb	Zielreiz	2.4	2	3	4	1	0	ja
8	94	2	-	-	2.3	2	3	5	0	0	ja
8	94	2	-	Zielreiz	1.4	7	2	1	0	0	ja
8	94	3	voll	Verdecker	3.8	0	0	3	6	1	ja
8	94	3	voll	-	3.8	0	0	3	6	1	ja
8	94	3	voll	Zielreiz	2.7	0	3	7	0	0	ja
8	94	3	halb	Verdecker	3.0	0	2	6	2	0	ja
8	94	3	halb	-	2.7	0	4	5	1	0	ja
8	94	3	halb	Zielreiz	2.5	0	5	5	0	0	ja
8	94	3	-	-	2.2	1	6	3	0	0	ja
8	94	3	-	Zielreiz	1.5	6	3	1	0	0	ja
8	94	4	voll	Verdecker	3.8	0	1	2	5	2	ja
8	94	4	voll	-	3.8	0	0	3	6	1	ja
8	94	4	voll	Zielreiz	2.8	0	2	8	0	0	ja
8	94	4	halb	Verdecker	2.5	0	5	5	0	0	ja
8	94	4	halb	-	2.3	0	7	3	0	0	ja
8	94	4	halb	Zielreiz	2.1	0	9	1	0	0	ja
8	94	4	-	-	1.9	2	7	1	0	0	ja
8	94	4	-	Zielreiz	1.6	5	4	1	0	0	ja
9	94	2	voll	Verdecker	4.3	0	0	0	7	3	ja
9	94	2	voll	-	4.5	0	0	0	5	5	ja
9	94	2	voll	Zielreiz	3.1	0	1	7	2	0	ja
9	94	2	halb	Verdecker	3.1	0	0	9	1	0	ja
9	94	2	halb	-	2.9	0	2	7	1	0	ja
9	94	2	halb	Zielreiz	2.5	0	5	5	0	0	ja
9	94	2	-	-	1.9	3	5	2	0	0	ja
9	94	2	-	Zielreiz	1.4	7	2	1	0	0	ja
9	94	3	voll	Verdecker	4.5	0	0	0	5	5	ja
9	94	3	voll	-	4.3	0	0	0	7	3	ja
9	94	3	voll	Zielreiz	3.9	0	0	1	9	0	ja
9	94	3	halb	Verdecker	2.7	0	3	7	0	0	ja
9	94	3	halb	-	2.9	0	3	5	2	0	ja
9	94	3	halb	Zielreiz	1.8	2	8	0	0	0	ja
9	94	3	-	-	1.7	6	1	3	0	0	nein
9	94	3	-	Zielreiz	1.1	9	1	0	0	0	ja
9	94	4	voll	Verdecker	4.9	0	0	0	1	9	ja
9	94	4	voll	-	4.8	0	0	0	2	8	ja
9	94	4	voll	Zielreiz	3.7	0	0	3	7	0	ja
9	94	4	halb	Verdecker	2.3	2	3	5	0	0	ja
9	94	4	halb	-	1.6	5	4	1	0	0	ja
9	94	4	halb	Zielreiz	1.2	8	2	0	0	0	ja
9	94	4	-	-	1.4	7	2	1	0	0	ja
9	94	4	-	Zielreiz	1.3	8	1	1	0	0	ja

Die Tabelle B.3 zeigt die Messwerte des Experiments V analog zur Tabelle B.1, die die Messwerte des Experiments IV zeigt. Mit demselben Unimodalitätsargument wie oben wurden auch hier die Mittelwerte je Versuchsperson und Bedingung gebildet (9 Versuchspersonen \times 24 Bedingungen = 216 Häufigkeitsverteilungen und Mittelwerte). Versuchsperson Nr. 4 gab bei einzelnen Sequenzen das Urteil „Kein Bewegungseindruck“ ab. Die Daten dieser Versuchsperson wurden für zwei Bedingungen, in denen bei zehn Darbietungen weniger als sechsmal Bewegung wahrgenommen wurde, nicht berücksichtigt. Von den somit 214 berücksichtigten Häufigkeitsverteilungen waren 202 unimodal nach obiger Definition (94 %) und sogar 210 Häufigkeitsverteilungen (98 %) erfüllten das Kriterium der schwachen Unimodalität (für den Parameter $d = 1$), so dass die Mittelwertbildung zur Aggregation der Daten zu rechtfertigen sein sollte.

B.2.2 Unimodalität der Häufigkeitsverteilungen der aggregierten Messwerte je Bedingung

Tabelle B.4: Aggregierte Ergebnisse des Experiments V. Spalten analog zu den Tabellen B.2 bzw. B.3.

Bedingung				MW _{MW}	Häufigkeiten					Unimodalität?
SD [ms]	Δy [a]	Verdeckung	Vorne		K1	K2	K3	K4	K5	
94	2	voll	Verdecker	4.3	0	0	0	6	3	ja
94	2	voll	-	4.3	0	0	0	5	4	ja
94	2	voll	Zielreiz	3.6	0	1	2	5	1	ja
94	2	halb	Verdecker	3.6	0	0	5	3	1	ja
94	2	halb	-	3.4	0	0	5	4	0	ja
94	2	halb	Zielreiz	3.3	0	1	4	4	0	ja
94	2	-	-	2.7	0	3	4	2	0	ja
94	2	-	Zielreiz	2.5	3	0	4	2	0	nein
94	3	voll	Verdecker	4.4	0	0	0	5	4	ja
94	3	voll	-	4.3	0	0	0	7	2	ja
94	3	voll	Zielreiz	3.7	0	0	3	6	0	ja
94	3	halb	Verdecker	3.0	0	0	9	0	0	ja
94	3	halb	-	2.9	0	1	8	0	0	ja
94	3	halb	Zielreiz	2.4	0	5	4	0	0	ja
94	3	-	-	2.4	0	4	5	0	0	ja
94	3	-	Zielreiz	2.0	2	5	2	0	0	ja
94	4	voll	Verdecker	4.5	0	0	0	4	5	ja
94	4	voll	-	4.4	0	0	0	4	5	ja
94	4	voll	Zielreiz	3.6	0	0	4	4	1	ja
94	4	halb	Verdecker	2.6	0	2	6	0	0	ja
94	4	halb	-	2.3	0	5	2	1	0	ja
94	4	halb	Zielreiz	2.3	1	4	4	0	0	ja
94	4	-	-	2.1	2	4	3	0	0	ja
94	4	-	Zielreiz	1.9	3	4	2	0	0	ja

Die Tabelle B.4 zeigt, dass die Häufigkeitsverteilungen der jeweils neun (bzw. acht) Vp-Mittelwerte in 23 von 24 Bedingungen unimodal sind. Die Aggregation der Daten erfolgte deshalb mit demselben Argument wie in den vorigen Abschnitten durch Mittelwertbildung.

Anhang C

Zusammenfassung

Eine erstaunliche Leistung des Wahrnehmungssystems besteht darin, trotz fragmentierter und unvollständiger sensorischer Informationen im proximalen Reiz, beispielsweise aufgrund von Verdeckung, stabile und vollständige Perzepte hervorzubringen. Die Wahrnehmung von Verdeckung kann hierbei sog. amodale Ergänzungen und Vervollständigungen von Objekten hervorrufen und die Interpretation einer Szene dadurch erheblich beeinflussen. Im Gegensatz zu amodalen Vervollständigungen verdeckter Objekte und Objektbereiche werden perzeptuelle Vervollständigungen unverdeckter Objekte und Objektbereiche als modal bezeichnet.

Die Arbeit beginnt mit einer theoretischen Analyse der Dichotomie von modalen und amodalen Vervollständigungen, die sich auf phänomenologische Beobachtungen und vorliegende empirische Befunde stützt. Dabei wird gezeigt, dass diese traditionelle Dichotomie nicht nur unvollständig, sondern auch inkonsistent ist. Das Kriterium der phänomenalen Präsenz, durch die sich modale und amodale Perzepte qualitativ voneinander unterscheiden sollen, erscheint aus theoretischer Sicht willkürlich und aus phänomenologischer Sicht ungerechtfertigt und daher insgesamt fragwürdig. Die dichotome Unterscheidung zwischen modalen und amodalen Perzepten ist außerdem häufig mit der impliziten Annahme verknüpft, modale Perzepte repräsentieren geometrisch-optische Sichtbarkeit und amodale Perzepte geometrisch-optische Unsichtbarkeit aufgrund von Verdeckung. Diese Annahme einer direkten Kopplung von phänomenaler Sichtbarkeit/Verdeckung an geometrisch-optische Sichtbarkeit/Verdeckung erweist sich jedoch unter empirischen Gesichtspunkten als fragwürdig, da einerseits auch bei phänomenaler Verdeckung modale Attribute wahrgenommen und sogar in ihrer Ausprägung beeinflusst werden können, andererseits wiederum auch unverdeckte Figuren einen amodalen Charakter besitzen können.

Anknüpfend an diese theoretischen Überlegungen wird die Unangemessenheit der klassischen Dichotomie von modalen und amodalen Wahrnehmung und insbesondere die damit verbundene direkte Kopplung von phänomenaler an geometrisch-optische Sichtbarkeit/Verdeckung in mehreren empirischen Untersuchungen aufgezeigt. Der experimentelle Fokus liegt hierbei exemplarisch auf dem Nachweis des Einflusses von perzeptueller Verdeckung auf zwei explizit modale Aspekte der Wahrnehmung, nämlich auf die wahrgenommene Glattheit von Scheinbewegung und auf die phänomenale Sichtbarkeit von Objektflächen bei Verdeckung.

In fünf Experimenten zum sog. Glättungseffekt wird nachgewiesen, dass die wahrgenommene Glattheit von ansonsten ruckartiger Scheinbewegung verbessert werden kann, wenn die räumlichen und ggf. auch zeitlichen Lücken in diskreten Bewegungsreizen durch geeignete Verdeckungshinweise maskiert werden. Der Effekt lässt sich erklären, wenn man annimmt, dass die ansonsten unerklärlichen Lücken im Reiz, die die Bewegungswahrnehmung beeinträchtigen, ganz oder teilweise kompensiert werden können, wenn diese vom visuellen System ursächlich auf Verdeckung zurückgeführt und somit plausibel „erklärt“ werden können. Diese Erklärung greift konstruktivistische Theorievorstellungen auf, wonach Wahrnehmung intelligentem Problemlösen ähnelt (Rock, 1983, 1997) und auf abduktiven Inferenzprozessen basiert (Mausfeld, 2011a).

In zwei weiteren Experimenten wird das sog. Sichtbarkeitsparadoxon nachgewiesen und seine Ausprägung quantifiziert. Das Paradoxon besteht darin, dass Teile der verdeckten Bereiche eines partiell verdeckten Objekts trotz deutlich erkennbarer Verdeckung gleichzeitig phänomenal sichtbar erscheinen. Dieser vermeintliche Widerspruch lässt sich auflösen, wenn man die klassische Annahme einer direkten Kopplung von phänomenaler Sichtbarkeit an geometrisch-optische Sichtbarkeit aufgibt und statt dessen die phänomenale Sichtbarkeit eines perzeptuellen Attributs (wie Form, Kontur, Oberflächenfarbe) als Repräsentation der Schlüssigkeit und Klarheit der sensorischen Hinweise für eine spezifische perzeptuelle Deutung hinsichtlich dieses Attributs auffasst, also als eine Art Maß für die Verlässlichkeit der Deutung. Aus dieser Perspektive lassen sich auch andere vermeintlich paradoxe Beobachtungen wie beispielsweise der amodale Charakter der verdeckten Bewegung beim Tunneleffekt (Burke, 1952) oder die partiell modale Ergänzung bei der Verdeckungstäuschung (Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007) in konsistenter Weise erklären. Die beschriebene Perspektive ist zwar zum jetzigen Zeitpunkt empirisch nur schwach gestützt, bietet aber eine vielversprechende Grundlage für weitere empirische Forschungen zur Bedeutung modaler und amodaler Perzepte.

Zusammenfassend stellen die Ergebnisse dieser Arbeit die traditionelle Vorstellung über modale und amodale Perzepte, die eng an geometrisch-optische Sichtbarkeit/Verdeckung geknüpft ist, in Frage. Die vorgeschlagene alternative Perspektive, die die Bedeutung dieser Konzepte für die abduktiven Inferenzprozesse in der Wahrnehmung hervorhebt, steht mit den experimentellen Befunden dieser Arbeit in Einklang. Eine gründlichere Prüfung, inwieweit bestehende Hypothesen und Erklärungen für Vervollständigungsphänomene mit den neugewonnenen Erkenntnissen verträglich sind, erscheint deshalb lohnenswert.

Anhang D

English Abstract

One of the most intriguing characteristics of the perceptual system is that it is able to produce stable, continuous, and complete percepts even if the sensory information available in the proximal stimulus is fragmented or incomplete, for instance due to occlusion. The perception of occlusion can provoke so-called amodal completion of objects, which may influence the interpretation of a scene substantially. In contradistinction to amodal completions, perceptual completions of non-occluded objects and object regions are termed modal.

This dissertation begins with a theoretical analysis of the dichotomy of modal and amodal completion that draws on phenomenological observations and existing empirical findings. It is shown that the traditional dichotomy is both incomplete and inconsistent. In addition, it is argued that the claim that phenomenal presence can be used as a criterion to distinguish between modal and amodal percepts is theoretically ad-hoc and inconsistent with phenomenology and therefore highly questionable. A further issue is that the dichotomous distinction between modal and amodal percepts is often linked with the implicit assumption that modal percepts represent geometric-optical visibility, whereas amodal percepts represent geometric-optical invisibility due to occlusion. There are, however, two empirical findings that speak against this assumption of a direct coupling of phenomenal visibility/occlusion and geometric-optical visibility/occlusion: First, modal aspects of the percept are not only available in the case of direct visibility but may also be present under phenomenal occlusion. Moreover, the modal characteristics of a percept may even be influenced by occlusion cues. Second, amodal characteristics of a percept do not only occur in the case of occlusion. Instead, the perceptual presence of non-occluded figures may, under appropriate conditions, also have an amodal character, even though the figures are phenomenally clearly visible.

Based on these theoretical considerations, several experiments were conducted with the aim to provide direct empirical evidence for the claim that the classical dichotomy of modal and amodal perception is inadequate, including the aforementioned “coupling assumption” of phenomenal and geometric-optical visibility/occlusion, which is often associated with the classical dichotomy. These experiments investigate the effect of perceptual occlusion on two explicitly modal aspects of perception, namely on the perceived smoothness of apparent motion and on the phenomenal visibility of object surfaces under occlusion.

In a series of five experiments on the so-called smoothing effect it is shown that the perceived smoothness of apparent motion can be considerably improved when the spatial gaps (and temporal gaps, if applicable) in discrete motion stimuli are masked with appropriate occlusion cues. The effect can be explained if one assumes that the—otherwise inexplicable—gaps in the stimulus, which typically impair the perception of motion, are (partly) compensated whenever the visual system can “explain” the gaps in a plausible manner by attributing them to an external occluder rather than to the moving object itself. This explanation ties in with theoretical ideas of constructivists claiming that perception is a process similar to intelligent problem solving (Rock, 1983, 1997) and that it is based on abductive inferences

(Mausfeld, 2011a).

In two further experiments the existence of the so-called visibility paradox is rigorously demonstrated and the strength of the paradoxical effect is quantified. The paradox consists of the observation that portions of a partially occluded object are, at the same time, perceived as occluded and as phenomenally visible. This seeming contradiction may be resolved if one gives up the classical assumption of a direct coupling of phenomenal visibility and geometric-optical visibility. Instead, one might conceive of the phenomenal visibility of a particular attribute (such as shape, contour, surface color) as a representation of the conclusiveness of the sensory evidence underlying perceptual inferences regarding this attribute, i. e., as reflecting the reliability of the perceptual construction. From this perspective a number of other seemingly paradoxical observations can also be explained in a consistent manner, e. g., the amodal character of hidden movement reported in Burke's (1952) study on the tunnel effect and the partial modal completion observed in the occlusion illusion (Kanizsa, 1979; Palmer et al., 2007). Admittedly, this perspective has currently only weak empirical support, but it seems to provide a promising basis for future empirical research on the meaning of modal and amodal percepts.

In summary, the results of this dissertation challenge the traditional conception of modal and amodal percepts, which is closely tied to geometric-optical visibility/occlusion. The proposed alternative view that emphasizes the role of these concepts in abductive inferences seems to be in line with the results of the experiments reported in this work. Therefore it seems worthwhile to scrutinize in a more comprehensive way to what extent existing hypotheses and explanations of completion phenomena are compatible with the findings presented here.

Erklärung

Hiermit erkläre ich, Tom R. Scherzer, dass die vorliegende Dissertation, abgesehen von der Beratung meiner Betreuer Prof. Dr. Rainer Mausfeld, Dr. habil. Vebjörn Ekroll und Dr. Franz Faul, in Inhalt und Form meine eigene Arbeit ist und unter Einhaltung der Regeln guter wissenschaftlicher Praxis der Deutschen Forschungsgemeinschaft entstanden ist. Diese Arbeit war bisher weder teilweise noch ganz Gegenstand eines Prüfungsverfahrens. Die in dieser Arbeit berichteten Daten wurden bereits veröffentlicht oder sind zur Veröffentlichung eingereicht. Die Programmierung, Durchführung und Auswertung der zugrunde liegenden Experimente lag ausschließlich, die Planung der Experimente und die Abfassung der zugehörigen Artikel weitgehend in meiner Verantwortung:¹

- Scherzer, T. R. & Ekroll, V. (2009). Intermittent occlusion enhances the smoothness of sampled motion. *Journal of Vision*, 9 (10), Art. 16.
- Scherzer, T. R. & Ekroll, V. (2012). Occlusion improves the interpolation of sampled motion. *Vision Research*, 62, 17–25.
- Scherzer, T. R. & Ekroll, V. (2014). Partial modal completion under occlusion: What do modal and amodal percepts represent? *Eingereicht zur Veröffentlichung beim Journal of Vision am 26. März 2014, zur Zeit im Review-Prozess.*

(Tom R. Scherzer)

¹Ausnahme: Die Durchführung des Experiments IV erfolgte durch eine wissenschaftliche Hilfskraft.