

PSYCHOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR GLANZWAHRNEHMUNG

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Philosophischen Fakultät
der Christian-Albrechts-Universität
zu Kiel

vorgelegt von

Gunnar Wendt

Kiel
2009

Erstgutachter: Prof. Dr. Rainer Mausfeld

Zweitgutachter: PD Dr. Johannes Andres

Tag der Mündlichen Prüfung: 29.01.2010

Durch den zweiten Prodekan, Prof. Dr. Rainer Zaiser
zum Druck genehmigt am: 15.02.2010

Demnach hat der Verstand die objektive Welt erst selbst zu schaffen: nicht aber kann sie, schon vorher fertig, durch die Sinne und die Oeffnungen ihrer Organe, bloß in den Kopf hineinspazieren. Die Sinne nämlich liefern nichts weiter, als den rohen Stoff, welchen allererst der Verstand [...] in die objektive Auffassung einer gesetzmäßig geregelten Körperwelt umarbeitet. (Schopenhauer)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	7
2 Theoretischer Teil	13
2.1 Zur Phänomenologie von Glanz	15
2.2 Physikalische Glanzcharakteristika	17
2.3 Verhältnis von physikalischen zu perzeptuellen Glanzgrößen	20
2.4 Hinweisreize für Glanz	28
2.4.1 Monokulare Hinweisreize	28
2.4.2 Binokulare Hinweisreize	40
2.5 Fragestellungen	54
3 Experimente	57
3.1 Experimentalreihe I	57
3.1.1 Reizmuster	59
3.1.2 Experiment 1: Der Einfluss von binokularen Hinweisreizen auf die Authentizität und Stärke des Glanzeindrucks	63
3.1.3 Experiment 2: Der Einfluss von binokularen Hinweisreizen auf die wahrgenommene Glanzstärke	68
3.2 Experimentalreihe II	73
3.2.1 Reizmuster	79
3.2.2 Experiment 1: Das Erkennen der Reflexionseigenschaft einer Oberfläche unter wechselnden 3D-Formen	82
3.2.3 Experiment 2: Der Einfluss von zwei weiteren potentiellen Hinweisreizen auf die Glanzkonstanzeistung	91
3.2.4 Experiment 3: Der Beitrag von Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanz I	98
3.2.5 Experiment 4: Der Beitrag von Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanz II	107
3.2.6 Experiment 5: Der Beitrag von binokularen Hinweisreizen zur Glanzkonstanz	112
3.2.7 Experiment 6: Der Beitrag von binokularen und bewegungsinduzierten Informationen zur Glanzkonstanz	119
3.2.8 Experiment 7: Der Beitrag von Farbinformationen zur Glanzkonstanz	129
3.3 Simulationen	138
3.3.1 Simulation zur Bedeutung von Bildstatistiken bei der Glanzkonstanz I	141
3.3.2 Simulation zur Bedeutung von Bildstatistiken bei der Glanzkonstanz II	146
4 Zusammenfassung und allgemeine Diskussion	151

5 Literatur	159
A Danksagung	167
B Lebenslauf (Curriculum Vitae)	169

Kapitel 1

Einführung

Wann immer im Alltagsgebrauch von Glanz die Rede ist, besteht im Allgemeinen die Auffassung, dass hiermit nichts anderes als eine physikalische Eigenschaft von Oberflächen gemeint sein kann. Glanz wird gemeinhin assoziiert mit dem Grad der Glätte, oder der feinstrukturellen Ebenheit einer Objektoberfläche und es führt nicht selten zu einer aufrichtigen Verwunderung, wenn sich ein Psychologe eines solchen Themas annimmt, das doch seinen rechtmäßigen Platz in der Physik haben sollte. Nun könnte man sagen, dass die ganze Verwirrung auf ein terminologisches Problem zurückgeht: Der Physiker fasst unter dem Begriff Glanz eben etwas anderes auf, wie z.B. eine Oberflächenbeschaffenheit von Objekten, die dazu führt, dass auf diese Oberfläche einfallendes Licht in einer charakteristischen Weise reflektiert wird. Der Psychologe hingegen meint mit demselben Begriff einen bestimmten Wahrnehmungseindruck. Im Grunde aber, so könnte man meinen, sprechen beide von demselben Phänomen, betonen nur jeweils einen anderen Aspekt desselben. Denn ein Glanzeindruck komme eben dadurch zustande, dass auf physikalischer Seite ein glänzendes (eine glatte Oberfläche aufweisendes) Objekt vorliege – das, was sich als Glanzeindruck in unserem Bewusstsein widerspiegeln, sei eben nichts anderes, als exakt diese physikalische Beschaffenheit des Objekts¹.

Betrachtet man das Verhältnis zwischen diesen beiden Perspektiven jedoch näher, so stellt sich schnell heraus, dass die physikalischen Glanzeigenschaften weder hinreichend noch notwendig zur Auslösung eines Glanzeindrucks sind. Wäre ein besonderes Reflexionsverhalten von Oberflächen eine notwendige Voraussetzung für ein Glanzperzept, so müsste man sich doch wundern, warum ein Glanzeindruck z.B. auf einem Bildschirm erzeugt werden kann, der doch selbst in erster Linie Licht emittiert. Auch dürfte es Malern kaum möglich sein, auf ihren Bildern den Eindruck von glänzenden Materialien wie Metallocberflächen, Glas, Wasser oder glatten Fruchtschalen herzustellen, da die von ihnen verwendeten Farbpigmente das einfallende Licht gewöhnlich stark zerstreut zurückstrahlen (wie Abb. 1.1 zeigt, gelingt es Malern aber offenbar sehr gut, verschiedene Materialqualitäten nachzuempfinden, vgl. Kirschmann, 1892). Umgekehrt muss das Vorliegen eines Körpers mit glatter Oberfläche nicht zwangsläufig zu einem Glanzeindruck führen. Wählt man beispielsweise ein diffuses Raumlicht als Beleuchtung, so wird selbst eine hoch polierte Chromkugel die Erscheinung eines matten Tischtennisballs annehmen (s. z.B. Sève, 1993; Fleming, Dror & Adelson, 2003; oder Pont & te Pas, 2006).

¹ Man beachte z.B. auch die Wandlung der Definition von ‚Glanz‘, wie sie im „International Lighting Vocabulary“ der CIE gegeben wird. Hier fiel anfangs noch das Hauptgewicht auf die physikalische Seite, wobei ‚Glanz‘ definiert wurde als „*the directionally selective reflecting properties responsible for the degree to which reflected highlights or the images of objects may be seen as superimposed on the surface*“ (CIE, 1971, S. 81). Erst später wurde dem perzeptuellen Aspekt stärker Rechnung getragen, wenn es in der 4. Auflage heißt: „*Gloss (of a surface) [is] the mode of appearance by which reflected highlights or objects are perceived as superimposed on the surface due to the directionally selective properties of that surface.*“ (CIE, 1987, S. 125; s. auch Billmeyer & O’Donnell, 1987, S. 316; sowie Christie, 1986 und Sève, 1993).



Abbildung 1.1: Dieses Stillleben von Pieter Cleasz (1625) enthält einige Bildstellen, die den Eindruck bestimmter Materialarten beim Betrachter erzeugen. So scheint beispielsweise die Kugel weite Bereiche der Umgebung zu spiegeln. Auch erscheinen die Intensitätsflecken auf dem Trinkglas, sowie innerhalb des Uhrendeckels nicht als bloße Luminanztexturen, sondern werden als direkte Lichtreflexionen auf einer glänzenden Oberfläche erlebt [Verwendung des Bildmotivs mit freundlicher Genehmigung des Germanischen Nationalmuseums Nürnberg].

Wenn nun aber zwischen dem, was auf physikalischer Seite als Glanzcharakteristikum verstandenen wird und der Wahrnehmung von Glanz offenbar keine deterministische Beziehung besteht, so muss man sich fragen, was denn nun die eigentlichen relevanten Bedingungen sind, die dazu führen, dass in unserer Wahrnehmung der Eindruck eines glänzenden Objekts entsteht. Um dieses Problem etwas verständlicher zu machen, lohnt es sich, zunächst näher zu betrachten, welche Art von Informationen dem visuellen System, also dem Teil unserer kognitiven Struktur, der für die visuelle Informationsverarbeitung verantwortlich ist, überhaupt zur Verfügung stehen, um darauf aufbauend die Vorstellung von einer Außenwelt zu erzeugen.

Der Augenschein legt uns nahe, dass das, was sich in unserem Bewusstsein als phänomenale Welt präsentiert, ein getreues Ebenbild dessen ist, was sich tatsächlich in der Außenwelt befindet: „*Die Flamme nennen wir heiß und hell, den Schnee weiß und kalt, das Manna weiß und süß, nach den Ideen, die sie in uns hervorbringen; Eigenschaften, die nach der gewöhnlichen Denkweise in den Körpern ebenso beschaffen sind, wie ihre Ideen in uns, die einen das vollkommene Ebenbild der andern wie in einem Spiegel; und die meisten Menschen würden es für höchst ungereimt halten, wenn jemand etwas anderes behaupten sollte.*“ (Locke, 1897, S. 145). Nun hat unser visuelles System aber keinen unmittelbaren Zugriff auf die distale, mit physikalischen Objekten angereicherte Welt. Was unserem visuellen System stattdessen als Ausgangsinformation zur Verfügung steht, ist der proximale Reiz, also das zweidimensionale Erregungssprofil der mit Millionen von lichtempfindlichen Rezeptoren besetzten Netzhaut.

Der Wahrnehmungseindruck, der sich in unserem Bewusstsein einstellt und der uns die Vorstellung von einer ‚objektiven‘ Außenwelt vermittelt, ist demnach kein Abbild der ‚physikalischen Realität‘, sondern das Ergebnis eines doppelten Übersetzungsprozesses (s. Abb. 1.2): Ausgehend

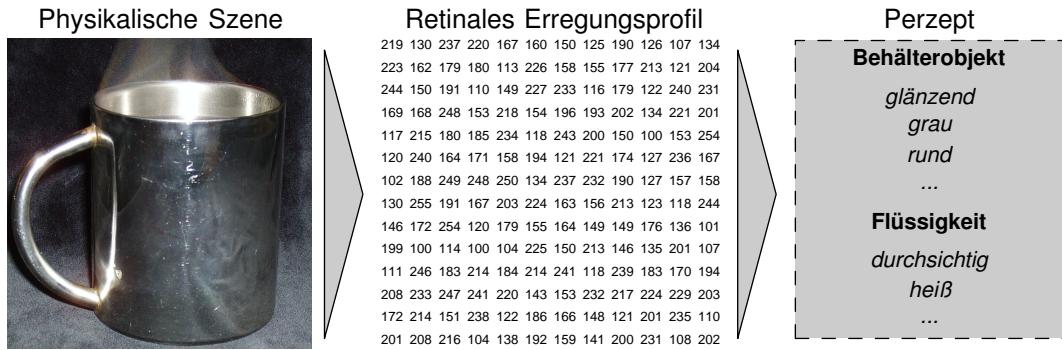


Abbildung 1.2: Wahrnehmung als „doppelter Übersetzungsprozess“. Ausgehend von einer physikalischen Szene werden im ersten Schritt die Rezeptoren der Netzhaut durch die physikalische Reizenergie erregt. Dieses retinale Erregungsprofil stellt das Ausgangssignal für die weitere Verarbeitung im visuellen System dar, dessen Ergebnis in dem Perzept besteht – ein internes, mit Qualiastrukturen verbundenes Bedeutungsobjekt.

vom physikalischen Reiz, der bezogen auf die visuelle Wahrnehmung aus einem raum-zeitlichen Energiemuster elektromagnetischer Strahlung besteht, werden im ersten Schritt die lichtempfindlichen Rezeptoren auf unserer Netzhaut angeregt. An der Retina erfolgt die Transduktion dieser physikalischen Reizenergie in neuronale Signale, die die Ausgangsinformationen für die weitere Verarbeitung im visuellen System darstellen. Dieser erste Übersetzungsschritt von physikalischer Reizenergie in neuronale Signale bringt es mit sich, dass aufgrund des in der Regel geringeren Informationsgehalts des sensorischen Codes eine eindeutige Rückübersetzung in sein physikalisches Urbild im Allgemeinen unmöglich ist. So ist beispielsweise die spektrale Energieverteilung eines Lichtes, das auf einer frühen sensorischen Ebene durch das Erregungstripel der Zapfen repräsentiert ist und uns im weiteren Verlauf auf der psychologischen Ebene als Farbeindruck bewusst gemacht wird, nicht mehr rekonstruierbar; dasselbe Erregungsmuster der drei Farbrezeptoren kann von einer ganzen Klasse von Lichtern herrühren („Metameriekategorie“). Ebenso ist jedes zweidimensionale retinale Erregungsprofil verträglich mit unterschiedlichen Entstehungsgeschichten auf distaler Ebene, so dass der proximale Reiz bezüglich seiner Ursache immer mehrdeutig ist (s. z.B. Hoffman, 2003). Der sensorische Code kann damit nicht als ein eindeutiger Repräsentant der physikalischen Eigenschaften eines ihn hervorrufenden distalen Objekts angesehen werden, sondern vielmehr als ein „Zeichen“², das wiederum auf psychologischer, perzeptueller Ebene einen Übersetzungs-, oder besser: einen Initiierungsprozess einleitet. Auf dieser perzeptuellen-kognitiven Ebene finden wir erst die Grundbausteine, aus denen sich unsere empirische Wirklichkeit zusammensetzt. Diese Grundbausteine lassen sich abstrakt als interne Bedeutungskategorien auffassen (Mausfeld, 2002; Mausfeld, 2005), die das interne Vokabular ausmachen und somit gewissermaßen das Medium bilden, innerhalb dessen Denken und Wahrnehmen geschieht.

Dabei wäre es ein Fehler anzunehmen, dass diese internen Bedeutungseinheiten gleichzusetzen wären mit den Kategorien, die innerhalb physikalischer Theorien zur Beschreibung der Außenwelt dienen. So nehmen wir beispielsweise kein aus einer bestimmten Massendichte be-

²Vergleiche hierzu die Zeichentheorie nach Helmholtz (1959, S. 18): „Insofern die Qualität unserer Empfindung uns von der Eigenthümlichkeit der äusseren Einwirkung, durch welche sie erregt ist, eine Nachricht giebt, kann sie als ein Zeichen derselben gelten, aber nicht als ein Abbild. Denn vom Bilde verlangt man irgend eine Art der Gleichheit mit dem abgebildeten Gegenstände [...] J. Ein Zeichen aber braucht gar keine Art der Aehnlichkeit mit dem zu haben, dessen Zeichen es ist. Die Beziehung zwischen beiden beschränkt sich darauf, dass das gleiche Object, unter gleichen Umständen zur Einwirkung kommend, das gleiche Zeichen hervorruft, und dass also ungleiche Zeichen immer ungleicher Einwirkung entsprechen.“

stehendes, sich geometrisch im Raum von einer Substanz einer anderen Dichte abgrenzendes Atomkonglomerat wahr, das einfallende elektromagnetische Strahlung in einer veränderten Wellenlängenzusammensetzung in den Raum zurückstrahlt, innerhalb dessen wiederum eine aufgrund thermodynamischer Prinzipien in Schwingung versetzte Substanz in einen anderen Aggregatzustand überwechselt, sondern eine silbern-metallische Tasse mit dampfendem Pfefferminztee, die man in die Hand nehmen und deren Inhalt man trinken kann. Die Funktion des ‚Atomkonglomerats‘ als Behälter für Flüssigkeiten und die Trinkbarkeit des Inhalts sind eben keine Eigenschaften, die das physikalische Objekt per se aufweist. Und ebenso wenig stecken diese Eigenschaften in dem zweidimensionalen Intensitätsprofil der Netzhaut, die ja im visuellen Bereich die eigentliche Kontaktstelle zur physikalischen Außenwelt darstellt. Tatsächlich besteht die Aufgabe des Wahrnehmungssystems nicht darin, ein veridikales Bild von der physikalischen Welt zu zeichnen, d.h. physikalische Größen zu messen (vgl. die ‚*measurement device misconception of perception*‘ in Mausfeld, 2002). Für eine solche Leistung wäre im Allgemeinen schon die zur Verfügung stehende Ausgangsinformation (in Form des proximalen Reizes) nicht ausreichend. Das, was das Wahrnehmungssystem stattdessen leistet, ist, den Organismus über für ihn relevante Aspekte der Außenwelt zu informieren, wobei die so gewonnene Information erst innerhalb des Systems seiner internen Konzepte verwertbar ist, die gewissermaßen das ureigene Datenformat des Organismus darstellen, auf dem kognitive Operationen ablaufen³.

Bezogen auf die Metapher des doppelten Übersetzungsprozesses stellt sich damit aber die Frage, wie aus dem zweidimensionalen Erregungsprofil der Netzhaut interne Bedeutungskategorien hervorgehen. Um auf das obige Beispiel zurückzukommen: Wie entsteht in unserem Bewusstsein die Vorstellung von einer glänzenden Metalltasse, die eine heiße, dampfende Flüssigkeit enthält, ausgehend von einer zweidimensionalen Datenmatrix, deren einzelnen Elemente lediglich Intensitätsinformationen enthalten (s. Abb. 1.2)? Warum wird diese zweidimensionale Intensitätskomposition nicht als ein zufälliges Punktmuster erlebt, was sie auf retinaler Ebene ja tatsächlich ist, sondern als ein bedeutungshaltiges Objekt mit bestimmten Eigenschaften (vgl. Mausfeld, im Druck)? Es sind offenbar bestimmte diagnostische Merkmale in diesem Punktmuster enthalten, die vom visuellen System aus dem proximalen Reiz in regelhafter Weise herausgelesen werden und die als Hinweisreize dienen, welche auf perzeptueller Ebene die entsprechende interne Bedeutungskategorie aufrufen⁴.

Die Rolle des sensorischen Codes besteht zum einen darin, die abstrakte, interne Bedeutungseinheit anzustoßen, die im obigen Beispiel mit der Teetasse vielleicht als ‚Behälterobjekt‘ etikettiert werden könnte. Zum anderen liefert der sensorische Code aber auch Informationen zur Bestimmung der Detaileigenschaften dieser internen Objektklasse. Ein solches perzeptuelles Objekt weist verschiedene ‚freie Parameter‘ auf (Mausfeld, 2002), die durch die vom sensorischen Code gelieferte Information mit entsprechenden Werten besetzt werden und die mit verschiedenen Attributen verbunden sind, wie Größe, Form, Farbe und auch Materialeigenschaften. Diese Attribute sind daher ausschließlich nähere Bestimmungen des internen, perzeptuellen Objekts, welche mit verschiedenen Qualiastrukturen, also subjektiven Erlebnisqualitäten wie *rot* und *glänzend* verbun-

³Augenfälliger als das Beispiel mit der dampfenden Teetasse, für die sich scheinbar eine Referenz in der physikalischen Außenwelt finden lässt, wäre z.B. die interne Bedeutungskategorie ‚Feind‘: Welche physikalische Information transportiert die Eigenschaft der Gefährlichkeit? Wie Mausfeld (2005, S. 49) es formuliert: „Sie [die Bedeutungskategorien] sind so komplex, daß sie sich nicht referentiell durch einen festen Bezugspartner in der physikalischen Welt bestimmen lassen. Pointiert gesagt: Bedeutungen sind ‚im Kopf‘ und nicht in der Welt.“

⁴Ein solcher Prozessablauf impliziert bereits, dass nicht der proximale Reiz schon die Bedeutung mit sich im Gepäck führt, sondern dass die abstrakten Bedeutungskategorien bereits in irgendeiner Form im Organismus vorhanden sein müssen. Ebenso beinhaltet eine solche Wahrnehmungstheorie, die sich wohl vollkommen von unserem naiven Verständnis von Wahrnehmung unterscheidet, dass unsere empirische Welt nicht in bildhafter Form repräsentiert ist, sondern eben in Form von abstrakten Konzepten (s. z.B. Pylyshyn, 2003a; 2003b): „[...] that information about a visual scene is not stored in a pictorial form, but rather is stored in a form more like that of a description, which is characterized by variable grain and abstractness and is based upon available concepts.“ (Pylyshyn, 2003a, S. 36).

den sind, und weisen – obwohl diese Attribute in gewisser Weise für den Organismus relevante Struktureigenschaften der Außenwelt widerspiegeln – keinerlei Ähnlichkeit zu den Merkmalen eines externen, physikalischen Objekts auf.

Aus der bisherigen Darstellung sollte sich nun also unzweifelhaft ergeben haben, dass es, statt dem Physiker, dem Wahrnehmungspsychologen zufällt, über die Bedingungen des Auftretens von Glanz in der phänomenalen Welt eines Beobachters Aufschluss zu geben. Ähnliche Einsichten liegen wohl auch Äußerungen früherer Forscher auf diesem Feld zugrunde: So gibt beispielsweise Wundt (1862) ausdrücklich zu verstehen, „dass die Erscheinung des Glanzes einen psychologischen Ursprung hat“ (S. 630), wobei „der Glanz [...] ein Urtheilsprozess“ ist (S. 631). Und auch Kirschmann (1895, S. 148) stellt noch einmal klar, wo die eigentlichen Ursprünge eines Glanzperzepts zu suchen seien, wenn er fragt: „Was muss sich in unserem Bewusstsein ereignen, d.h. welcher Art müssen die Gesichtsempfindungen oder deren Complexe sein, wenn wir den Eindruck des Metallglanzes haben sollen?“ Die Aufgabe des Wahrnehmungspsychologen besteht hierbei also darin, die Netzhautereignisse zu identifizieren, die vom visuellen System als Indikatoren für das mit einem perzeptuellen Objekt verbundene Attribut Glanz herangezogen werden. Und diesem Unterfangen stellt sich auch die vorliegende Arbeit in den Dienst.

In dieser Arbeit wird über drei Experimentalreihen berichtet, in denen Fragen zu diesem Themenkomplex nachgegangen wurde: In einer ersten Experimentalreihe wurde untersucht, ob das visuelle System bei der Bestimmung sowohl der wahrgenommenen Authentizität als auch der Stärke eines Glanzeindrucks von binokularen Hinweisreizen („Glanzlicht-Disparität“) Gebrauch macht, wobei zusätzlich untersucht wurde, inwieweit ein solcher möglicher Effekt von der räumlichen Beschaffenheit und dem Kontrast der Intensitätsspitzen („Glanzlichter“) abhängt. Eine zweite Experimentalreihe nahm einen direkten Bezug auf Befunde, die von Nishida und Shinya (1998) vorgelegt wurden: Die beiden Forscher fanden in Abgleichsexperimenten mit monokular präsentierten, rotierenden computergenerierten 3D-Oberflächen, dass es Beobachtern offenbar nicht gelingt, einen zuverlässigen Abgleich zwischen den Reflexionseigenschaften zweier Oberflächen herzustellen, solange diese beiden Flächen nicht ähnliche 3D-Strukturen aufweisen. In eigenen Experimenten wurde überprüft, ob und wenn ja, wie eine solche „Glanzkonstanzeleistung“ (s. Abschnitt 3.2 für eine ausführliche Darstellung dieses Problems) von verschiedenen potentiellen Hinweisreizen (wie dem Vorhandensein von Disparitäts- oder Bewegungsinformationen im Reizmuster) beeinflusst wird. Die dritte Klasse setzte sich mittels Durchführung zweier Simulationen mit der Bedeutung eines möglichen Hinweisreizes auseinander, der bereits von Nishida und Shinya (1998) vorgeschlagen wurde: Die Autoren nehmen hierbei an, dass das visuelle System für die Wahrnehmung der Reflexionseigenschaften von Oberflächen auf einfache Bildstatistiken in Form von Pixelhistogrammen zurückgreift. Bevor aber im Experimentalteil über die durchgeführten empirischen Arbeiten zu den genannten Themen berichtet wird, soll im folgenden theoretischen Teil ein breiterer Überblick über die verschiedenen Perspektiven des Glanzphänomens gegeben werden, sowie bisherige Befunde und theoretische Überlegungen aus dem Bereich der Glanzwahrnehmung vor gestellt werden, die in den vergangenen 150 Jahren der wahrnehmungspsychologischen Auseinandersetzung mit dem Phänomen *Glanz* erarbeitet wurden.

Kapitel 2

Theoretischer Teil

Objekte, wie sie sich in unserer Wahrnehmung präsentieren, lassen sich anhand verschiedener Attribute, wie Größe, Form und Farbe charakterisieren. Neben solchen Eigenschaften, die ‚unmittelbar‘ visuell bestimmbar sind, scheint das visuelle System aber auch mühelos in der Lage zu sein, auf die Materialeigenschaften von Objekten zu schließen. Attribute wie ‚weich‘, ‚flüssig‘, ‚spröde‘ oder ‚glatt‘, welche z.B. die Konsistenz oder die Oberflächenbeschaffenheit von Objekten bezeichnen, lassen sich offenbar ebenfalls auf rein visuellem Wege erschließen, d.h. ohne dass der Tastsinn zur Hilfe genommen werden müsste. Die Frage, wie das visuelle System solch eine Leistung erbringt, ist erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit verstärkt in den Fokus der Wahrnehmungsforschung gerückt (vgl. Adelson, 2001). Insbesondere die Glanzwahrnehmung, also der Wahrnehmungseindruck, der uns dazu verführt, einem ‚Außenweltobjekt‘ das Attribut der Glättheit zuzusprechen, erfreut sich hierbei eines großen Forschungsinteresses¹.

In den folgenden Abschnitten soll das Glanzphänomen zunächst aus zwei verschiedenen Perspektiven betrachtet werden, der phänomenologischen und der physikalischen. Bei den Ausführungen zur Phänomenologie des Glanzes wird der Versuch einer phänomenalen Charakterisierung von Glanz unternommen, sowie Ordnungssysteme vorgestellt, nach denen die verschiedenen Erscheinungsweisen von Glanz klassifiziert werden können. In dem darauf folgenden Abschnitt zu den physikalischen Glanzcharakteristika soll ein kurzer Überblick über die Prozesse gegeben werden, die sich ereignen, wenn Licht auf eine Oberfläche trifft. Zwar wurde in der Einführung bereits angedeutet, dass diese physikalischen Regularitäten weder hinreichende noch notwendige Bedingungen für die Auslösung eines Glanzeindrucks sind. Da die hier vorgestellten Reflexionsgesetze jedoch den ökologischen Regelfall der distalen Ursache für die retinale Bildgenerierung darstellen und von einigen Forschern als Erklärungsprinzipien für bestimmte Glanzphänomene herangezogen wurden (s. z.B. die Ansätze von Oppel (1854) und Helmholtz (1867) zu dem Phänomen des stereoskopischen Glanzes, Abschnitt 2.4.2) und sie obendrein als Grundlage für die Herstellung einiger Reizmuster berücksichtigt wurden, die in den Experimenten der vorliegenden Arbeit Verwendung fanden, sollen sie hier kurz dargestellt werden.

¹Neben der eigentlichen Wahrnehmung von Glanz als Reflexionseigenschaft wurde dabei außerdem untersucht, zu welchen anderen Wahrnehmungsleistungen aufgefundene Regularitäten, die sich aus den Reflexionseigenschaften von glänzenden Oberflächen ergeben, beitragen. Bezogen auf die Formwahrnehmung von dreidimensionalen Objekten liegen beispielsweise Arbeiten von Norman, Todd & Orban (2004); Fleming, Torralba & Adelson (2004), Hurlbert, Cumming und Parker (1991), sowie Blake und Bültlhoff (1990) vor, im Bereich der Farbkonstanz konnten z.B. Lee (1986), Yang & Maloney (2001), Maloney (2002) und Yang & Shevell (2002) zeigen, dass das visuelle System offenbar von entsprechenden Farbinformationen, die von Glanzlichtern stammen, Gebrauch macht (vgl. auch D’Zmura & Lennie, 1986) und auch die Frage, ob das visuelle System Informationen aus auf Objekten auftretenden Glanzflecken herausliest, um damit die Beleuchtungsrichtung der vorliegenden Szene zu bestimmen (dass dies aufgrund der vorhandenen Informationen tatsächlich möglich wäre, zeigen z.B. Hara, Ko & Ikeuchi, 2005), war bereits Gegenstand von Untersuchungen (Khang, Koenderink & Kappers, 2006; Pont & te Pas, 2006).

Der daran anschließende Abschnitt befasst sich mit dem klassischen psychophysikalischen Forschungsansatz der Skalierung: Hier werden einige Experimente vorgestellt, deren Ziel es war, eine quantitative Beziehung zwischen physikalischen Glanzmaßen und entsprechenden subjektiven Empfindungsgrößen herzustellen, sowie die Dimensionalität eines perzeptuellen Glanzraums zu bestimmen. Hierauf folgt eine breite Darstellung bisheriger Arbeiten zu der Frage, welche Hinweisreize im raum-zeitlichen Intensitätsmuster des proximalen Reizes vom visuellen System zur Ausbildung eines Glanzperzepts genutzt werden. In diesem Abschnitt wird nach drei verschiedenen Gruppen von Hinweisreizen unterschieden: (a) Nach Merkmalen, die bereits unter statischen, monokularen Sehbedingungen im proximalen Reiz auftreten und als Hinweisreiz für eine Glanzbeschaffenheit herangezogen werden; (b) nach entsprechenden Merkmalen, bei denen offenbar Bewegungsinformationen eine Rolle spielen und (c) nach solchen, die unter statischen, binokularen Sehbedingungen auftreten. Aus dieser Darstellung wird sich dann die Fragestellung der vorliegenden Arbeit ergeben, welche in dem abschließenden Abschnitt des theoretischen Teils formuliert werden wird.

2.1 Zur Phänomenologie von Glanz

Glanz ist als Attribut mit vielen Objekten, bzw. Materialien assoziiert. Dennoch erscheint der Glanz phänomenologisch weniger eng mit einem Objekt, als dem Träger dieser Eigenschaft, verbunden zu sein, als es beispielsweise für die Farbe eines Körpers gilt. So unterscheidet zum Beispiel Hering (1879) zwei Komponenten einer glänzenden Oberfläche, von der die eine die wesentliche Eigenfarbe des Körpers repräsentiert, die andere hingegen, der Glanz, als eine eigentümliche, zufällige Zutat, die nicht als Objektfarbe aufgefasst wird, sondern als Licht als solches empfunden wird: „[...] dass auf einer Fläche oder in einem Körper gleichsam ein Ueberschuss von Licht gesehen wird, der als ein Helles für sich und daher nicht als Körperfarbe aufgefasst wird“ (S. 576). Diese Glanzkomponente stellt sich dem Betrachter oft als eine instabile, fluktuierende Lichtschicht dar („[...] as if it were alive [...]“, Bixby, 1928, S. 151), die nur lose mit dem glänzenden Objekt verbunden zu sein scheint.

In einer von Bixby (1928) angestellten umfangreichen Untersuchung zur phänomenologischen Charakterisierung von Glanz wurde der Glanz seitens der Beobachter einhellig als ein beständiger Wechsel, ja eine unmögliche Mischung aus Hell und Dunkel erlebt, bei der die beiden Elemente nie zu einer einheitlichen Mischfarbe verschmolzen, sondern vielmehr zugleich an derselben Stelle des Sehfeldes aufzutreten schienen (auch Hering sprach hier bereits von einer Spaltung der Empfindung, bei der die beiden Komponenten ‚Körperfarbe‘ und ‚Lichtschicht‘ getrennt repräsentiert werden): „[...] its quality is a peculiar commingling or sifting-together of dark and light“ (Bixby, 1928, S. 139). Die wahrgenommene Losgelösttheit der Glanzschicht von der Objektoberfläche zeigte sich auch darin, dass sie nie als der Körperoberfläche unmittelbar aufliegend gesehen wurde. Mal als dünnes Häutchen empfunden, oft auch als massiv, räumlich ausgedehnt, wurde die Glanzkomponente von den Beobachtern fast ausnahmslos in das Innere des Objekts hineinverlegt (vgl. Abschnitt 2.4.2). Manche Beobachter sprachen auch von einer Art Glühen, das vom Inneren des Körpers herzuröhren scheint und auch Bühler (1922, S. 158) sieht seiner Erscheinung nach bei dem Glanz eine gewisse Verwandtschaft zum Leuchten. In seiner phänomenologischen Bestimmung betont Bühler ebenfalls den flächenhaften Charakter des Glanzes und grenzt ihn damit von artverwandten Phänomenen wie dem Glitzern (vgl. auch Oppel, 1857) und dem Funkeln ab, die demgegenüber eine eher punktförmige Erscheinung darstellen. Nicht zuletzt scheint dem Glanz auch eine ästhetische Komponente anzuhängen, die nach Dove (1859, S. 3) beispielsweise bei einem mit einem Firnis beschichteten Gemälde zu einer Aufwertung der „*todten Farben*“ führt².

Zusammenfassend stellt Bixby (1928) drei allgemeine Charakteristika von Glanz heraus, die alle Glanzphänomene miteinander teilen: (1) Die Unabhängigkeit des wahrgenommenen Glanzes von der Objektoberfläche, (2) die räumliche Ausdehnung der Glanzschicht, welche sich zwischen einem dünnen Häutchen und einem massiven Körper bewegt und (3) das eigentümliche gemeinsame Auftreten von Hell und Dunkel an derselben Stelle des Sehfeldes. Dennoch aber stellt der Glanz kein einheitliches Phänomen dar, was sich vor allem darin zeigt, dass das visuelle System im Allgemeinen in der Lage ist, zwischen verschiedenen glänzenden Materialien zu unterscheiden: Seidenglanz, Metallglanz oder Perlmuttenglanz sind nur einige Glanzkategorien, die sich hinsichtlich ihrer Erscheinung in bestimmten (quantitativen wie auch qualitativen) Merkmalen voneinander zu unterscheiden scheinen und dementsprechend in der Regel nicht miteinander verwechselt werden. Grobe Einteilungen in verschiedene phänomenologische Glanzklassen nahmen beispielsweise Zocher und Reinecke (1925, S. 14) vor, die etwa den spiegelnden Glanz (wie er sich bei-

² An dieser Stelle sei mir der Platz für eine kleine Anekdote gewährt, die der Überlieferung zufolge die Umstände des ersten mystischen Erlebnisses Jakob Böhmes betrifft. Demnach soll der Görlitzer Schustermeister im Jahre 1600 bei Betrachten eines glänzenden Zinngefäßes aus seiner Alltagserfahrung herausgerissen und in einen kontemplativen Zustand versetzt worden sein, in welchem ihm das innere Wesen der Natur offenbart wurde (vgl. z.B. Wehr, 2002, S. 23).

spielstweise bei Diamanten, Glas und Wasser zeigt) von dem matten Glanz (z.B. Fettglanz oder Perlmuttenglaz) trennten (vgl. hierzu aber auch Bühler (1922, S. 166), der beispielsweise dem Metallglanz in Abgrenzung zu dem „reinen, harten Spiegelglanz“ eine eher weiche Erscheinungsform zuschreibt).

Eine feiner differenzierte Ordnung von unterschiedlichen phänomenologischen Glanzkategorien lieferte Bixby (1928), die jedoch nur als beispielhafte Einteilung zu werten sein dürfte, da sie lediglich auf den Beschreibungen eines einzelnen Beobachters beruht. In einem Experiment wurden vor dem Beobachter 114 verschiedene glänzende Objekte aus unterschiedlichem Material auf einem Tisch ausgebreitet und von einer diffusen Lichtquelle beleuchtet. Aufgabe des Beobachters war es, diese Glanzproben entsprechend ihrer Glanzerscheinung in unterschiedliche Klassen einzuteilen, wobei zur Unterstützung verschiedene, den Glanzcharakter umschreibende Begriffe vorgegeben wurden. Im Ergebnis wurden von dem Beobachter 31 verschiedene Glanzklassen gebildet, die oft durch Kombinationen der vorgegebenen Begriffe gekennzeichnet waren. Es fanden sich sechs unterschiedliche Erscheinungsweisen eines seidenartigen Glanzes (*silky, soft silky, velvet-silky, satin-silky, metallic-silky, shiny-silky*) und ebenso viele Kategorien für perlenartigen Glanz (*pearly, metallic-pearly, hard pearly, satin-pearly, splendid-pearly, greasy-metallic-pearly*), weiterhin drei Arten des Satinlängzes (*satiny, silky-satiny, metallic-satiny*), jeweils zwei Varianten des Graphitlängzes (*graphitic, metallic-graphitic*), des Perlmuttenglanzes (*mother-of-pearl, pearly-mother-of-pearl*) und des Fettglanzes (*glistening-greasy* und *sub-metallic-greasy*) und jeweils einzeln vertreten der Metallglanz³, harzartiger Glanz (*resinous*), Samtglanz (*velvety*), Glasglanz (*vitreous*) und abschließend Glanzarten mit weniger an spezifische Materialien gebundenen Bezeichnungen wie „splendent“, „shining“, „shining-glistening“, „glistening“ und „sub-metallic“. Jede dieser Glanzklassen wurde von dem Beobachter nachträglich verbal charakterisiert, so dass sich aus diesen Beschreibungen Rückschlüsse auf die der Einteilung zugrunde liegenden Beurteilungskriterien ziehen lassen: Die Hauptmerkmale, nach denen der Beobachter seine Klassifikation der Glanzarten vornahm, schienen in der Form und Ausdehnung der durch die Glanzflecken gebildeten Textur, der wahrgenommenen Tiefenausdehnung der Glanzschicht, sowie dem Ausmaß, zu dem die Glanzschicht die Wahrnehmung der eigentlichen Objektoberfläche zu erschweren scheint zu bestehen. Diese Ergebnisse wurden von Bixby (1928, S. 159) dahingehend interpretiert, dass sich der Glanz in all seinen Erscheinungsformen anhand einer oder mehrerer phänomenologischen Dimensionen klassifizieren lasse: „[...] that a phenomenological arrangement of lustrous objects, in one or more dimensions, is feasible“.

³ Auch wenn Bixby den Metallglanz beinahe achtlos in die Reihe seiner Aufzählung einfügt, hatte dieser in der Geschichte der wahrnehmungpsychologischen Auseinandersetzung mit dem Glanzphänomen immer einen besonderen Stellenwert. Viele der früheren Arbeiten widmeten sich vornehmlich dem Metallglanz (z.B. Brücke, 1861; Kirschmann, 1895, 1921; Bancroft & Allen, 1925), der sich in einigen Besonderheiten von den Glanzarten unterscheidet, die durch nichtleitende Materialien erzeugt werden (s. hierzu den Abschnitt 2.2). Augenfälligstes Merkmal des Metallglanzes ist hierbei die Farbigkeit des Glanzes: Während der reine Oberflächenglanz bei nicht metallglänzenden Objekten immer die Farbe der Beleuchtung annimmt (s. aber Angelopoulou & Poger, 2003), behält bei den Metallen der Glanz die Farbe des Metalls: „[...] die Farbe des Metalls ist die Farbe seines Glanzes“ (Brücke, 1861, S. 181). Nichtsdestotrotz zeigen auch nicht-metallische und sogar organische Oberflächen diese Beziehung zwischen Objektfarbe und Glanzfarbe, weshalb auch diese als Metallglanz empfunden werden. Beispiele geben Brücke (1861), der charakteristischen Goldglanz bei Harnsteinen von Ochsen und dem Zahnbeflag von Gemsen aus der Steiermark, sowie andersfarbigen Metallglanz bei aufgeblätterten Glimmerplättchen, Pfauenfedern und Taubenhälsen gefunden hat, sowie Kirschmann (1921), der ähnliches bei den Flügeldeckeln mancher Käferarten, Schmetterlingsflügeln und Fischschuppen fand.

2.2 Physikalische Glanzcharakteristika

Sobald Licht von einem Medium einer bestimmten optischen Dichte (z.B. Luft) auf ein Medium mit einer anderen Dichte trifft (z.B. Glas, Metall oder Kunststoff), ereignen sich unmittelbar an der Grenzschicht zwischen diesen beiden Medien, sowie innerhalb des Mediums, sofern das Licht zu einem gewissen Anteil in dieses eindringt, verschiedene Prozesse, die sich auf das weitere Ausbreitungsverhalten, die spektrale Zusammensetzung und die Polarisation des Lichtes auswirken können. Bei nicht-leitenden Materialien wird ein geringer Teil des einfallenden Lichtes direkt an der Schnittstelle zwischen den beiden Medien reflektiert, wobei das Reflexionsverhalten mithilfe des Fresnelschen Reflexionsgesetzes beschreibbar ist (dieses gibt den Anteil des reflektierten Lichtes relativ zum einfallenden Licht in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des auftreffenden Lichtes und vom Brechungsindex des Empfängermediums wieder; für die meisten Oberflächen gilt, dass der Anteil des reflektierten Lichtes mit zunehmendem Einfallswinkel des auftreffenden Lichtes wächst). Der größte Teil des einfallenden Lichtes dringt bei nicht-leitenden Materialien jedoch in den Körper ein, nachdem es beim Übertritt an der Grenzfläche gebrochen wurde (gemäß dem Snelliuss-Gesetz ist die Richtungsänderung der Lichtausbreitung dabei abhängig von den optischen Dichten der beteiligten Medien). Je nach Beschaffenheit und Schichtdicke des Empfängermediums kann das Licht mehr oder weniger ungehindert dieses Medium passieren und an einer anderen Stelle wieder austreten (Transmission) oder nahezu vollständig absorbiert werden. Im Allgemeinen wird das Licht im Falle der Transmission bei seinem Durchgang durch das Medium aufgrund selektiver Absorption in seiner Wellenlängenzusammensetzung verändert (transparenter Filter).

Innerhalb des Mediums kann das eindringende Licht mit Partikeln interagieren, die in diesem Medium eingeschlossen sind. An den Grenzflächen zwischen der globalen Empfängersubstanz und den Partikeln kann das Licht wiederum reflektiert oder (selektiv) absorbiert werden. Diese Reflexionen zwischen Empfängermedium und Partikeln können sich mehrmals wiederholen („Subsurface Scattering“), wobei es stark gestreut wieder aus dem Empfängermedium austreten kann. Das so modifizierte Licht kann das Medium vollständig durchdringen und somit an einer anderen als der Eintrittsseite wieder austreten, wie es bei transluzenten Materialien der Fall ist (Hunter (1975) spricht hier von einer ‚diffusen Transmission‘, siehe auch Fleming & Büthoff, 2005). Erfolgt das Subsurface Scattering nur bis zu einer bestimmten Schichttiefe des Mediums, so kann es an der Einfallsseite wieder austreten, wodurch das Licht also stark gestreut zurückgeworfen wird. Die Farbigkeit eines nicht-leitenden Objektes ergibt sich hierbei aus der durch die selektive Absorption verursachte Veränderung der spektralen Zusammensetzung des so zurückgeworfenen Lichtes⁴.

Bezüglich der Reflexion, die sich unmittelbar am Interface zwischen den beiden Medien ereignet, werden zwei Grundarten unterschieden: Die diffuse und die spiegelnde Reflexion. Eine ideal diffus reflektierende Oberfläche strahlt das einfallende Licht gleichmäßig in alle Richtungen wieder zurück (so zeigen beispielsweise Papier oder Kreide ein annähernd ideal diffuses Reflexionsverhalten). Die Intensität des reflektierten Lichtes hängt dabei ausschließlich von der Orientierung

⁴Die Farbigkeit mancher Metalle, wie z.B. Kupfer oder Gold (s. z.B. Bartlett, 1998) wird hingegen auf andere, bis heute jedoch nicht vollständig verstandene Prozesse zurückgeführt: Metalle haben grundsätzlich eine hohe Reflektivität (Silber beispielsweise reflektiert ca. 95% des einfallenden Lichtes); der Anteil des Lichtes, der in tiefere Schichten der Objektoberfläche eindringt ist damit vernachlässigbar (vgl. auch Christie, 1986; und Hunter, 1975). Dieser hohe Reflektivitätsgrad wird paradoxalement mit der hohen Absorptionsfähigkeit des Materials erklärt: Bis zu einer Schichttiefe von wenigen Atomen wird nahezu das gesamte einfallende Licht absorbiert. Unter der Beteiligung von „freien Elektronen“ (siehe hierzu bereits Bancroft & Allen, 1925) finden, verursacht durch den Einfall elektromagnetischer Strahlung, bei Metalloberflächen nahe der Grenzschicht elektrodynamische Prozesse statt, die mit einer Veränderung des Energieniveaus der Elektronen einhergehen. Diese Prozesse führen im weiteren Verlauf zu einer Reemission des einfallenden Lichtes, wobei bei einigen Metallarten offenbar bestimmte Wellenlängenbereiche bevorzugt reemittiert werden. Die charakteristische Färbung mancher Metalle ergäbe sich somit aus dieser Wellenlängenabhängigkeit des Reemissionsverhaltens (siehe Nassau, 2001, S. 157 ff.; sowie Jacobi & Stahl, 1968).

der Oberfläche zur Lichtquelle ab (Lambertsches Gesetz: die rückgestrahlte Lichtenergie ist proportional zum Kosinus des Winkels zwischen der Oberflächennormalen und der Lichtrichtung; s. Abb. 2.1 links). Ein idealer Spiegel hingegen reflektiert das einfallende Licht ausschließlich in eine Richtung, wobei das reflektierte Licht im selben Winkel zur Oberflächennormalen steht wie das einfallende („Einfallsinkel = Ausfallswinkel“, s. z.B. Heron, 1900; s. Abb. 2.1 Mitte). Das Reflexionsverhalten der meisten natürlichen Objektoberflächen entspricht jedoch keinem dieser beiden Grundtypen, sondern lässt sich als eine Mischung aus der ideal diffusen und ideal spiegelnden Reflexion darstellen (Abb. 2.1 rechts): Im Allgemeinen weist das von einer Objektoberfläche reflektierte Licht eine dominante Richtung auf, wobei der Anteil der rückgestrahlten Lichtenergie mit zunehmender Abweichung von der Hauptreflexionsrichtung abnimmt. Als Ursache für eine derartige Reflexionsbeschaffenheit werden feinstrukturelle Unebenheiten der Oberfläche angesehen. Man nimmt hierbei an, dass die Oberfläche eines Objektes aus kleinen, gleich großen, zufällig orientierten, ebenen Elementen, den Mikrofacetten besteht, deren Ausdehnung größer als die Wellenlänge des Lichtes ist und die das einfallende Licht gemäß einem idealen Spiegel reflektieren⁵.

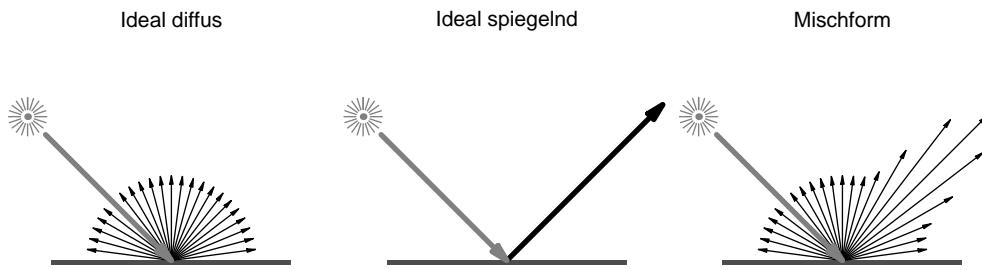


Abbildung 2.1: Die unterschiedlichen Reflexionsarten: Die ideal diffuse Reflexion, die ideal spiegelnde Reflexion und die Kombination aus beiden (von links nach rechts).

Je nachdem, wie die Orientierungen der Mikrofacetten in ihrer Gesamtheit um die globale Oberflächennormale verteilt sind, kann das Licht von stark diffus bis stark spiegelnd zurückgeworfen werden. Das tatsächliche Reflexionsverhalten einer Oberfläche lässt sich mithilfe der sog. BRDF darstellen, der bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion (*bi-directional reflectance-distribution function*). Hierbei handelt es sich um eine Funktion, die eine quantitative Beschreibung des geometrischen Reflexionsverhaltens einer Oberfläche liefert (Nicodemus, Richmond, Hsia, Ginsberg & Limperis, 1977). Empirisch lässt sich diese unter Verwendung eines Gonioreflektometers ermitteln: Eine ebene Probe des hinsichtlich seiner Reflexionseigenschaften zu untersuchenden Materials wird hierbei von einem parallelen Lichtbündel angestrahlt, die Lichtquelle befindet sich dabei während eines Messvorgangs üblicherweise an einer fixen Position. Der von der Oberfläche reflektierte Anteil des Lichtes wird dann von einem Messsensor registriert, dessen Position in kleinen diskreten Schritten so variiert wird, dass im Ergebnis die rückgestrahlte

⁵Ein sehr frühes Mikrofacettenmodell, wie es von Barkas (1939) vorgestellt wurde, ging noch von zwei unterschiedlichen Arten von Mikrofacetten aus, von denen die eine das einfallende Licht ideal spiegelnd, die andere dagegen ideal diffus reflektiert. Heutige Modellvorstellungen, wie sie auch in verschiedenen Beleuchtungsmodellen innerhalb der Computergrafik realisiert sind, gehen nur noch von rein spiegelnden Facetten aus (z.B. Torrance & Sparrow, 1967; Blinn, 1977; Cook & Torrance, 1982; siehe auch Foley, van Dam, Feiner & Hughes, 2004; diese Modelle unterscheiden sich vor allem in der Annahme bezüglich der Verteilungsform der Mikrofacettenorientierungen um die globale Oberflächennormale, wobei auch Abschattungs- und Maskierungseffekte berücksichtigt werden). Einen erheblichen Beitrag zum diffusen Reflexionsverhalten einer Oberfläche wird dabei dem Prozess des Subsurface Scatterings zugesprochen (vgl. auch Sèze, 1993).

Lichtenergie über die gesamte, die Probe umschließende Halbsphäre erfasst wird (s. Abb. 2.2; vgl. aber auch Ward (1992), der eine Methode vorstellt, mit der die reflektierten Anteile des Lichtes simultan für alle Richtungen erfasst werden können). Im einfachsten Fall besteht eine BRDF also aus vier Parametern: Der Position der Lichtquelle (θ_i, ϕ_i) und der jeweiligen Position der Reflexionsrichtung (θ_r, ϕ_r ; jeweils repräsentiert durch den Deklinationswinkel θ und dem Azimutwinkel ϕ der Kugelkoordinaten):

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r)$$

Die Dimensionalität einer BRDF kann sich aber dadurch erhöhen, dass zusätzlich die Wellenlänge des Lichtes betrachtet wird, oder wenn die untersuchte Materialprobe anisotrope Reflexionen zeigt (wenn sich also die Reflexionseigenschaften der Oberfläche bei Drehung der Probe um ihre Oberflächennormale ändert, wie es beispielsweise bei gebürsteten Metalloberflächen der Fall ist). Eine physikalisch korrekte BRDF muss dabei zwei grundlegende Bedingungen erfüllen: Zum einen muss sie dem Energieerhaltungsgesetz genügen, wonach die Summe der in alle Richtungen reflektierten Lichtenergie die Ausgangsenergie des einfallenden Lichtes nicht übersteigen darf. Zum anderen muss eine BRDF, gemäß der Helmholtzschen Reziprozität, symmetrisch sein, d.h. dass sich der Wert der BRDF für ein festes Paar von Einfallsrichtung (θ_i, ϕ_i) und Ausfallsrichtung (θ_r, ϕ_r) des Lichtes nicht ändern darf, wenn diese miteinander vertauscht werden. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 2.2 rechts eine Beispield-BRDF als dreidimensionalen Körper: Die Distanz eines jeden Punktes auf dem Mantel dieses Körpers zum Lichteinfallszentrum auf der Oberfläche repräsentiert hierbei den Anteil der reflektierten Leuchtdichte relativ zur Beleuchtungsstärke des einfallenden Lichtes in die entsprechende Reflexionsrichtung.

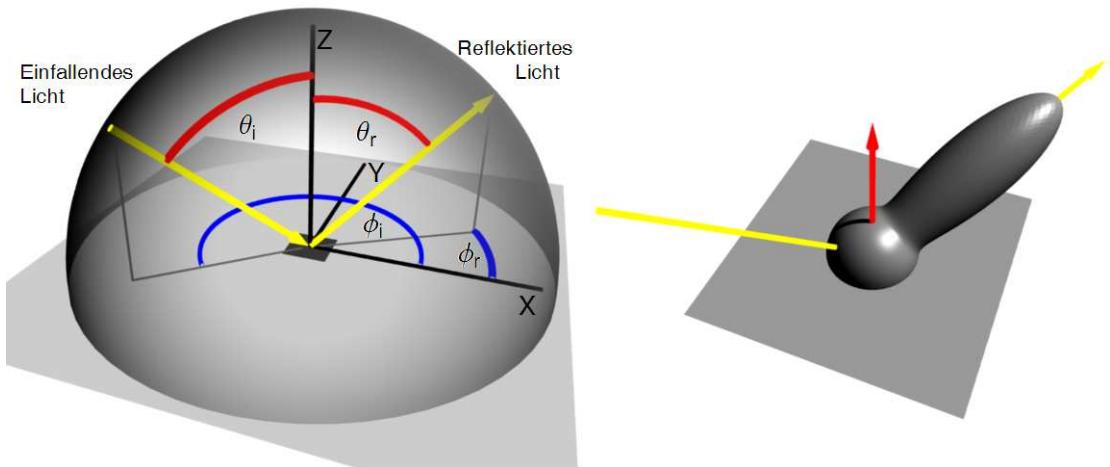


Abbildung 2.2: Bidirektionale Reflektanzverteilungsfunktion (BRDF). Links: Für eine fixe Richtung des einfallenden Lichtes (θ_i, ϕ_i) wird für variable Reflexionsrichtungen (θ_r, ϕ_r) der jeweilige Anteil der rückgestrahlten Lichtstärke erfasst. Rechts: Beispiel-BRDF, dargestellt als dreidimensionaler Körper (s. Text).

2.3 Verhältnis von physikalischen zu perzeptuellen Glanzgrößen

Einer alten psychophysikalischen Tradition folgend, wurde vielfach untersucht, in welcher quantitativen Beziehung Glanzempfindungen zu den entsprechenden physikalischen Größen stehen. Vorbild für die Konstruktion eines Empfindungsraums für Glanz war der dreidimensionale Farbraum: Unter standardisierten Beobachtungsbedingungen („2-Grad-Paradigma“, s. z.B. Wyszecki & Stiles, 1982) zeigte sich, dass ein jedes Licht mit einer eindeutigen additiven Mischung aus drei linear unabhängigen Basislichtern abgeglichen werden konnte – gemäß der Trichromatizitätstheorie ein Beleg dafür, dass das menschliche Farbensehen auf drei Grundempfindungen zurückgeht. Auf sensorischer Seite lässt sich dies mit den unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der drei Zapfentypen der Netzhaut erklären. Ausgehend vom physikalischen Reiz, der spektralen Energieverteilung eines Lichtes, werden die drei Zapfentypen gemäß ihrer spektralen Empfindlichkeit erregt, bei einer stetigen Veränderung der Wellenlängenzusammensetzung des Lichtes, ändern sich auch die Rezeptorerregungen entsprechend. Jedes physikalische Licht lässt sich somit quantitativ in einen dreidimensionalen Empfindungsraum abbilden, dessen Achsen beispielsweise die Erregungsstärken der drei Farbrezeptoren repräsentieren.

Versucht man nun aber, ein ähnliches Koordinatisierungssystem auch für das Attribut Glanz einzuführen, so stößt man auf vielerlei Probleme (Christie, 1986; Billmeyer & O’Donnell, 1987; Sève, 1993) – Probleme, die sich nicht zuletzt daraus ergeben, dass es für Glanz eben keine spezifischen Rezeptoren auf der Retina gibt; denn das Attribut Glanz muss gewissermaßen über Umwege aus dem raum-zeitlichen retinalen Intensitätsmuster herausgelesen werden. Ein grundlegendes Problem besteht somit darin, angemessene physikalische Glanzmaße zu definieren, die bei stetiger Variation zu einer stetigen Veränderung der wie auch immer gearteten Grundempfindungen führen. Die Frage ist hierbei also, ob, und wenn ja, wie sich die unabhängige Variable, die physikalische Glanzgröße, quantitativ spezifizieren ließe. Auch zeigt sich eine Schwierigkeit bereits in der Festlegung von einheitlichen Beobachtungsbedingungen, die sämtlichen Glanzphänomenen gerecht werden (z.B. monokular vs. binokular, vgl. Abschnitt 2.4). Vor ca. 20 Jahren fasste Christie (1986, S. 42) die bis dahin vorliegenden Bemühungen auf dem Gebiet der Glanzskalierung so zusammen, dass bislang keine allgemeingültigen Verfahren entwickelt wurden, mit deren Hilfe Glanzempfindungen mit entsprechenden physikalischen Maßen quantitativ in Beziehung gesetzt werden können. Seitdem liegen weitere Befunde aus verschiedenen Skalierungsexperimenten vor, die verschiedene Lösungen bezüglich der Frage zum Ergebnis haben, auf wie vielen grundlegenden Mechanismen eine Glanzempfindung basiert und welche physikalischen Größen diese beeinflussen. Nicht zuletzt aufgrund der Verwendung von unterschiedlichen Reizmaterialien, Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen, womit diese Ergebnisse allenfalls auf einen kleinen Bereich von Glanzerscheinungen beschränkt bleiben, können aber auch die neueren Studien keinen wesentlichen Beitrag zur Konstruktion eines allumfassenden Modells zur Glanzempfindung leisten, welches sämtliche Glanzphänomene mit einschließt. Bevor nun in diesem Abschnitt einige Befunde aus solchen Skalierungsexperimenten dargestellt werden, soll zunächst an dieser Stelle ein von Hunter (1936, 1975) vorgeschlagenes Klassifikationssystem vorgestellt werden, in dem zwischen mehreren Glanzarten unterschieden wird. Diese Einteilung kann als wegweisend für eine Vielzahl von Experimenten auf diesem Gebiet angesehen werden, da hiermit nicht zuletzt methodische Anregungen für die Konstruktion geeigneter objektiver Glanzmaße gegeben wurden.

Hunter fand bei einer Untersuchung zur Bestimmung der Glanzbeschaffenheit von emaillierten Porzellanplatten, dass herkömmliche Instrumente, welche den relativen Anteil der in die Hauptreflexionsrichtung zurückgestrahlten Lichtes zur Leuchtdichte des einfallenden Lichtes erfassten, keine objektiven Werte lieferten, die mit den visuellen Urteilen der Glanzstärke korrelierten. Die untersuchten Porzellanplatten wiesen einen verhältnismäßig starken Glanz auf, der mehr oder weniger deutliche Spiegelbilder der Umgebung auf der Oberfläche erzeugte. Weitere Analysen mit

verschiedenen Materialien führten Hunter zu der Überzeugung, dass zwischen mehreren Glanzphänomenen unterschieden werden müsse, für die jeweils ein anderes visuelles Kriterium zur Anwendung komme und für die daher auch jeweils ein anderes Verfahren zur Bestimmung eines objektiven Glanzmaßes nötig sei. Nicht allein der Anteil des in die Hauptreflexionsrichtung reflektierten Lichtes sei demnach von Bedeutung bei der Beurteilung der Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche, sondern ebenfalls das Ausmaß, in welchem das Licht in andere, von der Hauptreflexionsrichtung abweichende Richtungen zurückgestrahlt werde, sowie die Variation des reflektierten Lichtanteils mit Änderung des Beleuchtungs- und Betrachtungswinkels (vgl. Abschnitt 2.2). Hunter fand schließlich sechs verschiedene (wenn auch nicht zwangsläufig disjunkte) Glanzkategorien, die sich hinsichtlich der Art der visuellen Beurteilung der Glanzbeschaffenheit unterscheiden und etablierte damit ein Klassifikationssystem, welches bis heute in Gebrauch ist (s. Abb. 2.3; vgl. auch Judd, 1937; Christie, 1986; Billmeyer & O'Donnell, 1987):

1. *Specular gloss* (in früheren Arbeiten auch *objective gloss*) bezeichnet hierbei die einfachste Art, die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche zu bestimmen: „*The shininess of a surface, the brilliance of its reflected high lights, or its specular reflectance are the appearances corresponding to specular glossiness*“ (Hunter, 1936, S. 795). Ein entsprechendes Maß für die Glanzausprägung G_s dieser Kategorie lässt sich durch den Anteil des in die Hauptreflexionsrichtung (S) zurückgestrahlten Lichtes relativ zum Anteil des einfallenden Lichtes (I) definieren.
2. *Sheen*: Diese Glanzart lässt sich als Spezialfall des *specular gloss* auffassen, da hiermit ein Phänomen bezeichnet ist, welches nur unter bestimmten Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen auftritt. *Sheen* (G_{sh}) zeigen demnach vor allem solche, unter gewöhnlichen Bedingungen nur sehr schwachen Glanz aufweisenden Oberflächen, wie beispielsweise Wandfarben, die allein unter sehr schrägem Lichteinfall (I) von mehr als 70° eine starke Lichtreflexion (Sh) zeigen (vgl. die Fresnel-Reflexion in Abschnitt 2.2).
3. *Contrast gloss* zeigen vor allem Materialien, die nur eine geringe Glanzeigenschaft besitzen, wie z.B. Stoffe, Fell oder Haare. Zur Bestimmung der Glanzausprägung (G_c) wird hier ein Vergleich zwischen verschiedenen Bereichen derselben Oberfläche angestellt, wobei die in die Hauptreflexionsrichtung gespiegelte Lichtstärke (S) mit solchen Bereichen der Oberfläche in Beziehung gesetzt wird, welche annähernd diffus reflektieren. Für ein objektives Glanzmaß wird hierfür gewöhnlich die (unter einer 45° - 45° Bedingung für die Richtung des einfallenden Lichtes und die Messrichtung) in Spiegelrichtung reflektierte Lichtstärke an der Lichtstärke relativiert, die in Richtung der Oberflächennormalen (D) reflektiert wird (s. Abb. 2.3).
4. *Absence-of-bloom gloss*: Diese Glanzart tritt bei Materialien auf, die relativ scharf umrissene Spiegelbilder der Umgebung aufweisen können und bei solchen, auf deren Oberfläche sich Highlights zeigen, welche zu den Rändern hin einen Intensitätsgradienten („Schleier“) aufweisen. Erstere erscheinen hochglänzend, während letztere eine mittlere Glanzausprägung aufweisen. Als Ausgangspunkt zur Beurteilung der Glanzstärke (G_b) dient hier nicht das in die Hauptreflexionsrichtung (S) zurückgestrahlte Licht, sondern das, welches in eine etwas von dieser Hauptreflexionsrichtung abweichende Richtung (B) reflektiert wird.
5. *Distinctness-of-image gloss* (auch *Distinctness-of-reflected-image gloss*, kurz: *DOI*) ist ein Glanztyp, der sich bei hochglänzenden Materialien zeigt, an deren Oberfläche Spiegelbilder der Umgebung auftreten und beschreibt die Schärfe dieser Spiegelbilder. Ein entsprechendes Glanzmaß G_{di} lässt sich bei dieser Kategorie nicht mittels eines einfachen photometrischen

Wertes darstellen, jedoch sah Hunter eine Möglichkeit zur Quantifizierung dieser Glanzart darin, die Steilheit der zugehörigen BRDF im Bereich der Hauptreflexionsrichtung zu betrachten (vgl. Abb. 2.3). Alternative Methoden zur Bestimmung eines Glanzmaßes, wie sie von Hunter beschrieben wurden, basieren auf einem direkten visuellen Vergleich: So war bereits Anfang der 30er Jahre eine Methode zur Glanzbestimmung in Gebrauch, nach welcher das gespiegelte Muster eines (innerhalb dieses Verfahrens verwendeten) Gitters auf der Oberfläche der zu untersuchenden Materialprobe mit einem Satz von standardisierten Proben verglichen wurde, die sich in kleinen diskreten Nuancen in ihrem DOI-Glanz von einander unterscheiden (vgl. Hunter, 1936, S. 801; für eine weitere Methode siehe auch Judd, 1937).

6. *Surface-uniformity gloss (Absence-of-surface-texture gloss)* bezeichnet abschließend einen Glanztyp, der bei allen Materialien auftreten kann, welche mittleren bis hohen Glanz zeigen. Diese Glanzart ist gekennzeichnet durch die makroskopische Struktur, oder die Topographie einer Oberfläche (wie etwa bei Orangenschalen, die wahrnehmbare Unebenheiten aufweisen; vgl. auch Lu, Koenderink & Kappers, 1999). Hierbei wird also weniger die Beschaffenheit von Glanzflecken, als vielmehr die Struktur der Oberfläche selbst betrachtet, so dass ein entsprechendes objektives Maß nicht über die Reflexionseigenschaften einer Oberfläche ermittelt werden kann.

Das wohl erste Experiment im Zusammenhang mit der Skalierung von Glanz wurde von Ingersoll (1914) durchgeführt, der den Glanz von Papier untersuchte, ohne ihn dabei jedoch direkt mit korrespondierenden Empfindungsgrößen in Beziehung zu setzen. Ziel der Untersuchung war in erster Linie die Einführung eines Maßes, nach dem die Augenfreundlichkeit von Zeitungspapieren beurteilt werden konnte. Für die Festlegung eines physikalischen Glanzmaßes machte der Autor sich den Umstand zunutze, dass der Anteil des Lichtes, der vornehmlich spiegelnd von Papier, wie auch einigen anderen Materialien reflektiert wird, an einem bestimmten Reflexionswinkel (57.5 Grad, vgl. auch Harrison, 1945, S. 9) eine ebene Polarisation aufweist. Mit Hilfe eines entsprechenden optischen Geräts („Glarimeter“), war Ingersoll nun in der Lage, den relativen Anteil des so reflektierten Lichtes bezogen auf die Gesamtstärke des reflektierten Lichtes zu bestimmen, welcher somit als physikalisches Glanzmaß behandelt wurde. Dem Autor zufolge ist dieses Maß unabhängig von der absoluten Intensität des einfallenden Lichtes, jedoch nicht stabil hinsichtlich unterschiedlicher Formen und der räumlichen Ausdehnung der Lichtquelle, so dass für die durchgeführten Messungen eine Standardbeleuchtung eingeführt werden musste. Mit diesem Verfahren wurde die Glanzstärke unterschiedlicher, nach einer Industrienorm standardisierter Papierproben untersucht. Hier zeigte sich beispielsweise, dass schwarze, oder allgemein farbige Papierproben gegenüber (hinsichtlich der übrigen Oberflächenbeschaffenheit identischen) weißen Papierproben einen ungleich höheren Wert auf der Glanzskala erreichten. Ohne tatsächlich die genaue Beziehung zwischen dem physikalischen Glanzmaß und der psychologischen Variable des ‚Lesekomforts‘ (bei der Lektüre von Schriften, die auf Papier mit entsprechendem Glanzwert gedruckt sind) empirisch ermittelt zu haben, gibt Ingersoll abschließend an, dass man die so konstruierte Glanzskala unter diesem Gesichtspunkt zumindest als ordinale Rangordnung betrachten könne.

Bei einer Untersuchung von Harrison und Poulter (1951) wurden zehn verschiedene Papierproben (die zunächst nicht hinsichtlich ihrer physikalischen Glanzstärke spezifiziert waren) einer großen Anzahl von Probanden vorgelegt, welche die Proben auf einer subjektiven Skala zwischen 1 und 10 bezüglich der empfundenen Glanzstärke beurteilen sollten. Für die meisten der Papierproben entsprachen die Verteilungen der Urteile annähernd einer Normalverteilung. Für zwei der Proben zeigten sich jedoch abnorme, bimodale Verteilungen, was nach weiterer Analyse der Tatsache zugeschrieben wurde, dass bei der Beurteilung der Glanzstärke der Proben keine kontrollierten

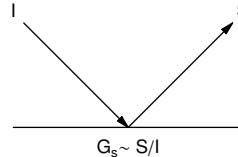
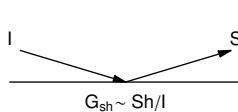
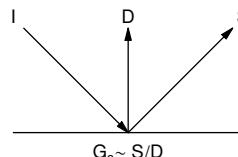
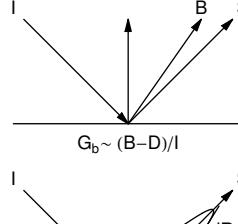
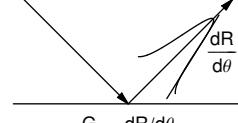
Types of Gloss	Visual Evaluation	Reflectance Function	Types of Surfaces
Specular Gloss	Shininess, brilliance of highlights		Medium-gloss surfaces of book paper, paint, plastics, etc.
Sheen	Shininess at grazing angles		Low-gloss surfaces of paint, paper, etc.
Contrast gloss or luster	Contrast between specularly reflecting areas and other areas		Low-gloss surfaces of textile fiber, yarn and cloth, newsprint, bond paper, diffuse-finish metals, hair, fur etc.
Absence-of-bloom gloss	Absence of haze, or milky appearance, adjacent to reflected highlights		High- and semigloss surfaces in which reflected highlights may be seen
Distinctness-of-image gloss	Distinctness and sharpness of mirror images		High-gloss surfaces of all types in which mirror images may be seen
Surface-uniformity gloss	Surface uniformity, freedom from visible nonuniformities such as texture	Not a function of reflectance	Medium-to-high-gloss surfaces of all types

Abbildung 2.3: Die sechs Glanzarten nach Hunter [übernommen aus Hunter (1975, S. 68, Tabelle 6.1)]. Siehe Text zu den einzelnen Bezeichnungen.

Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen vorlagen. Nach einem weiteren Laborexperiment mit denselben Papierproben, jedoch anderen Beobachtern und kontrollierten Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen, traten diese Abweichungen nicht mehr in den Daten auf. Erst nach dem Vorliegen der empirischen, perzeptuellen Glanzurteilsdaten wurden die Papierproben hinsichtlich ihres Reflexionsverhaltens goniophotometrisch untersucht. Für verschiedene Messwinkel und einem fixen Beleuchtungswinkel von 45 Grad wurde die relative Intensität des reflektierten Lichtes gemessen (relativ zu einer Standardprobe bei einem Lichteinfalls- und Messwinkel von jeweils 45 Grad). Diese physikalischen Glanzmaße wurden hierauf mit den (durch ein nicht näher bezeichnetes Verfahren auf Intervallskalenniveau gebrachten) Urteilsmaßen korreliert. Die Bezie-

hung zwischen den beiden Größen erwies sich hierbei als annähernd linear, jedoch wichen einige der Papierproben deutlich von der Vorhersagegerade ab, wofür offenbar die unterschiedliche Farbigkeit der Proben verantwortlich war. Nach photometrischen Messungen der Papierproben wurde eine Vorhersageformel entwickelt, die neben dem Reflexionsgrad auch den Luminanzfaktor der Proben berücksichtigt: $G = S(a + 10/L)$, wobei G ein Maß für die visuelle Glanzstärke darstellt, S die relative Intensität unter einer Lichteinfalls- und Reflexionsrichtungsbedingung von 45° - 45° (relativ zu einer Probe aus Magnesiumoxid bei 45° - $0^\circ = 100$), L den Luminanzfaktor (unter der Bedingung 45° - 0°) und a eine Konstante, die für das verwendete Reizmaterial den Wert 0.2 annimmt. Die Güte dieser Vorhersageformel zeigte sich bei einer Korrelation zwischen den empirischen Urteilswerten und den Vorhersagewerten (G), welche einen Korrelationskoeffizienten von 0.97 ergab. Einen möglichen Hinweis auf visuelle Verarbeitungsmechanismen bei der Glanzbeurteilung sahen die Autoren in den beiden Komponenten, aus denen die Formel (nach Auflösen der Klammer) besteht: $Sa + (10)S/L$. G ergibt sich somit aus einer Kombination der Komponenten Sa (als Maß für die Intensität des reflektierten Lichtes in Richtung der Hauptreflexionsrichtung bei 45°) und S/L (als Kontrastmaß für die Bedingung 45° - 0°), die offenbar bei der Beurteilung einer glänzenden Oberfläche berücksichtigt werden: „[...] the average observer judges gloss neither by pure specular reflexion nor by pure contrast, but by a combination of the two“ (Harrison & Poulter, 1951, S. 97).

Billmeyer und O'Donnell (1987) beziehen sich in ihren Experimenten direkt auf die unterschiedlichen Glanzarten der Hunterschen Klassifikation (s.o.), die sie ebenfalls als eigenständige Glanzphänomene betrachten. In ihren Experimenten wurden dabei fünf dieser (zum Teil hinsichtlich ihrer Definition leicht modifizierten) Kategorien separat untersucht („Distinctness-of-Image Gloss“, „Specular Gloss“, „Contrast Gloss“, „Reflection-of-Haze Gloss“ und „Sheen“), wofür drei unterschiedliche Sätze von Glanzproben verwendet wurden, die jeweils 15, bzw. 20 Proben umfassten. Die Proben bestanden allesamt aus lackierten Aluminiumscheiben, deren physikalisches Reflexionsverhalten, sowie in manchen Fällen auch die Reflektanzstufen dieser Reizmuster, durch unterschiedliche Mengenanteile der verwendeten Substanz und unterschiedliche Hitzebehandlung bei der Herstellung variiert wurde. Unter den entsprechenden, für das jeweilige Glanzphänomen notwendigen Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen wurden diese paarweise den Beobachtern dargeboten, die dazu aufgefordert worden waren, Paarvergleichsurteile (teilweise unter Verwendung von Ankerreizen) bezüglich des Unterschieds in der empfundenen Glanzstärke anzustellen. Um zu untersuchen, aufgrund wie vieler Urteilsdimensionen die Beobachter ihre Einschätzungen der Glanzstärke vornahmen, wurden für jeden der erhobenen Datensätze verschiedene Varianten einer multidimensionalen Skalierung (MDS) gerechnet. Die Autoren kommen aufgrund ihrer Analysen zu dem Ergebnis, dass für jede der untersuchten Glanzarten eine eindimensionale Lösung den besten Fit ergab: „[...] the observers perceived gloss as a single dimension“ (S. 326). Auch fanden sie, im Gegensatz zu dem Befund von Harrison und Poulter (1951, s.o.), dass die Helligkeit der Proben in der Regel keinen Einfluss auf die Glanzbeurteilung hatte. Weiterhin untersuchten die Autoren, in welcher quantitativen Beziehung die wahrgenommenen Glanzstärken zu den objektiven Glanzgrößen der Proben standen, wofür verschiedene Maße für die physikalische Glanzstärke erhoben wurden. Hier zeigte sich, erneut im Widerspruch zu den Ergebnissen von Harrison und Poulter (1951), dass eine einfache lineare Beziehung keine zufrieden stellende Vorhersage ergab. Die von Billmeyer und O'Donnell ermittelten Vorhersagegleichungen bestanden vielmehr aus Polynomen, die auch quadratische und kubische Anteile enthielten. Einschränkend geben die Autoren allerdings zu bedenken, dass die in ihrer Studie gefundenen Ergebnisse lediglich auf das von ihnen verwendete Reizmaterial (Lackfarben) und die experimentellen Bedingungen zu beziehen seien. Bei einer Betrachtung anderer Materialien, wie beispielsweise Metallen, könnten sich demnach nicht nur andere Vorhersagegleichungen ergeben, sondern auch die perzeptuellen Glanzurteile eine höhere Dimensionalität aufweisen.

Ferwerda, Pellacini und Greenberg (2001) kritisieren eine Reihe von Unzulänglichkeiten bei den zurückliegenden Bemühungen zur Konstruktion eines mit dem Farbraum vergleichbaren Empfindungsraums für Glanz. So seien bei bisherigen Modellen die Dimensionen eines solchen Glanzraums vorwiegend intuitiv gewählt worden oder von vornherein festgelegt gewesen und die einzelnen Achsen separat untersucht worden. Außerdem sei der Geltungsbereich dieser Modelle auf bestimmte Materialien, Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen begrenzt. Für ein angemessenes Modell fordern die Autoren zunächst Dimensionen, die sowohl physikalisch als auch perzeptuell bedeutungsvoll sind. Weiterhin sollte es neben der Beschreibung von Glanzerscheinungen auch Unterschiede zwischen solchen quantifizieren können. Unter diesen selbst auferlegten Vorgaben stellten die Autoren nun zwei Experimentalreihen an. Anders als bei früheren Untersuchungen auf diesem Gebiet, für die fast ausschließlich ebene Materialproben (Papier oder lackierte Metallscheiben) unter einer direkten Beleuchtung verwendet wurden, wählten die Autoren für ihre Experimente computergeneriertes Reizmaterial: Die Reizmuster bestanden hierbei aus achromatischen Kugeln, deren Reflexionseigenschaften mithilfe des Ward-Modells (Ward, 1992; in diesem Modell werden jedoch einige physikalische Aspekte, wie die Fresnel-Reflexion, nicht berücksichtigt) simuliert wurden und die in eine Szene eingebettet waren, die aus einem rechtwinkligen Raum bestand, dessen Wände eine Schachbretttextur aufwiesen. Auf diese Weise sollte vor allem der Einfluss von Interreflexionen berücksichtigt werden, da eine wesentliche Eigenschaft von glänzenden Oberflächen sei, dass sie zu einem gewissen Grad die Umgebung spiegelten. Ihr erstes Experiment war dem Auffinden der einer Glanzerscheinung zugrunde liegenden Dimensionen gewidmet. Hierfür wurde ein Satz von insgesamt 27 Reizmustern angefertigt, die sich hinsichtlich der drei Parameter des Ward-Modells unterschieden (3 Stufen für die diffuse Komponente, die das Reflektanzniveau bestimmt; 3 Stufen für die spiegelnde Komponente und 3 Stufen für die ‚Roughness‘, welche die Streubreite des reflektierten Lichtes repräsentiert, vgl. Abb. 2.2). Jeweils zwei dieser Reizmuster wurden den Versuchspersonen während jedes Durchgangs zur Beurteilung des Unterschieds in der wahrgenommenen Glanzstärke präsentiert. Die so gewonnenen Daten wurden danach mit einem Verfahren zur Multidimensionalen Skalierung analysiert, welches eine zweidimensionale Lösung nahe legte: Es zeigte sich, dass sich die Beurteilungen der Versuchspersonen offenbar auf zwei unabhängige Dimensionen gründeten, von denen eine mit der Hunterschen Kategorie (s.o.) des ‚*Contrast Gloss*‘ (wahrgenommener Kontrast des Spiegelbildes auf der Oberfläche) und die andere mit der des ‚*Distinctness-of-Image Gloss*‘ („DOI“, wahrgenommene Schärfe der Spiegelbilder) beschrieben werden kann. Die zweite, aus zwei Einzelexperimenten bestehende Experimentalreihe diente dazu, die aufgefundenen Achsen mit einer Metrik zu versehen und darauf aufbauend einen uniformen Glanzraum zu konstruieren. Getrennt für die beiden Dimensionen ‚*Contrast Gloss*‘ und ‚DOI‘ wurden weitere Reizmuster angefertigt: Insgesamt 30 Reizmuster für die Untersuchung der ‚*Contrast Gloss*‘-Dimension (5 Werte für die diffuse Komponente, 6 Werte für die spiegelnde Komponente, der ‚Roughness‘-Parameter wurde hier konstant gehalten) und 10 verschiedene Reizmuster für die ‚DOI‘-Dimension (hier wurde nur der ‚Roughness‘-Parameter variiert, die beiden übrigen konstant gehalten) wurden nun den Versuchspersonen jeweils einzeln zur Beurteilung der empfundenen Glanzstärke dargeboten. Die Beurteilungswerte wurden danach mit den ursprünglichen, physikalischen Größen in Beziehung gebracht. Es zeigte sich, dass bezogen auf die ‚DOI‘-Dimension die subjektiven Glanzwerte linear mit dem (invertierten) ‚Roughness‘-Parameter korrelierten. Auch für die zweite Dimension des ‚*Contrast Gloss*‘ zeigte sich eine lineare Beziehung, jedoch erst, nachdem ein neues Maß, das sich in komplexer Weise aus der diffusen und der spiegelnden Komponente des Ward-Modells zusammensetzt, für die unabhängige, physikalische Variable festgelegt worden war. Für diese linearen Metriken wurden anschließend Gewichtungsfaktoren ermittelt, mit deren Hilfe ein Abstandsmaß für einen uniformen Glanzraum definiert werden konnte: Paare von Reizmustern, die denselben Abstand in diesem Glanzraum aufwiesen, jedoch durch unterschiedliche Parameterkombinationen gekennzeichnet waren, wur-

den hinsichtlich des Unterschieds in ihrer Glanzausprägung als gleich empfunden, wie ein informelles Zusatzexperiment ergab. Die Autoren selbst geben an, dass sie ihrem eigenen Anspruch zumindest in der Hinsicht nicht gerecht werden konnten, dass auch sie in ihren Experimenten nur eine bestimmte Reizklasse untersucht haben (ihre computergenerierten Reize sollen demnach ihre ökologische Entsprechung in den ‚*achromatic glossy paints*‘ haben). Auch sie schließen die Möglichkeit nicht aus, dass für die Einordnung weiterer Materialien, wie beispielsweise Plastik, Metalle und Papier, eine Erweiterung des Glanzraums um zusätzliche Dimensionen notwendig werden könnte. Auch sei nicht gewiss, inwieweit andere Reizmerkmale (z.B. Form, Textur, Farbe der Objekte oder andere Szeneneigenschaften) sich auf die Glanzempfindung auswirke. Jedoch glauben Ferwerda et al. (2001) einen ersten wesentlichen Schritt zur Entwicklung eines psycho-physikalischen Modells der Glanzwahrnehmung geleistet zu haben und geben Empfehlungen für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet.

Einige dieser Anregungen wurden von Obein, Knoblauch und Viénot (2004) aufgegriffen, die für ihre Experimente schwarze, beschichtete Papierproben verwendeten und den Einfluss der Beleuchtungsrichtung sowie der Beobachtungsart (monokular vs. binokular) auf die wahrgenommene Glanzstärke untersuchten. Zehn unterschiedliche Papierproben wurden zunächst für zwei unterschiedliche Beleuchtungsrichtungen (20° und 60° relativ zur Oberflächennormalen der Proben) bezüglich ihrer physikalischen Glanzstärke untersucht (diese Glanzstärke wurde durch die sog. ‚*Gloss Units*‘ quantifiziert, die den Anteil des in die Hauptreflexionsrichtung zurückgestrahlten Lichtes relativ zu einer Standardprobe, die aus poliertem schwarzem Glas bestand, wiedergibt). Als experimentelles Design wählten die Autoren einen doppelten Paarvergleich, wobei die Beobachter jeweils unter den verschiedenen Bedingungskombinationen (2 Beobachtungsarten \times 2 Beleuchtungsrichtungen) anzugeben hatten, zwischen welchen der während jedes Durchgangs dargebotenen beiden Reizpaare der wahrgenommene Unterschied in der Glanzstärke am größten war. Die so erhobenen Daten wurden unter Verwendung eines Verfahrens zur Unterschiedsskalierung („*Maximum likelihood difference scaling*“, MLDS) analysiert, welche als Ergebnis eine auf relativen Werten basierende perzeptuelle Glanz-Unterschiedsskala lieferte. Abgetragen gegen die Skala der ‚*Gloss Units*‘, zeigte sich, dass die Beziehung zwischen den physikalischen und den perzeptuellen Glanzgrößen unter allen Bedingungen nicht linear war. Vielmehr schienen sich die Datenkurven in drei unterschiedliche Segmente einteilen zu lassen („*matte*“, „*intermediate*“ und „*high gloss*“). Für die beiden Regionen „*matte*“ und „*high gloss*“ schien dabei die Empfindlichkeit zur Detektion von Unterschieden in der Glanzstärke höher als im Bereich der „*intermediate*“ Region zu sein. Für die Papierproben, die unter die Rubrik „*high gloss*“ eingeordnet werden können, nehmen die Autoren an, dass die Beobachter ihre Einschätzungen auf die wahrgenommene Schärfe der auf den Oberflächen erscheinenden Spiegelbilder stützten („*Distinctness-of-Image Gloss*“, s.o.), während die Glanzstärke der dem „*intermediate*“ Bereich zuordenbaren Proben offenbar aufgrund des Kontrastes zwischen dem Bereich, in welchem das Glanzlicht auftrat und weiter entfernten Bereichen der Probe („*Contrast Gloss*“, s.o.) bewertet worden waren. Bezogen auf die beiden unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen, die sich auf die absolute Leuchtdichte des reflektierten Lichtes auswirkt (vgl. Abschnitt 2.2), fanden die Autoren, dass sich die relativen Datenkurven kaum voneinander unterschieden, worin sie einen Hinweis auf einen Glanzkonstanz-Mechanismus sahen: „[...] the visual system is able to compensate for luminous flux variations due to a change in angle of illumination and to maintain an invariable gloss percept, typical for the sample itself“ (S. 718-719). Einen Einfluss der Beobachtungsart fanden sie nur im „*high gloss*“ Bereich: Hier schien unter binokularen Sehbedingungen eine Steigerung der Empfindlichkeit bei der Wahrnehmung von Unterschieden in der Glanzerscheinung von Oberflächen aufzutreten, wobei angenommen wurde, dass die in den Spiegelbildern enthaltenen stereoskopischen Tiefencues (vgl. Abschnitt 2.4.2) dazu beigetragen haben könnten.

Wie einleitend zu diesem Abschnitt bereits dargestellt, besteht der Ansatz bei den hier be-

schriebenen Skalierungsexperimenten darin, eine quantitative Beziehung zwischen physikalischen und perzeptuellen Glanzgrößen aufzuzeigen. Hierbei wird also eine Stufe, nämlich die des proximalen Reizes in dem in Abschnitt 1 als doppelten Übersetzungsprozess beschriebenen Verlaufs umgehen und eine direkte Beziehung zwischen den beiden Endstücken – dem physikalischen, distalen Reiz und dem perzeptuellen Output – gesucht. Sinnvoll ist eine solche Vorgehensweise daher allenfalls dann, wenn die physikalischen Glanzgrößen auch gleichzeitig mit quantitativen Veränderungen in den (noch zu identifizierenden) für die Glanzwahrnehmung relevanten Merkmalen des proximalen Reizes einhergehen, die allein als Ausgangsinformation zur Verfügung stehen (dass physikalische Regularitäten ohnehin keine notwendigen Bedingungen für ein Glanzperzept darstellen, wurde ebenfalls bereits in der Einführung angesprochen). Ausführliche Kritik an einigen Verfahren zur Bestimmung von objektiven Glanzmaßen liefert zum Beispiel Harrison (1945, Kap. 3). So sieht er beispielsweise große Schwierigkeiten bei solchen physikalischen Glanzgrößen, welche allein durch das Verhältnis von eingehender zu der in die Hauptreflexionsrichtung oder einer anderen fixen Reflexionsrichtung zurückgestrahlten Lichtenergie abgeleitet werden (im Gegensatz zu den Glanzmaßen, die durch Parameter bestimmter BRDF-Modelle charakterisiert sind): Das genauere Reflexionsverhalten einer Oberfläche sei mit solch einem einfachen Maß nicht ausreichend bestimmt, so dass sich schnell unterschiedliche Proben finden ließen, deren Glanzwert zwar gleich wäre, von Beobachtern hinsichtlich ihrer wahrgenommenen Glanzbeschaffenheit jedoch unterschiedlich beurteilt würden. Insgesamt stellt Harrison (ähnlich wie auch noch 40 Jahre später Christie, 1986; s.o.) – nach einer Gesamtbewertung der von ihm untersuchten Verfahren – die Möglichkeit zur Konstruktion eines objektiven Glanzmaßes, das unter allen Bedingungen Vorhersagen über die subjektive Glanzempfindung erlaubt, in Frage: „*It is therefore hardly to be expected that any gloss number will give us a reliable indication in all circumstances; the most we can hope for is a set of figures which will be a good working guide for everyday purposes, but which will not necessarily tie up with our visual judgments in all cases*“ (Harrison, 1945, S. 74).

2.4 Hinweisreize für Glanz

Die erste fruchtbare Periode der Erforschung solcher Hinweisreize, die das visuelle System heranzieht, um auf distaler Seite auf das Vorhandensein einer glatten Oberfläche zu schließen, lässt sich auf die Mitte des 19. Jahrhunderts datieren. Hier wurde in erster Linie untersucht, durch welche physikalischen, physiologischen oder psychologischen Prinzipien sich das Phänomen des *stereoskopischen Glanzes* erklären lässt (s. Abschnitt 2.4.2). Trotz der Tatsache, dass alle Forscher auf diesem Gebiet seit jeher darauf hingewiesen haben, dass im Allgemeinen auch bei einäugiger Betrachtung Glanz wahrgenommen werden kann – die erarbeiteten Modelle zur Erklärung der Erscheinung des stereoskopischen Glanzes damit also nicht als vollständiges Modell zur Wahrnehmung von Glanz angesehen werden können – fand eine wissenschaftliche Betrachtung der monokularen Hinweisreize zur Glanzwahrnehmung in der nachfolgenden Zeit nur vereinzelt statt. Kirschmann (1895, 1921) grenzte solche Hinweisreize, welche bereits in statischen, monokularen Reizmustern enthalten sind, die seiner Auffassung nach perzeptuell lediglich einen *uneigentlichen, scheinbaren oder falschen „Pseudoglanz“* erzeugen könnten, strikt von dem *eigentlichen oder wahren Glanz* ab, der seiner Auffassung nach immer parallaktischer Natur sei. Während er ersteren als „*eine [...] Classe von Erscheinungen, welche lediglich auf einer besonderen Art der Vertheilung der Helligkeiten auf einer Körperoberfläche beruhen*“ (Kirschmann, 1895, S. 161) betrachtete, sah er für die Erfahrung des *wahren Glanzes* als wesentlichen Mechanismus ein „*sukzessives oder simultanes Beobachten von verschiedenen Stellen des Raumes aus*“ an. Der *eigentliche Glanz* tritt demnach nur dann in Erscheinung, wenn entweder eine dynamische Änderung der retinalen Intensitätsverteilung auftritt – verursacht durch Bewegung eines glänzenden Objekts relativ zum Beobachter, oder durch Veränderung der Beobachterrichtung relativ zum Objekt – oder wenn bei binokularer Betrachtung ein Unterschied im Intensitätsmuster zwischen den beiden Netzhäuten auftritt. Diese Kirschmannsche Unterteilung in verschiedene Informationsquellen, welche das visuelle System für die Glanzwahrnehmung heranzieht, soll für die folgenden Abschnitte als Orientierungshilfe dienen. In einem ersten Abschnitt werden demnach zuerst solche Hinweisreize betrachtet, die bereits unter monokularen Sehbedingungen wirksam sind. Hier wird zwischen drei Merkmalen unterschieden: Zum einen werden die bisherigen Befunde zu monokularen Hinweisreizen betrachtet, welche in rein statischen Reizanordnungen auftreten (wie beispielsweise auf Gemälden oder Photographien), wobei zusätzlich zwischen dem Vorhandensein relativ eng umrisssener Intensitätsspitzen im retinalen Input („Highlights“) und dem Vorliegen komplexer Muster, die als Spiegelbilder der Umgebung interpretiert werden, unterschieden wird. Zum anderen wird hier auch kurz der mögliche Einfluss von Bewegungsinformationen auf die Glanzwahrnehmung dargestellt – ein Gebiet, auf dem bislang kaum Forschung betrieben wurde. In dem darauf folgenden Abschnitt werden dann binokulare Hinweisreize betrachtet, wobei zunächst in ausführlicher Form die bisher vorliegenden Befunde und Erklärungsansätze zu dem Phänomen des stereoskopischen Glanzes dargestellt werden sollen. Abschließend wird hier ein Ansatz besprochen, nach dem das visuelle System sich bei der Glanzwahrnehmung binokularer Tiefeninformation bedient.

2.4.1 Monokulare Hinweisreize

Highlights: „Ungewöhnliche Helligkeitsverhältnisse“

Bereits vor einigen Jahrhunderten bedienten sich Maler bei der Darstellung von glänzenden Oberflächen in gewisser Weise bestimmter monokularer Hinweisreize. Ohne dabei im strengerem Sinne auf das physikalischen Prinzip der spiegelnden Reflexion zurückgegriffen zu haben⁶, gelang es

⁶Obwohl schon seit der Antike bekannt (s. Heron, 1900, S. 321ff.), scheint das Prinzip der spiegelnden Reflexion in der Malerei kaum berücksichtigt worden zu sein, wenn entsprechende Bildobjekte mit Glanzflecken versehen wurden (s. z.B. die Anmerkungen in Da Vinci, 1990, S. 268). So gibt es einige Beispiele aus der Kunst, die zeigen, dass

Künstlern, die verschiedensten Materialqualitäten in überzeugender Weise auf ihren Bildern nachzuempfinden. Zwei Beispiele sind in Abbildung 2.4 wiedergegeben:



Abbildung 2.4: Links: Ausschnitt aus dem Gemälde „Madonna des Kanonikus van der Paele“ von Jan van Eyck (1436). Rechts: „Papst Innozenz X.“, Gemälde von Diego Velázquez (1650). Beide Abbildungen enthalten Bildstellen, die als glänzende Objekte wahrgenommen werden.

Das linke Bild zeigt einen Ausschnitt aus dem Gemälde „Madonna des Kanonikus van der Paele“ von Jan van Eyck aus dem Jahre 1436. Das rechte Bild stammt von Diego Velázquez aus dem Jahre 1650 und zeigt ein Porträt des Papstes Innozenz X. Beide Gemälde enthalten Bestandteile, die bei dem Betrachter den Eindruck glänzender Objekte hervorrufen. Das linke Bild lässt in dem Betrachter den Eindruck eines Ritters mit einer polierten Metallrüstung entstehen und das rechte Bild wird als eine Szene wahrgenommen, in der eine Person einen seidenglänzenden Schulterkragen trägt.

Doch warum nimmt ein Betrachter solche Bildflächen überhaupt als glänzend wahr, da doch „[...] der gemalte d.h. dargestellte Glanz kein einfach in die Malfläche hineingesetzter wirklicher Glanz der darstellenden Farbflecke (genauer der Malfläche) ist [...]“ – „Wie entsteht aus glanzfreien Palettenwerten Glanz als Bildwert der Farben?“ (Bühler, 1922, S. 171). Offenbar enthalten die betreffenden Bildstellen Merkmale, die unser visuelles System – naiv könnte man sagen: irrtümlich – als Hinweis auf das Vorliegen einer glatten Oberfläche deutet. Und bei näherer

beispielsweise bei der Darstellung eines Spiegels Bildszenen geschaffen wurden, die grob gegen die physikalische Gesetzmäßigkeit der spiegelnden Reflexion verstößen (eine Übersicht ist in Bertamini, Latto & Spooner, 2003, enthalten). Ein häufig in diesem Zusammenhang zitiertes Kunstbeispiel findet sich in dem Gemälde „Venus im Spiegel (Rokeby Venus)“, das in der Mitte des 17. Jahrhunderts von Diego Velázquez gemalt wurde (s. z.B. Gregory, 1998; Cavanagh, 2005; Croucher, Bertamini & Hecht, 2002). Zu sehen ist hier eine Frauengestalt, die ihr eigenes Gesicht in einem Spiegel betrachtet. Dieses Spiegelbild ist aber gleichzeitig für den Betrachter sichtbar, dessen Beobachtungsrichtung jedoch stark von der Blickrichtung der Venus abweicht, so dass es aus optisch-geometrischer Sicht unmöglich ist, dass sowohl der Beobachter als auch die Venus zugleich das Spiegelbild sehen (Gregory, 1998, merkt außerdem an, dass für die dargestellten perspektivischen Verhältnisse das Spiegelbild der Venus viel zu groß sei). Bemerkenswert an solchen Beispielen ist jedoch, dass derartige Verstöße gegen physikalische Prinzipien dem Betrachter in der Regel gar nicht auffallen (vgl. auch Bertamini, Latto & Spooner, 2003): „Because we do not notice them, they reveal that our visual brain uses a simpler, reduced physics to understand the world.“ (Cavanagh, 2005, S. 301).

Betrachtung wird es wohl kaum jemandem schwer fallen, das künstlerische Vorgehen bei der Erzeugung solcher Glanzeffekte nachzuvollziehen: Wie schon zu Abbildung 1.1 in der Einführung angesprochen wurde, genügt offenbar schon allein das Vorhandensein einzelner heller Intensitätsflecken auf der Oberfläche eines Objekts, um bei dem Betrachter die Vorstellung von einer die gesamte, oder zumindest Teile einer Oberfläche ausfüllenden Glanzbeschaffenheit hervorzurufen. Diese Intensitätsflecken werden demnach vom visuellen System als durch eine besondere Reflexionseigenschaft der Oberfläche verursacht interpretiert, eben als die Orte auf der Oberfläche, von denen das einfallende Licht zu einem gewissen Grad spiegelnd zum Auge des Beobachters zurückgeworfen wird. Als einen relevanten Hinweisreiz zieht visuelle System hierbei anscheinend den Helligkeitskontrast zwischen dem Intensitätsflecken und der benachbarten Umgebung heran (s. z.B. Hering, 1879, S. 576-577; Kirschmann, 1921, S. 98; Bühler, 1922, S. 171ff.). Da starke Helligkeitskontraste mit dem Vorliegen einer matten Oberfläche in der Regel nicht vereinbar sind, schlussfolgert das visuelle System demnach, dass eine solche Intensitätsverteilung auf eine besondere Reflexionseigenschaft zurückgehen müsse: „*Wir wissen, wie matte Körper sich bei unzweideutiger Beleuchtung an ihren Ecken und Krümmungen hinsichtlich der Lichtreflexion verhalten. Wir wissen beispielsweise, dass schroffe Intensitätsgegensätze (wenn nicht durch Schlagschatten verursacht) an einer stetig gekrümmten matten Fläche gar nicht vorkommen können. Sehen wir nun auf einer Fläche, über deren räumliche Beschaffenheit wir aufgrund anderweitiger Wahrnehmungen nicht im Zweifel sind, Helligkeiten neben einander, wie sie nach unserer Erfahrung an einer matten Oberfläche nicht möglich sind, so schließen wir, dass nicht lediglich diffuses Licht vorliegen könne, sondern dass die Fläche glänze.*“ (Kirschmann, 1895, S. 162)⁷.

In Anlehnung an erste Arbeiten von Beck (1972) untersuchte Forbus (1977), welche Merkmale solche, einer Oberfläche anhaftenden lokalen Intensitätsspitzen aufweisen müssen, um vom visuellen System als durch eine glatte Oberflächenbeschaffenheit verursacht interpretiert zu werden. Umfangreichere empirische Untersuchungen stellte er mit zylinderförmigen Reizmustern an, die er unter Verwendung eines dem Phongschen Modell (s. Phong, 1975) vergleichbaren Beleuchtungsmodells herstellte und seinen Probanden zur Beurteilung auf einem Monitor darbot. Durch Variieren zweier Reizparameter (dem relativen Anteil der spiegelnden Komponente an der Gesamtzusammensetzung der Reflexionsbeschaffenheit der simulierten Oberfläche sowie der für die Schärfe und Größe des Glanzfleckens verantwortlichen Höhe des Exponenten) erzeugte er verschiedene Intensitätsprofile, die der virtuellen Oberfläche seiner Reizmuster aufgelegt wurden. Es zeigte sich dann, dass die spezifische Form dieser Profile unerheblich war bezogen auf ihre Fähigkeit, einen Glanzeindruck auszulösen. Die einzige notwendige Bedingung bestand demnach darin, dass die Intensitätsverteilung kontinuierlich sein musste und nicht abrupt umspringen durfte. Ein Glanzeindruck stellte sich bei seinen Beobachtern also immer ein, „[...] so long as it is not a

⁷Hier spricht Kirschmann allerdings ein neues Problem an: Aufgrund welcher „anderweitiger Wahrnehmungen“ erschließt das visuelle System denn eigentlich die 3D-Geometrie einer Oberfläche? Betrachtet man beispielsweise das rechte Bild in Abbildung 2.4, so erscheint dem Betrachter die als Schulterkragen wahrgenommene Fläche als glänzend, wobei das Helligkeitsmuster offenbar durch den ‚Faltenwurf‘ des ‚Stoffes‘ zustande kommt. Wenn nun aber die Wölbungen dieser Fläche bekannt sein müssen, um darauf aufbauend zu dem Schluss gelangen zu können, dass die zugehörigen Einfärbungen und Helligkeitsverhältnisse nicht mit dem Vorliegen einer matten Oberfläche vereinbar sind, muss man sich fragen, woher, wenn nicht ebenfalls aus diesen Farbverhältnissen, das visuelle System die Information über die 3D-Geometrie der Oberfläche gewinnt (vgl. Doerschner, Wijntjes, Kucukoglu & Pont, 2009). Verschärft wird dieses Problem noch dadurch, wie es bei Kirschmann ebenfalls anklingt, dass auch die Beleuchtungsbedingungen zu dem Intensitätsmuster beitragen (vgl. Pont & te Pas, 2006): Dieselbe Farbverteilung kann sich nämlich aus einer unendlichen Anzahl von Kombinationen aus den drei beteiligten Komponenten ‚Beleuchtung‘, ‚3D-Geometrie der Oberfläche‘ und ‚Reflexionsbeschaffenheit‘ ergeben. Die Tatsache, dass das visuelle System jedoch eine konkrete Lösung für diese vieldeutige Situation anbietet, deutet darauf hin, dass es, offenbar ausgestattet mit bestimmten Vorannahmen über die Beschaffenheit realistischer Reizsituationen, gewissermaßen Plausibilitätsprüfungen vornimmt, wobei es beispielsweise unwahrscheinliche Beleuchtungsbedingungen auszuschließen scheint (s. hierzu im folgenden Abschnitt die Darstellung der Arbeit von Fleming, Dror & Adelson, 2003).

discontinuous step in intensity.“ (S. 10; vgl. auch Hurlbert, Cumming & Parker, 1991).

Weiterhin wurde die Breite des Flächenanteils, der vom Intensitätsflecken eingenommen wurde, relativ zur Gesamtbreite der verwendeten Objektoberfläche variiert. Hier zeigte sich, dass alle Reizmuster bis auf das mit dem breitesten Flächenanteil für das Highlight (75%) als glänzend wahrgenommen wurden: „*This suggests that the width is not critical, so long as the surround is visible.*“ (S. 10). Zusätzlich wurde ein ähnliches Experiment durchgeführt, bei dem für die Flächenbereiche seiner zylindrischen Reizmuster, die sich außerhalb des Glanzfleckens befanden, ein homogener Grauton gewählt wurde, statt (wie beim vorangegangenen Experiment) eine Helligkeitsverteilung aufzuweisen, die physikalisch korrekt nach dem Lambertschen Gesetz der diffusen Reflexion konstruiert wurde. Nahm hier nun der Anteil des Glanz-Peaks mehr als 20% der Gesamtfläche ein, so wurde kein klarer Glanz mehr wahrgenommen. Die Ergebnisse der bisherigen Experimente fasst Forbus so zusammen, dass offenbar der räumliche Kontext von Glanzflecken von Bedeutung zu sein scheint, damit die entsprechende Intensitätsverteilung als glänzende Oberfläche erlebt wird. Der von dem Glanzflecken eingenommene Flächenbereich sollte dabei eher schmal sein und es dürften keine abrupten Intensitätssprünge auftreten.

Eine systematische Untersuchung weiterer, für eine Glanzinterpretation notwendiger Eigenschaften von Intensitätsflecken wurde von Beck und Prazdny (1981) angestellt. In einer Reihe von Experimenten manipulierten die Autoren unter anderem die Intensität, Größe, Form und Position solcher Glanzlichter, die sie dem digitalisierten, auf einem Monitor dargebotenen Bild einer Vase zufügten. Zunächst zeigte sich für die von ihnen verwendeten Reizmuster, dass offenbar kein globaler Effekt von diesen Glanzlichtern ausging: Die Zuschreibung einer Glanzegenschaft der Oberfläche blieb nur auf einen begrenzten Bereich dieser Oberfläche beschränkt: „*Highlights have a local effect that makes surrounding areas of the vase appear glossy. They do not lead to a perceptual inference about the vase surface that causes the entire vase to appear glossy.*“ (Beck & Prazdny, 1981, S. 407-408). Die Ausdehnung des als glänzend empfundenen Bereichs der Oberfläche stieg jedoch mit zunehmender Intensität und Größe der Glanzpunkte. Zudem sahen die Autoren Hinweise darauf, dass die Stärke des Glanzeindrucks davon abhängt, ob die Positionen der Glanzlichter auf der Oberfläche als konsistent mit den (über andere Informationen, wie z.B. Schatten, abgeleiteten) Beleuchtungsbedingungen und der 3D-Geometrie der Oberfläche erscheinen (vgl. auch Anderson & Kim, 2009). Tatsächlich scheinen gerade Schatten-Informationen von großer Bedeutung für die Interpretation eines Intensitätsflecken als Glanzlicht zu sein, da sie offenbar bevorzugte Hinweise auf die 3D-Geometrie von Objektoberflächen liefern: Wurde den Beobachtern in den Experimenten von Beck und Prazdny lediglich der zweidimensionale Umriss einer Vase vorgelegt, der bis auf einen hinzugefügten Intensitätsflecken in einem homogenen Grauton eingefärbt war, so wurde der Figur keine Glanzbeschaffenheit zugesprochen. Und auch, als dieser Figur zusätzlich ein Konturgitter als Hinweisgeber auf die 3D-Geometrie der Oberfläche zugefügt wurde, trat kein überzeugender Glanzeindruck auf.

Die Ergebnisse aus ihren Untersuchungen führten die Autoren zu dem Schluss, dass Glanzwahrnehmung „*[...] is not the result of a perceptual inference which identifies a surface as reflecting light specularly*“, sondern es sich hierbei um eine „*[...] direct perceptual response to local visual stimulation*“ handelt (Beck & Prazdny, 1981, S. 409; siehe dagegen aber Adelson, 2001). In einer neueren Arbeit von Berzhanskaya, Swaminathan, Beck und Mingolla (2002, 2005) wurde diese Aussage jedoch dahingehend etwas abgeschwächt, dass nun zwei Betrachtungsweisen, bzw. Arten von perzeptuellen Urteilen unterschieden werden: „*On the one hand, an observer may seek to determine whether the surface of some whole object is a sample of a particular category, e.g. smooth plastic or polished metal. On the other hand, one may ask to what extent a particular portion of a given surface looks glossy at the present time, from a given viewpoint.*“ (Berzhanskaya et al., 2005, S. 566).

Demnach scheint es also zum einen möglich, ausgehend von entsprechenden, lokal auftretenden

den Intensitätsspitzen auf die globale Glanzbeschaffenheit einer Objektoberfläche zu schließen, wobei diese Materialeigenschaft der gesamten Oberfläche zugeschrieben wird. Gleichzeitig soll ein Betrachter aber auch in der Lage sein, von diesem Gesamteindruck zu abstrahieren und Urteile über die lokale Glanzbeschaffenheit an ausgewählten Orten auf einer Oberfläche anzustellen. Wie diese beiden Betrachtungsweisen sinnvoll zu vereinen sind, geht aus den weiteren Ausführungen der Autoren jedoch nicht hervor. Es stellt sich vor allem die Frage, ob für diese beiden Betrachtungsweisen ein einziger Mechanismus verantwortlich ist, oder ob sie auf getrennten Prozessen beruhen. Zumindest was die Beurteilung der lokalen Glanzbeschaffenheit von Objektoberflächen angeht, nehmen die Autoren an, dass möglicherweise ‚filling-in‘-Prozesse bei dieser perzeptuellen Aufgabe eine Rolle spielen: Berzhanskaya et al. (2005) äußern die Vermutung, dass ausgehend von solchen als Glanzlichter interpretierten Intensitätsflecken, die offenbar als die Orte auf einer Oberfläche erlebt werden, an denen der Glanzeindruck am stärksten ausgeprägt ist, eine Ausbreitung des Glanzcharakters auf weitere Bereiche der Oberfläche stattfindet. Eine solche Extrapolation verlaufe jedoch nicht gleichförmig, sondern führe zu einer Abschwächung der empfundenen Glanzstärke mit zunehmender Entfernung des betrachteten Ortes auf dieser Oberfläche vom Zentrum der Ausbreitung. Doch was für ein Mechanismus führt nun zur Bestimmung der globalen Glanzcharakteristik einer Oberfläche? Falls die globale Beurteilung der Glanzbeschaffenheit auf denselben Mechanismus zurückgehen sollte wie bei der lokalen Beurteilung der Glanzausprägung, müsste man sich z.B. fragen, welche, mit einem festen Ort auf einer solchen Oberfläche verbundene wahrgenommene lokale Glanzstärke dann vom visuellen System als der Repräsentant für die globale Glanzbeschaffenheit dieser Objektoberfläche herangezogen wird. Ohne näher auf solche Probleme einzugehen, glauben Berzhanskaya et al. (2005) jedoch, dass mit der Untersuchung der lokal empfundenen Glanzstärke ein tieferer Einblick in die der Glanzwahrnehmung zugrunde liegenden Mechanismen möglich sei.

In ihren Experimenten bestand die Aufgabe der Beobachter darin, für gekennzeichnete Stellen auf der Oberfläche eines computergenerierten und auf einem Monitor dargebotenen Torus' ein Urteil über die empfundene Glanzstärke abzugeben. Der Torus war dabei unter Zuhilfenahme eines Beleuchtungsmodells für computergenerierte Bilder so konstruiert, dass er das einfallende Licht zu einem gewissen Grad spiegelnd reflektierte und dementsprechend Glanzpunkte aufwies (Abb. 2.5 links). Wie schon Beck und Prazdny (1981), fanden auch Berzhanskaya et al. (2002, 2005), dass die empfundene Glanzstärke der betrachteten Orte auf der Oberfläche des Torus' mit der Distanz vom Glanzlicht abnahm. Da aber auch die absolute Intensität der Oberflächenpunkte mit zunehmender Entfernung vom Glanzlicht abnahm, untersuchten die Autoren, ob das Glanzurteil ihrer Beobachter möglicherweise mit diesem Aspekt zusammenhing. Zu diesem Zweck wurde die eine Seite des Torus künstlich aufgehellt und der so modifizierte Reiz den Beobachtern erneut zur Glanzbewertung vorgelegt (vgl. Abb. 2.5 rechts). Hier zeigte sich nun, dass unabhängig von der absoluten Intensität der zu beurteilenden Stellen auf der Torusoberfläche für Bereiche, die dieselbe Entfernung vom Glanzlicht aufwiesen (entweder auf der künstlich aufgehellten oder der unverändert belassenen Seite), auch dieselben Glanzeinschätzungen abgegeben wurden. Wie sich außerdem aus einem weiteren Experiment ergab, schien sich die empfundene Abschwächung der Glanzstärke dabei nicht etwa als eine Funktion der Distanz auf der zweidimensionalen Projektion der Torusoberfläche darzustellen, sondern als eine Funktion der Distanz entlang der rekonstruierten dreidimensionalen Oberfläche dieses Körpers zum Glanzlicht. In einem letzten Experiment wurde schließlich untersucht, ob diese distanzabhängige Abnahme des lokalen Glanzeindrucks von Unterbrechungen im Formverlauf der betrachteten Oberfläche beeinflusst wird. Erneut wurde als Reizmuster das computergenerierte Bild eines Torus verwendet, dem zusätzlich eine Textur aufgelegt wurde. Diese Textur war so gewählt, dass die Oberfläche des Torus als stark spiegelnd erschien, womit der globale Glanzcharakter des Körpers erhöht werden sollte (s. Abb. 2.6). Die Unterbrechungen im wahrgenommenen Formverlauf wurden im Reizmuster auf zwei Arten rea-

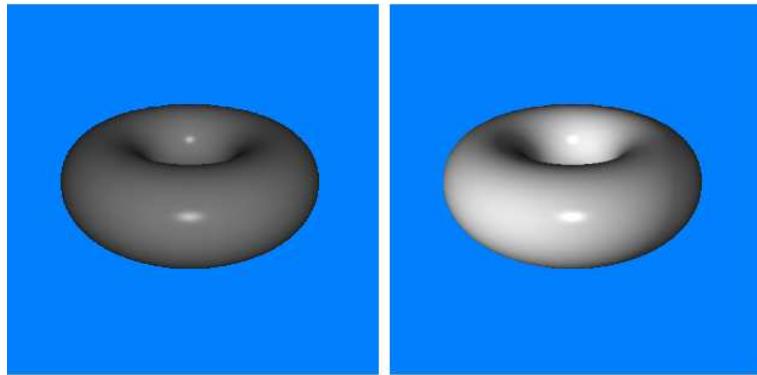


Abbildung 2.5: Nachempfundene Reizbeispiele, wie sie in ähnlicher Form in den Experimenten von Berzhanskaya et al. (2002, 2005) verwendet wurden. Die Reize unterscheiden sich in der räumlichen Luminanzverteilung.

lisiert: Zum einen wurde aus dem Torus ein kleines Segment ausgespart, so dass eine Lücke entstand (Abb. 2.6 links), zum anderen wurde ein Verdecker in Form eines Ringes verwendet (Abb. 2.6 rechts). Im Vergleich zu einem Torus ohne derartige Unterbrechungen zeigte sich hier, dass solche Stellen, die dieselbe Distanz zum Glanzlicht aufwiesen, bei Körpern mit solchen Diskontinuitäten allgemein als schwächer in ihrer lokalen Glanzstärke eingestuft wurden. Die Bedingung, bei der der Torus mit einer Lücke versehen war, verlor dabei gegenüber der Verdecker-Bedingung am stärksten an wahrgenommener Glanzintensität mit zunehmender Entfernung vom Glanzlicht.

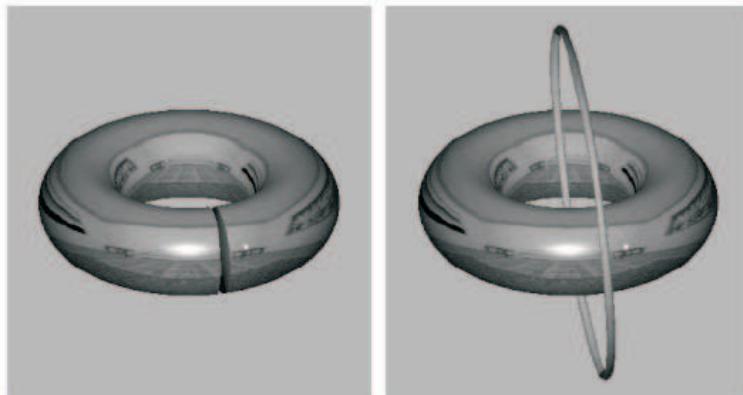


Abbildung 2.6: Zwei Reizbeispiele aus Berzhanskaya et al. (2002, 2005). Links: Torus, aus dem ein Segment ausgespart wurde. Rechts: Torus mit einem Ring als Verdecker.

Diagnostische Merkmale von Spiegelbildern

Bei den bisher dargestellten Untersuchungen zur Bedeutung von auf einer Oberfläche auftretenden Intensitätsflecken für die Glanzwahrnehmung wurde ausschließlich auf einfache Beleuchtungsbedingungen bei der Reizkonstruktion zurückgegriffen. In der Regel wurden hierbei Szenen geschaffen, bei denen eine einzige Punktlichtquelle die entsprechenden Objekte beschien. Wie gezeigt wurde, führen auch bereits solch einfache Beleuchtungsbedingungen zu entsprechenden Intensitätsflecken auf der Objektoberfläche, die beim Betrachter den Eindruck von Glanz hervorrufen.

Fleming, Dror und Adelson (2003) merkten jedoch an, dass ökologische Reizszenen in der Regel weitaus komplexere Beleuchtungssituationen enthalten. Abhängig von dem Grad der Glattheit einer Oberfläche, spiegelt diese nicht ausschließlich das Licht einer direkten Beleuchtung, sondern mehr oder weniger auch das von Umgebungsobjekten reflektierte Licht (indirekte Beleuchtung). Eine realistische Beleuchtungssituation schließt damit auch solche Interreflexionen ein (s. z.B. die Kugel in Abb. 1.1).

In ihrer Arbeit behandeln Fleming et al. (2003) nun folgendes Problem: Die Oberfläche eines zu einem gewissen Grad spiegelnd reflektierenden Objekts nimmt in jeder Umgebung aufgrund unterschiedlicher indirekter Beleuchtungsbedingungen eine entsprechend andere Erscheinung an. Doch ist es unter diesen Umständen überhaupt möglich, die Reflexionsbeschaffenheit der Oberfläche unabhängig von den jeweils bestehenden Beleuchtungsbedingungen zu erkennen? Mit anderen Worten: Gibt es so etwas wie Glanzkonstanz⁸? Zur Erinnerung: Alles was dem visuellen System als Information zur Verfügung steht, um auf die Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche zu schließen, ist das zweidimensionale Intensitätsprofil des proximalen Reizes. In diesem komplexen Ausgangssignal sind jedoch die beiden beteiligten Komponenten miteinander konfundiert, d.h. dieselbe Intensitätsverteilung ließe sich durch verschiedene Kombinationen der Komponenten „Beleuchtungsszene“ und „Reflexionseigenschaft der Oberfläche“ herstellen. In der Einleitung (s. Abschnitt 1) wurde dieses Problem bereits kurz angesprochen: Eine polierte Chromkugel würde in den meisten Kontexten als hochglänzend erscheinen; wäre dieselbe Kugel jedoch in einem matt gestrichenen Raum mit ausschließlich diffuser indirekter Beleuchtung, so würde sie einem Betrachter als matt erscheinen. Wie dieses Beispiel verdeutlicht, scheint zumindest in solch einem Fall, bei dem eine diffuse Beleuchtungsszene vorliegt, ein korrektes Erkennen der Reflexionseigenschaft dieser Oberfläche nicht zu gelingen. Und selbst bei solchen Reizsituationen, bei denen aufgrund des spiegelnden Reflexionsverhaltens einer Oberfläche klar strukturierte Muster auf der Oberfläche erscheinen, könnten diese in statischen Bildern doch auch mit gleicher Berechtigung als Textur statt als Spiegelbilder der umgebenden Szene interpretiert werden⁹ (vgl. Abb. 2.7). Woran liegt es also, dass bei einigen Reizobjekten offenbar eine Trennung in die beiden ursächlichen Komponenten möglich ist, bei anderen jedoch nicht?

Fleming et al. (2003) haben nun folgende Überlegungen angestellt: Zwar sind mit einer gegebenen proximalen Intensitätsverteilung viele Entstehungsgeschichten auf distaler Seite vereinbar, allerdings haben einige Kombinationen von „Beleuchtungsszene“ und „Reflexionscharakteristik“ eine höhere Wahrscheinlichkeit als andere. Wäre als Reizmuster beispielsweise eine Kugel gegeben, die ein Muster von verschwommenen Konturen aufweist, so könnte dieses Muster z.B. als unvollkommene Spiegelung der Umgebung auf einer etwas aufgerauten Oberfläche, oder aber auch als perfekte Spiegelung einer verschwommenen Szene interpretiert werden. Weil die Autoren nun aber annehmen, dass unser visuelles System in irgendeiner Form Kenntnisse über die Beschaffenheit ökologischer Beleuchtungsszenen besitzt, würde letztere Interpretation vermutlich als unwahrscheinlich zurückgewiesen werden. Wie diese Arbeitsgruppe in mehreren Untersuchungen zeigen konnte, scheinen realistische Beleuchtungen außerdem bestimmte statistische Merkmale aufzuweisen (Dror, Adelson & Willsky, 2001; Dror, Willsky & Adelson, 2004), die sie von künstlichen unterscheiden und die möglicherweise auch das visuelle System aus dem pro-

⁸Womit Glanzkonstanz hier im Sinne einer Invarianz der wahrgenommenen Reflexionseigenschaften einer Oberfläche unter wechselnden Beleuchtungsbedingungen gemeint ist (zu anderen Arten von Glanzkonstanz vgl. z.B. Obein, Knoblauch & Viénot, 2004; sowie Nishida & Shinya, 1998)

⁹Unter natürlichen Sehbedingungen wird die Interpretation einer Oberfläche als spiegelnd noch durch weitere Hinweise erleichtert: In Abschnitt 2.4.2 wird hierbei die Bedeutung des binokularen Sehens dargestellt, im nachfolgenden Abschnitt wird der diesbezügliche Einfluss von Bewegung besprochen. Wie jedoch schon die Kugel in Abb. 1.1 und auch die Reizmuster von Fleming et al. (2003) veranschaulichen, gelingt es dem visuellen System auch bei statischen, rein monokularen Darbietungen, das auf der Oberfläche auftretende Muster als durch die Glanzbeschaffenheit der Kugel verursacht und somit als Spiegelbild aufzufassen.

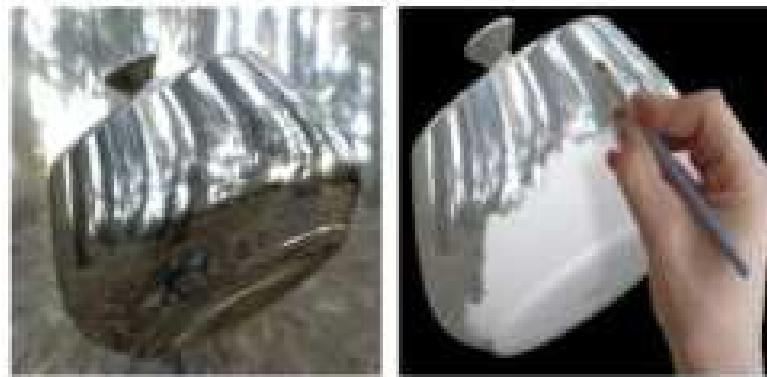


Abbildung 2.7: Wie kann das visuelle System entscheiden, ob die Muster auf einer Oberfläche das Resultat einer Interaktion zwischen Reflexionsbeschaffenheit und Beleuchtungsszene sind oder eine fest aufgeprägte Textur darstellen [übernommen aus Kersten, Mamassian & Yuille, 2004, Abb. 1-D]?

ximalen Reiz extrahiert (vgl. auch DelPozo, Savarese, Baker & Simons, 2008). So scheint z.B. ein Charakteristikum von Bildern einer realistischen Szene zu sein, dass niedrigere Intensitäten einen höheren Anteil an dem Gesamtmuster einnehmen als höhere Intensitäten: Für ihre Analyse werteten die Autoren realistische Lichtkarten aus, die das gesamte sphärische Panorama bezogen auf einen bestimmten Punkt im Raum abbilden (es wurde hierbei also die Gesamtheit aller, aus allen Richtungen auf diesen Punkt einwirkenden Lichtintensitäten erfasst, s. Abb. 2.8). Aus den digitalisierten Bildern dieser Lichtkarten wurde dann für jede Intensitätsstufe die Häufigkeit der zugehörigen Pixel ausgelesen. Die so ermittelten Intensitäts-Histogramme wiesen zwischen den einzelnen Lichtkarten alle ein ähnliches Profil auf, nämlich einen zu den höheren Intensitäten hin stark abflachenden Verlauf mit geringeren Pixel-Häufigkeiten.



Abbildung 2.8: Links: Lichtkarte in sphärischer Form. Bezogen auf einen konkreten Punkt im Raum enthält die Lichtkarte sämtliche, aus allen Richtungen auf diesen Punkt einwirkenden Lichtintensitäten. Rechts: Dieselbe Lichtkarte, auf eine zweidimensionale Ebene projiziert [übernommen aus: Fleming et al., 2003, Abb. 3].

Unter der Annahme, dass das visuelle System tatsächlich in irgendeiner Form solche Statistiken aus dem proximalen Reiz herausliest, vermuteten die Autoren nun, dass Beobachter die Glanzbeschaffenheit eines Objektes vor allem dann zuverlässig erkennen können, wenn die auf

der Oberfläche auftretenden Intensitätsverteilungen die statistischen Merkmale von realistischen Beleuchtungsszenen aufweisen. Bei künstlichen Beleuchtungsszenen, die sich in den entsprechenden Statistiken von realistischen unterscheiden, würde das visuelle System demnach die Textur auf einer Oberfläche nicht als Spiegelbild der Umgebung interpretieren und somit auch die Reflexionscharakteristik der Oberfläche falsch einschätzen.

Für ihre asymmetrischen Abgleichs-Experimente verwendeten Fleming et al. (2003) computergenerierte kugelförmige Objekte als Reizmuster, die mit Hilfe eines Raytracers erstellt wurden. Als Beleuchtungsszenen wurden hier solche komplexen Lichtkarten verwendet, wie sie oben bereits beschrieben wurden (s. Abb. 2.8). Bei diesen Lichtkarten handelte es sich zum Teil um realistische Beleuchtungen, die an verschiedenen Orten aufgenommen worden waren, zum Teil aber auch um künstliche, die eigens so konstruiert wurden, dass sie sich hinsichtlich ihrer statistischen Merkmale von realistischen Beleuchtungsszenen unterscheiden. Das Reflexionsverhalten der Oberfläche der Kugel wurde nach dem Ward-Modell (Ward, 1992) konstruiert, welches drei Parameter aufweist: Zwei dieser Parameter repräsentieren den Anteil der diffusen und der spiegelnden Komponente an der Gesamtzusammensetzung der Reflexionseigenschaft, durch einen dritten wird die Rauheit der Oberfläche repräsentiert, der auf perzeptueller Seite mit der Schärfe des Spiegelbildes korreliert. Für die Festlegung der Reflexionseigenschaft ihrer Vorgabe-Reizmuster wurden nur der Anteil der spiegelnden Komponente (10 Stufen) und der Grad der Rauheit der Oberfläche (11 Stufen) variiert, der Anteil der diffusen Komponente wurde konstant gehalten. Die so in ihrer Glanzbeschaffenheit festgelegten Objekte reflektierten die durch die sphärischen Lichtkarten repräsentierte Umgebung damit in unterschiedlicher Weise. Da die Autoren annehmen, dass das visuelle System für das Erkennen der Reflexionscharakteristik ausschließlich die lokalen Informationen, welche von den Spiegelbildern auf der Oberfläche ausgehen, verwendet, wurden die kugelförmigen Reizobjekte aus ihrem durch die Lichtkarten gebildeten Kontext herausgenommen und vor einem neutralen Umfeld dargeboten¹⁰(vgl. Abb. 2.9). Für den Vorgabereiz wurde nun jeweils eine der verschiedenen (realistischen wie künstlichen) Lichtkarten verwendet. Aufgabe der Beobachter war es, für einen ebenfalls kugelförmigen Abgleichsreiz unter einer realistischen Standard-Lichtkarte, die Werte für die spiegelnde Komponente und den Rauheits-Parameter nach dem Ward-Modell so einzustellen, dass die wahrgenommene Reflexionsbeschaffenheit der Abgleichskugel der der Vorgabekugel glich.

Die Ergebnisse aus diesem Abgleichsexperiment zeigten nun, dass das Erkennen der Reflexionseigenschaft von Objektoberflächen offenbar tatsächlich besser gelingt, wenn realistische Beleuchtungsszenen vorliegen. Zwar stellten die Beobachter in ihrem Experiment unter der Bedingung „realistische Beleuchtung“ in der Regel keinen perfekten Abgleich der entsprechenden Parameterwerte her, so dass zumindest unter den von den Autoren gewählten Darbietungsbedingungen (monokular und dekontextualisierte Reizmuster) keine perfekte Glanzkonstanz auftrat. Die Abweichungen der Einstellungen von den Vorgabewerten waren im Durchschnitt jedoch deutlich geringer, wenn der Vorgabereiz unter Verwendung einer realistischen Lichtkarte konstruiert wurde, als wenn eine künstliche Beleuchtungsszene zur Reizgenerierung verwendet wurde.

In weiteren Demonstrationen konnten die Autoren zusätzliche Hinweise darauf finden, dass

¹⁰Die Autoren vermuten also keinen Mechanismus, nach dem das visuelle System die auf einer Oberfläche auftretenden Muster mit der Umgebungsszene abgleicht, um so zu prüfen, ob sich die Struktur der Muster mit der Struktur der Umgebung deckt (in diesem Falle müsste das visuelle System natürlich auch die 3D-Geometrie der Oberfläche mit einbeziehen, da sich diese auf die Struktur der Spiegelbilder auswirkt). Wie sie an einem Beispiel demonstrieren konnten, scheint das visuelle System als Ausgangsinformation tatsächlich allein die lokale Intensitätsverteilung auf der Oberfläche des Objekts heranzuziehen: Dasselbe, nach dem beschriebenen Verfahren konstruierte Objekt wurde einmal in seinem ursprünglichen Kontext gezeigt, dann aber (unter Beibehaltung der Textur auf der Oberfläche) in weitere Umgebungsszenen eingebettet, die sich stark vom Ursprungskontext unterschieden. Obwohl die Spiegelbilder nun offenbar nicht zu den fremden Umgebungsszenen passten, wurde das Objekt als unverändert glänzend wahrgenommen (vgl. auch Hartung & Kersten, 2002).

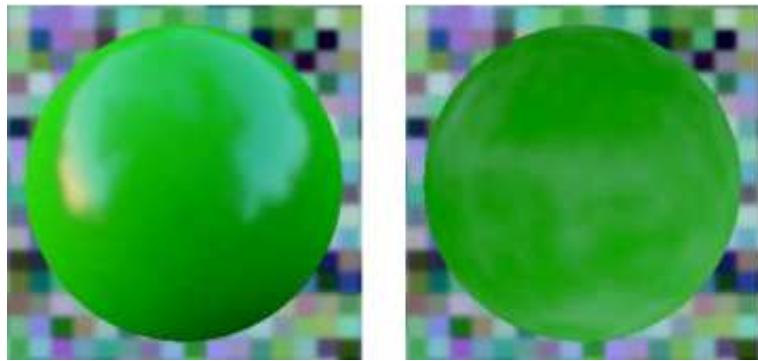


Abbildung 2.9: Zwei Reizbeispiele, wie sie von Fleming et al. (2003) verwendet wurden. Links: Kugel mit teils spiegelnder Reflexionsbeschaffenheit, hergestellt unter der Verwendung der Beleuchtungskarte „Campus“. Rechts: Dieselbe Kugel wie links, diesmal jedoch unter Verwendung einer künstlichen Lichtkarte gerendert [übernommen aus: Fleming et al., 2003, Abb. 19].

das visuelle System bestimmte Häufigkeitsverteilungen von Intensitäten verlangt, um Farbverteilungen auf Oberflächen als Spiegelbilder anzusehen: So zwangen sie beispielsweise der Intensitätsverteilung einer realistischen Lichtkarte die Form des Pixel-Histogramms einer unnatürlichen Beleuchtung auf (ein solcher Prozess wird als ‚histogram matching‘ bezeichnet), mit dem Erfolg, dass das damit beleuchtete Objekt keinen Glanzeindruck mehr hervorrief. Umgekehrt wies ein Objekt, das ursprünglich unter einer künstlichen Beleuchtungsszene generiert wurde, einen gewissen Glanz auf, als das zugehörige Intensitätsmuster so transformiert wurde, dass es das Profil einer realistischen Lichtkarte annahm (weitere Hinweise für die Annahme, dass das visuelle System statistische Merkmale aus der proximalen Intensitätsverteilung heranzieht, um diese für die Schätzung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche zu nutzen, fanden auch Nishida & Shinya, 1998; Motoyoshi, Nishida & Adelson, 2005 und Motoyoshi, Nishida, Sharai & Adelson, 2007).

Dass es sich beim Vorliegen einer entsprechenden Häufigkeitsverteilung von Pixelintensitäten jedoch allenfalls um eine notwendige, nicht aber um eine hinreichende Bedingung handelt, um damit auf die Reflexionseigenschaft einer Oberfläche zu schließen, wurde auch von Fleming et al. (2003) hervorgehoben. Neben derartigen einfachen Bildstatistiken scheinen nämlich auch strukturelle oder konfigurative Merkmale der räumlichen Intensitätsmuster eine Rolle zu spielen, wie z.B. das Vorhandensein von Mustern, die auf eine dominante Beleuchtungsrichtung hinweisen oder ausgedehnte Konturen, die die Formen von identifizierbaren Objekten wiedergeben. Und gerade wenn es darum geht, die exakte Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche zu erkennen und nicht einfach nur darum, zu entscheiden, ob sie überhaupt in irgendeinem Ausmaß spiegelnde Eigenschaften besitzt, scheint insbesondere die Schärfe von Kanten, mit denen sich die einzelnen Muster der Spiegelbilder von ihren Nachbarregionen abgrenzen, ein starkes ‚diagnostisches Merkmal‘ darzustellen (vgl. Abschnitt 2.3).

Die Bedeutung von Bewegungsinformationen

Aufgrund der zu einem gewissen Anteil spiegelnden Reflexionscharakteristik geschieht es, dass wenn sich die relative Position von Beobachter, Objekt oder Lichtquelle ändert, auch die Glanzpunkte oder Spiegelbilder auf einer glänzenden Oberfläche an einer anderen Position erscheinen, bzw. andere Bereiche der Umgebung zum Auge des Beobachters gespiegelt werden. Dass solche Bewegungsinformationen möglicherweise vom visuellen System aufgegriffen werden, um auf die Glanzbeschaffenheit einer Objektoberfläche zu schließen, wurde bereits von Helmholtz (1867),

Hering (1879) und Kirschmann (1892, 1895) angenommen (s. auch Preston, 1931, der den monokularen Glanz vollständig mit sukzessivem Kontrast in Beziehung setzt): „*Den Eindruck des Glanzes können übrigens auch monocular gesehene Bilder und Objecte hervorbringen, zum Beispiel dadurch, dass ihre Beleuchtung bei Bewegungen des Beobachters sich schnell verändert [...] J. Ferner erscheinen bewegte Objecte glänzend, wenn die Beleuchtung ihrer einzelnen Theile schnell hintereinander sich verändert, wie es zum Beispiel bei einer bewegten Wasserfläche erscheint.*“ (Helmholtz, 1867, S. 785). Anders verhält es sich bei solchen Objekten, die ausschließlich diffus das einfallende Licht reflektieren: Da bei der diffusen Reflexion keine Abhängigkeit von der Position des Beobachters besteht – der Anteil der rückgestrahlten Energie an der betreffenden Stelle eines Objektes (neben der Reflektanz) nur von dem Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Lichtrichtung abhängt – erscheint einem Beobachter, wenn er ein solches Objekt betrachtet, dieselbe Stelle auf der Objektoberfläche von jeder Beobachtungsposition auch immer als gleich hell.

Nach Kirschmann (1892, S. 388) werden diese Unterschiede in der Beobachterabhängigkeit zwischen unterschiedlichen Reflexionstypen auch aktiv genutzt, um sich im Zweifelsfall der ‚tatsächlichen‘ Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche zu vergewissern: „*Wenn wir uns überzeugen wollen, ob ein Gegenstand wirklich glänzt oder aus andern Gründen ungewöhnliche Helligkeitsdifferenzen aufweist, so machen wir ganz instinctiv Bewegungen mit dem Kopfe, um aus der Constanz oder Inconstanz der Lage und Intensität der in Frage kommenden Stellen auf das eine oder das andere zu schließen.*“ Aufschlussreich in diesem Zusammenhang ist auch eine Beobachtung, die von Zocher und Reinicke (1925, S. 19) angestellt wurde: „[...] Noch eine weitere Beobachtung einer sehr groben Glanztäuschung, bei der das scheinbare Spiegelbild ein wirklicher Körper war, sei mitgeteilt. Durch die mit Wassertröpfchen schwach beschlagenen Fensterscheiben eines D-Zugs sah ich auf einer Fahrt in gebirgiger Gegend auf einer Anhöhe ein weißes Haus, und darunter schien sich eine große Wasserfläche zu befinden. Bei näherem Zusehen zeigte es sich jedoch, daß das vermeintliche Spiegelbild des Hauses ein weißer Kraftwagen war, der ungefähr mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Zug in der gleichen Richtung parallel zu ihm auf einer ziemlich tiefliegenden Straße fuhr.“ Wie diese Beschreibung zeigt, scheinen bestimmte Bewegungsreize hinreichend für das visuelle System zu sein, um ein Glanzperzept zu erzeugen (zumindest wenn der entsprechende Kontext, hier das weiße Haus, welches offenbar als das gespiegelte Objekt aufgefasst wurde, eine solche Glanzinterpretation anbietet).

Weiter scheinen einige Spielarten des Glanzes erst durch solche Bewegungseinflüsse aufzutreten oder zumindest begünstigt zu werden, wie zum Beispiel das „Glitzern“, welches bei relativ feinkörnigen Bruchflächen von Objekten mit einer kristallartigen Struktur, wie beispielsweise bestimmten Mineralienarten, vorkommt (vgl. Oppel, 1857), oder das „Funkeln“, welches von Bühler (1922, S. 160) als ein „[...] bewegtes Auf- und Ableuchten [...]“ beschrieben wird und das beispielsweise Diamanten zeigen.

Obwohl es nun bereits als eine ausgemachte Sache erscheint, dass durch Bewegung vermittelte Information zur Glanzwahrnehmung beiträgt, liegen hierzu bislang kaum systematische Untersuchungen vor. Eine eindrucksvolle Demonstration zu diesem Aspekt lieferten Hartung und Kersten (2002)¹¹:

Als Reizmuster verwendeten sie rotierende, komplexe Objekte in der Form einer Teekanne oder eines Croissants, die mithilfe eines Raytracers generiert wurden. Zum Teil wurde diesen Objekten eine stark spiegelnde Reflexionseigenschaft zugewiesen, wobei sie die durch eine realistische Lichtkarte repräsentierte Umgebung stark spiegelten (vgl. Abschnitt 2.4.1). Zum Teil wurde dasselbe Lichtkartenmuster dem Objekt als fest mit der Oberfläche verbundene Textur aufgeprägt. Als Einzelbilder präsentiert, wurde unter beiden Bedingungen das jeweilige Objekt als ein Körper

¹¹Das von Hartung und Kersten (2002) verwendete Material ist in Form von Videoclips im Internet unter <http://vision.psych.umn.edu/~kersten/kersten-lab/demos/MatteOrShiny.html> zu finden.

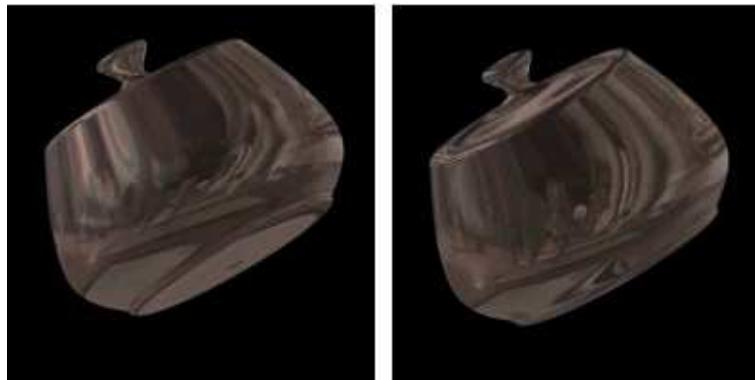


Abbildung 2.10: Zwei Einzelbilder aus einem Demonstrationsvideo von Hartung und Kersten (2002). Auf beiden Bildern erscheint das Objekt als glänzend, die Muster auf der Oberfläche als Spiegelbilder der Umgebung.

wahrgenommen, der einen starken Glanz aufwies (s. Abb. 2.10). Wurden die Objekte jedoch in einem dynamischen Verlauf gezeigt, so behielten nur die Körper ihren Glanz, die zuvor als stark spiegelnd reflektierend konstruiert worden waren und die demgemäß während der Rotationsbewegung einen typischen „optic flow“ der auf der Objektoberfläche erscheinenden Spiegelbilder zeigten. Bei der anderen Bedingung hingegen, bei der während der Rotationsbewegung die Textur fest an der Oberfläche des Objektes zu haften schien, wurde der Glanzeindruck augenblicklich zerstört und die Muster auf den Objekten erschienen nun als matte Einfärbungen. Wie diese Demonstration zeigt, scheint das visuelle System also tatsächlich die Relativbewegungen zwischen dem Objekt und den darauf erscheinenden Mustern zu berücksichtigen, um die Reflexionseigenschaften der Oberfläche zu beurteilen.

Eine neuere Untersuchung von Sakano und Ando (2008) hat sich mit der Frage beschäftigt, ob das visuelle System Bewegungsinformationen, die durch eine stetige Ortsveränderung des Beobachters relativ zu einer zum Teil spiegelnd reflektierenden Oberfläche erzeugt werden, bei der Wahrnehmung der Glanzbeschaffenheit dieser Oberfläche berücksichtigt. Für ihre Experimente verwendeten sie komplex gewölbte, computergenerierte Oberflächen, die denen ähnelten, die in den Experimenten der vorliegenden Arbeit benutzt wurden (vgl. Abb. 3.12). Diese Oberflächen wurden nach dem Beleuchtungsmodell von Phong (1975) mit einer zum Teil spiegelnden Reflexionscharakteristik ausgestattet und den Beobachtern auf einem Monitor präsentiert. Um zu überprüfen, ob Bewegungsinformationen eine Rolle bei der Glanzwahrnehmung spielen, wurde neben einer Kontrollbedingung, bei der das Reizmuster statisch blieb, eine dynamische Bedingung eingeführt: Mit Hilfe eines Apparates, der ausgehend von einem am Kopf des Beobachters befestigten Infrarot-Senders die Kopfbewegungen des Beobachters registrierte, wurde diese Bewegungsinformation fortwährend auf das Reizmuster übertragen, so dass die Orientierung der Oberfläche und die Glanzlichtpositionen auf diesem Reizmuster immer konsistent mit dem Bewegungsverhalten des Beobachters erschienen. Zusätzlich wurde die Art der Reizdarbietung variiert, wobei das Reizmuster entweder unter monokularen oder binokularen Sehbedingungen präsentiert wurde. Zunächst stellten die beiden Forscher ein Rating-Experiment an: Hier zeigte sich, dass unter monokularen Sehbedingungen das statische Reizmuster hinsichtlich seiner wahrgenommenen Glanzstärke im Durchschnitt nur etwa 20% des Glanzgehaltes zugesprochen wurde, welcher dem dynamischen Reizmuster zugewiesen worden war. Unter binokularen Sehbedingungen erreichten die Urteile der Beobachter dagegen einen durchschnittlichen Wert von 60% der wahrgenommenen Glanzstärke im Vergleich zum dynamischen Reizmuster. In einem zusätzlichen Abgleichs-

experiment wurden den Beobachtern simultan ein dynamisches und ein statisches Reizmuster dargeboten. Die Aufgabe der Beobachter bestand darin, jeweils das statische Reizmuster durch Manipulation der spiegelnden Komponente des Phong-Modells (vgl. Formel 3.4 im Experimentalteil der vorliegenden Arbeit) so einzustellen, dass es hinsichtlich seiner Glanzbeschaffenheit als perzeptuell ununterscheidbar im Vergleich zum dynamischen Reizmuster erschien. Unter monokularer Reizdarbietung zeigte sich, dass für die statische Oberfläche die spiegelnde Komponente des Phong-Modells im Schnitt ein Faktor von 1.8 benötigt wurde (bezogen auf den Referenzwert für die spiegelnde Komponente des dynamischen Reizmusters). Unter binokularer Darbietung lag dieser Faktor dagegen bei ca. 1.2, was zudem den Beitrag von binokularen Hinweisreizen zur Wahrnehmung von Glanz demonstriert (s. den folgenden Abschnitt 2.4.2). Insgesamt zeigen die Ergebnisse von Sakano und Ando (2008), dass das Vorliegen von über Bewegungsparallaxe gewonnenen Informationen offenbar zu einer Steigerung der wahrgenommenen Glanzstärke einer Oberfläche führt.

Zusammengekommen liefern die hier aufgeführten Beobachtungen, Demonstrationen und Untersuchungen starke Hinweise darauf, dass das visuelle System bei der Beurteilung der Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche auch von Bewegungsinformationen Gebrauch macht.

2.4.2 Binokulare Hinweisreize

Das Phänomen des stereoskopischen Glanzes

Wie bereits oben kurz angesprochen, nahm die wissenschaftliche Untersuchung von Glanz als wahrnehmungpsychologischem Gegenstand ihren Ausgang mit H. W. Dove (1850, 1853, 1859, 1861). Dove fertigte perspektivische Linienzeichnungen von geometrischen Körpern an, wobei er einmal die Konturen eines Pyramidenstumpfes mit weißer Farbe auf schwarzem Grund malte und dann eine weitere Zeichnung derselben Figur anfertigte, diesmal jedoch mit schwarzer Farbe auf weißem Grund. Nachdem er diese beiden Zeichnungen beiden Augen getrennt dargeboten hatte, so dass sich diese stereoskopisch zu einem Perzept vereinigten, erhielt er „*einen höchst merkwürdigen Anblick.*“ (S. 173): Die Flächen der Figur wiesen im fusionierten Zustand einen Glanz auf, der an Graphit, Blei, oder auch Zinn erinnerte (vgl. Abb. 2.11).

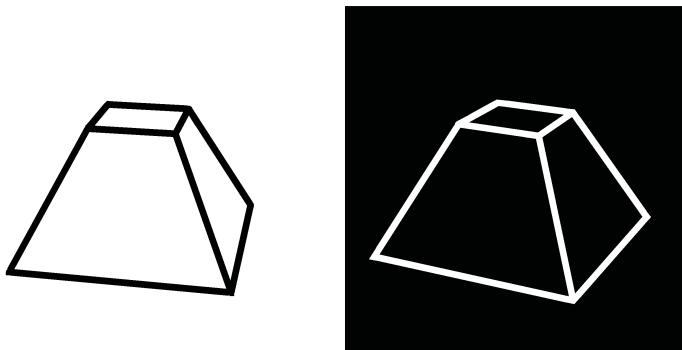


Abbildung 2.11: Reizmuster zur Herstellung eines stereoskopischen Glanzeindrucks (nach Dove).

Auffallend bei diesem Phänomen war außerdem, dass sich die beiden unterschiedlichen Flächenfarben offenbar nicht zu einem einheitlichen Grau vermischten, sondern die eine Farbe durch die andere hindurch gesehen wurde, womit die beiden Flächenfarben also als tiefengegliedert wahrgenommen wurden. Die helle Flächenfarbe schien dabei der dunklen aufzuliegen. Ähnliche Versuche stellte Dove auch mit stereoskopischen Reizen an, deren Halbbilder sich nicht in

der Helligkeit der Flächen sondern in der Farbigkeit unterschieden. Auch bei diesen Reizmustern stellte sich im fusionierten Perzept ein Glanzeindruck ein. Nachdem Dove nun unter Verwendung unterschiedlicher Stereoskope ausschließen konnte, dass das von ihm beobachtete Phänomen des stereoskopischen Glanzes¹² als Artefakt der benutzten optischen Geräte auftrat, bot er eine Erklärung an, die seiner Ansicht nach „[...] in der Structur des Auges selbst [...]“ (S. 176) gefunden werden könne. Als allgemeines Prinzip der Glanzwahrnehmung nimmt Dove zunächst Folgendes an (1850, S. 180; sowie 1853, S. 177-178):

„Unter allen Fällen, wo eine Fläche glänzend erscheint, ist es immer eine spiegelnde durchsichtige oder durchscheinende Schicht von geringer Mächtigkeit, durch welche man hindurch einen anderen Körper betrachtet. Es ist also äußerlich gespiegeltes Licht in Verbindung mit innerlich gespiegeltem oder zerstreutem, aus deren Zusammenwirkung die Vorstellung des Glanzes entsteht. [...] Die beiden auf das Auge wirkenden Lichtmassen wirken auf dasselbe aus verschiedenen Entfernungen. Indem nun das Auge sich dem durch die durchsichtige Schicht gesehenen Körper anpasst, kann das von der Oberfläche zurückspiegelnde Licht nicht deutlich gesehen werden und das Bewusstwerden dieser undeutlich wahrgenommenen Spiegelung erzeugt die Vorstellung des Glanzes.“

Dass nun auch bei den von ihm verwendeten stereoskopischen Reizmustern, die ja für sich genommen keine Tiefenschichtung aufweisen, ein Glanzeindruck auftritt, erklärt er mit demselben Akkomodationsmechanismus:

„Die Pupille erweitert sich im Dunkel und zieht sich bei wachsender Helligkeit zusammen, die Pupille ist aber auch kleiner bei dem Betrachten naher Gegenstände, als wenn man einen entfernten scharf beobachtet. Ein dunkler Gegenstand wird also unter ähnlichen äußerlich sichtbaren Veränderungen des Auges gesehen wie ein fernerer, ein weißer wie ein näherer.“ (Dove, 1850, S. 181).

Der Eindruck von Glanz entsteht nach Dove also immer dann, wenn das Auge zwei unterschiedliche Lichtmengen erfasst, die demselben Objekt zugeschrieben werden, jedoch als aus unterschiedlichen Tiefenschichten reflektiert empfunden werden. Dadurch, dass bei Fokussieren der einen Tiefenschicht dieser Objektoberfläche die andere immer als undeutlich erscheint, die beiden Reflexionsschichten also nicht zur Deckung gebracht werden können, werde „[...] dem Auge eine Aufgabe gegeben, die es nur in der unbestimmten Vorstellung des Glanzes zu lösen vermag.“ (Dove, 1861, S. 525). Bei Objekten, die physikalisch eine glatte Oberfläche aufweisen, glaubt Dove, dass diese sich aus zwei Schichten zusammensetzt: Einer diffus reflektierenden Schicht, die gewissermaßen auch die Eigenfarbe des Objekts ausmacht und einer dünnen, äußeren, lichtdurchlässigen Schicht, die der ersten wie ein Film aufliegt und das einfallende Licht regelmäßig reflektiert. Bei seinen stereoskopischen Reizmustern tritt nach Dove deshalb ein Glanzperzept auf, weil die Teilfigur mit den hellen Flächen vom visuellen System als räumlich vor der Figur des kontralateralen Teilbilds empfunden wird. Dies wiederum resultiert daraus, dass sich die Pupille des Auges, dem die hellen Flächen präsentiert werden, stärker zusammenzieht, als die Pupille des anderen Auges, dem die Figur mit den dunkleren Flächen dargeboten wird. Bei den Reizmustern, die einen rein chromatischen Unterschied zwischen den Flächen der Halbbilder aufwiesen, gelte nach Dove dasselbe Prinzip: Er nahm an, dass sich die Pupille auch bei unterschiedlichen chromatischen Lichtern (aufgrund ihrer unterschiedlichen Brechbarkeit) unterschiedlich stark weite. Das visuelle System interpretiert demnach das räumlich als vorgelagert empfundene Teilmuster

¹²Der Begriff des stereoskopischen Glanzes mag etwas irreführend erscheinen, da dieser in gewisser Weise impliziert, dass das Vorhandensein von Disparitäts-Informationen zu dem Glanzeffekt beiträgt. Tatsächlich lässt sich dieses Glanzphänomen aber auch mit einfacheren Reizmustern herstellen, die keine Disparitäts-Informationen enthalten (s. z.B. weiter unten die in den berichteten empirischen Untersuchungen verwendeten Reizmuster), so dass es sinnvoller wäre, von einem *binokularen* oder *haploskopischen* Glanz zu sprechen. Da dieser Begriff aber seit jeher, unabhängig von der Art der verwendeten Reizmuster, mit allen zu diesem Bereich gehörenden Phänomenen verbunden wird, soll er auch hier weiter verwendet werden.

als die regelmäßig reflektierende Schicht und das andere Teilmuster als die diffus reflektierende Schicht derselben Objektoberfläche. In allen Fällen ist es nach Dove somit das Unvermögen des Auges, die beiden Lichtmengen aufgrund ihres als unterschiedlich empfundenen Tiefenursprungs zu vereinigen, das letztlich die Vorstellung von Glanz bewirkt.

Das Phänomen des stereoskopischen Glanzes wurde in den folgenden Jahren nach der Entdeckung durch Dove von vielen weiteren Forschern aufgegriffen und repliziert. Während der Befund, dass sich bei stereoskopischer Vereinigung von Reizmustern mit unterschiedlichen Helligkeiten (bzw. Farbtönen) ein Glanzeindruck zeige, von allen bestätigt werden konnte, gab es jedoch nur wenige, die sich der von Dove mitgelieferten „Akkommodationstheorie“ als Erklärung für dieses Phänomen anschließen wollten. Zu den Befürwortern der Doveschen Theorie zählt Rood (1861)¹³. Rood stellte zunächst eine Reihe von Experimenten an, wofür er mithilfe eines Stereoskops unterschiedliche Farbfelder mit verschiedenen Metallfolien kombinierte. Auf diese Weise gelang es ihm, charakteristische Glanzerscheinungen herzustellen, die Goldglanz, Kupferglanz, Graphitglanz, oder sogar Schokoladenglanz aufwiesen. Eine Bestätigung für die Dovesche Theorie glaubte Rood vor allem in den Ergebnissen eines Experiments gefunden zu haben, bei dem er ein gelbes Farbfeld mit einem achromatischen Farbfeld haploskopisch kombinierte, wobei er für das achromatische Feld unterschiedliche Graustufen wählte. Glichen sich die beiden so kombinierten Farbfelder nämlich in ihrer Helligkeit an, so wurde auch die Glanzempfindung zunehmend schwächer (da nach dieser Theorie bei einer Annäherung der Helligkeiten der beiden monokularen Reize auch die wahrgenommene Tiefendifferenz zwischen ihnen abnahm). In weiteren Experimenten gelang es Rood nach eigenen Angaben, auch monokular einen Glanzeindruck herzustellen: Hierzu benutzte er einen Episkotister, also eine rotierende farbige Scheibe, aus der in regelmäßigen Winkelabständen Sektoren gleicher Größe ausgespart waren. Hielt er nun in einem Abstand hinter diese rotierende Sektorscheibe einen dunkleren Farbstreifen, so stellte sich auch hier ein Glanzeindruck ein (Rood gibt jedoch an, dass dieser Effekt sehr schwach gewesen und von vielen Beobachtern übersehen worden sei; siehe aber auch Bancroft & Allen, 1925, S. 575-576, die einen ähnlichen Effekt berichten). Da hiermit also eine Situation geschaffen worden war, bei der eine dunkelfarbige Schicht räumlich hinter einer lichtdurchlässigen Schicht von höherer Intensität wahrgenommen wurde, kommt Rood auch hier in Übereinstimmung mit Dove zu dem Schluss, dass „*It would seem probable that in all cases where two masses of light reach a single eye, one passing through the other, particularly when there is any perception of their individuality, that the appearance of more or less lustre is produced [...] .*“ (S. 344).

Gegen diese Theorie sprach sich zunächst Brewster (1852, 1861) aus. Er glaubte nicht, dass das Phänomen des stereoskopischen Glanzes mit einer physikalischen Eigenschaft in Beziehung gesetzt werden könne, nach der eine Objektoberfläche aus unterschiedlichen Tiefenschichten unterschiedliche Lichtmengen reflektiert. Vielmehr sei der stereoskopische Glanz eine vollkommen eigenständige Erscheinung, die keinerlei Bezug zu irgendwelchen physikalischen Regularitäten aufweise. Brewster sieht in diesem Phänomen eher ein Kunstprodukt, welches von dem binokularen Wettstreit zwischen den unterschiedlichen Netzhautsignalen herrührt: Sobald man den beiden Augen bezüglich ihrer Form oder Farbe hinreichend unterschiedliche Reizmuster darbietet, komme es zu einer Rivalität zwischen diesen beiden diskrepanten Signalen. Hierbei gelingt es dem visuellen System nicht, beide Netzhautsignale zu einem stabilen Perzept zu verschmelzen, so dass in der Wahrnehmung ein ständiger Wechsel auftritt, bei dem mal das Netzhautbild des einen, mal das des anderen Auges dominiert und manchmal auch eine Kombination aus beiden Signalen entsteht

¹³Rood selbst führt auch Ruete (1860) als einen Vertreter dieses Erklärungsmodells an, der, ähnlich wie Wundt (1862), ebenfalls einen Glanzeindruck mit einer phänomenalen Tiefenspaltung in zwei unterschiedliche Schichten in Verbindung brachte. Wie sich im folgenden Abschnitt jedoch zeigen wird, ist hiermit ganz offensichtlich nicht die Trennung in zwei unterschiedliche Oberflächenkomponenten gemeint, so dass Ruete in diesem Sinne nicht als Fürsprecher des Doveschen Modells gelten kann.

(zur binokularen Rivalität s. z.B. Blake & Logothetis, 2001; Blake, 1989; Dayan, 1998; Wolfe, 1986; Logothetis, Leopold & Sheinberg, 1996). Die Erscheinung des stereoskopischen Glanzes sieht Brewster (1861, S. 31) daher verursacht durch eine Art Übersprungshandlung auf physiologischer Ebene: „[...] it is therefore not an unreasonable conclusion that, in the dazzle produced by this struggle of flickering sensations, something like lustre may be produced.“¹⁴.

Oppel (1854) bot schließlich eine Erklärung für dieses Phänomen an, die bis vor kurzem noch allgemeine Anerkennung erfuhr (s. z.B. Sheedy & Stocker, 1984; neuere Befunde von Anstis, 2000, scheinen diesem Ansatz jedoch zu widersprechen, s.u.). Den Doveschen Erklärungsansatz hielt Oppel allein schon deshalb für unhaltbar, weil die Tiefendifferenz zwischen den beiden Oberflächenschichten im Allgemeinen wohl kaum so groß sein dürfte, um einen merklichen Unterschied in dem Akkomodationsgrad des Auges zu erzeugen, so dass die jeweils nicht fokussierte Schichtebene als verschwommen erscheint. Er stellte sich zunächst die Frage, unter welchen ökologischen Bedingungen denn der Fall auftritt, bei dem „[...] eine und dieselbe Fläche eines gesehenen Körpers von dem linken Auge weiß und von dem rechten schwarz (oder überhaupt in viel dunklerer Färbung) erblickt wird?“ (S. 53). Er fand, dass dies gerade bei Objekten mit glatter Oberfläche der Fall sei: Aufgrund der Reflexionscharakteristik glatter Oberflächen, die das einfallende Licht ja zu einem gewissen Grad regelmäßig reflektieren, kommt es vor, dass korrespondierende Netzhautstellen von demselben Punkt auf der Oberfläche unterschiedliche Lichtmengen empfangen. Helmholtz (1867, S. 783), der nach eigenen Angaben unabhängig von Oppel denselben Erklärungsansatz formulierte, beschreibt eine derartige Situation wie folgt (vgl. hierzu auch Abb. 2.12): „[...] Unter diesen Umständen wird es oft vorkommen, dass eines unserer Augen sich in der Richtung des zurückgeworfenen Lichts befindet, das andere nicht. Dem ersten erscheint dann die betreffende Fläche stark erleuchtet, dem anderen schwach. Sehen wir also im Stereoskop an dem Bilde eines Körpers eine Fläche mit beiden Augen verschieden stark erleuchtet, so erhalten wir einen sinnlichen Eindruck, den in Wirklichkeit nur glänzende, aber niemals matte Flächen hervorbringen können, und die betreffende Fläche erscheint uns deshalb glänzend.“

Anders als Dove, der in phänomenalem Glanz allgemein nichts anderes als „ein Beiwerk“ sah (Dove, 1850, S. 180), weil dieser „die Sache, auf die es ankommt scharf ins Auge zu fassen verhindert“ (nämlich die simultane Tiefenlokalisierung der beiden Oberflächenschichten), glauben Oppel und Helmholtz, dass in der Erscheinung des stereoskopischen Glanzes eine Heuristik zum Vorschein kommt, die das visuelle System nutzt, um auf eine bestimmte physikalische Eigenschaft von Objektoberflächen zu schließen: „[...] eben aus dieser Verschiedenheit des Reflexes [...] erkennt mein 'Auge' die Fläche als eine spiegelnde, leitet mein Verstand (unbewußt und unwillkürlich) das Urtheil ab: die Fläche glänzt.“ (Oppel, 1854, S. 54).

Dieser von Oppel und Helmholtz formulierte Ansatz wurde in der nachfolgenden Zeit als psychologisches Erklärungsmodell für das Phänomen des stereoskopischen Glanzes von nahezu allen Forschern auf diesem Gebiet akzeptiert. So schlossen sich diesem Ansatz beispielsweise Brücke (1861) und Bühler (1922) an, die aber beide darauf hinwiesen, dass diese Erklärung natürlich kein allumfassendes Modell für die Wahrnehmung von Glanz darstellen könne, da Glanz im Allgemeinen auch monokular wahrgenommen werde. Obwohl das visuelle System offenbar auch rein monokulare Hinweisreize heranzieht, um im distalen Reiz auf eine glatte Oberfläche zu schließen (siehe hierzu den Abschnitt 2.4.1), sieht Bühler (1922, S. 168) in der binokularen „Helligkeitsverschiedenheit“ jedoch den „klarsten Prototyp der Entstehungsbedingungen“ eines Glanzeindrucks.

¹⁴ Auch Burr, Ross und Morrone (1986), die einen Glanzeindruck mit dynamischen Reizmustern herstellen konnten, die aus sich überlagernden Sinustexturen bestanden, vermuten, dass „Perhaps it is true more generally that lustre is vision's response to two conflicting signals from one region of the visual field.“ (S. 65). Und auch Anstis (2000, S. 2555) schließt sich einer solchen, auf physiologischer Ebene angesiedelten Interpretation an: „All these phenomena [...] seem to involve competition between neural detectors which signal incompatible values of some visual property [...]“. Für ein monokulares Glanzphänomen („scintillating lustre“), dessen Entstehung die Autoren ebenfalls einem solchen neuronalen Konflikt zuschreiben, siehe Pinna, Spillmann und Ehrenstein (2002).

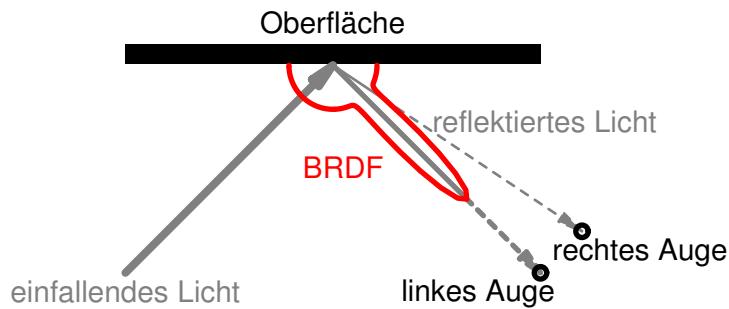


Abbildung 2.12: Aufgrund der Reflexionscharakteristik von glatten Oberflächen empfangen beide Augen eines Beobachters bei Fixation desselben Punktes auf dieser Oberfläche in der Regel unterschiedliche Lichtmengen.

Nachdem nun also eine Erklärung für die Erscheinung des stereoskopischen Glanzes lieferte schien, wurde in jüngerer Vergangenheit dazu übergegangen, die Reizbedingungen für dieses Phänomen einer quantitativen Untersuchung zu unterziehen. Czepluch (1976) untersuchte mit Hilfe eines haploskopischen Versuchsaufbaus, bei welchem Leuchtdichteverhältnis zwischen zwei, den Augen getrennt dargebotenen Reizelementen maximaler Glanz wahrgenommen wird, bzw. ab welchen Leuchtdichteverhältnissen dieser nicht mehr auftritt. Seine Rezmuster bestanden dabei jeweils aus einer zentralen Kreisscheibe (mit einem Durchmesser von 2.2 Grad visuellem Winkel), die von zwei Ringen umgeben war (mit einem äußeren Radius von 4.3 Grad, bzw. 6.5 Grad Sehwinkel, s. Abb. 2.13).

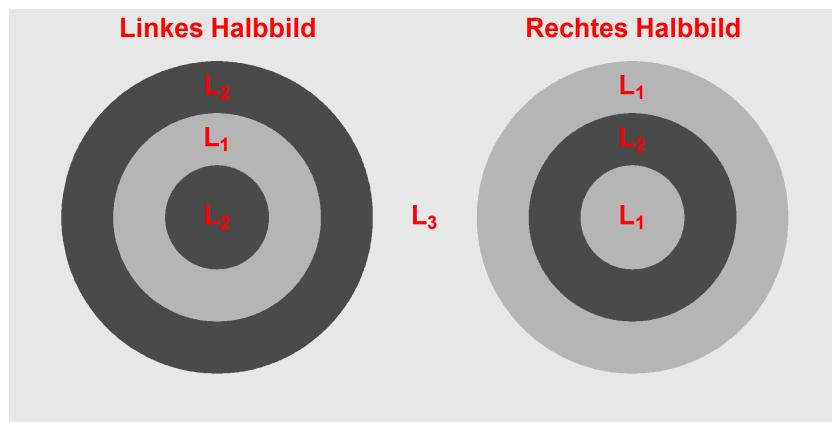


Abbildung 2.13: Reizaufbau bei Czepluch (1976). Verwendet wurden aus Ringstrukturen bestehende Rezmuster, bei denen angrenzende Reizelemente mit 2 unterschiedlichen Lichtern erzeugt wurden (L_1 und L_2). Die Leuchtdichtezuordnungen korrespondierender Reizelemente war dabei zwischen den Augen vertauscht. Mit Hilfe eines dritten Lichtes (L_3) wurde die Intensität des Hintergrundes erzeugt.

Die Rezmuster wurden insgesamt mit drei unabhängig regulierbaren Diaprojektoren hergestellt. Dabei wurde jeweils dem äußeren Ring und der zentralen Scheibe eines Halbbildes die-

selbe Leuchtdichte zugewiesen, der mittlere Ring hingegen wurde von einer zweiten Lichtquelle erzeugt. Zwischen den beiden Halbbildern wurde diese Leuchtdichtezuordnung außerdem vertauscht, so dass korrespondierende Reizelemente immer von unterschiedlichen Projektoren ihren Intensitätswert erhielten und die Leuchtdichten der zentralen Scheibe und des äußeren Ringes des einen Halbbildes immer identisch mit der Leuchtdichte des mittleren Ringes des anderen Halbbildes waren. Das Umfeld, in welches diese Ringmuster eingebettet waren, wies dabei für beide Halbbilder immer dieselbe Leuchtdichte auf (L_3 in Abb. 2.13). In einem ersten Experiment wurde eine der beiden zu den Ringmustern gehörenden Leuchtdichten konstant gehalten (L_1 in Abb. 2.13), während die andere frei variiert werden konnte (L_2 in Abb. 2.13). Während die Leuchtdichte von L_2 nun beispielsweise stetig von $20 \frac{cd}{m^2}$ bis zu einem maximalen Intensitätswert von $320 \frac{cd}{m^2}$ erhöht wurde, hatte der Beobachter anzugeben, wann sich für ihn bestimmte Wahrnehmungseindrücke einstellten, die wiederum mit einem numerischen Wert für die empfundene „Glanzstufe“ kodiert wurden: War für Werte von $L_2 < L_1$ das Leuchtdichteverhältnis L_2/L_1 zu niedrig (der Intensitätskontrast zwischen diesen beiden Lichtern somit sehr stark), so wurde in der Regel kein stereoskopischer Glanz wahrgenommen, da in diesem Fall der binokulare Wettstreit vorherrschte. Erst wenn bei zunehmendem Verhältnis zwischen L_2 und L_1 Glanz wahrgenommen wurde, wurde der zugehörige Leuchtdichtewert von L_2 mit der Glanzstufe -2 kodiert. Wenn dann bei weiterer Zunahme des Leuchtdichteverhältnisses zwischen den beiden Lichtern auch der Glanzindruck allmählich verschwand, wurde die Glanzstufe -1 vergeben. Die Glanzstufe 0 wurde dem Eindruck zugeordnet, der auftrat, wenn dem Beobachter der fusionierte Reiz am ungestörtesten erschien (dieser Fall trat ein, wenn das Leuchtdichteverhältnis zwischen L_1 und L_2 annähernd 1 war, die beiden Lichter somit ungefähr denselben Intensitätswert aufwiesen und die Ringstruktur des Reizmusters kaum noch oder gar nicht mehr wahrnehmbar war). Für Leuchtdichteverhältnisse zwischen L_2 und L_1 größer 1, stellte sich dann ab einem gewissen Intensitätswert für L_2 erneut ein Glanzindruck (Glanzstufe 1) ein, der wieder bei einem bestimmten Wert für L_2 zu einem maximalen Glanzindruck (Glanzstufe 2) führte, bevor wieder die binokulare Rivalität einsetzte und damit der Glanzindruck zerstört wurde. Abbildung 2.14 zeigt beispielhaft die Beziehung zwischen dem Leuchtdichteverhältnis L_2/L_1 und den Glanzstufen für einen Beobachter (hier für konstante Intensitätswerte für L_1 und L_3 von jeweils $175 \frac{cd}{m^2}$). Czepluch (1976) sieht hier einen Zusammenhang, der in guter Näherung als linear angesehen werden könne¹⁵.

Aus den in Abbildung 2.14 dargestellten Daten lässt sich nun weiterhin das Intensitätsintervall für das Licht L_2 ermitteln, innerhalb dessen ein stereoskopischer Glanzindruck bei dem Beobachter auftrat (dieses ergibt sich aus der Differenz der Leuchtdichten von L_2 zwischen den beiden Glanzstufen 1 und 2, bzw. -2 und -1). Für die hier verwendete konstante Leuchtdichte des Vorgabelichtes L_1 von $175 \frac{cd}{m^2}$ ergab sich eine Intervallbreite von $58 \frac{cd}{m^2}$ für L_2 (vgl. Abb. 2.14). Czepluch erhob nun für weitere Vorgabeleuchtdichten (L_1) die Intervallbreiten für die Leuchtdichte des Testlichtes (L_2), die zu einem Glanzindruck führten. Die Ergebnisse sind für drei unterschiedliche Beobachter in Abbildung 2.15 dargestellt.

Dargestellt sind hier für jede untersuchte Intensität des Vorgabelichtes L_1 (Ordinate) die Intervallbreiten ΔL_2 , innerhalb derer sich bei den Beobachtern ein stereoskopischer Glanzindruck zeigte (Abszisse). Die Daten wurden für jeden der drei Beobachter durch eine Vorhersagegerade gefittet. Gilt diese lineare Beziehung, dann bedeutet dies, dass die jeweils konstante Leuchtdichte L_1 immer in einem festen Verhältnis zur Leuchtdifferenz ΔL_2 steht. Aus dem Diagramm ist

¹⁵ Welche inhaltliche Bedeutung sich in diesem Fall aus einer solchen aufgefundenen linearen Beziehung zwischen physikalischer Reizintensität und psychologischem Wahrnehmungseindruck ergeben mag, ist nicht zu ersehen. Ob die hier verwendeten Beurteilungskategorien („kein Glanz“, „Glanz beginnt“, „maximaler Glanz“) überhaupt als äquidistant angesehen werden können, ist eine Frage, die von Czepluch offenbar gar nicht berücksichtigt wurde. Aber aus dieser Voraussetzung ergibt sich überhaupt erst der von ihm festgestellte lineare Zusammenhang zwischen den beiden Größen. Für die weitere Verwendung seiner empirischen Daten (wie in Abb. 2.15 dargestellt) ist dieser Skalierungsaspekt jedoch ohne Bedeutung.

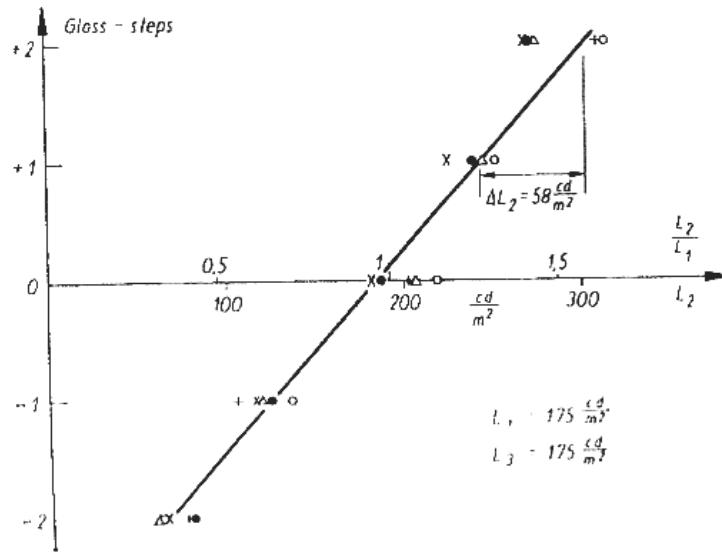


Abbildung 2.14: Ergebnisdiagramm aus Czepluch (1976). Dargestellt ist die Beziehung zwischen dem Leuchtdichtevehrhältnis L_2/L_1 und den Glanzbeurteilungswerten. Die Leuchtdichten für L_1 und das Hintergrundlicht L_3 lagen für dieses Datenbeispiel konstant bei $175 \frac{cd}{m^2}$.

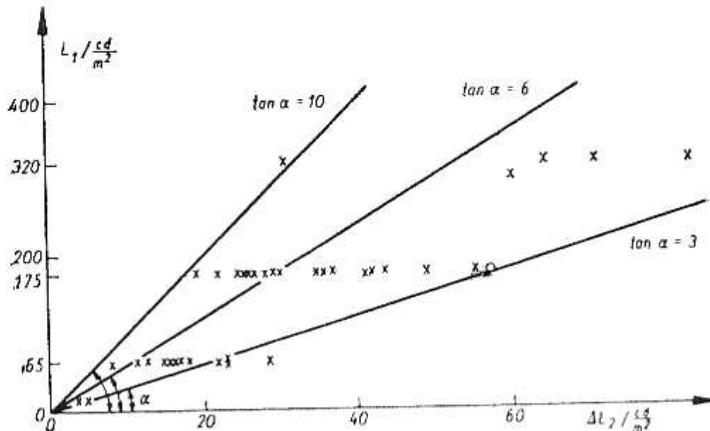


Abbildung 2.15: Ergebnisdiagramm aus Czepluch (1976). Für drei unterschiedliche Beobachter sind hier die Vorhersagegeraden für die als glänzend empfundenen Intensitätsintervalle ΔL_2 (Abszisse) in Abhängigkeit von der Vorgabeleuchtdichte L_1 (Ordinate) abgetragen.

ersichtlich, dass die Steigungen dieser Vorhersagegeraden beträchtliche Unterschiede aufweisen, was darauf hindeutet, dass eine starke interindividuelle Variationsbreite bezüglich des Bereichs ΔL_2 besteht. Wie Czepluch weiterhin zeigen konnte, hatte die Intensität des Umfeldlichtes (L_3 , vgl. Abb. 2.14), welche in einem Bereich zwischen 5 und $320 \frac{cd}{m^2}$ untersucht wurde, keine signifikante Auswirkung auf die ermittelten Kurvenverläufe.

In weiteren Experimenten untersuchte Czepluch (1976) zusätzlich, ob sich chromatische Unterschiede zwischen einzelnen Reizbestandteilen auf die Etablierung eines Glanzeindrucks aus-

wirken. Hier fand er zum einen, dass die bisher gefundenen Messergebnisse von Unterschieden in der Farbigkeit zwischen dem Umfeld und den Ringstrukturen nicht berührt wurden. Waren hingegen die beiden Halbbilder unterschiedlich gefärbt, so führte dies offenbar ab einem bestimmten Farbunterschied zu einer Zerstörung des Glanzeindrucks. Hier ermittelte Czepluch einen durchschnittlichen Farbabstand zwischen den Halbbildern von $\Delta E_{ab}^* \approx 10$ (Abstandsmaß nach dem CIELAB 1976 System, s. Wyszecki & Stiles, 1982, S. 166-168), bei dessen Überschreitung sich kein Glanzperzept mehr einstellte.

Pieper und Ludwig (1999, 2001, 2002) haben in mehreren Arbeiten einige Bedingungsfaktoren für das Auftreten des Phänomens des stereoskopischen Glanzes untersucht. Zunächst untersuchten sie die temporalen Voraussetzungen für das Auftreten dieser Erscheinung (Pieper & Ludwig, 1999; Ludwig, Pieper & Lachnit, 2007): In einem ersten Experiment wurden hierfür den Beobachtern die beiden monokularen Reizhälften nicht zeitgleich präsentiert, sondern alternierend, so dass zu jedem Zeitpunkt jeweils nur einem Auge der entsprechende Reiz dargeboten wurde. Sie fanden, dass sich bei einer Wechselsequenz von weniger als 10.1 Hz kein Glanzeindruck mehr etablierte. In einem weiteren Experiment wurden den Beobachtern ebenfalls alternierend die beiden Halbbilder dargeboten. Während die Präsentationsdauer für das jeweilige Reizmuster konstant bei 25 ms gehalten wurde, wurde zwischen einem Augenwechsel eine variable Pause eingelegt. Hier zeigte sich, dass Unterbrechungen von mehr als 20 ms zwischen einem Wechsel der Halbbilder nicht mehr zu einer Glanzempfindung führten. Wie die beiden Autoren außerdem zeigen konnten, unterscheiden sich diese zeitlichen Integrationswerte deutlich von denen, welche für die Ausbildung eines stereoskopischen Tiefeneindrucks mit querdisparaten Reizen nötig sind (hier wurde eine Wechselsequenz von 3 Hz und Unterbrechungen bis zu 51 ms zwischen einem Wechsel der Halbbilder toleriert, ohne den Tiefeneindruck zu zerstören).

In einer weiteren Arbeit untersuchten die beiden Autoren unter anderem, ob sich die Reizgröße auf den Glanzeindruck auswirkt (Pieper & Ludwig, 2001). Als Reize wurden hier schwarze Scheiben ($0.5 \frac{cd}{m^2}$) mit weißen Scheiben ($60 \frac{cd}{m^2}$), die von einem schwarzen Rand umgeben waren, haploskopisch kombiniert. Es zeigte sich, dass unter Verwendung solcher Reizmuster ein stereoskopischer Glanzeindruck nur dann auftrat, wenn die Ausdehnung der Figuren zwischen 0.5 und 1.5 Grad Schwenkel lag. Bei höherer Ausdehnung überwog die binokulare Rivalität (in einer anderen Arbeit (Pieper & Ludwig, 2002) berichten die Autoren hingegen, dass der Glanzeindruck bei ähnlichen Reizmustern auch dann noch erhalten blieb, wenn diese eine Ausdehnung von bis zu 3 Grad Schwenkel aufwiesen), bei geringerer Ausdehnung trat ein Phänomen auf, welches als „sieve effect“ bezeichnet wird und mit einer Tiefenempfindung einhergeht (s. Howard, 1995).

Weiterhin fanden die Autoren, dass die haploskopische Paarung dieser Reizmuster nicht zu einem Glanzeindruck führt, wenn sich die Figuren der beiden Halbbilder nur hinsichtlich ihrer Chromatizität unterscheiden (untersucht wurde hier ein Farbpaar, welches als „Magenta-Grün“ angegeben wird und mit einer Luminanz von $25 \frac{cd}{m^2}$ dargeboten wurde). Letzterer Befund spricht somit gegen die Angaben Doves, dass auch reine Farbunterschiede zwischen den stereoskopischen Reizelementen fähig sind, einen Glanzeindruck zu erzeugen. Schließlich untersuchten Pieper & Ludwig (2002), bei welchen Leuchtdichteunterschieden zwischen den haploskopischen Reizbestandteilen ein Glanzeindruck auftritt. Für ihre Experimente wählten sie erneut Reizmuster, bei denen die Figur des einen Halbbildes aus einer schwarzen Scheibe und die des anderen Halbbildes aus einer weißen Scheibe bestand, die von einem schwarzen Rand umschlossen war. Die Luminanz der schwarzen Scheibe wurde während des gesamten Experiments konstant gehalten ($0.7 \frac{cd}{m^2}$), die Leuchtdichte der weißen Scheibe wurde im Verlauf des Experiments zwischen 5 und $50 \frac{cd}{m^2}$ variiert. Die Autoren fanden eine mittlere Schwellenleuchtdichte von $9 \frac{cd}{m^2}$ für die weiße Scheibe (dies entspricht in Bezug auf die konstante Leuchtdichte der schwarzen Scheibe einem Michelson-Kontrast von 0.86), unterhalb derer das fusionierte Reizmuster als mattschwarz und ohne jeglichen Glanz wahrgenommen wurde.

Anstis (2000) verglich die Bedingungen für das Auftreten des von ihm behandelten monokularen Glanzphänomens mit denen, die für die Auslösung eines stereoskopischen Glanzeindrucks verantwortlich sind. Als Reizmuster wählte er einfache achromatische Infeld-Umfeld-Konfigurationen, bei denen die quadratischen Infelder den Beobachtern mit einer Seitenlänge von 0.75 Grad visuellem Winkel vor einem ausgedehnten Umfeld dargeboten wurden. Untersucht wurden Kombinationen von unterschiedlichen Infeldluminanzen, die bezüglich der maximal von dem Monitor erzeugbaren Intensität von $229 \frac{cd}{m^2}$ relative Leuchtdichtewerte von 15, 21, 30, 42, 60 und 84% aufwiesen. In seinen Experimenten wurden jeweils zwei Infeld-Intensitäten miteinander kombiniert, die in dieser Reihe benachbart waren. Zusätzlich wurden 5 unterschiedliche Umfeldintensitäten untersucht, die relativ zum maximalen Intensitätswert Werte von 18, 25, 35, 50 und 70% aufwiesen. Diese Infeld-Umfeld-Reize wurden den Beobachtern mittels eines Stereoskops dargeboten. Für die binokulare Variante wurde entsprechend jedem Auge ein Reiz mit einer anderen Infeldintensität präsentiert, für die monokulare Variante erhielten beide Augen denselben Input, wobei die beiden unterschiedlichen Infeldintensitäten temporal alternierend mit einer Wechselfrequenz von 16 Hz dargeboten wurden. Aufgabe des Beobachters war es, die Güte des wahrgenommenen Glanzes auf einer Beurteilungsskala von 0 („kein Glanz“) bis 10 („maximaler Glanz“) zu bewerten. Für beide Darbietungsarten ergab sich ein ähnliches Datenprofil (vgl. Abb. 2.16): Es zeigte sich, dass der wahrgenommene Glanz dann am höchsten ausgeprägt war, wenn beide Reizbestandteile umgekehrte Kontrastpolaritäten aufwiesen, wenn also relativ zur jeweiligen Umfeldintensität inkrementelle mit dekrementellen Infeldreizen (entweder zwischen den Augen oder über die Zeit) kombiniert wurden: „*Clearly it is the contrast reversal of the spot that makes it appear lustrous, in both the monocular and binocular conditions.*“ (Anstis 2000, S. 2553).

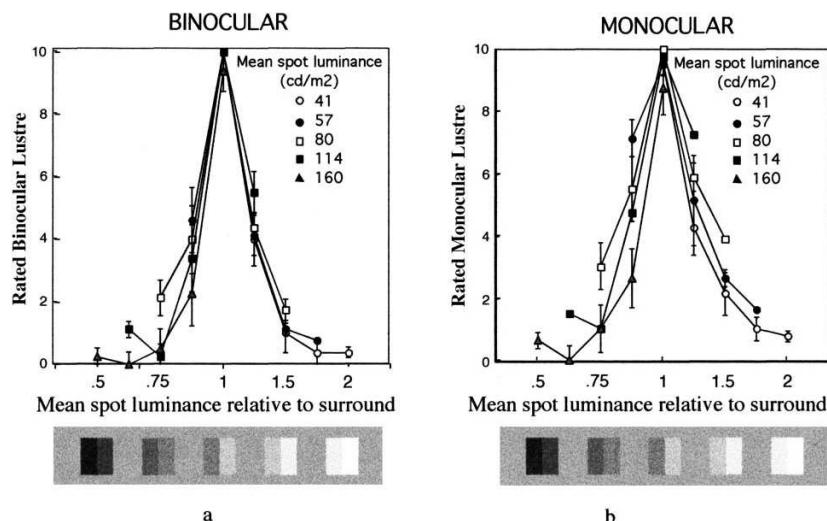


Abbildung 2.16: Ergebnisdiagramm aus Anstis (2000). Dargestellt sind für die beiden Präsentationsvarianten „binokular“ (die beiden Infeldintensitäten wurden stereoskopisch fusioniert präsentiert) und „monokular“ (die beiden Infeldintensitäten wurden hier alternierend mit einer Flickerfrequenz von 16 Hz dargeboten) die gemittelten Beurteilungswerte in Abhängigkeit von den über beide Infelder gemittelten Luminanzwerten (relativ zur Umfeldintensität). Die Beurteilungswerte wurden dabei auf einen Maximalwert von 10 normiert.

Tiefengliederung in zwei phänomenale Schichtkomponenten

Nach der (von mehreren Forschern zu Recht als unzulänglich kritisierten) Doveschen Glanztheorie liegt der Schlüssel für die Erklärung des Phänomens des stereoskopischen Glanzes ja in der Annahme, dass das visuelle System (bzw. bei Dove wohl tatsächlich noch das Auge selbst) mit Lichtanteilen aus unterschiedlichen Tiefenorten einer Oberfläche konfrontiert wird, die es nicht anders aufzulösen vermag, als eben in einer unbestimmten Vorstellung von Glanz (vgl. Abschnitt 2.4.2). Eine Tiefenzergliederung des Inputs wird auch von anderen Forschern auf diesem Gebiet als bedeutungsvoll für die Wahrnehmung von Glanz angesehen. Ihr Ansatz unterscheidet sich jedoch von dem Doveschen in der Auffassung darüber, in welche unterschiedlichen ursächlichen Schichtkomponenten sich der Input aufspaltet. Dove selbst glaubte ja, dass das Auge aufgrund eines Akkomodationsmechanismus nicht fähig sei, zwei angrenzende Oberflächenschichten mit unterschiedlichen Reflexionseigenschaften in der gleichen Tiefenebene zur Deckung zu bringen. Aus diesem Grund präsentierte sich ihm unfreiwillig eine tiefer gelegene Schicht mit diffuser Rückstrahlcharakteristik und, getrennt davon, eine zweite, der ersten aufliegenden Schicht mit vornehmlich spiegelnden Reflexionseigenschaften.

Wundt (1862) hingegen merkte an, dass das visuelle System bei Glanzreizen offensichtlich eine Trennung zwischen der zu einem gewissen Grad spiegelnden Objektoberfläche und der sich darin spiegelnden Szene vornimmt (s. hierzu aber auch Ruete, 1860, S. 73, der ebenfalls eine solche Schichtzerlegung anspricht). Betrachtet man beispielsweise beidäugig eine polierte Tischplatte, so erscheinen dem Betrachter die darin gespiegelten Umgebungslichter in einer hinter der Tischoberfläche liegenden Tiefenebene. Der wahrgenommene Tiefenort des Spiegelbildes hängt dabei von der Oberflächenwölbung des spiegelnden Objekts ab. Bei ebenen und konkav geformten Oberflächen erscheint das Spiegelbild hinter der Oberfläche, bei konkav gewölbten im Allgemeinen vor dieser (s. z.B. Kirschmann, 1895, S. 158-160; Gräper, 1922; Blake, 1985; Blake & Bülthoff, 1990). Das damit verbundene optisch-geometrische Prinzip lässt sich unmittelbar aus den bereits in Abbildung 2.12 dargestellten Zusammenhängen ableiten: Dadurch, dass ausgehend von einem Punkt auf einer zum Teil regelmäßig reflektierenden Oberfläche beide Augen im Allgemeinen unterschiedliche Lichtmengen erhalten, lässt sich leicht ersehen, dass die Punkte, von denen beide Augen annähernd dieselbe Lichtmenge empfangen, sich an zwei unterschiedlichen Orten auf der spiegelnden Oberfläche befinden (s. Abb. 2.17). Fokussiert der Betrachter auf einen bestimmten Punkt auf der Oberfläche, so führt dies in der Regel dazu, dass ihm die gespiegelten Lichter als verschwommen erscheinen, wobei zusätzlich Doppelbilder auftreten können. Fokussiert er hingegen auf die gespiegelte Szene und bringt damit die beiden korrespondierenden Bildhälften zur Deckung, so erscheint ihm der wahrgenommene Tiefenort des Spiegelbildes als hinter der spiegelnden Objektoberfläche lokalisiert.

Nach Wundt wird die zu einem gewissen Grad spiegelnde Fläche jedoch nur dann als glänzend erlebt, wenn diese nicht tatsächlich in ausschließlicher Weise das Licht regelmäßig zurückwirft (vgl. auch Bühler, 1922, S. 158-159; sowie Zocher & Reinicke, 1925, S. 15). Ein idealer Spiegel würde demnach nicht als glänzend empfunden, weil die gespiegelte Szene dem Betrachter in diesem Fall so erschiene, als würde er sie direkt betrachten; das Vorhandensein einer spiegelnden Fläche würde ihm gar nicht gewahr werden: „*Wir nennen endlich einen Gegenstand glänzend, wenn wir, wie bei der Spiegelung, durch denselben andere Objecte wahrnehmen, wenn aber zugleich fortwährend der spiegelnde Gegenstand selber sich unserer Wahrnehmung aufdrängt.*“ (Wundt, 1862, S. 630).

Hering (1879, S. 576) sieht in einer solchen Trennung in zwei unterschiedliche phänomenale Schichten sogar die bedeutendste Bedingung für eine Glanzinterpretation: „*Soll sich Glanz zeigen, so muss eine Spaltung der Empfindung eintreten, bei welcher ein Theil der Empfindung in die Fläche als deren wesentliche Farbe, andere Theile aber als zufälliges auf oder vor der Fläche*

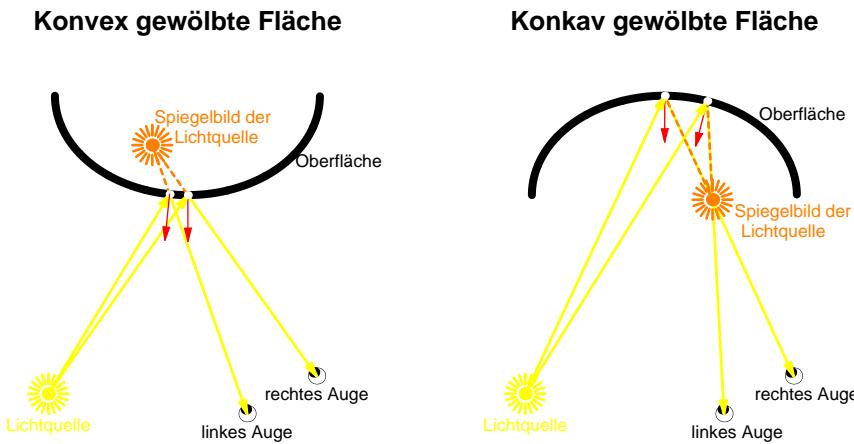


Abbildung 2.17: Aufgrund der Rückstrahlcharakteristik von Oberflächen mit zum Teil spiegelndem Reflexionsverhalten erhalten beide Augen das Spiegelbild eines Umgebungslichtes von verschiedenen Orten auf dieser Oberfläche. Bei Fokussieren auf das Spiegelbild erscheint der wahrgenommene Tiefenort des Spiegelbildes relativ zur spiegelnden Fläche in einer anderen Tiefenebene.

liegendes oder aus der Tiefe des Körpers kommendes Licht oder Dunkel gesehen werden.“¹⁶ Nun waren sich sowohl Wundt als auch Hering darüber im Klaren, dass Glanz ebenso bei monokularer Betrachtung wahrgenommen wird, jedoch glaubten beide Forscher, dass auch hierbei eine Schichtzerlegung stattfindet. Wie das visuelle System in solch einem Fall das Problem löst, d.h. wie es aus einer Mischempfindung die beiden ursächlichen Komponenten „spiegelnde Schicht“ und „gespiegelte Szene“ herauslöst, ist bisher jedoch noch nicht eingehend untersucht worden (Hering vermutete aber, dass bereits kleine, durch Bewegung herbeigeführte Veränderungen im Bedingungstriplett Oberflächenorientierung - Beobachterposition - Lichtposition eine Zerlegung begünstigen, vgl. hierzu die im vorangegangenen Abschnitt dargestellte Arbeit von Hartung & Kersten, 2002).

Das gemeinsame Auftreten einer räumlichen Schichttrennung mit einer Glanzwahrnehmung wird auch durch Befunde aus einer phänomenologischen Studie gestützt: In einer Arbeit von Bixby (1928) waren die Beobachter dazu aufgefordert, verschiedene Glanzreize hinsichtlich ihres phänomenalen Charakters zu beschreiben. Hier lassen sich häufig Beschreibungen finden, die belegen, dass die beiden kausalen Komponenten offenbar tatsächlich getrennt repräsentiert werden: „*There is a layer of light [...]*“, „*[...] a very tenuous surface, a very thin veil, and all the luster is behind that.*“ (S. 138), „*[...] the luster lies behind that surface and detached from it.*“, „*Wherever there is a surface, the luster lies behind it.*“, „*A sort of thin cloud of very luminous light suddenly looms up, quite apart from the surface [...].*“ (S. 139)¹⁷.

¹⁶In diesem Zusammenhang berichten z.B. Zocher & Reinicke (1925, S. 19), einen Glaneindruck bei „unbefangenen Beschauern“ ausgelöst zu haben, indem sie hinter einer matten, lichtdurchlässigen Trennscheibe, sowie vor dieser eine Lichtquelle platzierten. Da so die tatsächlich hinter der Trennscheibe befindliche Lichtquelle offenbar als das Spiegelbild der direkt sichtbaren Lichtquelle interpretiert wurde, erschien den Betrachtern die gesamte Trennscheibe als glänzende Fläche.

¹⁷Interessant ist bei diesen Beschreibungen allerdings, dass oft davon gesprochen wird, der Glanz an sich und nicht etwa die Spiegelbilder befänden sich hinter der Objektschicht. Wenn Bixby (1928, S. 139) diese Beobachterberichte so zusammenfasst, dass „*[...] luster is not a surface phenomenon [...]*“, so bleibt doch die Frage übrig, welchem Ding im

Wie außerdem aus Arbeiten zur Wahrnehmung anderer, aber wie mir scheint, doch verwandter Materialqualitäten hervorgeht, scheint auch dort der Aspekt der Tiefengliederung von Bedeutung zu sein. So berichtet z.B. Schumann (1920) von einem seltsamen Phänomen, das er als „Glasempfindung“ bezeichnet und das sich offenbar mit einfachsten stereoskopischen Tiefenreizen herstellen lässt. In einer weiterführenden Untersuchung von Möller (1925) zu diesem Glasphänomen zeigte sich, dass neben den in den Experimenten verwendeten Reizmaterialien, wie stereoskopische Landschaftsfotos oder dreidimensionale Drahtfiguren, auch ökologische Szenen (z.B. ein Schneetreiben oder der Rauch einer Zigarette) von den Beobachtern oft so erlebt wurden, als seien zumindest Teile der Szene mit einem Glascharakter behaftet. Wie Möller, der in seiner Arbeit die genauen Reizbedingungen für das Auftreten dieses Glasphänomens herauszustellen bemüht war, abschließend feststellt, scheint die einzige relevante Bedingung hierfür die Wahrnehmung von räumlicher Tiefe zu sein: „*Wherever there can be spatial perception, wherever there can be visual object-consciousness by way of localization, there may also be glass.*“ (Möller, 1925, S. 284)¹⁸.

Bisher gibt es nur sehr wenige Befunde, die Aufschluss über den möglichen Beitrag von binokularen Hinweisreizen zur Wahrnehmung von Glanz geben. Der Aspekt der Tiefengliederung von spiegelnder Oberflächenschicht und gespiegelter Umgebung spielte aber insbesondere in der Arbeit von Blake & Bülthoff (1990) eine gewisse Rolle. Die beiden Autoren gingen hier der Frage nach, ob dem visuellen System die oben angesprochenen optisch-geometrischen Prinzipien in irgendeiner Form zur Verfügung stehen und ob es diese nutzt, um ausgehend von der wahrgenommenen relativen Tiefenanordnung von Glanzpunkten auf die 3D-Geometrie von Objektoberflächen zu schließen. In einem der Experimente von Blake und Bülthoff wurden den Beobachtern stereoskopische Reizmuster in Form von entweder konkav oder konvex gewölbten Objekten auf einem Monitor vorgegeben. Die relative Disparität eines diesen Objekten zugefügten Glanzpunktes sollten die Versuchspersonen nun so einstellen, dass ihnen die Oberfläche des Objektes als maximal glänzend erschien. Die Autoren fanden (dies allerdings nur für die konvex gewölbten Objekte, wofür Begrenzungen in der Darstellbarkeit von konkaven Objekten auf Computermonitoren angeführt wurden), dass sich das Einstellverhalten der Versuchspersonen streng nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten richtete: Die relative Anordnung der Glanzlichter auf den monokularen Halbbildern wurde so gewählt, dass die gespiegelte Lichtquelle von dem Betrachter in einer hinter der konvex gewölbten Oberfläche gelegenen Ebene wahrgenommen wurde.

In einem zweiten Experiment zeigte sich, dass die relative Disparität eines Glanzlichtes, die

Sehraum der Glanz denn nun eigentlich angehören soll. Mir scheint, dass die Beobachter aufgrund ihrer (von ihnen auch immer wieder betonten) Schwierigkeiten mit der exakten Beschreibung ihres subjektiven Wahrnehmungseindrucks mit dem Begriff „luster“ tatsächlich die gespiegelte Lichtkomponente meinten. Meiner Auffassung nach resultiert phänomenaler Glanz erst aus dieser Trennung in die beiden Schichten, der dann aber allein der spiegelnden Oberfläche als Reflexionseigenschaft zugeschrieben wird.

¹⁸Erwähnenswert ist im Zusammenhang mit der Schumannschen „Glasempfindung“ ebenfalls, dass in Möllers Untersuchungen auch bei solchen Reizen ein Glascharakter auftrat, welche bei Dove (1850) und Helmholtz (1867) noch als klassische Reizanordnungen zur Auslösung eines Glanzperzepts dienten. Während bei Dove und Helmholtz der Materialcharakter ihrer stereoskopisch fusionierten perspektivischen Linienzeichnungen mit invertierten Helligkeiten gemeinhin als „Graphitglanz“ beschrieben wurde, berichten auch einige Versuchspersonen bei Bixby (1928, S. 162) bei gleichen Reizanordnungen von einem Glascharakter („*But we found, to our surprise, that there is no such thing as stereoscopic luster. What is typically seen is the grey side of a tridimensional figure overlaid by „glass“.*“). Auch Rood (1861) erinnert der Materialcharakter dieser Reizmuster eher an hochpoliertes Glas, denn an Graphit („*[...] Dove found that the pyramid appeared lustrous as though made of graphite. [...] To me it recalls rather the idea of highly polished glass.*“, S. 339, s. auch Rood (1862), wo er einen Versuch beschreibt, bei dem er unter Verwendung eines real tiefengegliederten Reizaufbaus einen Glaseindruck herstellen konnte). Schon Brewster (1971) erwähnte eine seltsame Erscheinung, die auftrat, nachdem er auf einer mit Blumenmotiven bedruckten Tapete zwei benachbarte Muster zur Fusion brachte: Offenbar dadurch, dass sich die beiden Muster minimal in ihren Details unterschieden, erschien ihm das fusionierte Perzept des Blumenmusters als räumlich gekrümmt und von einem silbern-transparenten Schleier bedeckt (S. 91, ähnliche Tapetenmuster verwendete später auch Möller als Reize, die wiederum als von einer Glasschicht bedeckt wahrgenommen wurden, s. Möller, 1925, S. 277ff.).

einem bezüglich seiner Wölbung zweideutigen Reiz (konkav oder konvex) zugefügt war, diese Ambiguität beim Betrachter aufzulösen vermochte. Blake und Bülthoff kommen nach diesen Befunden zu dem Schluss, „[...] that the early visual system 'knows' better, choosing interpretations that are broadly consistent with the physics of specular reflection.“ (S. 168, zum Internalisierungskonzept s. z.B. Shepard, 1994; aber auch Hecht, 2001).

Ähnliche Reizmuster, wie sie von Blake und Bülthoff (1990) verwendet wurden, benutzten auch Hurlbert et al. (1991) für ihre Rating-Experimente: Unter Verwendung eines stereoskopischen Reizaufbaus wurden dem Beobachter computergenerierte Reizmuster in Form von Ellipsoiden dargeboten, denen eine aus einem Punktmuster bestehende Textur aufgeprägt war und die entweder als konkav oder konvex gekrümmt präsentiert wurden. Die relative Disparität zwischen den Glanzlichtern der beiden monokularen Halbbilder wurde systematisch variiert und der Beobachter war dazu aufgefordert, unter jeder der vorgegebenen Glanzlicht-Disparitäten das Ausmaß der empfundenen „glossiness“ (wobei nicht eindeutig ist, ob damit die empfundene Glanzstärke oder etwa die wahrgenommene Authentizität des Glanzeindrucks gemeint ist) auf einer Prozent-skala anzugeben. Es zeigte sich, dass unter der Bedingung einer konkav gekrümmten Oberfläche relativ extreme Glanzlicht-Disparitäten, unabhängig vom Vorzeichen der Disparität (gekreuzte vs. ungekreuzte Disparität der Glanzlichter relativ zur Oberflächen-Disparität) zu hohen Urteilen hinsichtlich der „glossiness“-Skala führten, wohingegen unter der Bedingung einer konvexen Oberflächenkrümmung ausschließlich für gegenüber der Oberflächen-Disparität ungekreuzte Glanzlicht-Disparitäten hohe „glossiness“-Werte erreicht wurden. Obwohl diese Ergebnisse darauf hindeuten, dass der potentielle Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität in irgendeiner Form vom visuellen System bei der Einschätzung der Glanzerscheinung einer Oberfläche berücksichtigt wird, scheinen sie dennoch den Befunden von Blake und Bülthoff (1990) in gewisser Weise zu widersprechen: Wie dem Ergebnisdiagramm in Abbildung 2.18 zu entnehmen ist, führten unter beiden Krümmungsbedingungen vor allem solche Glanzlicht-Disparitäten zu hohen „glossiness“-Werten, die stark vom physikalisch korrekten Fall abwichen.

In einer Untersuchung von Obein, Knoblauch & Viénot (2004) arbeiteten die Forscher statt mit computersimulierten Reizen mit realistischen Glanzproben. Für ihre Experimente verwendeten sie mit schwarzer Farbe beschichtete Papierbögen, die sich hinsichtlich ihrer physikalischen Glanz-eigenschaften voneinander unterschieden. Diese Proben wurden den Beobachtern unter Verwendung eines auf doppeltem Paarvergleich aufbauenden Designs zur Glanzbeurteilung vorgelegt, wobei zusätzlich der Beleuchtungswinkel relativ zur Oberflächenorientierung sowie die Art der Betrachtung (monokular vs. binokular) variiert wurden. Zunächst fanden die Autoren, dass die subjektiven Glanzbeurteilungen in einer nicht-linearen Beziehung zu dem physikalischen Glanzmaß standen. Die Datenstruktur ihrer Ergebnisse legten ihrer Ansicht nach eine Einteilung der Glanzproben in drei unterschiedliche Bereiche nahe, die sie als „matte“, „mittlere“ und „hochglänzende“ Region bezeichneten. Für den „matten“ und für den „hochglänzenden“ Bereich schien dabei die Diskriminationsleistung hinsichtlich der Glanzbeschaffenheit am höchsten ausgeprägt. Die Autoren vermuten, dass hierbei unterschiedliche Hinweisreize von den Beobachtern herangezogen wurden, um die Glanzbeschaffenheit der Proben zu beurteilen: Während die zu dem „matten“ Bereich gehörigen Proben offenbar allein aufgrund ihrer relativen Helligkeit eingeschätzt wurden, schienen die unter dem „hochglänzenden“ Bereich zusammengefassten Proben offenbar unter dem Aspekt beurteilt worden zu sein, wie scharf sie die Umgebungslichter zu spiegeln in der Lage waren (vgl. die Kategorie „distinctness-of-image gloss“ (DOI) nach der Hunter-Klassifikation in Abschnitt 2.3). Bei einem Vergleich zwischen den beiden Beobachtungsvarianten zeigte sich dann, dass binokulare Hinweisreize offenbar nur bei solchen Reizen eine Rolle spielen, die als hochglänzend einzustufen sind und die damit eine mehr oder weniger scharfe Spiegelung von Umgebungslichtern erlauben. In einer weiteren Arbeit aus dieser Forschergruppe (Obein, Pichereau, Harrar, Monot, Knoblauch & Viénot, 2004), für die dieselben Reizmaterialien verwendet worden waren wie

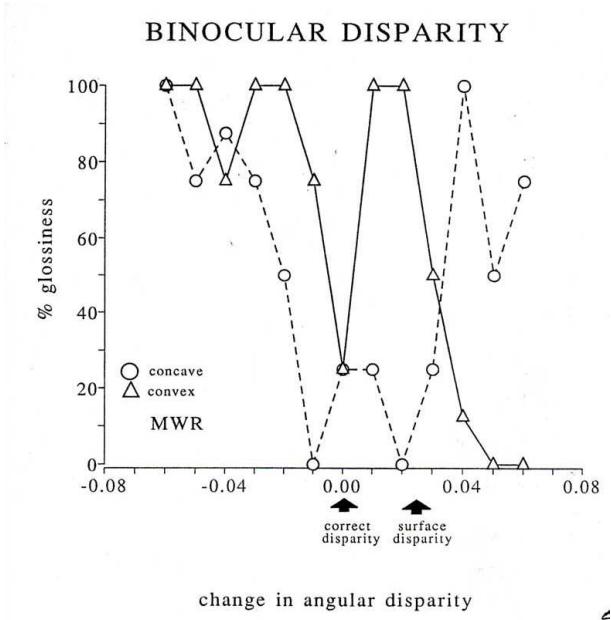


Abbildung 2.18: Ergebnisdiagramm der Untersuchung von Hurlbert et al. (1991). Getrennt für die beiden Krümmungsbedingungen „konkav“ und „konvex“ sind in Abhängigkeit von der Glanzlicht-Disparität die „glossiness“-Ratings für einen Beobachter abgetragen [übernommen aus dem zum Abstract von Hurlbert et al. (1991) gehörigen Poster, Abb. 9, abrufbar im Internet unter http://www.staff.ncl.ac.uk/anya.hurlbert/Pdf%20Files/ARVO_Poster1991.pdf].

in der oben beschriebenen Untersuchung, berichten die Autoren einen Zusammenhang zwischen dem Augenabstand ihrer Beobachter und dem Ausmaß der Berücksichtigung von binokularen Hinweisreizen bei der Glanzbeurteilung: Hierbei schienen die binokularen Hinweisreize um so stärker zur Anwendung zu kommen, je geringer der Augenabstand ihrer Beobachter war.

2.5 Fragestellungen

Wie die bisher gelieferte Übersicht über Arbeiten aus dem Bereich der Glanzwahrnehmung verdeutlicht haben mag, gibt es viele Forschungsstränge auf diesem Gebiet. Zum einen folgte man dem klassischen psychophysikalischen Ansatz der Skalierung, mit dem versucht wurde, einen perzeptuellen Glanzraum zu konstruieren (Abschnitt 2.3). Zum anderen wurde versucht, Hinweisreize aus dem raum-zeitlichen Intensitätsprofil der Netzhaut zu identifizieren, welche das visuelle System für die Wahrnehmung von Glanz nutzt (Abschnitt 2.4). Hierzu deuten schon einige Befunde darauf hin, dass das visuelle System offenbar von einer großen Bandbreite von Informationsquellen, wie binokularen und bewegungsinduzierten Hinweisreizen, Gebrauch macht, um auf die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche zu schließen. Weiter wurde auch schon der Frage nachgegangen, ob das visuelle System in der Lage ist, die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche auch unter wechselnden anderen Einflussgrößen auf distaler Seite, die sich auf die Struktur des proximalen Reizes auswirken, zu bestimmen und welche Informationsquellen das visuelle System speziell für solch eine Glanzkonstanzleistung nutzt. Doch obwohl die Erforschung des Glanzphänomens schon auf eine 150-jährige Entwicklung zurückblicken kann, ist der Bestand an systematischen empirischen Untersuchungen auf diesem Gebiet bis dato vergleichsweise gering. Mit der vorliegenden Arbeit wurde nun der Versuch unternommen, mittels eigener systematischer Experimente zu einem besseren Verständnis verschiedener Fragen aus dem Bereich der Glanzwahrnehmung beizutragen. Es wurden insgesamt drei unterschiedliche, aber dennoch, wie sich in der weiteren Darstellung in den folgenden Abschnitten zeigen wird, zusammenhängende Fragestellungen behandelt, die im Folgenden kurz umrissen werden sollen, bevor sie in den entsprechenden Abschnitten ausführlicher dargestellt werden.

Experimentalreihe I: Der Beitrag binokularer Hinweisreize zur Glanzwahrnehmung

Wie in einem früheren Abschnitt zum Beitrag von binokularen Informationen zur Glanzwahrnehmung bereits dargelegt wurde (s. Abschnitt 2.4.1), ging es in einigen Untersuchungen darum zu überprüfen, ob das visuelle System den potentiellen Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität nutzt – wie ursprünglich von Kirschmann (1895) angenommen. Der gegenwärtig wohl wichtigste empirische Befund zu dieser Frage stammt von Blake und Bühlhoff (1990), die in ihren Ergebnissen einen Hinweis darauf gefunden zu haben glaubten, dass das visuelle System in irgendeiner Form das physikalische Prinzip der spiegelnden Reflexion internalisiert hat und dieses bei der Glanzwahrnehmung nutzt. Wie im folgenden Abschnitt näher ausgeführt werden wird, ist es bei dem von Blake und Bühlhoff verwendeten Reizmaterial jedoch nicht vollkommen auszuschließen, dass der von ihnen berichtete Effekt auf andere Ursachen zurückzuführen ist. Weiterhin trat dieser Effekt ausschließlich unter einer bestimmten Reizbedingung auf, nämlich unter der, bei welcher konvex gewölbte Oberflächen verwendet wurden. Zudem scheinen auch die Ergebnisse von Hurlbert et al. (1991) den Schlussfolgerungen von Blake und Bühlhoff bezüglich der Frage, ob das visuelle System physikalische Reflexionsgesetze internalisiert hat, zu einem gewissen Grad entgegenzustehen. Zwar geben diese Pionierarbeiten von Blake und Bühlhoff (1990) und Hurlbert et al. (1991) schon einige Hinweise darauf, dass das visuelle System möglicherweise von dem Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität in irgendeiner Form Gebrauch macht. Jedoch ist in diesem Kontext bislang weder überprüft worden, auf welche perzeptuellen Glanzdimensionen sich die Verfügbarkeit der durch die Glanzlicht-Disparität bereitgestellte binokulare Information auf welche Weise auswirkt, noch, wie solche möglichen Effekte von der genauen Beschaffenheit der Glanzlichter abhängen.

In der ersten Experimentalreihe wurde direkt auf diese Fragen bezüglich des potentiellen Hinweisreizes der Glanzlicht-Disparität eingegangen. In den entsprechenden Experimenten zu dieser Experimentalreihe wurde daher zunächst genauer untersucht, ob, und wenn ja, wie sich sowohl

der Kontrast als auch die Ausdehnung, bzw. der Gradient von Intensitätsspitzen („Glanzlichter“) auf zwei unterschiedliche perzeptuelle Dimensionen, nämlich der wahrgenommenen Authentizität des Glanzes und der wahrgenommenen Glanzstärke, auswirken. Hierzu wurden komplexe, dreidimensionale computergenerierte Reizmuster verwendet, die so konstruiert waren, dass etwaige Mängel, wie sie möglicherweise in den Reizmustern der zitierten Vorgängeruntersuchungen enthalten waren, beseitigt wurden.

Experimentalreihe II: Die Invarianz der wahrgenommenen Reflexionseigenschaften einer Oberfläche unter wechselnden 3D-Strukturen

Es gibt einige Hinweise darauf, dass das visuelle System zur Bestimmung der Glanzstärke einer Oberfläche die räumliche Beschaffenheit der Glanzflecken, bzw. die Schärfe von Spiegelbildern heranzieht (dies wird beispielsweise auch durch die Ergebnisse der ersten Experimentalreihe der vorliegenden Arbeit nahe gelegt; vgl. auch Fleming et al., 2003, in Abschnitt 2.4.1; sowie die Skalierungsexperimente von Ferwerda et al., 2001, in deren Modell die eine Dimension innerhalb des von ihnen konstruierten perzeptuellen Glanzraums durch die Huntersche Glanzkategorie des „*distinctness-of-image gloss*“ gebildet wird; s. Abb. 2.3 in Abschnitt 2.3). Jedoch wird die räumliche Intensitätsverteilung eines Glanzlichtes nicht nur von der Reflexionsbeschaffenheit, bzw. feinstrukturellen Rauheit einer Oberfläche bestimmt (vgl. Abschnitt 2.2), sondern ebenfalls durch die lokalen Krümmungen dieser Oberfläche: Eine Oberfläche mit schwachen Wölbungen wird bei gleicher Reflexionsbeschaffenheit größere Glanzflecken mit sanfteren Helligkeitsgradienten aufweisen, als eine stark zerklüftete Oberfläche (vgl. Abb. 3.11). Doch ist es einem Beobachter unter diesen Umständen überhaupt möglich, die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche unabhängig von ihrer 3D-Struktur zuverlässig zu erkennen? Berücksichtigt das visuelle System bei der Bestimmung der Glanzstärke die lokalen Krümmungen der Oberfläche? Existieren möglicherweise andere Hinweisreize im proximalen Reiz als die räumlichen Merkmale von Glanzlichtern, die invariant gegenüber Unterschieden in der 3D-Struktur sind und die demzufolge zuverlässiger Indikatoren für die Glanzausprägung einer Oberfläche sind? Mit diesen Fragen haben sich Nishida und Shinya (1998) beschäftigt, die in ihren Abgleichsexperimenten als Reizmuster rotierende, computergenerierte, komplex gewölbte Oberflächen benutztten, die den Versuchspersonen monokular präsentiert wurden. Mit diesem Reizmaterial fanden die Autoren jedoch, dass es einem Beobachter offenbar nicht gelingt, einen zuverlässigen Abgleich der Reflexionseigenschaften zwischen zwei Oberflächen herzustellen, sofern diese beiden Oberflächen keine ähnlichen 3D-Strukturen aufweisen.

In einer Reihe von eigenen, weiterführenden Abgleichsexperimenten wurde untersucht, ob eine solche Glanzkonstanzleistung möglicherweise durch die Verfügbarkeit von verschiedenen Informationsquellen im Reiz beeinflusst wird, wofür ähnliche komplexe Reizmuster verwendet wurden wie bei Nishida und Shinya (1998). Getestet wurde zum einen, ob die Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen zu einer Verbesserung dieser Leistung führt; die Reizmuster wurden hierbei also entweder in einer Rotationsbewegung oder aber statisch dargeboten. Zum anderen wurde der mögliche Beitrag von Disparitäts-Informationen überprüft, wobei die Reizmuster entweder, wie in der Ursprungsuntersuchung von Nishida und Shinya, monokular präsentiert wurden, oder aber mit Oberflächen-Disparität, bzw. sowohl mit Oberflächen- als auch Glanzlicht-Disparität ausgestattet wurden. Weiterhin wurde auch untersucht, ob eine farbliche Trennung zwischen den beiden für die Reizgenerierung verwendeten Reflexionskomponenten (diffuse und spiegelnde Komponente) eine bessere Trennung zwischen der Eigenfarbe und der Glanzausprägung einer Oberfläche ermöglicht – in den Experimenten von Nishida und Shinya wurden lediglich rein achromatische Reizmuster verwendet.

Simulationen: Die Bedeutung von Bildstatistiken als Hinweisreize bei der Glanzwahrnehmung

Nishida und Shinya (1998) glaubten, dass sich das Einstellverhalten der Beobachter in ihren Abgleichsexperimenten durch einen Mechanismus erklären ließe, bei dem das visuelle System von Statistiken der globalen räumlichen Intensitätsverteilung eines Reizmusters Gebrauch macht, um die Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche zu beurteilen: In einer hierzu von ihnen durchgeführten Simulation fanden sie, dass zwei Oberflächen gerade dann als gleich hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften wahrgenommen wurden, wenn die zugehörigen Pixel-Histogramme der beiden Oberflächen sich am wenigsten unterschieden. Da die bisherigen Ergebnisse der vorliegenden Arbeit darauf hindeuten, dass ein solcher Mechanismus zumindest nicht allein für die von den Beobachtern in den vorangegangenen Experimenten gezeigten Leistungen verantwortlich sein kann, wurden abschließend zwei eigene Simulationen durchgeführt, mit deren Hilfe die Tauglichkeit des von Nishida und Shinya vorgeschlagenen Mechanismus (zumindest in Bezug auf die hier erhobenen Abgleichsdaten) überprüft wurde.

Kapitel 3

Experimente

3.1 Experimentalreihe I

Wie in Abschnitt 2.4.2 ausführlich dargestellt, wurde auf die mögliche Bedeutung von binokularen Hinweisreizen für die Glanzwahrnehmung bereits im 19. Jahrhundert hingewiesen. Dass Spiegelbild und spiegelnde Oberfläche in unterschiedlichen Tiefenebenen gesehen werden, wurde beinahe zeitgleich von Ruete (1860) sowie Wundt (1862) angesprochen. Ausführlicher wurde der Aspekt der Glanzlicht-Disparität von Kirschmann (1895) behandelt und später nochmals deutlich von Gräper (1922) hervorgehoben. Demnach wurde angenommen, dass das visuelle System bei der Zuschreibung von Glanz zu Oberflächen das optisch-geometrische Prinzip berücksichtigt, dass sich aufgrund des spiegelnden Reflexionsverhaltens einer Oberfläche und des Abstands zwischen beiden Augen die Disparität von Glanzlichtern im Allgemeinen von der Disparität korrespondierender Oberflächenpunkte unterscheidet (vgl. Abb. 2.17). Durch die genannten Arbeiten wurde das Vorhandensein eines potentiellen binokularen Hinweisreizes herausgestellt. Die Frage jedoch, ob das visuelle System die Glanzlicht-Disparität tatsächlich als Hinweisreiz für die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche heranzieht, wurde erst vor kurzem untersucht. So nahe liegend die Verwendung einer solchen binokularen Information für die Wahrnehmung der Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes auch sein mag, lassen sich doch viele Beispiele anführen, die zeigen, dass das visuelle System sich nicht uneingeschränkt aus dem vollen Angebot von Informationen bedient, das potentiell zur Verfügung steht¹. Das alleinige Vorliegen einer bestimmten Information bedeutet demnach nicht zwangsläufig, dass diese vom visuellen System auch tatsächlich genutzt wird. Ob das visuelle System von potentiellen Hinweisreizen Gebrauch macht ist deshalb eine Frage, die empirisch beantwortet werden muss. In den folgenden Experimenten dieser Experimentalreihe soll nun systematisch untersucht werden, ob und wenn ja, welchen genauen Beitrag binokulare Informationen zur Glanzwahrnehmung leisten, wobei zunächst zwei Aspekte im Vordergrund stehen:

¹Im Bereich der Glanzwahrnehmung wäre es beispielsweise von Vorteil, wenn das visuelle System in irgendeiner Weise die Polarisationsrichtung von an Oberflächen spiegelnd reflektiertem Licht auswerten könnte. Da unser Organismus jedoch über keine Mechanismen verfügt, mit deren Hilfe die Polarisationsrichtung von Licht erfasst werden kann, wird eine solche physikalische Information eben nicht berücksichtigt (vgl. Kirschmann, 1895; Bühler, 1922 und Harrison, 1945). Im Fall der Glanzlicht-Disparität könnte das visuelle System die im proximalen Reiz enthaltene Information beispielsweise deshalb ignorieren, weil generell stereoskopische Informationen vor allem für verhältnismäßig kurze Distanzen zwischen Objekt und Beobachter bereitstehen oder weil die Glanzlicht-Disparität möglicherweise mit der Bestimmung der Oberflächen-Disparität interferieren könnte (vgl. z.B. Nefs, 2008).

Die Auswirkung binokularer Informationen auf die wahrgenommene Stärke und Authentizität des Glanzes

Bezogen auf die mögliche Nutzung von Glanzlicht-Disparität als binokulare Information zur Bestimmung der Glanzeigenschaft einer Oberfläche wurden erste empirische Untersuchungen erst knapp hundert Jahre nach der Kirschmannschen Annahme angestellt, namentlich von Blake und Bühlhoff (1990), sowie Hurlbert et al. (1991). Eine Übersicht über die entsprechenden Befunde wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 gegeben. Blake und Bühlhoff (1990) haben gefunden, dass Oberflächen dann als besonders realistisch bewertet werden, wenn die Disparität der Glanzlichter zwischen den monokularen Einzelbildern physikalisch korrekt in den Reizmustern wiedergegeben ist, wobei dies jedoch ausschließlich für die Reizmuster zutraf, welche eine konvex geformte Oberfläche aufwiesen. Die Ergebnisse von Hurlbert et al. (1991) hingegen, welche für ihre Untersuchungen ähnliche Reizmuster wie Blake und Bühlhoff verwendeten, widersprechen diesem Befund, da sie fanden, dass sowohl für konvex, als auch für konkav geformte Oberflächen jeweils Reizmuster als besonders hoch in ihrem Glanzgehalt beurteilt wurden, bei denen die Glanzlicht-Disparitäten stark vom physikalisch korrekten Fall abwichen. Unklar ist bei diesem Vergleich zwischen den beiden Untersuchungen von Blake und Bühlhoff (1990) und Hurlbert et al. (1991) allerdings, ob die Versuchspersonen in den entsprechenden Experimenten auch dieselbe Beurteilungsdimension zur Bestimmung des Glanzcharakters einer Oberfläche heranzogen. Während Blake und Bühlhoff ausdrücklich die wahrgenommene Authentizität des Glanzeindrucks als Beurteilungskriterium für ihre Beobachter festgelegt hatten, waren die Versuchspersonen bei Hurlbert et al. dazu aufgefordert, ein quantitatives Urteil über die „glossiness“ abzugeben, wobei nicht eindeutig ist, ob damit nun ebenfalls die wahrgenommene Realitätsnähe des Glanzes, d.h. die Ähnlichkeit zu Glanzeindrücken in ökologischen Glanzsituationen, oder aber die empfundene Glanzstärke gemeint ist. Dass es sich bei diesen beiden Kriterien (wahrgenommene Authentizität und wahrgenommene Stärke des Glanzes) offenbar um zwei unterschiedliche und möglicherweise auch unabhängige Dimensionen zur Beurteilung des Glanzcharakters einer Oberfläche handelt, liegt auf der Hand: Vergleicht man beispielsweise eine polierte Chromkugel mit einem Objekt aus gebürstetem Aluminium, so würde ein Betrachter der Chromkugel in der Regel eine höhere Glanzstärke als dem Aluminiumobjekt attestieren, wenngleich beide als ebenbürtig in Bezug auf die Authentizität ihrer Glanzerscheinung beurteilt werden würden. Eine strikte Unterscheidung zwischen diesen beiden perzeptuellen Dimensionen scheint also geboten. In den folgenden Experimenten soll daher untersucht werden, welchen möglichen Einfluss das Vorliegen von Glanzlicht-Disparität in den verwendeten Reizmustern sowohl auf die wahrgenommene Authentizität als auch auf die wahrgenommene Stärke des Glanzeindrucks ausübt.

Die Abhängigkeit eines möglichen Effekts binokularer Darbietung von der räumlichen Beschaffenheit der Glanzlichter

Zusätzlich soll hier untersucht werden, wie ein solcher möglicher Effekt von der Beschaffenheit der Glanzlichter, bzw. von der Reflexionsbeschaffenheit der Oberfläche abhängt. Sowohl Blake und Bühlhoff (1990) als auch Hurlbert et al. (1991) hatten Bilder (Projektionen) ellipsoidförmiger Objekte als Reizmuster für ihre Experimente verwendet, wobei die monokularen Halbbilder der stereoskopischen Darbietung jeweils relativ scharf umrissene und relativ zu benachbarten Oberflächenbereichen kontrastreiche Glanzpunkte enthielten. Um den potentiellen Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität überhaupt nutzen zu können, muss das visuelle System in der Lage sein, diese binokulare Information aus den beiden monokularen proximalen Intensitätsverteilungen zu extrahieren. Es erscheint plausibel, dass das Auffinden einer solchen Disparitäts-Information seitens des visuellen Systems besser für solche Glanzlichter gelingt, welche sich durch einen relativ starken Kontrast von umliegenden Bereichen der Oberfläche abgrenzen und entsprechend scharfe

Konturen aufweisen (s. z.B. Formankiewicz & Mollon, 2009; Simmons, 1998; sowie Abbildung 3.1). Danach sollte der Effekt der Disparitätsinformation auf die Entdeckungsleistung umso geringer ausfallen, je geringer der Intensitätskontrast und je unschärfer die Konturen der Glanzlichter sind. Für die folgenden Experimente sollen daher zusätzlich die Parameter des für die Reizkonstruktion zugrunde gelegten Beleuchtungsmodells (mit denen unterschiedliche Reflexionseigenschaften der computergenerierten Reizmuster simuliert werden und die sich auf die Beschaffenheit der Glanzlichter auswirken) systematisch variiert werden.

In den Experimenten werden Bilder von Objekten verwendet, die komplexe Wölbungen enthalten, da solche Objekte einen stärkeren Bezug zu natürlichen Oberflächen haben als die von Blake und Bühlhoff verwendeten Ellipsoide oder andere Grundkörper. Die Oberflächen sind außerdem homogen und unterscheiden sich damit auch in dieser Hinsicht von den von Blake und Bühlhoff (1990) und Hurlbert et al. (1991) verwendeten Objekten, die von einer Textur überzogen waren. Diese Textur war eingeführt worden, um das Erkennen der Oberflächen-Wölbungen und der Oberflächen-Disparität zu erleichtern. Diese Vorgehensweise birgt jedoch die Gefahr, dass die Beobachter ihre Urteile bezüglich der Glanzbeschaffenheit der Oberflächen statt auf ein perceptuelles Kriterium („Authentizität“, bzw. „Stärke“ des Glanzeindrucks) auf ein sekundäres Kriterium gründen – nämlich auf die über einen bewussten Vergleich zwischen den beiden monokularen Halbbildern ermittelten Abweichungen der Glanzlichtpositionen von korrespondierenden Texturelementen. Um die Nutzung solcher unerwünschten Informationsquellen für das Vorliegen von Glanzlicht-Disparität zu unterbinden, wurde hier daher auf die Verwendung einer fest mit der Oberfläche verbundenen Textur verzichtet (die komplexe Oberflächenstruktur der für die folgenden Experimente benutzten Reizmuster bietet genügend Information für das Erkennen der 3D-Form: Neben Konturinformationen, die von den Umrissen der Reizmuster geliefert werden, weisen diese zudem beleuchtungsabhängige Schattierungsmuster auf).

3.1.1 Reizmuster

Als Reizmuster für die folgenden Experimente der ersten Experimentalreihe wurden computergenerierte, dreidimensionale Oberflächen benutzt, welche unter Verwendung einer einfachen Fourier-Synthese konstruiert wurden und komplexe Wölbungen aufwiesen (vgl. Abb. 3.2). Die Reize wiesen eine quadratische Grundfläche in der (x,z) -Ebene auf². Das Höhenprofil (y -Koordinate) ergab sich dabei aus der Summe von 15 zufällig orientierten Sinusgittern:

$$y = f(x, z) = \sum_{k=1}^{15} \sin(\pi a_k [x/\lambda + \pi] + \pi b_k [z/\lambda + \pi]). \quad (3.1)$$

Die Koordinaten x und z reichten (in ganzzahligen Schritten) von $-\lambda/2$ bis $\lambda/2$, wobei $\lambda + 1$ die Anzahl der diskreten Schritte entlang der x - und der z -Achse ist (im ersten Experiment betrug λ 100, im zweiten 76). Die Größen a_k und b_k in Formel 3.1 repräsentieren Pseudozufallszahlen aus dem Intervall $[-4.0, 4.0]$, die Größe des Reizmusters (d.h. jeder (x, y, z) -Vektor) wurde um den Faktor s gestaucht, der im ersten Experiment den Wert 0.08 und im zweiten den Wert 0.12 annahm. Jeweils vier benachbarte Vektoren bildeten die Eckpunkte einer viereckigen Facette der Oberfläche. Alle Reizelemente waren in einem achromatischen Grauton eingefärbt, d.h. jeder, den einzelnen Facetten der Oberfläche zugewiesene Farbwert lag auf der Raumdiagonalen

²Das Koordinatensystem des 3D-Konstruktionsraums ist hierbei wie folgt festgelegt: Die x - und die y -Achse spannen die Projektionsebene auf, die dem Bildschirm des Monitors entspricht, wobei die x -Achse von links nach rechts und die y -Achse rechtwinklig zu jener von unten nach oben verläuft. Orthogonal zu diesen beiden Achsen verläuft die Tiefenachse z , die vom Inneren des Raums in die Richtung des Beobachters zeigt.

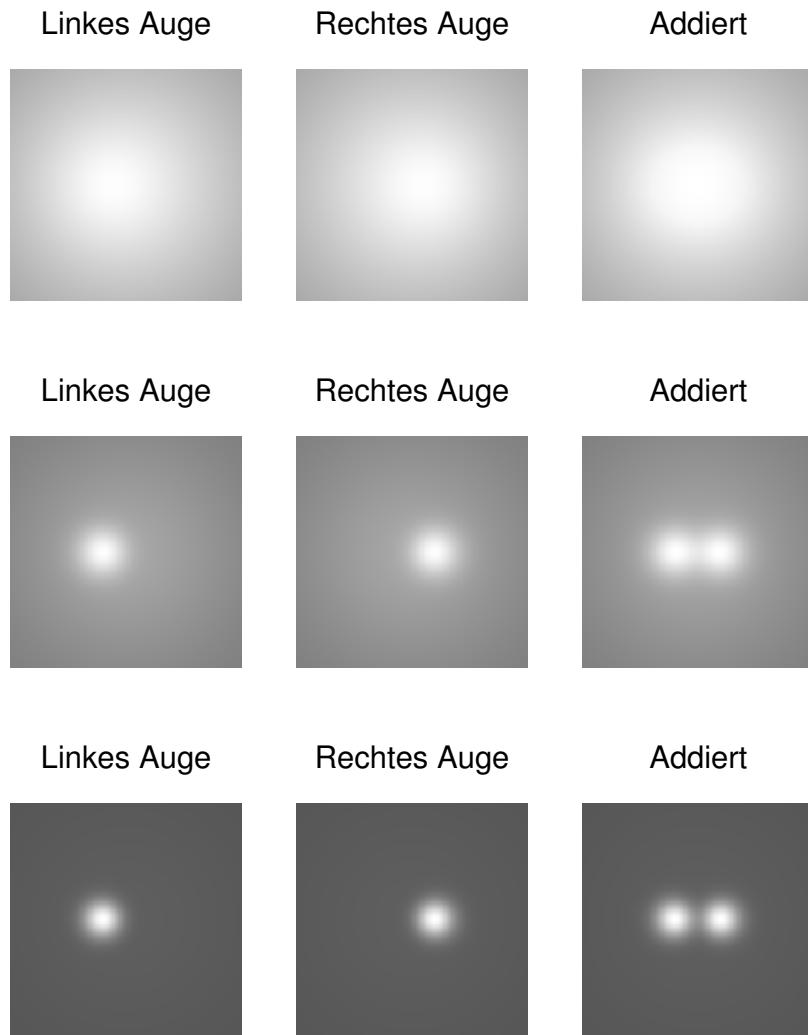


Abbildung 3.1: Dargestellt sind jeweils für das linke wie für das rechte Auge eines Betrachters die entsprechenden monokularen retinalen Bilder, wie sie von einer zum Teil spiegelnd reflektierenden Oberfläche produziert werden. Je nach Reflexionsbeschaffenheit der Oberfläche erscheinen die Konturen der Glanzlichter mehr oder weniger stark verschwommen und bezüglich der übrigen Fläche mehr oder weniger kontrastreich (Zeilen). Zur Veranschaulichung des Unterschieds zwischen den beiden monokularen Halbbildern sind in der letzten Spalte die beiden Einzelbilder bezüglich ihrer lokalen Luminanzen zusammengefasst worden. Anzunehmen ist, dass die Entdeckungsleistung des visuellen Systems für solche Unterschiede zwischen den Halbbildern von der Schärfe der Kontur und dem Intensitätskontrast der Intensitätsspitzen (Glanzlichter) zur Grundhelligkeit der übrigen Fläche abhängt.

im RGB-Farbraum ($R = G = B$). Die maximale mit dem verwendeten Monitor erzeugbare Luminanz betrug $85 \frac{cd}{m^2}$. Der Hintergrund, vor dem die komplexen Reizmuster präsentiert wurden, war in einem konstanten Grauton mit einer Intensität von 75% des Maximalwerts gehalten ($RGB = (0.75, 0.75, 0.75)$). Der relative Intensitätswert einer jeden Facette der Oberfläche wurde

nach dem Beleuchtungsmodell von Phong (1975) für eine Szene berechnet³, in der sich am Punkt $(-4.38, 7.85, 4.38)$ eine einzige Punktlichtquelle befand. Der relative Grauwert I ($0 \leq I \leq 1$) ergibt sich dabei aus folgender Formel:

$$I = k_a + (1 - a)k_d \cos(\theta) + ak_s \cos^n(\alpha). \quad (3.2)$$

Die Konstanten k_a , k_d und k_s repräsentieren dabei die relative Stärke des ambienten⁴, diffusen und spiegelnden Anteils an der Gesamtintensität eines jeden Oberflächenpunktes und hatten hier die Werte 0.6, 0.4, bzw. 0.4. Die Variable θ gibt den Winkel zwischen der Oberflächennormalen der entsprechenden Facette und der Beleuchtungsrichtung an, α den Winkel zwischen der Hauptreflexionsrichtung des Lichtes und der Beobachterrichtung, n den sogenannten Phong-Exponenten (dieser bestimmt, wie stark das spiegelnd reflektierte Licht um seine Hauptreflexionsrichtung streut, vgl. die untere Reihe in Abb. 3.3) und schließlich a eine Variable, welche Werte zwischen 0.0 und 1.0 annimmt und dazu dient, die diffuse und die spiegelnde Komponente zu einer konvexen Mischung zu kombinieren.

Die so konstruierten Oberflächen wurden anschließend (ausgehend von der globalen Oberflächennormalen ($x = 0.0, y = 1.0, z = 0.0$)) bezogen auf ihre Grundebene um 54° zur Beleuchtungsrichtung geneigt, um somit zu gewährleisten, dass das Oberflächenprofil der Reizmuster für den Beobachter gut sichtbar ist. Zusätzlich rotierten die Oberflächen im Uhrzeigersinn um die zentrale Mittelachse mit einer Geschwindigkeit von ca. 45° pro Sekunde, was aus zwei Gründen vorgenommen wurde: Zum einen gibt es Hinweise darauf, dass die Verwendung von nicht-statischen Reizmustern zu einer Steigerung des Glanzeindrucks führt, da die Glanzpunkte, anders als bei einer fest aufgeprägten Textur, niemals an den Oberflächen zu haften scheinen (Hartung & Kersten, 2002; vgl. Abschnitt 2.4.1). Zum anderen sollte hiermit den Beobachtern die Möglichkeit genommen werden, bewusst zwischen den beiden monokularen Halbbildern des Reizmusters die Positionen korrespondierender Glanzlichter zu vergleichen (indem sie abwechselnd jeweils eines der Halbbilder separat betrachten). Auf diese Weise sollte also vermieden werden, dass die Beobachter auf mittelbare und für die zu behandelnden Fragestellungen unerwünschte Art das Vorhanden-, bzw. Nichtvorhandensein von binokularen Glanzhinweisreizen entdecken können, so dass mit diesem Vorgehen (zusätzlich zur Verwendung von texturfreien, dafür aber komplex gewölbten Oberflächen, s.o.) entsprechende potentielle Mängel der angesprochenen Vorgängeruntersuchungen beseitigt werden sollten.

Die stereoskopischen Reizmuster wiesen zwei verschiedene Arten von Disparität auf: Zum einen Oberflächen-Disparität, die unter stereoskopischer Fusion der beiden Reizhälften zu einem starken 3D-Eindruck der Oberflächenform führt. Diese Art der Disparität wurde mit der glFrustum-Methode des OpenGL-Moduls erzeugt, mit deren Hilfe, unter Berücksichtigung der beiden Positionen des linken und des rechten Auges des Beobachters, jeweils eine perspektivische Projektion des simulierten Objekts erstellt wurde. Die andere Art von Disparität (Glanzlicht-Disparität) betrifft ausschließlich die Positionen der Glanzlichter relativ zu korrespondierenden Oberflächenpunkten der beiden Halbbilder. In den hier durchgeföhrten Experimenten war die

³Da die verwendeten Reizmuster in der ersten Experimentalreihe vergleichsweise schwache lokale Krümmungen aufwiesen, wurden die einzelnen viereckigen Facetten idealisiert als ebene Flächen angesehen, deren Oberflächen-normalen jeweils durch das Vektorprodukt aus den Diagonalen der vier, die Facette eingrenzenden Vertices gebildet wurden.

⁴Diese Reflexionskomponente soll im Phongschen Modell den Einfluss von Interreflexionen simulieren, indem zu jedem Intensitätswert einfach ein konstanter Wert hinzugefügt wird, ohne dass hier, wie bei den beiden übrigen Komponenten, geometrische Faktoren eine Rolle spielen. Die ambiente Komponente führt somit zu einer gleichmäßigen Aufhellung der gesamten Oberfläche.

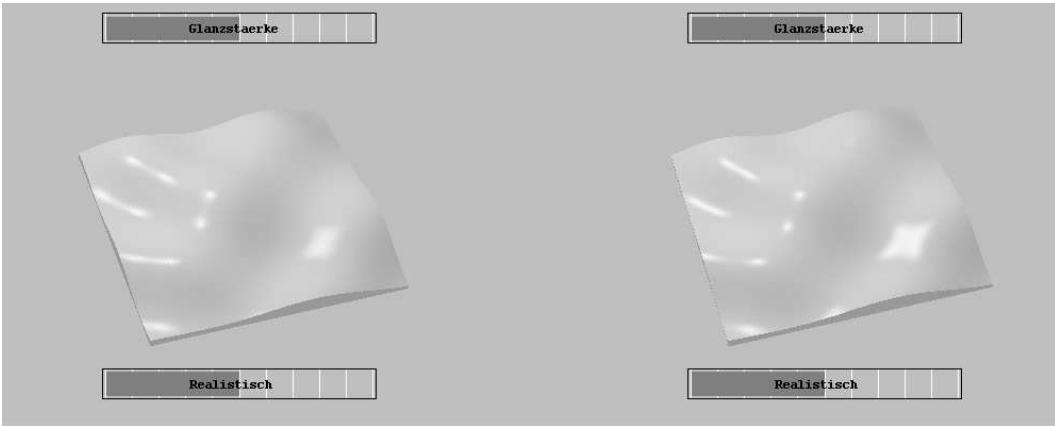


Abbildung 3.2: Versuchsdisplay, wie es im ersten Experiment verwendet wurde (*hier in reduzierter Größe dargestellt*). Zu sehen sind die beiden monokularen Halbbilder eines stereoskopischen Reizmusters, sowie die beiden von dem Beobachter interaktiv in ihrer Länge manipulierbaren Einstellbalken, mit deren Hilfe ein Urteil über die Glanzbeschaffenheit des Reizmusters abgegeben wurde. Während der Reizpräsentation rotierten die Flächen im Uhrzeigersinn um ihre vertikale Mittelachse.

Glanzlicht-Disparität eine der unabhängigen Variablen, d.h. in einigen Reizmustern lag Glanzlicht-Disparität vor, in anderen nicht. Für die Reizpaare, die Glanzlicht-Disparität aufwiesen, wurde für jedes Auge des Beobachters ein eigener Beobachtervektor, dem Augenabstand und der globalen Anordnung der Szene entsprechend, definiert und zur separaten Berechnung der Glanzflecken der beiden Halbbilder dem hier verwendeten Generierungsalgorithmus für die Einfärbung der Oberflächenfacetten übergeben (s. Formel 3.2; man beachte hierbei, dass allein die spiegelnde Komponente von der Position des Beobachters abhängt). Die Positionen der Glanzflecken waren damit einer ökologischen Reizsituation unter natürlichen, binokularen Sehbedingungen getreu nachempfunden. Um die Glanzlicht-Disparität auszuschalten, wurde bei der Berechnung des Spiegelungsanteils für beide Augen des Beobachters ein und derselbe Beobachtervektor in das Beleuchtungsmodell eingegeben, welcher in diesem Fall als der Mittelwertsvektor aus den beiden korrekten Beobachterrichtungen festgelegt war. Bei den Reizmustern, die keine Glanzlicht-Disparität aufwiesen, war die Glanzlicht-Disparität somit identisch mit der Oberflächen-Disparität, d.h. korrespondierende Glanzflecken befanden sich in diesem Fall immer auf korrespondierenden Oberflächenpunkten zwischen den beiden Halbbildern. Sämtliche Reizmuster wurden auf einem 22-Zoll-Monitor präsentiert (Sony Triniton Multiscan 500 PS), gesteuert von einer NVIDIA GeForce 7900 GTX Grafikkarte. Zur Herstellung eines Reizmusters wurden für jede Oberfläche zwei monokulare Halbbilder generiert, die mittels eines Spiegelstereoskops zur Fusion gebracht wurden (SA200 ScreenScope Pro), wobei jedes der beiden auf dem Monitor präsentierte Halbbild über zwei Spiegel umgelenkt wurde, bevor es das entsprechende Auge des Beobachters erreichte. Die Seitenlänge des quadratischen, für jedes der beiden Augen auf dem Monitor dargebotenen Ausschnitts betrug 12.4 cm. Alle Reizmuster wurden unter Verwendung der C++ Programmiersprache, verbunden mit dem OpenGL-Modul für 3D-Grafik-Anwendungen, erzeugt. Wie oben bereits angesprochen, wurde für die Durchführung einer perspektivischen Projektion der Reizmuster (zur Herstellung von Oberflächen-Disparität) die glFrustum-Methode des OpenGL-Pakets verwendet. Der Beobachterabstand zur Schnittebene (Bildschirm) betrug 40 cm, der Augenabstand war auf 6 cm festgelegt. Das Zentrum der Reizmuster wurde 10 cm hinter der Schnittebene in das Innere der virtuellen Szene hineinverlegt.

3.1.2 Experiment 1: Der Einfluss von binokularen Hinweisreizen auf die Authentizität und Stärke des Glanzeindrucks

In dem ersten Experiment waren die Beobachter dazu aufgefordert, die wahrgenommene Glanzbeschaffenheit der ihnen präsentierten Reizmuster auf zwei unterschiedlichen Skalen zu beurteilen: Zum einen wurden sie gebeten, die wahrgenommene Glanzstärke der Reizmuster auf einer kontinuierlichen Skala zu bewerten („Wie stark ist der wahrgenommene Glanz ausgeprägt?“), zum anderen sollten sie auf einer vergleichbaren Skala die wahrgenommene Authentizität des Glanzes beurteilen („Wie realistisch ist der Glanz?“). Die dargebotenen stereoskopischen Reizpaare wiesen dabei in der einen Hälfte aller Bedingungen den Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität auf, in der anderen Hälfte wurden die Reizmuster ohne diese binokulare Information präsentiert. Zudem wurden die Reflexionsparameter des zur Reizgenerierung verwendeten Beleuchtungsmodells variiert, wozu zwei unterschiedliche Sätze von Reizmustern gebildet wurden: Bei der einen Gruppe wurden ausschließlich die Mischungsanteile für die diffuse und die spiegelnde Komponente (a in Formel 3.2) zwischen 0.0 und 1.0 in Schritten zu 0.1 variiert; der Phong-Exponent (n in Formel 3.2) wurde konstant bei einem Wert von 85.0 gehalten (vgl. die obere Reihe in Abbildung 3.3). Bei der zweiten Gruppe von Reizmustern wurde umgekehrt lediglich der Phong-Exponent zwischen 10.0 und 160.0 in Schritten zu 15.0 variiert, während das Mischungsverhältnis zwischen der diffusen und der spiegelnden Komponente konstant gehalten wurde (bei $a = 0.5$; vgl. die untere Reihe in Abbildung 3.3). Somit ergab sich für das erste Experiment eine Gesamtzahl von 42 Bedingungskombinationen: 11 unterschiedliche Gewichte für a bei konstantem n , 11 unterschiedliche Werte für n bei konstantem a , deren zugehörigen Reizmuster jeweils mit und ohne Glanzlicht-Disparität präsentiert wurden (die Kombination „ $a = 0.5, n = 85.0$ “ kam in beiden Gruppen vor, wurde jedoch nur einmal innerhalb des Versuchsdurchlaufs verwendet). Jede dieser 42 unterschiedlichen Reizkombinationen wurde insgesamt acht Mal präsentiert, wofür acht unterschiedliche Oberflächenformen verwendet wurden (gekennzeichnet durch unterschiedliche Listen von Zufallsgrößen a_k und b_k , vgl. Formel 3.1).

Es ergab sich somit eine Gesamtzahl von 336 Durchgängen; die unterschiedlichen Reizmuster wurden dabei in randomisierter Reihenfolge dargeboten. Für die Abgabe der Urteile bezüglich der wahrgenommenen Stärke und Authentizität des Glanzes, wurden oberhalb wie unterhalb des rotierenden Reizmusters jeweils ein horizontaler Balken hinzugefügt, der hinsichtlich seiner Länge von den Versuchspersonen während der Betrachtung des Reizes kontinuierlich mittels der Pfeiltasten auf der Tastatur manipuliert werden konnte (vgl. Abb. 3.2). Die relative Länge dieser Balken diente als Maß für die Ausprägung der wahrgenommenen Authentizität und Stärke des Glanzeindrucks. Die Beobachter erhielten keine Zeitbeschränkungen für die Abgabe ihrer Urteile, so dass die Reizmuster beliebig lange betrachtet werden konnten. Jedoch war ein Umschalten zum nächsten Reiz seitens des Beobachters erst nach frühestens 8 s möglich (die Zeit, welche das rotierende Reizmuster für eine komplette Umdrehung benötigte). Nach Abgabe der beiden Urteile wurde jeder Durchgang mit dem Drücken der Eingabetaste beendet. Bevor der nächste Reiz präsentiert wurde, wurde eine 3 Sekunden andauernde Dunkeladaptationsphase eingeschoben.

Versuchspersonen

An diesem, wie auch dem nachfolgenden Experiment der Experimentalreihe I nahmen drei hinsichtlich der Fragestellungen naive Versuchspersonen teil. Allesamt waren Studierende der Psychologie und durch ihre Hilfstatigkeit im Kieler Labor für visuelle Psychophysik geübt in der Durchführung psychophysikalischer Experimente. Die Versuchspersonen wiesen keinerlei Beeinträchtigungen ihrer Sehfähigkeit auf.

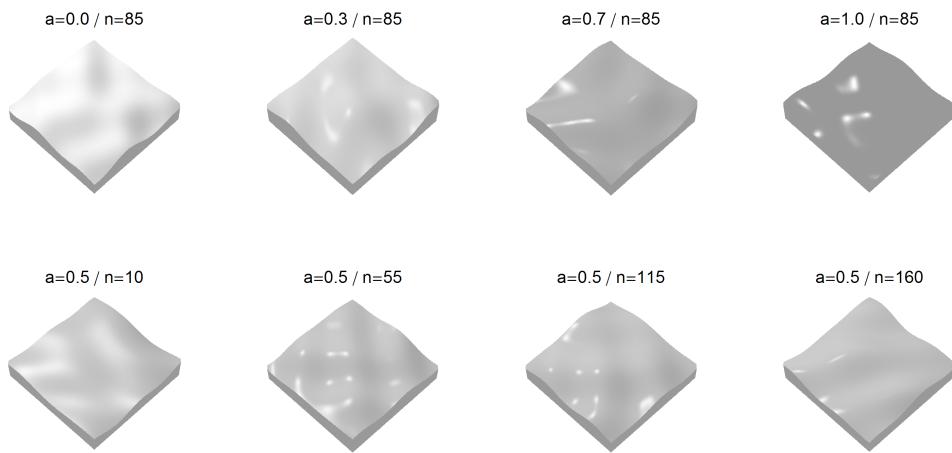


Abbildung 3.3: Einige Beispiel-Reizmuster, wie sie im ersten Experiment verwendet wurden. Die computergenerierten Oberflächen weisen unterschiedliche Kombinationen von Reflexionsparametern auf (a und n , siehe Formel 3.2). Es sind alle acht während des ersten Experiments verwendeten 3D-Formen für die Oberflächen dargestellt (hier in der Größe reduziert).

Ergebnisse

Abbildungen 3.4 und 3.5 zeigen die einzelnen sowie die für alle Beobachter zusammengefaßten gemittelten Beurteilungswerte (untere Hälfte in Abb. 3.5) und zwar getrennt nach den beiden Kriterien („Authentizität“ und „Stärke“ des wahrgenommenen Glanzes, Spalten) und den beiden Reflexionsparametern (a und n , Zeilen). Die beiden Datenkurven in jedem dieser Diagramme repräsentieren ferner die beiden Bedingungen „mit Glanzlicht-Disparität“ („mit GL-Disp.“, grüner Linienzug) und „ohne Glanzlicht-Disparität“ („ohne GL-Disp.“, roter Linienzug).

Auffällig ist bei der Betrachtung der einzelnen Diagramme zunächst, dass jeweils beide Kurven (insbesondere bei den über alle Beobachter gemittelten Daten) einen sehr ähnlichen Verlauf zeigen. Da jedes Reizmuster isoliert dargeboten wurde, d.h. ohne eine direkte Vergleichsmöglichkeit zu einem Referenzreiz, deutet diese Ähnlichkeit der Kurvenverläufe darauf hin, dass die Beobachter kaum Schwierigkeiten damit hatten, die Reize bezüglich der beiden Beurteilungskriterien zuverlässig zu bewerten. Weiterhin zeigt sich bei einem Vergleich zwischen den beiden Beurteilungskriterien, dass die entsprechenden Kurven einen gegensätzlichen Trend aufweisen: Während die mittleren Urteile bezüglich der wahrgenommenen Glanzstärke mit ansteigenden Werten für die Reflexionsparameter (d.h. mit zunehmendem ‚objektiven‘ Glanz) steigen, nehmen die mittleren Authentizitätsurteile entsprechend ab – ein Hinweis darauf, dass diese beiden Beurteilungskriterien von den Beobachtern tatsächlich als zwei unterschiedliche perzeptuelle Glanzdimensionen aufgefasst wurden. Die positive Korrelation zwischen wahrgenommener Glanzstärke und den jeweiligen Reflexionsparametern a und n deutet nicht zuletzt darauf hin, dass letztere der ihnen innerhalb des Phongschen Beleuchtungsmodells (Phong, 1975) zugedachten Rolle als ‚objektive‘ Glanzgrößen gerecht wurden (vgl. Abschnitt 2.3). Dass die Authentizitätsurteile mit steigenden Reflexionsparametern abnehmen, scheint auf den ersten Blick kontraintuitiv zu sein: Warum werden stärker glänzende Oberflächen als weniger realistisch in ihrer Glanzerscheinung empfunden? Eine mögliche Erklärung hierfür wäre der Umstand, dass allgemein stark glänzende Oberflächen

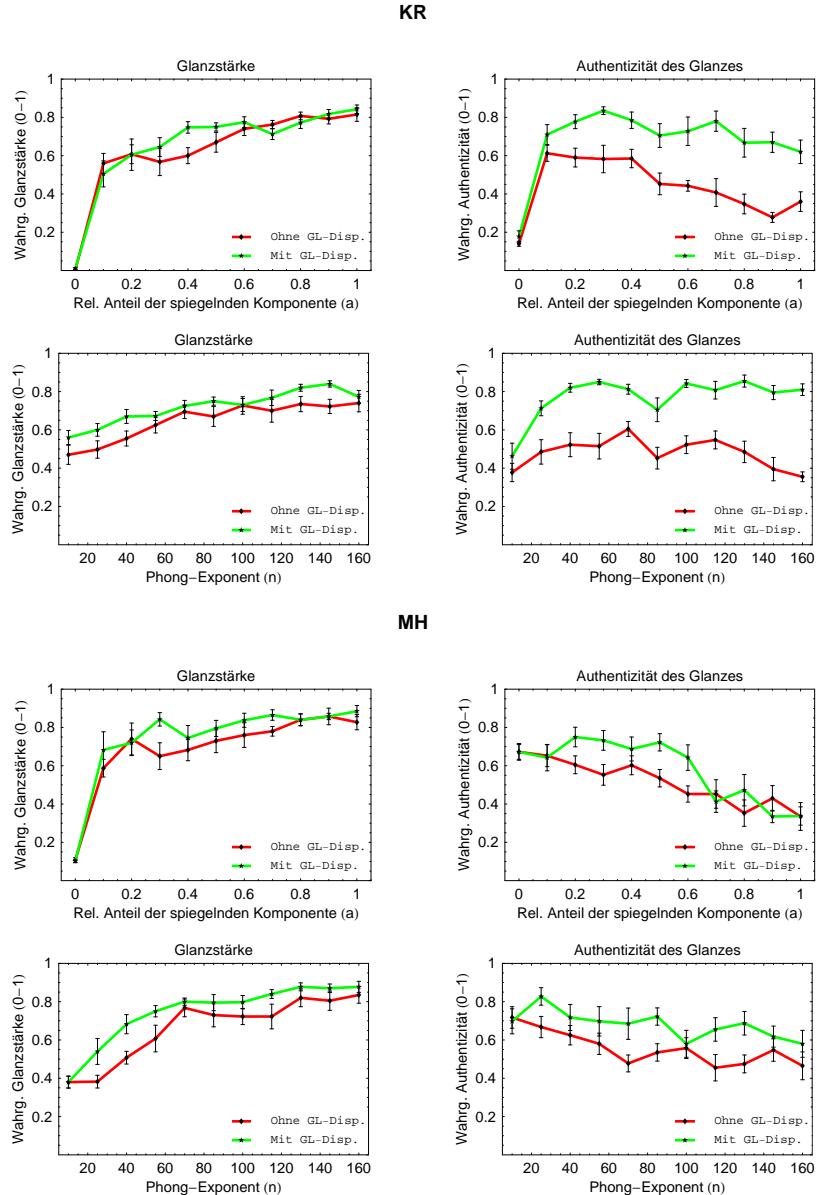


Abbildung 3.4: Ergebnisse des Rating-Experimentes für die Versuchspersonen KR und MH, getrennt dargestellt für die beiden variierten Parameter des Beleuchtungsmodells (Zeilen) sowie für die beiden unterschiedlichen Beurteilungskriterien (Spalten). Jedes Diagramm zeigt die gemittelten Beurteilungswerte für die beiden Reizbedingungen „mit Glanzlicht-Disparität“ (grüner Linienzug) und „ohne Glanzlicht-Disparität“ (roter Linienzug). Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den Standardschätzfehler.

eher selten in natürlichen Umgebungen vorkommen, so dass Beobachter diese eher als unnatürlich empfinden. Zum anderen könnte dies auch an der Beschaffenheit der hier verwendeten Reizmuster liegen: Stark glänzende Oberflächen würden unter ökologischen Bedingungen vermutlich viel lichtintensivere Glanzflecken aufweisen, als die hier verwendeten computergenerierten Reizmuster. Dadurch, dass der Wertebereich darstellbarer Intensitäten auf dem hier verwendeten Gerät sehr begrenzt war, könnte demnach die absolute Lichtstärke der künstlich hergestellten Glanzreize

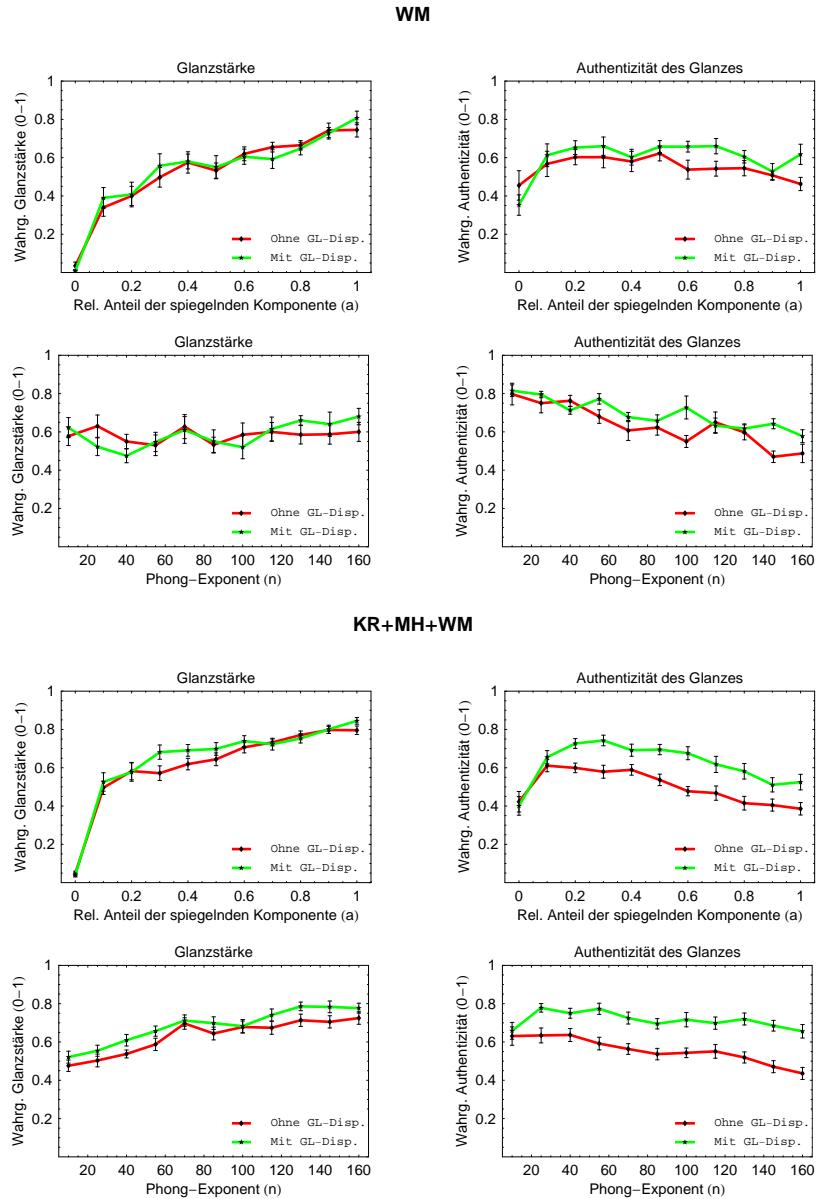


Abbildung 3.5: Ergebnisse des Rating-Experimentes für die Versuchsperson WM (obere Hälfte) sowie die über alle 3 Beobachter gemittelten Werte (untere Hälfte), getrennt dargestellt für die beiden varierten Parameter des Beleuchtungsmodells (Zeilen) sowie für die beiden unterschiedlichen Beurteilungskriterien (Spalten). Jedes Diagramm zeigt die gemittelten Beurteilungswerte für die beiden Reizbedingungen „mit Glanzlicht-Disparität“ (grüner Linienzug) und „ohne Glanzlicht-Disparität“ (roter Linienzug). Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den Standardschätzfehler.

stark von natürlichen Oberflächen mit entsprechend hoher Glanzcharakteristik abgewichen sein, was von den Beobachtern möglicherweise als unrealistisch empfunden wurde.

Ein Vergleich zwischen den beiden Kurven in den jeweiligen Diagrammen zeigt, dass das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität offenbar einen Effekt auf die Beurteilung der Reizmuster ausübt. Dies gilt insbesondere für das Authentizitätskriterium: Bei Reizmustern, in denen

Glanzlicht-Disparität vorlag, wurde der Glanzeindruck als deutlich realistischer bewertet gegenüber solchen, die diese Information nicht enthielten. Zu einem geringeren Teil scheint aber auch die wahrgenommene Glanzstärke durch das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität beeinflusst worden zu sein. Im Mittel wurden auch hinsichtlich dieser Beurteilungsdimension die Reizmuster mit Glanzlicht-Disparität als höher in ihrer Glanzstärke bewertet, als solche, die keine binokularen Hinweisreize für Glanz enthielten (dieser Aspekt soll in einem anschließenden Experiment genauer untersucht werden). Dieser Zuwachs an wahrgenommener Glanzstärke durch das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität zeigt sich dabei deutlicher unter der Reizbedingung, bei der ausschließlich der Phong-Exponent als Reflexionsparameter variiert wurde (vgl. jeweils die Diagramme in der linken Spalte in den Abbildungen 3.4 und 3.5).

Die Datenkurven liefern dagegen keinen klaren Hinweis darauf, dass unter den Bedingungen, bei welchen Glanzlicht-Disparität im Reiz enthalten war, die genaue Beschaffenheit der Glanzlichter (d.h. einerseits der Intensitätskontrast zwischen Glanzlicht und diffus reflektierenden Bereichen der Oberfläche, moduliert über den Parameter a und andererseits die Unschärfe der Glanzflecken, welche über den Phong-Exponenten n variiert wurde) einen Einfluss auf den Effekt ausübt: Bis auf die niedrigsten Werte für das Mischungsverhältnis zwischen der diffusen und der spiegelnden Komponente (für den trivialen Fall $a = 0.0$ aber auch für $a = 0.1$) und für den Phong-Exponenten ($n = 15$) scheint unabhängig von den Ausprägungen der Reflexionsparameter in allen Diagrammen der Abstand zwischen den jeweiligen zwei Kurven nahezu konstant zu sein. Das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität scheint demnach unter nahezu allen Reflexionsbedingungen vom visuellen System erfasst worden zu sein. Dies könnte möglicherweise darauf zurückzuführen sein, dass die Beschaffenheit der Glanzlichter bei den hier verwendeten komplexen Oberflächen nicht ausschließlich von den Reflexionsparametern abhing, sondern auch von den lokalen Krümmungen der Oberfläche: An stark gekrümmten Bereichen der Oberfläche zeigten sich beispielsweise bei verhältnismäßig niedrigen Werten für den Phong-Exponenten immer noch Glanzflecken, die sich relativ scharf gegenüber Nachbarbereichen abgrenzten.

3.1.3 Experiment 2: Der Einfluss von binokularen Hinweisreizen auf die wahrgenommene Glanzstärke

Die Ergebnisse aus dem ersten Experiment deuten darauf hin, dass das Vorliegen von Glanzlicht-Disparität als binokularer Hinweisreiz neben einer deutlichen Steigerung der wahrgenommenen Authentizität des Glanzes, ebenfalls zu einer geringen Erhöhung der wahrgenommenen Glanzstärke der Oberfläche führt. Um letzteren Effekt genauer zu untersuchen, wurde ein zweites Experiment angestellt, mit dessen Hilfe folgende Hypothese getestet werden soll: Ein Reizmuster, welches einen solchen binokularen Hinweisreiz für Glanz enthält, sollte weniger ‚objektiven‘ Glanz aufweisen müssen als ein Reizmuster, welches keine Glanzlicht-Disparität aufweist, damit beide Reizmuster als gleich hinsichtlich ihrer Glanzstärke wahrgenommen werden. In dem entsprechenden Experiment sollten die Beobachter die wahrgenommene Glanzstärke zweier Oberflächen abgleichen. Zu diesem Zweck wurden zwei stereoskopische Reizpaare simultan dargeboten, welche untereinander auf dem Bildschirm angeordnet waren. Während die Testoberfläche dabei immer dieselbe 3D-Form aufwies, wurden für die Form der Abgleichsoberfläche vier verschiedene Varianten verwendet, von denen keine der 3D-Form der Testfläche entsprach (vgl. Abb. 3.6). Wie schon im vorangegangenen Experiment, rotierten auch hier die Reizmuster um ihre um 54° zur Beobachterrichtung geneigte vertikale Mittelachse. Die konkrete Aufgabe der Beobachter war es in diesem Experiment, den Phong-Exponenten des Abgleichsreizes interaktiv so einzustellen, dass die wahrgenommene Glanzstärke der Abgleichsoberfläche mit der entsprechenden Glanzstärke der Testoberfläche übereinstimmte. Für die Festlegung der Schrittweite für die Einstellung des Phong-Exponenten n der Abgleichsoberfläche wurde dieser Parameter zunächst in die Skala m (im Folgenden als Phong-Index bezeichnet) transformiert, welche annähernd perzeptuell gleichabständig ist. Vorherige Untersuchungen hierzu ließen folgende Beziehung zwischen Phong-Index und Phong-Exponenten als angemessen erscheinen: $m = \sqrt[4]{n}$.

Der Phong-Index der in diesem Experiment verwendeten Testoberflächen wurde in 7 Schritten zu 0.3 zwischen 1.3 und 3.1 variiert; das Mischungsverhältnis zwischen der diffusen und der spiegelnden Komponente wurde hierbei für alle untersuchten Testflächen konstant gehalten mit einem Wert für a von 0.5 (vgl. Formel 3.2). Der Startwert des Phong-Indexes für die Abgleichsoberfläche war zu Beginn eines jeden Durchgangs durch einen Zufallswert bestimmt. Weiterhin wurden 3 unterschiedliche Kombinationen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität im Test- und Abgleichsreiz gewählt: (1) Sowohl die Test- wie auch die Abgleichsoberfläche enthielten diesen binokularen Hinweisreiz ($T+/A+$); (2) weder die Test- noch die Abgleichsoberfläche wiesen Glanzlicht-Disparität auf ($T-/A-$) und (3) nur die Abgleichsoberfläche war mit Glanzlicht-Disparität ausgestattet, während die Testfläche diese binokulare Information nicht enthielt ($T-/A+$). Somit ergaben sich insgesamt 21 verschiedene Bedingungskombinationen (7 verschiedene Phong-Index-Werte \times 3 unterschiedliche Kombinationsarten bezüglich der Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität), für die jeweils 8 Messwiederholungen durchgeführt wurden. Es wurden hierbei für die Testoberfläche 4 verschiedene 3D-Formen verwendet, die innerhalb einer Bedingungskombination jeweils zweimal präsentiert wurden. Insgesamt ergaben sich damit 168 Durchgänge, welche innerhalb des Experiments in randomisierter Reihenfolge dargeboten wurden. Zudem wurde die Position der Test- und der Abgleichsoberfläche auf dem Bildschirm balanciert, so dass in der Hälfte aller Reizdarbietungen die Testfläche (bzw. Abgleichsfläche) in der oberen Bildschirmhälfte und die Abgleichsfläche (bzw. Testfläche) in der unteren Bildschirmhälfte erschien. Für die Durchführung eines Durchgangs bei dieser Abgleichsaufgabe wurde den Beobachtern keine zeitliche Beschränkung auferlegt. Nach Herstellung eines perzeptuellen Abgleichs wurde jeder Durchgang durch Betätigen der Eingabetaste beendet, worauf wiederum ein 3 Sekunden währendes Intervall folgte, bevor das nächste Reizpaar präsentiert wurde.

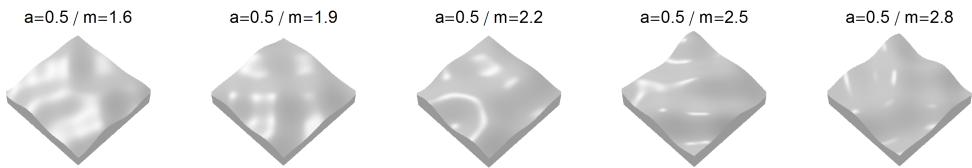


Abbildung 3.6: Einige Reizmuster, wie sie in Experiment 2 verwendet wurden (hier in der Größe reduziert). Die Oberflächen weisen bei einer konstanten diffusen Komponente von $a = 0.5$ unterschiedliche Phong-Index-Werte (m) auf. Während des Abgleichsexperiments diente die Form auf der linken Seite als Vorgabefläche, die übrigen 3D-Formen wurden für die Abgleichsfläche verwendet.

Ergebnisse

Abbildung 3.7 zeigt die Ergebnisse des Abgleichsexperiments separat für die drei Beobachter (Zeilen). Getrennt für die drei Bedingungen bezüglich der Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität in den stereoskopischen Reizmustern sind jeweils die von der Versuchsperson eingestellten, über die Anzahl der Messwiederholungen gemittelten Phong-Index-Werte für die Abgleichsoberfläche gegen die entsprechenden vorgegebenen Werte der Testfläche abgetragen (linke Spalte in Abb. 3.7). Für alle drei Beobachter lässt sich hier feststellen, dass unter den beiden symmetrischen Bedingungen $T+/A+$ und $T-/A-$ (sowohl der Test- als auch der Abgleichsreiz wiesen Glanzlicht-Disparität auf oder nicht) ein nahezu perfekter Abgleich hergestellt werden konnte: Die eingesetzten Phong-Index-Werte der Abgleichsoberfläche stimmen im Mittel mit dem Vorgabewert der Testfläche überein. Abweichungen von dem vorgegebenen Reflexionsparameter (m) lassen sich dagegen in der asymmetrischen Bedingung $T-/A+$ feststellen, d.h. unter der Bedingung, bei der lediglich der Abgleichsreiz mit Glanzlicht-Disparität ausgestattet wurde, während der Testreiz diese Information nicht enthielt. Gemäß der oben aufgestellten Hypothese wurden unter dieser Reizbedingung tatsächlich im Schnitt geringere Werte für die objektive Glanzausprägung des Abgleichsreizes gewählt als der Testreiz aufwies. Zur besseren Veranschaulichung des Effekts wurde in der rechten Spalte in Abbildung 3.7 eine stärker verdichtete Form der Datenrepräsentation gewählt: Für jede der drei Bedingungen hinsichtlich der Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität sind die über alle 7 Stufen des Vorgabewertes des Phong-Index gemittelte Abweichung zwischen dem Phong-Index des Vorgabe- und des Abgleichsreizes als Balken dargestellt. Hier zeigt sich sowohl sehr deutlich die hohe Übereinstimmung zwischen dem Vorgabe- und dem Abgleichswert für die beiden symmetrischen Bedingungen, als auch die starke Abweichung in die vorhergesagte Richtung für die asymmetrische Bedingung: Offenbar ist bei letzterer Bedingung die wahrgenommene Glanzstärke des Abgleichsreizes durch das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität soweit erhöht worden, dass der entsprechende Reiz eine geringere „objektive“ Glanzausprägung benötigt, um, im Vergleich zum Testreiz, als perzeptuell gleich bezüglich der Glanzstärke empfunden zu werden. Abbildung 3.8 zeigt in derselben Darstellungsform zusätzlich die über alle drei Beobachter gemittelten Daten. Eine statistische Analyse dieser zusammengefassten Daten ergab einen signifikanten Unterschied des Phong-Index zwischen dem Vorgabe- und dem Abgleichsreiz unter der asymmetrischen Bedingung ($p < 0.001$, einseitiger Einstichproben-t-Test; vgl. den grünen Balken im rechten Diagramm aus Abb. 3.8).

Die Ergebnisse aus dem Abgleichsexperiment deuten weiterhin auf das Vorhandensein einer bestimmten Art der ‚Glanzkonstanz‘ hin (vgl. weitere Arten z.B. bei Fleming et al., 2003

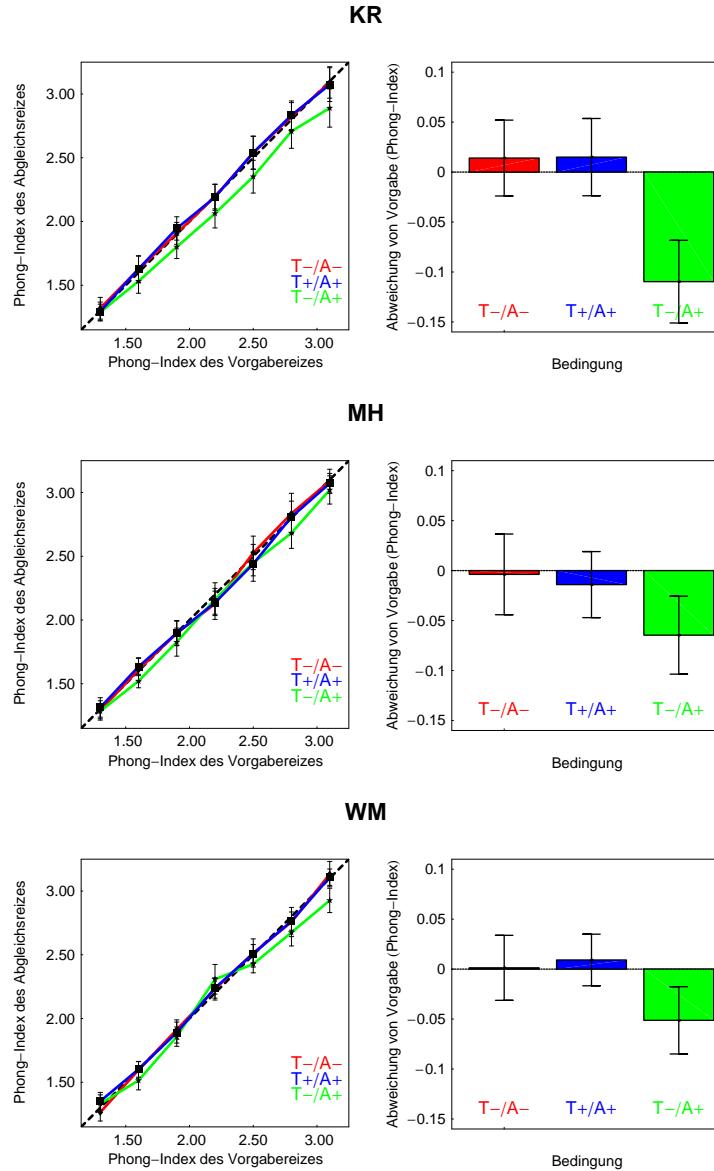


Abbildung 3.7: Ergebnisse des Abgleichsexperiments, separat für die drei Beobachter. Getrennt nach den drei Bedingungskombinationen für die Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität im Abgleichs- und Vorgabereiz sind zunächst links die mittleren Werte für die eingestellten Phong-Indizes gegen die jeweiligen Vorgabewerte abgetragen. In der rechten Spalte sind jeweils die mittleren Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Phong-Index-Werten (gemittelt über alle Vorgabewerte des Phong-Index) dargestellt, getrennt nach den drei Bedingungen für die Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils den Standardschätzfehler in beide Richtungen.

und Obein et al., 2004; zur näheren Erläuterung der hier in Frage stehenden Art von Glanzkonstanz siehe den folgenden Abschnitt 3.2): Obwohl die Abgleichs- und die Testoberfläche niemals identische 3D-Formen aufwiesen, waren die Vpn in den symmetrischen Bedingungen dennoch in der Lage, einen annähernd perfekten Abgleich bezüglich der Glanzbeschaffenheit der Reize herzustellen. Die wahrgenommene Glanzeigenschaft der hier verwendeten computergenerierten

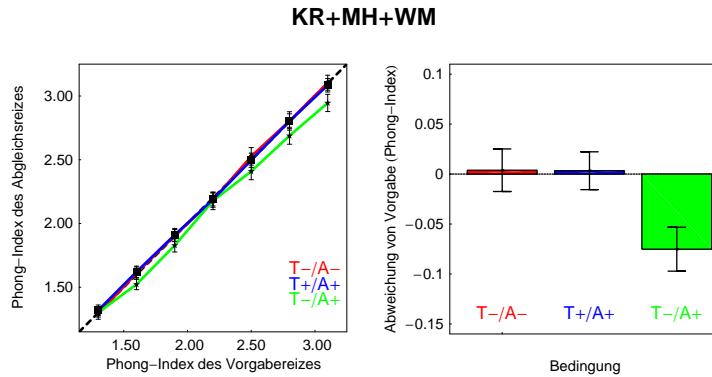


Abbildung 3.8: Die Ergebnisse aus Abb. 3.7, gemittelt über alle drei Beobachter.

Oberflächen scheinen also invariant gegenüber der 3D-Form dieser Oberflächen zu sein. Man erinnere sich daran, dass die räumliche Ausdehnung und der Grad der Unschärfe der Glanzlichter nicht nur von der objektiven Reflexionsbeschaffenheit der Oberfläche abhängen, sondern ebenfalls von ihrer dreidimensionalen Form. Ein simpler Abgleich der räumlichen Beschaffenheit einzelner Glanzlichter kann den Befund eines annähernd perfekten Abgleichs also nicht erklären, da die Test- und die Abgleichsoberflächen eben immer unterschiedliche 3D-Formen aufwiesen. Die Frage muss also lauten, aufgrund welcher proximaler Information das visuelle System eigentlich zu dem Schluss gelangt, dass zwei unterschiedliche 3D-Oberflächen dieselbe Glanzeigenschaft besitzen. Man mag bei den hier verwendeten Reizmustern einwenden, dass die 3D-Formen der Abgleichs- und der Testfläche zwar niemals identisch waren, aber dass sie dennoch sehr ähnliche Wölbungen aufwiesen: Die miteinander kombinierten Sinusgitter, aus denen die 3D-Form unter Verwendung einer einfachen Fourier-Synthese gebildet wurden, wiesen zum einen jeweils eine Zufalls-Frequenz innerhalb eines festgelegten, verhältnismäßig engen Intervalls auf, zum anderen waren auch die Amplituden der Wölbungen sehr ähnlich (s. die Gleichung in Formel 3.1). Für ähnliche Oberflächen hatten bereits Nishida und Shinya (1998, s. nächsten Abschnitt) gefunden, dass annähernde Glanzkonstanz im angesprochenen Sinne nur dann besteht, wenn sich die hinsichtlich ihrer Glanzbeschaffenheit zu vergleichenden Oberflächen stark in ihrer Raumfrequenz und Amplitude ähneln. Weichen die entsprechenden, die 3D-Form bestimmenden Parameter zu sehr voneinander ab, so gelingt es dem Beobachter auch schlechter, die Reflexionseigenschaften der Oberflächen zur Deckung zu bringen. Allerdings hatten die beiden Forscher für ihre Experimente lediglich monokulare Reizmuster verwendet, so dass nicht klar ist, inwieweit zusätzliche binokulare Glanz-Hinweisreize zu einer Verbesserung dieser Konstanzleistung beitragen. Bezogen auf die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung hat es jedoch den Anschein, dass die Beobachter in irgendeiner Weise eine abstrakte Repräsentation der Glanzeigenschaft bilden, getrennt von der Repräsentation der (mit der diffusen Komponente assoziierten) *Eigenfarbe* des Objekts.

Es ist zu vermuten, dass das Vorhandensein von binokularen Glanz-Hinweisreizen zu einer Erleichterung solch eines Segmentierungsprozesses führt (s. Abschnitt 2.4.2): Zum mindest phänomenal erscheint bei ökologischer, beidäugiger Betrachtung eines glänzenden Objekts in gewisser Weise die *Glanzschicht* räumlich von der Oberfläche getrennt. Jedoch zeigen die Befunde aus dem Abgleichsexperiment außerdem, dass das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität keine notwendige Voraussetzung für einen solchen Segmentierungsprozess zu sein scheint. Ein nahezu perfekter Abgleich war ja auch unter der symmetrischen Bedingung hergestellt worden, bei der beide Reizmuster ohne Glanzlicht-Disparität präsentiert wurden. Dies muss allerdings nicht bedeuten, dass Glanzlicht-Disparität gar keinen Einfluss auf diese Segmentierungs-Leistung hat. Es ist nämlich

denkbar, dass ein weiterer Hinweisreiz auch bei den Reizen zu einer Erleichterung der Trennung in die Komponenten *Glanz* und *Eigenfarbe* beigetragen hat, welche keine Glanzlicht-Disparität enthielten: Ein naheliegender Kandidat ist die dynamische Veränderung der Glanzlichtpositionen während der Rotationsbewegung der Reizmuster (vgl. Abschnitt 2.4.1). Um den Beitrag verschiedener Informationsquellen, insbesondere von Glanzlicht-Disparität und Bewegung, zur Glanzkonstanzleistung genauer zu untersuchen, sollen nun im Folgenden weitere Experimente durchgeführt werden.

3.2 Experimentalreihe II

Es liegen bereits einige Befunde vor, die darauf hindeuten, dass das visuelle System in der Lage ist, die Glanzeigenschaft einer zum Teil spiegelnd reflektierenden Oberfläche auch dann annähernd zuverlässig zu erfassen, wenn andere, die Verteilung oder die Intensität des rückgestrahlten Lichts beeinflussende Größen variiert werden. In Abschnitt 2.4.1 wurden bereits die Befunde von Fleming et al. (2003) ausführlich dargestellt. Diese Forscher konnten zeigen, dass die Glanzbeschaffenheit einer stark spiegelnden Oberfläche unter wechselnden Umgebungsszenen als nahezu unverändert wahrgenommen wurde. Obein et al. (2004) lieferten weiterhin Ergebnisse, die zeigen, dass die wahrgenommene Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche auch unter verschiedenen Lichteinfallswinkeln gleich bleibt – obwohl sich eine Änderung der Position einer Lichtquelle relativ zur Orientierung einer Oberfläche (bei konstanter Beobachtungsrichtung) auf die Menge des reflektierten Lichtes auswirkt (vgl. Abschnitt 2.2 - Fresnel).

Doch was bedeutet es eigentlich, zu sagen, dass das visuelle System in der Lage ist, die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche „annähernd zuverlässig“ auch unter wechselnden anderen Einflussgrößen zu erfassen? Das zugrunde liegende Problem solch einer Glanzkonstanzeistung soll im Folgenden anhand eines Beispiels verdeutlicht werden (Abb. 3.9): Man nehme an, dass auf physikalischer Seite, im distalen Reiz, zwei Objektoberflächen vorliegen, die auf mikroskopischer Ebene dieselbe „Rauheit“ aufweisen – ausgedrückt durch die Verteilung der Orientierungen der Mikrofacetten um die globale Oberflächennormale, so dass beide Oberflächen eine, durch die BRDF beschriebene, vergleichbare Rückstrahlcharakteristik des einfallenden Lichtes zeigen (s. Abschnitt 2.2). Beide Oberflächen sollen sich jedoch hinsichtlich ihrer 3D-Struktur unterscheiden, etwa in ihrer Raumfrequenz. Die so definierten distalen Reize erzeugen auf retinaler Ebene zwei unterschiedliche proximale Reize: Wie die Beispiele in Abbildung 3.9 (mittlere Spalte) zeigen, erzeugen beide distalen Reize unterschiedliche räumliche Intensitätsverteilungen im proximalen Reiz (bei der Oberfläche, die auf physikalischer Seite eine geringere Raumfrequenz aufweist, zeigen beispielsweise die Intensitätsspitzen eine größere räumliche Ausdehnung als bei der Oberfläche mit der höheren Raumfrequenz). Die Frage ist nun: Welcher Wert wird den in diesen Reizmustern dargestellten Oberflächen auf einer internen, die wahrgenommene Glanzstärke repräsentierenden Skala zugewiesen? Werden beide Flächen als gleich oder als ungleich in ihrer Glanzausprägung beurteilt? Sollten beide Oberflächen als unterschiedlich glänzend bewertet werden, so würde dies darauf hindeuten, dass das visuelle System über keinerlei zuverlässigen Mechanismen verfügt, die dazu führen, dass eine auf distaler Seite gleiche Oberflächeneigenschaft (hier die Rauheit der Oberfläche) auch unter dem Einfluss weiterer physikalischer Größen (die sich auf die Struktur des proximalen Reizes auswirken), auf perzeptueller Ebene als äquivalent verbucht werden. Interessant ist jedoch der Fall, bei dem tatsächlich beide unterschiedlichen Reizmuster intern als gleich bezüglich ihrer Glanzstärke empfunden werden, denn hier ergibt sich die Frage, welche Mechanismen dem visuellen System zur Verfügung stehen, um solch eine Glanzkonstanzeistung, von der angenommen wird, dass sie im funktionalen Sinne durchaus von Nutzen wäre (vgl. z.B. Landy, 2007), zu erbringen. Verfügt es über bestimmte Verarbeitungsprinzipien, die den Einfluss der 3D-Struktur auf die räumliche Beschaffenheit der Glanzflecken berücksichtigen? Zieht das visuelle System überhaupt die genaue Beschaffenheit der Intensitätsspitzen auf einer Oberfläche heran (wie die räumliche Ausdehnung und die Schärfe der Glanzlicht-Konturen), um darauf aufbauend die Glanzausprägung einzuschätzen, oder stützt es sich hierbei auf völlig andere, weniger intuitiv erscheinende Hinweisreize im proximalen Reiz?

Nishida und Shinya (1998) hatten eine erste empirische Untersuchung zu der Frage ange stellt, wie genau es dem visuellen System gelingt, die Materialbeschaffenheit von Oberflächen unabhängig von Unterschieden in ihrer 3D-Struktur zu bestimmen. Die Wölbungen der verwendeten computergenerierten Oberflächen waren dabei durch zwei verschiedene Parameter gekenn-

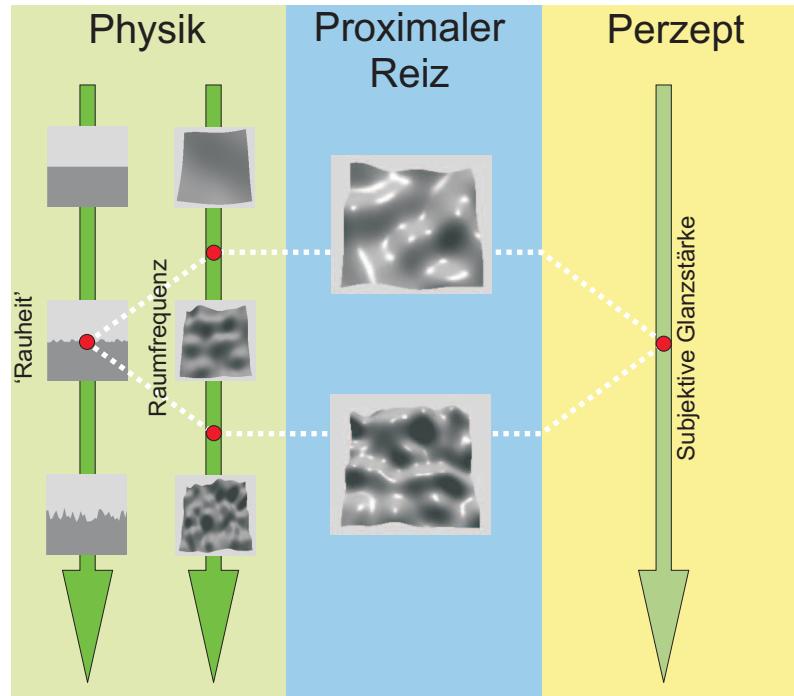


Abbildung 3.9: Das Problem der Glanzkonstanz, bezogen auf die Frage, ob das visuelle System über Mechanismen verfügt, die es ihm ermöglichen, die Glanzausprägung einer Oberfläche unabhängig von ihrer 3D-Struktur zu erfassen (Erläuterungen im Text).

zeichnet, der Raumfrequenz und der Amplitude (vgl. Abb. 3.12; die hier dargestellten Reizmuster wurden in den Experimenten der vorliegenden Arbeit verwendet, jedoch wurden diese den Reizmustern nachempfunden, die Nishida und Shinya in ihren eigenen Versuchen benutzten). In einem Abgleichsexperiment waren ihre Beobachter dazu aufgefordert, zwei Reflexionsparameter des Phong-Modells (Phong, 1975; variiert wurden hier der Anteil der diffusen Komponente, sowie der Phong-Exponent) eines Abgleichsreizes so einzustellen, dass die auf einem Monitor präsentierte Oberfläche in ihrer wahrgenommenen Glanzbeschaffenheit mit der Glanzausprägung einer gleichzeitig dargebotenen Testoberfläche übereinstimmte. Neben der 3D-Beschaffenheit und der Reflexionseigenschaft der Oberflächen (drei verschiedene Werte sowohl für die diffuse Komponente als auch für den Phong-Exponenten) wurde zudem die Rotationsart variiert: Sowohl der Abgleichs- als auch der Testreiz rotierten während der Darbietung synchron um 90° um ihre horizontale Mittelachse. Unterschieden wurde hierbei zwischen der Simulation einer Objektbewegung und einer Beobachterbewegung (bei ersterer Rotationsvariante wurde eine stationäre Punktlichtquelle im virtuellen Raum festgelegt; bei der Beobachterrotation hingegen folgte die Lichtquelle der Rotationsbewegung der Oberfläche entlang der globalen Oberflächennormalen). Die Ergebnisse dieses ersten Experiments von Nishida und Shinya (1998) sind in Abbildung 3.10 dargestellt: Unterteilt nach den beiden Rotationsvarianten, sind jeweils sieben Diagramme dargestellt, welche mit den sieben unterschiedlichen Formparameter-Kombinationen für die Testoberfläche assoziiert sind (in den runden Klammern; der erste Wert steht für die Raumfrequenz, der zweite für die Amplitude, vgl. Abb. 3.12). Als Abgleichsreiz wurden ausschließlich Oberflächen mit einer Raumfrequenz von 3 und einer Amplitude von 0.2 verwendet (das jeweils mittlere Diagramm repräsentiert also die Bedingung, in der ein symmetrischer Abgleich angestellt wurde). Jedes Diagramm enthält die Parameterkombinationen für die Reflexionseigenschaft der Vorgabe-

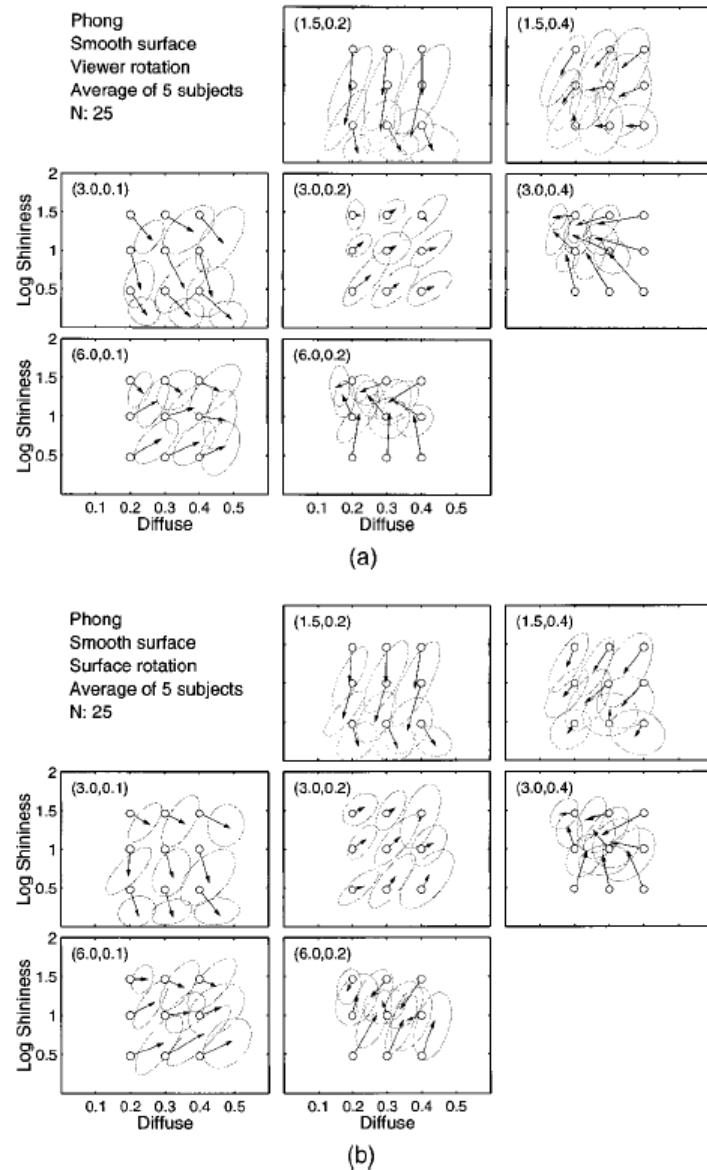


Abbildung 3.10: Ergebnisse des Experiments von Nishida und Shinya (1998; übernommen aus Abb. 4 ihrer Arbeit), getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen ‚Beobachterrotation‘ (oben) und ‚Oberflächenrotation‘ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Testoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden gemittelten Wertepaare des Abgleichsreizes (Pfeilspitzen).

oberfläche (offene Kreise), sowie die entsprechenden Wertepaare, die von den Beobachtern durch interaktive Manipulation der beiden Variablen „diffuse Komponente“ und „Phong-Exponent“ den Abgleichsoberflächen zugeordnet worden waren (Pfeilspitzen).

Es zeigt sich, dass für alle Bedingungen, außer derjenigen, bei der Abgleichs- und Testoberfläche dieselben Formparameter aufwiesen, zum Teil gravierende Abweichungen zwischen den vorgegebenen und eingestellten Reflexionsparametern bestehen. Die Art der Rotation scheint hier-

bei keinen nennenswerten Einfluss auf die Ausprägung und Richtung dieser Abweichungen zu haben, da unter beiden Rotationsbedingungen sehr ähnliche Daten erzeugt wurden. Betrachtet man die Diagramme in den Diagonalen der beiden nach der Rotationsart getrennten Datensätze (mit den 3D-Parameter-Kombinationen (6.0, 0.1), (3.0, 0.2) und (1.5, 0.4)), d.h. eben jene Bedingungen, bei denen die entsprechenden Oberflächen sich lediglich hinsichtlich ihrer Skalierung unterschieden⁵, so zeigt sich, dass sowohl die diffuse Komponente als auch die „Shininess“ (repräsentiert durch den Phong-Exponenten) für Oberflächen mit einer geringeren Raumfrequenz und einer gleichzeitig höheren Amplitude (1.5, 0.4) systematisch unterschätzt wurden, während diese Werte für Oberflächen mit einer hohen Raumfrequenz und einer geringeren Amplitude systematisch überschätzt wurden. Für die beiden Bedingungen, die sich im Vergleich zur Form-Bedingung (3.0, 0.2) nur bezüglich ihrer Raumfrequenz unterschieden ((1.5, 0.2) und (6.0, 0.2)), traten in erster Linie Abweichungen entlang der „Shininess“-Dimension auf. Lagen die Unterschiede zwischen der Test- und der Abgleichsoberfläche ausschließlich in der Amplitude der 3D-Form ((3.0, 0.1) und (3.0, 0.4)), so scheinen beide Reflexionsparameter für den Abgleichsreiz mehr oder weniger stark von den vorgegebenen Werten des Testreizes abzuweichen. Konkret an einem Beispiel ausgedrückt: Weisen zwei Oberflächen mit gleicher Raumfrequenz, jedoch unterschiedlicher Amplitude dieselbe Reflexionscharakteristik auf, so erscheint dem Betrachter die Oberfläche mit geringerer Amplitude (3.0, 0.1) stärker glänzend und gleichzeitig hinsichtlich ihrer Eigenfarbe (diffuse Komponente) dunkler als die Oberfläche mit vergleichsweise höherer Amplitude (3.0, 0.2).

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass es dem visuellen System nicht möglich ist, die Reflexionseigenschaft einer Oberfläche unabhängig von ihrer 3D-Geometrie zuverlässig zu erfassen – zumindest unter den in diesem Experiment verwendeten Darbietungsbedingungen. Mithilfe der hier durchzuführenden Reihe an Experimenten soll nun untersucht werden, ob durch eine Anreicherung der Reizmuster mit weiteren potentiellen Hinweisreizen eine Verbesserung der Glanzkonstanzeistung erreicht werden kann⁶. In Abgleichsexperimenten unter Verwendung ähnlicher Reizmuster wie bei Nishida und Shinya (1998) sollen hierzu drei verschiedene Kandidaten von Informationsquellen untersucht werden, die das visuelle System in diesem Zusammenhang möglicherweise nutzt:

Der mögliche Beitrag von binokularen Informationen zur Glanzkonstanz

In Abschnitt 2.4.2 wurde bereits eine Übersicht zum möglichen Beitrag von binokularen Hinweisreizen zur Glanzwahrnehmung geliefert. Wie durch verschiedene empirische Befunde gezeigt wurde, zu denen auch die Ergebnisse aus der vorangegangenen Experimentalreihe gehören, nutzt das visuelle System offenbar die Information der Glanzlicht-Disparität zur Beurteilung der Glanzstärke einer Oberfläche (vgl. auch Sakano & Ando, 2008). Weiterhin scheinen Reizmuster, die diesen Hinweisreiz enthalten, einen authentischeren Glanzindruck hervorzurufen. Doch können binokulare Informationen auch Glanzkonstanz fördern? Ein möglicher Einfluss von Disparitätsinformationen wurde bereits von Nishida und Shinya angesprochen: Die beiden Autoren nahmen an, dass durch das Vorhandensein von Oberflächen-Disparität im Reizmuster (z.B. bei

⁵Wenn hier und im Folgenden von dieser Gruppe von Form-Bedingungen die Rede sein wird, die sich nur hinsichtlich ihrer Skalierung unterscheiden, so ist hiermit nicht eine Skalierung der ihnen zugrunde liegenden Formparameter gemeint (in diesem Falle verhielten sich die mittlere Frequenz und die Amplitude ja invers zueinander: ($f_k, a/k$)), sondern eine Skalierung auf Basis der Vertices: Würde man beispielsweise alle Vertices eines Reizmusters mit den Formparametern (3.0, 0.2) gleichförmig entlang aller drei Raumdimensionen um den Faktor 0.5 verkleinern, so entstünden Wölbungen, die denen eines Reizmusters mit den Formparametern (6.0, 0.1) entsprächen.

⁶Sofern aus dem Kontext nicht anderweitig hervorgeht, soll im Folgenden unter dem Begriff „Glanzkonstanz“ immer die Invarianz der wahrgenommenen Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche unter wechselnden 3D-Strukturen verstanden werden; vgl. Abb. 3.9.

Verwendung einer texturierten Oberfläche) eine bessere Schätzung der 3D-Struktur einer Objektoberfläche ermöglicht werde (s. aber auch Johnston, Cumming & Landy, 1994), was wiederum – unter der Annahme, dass das visuelle System die räumliche Beschaffenheit der Glanzlichter als Anhaltspunkte für die Reflexionseigenschaften bewertet und hierfür die lokalen Krümmungen berücksichtigt – eine Verbesserung der Glanzkonstanzzleistung erwarten ließe⁷. Neben der Oberflächen-Disparität könnte sich aber auch das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität diesbezüglich als nützlich erweisen: Die Befunde aus der ersten Experimentalreihe deuteten darauf hin, dass das visuelle System über getrennte Repräsentationen für die Eigenfarbe und die Glanzschicht einer Oberfläche verfügt – zumindest phänomenal hoben sich diese beiden Komponenten räumlich voneinander ab. Glanzlicht-Disparität könnte nun dazu beitragen, die in jedem Bildpunkt miteinander vermischten Intensitäten dieser beiden Komponenten zu trennen, so dass zuverlässigere Schätzungen der Eigenfarbe wie der Glanzschicht möglich wären, die sich in den nachfolgend zu erhebenden Abgleichsdaten durch geringere Abweichungen zwischen den Reflexionsparameterwerten des Vorgabe- und des Abgleichsreizes zeigen würden.

Der mögliche Beitrag von Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanz

Die Bedeutung von Bewegungsinformationen für die Wahrnehmung von Glanz wurde zwar schon sehr früh in Betracht gezogen, empirische Untersuchungen hierzu sind jedoch kaum vorhanden (s. Abschnitt 2.4.1). Wie Sakano und Ando (2008) jedoch vor kurzem zeigen konnten, werden auch solche Informationen offenbar vom visuellen System genutzt, um den Grad der Glanzausprägung einer Oberfläche zu beurteilen. Bezogen auf einen möglichen Einfluss von Bewegungsinformation auf die Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche unter wechselnden 3D-Strukturen, wäre Ähnliches denkbar wie bei den Disparitäts-Informationen (vgl. auch Rogers & Graham, 1982): Wies dort das Reizmuster im Allgemeinen einen simultanen Unterschied in den Intensitäten an jeder Stelle der Oberfläche zwischen den beiden monokularen Halbbildern auf (zumindest in den Bereichen, die von einem Glanzlicht bedeckt sind), so zeigen sich in der Projektion eines sich bewegenden Objekts in vergleichbarer Weise sukzessive Intensitätsänderungen an jeder Stelle seiner Oberfläche. Derselbe Bereich einer Oberfläche wird unter unterschiedlichen Orientierungen zur Lichtquelle in der Regel auch unterschiedliche Lichtmengen zum Auge des Beobachters reflektieren. Im Extremfall weist das vom selben Punkt der Oberfläche in Richtung des Beobachters reflektierte Licht unter der einen Orientierung einen starken Glanzanteil auf, während er unter einer anderen Orientierung ausschließlich diffus zum Auge des Betrachters reflektiert, so dass auch hier eine bessere Aufspaltung in die beiden (unter jeder einzelnen Orientierung unauflöslich miteinander vermengten) Komponenten gelingen könnte, wenn diese sukzessiven Intensitätsänderungen in dem Gesamtverlauf der Bewegung erfasst und in irgendeiner Weise miteinander in Beziehung gesetzt werden. Zudem könnten auch Bewegungsinformationen zu einer besseren Schätzung der 3D-Struktur beitragen (vgl. Ullman, 1979; sowie Richards, 1985; siehe aber auch Todd & Norman, 2003): Ähnlich wie bei Vorhandensein von Disparitäts-Informationen (s.o.) könnte die Glanzkonstanzzleistung also dadurch verbessert werden, dass das visuelle System den durch die lokale Oberflächenkrümmung gegebenen Einfluss auf die räumliche Beschaffenheit

⁷Tatsächlich nehmen Nishida und Shinya (1998) jedoch an, dass das visuelle System zur Beurteilung der Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche auf Bildstatistiken zurückgreift: Wie eine von ihnen angestellte Simulation ergab, ließen sich die von ihnen erhobenen empirischen Daten mit einem Mechanismus erklären, demzufolge zwei Oberflächen dann als gleich hinsichtlich ihrer Reflexionseigenschaften empfunden werden, wenn diese ähnliche Pixelhistogramme aufweisen. Sollten solche Bildstatistiken aber die einzige Informationsquelle sein, die das visuelle System bei der Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche berücksichtigt, so dürfte es keine weitere Rolle spielen, ob zusätzlich eine bessere Schätzung der 3D-Struktur mit Hilfe von binokularen Informationen ermöglicht wird – denn die Pixelhistogramme lassen sich auch aus dem monokularen Input ermitteln. Dieser von Nishida und Shinya vorgeschlagene Ansatz zur Bedeutung von Bildstatistiken bei der Wahrnehmung von Glanz wird in Abschnitt 3.3 der vorliegenden Arbeit noch genauer dargestellt werden.

der Glanzlichter bei der Bestimmung der Glanzeigenschaft berücksichtigt. Sowohl die Reizmuster bei Nishida und Shinya als auch die, welche in der ersten Experimentalreihe dieser Arbeit verwendet wurden, enthielten entsprechende Bewegungsinformationen, so dass die hier wie dort erhobenen Daten den möglichen Einfluss dieser Informationsquelle bereits enthielten. In den folgenden Experimenten soll daher überprüft werden, ob demgegenüber eine statische Präsentation der Reizmuster zu einer Verschlechterung der Glanzkonstanzeistung führt.

Der mögliche Beitrag von Farbinformationen zur Glanzkonstanz

Die Glanzflecken auf Oberflächen aus nichtleitenden Materialien, wie beispielsweise Kunststoff, weisen die Farbe der Beleuchtung auf (Angelopoulou & Poger, 2003; vgl. auch Abschnitt 2.1), die sich im Allgemeinen von der Eigenfarbe des Objektes unterscheidet⁸. Wie in einigen Untersuchungen gezeigt werden konnte, nutzt das visuelle System diese Farbinformation offenbar innerhalb eines Farbkonstanzmechanismus' (s. z.B. Lee, 1986; Yang & Maloney, 2001; Maloney, 2002; Yang & Shevell, 2002), um die Farberscheinung eines Objektes von dem Einfluss der Beleuchtungsfarbe zu befreien. Im Bereich der Glanzwahrnehmung konnten außerdem Nishida, Motoyoshi, Nakano, Li, Sharan und Adelson (2008) zeigen, dass das visuelle System offenbar nicht jede beliebige Kombination von Glanz- und Eigenfarbe eines Objektes akzeptiert: Werden physikalisch unmögliche Farbkombinationen für die diffuse und die spiegelnde Komponente gewählt, wie beispielsweise ein rotes Glanzlicht auf einer ansonsten weiß gefärbten Oberfläche, so werden die entsprechenden Reizmuster zum einen als geringer in ihrem Glanzgehalt bewertet und zum anderen als inhomogen hinsichtlich ihrer wahrgenommenen Eigenfarbe, wobei die gesamte Oberfläche offenbar eine etwas bizarre Erscheinung annimmt („[...] the surface images looked somewhat strange [...]“; S. 339a).

Doch auch für einen Glanzkonstanzmechanismus könnten solche Farbbeziehungen potentiell wertvolle Informationen liefern: So wäre beispielsweise anzunehmen, dass dem visuellen System bei solchen Reizmustern, deren diffuse und spektrale Reflexionskomponente durch unterschiedliche Farbtöne gekennzeichnet sind, eine bessere Schätzung der Ausdehnung und vor allem der Gradienten der Glanzflecken gelingt und zwar durch die zusätzliche Berücksichtigung der Mischungsanteile zwischen den beiden zugrunde liegenden Farbkomponenten – eine Leistung, die bei rein achromatischen (oder allgemein bezüglich ihrer Farbbeschaffenheit homogenen) Reizmustern dadurch erschwert sein könnte, dass hier ausschließlich Intensitätsunterschiede als Ausgangsinformation vorliegen: Da sich das von einer Oberfläche reflektierte Licht additiv aus dem diffus und dem spiegelnd zurückgestrahlten Licht zusammensetzt, würde sich beispielsweise ein weißliches Glanzlicht nicht nur hinsichtlich seiner Intensität von den eher diffus reflektierenden Bereichen der Oberfläche abgrenzen, sondern zusätzlich durch farbliche Übergänge zwischen den beiden beteiligten Komponenten. Trüge man die Farbkoordinaten jedes Pixels eines Bildes, das ein glänzendes Objekt darstellt und welches für beide Reflexionskomponenten unterschiedliche Farben aufweist, in einem Farbraum ab, so ergäben sich im Gegensatz zu einfärbigen Reizen zwei unterschiedliche Cluster, welche eindeutig den beiden Komponenten *Glanzschicht* und *Eigenfarbe* zuordnenbar wären (vgl. z.B. Tominaga & Tanaka, 2000) – Informationen, die möglicherweise auch vom visuellen System berücksichtigt werden, um die räumliche Beschaffenheit von Glanzflecken zu bestimmen, die wiederum als potentieller Hinweisreiz für die Reflexionsbeschaffenheit einer Objektoberfläche genutzt werden könnte. In den folgenden Experimenten sollen daher auch rein

⁸Natürlich wirkt sich die spektrale Energieverteilung der herrschenden Beleuchtung auch auf die Remissionsverteilung des von einer rein diffus reflektierenden Oberfläche zurückgeworfenen Lichtes aus, wobei diese sich (für jede Wellenlänge) aus dem Produkt der spektralen Energieverteilung der Beleuchtung und der Reflektanzfunktion der Oberfläche ergibt. Die (relative) spektrale Remissionsverteilung einer Oberfläche entspräche also nur dann der spektralen Energieverteilung der Beleuchtung, wenn sie eine flache Reflektanzfunktion besäße.

achromatische Reizmuster mit solchen verglichen werden, deren diffuse und spiegelnde Komponente unterschiedliche Farben aufweisen, um auf diese Weise zu testen, ob das visuelle System diesen potentiellen Hinweisreiz für eine Glanzkonstanzleistung berücksichtigt.

3.2.1 Reizmuster

Die Reizmuster, die für die nachfolgenden Experimente verwendet wurden, waren so konstruiert, dass sie vergleichbar mit den computergenerierten 3D-Reizen waren, die Nishida und Shinya (1998) in ihrem Abgleichsexperiment benutzten. Ähnlich wie bei den Reizmustern aus der Experimentalreihe I bestanden sie aus einer quadratischen Grundfläche in der (x, z) -Ebene und einem Höhenprofil (y -Koordinate), das sich aus einer Kombination von Sinusgittern zusammensetzte, deren Orientierungen und Phasen zufällig waren. In den Experimenten wurden sieben verschiedene 3D-Formbedingungen verwendet (s. Abb. 3.12), deren globale 3D-Formen durch zwei Parameter gekennzeichnet waren: Zum einen durch den Frequenzparameter f , der die Raumfrequenz der komplex gewölbten Oberflächen festlegt und zum anderen durch den Amplitudenparameter a , der die Amplitude, bzw. die Spannweite des Höhenprofils der Oberflächen bestimmt. Die Anzahl der für jedes Reizmuster miteinander kombinierten Sinusgitter hing von dem Frequenzparameter f ab, in der Form, dass jede Oberfläche aus $40f$ Sinusgittern zusammengesetzt war, welche Frequenzen zwischen 0 und $2f$ Zyklen pro Bild in Schritten zu $1/20$ Zyklen pro Bild aufwiesen. Das Gewicht, mit dem jedes dieser Sinusgitter in das Gesamtmuster einfloss, nahm dabei exponentiell mit dessen Frequenz ab, so dass ein Sinusgitter mit einer Frequenz von 0 Zyklen pro Bild ein Gewicht von 1 erhielt, während die höchste im Reizmuster vertretene Frequenz von $2f$ Zyklen pro Bild ein Gewicht von $1/e$ aufwies – Sinusgitter mit höheren Frequenzen als diese Grenzfrequenz von $2f$ wurden nicht berücksichtigt. Die grundlegende Generierungsformel für die in der zweiten Experimentalreihe verwendeten Reizmuster ist in Formel 3.3 dargestellt:

$$y = g(x, z) = \sum_{k=0}^{40f-1} a \cdot \exp\left[-\frac{k^2}{1600f^2}\right] \sin\left[\left(\frac{x}{100}\pi \cos(o_k) + \frac{z}{100}\pi \sin(o_k)\right)\frac{k}{10} + p_k\right]. \quad (3.3)$$

x und z , die die Vertexpositionen in der quadratischen Grundebene repräsentieren, nehmen dabei in ganzzahligen Schritten jeweils Werte zwischen 1 und 100 an. Der Frequenzparameter (f), wie auch die Amplitude (a) der zu generierenden Oberflächen sind hier jeweils vorgegeben (s.u.). Die Orientierungen (o_k) und Phasen (p_k) waren für jedes der zugrunde liegenden Sinusgitter zufällig aus dem Intervall $[0, \pi]$, bzw. $[0, 2\pi]$ gewählt. Das resultierende Höhenprofil wurde anschließend an seinem maximalen Wert normiert und so umskaliert, dass eine vorgegebene Amplitude von $a = 1.0$ zu einem Gesamtrez führte, dessen Höhenspannweite genau der doppelten Reizlänge in den beiden übrigen Dimensionen in der (x, z) -Ebene entsprach. Durch eine nochmalige Skalierung aller Vertices mit einem Faktor von 0.12 wurde das gesamte Reizmuster, dessen Zentrum 10 cm im virtuellen Raum hinter der Schnittalebene (Bildschirm) lokalisiert war, schließlich auf eine Größe gebracht, bei der die Kantenlänge der auf die Schnittalebene projizierten Grundfläche ca. 6.5 cm betrug.

Wie schon bei den Reizmustern in den vorangegangenen Experimenten, bildeten auch hier vier benachbarte Vertices die Eckpunkte einer viereckigen Facette, aus denen sich die gesamte, komplexe gewölbte Oberfläche des Reizmusters zusammensetzte. Im Gegensatz zu den Reizmustern aus der Experimentalreihe I wurden die einzelnen Kacheln hier jedoch nicht homogen eingefärbt. Stattdessen wurde eine Pixel-Shading-Interpolationsmethode verwendet (Akenine-Möller & Haynes, 2002), welche für jedes dargestellte Pixel der Oberfläche die zugehörige Normale als Ergebnis einer Interpolation zwischen den vier Normalen der Eckpunkte einer Facette berechnet. Jedes

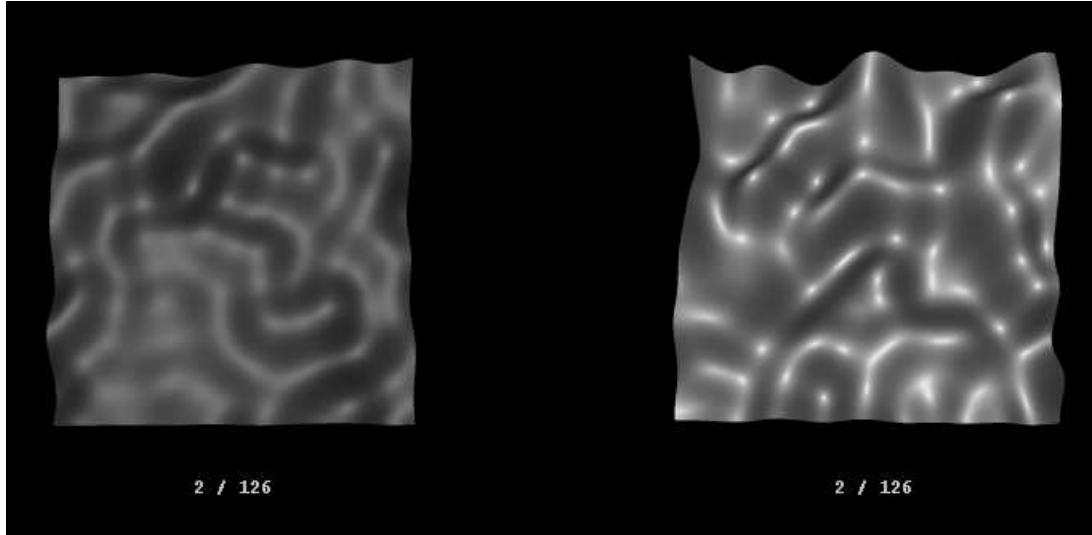


Abbildung 3.11: Screenshot des Versuchsdisplays unter monokularen Beobachtungsbedingungen (hier als Ausschnitt und verkleinert dargestellt): Das Reizmuster auf der linken Bildhälfte stellt den Testreiz dar, der während des gesamten Versuchs die Formparameter-Kombination ($f = 3.0, a = 0.2$) aufwies (vgl. Formel 3.3). Das rechte Reizmuster zeigt beispielhaft den Abgleichsreiz, welcher in sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen präsentiert wurde. Beide Reizmuster rotierten während der Darbietung um ihre horizontale Mittelachse.

Pixel wurde demnach separat eingefärbt, entsprechend der ihm zugeordneten Reflexionsparameterkombination, unter Berücksichtigung seiner Normalenorientierung, sowie der Beobachter- und Lichtrichtung – Abschattungseffekte hingegen, wie sie beispielsweise vorkommen, wenn Teile einer Oberfläche den Lichteinfall auf andere Oberflächenteile behindern, wurden bei der Reizgenerierung jedoch nicht berücksichtigt. Die Verwendung eines solchen Interpolationsverfahrens war deshalb notwendig geworden, weil in den nachfolgenden Experimenten die räumliche Struktur der Oberflächen variiert werden soll. Für die relativ schwach gekrümmten Oberflächen aus der Experimentalreihe I konnten durch eine homogene Einfärbung der einzelnen Facetten noch annähernd stetige Helligkeitsgradienten erzeugt werden – für die mitunter sehr stark gekrümmten Oberflächen der nachfolgenden Experimente hingegen wäre dies nicht mehr der Fall, da die Kachelstruktur der Reizmuster deutlich sichtbar hervortreten würde.

Für die Einfärbung der einzelnen Pixel einer Oberfläche wurde wieder das Beleuchtungsmodell nach Phong (1975) verwendet, diesmal jedoch in einer feiner aufgelösten Variante als in Formel 3.2:

$$I = I_a k_a + I_p k_d \cos(\theta) + I_p k_s \cos^n(\alpha). \quad (3.4)$$

Als weitere modifizierende Faktoren sind hier nun, im Vergleich zu der vereinfachten Variante in Formel 3.2, explizit Intensitäten für die unterschiedlichen Lichtquellen hinzugekommen: I_a repräsentiert hierbei die Intensität der ambienten Beleuchtung, I_p die der Punktlichtquelle (die übrigen Bezeichnungen entsprechen denen in Formel 3.2).

Wie bei der Untersuchung von Nishida und Shinya, sollen auch hier, zumindest in einigen Experimenten, zwei verschiedene Rotationsbewegungen betrachtet werden: Zum einen eine Rotation der Oberfläche, zum anderen eine des Beobachters. In beiden Fällen rotiert die Oberfläche um 90°

um ihre horizontale Mittelachse. In ihrer Ausgangsstellung (0°) ist die globale Oberflächennormale des Reizmusters dabei in die y -Richtung des virtuellen Raums orientiert. Mit einer Geschwindigkeit von ca. 56° pro Sekunde rotiert die Oberfläche dann gleichmäßig um ihre horizontale Mittelachse (x -Achse), so dass nach 90° die Oberfläche mit ihrem Höhenprofil frontoparallel zum Beobachter ausgerichtet ist, die globale Oberflächennormale also parallel zur Blickrichtung verläuft. Zwischen diesen beiden Stellungen rotiert die Oberfläche solange hin und her, bis der jeweilige Durchgang während des Experiments seitens des Beobachters abgebrochen wird. Für die Simulation einer Oberflächenrotation wurde eine hinsichtlich ihrer Position statische Punktlichtquelle in den virtuellen Raum platziert (mit einer Distanz von 100 cm zum Zentrum des Reizmusters); die Lichtrichtung war so festgelegt, dass sie die Winkelhalbierende zwischen den Normalenorientierungen der Oberfläche während ihrer beiden Extremstellungen (0° und 90°) bildete. Für die Simulation einer Beobachterrotation folgte die Lichtquelle der Rotationsbewegung der Oberfläche entlang der globalen Oberflächennormalen. In letzterem Fall blieb daher die diffuse Komponente konstant für jeden Punkt auf der Oberfläche, da der Winkel zwischen der Lichtquelle und den einzelnen Pixelnormalen ($\theta = \text{const}$ in Formel 3.4) unverändert blieb.

In manchen Experimenten der Experimentalreihe II sollen die Reizmuster, die in jedem Fall aus einem Abgleichs- und einem Vorgabereiz bestehen, in einer monokularen Darbietungsform präsentiert werden, wobei unter ‚monokular‘ hier wie im Folgenden nicht streng genommen das einäugige Betrachten von Reizmustern gemeint sein soll, sondern allgemein die Darbietung von Reizmustern, die keinerlei Disparitätsinformationen enthalten. In diesem Fall sind die beiden Reizmuster nebeneinander mit einer Zentrum-zu-Zentrum-Distanz von 12 cm auf dem Monitor dargestellt (s. Abb. 3.11). Für eine in anderen Fällen ebenfalls verwendete stereoskopische Darbietungsvariante, wenn es also darum ging, den Beitrag von binokularen Hinweisreizen zu prüfen, wurden die entsprechenden Reizpaare untereinander auf dem Bildschirm präsentiert, mit einem vertikalen Abstand von 12 cm (Zentrum-zu-Zentrum; vgl. z.B. Abb. 3.18). Alle Reizmuster wurden vor einem gemeinsamen, annähernd lichtlosen Hintergrund dargeboten. Die zur Reizpräsentation verwendeten Geräte waren dieselben wie in Experimentalreihe I, die Beobachterdistanz zum Monitor betrug ca. 50 cm.

3.2.2 Experiment 1: Das Erkennen der Reflexionseigenschaft einer Oberfläche unter wechselnden 3D-Formen

Um die Effekte der eingangs beschriebenen potentiellen Hinweisreize auf eine Glanzkonstanzeistung messen zu können, wurde zunächst ein Experiment durchgeführt, das dem Ursprungsexperiment von Nishida und Shinya (1998) sehr ähnlich war. Gegenstand dieses Experiments ist es, zu prüfen, ob, bzw. wie gut es Beobachtern – zunächst unter monokularen Darbietungsbedingungen – gelingt, die Reflexionsbeschaffenheit zwischen zwei komplex gewölbten Oberflächen abzugleichen, die sich hinsichtlich ihrer räumlichen Struktur unterscheiden. Die dabei gewonnenen Daten sollen für die Ergebnisse der darauffolgenden Untersuchungen als Referenzwerte dienen.

Der Vorgabe- und der Abgleichsreiz wurden simultan auf dem Bildschirm präsentiert. Der Vorgabereiz befand sich dabei immer in der linken, der Abgleichsreiz immer in der rechten Bildhälfte des Monitors (vgl. Abb. 3.11). Der Vorgabereiz wies immer dasselbe Paar von 3D-Parametern auf: 3.0 für die mittlere Frequenz (f) der Sinusgitter und 0.2 für die Amplitude (a , vgl. Formel 3.3). Da für jedes Reizmuster bei jedem neuen Versuchsdurchgang andere Zufallswerte für die Orientierungen und Phasen der zugrunde liegenden Sinusgitter verwendet wurden, war es unwahrscheinlich, dass innerhalb des Gesamtumfangs des Experiments der Fall auftrat, bei dem sich zwei Reizmuster in ihrer 3D-Struktur vollkommen glichen, selbst wenn ihre 3D-Formen durch dasselbe Parameterpaar gekennzeichnet waren. Für den Abgleichsreiz wurden sieben verschiedene Parameterkombinationen für die 3D-Struktur gewählt (der jeweils erste Wert repräsentiert die mittlere Frequenz, der zweite jeweils die Amplitude): (1.5, 0.2), (1.5, 0.4), (3.0, 0.1), (3.0, 0.2), (3.0, 0.4), (6.0, 0.1), (6.0, 0.1). Beispiele für aus diesen Parameterkombinationen resultierende Reizmuster gibt die Abbildung 3.12.

Die Vorgabeoberfläche wurde insgesamt mit neun unterschiedlichen Kombinationen von Reflexionsparametern versehen, variiert wurde hier der Anteil der diffusen Komponente (k_d in Formel 3.4) und der Exponent des spiegelnden Anteils (n in Formel 3.4). Für die diffuse Komponente wurden die Werte 0.2, 0.3 und 0.4 vorgegeben, die jeweils gepaart wurden mit den Werten 3.322, 10.498 und 30.498 für den Phong-Exponenten⁹. Die Werte für die übrigen Komponenten in Formel 3.4 wurden konstant gehalten, mit 0.2 für die Intensität der ambienten Beleuchtung (I_a), 0.3 für den ambienten Reflexionskoeffizienten (k_a), 1.0 für die Intensität der Punktlichtquelle (I_p) und 0.2 für den spiegelnden Reflexionskoeffizienten (k_s).

Neben der 3D-Form und der Reflexionsbeschaffenheit wurde auch die Art der Rotation variiert (in den Stufen *Objektrotation* und *Beobachterrotation*). Es ergaben sich für das erste Experiment somit insgesamt 126 unterschiedliche Bedingungskombinationen (7 3D-Formen \times 3 Werte für die diffuse Komponente \times 3 Werte für den Phong-Exponenten \times 2 Rotationsarten). Jede dieser Kombinationen wurde während des Experiments vier Mal wiederholt, wobei die einzelnen Bedingungen im Gesamtumfang von nunmehr 504 Durchgängen, die in vier getrennten Sitzungen zu je 126 Durchgängen bearbeitet wurden, in randomisierter Reihenfolge dargeboten wurden.

Die Beobachter erhielten für die Abgleichsaufgabe keinerlei Zeitbeschränkung. Für die Einstellung der beiden Reflexionsparameter im Abgleichsreiz benutzten sie die Pfeiltasten auf der Tastatur („ \uparrow “ / „ \downarrow “ für die Inkrementierung / Dekrementierung des Wertes für die diffuse Komponente, „ \rightarrow “ / „ \leftarrow “ für den Phong-Exponenten). Der diffusen Komponente konnten seitens des Beobachters Werte zwischen 0.0 und 0.7 in Schritten zu 0.02 zugewiesen werden, dem Phong-Index Werte zwischen 1.0 und 3.5 in Schritten zu 0.05. Jeder Durchgang wurde, nachdem der Beobachter den Abgleich fertig gestellt hatte, mit der Eingabetaste beendet, worauf eine Sekunde

⁹Diese Werte entsprechen nur annähernd den Werten, die Nishida und Shinya für ihre Untersuchung gewählt hatten (3.0, 10.0 und 29.0). Sie wurden deshalb für dieses Experiment verwendet, weil sie die rücktransformierten Werte der Phong-Index-Skala (mit den entsprechenden Werten 1.35, 1.8 und 2.35; vgl. Abschnitt 3.1.1) darstellen, welche hier benutzt wurde, um annähernd perzeptuell gleichabständige Einheiten für die Einstellung dieses Reflexionsparameters während des Abgleichsvorgangs zu gewährleisten.

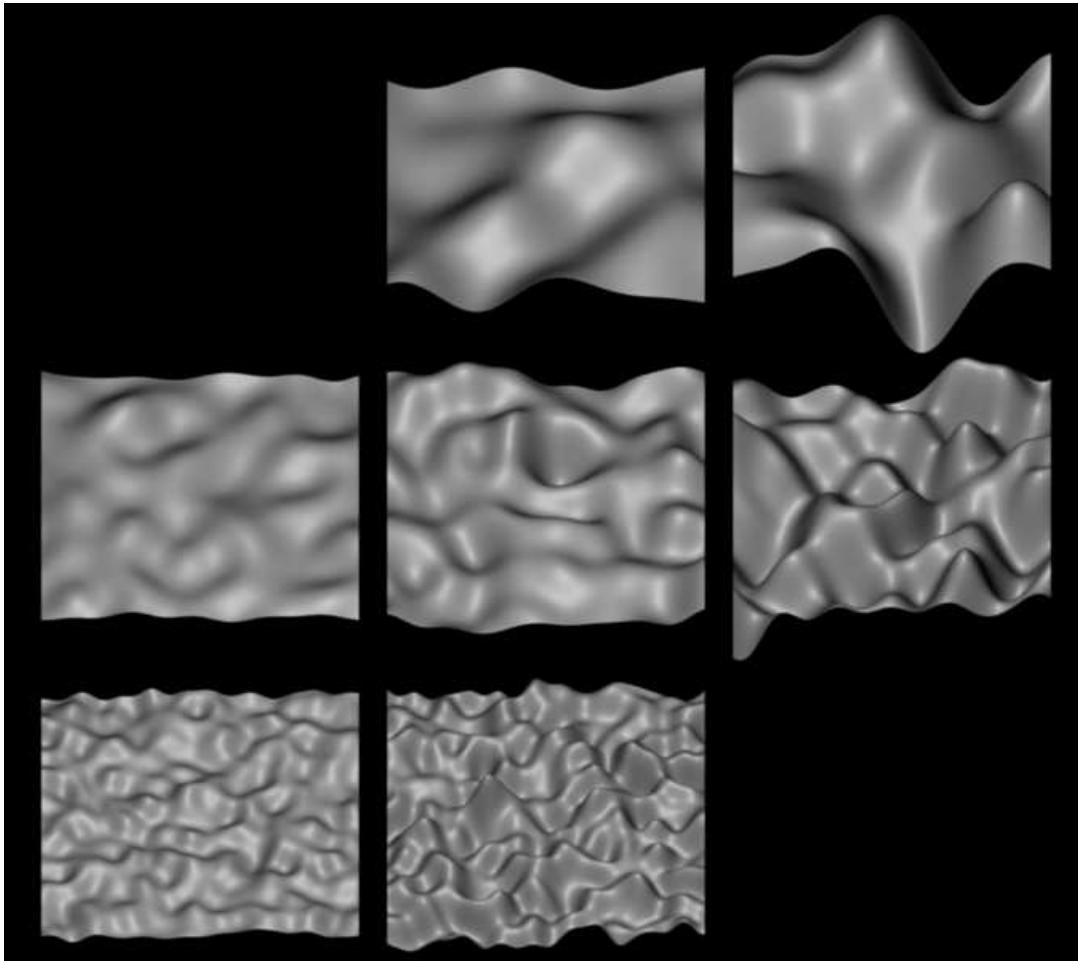


Abbildung 3.12: Beispielreizmuster, wie sie aus den sieben unterschiedlichen 3D-Parameterkombinationen resultieren. Die Reizmuster unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Amplitude (Abszisse) und ihrer Raumfrequenz (Ordinate).

anhaltende Dunkeladaptationsphase eingeschoben wurde, bevor der nächste Durchgang startete.

Versuchspersonen

An dem ersten Experiment nahmen, neben dem Autor der vorliegenden Arbeit, drei weitere Beobachter teil, die zum Teil mit Versuchspersonenstunden im Rahmen ihres Pflichtkontingents als Studierende der Psychologie an der CAU Kiel, zum Teil mit Geld vergütet wurden. Alle Beobachter waren normalsichtig oder trugen während der Versuchsdurchführung entsprechende Sehhilfen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse dieses ersten Experiments der zweiten Experimentalreihe sind in den Abbildungen 3.13 - 3.17 dargestellt. Für die Darstellung der Daten wurde dieselbe Form benutzt wie bei Nishida und Shinya (1998; vgl. Abb. 3.10). Getrennt nach den beiden Rotationsvarianten (obere, bzw. untere Hälfte einer jeden Abbildung) sind jeweils sieben Diagramme dargestellt, welche mit den sieben unterschiedlichen Formparameter-Kombinationen für die Abgleichsoberfläche assoziiert sind (die jeweiligen Form-Bedingungen – die mittlere Frequenz und die Amplitude – sind in jedem

Diagramm in der linken oberen Ecke angegeben, vgl. auch Abb. 3.12). Jedes Diagramm enthält neun Paare von Datenpunkten: Jedes Wertepaar für die diffuse Komponente (Abszisse) und den Phong-Index (Ordinate) des Vorgabereizes (dargestellt als offener roter Kreis) ist, als roter Pfeil dargestellt, mit dem entsprechenden gemittelten Wertepaar verbunden, welches von den Beobachtern dem jeweiligen Abgleichsreiz zugewiesen worden war (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren, entlang ihrer Hauptachsen, jeweils auf der einfachen Stichprobenstreuung¹⁰. Abbildung 3.13 zeigt die über alle vier Beobachter gemittelten Daten, die übrigen Abbildungen (Abb. 3.14 - 3.17) zeigen die gemittelten Daten einzeln für jede Versuchsperson.

Zunächst zeigt sich bei einem Vergleich der jeweils oberen mit der unteren Hälfte der Abbildungen, dass die Art der Rotationsbewegung offenbar keinen nennenswerten Einfluss auf die Einstellgenauigkeit der Reflexionsparameter für die Abgleichsoberflächen hatte. Wie schon bei Nishida und Shinya (1998; vgl. Abb. 3.10) weisen die Datenprofile zwischen den beiden Stufen „Oberflächenrotation“ und „Beobachterrotation“ wenigstens unter einigen 3D-Form-Bedingungen große Ähnlichkeiten sowohl in der Richtung als auch in der Stärke der Abweichung von den vorgegebenen Reflexionsparameterpaaren auf. Auch wenn bei anderen 3D-Bedingungen teilweise unterschiedliche Muster in den Tendenzen der Abweichungen zwischen eingestellten und vorgegebenen Parameterwerten zu erkennen sind, lässt sich doch zumindest nicht feststellen, dass eine Rotationsart der anderen gegenüber eine grundlegende Erleichterung für das Erkennen der Reflexionseigenschaften geboten hätte.

Bei einem Vergleich zwischen den einzelnen Diagrammen innerhalb einer Rotationsart zeigt sich, dass die größten Unsicherheiten bei der Herstellung eines Abgleichs offenbar unter den 3D-Bedingungen (3.0, 0.4) und (6.0, 0.2) auftraten, wenn man sowohl die Größe der Streuungsellipsen berücksichtigt, als auch die Tatsache, dass sich die jeweils neun Datenpunkte in den entsprechenden Diagrammen am wenigsten unter einen einheitlichen Trend zusammenfassen lassen. Weiterhin kann man beobachten, dass, bei genauerer Betrachtung der Ausdehnung und der Orientierung der Streuungsellipsen, offenbar unter einigen Reflexionsparameter-Bedingungen eine relativ starke positive Korrelation zwischen eingestelltem Phong-Exponenten und eingestellter diffuser Komponente besteht. Dies trat insbesondere unter solchen Vorgabereizen auf, welche durch einen sehr niedrigen Phong-Exponenten gekennzeichnet waren (vor allem bei $n = 3.322$; dies entspricht einem Phong-Index von 1.35). Möglicherweise lässt sich dieser Aspekt damit erklären, dass Reizmuster mit einem verhältnismäßig geringen Phong-Exponenten aufgrund der weiten Ausdehnung der einzelnen Glanzflecken, die zudem nicht scharf voneinander getrennt erscheinen, sondern räumlich ineinander zerfließen, eher als in ihrer Eigenfarbe aufgehellt wahrgenommen werden denn als glänzend. Um einen Abgleich zu solchen gering glänzenden Reizmustern herzustellen, könnte der Beobachter also auf einem Kontinuum zwischen zwei Extremvarianten wählen, die darin bestehen, entweder die diffuse Komponente zu erhöhen und gleichzeitig auch den Phong-Exponenten heraufzusetzen (um den Reiz damit in seiner Gesamterscheinung wieder etwas abzudunkeln), oder aber die diffuse Komponente zu reduzieren und die Grundhelligkeit der Oberfläche stattdessen mittels eines niedrigen Phong-Exponenten zu erzeugen. Dieser Aspekt, die relativ starke Korrelation zwischen den Abgleichswerten für die diffuse Komponente und dem Phong-Exponenten, findet sich übrigens auch schon in den Daten von Nishida und Shinya (vgl. die Orientierung ihrer Streuungsellipsen in Abb. 3.10).

¹⁰Hier, wie auch bei den übrigen Ergebnisdarstellungen dieser Arbeit, in denen die Daten in derselben Form präsentiert sind, wurde für die Berechnung der Streuungsellipsen wie folgt vorgegangen: Aus jedem Datensatz einer entsprechenden Bedingungskombination wurden zunächst die Mittelwerte der beiden abhängigen Variablen ‚diffuse Komponente‘ und ‚Phong-Index‘ errechnet, welche das Zentroid der Streuungsellipsen bilden. Aus diesem zweidimensionalen Datensatz wurden zudem die korrigierten Varianzen, bzw. Kovarianzen berechnet. Von der daraus gebildeten Kovarianzmatrix wurde danach das Eigensystem berechnet, d.h. die Eigenvektoren und die Eigenwerte. Die beiden Eigenvektoren bestimmen nun die (orthogonalen) Hauptachsenorientierungen der Streuungsellipsen, die Wurzeln der Eigenwerte die Halbmesser entlang dieser Achsen.

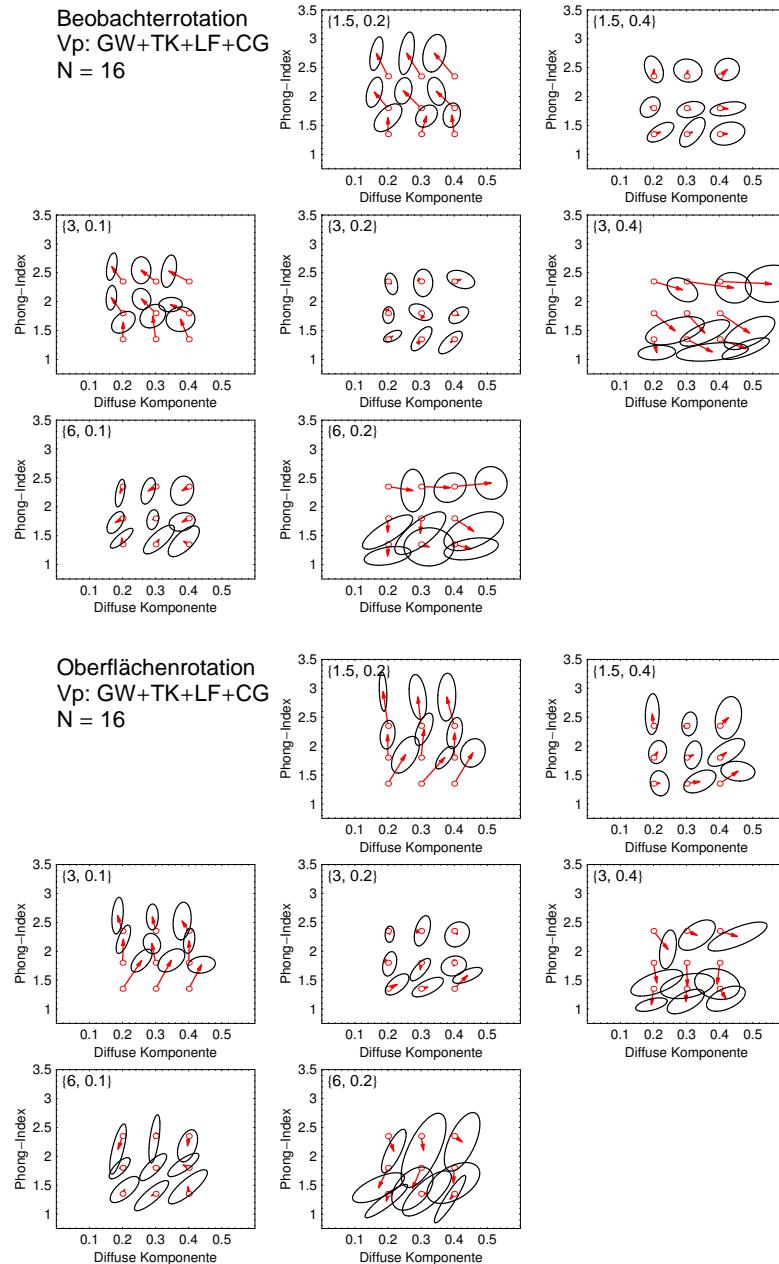


Abbildung 3.13: Ergebnisse des Abgleichsexperiments (über alle vier Beobachter gemittelt), getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen ‚Beobachterrotation‘ (oben) und ‚Oberflächenrotation‘ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweils zusammengefassten Stichproben.

Augenfällig, insbesondere bei Betrachtung der über alle Beobachter gemittelten Daten (Abb. 3.13), sind nun jedoch einige Unterschiede zu den Ergebnissen von Nishida und Shinya: Zunächst

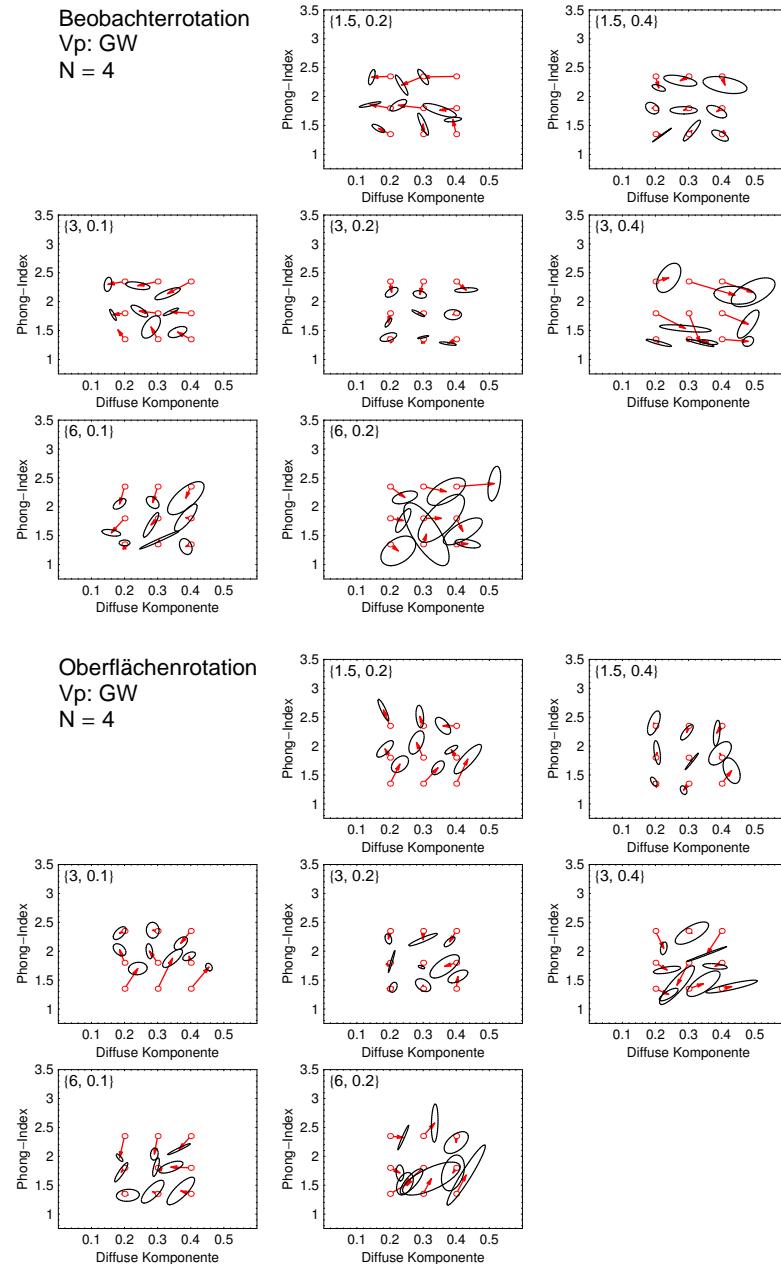


Abbildung 3.14: Ergebnisse des Abgleichsexperiments für Beobachter GW, getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen ‚Beobachterrotation‘ (oben) und ‚Oberflächenrotation‘ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen Stichproben.

scheinen die geringsten Fehler¹¹ nicht nur unter der symmetrischen Bedingung aufzutreten, d.h.

¹¹Der Begriff *Fehler* wird im Folgenden nur in seiner statistischen Bedeutung gebraucht, im Sinne einer Abweichung

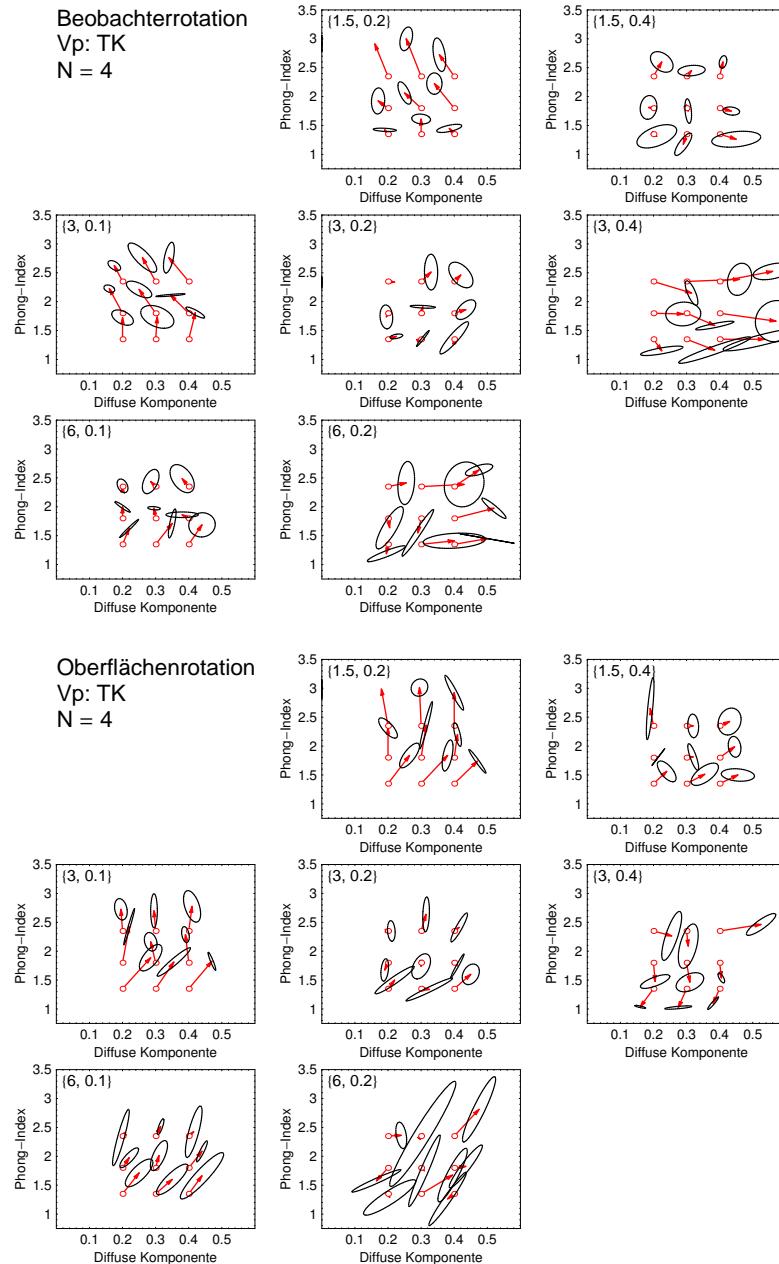


Abbildung 3.15: Ergebnisse des Abgleichsexperiments für Beobachter TK, getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen ‚Beobachterrotation‘ (oben) und ‚Oberflächenrotation‘ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen Stichproben.

unter der Bedingung bei welcher der Vorgabe- und der Abgleichsreiz dieselben 3D-Parameter

der eingestellten von den vorgegebenen Werten für die Reflexionsparameter und soll keine substantielle Interpretation im Sinne einer Fehlleistung des visuellen Systems implizieren.

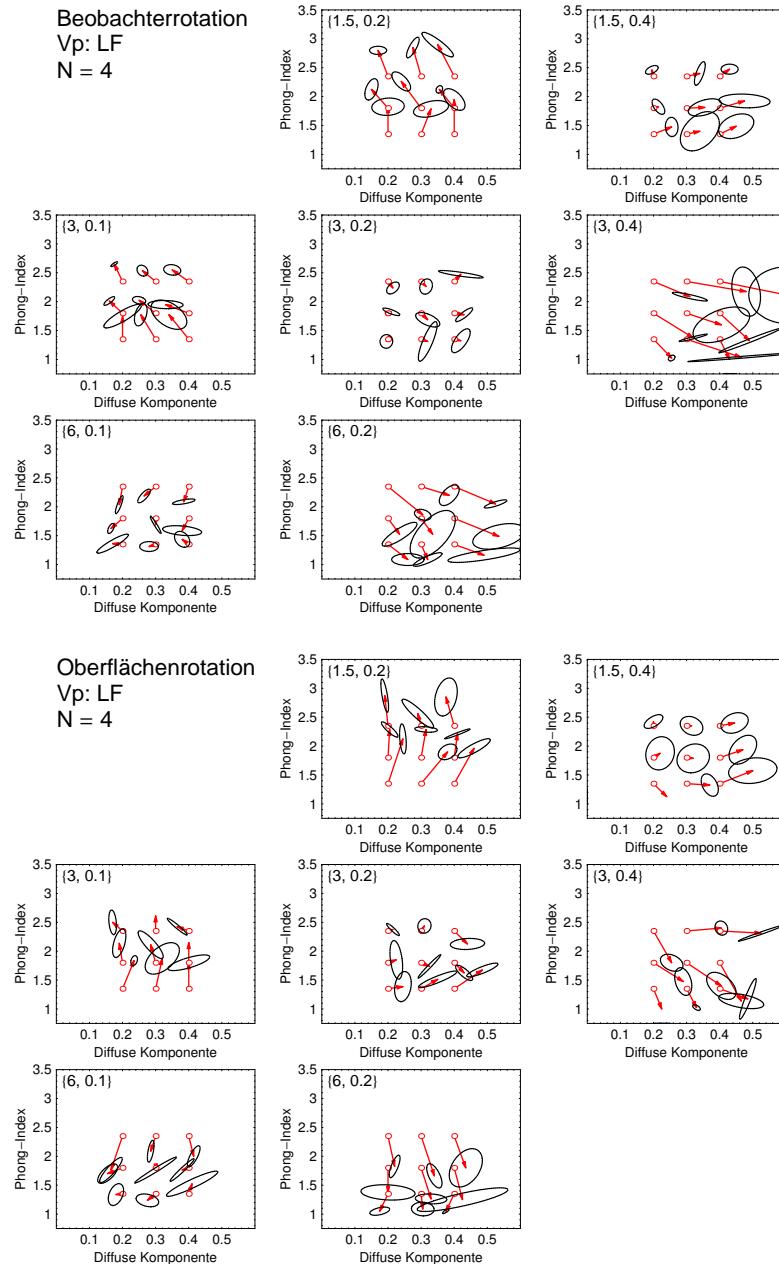


Abbildung 3.16: Ergebnisse des Abgleichsexperiments für Beobachter LF, getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen ‚Beobachterrotation‘ (oben) und ‚Oberflächenrotation‘ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen Stichproben.

aufwiesen (eine mittlere Frequenz von 3.0 und eine Amplitude von 0.2; s. das sich jeweils im Zentrum einer Gruppe befindliche Diagramm), sondern in gleichem Maße unter den Bedingungen, bei welcher sich die Abgleichsoberflächen von der 3D-Struktur der Vorgabefläche lediglich in der

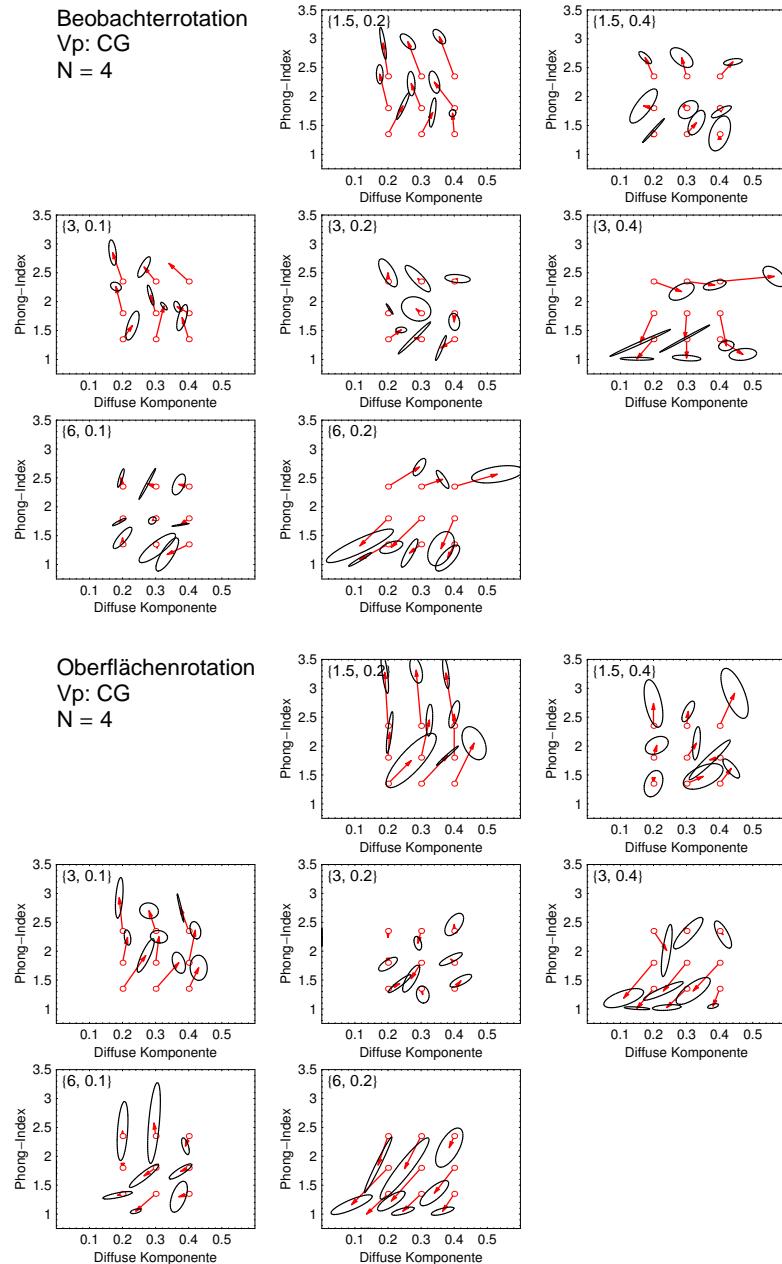


Abbildung 3.17: Ergebnisse des Abgleichsexperiments für Beobachter CG, getrennt nach den beiden Bewegungsbedingungen „Beobachterrotation“ (oben) und „Oberflächenrotation“ (unten). Weiter unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen Stichproben.

Skalierung unterschieden (s. die drei Diagramme einer jeden Gruppe, die sich in der Diagonale befinden: Neben der bereits besprochenen 3D-Form-Bedingung (3.0, 0.2) auch die Bedingungen (6.0, 0.1) und (1.5, 0.4)). Unter diesen drei Form-Bedingungen waren die Beobachter im Mittel in

der Lage, einen nahezu perfekten Abgleich der Reflexionsparameter herzustellen. Für diese Abgleichsoberflächen, welche im Vergleich zur 3D-Bedingung für die Vorgabefläche entweder eine kleinere Frequenz bei gleichzeitig erhöhter Amplitude (1.5, 0.4) oder aber eine höhere Frequenz bei gleichzeitig niedrigerer Amplitude (6.0, 0.1) aufwiesen, zeigen die Daten der Untersuchung von Nishida und Shinya (1998) dagegen noch relativ starke Fehler, die zudem einen stabilen Trend hinsichtlich der Richtung ihrer Abweichungen erkennen lassen.

Betrachtet man die Ergebnisse zu den übrigen Form-Bedingungen, so fällt auf, dass die Richtungen der Abweichungen einen zu den Ergebnissen von Nishida und Shinya (vgl. Abb. 3.10) gegebenen Trend zeigen. Da bei dem hier durchgeföhrten Experiment jedoch die 3D-Variationen im Abgleichsreiz vorgenommen wurden, statt, wie bei Nishida und Shinya im Vorgabereiz, waren auch grob spiegelbildliche Datenstrukturen zu erwarten.

In einem weiteren Experiment soll nun geprüft werden, ob die unter einigen Form-Bedingungen aufgetretenen Abweichungen zwischen den vorgegebenen und den eingestellten Reflexionsparametern durch eine Anreicherung der Reizmuster mit weiteren potentiellen Hinweisreizen für die Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche reduziert werden können, d.h., ob, im oben angesprochenen Sinne, eine bessere Glanzkonstanzeleistung erreicht werden kann, wenn reichhaltigere Informationen im Reiz zur Verfügung stehen.

3.2.3 Experiment 2: Der Einfluss von zwei weiteren potentiellen Hinweisreizen auf die Glanzkonstanzeistung

Die Ergebnisse des ersten Experiments unterschieden sich zwar in mancher Hinsicht von den Daten, die von Nishida und Shinya (1998) geliefert wurden, allerdings zeigte sich auch hier, dass es Beobachtern – zumindest bezogen auf die verwendeten Reizmuster und Darbietungsbedingungen – offenbar nicht uneingeschränkt möglich ist, die Materialbeschaffenheit von Oberflächen unter wechselnden 3D-Formen zuverlässig zu erkennen. In einem weiteren Experiment sollte deshalb geprüft werden, ob eine Verbesserung der Glanzkonstanzeistung eintritt, wenn weitere potentiell nutzbare Hinweisreize im Reizmuster zur Verfügung gestellt werden. Wie in der Einleitung zur Experimentalreihe II bereits ausgeführt wurde, zählen zu diesen potentiellen Hinweisreizen die Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität, wie auch unterschiedliche Farben für die diffuse und spiegelnde Komponente. Sind diese beiden Hinweisreize zusätzlich vorhanden, so wäre nach den oben angestellten Überlegungen zu erwarten, dass zumindest eine bessere Schätzung der diffusen Komponente gelingt, da sie mutmaßlich zu einer besseren Aufspaltung in die beiden wahrgenommenen Oberflächenkomponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* beitragen.

Die Reizmuster in diesem zweiten Experiment der Experimentalreihe II sollen nun zusätzlich zu den durch Bewegung vermittelten Informationen (d.h. die Reizmuster rotierten in gleicher Weise wie im ersten Experiment um ihre horizontale Mittelachse) Glanzlicht-Disparität, sowie unterschiedlichen Farbtöne für diffuse und spiegelnde Komponente aufweisen. Für die Zugabe von binokularen Informationen wurde ein stereoskopischer Reizaufbau nötig, so dass jedes Reizmuster, d.h. sowohl der Vorgabe- als auch der Abgleichsreiz, jeweils aus einem Paar von stereoskopischen Halbbildern bestand (siehe den Abschnitt *Reizmuster*, sowie Abb. 3.18). Für die Herstellung von binokularen Hinweisreizen im Reizmuster wurde hier nach derselben Weise wie in der Experimentalreihe I verfahren: Die für alle Reizmuster verwendete Oberflächen-Disparität wurde durch die perspektivische Darbietung der monokularen Halbbilder hergestellt. Die ebenfalls in allen Reizmustern enthaltene Glanzlicht-Disparität wurde dadurch erzeugt, dass beiden Reizhälften unterschiedliche Beobachtervektoren zugewiesen wurden – entsprechend dem Abstand zwischen beiden Augen und dem Abstand zwischen Beobachter und Reizmuster. Um den einzelnen Reflexionskomponenten weiterhin unterschiedliche Farben zuzufügen, wurde die Formel 3.4 folgendermaßen modifiziert:

$$\begin{pmatrix} I_R \\ I_G \\ I_B \end{pmatrix} = I_a k_a \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix} + I_p k_d \cos(\theta) \begin{pmatrix} D_R \\ D_G \\ D_B \end{pmatrix} + I_p k_s \cos^n(\alpha) \begin{pmatrix} S_R \\ S_G \\ S_B \end{pmatrix}. \quad (3.5)$$

Wurde in den bisherigen Experimenten noch für jedes einzufärbende Pixel jeder der drei Farbkanäle mit demselben Intensitätswert versehen, ergibt sich die Färbung eines Pixels nun aus einer getrennten Betrachtung der drei Basislichter. Jede Reflexionskomponente wurde hier um einen dreidimensionalen Farbvektor erweitert $[(A_R, A_G, A_B)^T, (D_R, D_G, D_B)^T, (S_R, S_G, S_B)^T]$, dessen Elemente jeweils die Gewichte für die drei Basislichter (R, G, B) repräsentieren. Für die ambiente und die diffuse Komponente wurde in diesem Experiment dieselbe Farbvektor verwendet, mit den Elementen $R = 1.0$, $G = 1.0$ und $B = 0.0$, so dass diese Reflexionsanteile für sich genommen gelblich erschienen (vgl. Abb. 3.18); die spiegelnde Komponente erhielt dagegen einen Farbvektor, bei dem alle Elemente den Wert 1.0 aufwiesen (weißliche Erscheinung).

Das Versuchsdesign war, bis auf eine Ausnahme, dasselbe wie in Experiment 1: Statt einer getrennten Betrachtung der beiden unterschiedlichen Rotationsvarianten *Oberflächenrotation* und *Beobachterrotation*, wurde dieses Mal nur erstere untersucht, da sich in der ersten Untersuchung

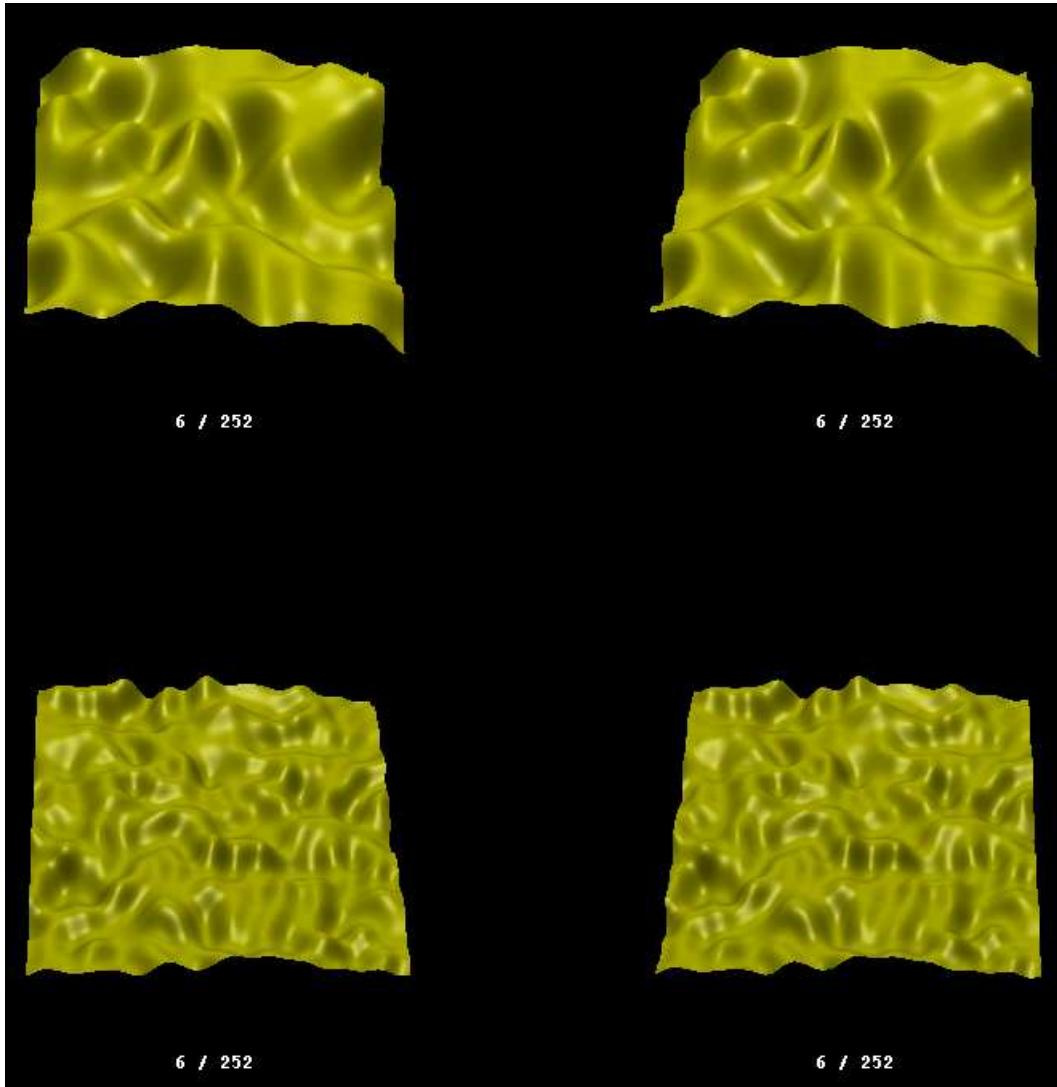


Abbildung 3.18: Screenshot des Versuchsdisplays unter binokularen Beobachtungsbedingungen (hier verkleinert und stärker kontrastiert dargestellt). Testreiz (in diesem Falle oben) und Abgleichsreiz (unten) bestanden jeweils aus zwei monokularen Halbbildern, die mittels eines Stereoskops zur Fusion gebracht wurden. Neben dem Zufügen von Glanzlicht-Disparität wurden die unterschiedlichen Reflexionskomponenten der virtuellen Oberflächen auch mit verschiedenen Farbanteilen versehen (vgl. Formel 3.5).

gezeigt hat, dass die Art der Rotation offenbar keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Abgleichseinstellungen hat. Variiert wurde erneut die 3D-Struktur der Abgleichsoberfläche (sieben unterschiedliche 3D-Formen) und die Reflexionsbeschaffenheit der Vorgabefläche (drei Werte für die diffuse Komponente \times drei Werte für den Phong-Exponenten), jeweils mit denselben Werten wie im ersten Experiment. Ebenfalls wie in Experiment I der zweiten Experimentalreihe wurden hier für jede Bedingungskombination vier Messwiederholungen angestellt. Unter Beibehaltung der selben Abgleichsprozedur hatten die Beobachter die somit insgesamt 252 Reize nun in zwei Sitzungen zu bearbeiten.

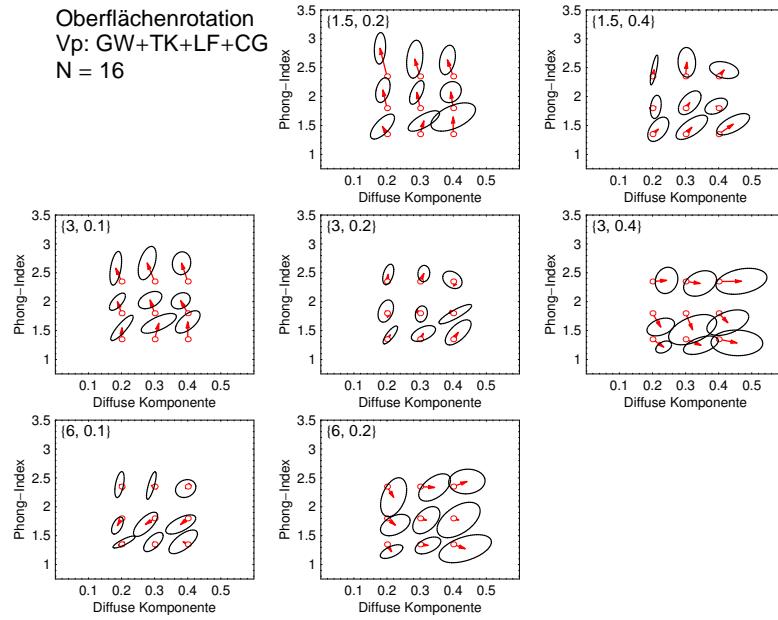


Abbildung 3.19: Ergebnisse des Experiments 2 (über alle vier Beobachter gemittelt). Unterteilt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweils für Beobachter zusammengefassten Stichproben.

Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen dieselben vier Beobachter teil, die auch schon am vorangegangenen Experiment als Versuchspersonen mitgewirkt hatten.

Ergebnisse

Abbildung 3.19 zeigt die Ergebnisse des Experiments 2, gemittelt über alle vier Beobachter. Die Darstellung ist dieselbe wie im vorangegangenen Experiment (vgl. Abb. 3.13): Getrennt nach den einzelnen 3D-Formen für die Abgleichsoberfläche, wurden auch hier die mittleren Wertepaare für die eingestellten Reflexionskomponenten (diffuse Komponente und Phong-Index, hier jeweils als Pfeilspitze dargestellt) mit den entsprechenden Vorgabewerten (offene rote Kreise) in Beziehung gesetzt. Was zunächst ins Auge fällt, ist, dass die Richtungen der Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten denselben Trend zeigen wie im vorangegangenen Experiment. Auch zeigt sich, dass unter den Form-Bedingungen, bei denen die Abgleichsflächen sich bezüglich ihrer räumlichen Struktur lediglich in der Skalierung unterschieden (vgl. die drei Diagramme in der Diagonale in Abb. 3.19), erneut im Mittel ein nahezu perfekter Abgleich erzielt wurde.

Für eine bessere Veranschaulichung der Änderung der Glanzkonstanzerzielung gegenüber dem ersten Experiment (s. Abschnitt 3.2.2) durch Hinzufügen der zusätzlichen Hinweisreize, wurden die neuen Daten mit den vorherigen direkt verglichen¹² (Abb. 3.20): Getrennt nach den beiden

¹²Dieses Vorgehen, d.h. der Vergleich von Datensätzen, die zu unterschiedlichen Messzeitpunkten erhoben wurden, birgt natürlich die Gefahr, dass sich hier andere Einflüsse auswirken (wie beispielsweise Übungseffekte), die nicht auf

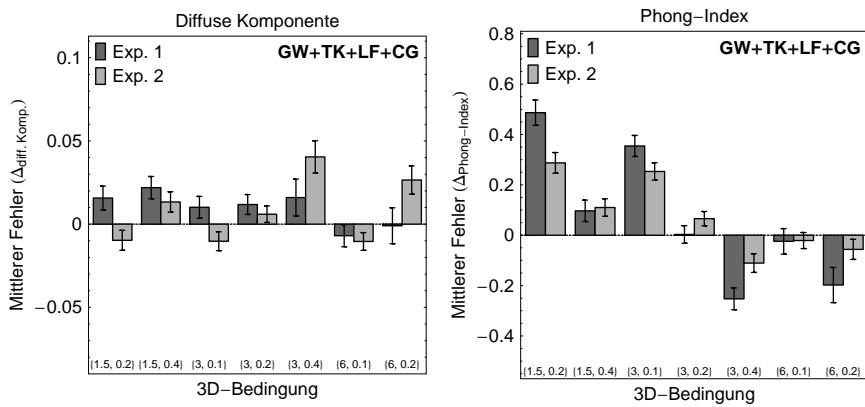


Abbildung 3.20: Die Ergebnisse von Experiment 2 im Vergleich zu denen aus Experiment 1 (über alle vier Beobachter gemittelt). Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern sind in den Diagrammen für jede der sieben 3D-Bedingungen die über alle Beobachter und Messwiederholungen gemittelten Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten dargestellt. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler.

einzustellenden Reflexionsparametern *Anteil der diffusen Komponente* und *Phong-Index* wurden hierzu für jede der sieben getesteten Form-Bedingungen (Abszisse), und zusammengefasst für jeweils alle neun Reflexionsparameterpaare, die mittleren Abweichungen zwischen Vorgabe- und Abgleichswert als Balken dargestellt. In den beiden Diagrammen in Abbildung 3.20 wurden diese mittleren Fehlerwerte aus dem Experiment 2 nun zum einen den entsprechenden Werten aus Experiment 1 gegenübergestellt (man vergleiche jeweils die Höhe der Balken einer jeden Form-Bedingung miteinander), zum anderen lässt sich in dieser Darstellung auch ablesen, wie stark die eingestellten Werte von den entsprechenden Vorgabewerten abweichen (jeweils die absolute Höhe der Balken, d.h. der Vergleich zur Nulllinie).

Ein erster Blick auf die über alle Beobachter gemittelten Daten in Abbildung 3.20 deutet darauf hin, dass die Einstellgenauigkeit der diffusen Komponente weniger von der Verfügbarkeit zusätzlicher Hinweisreize profitiert hat, als die der „Shininess“-Komponente. Während für die Erkennung der *Eigenfarbe* offenbar keine deutliche Verbesserung eingetreten ist – unter zwei 3D-Bedingungen ((3,0, 0.4) und (6,0, 0.2)) sogar stärkere Abweichungen aufzutreten scheinen als im ersten Experiment –, scheint dies jedoch in vollem Umfang für die Erkennung der Glanzbeschaffenheit zu gelten. Abgesehen von den drei Form-Bedingungen, bei denen bereits unter monokularer Darbietung und rein achromatischer Reizmustereinfärbung in Experiment 1 im Mittel einen annähernd perfekter Abgleich möglich war (dies sind die Bedingungen (1.5, 0.4), (3,0, 0.2) und (6,0, 0.1)) und bei denen sich auch im zweiten Experiment ebenbürtige Ergebnisse ergaben, lässt sich für alle übrigen Form-Bedingungen eine signifikante Reduzierung der Abweichungen zwischen den vorgegebenen und eingestellten Phong-Werten feststellen. Möglicherweise lässt sich auch dieser Befund mit einer verbesserten Trennung der Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* durch die Verfügbarkeit von binokularen Hinweisreizen erklären: Insbesondere wenn die Glanzflecken weniger scharf umrissen sind, sondern eher räumlich ausgedehnte Helligkeitsgradi-

die eigentlich zu untersuchenden unabhängigen Variablen zurückgeführt werden können. Die folgenden Experimente 2 - 5 der zweiten Experimentalreihe, bei denen solche Vergleiche angestellt wurden, sind daher vielmehr als explorative Arbeiten zu betrachten. Die aus den Ergebnissen dieser Experimente abgeleiteten Erkenntnisse wurden jedoch dazu verwendet, die beiden abschließenden Experimente 6 und 7 dieser Experimentalreihe zu konzipieren, in denen wiederum alle miteinander zu vergleichenden Datensätze zeitgleich erhoben wurden.

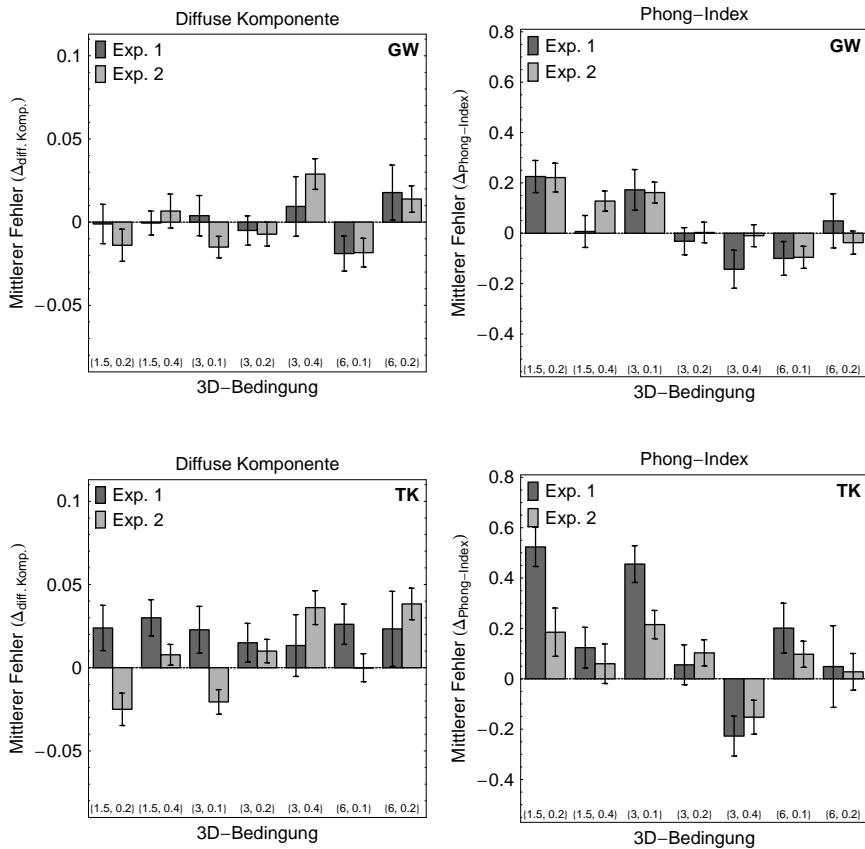


Abbildung 3.21: Die Ergebnisse von Experiment 2 im Vergleich zu denen aus Experiment 1 (getrennt für die beiden Beobachter GW und TK). Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern, sind in den Diagrammen für jede der sieben 3D-Bedingungen die mittleren Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten dargestellt. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler.

enten aufweisen, könnte eine verbesserte Segmentierung dazu führen, dass die stark verwaschenen Konturen solcher Glanzlichter klarer hervortreten, wohingegen sie bei einfacher monokularer Darbietung möglicherweise mit der *Eigenfarbe* verschmelzen und daher nicht mehr deutlich aus der Gesamtmischung von Intensitäten herauszulösen sind. Und gerade von der Beschaffenheit der Glanzlichtkonturen ist anzunehmen, dass sie der maßgebliche Hinweisreiz zur Bestimmung der exakten Glanzausprägung einer Oberfläche darstellt (vgl. Fleming et al., 2003).

Warum aber im Gegenzug die Erkennungsleistung der *Eigenfarbe*, wie die Daten in Abbildung 3.20 nahe zu legen scheinen, keine Verbesserung durch die zusätzlichen Hinweisreize erfahren hat, bleibt zunächst ein Rätsel: Wenn durch den oben beschriebenen Segmentierungsprozess eine klarere Trennung in die beiden wahrgenommenen Reflexionskomponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* erfolgt, so sollte man annehmen, dass nicht nur eine dieser Komponenten davon besser erkannt wird, sondern beide. Salopp gesagt: Das, was an Intensität aus der Gesamtmischung beispielsweise der *Glanzschicht* zugerechnet wird, wird auf der anderen Seite von der *Eigenfarbe* abgezogen, so dass letztendlich beide Komponenten in einem höheren Reinheitsgrad erscheinen müssten.

Eine gesonderte Betrachtung der Daten der einzelnen Beobachter bringt diesbezüglich nun

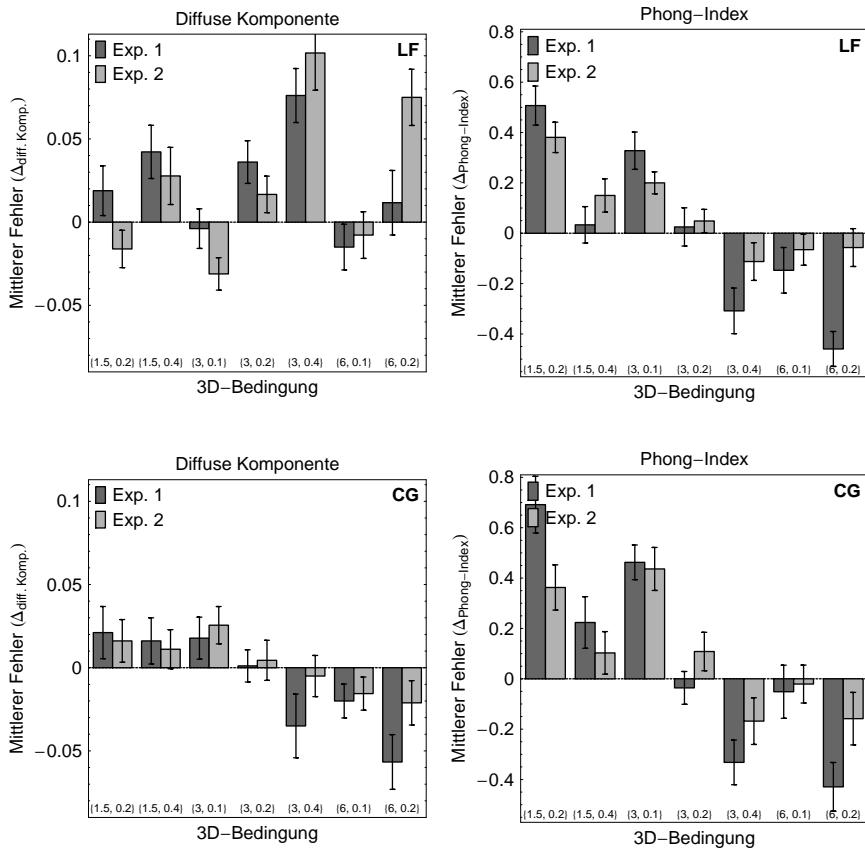


Abbildung 3.22: Die Ergebnisse von Experiment 2 im Vergleich zu denen aus Experiment 1 (getrennt für die beiden Beobachter LF und CG). Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern, sind in den Diagrammen für jede der sieben 3D-Bedingungen die mittleren Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten dargestellt. Die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler.

auch unterschiedliche Trends zum Vorschein (Abb. 3.21 und 3.22): Deutlich stärkere Abweichungen zwischen den vorgegebenen und eingestellten Werten für die diffuse Komponente treten bei den meisten Beobachtern unter den Form-Bedingungen (3.0, 0.4) und (6.0, 0.2) auf – eben unter den Bedingungen, die schon im ersten Experiment dieser Reihe die größten Schwierigkeiten bei der Abgleichsaufgabe bereiteten. Abweichend davon erreichte die Versuchsperson CG unter diesen beiden 3D-Bedingungen jedoch deutliche Verbesserungen bei der Einstellung der diffusen Komponente. Weiterhin lassen sich für alle Beobachter einzelne 3D-Bedingungen finden, unter denen bei Zugabe von weiteren potenziellen Hinweisreizen eine Verbesserung des Abgleichs gegenüber den reduzierteren Bedingungen in Experiment 1 auftreten.

Zusammenfassend deuten die Befunde aus diesem zweiten Experiment der Experimentalreihe II darauf hin, dass die Anreicherung des Reizmusters mit zusätzlichen Informationsquellen zu einer teils erheblichen Verbesserung der Glanzkonstanzeistung führt – dies jedoch nur bezüglich des wahrgenommenen Glanzcharakters, während die Erkennung der Eigenfarbe der Oberfläche offenbar im Allgemeinen keine Erleichterung (wenngleich auch keine Verschlechterung) durch die zusätzlichen Informationsangebote erfährt (mit einzelnen Ausnahmen, siehe z.B. unter einigen Form-Bedingungen bei Beobachter CG, Abb. 3.22). Welchen Beitrag die einzelnen Informa-

tionsquellen (Glanzlicht-Disparität, farbliche Trennung der einzelnen Reflexionsanteile, sowie bewegungsabhängige Informationen) zur Glanzkonstanz leisten, soll nun in weiteren Experimenten untersucht werden.

3.2.4 Experiment 3: Der Beitrag von Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanz I

Sowohl in den Experimenten von Nishida und Shinya (1998), als auch in den bisherigen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit, wurden immer dynamische Reizmuster verwendet, d.h. die dargebotenen Oberflächen rotierten um eine bestimmte Achse im Raum. Wie in Abschnitt 2.4.1 dieser Arbeit schon angesprochen, existieren einige Befunde, die darauf hindeuten, dass das visuelle System entsprechende Bewegungsinformationen verwertet – sei es, wenn es darum geht zu entscheiden, ob eine Oberfläche überhaupt glänzend ist (Hartung & Kersten, 2002) oder wenn dem entsprechenden Objekt eine konkrete Glanzausprägung zugewiesen wird (Sakano & Ando, 2008). Auch die Ergebnisse aus der ersten Experimentalreihe dieser Arbeit (s. Abschnitt 3.1) deuten darauf hin, dass dem visuellen System eine bessere Spaltung in die beiden Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* gelingt, wenn die Reizmuster um ihre vertikale Mittelachse rotieren. Hier soll nun genauer überprüft werden, ob solche Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanzleistung beitragen – bzw. ob das Fehlen einer solchen Informationsquelle zu einer Verschlechterung der Glanzkonstanzleistung führt.

Als Testreize für das folgende Experiment wurden daher statische Oberflächen verwendet. Es wurden zwei (bezüglich der Stellungen zwischen Lichtquelle und Oberfläche) unterschiedliche Gruppen von Reizmustern gebildet:

Gruppe I enthielt solche Reizmuster, bei denen die Vorgabeoberfläche in einer konstanten Orientierung zum Beobachter auf dem Monitor präsentiert wurde (mit einem Winkel von 45° zwischen der Oberflächennormalen und der y -Achse; s. den roten Vektor in Abb. 3.23 links), wobei die Lichtrichtung variiert wurde. Der Lichtvektor wurde in acht verschiedenen Winkeln zur y -Achse dargeboten, in Zehnerschritten zwischen 15° und 85° (s. den gelben Vektor in Abb. 3.23 links). Die durch diesen Winkel festgelegte Lichtrichtung wurde ebenfalls für den Abgleichsreiz verwendet.

Gruppe II fasst solche Reizmuster zusammen, bei denen die Lichtrichtung konstant gehalten wurde (mit einem Winkel von 45° zwischen der Lichtrichtung und der y -Achse des zugrunde liegenden Koordinatensystems; s. den gelben Vektor in Abb. 3.23 rechts) und die Orientierung der Oberfläche variiert wurde. Die Oberflächennormale der Vorgabeoberfläche wurde hier ebenfalls in acht unterschiedlichen Winkeln zur y -Achse präsentiert, erneut in Zehnerabständen zwischen 15° und 85° (s. den roten Vektor in Abb. 3.23 rechts).

Wie bereits in den vorherigen Experimenten, wurden für die Vorgabeoberfläche die Werte $f = 3.0$ und $a = 0.2$ für die globalen Formparameter verwendet. Für beide Gruppen wurden jeweils zwei unterschiedliche 3D-Formen für die Abgleichsfläche verwendet: Zum einen eine Oberfläche mit einer mittleren Frequenz von 3 und einer Amplitude von 0.1 (s. Formel 3.3) – eine 3D-Form-Bedingung, unter der im ersten Experiment dieser Experimentalreihe relativ große Abweichungen zwischen den Reflexionsparametern der Vorgabe- und der Abgleichsoberfläche auftraten –, zum anderen eine Oberfläche, die dieselben globalen Formparameter wie die Vorgabeoberfläche aufwies.

Der Vorgabe- und der Abgleichsreiz wurden, wie im ersten Experiment dieser Reihe, monokular nebeneinander auf dem Monitor dargeboten. Die Vorgabeoberfläche wurde auf der linken, der Abgleichsreiz, der im Gegensatz zum Vorgabereiz während der Präsentation in gewohnter Weise um seine horizontale Mittelachse mit einer Geschwindigkeit von ca. 56.25° pro Sekunde rotierte, wurde auf der rechten Bildhälfte dargeboten. Es wurde nur ein Paar von Reflexionsparametern getestet: In allen Versuchsdurchgängen war die Vorgabefläche nach dem Phong-Modell (1975; vgl. Formel 3.4) mit einem Wert für die diffuse Komponente von 0.3 und einem Phong-Exponenten von 10.4976 (dies entspricht einem Phong-Index von 1.8) gerendert worden; die Werte für die

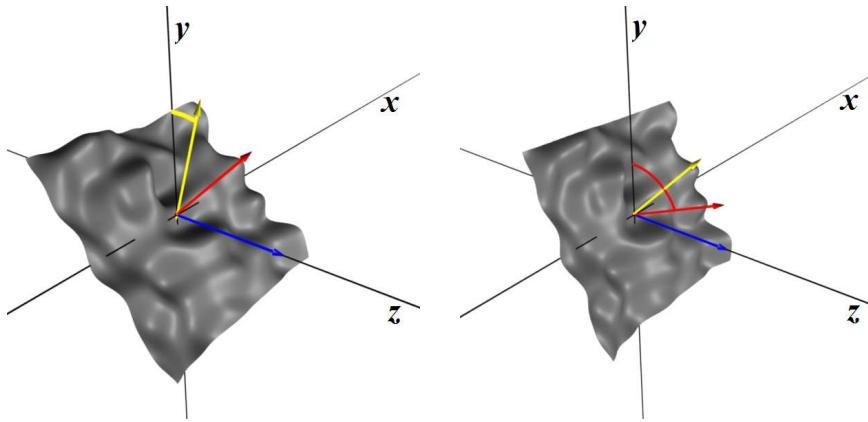


Abbildung 3.23: In Experiment 3 wurden zwei unterschiedliche Gruppen von Reizmustern untersucht: Bei Gruppe I (Beispiel links) wurde die Orientierung der Oberfläche konstant gehalten, mit einem Winkel von 45° zwischen der Oberflächennormalen (roter Vektor) und der y -Achse, während die Einfallsrichtung des Lichtes variiert wurde (gelber Vektor). Bei Gruppe II (rechtes Beispiel) wurde umgekehrt die Lichteinfallsrichtung konstant gehalten (45° zwischen Lichtrichtung und y -Achse) und die Orientierung der Oberfläche variiert. Der blaue Vektor repräsentiert jeweils die Beobachterrichtung.

übrigen Komponenten waren für die Vorgabe- und Abgleichsfläche (die hier wiederum in einer rein achromatischen Farbe gehalten waren) dieselben wie im ersten Experiment dieser Reihe (0.2 für die ambiente Beleuchtung I_a , 0.3 für den ambienten Reflexionskoeffizienten k_a , 1.0 für die Intensität der Punktlichtquelle I_p und 0.2 für den spiegelnden Reflexionskoeffizienten k_s ; s. Formel 3.4).

Die Prozedur für die Beobachter war dieselbe wie in den beiden vorangegangenen Experimenten: Durch Manipulation der beiden Reflexionsparameter *diffuse Komponente* und *Phong-Index* mit Hilfe der Pfeiltasten sollte ein perzeptueller Abgleich der Reflexionsbeschaffenheit zwischen der Vorgabe- und der Abgleichsfläche hergestellt werden. Für jede der insgesamt 32 Bedingungskombinationen (2 Gruppen von Beziehungen zwischen Oberflächenorientierung und Lichtrichtung \times 2 verschiedene 3D-Formen für die Vorgabefläche \times 8 unterschiedliche Winkel für die Oberfläche, bzw. für die Lichtrichtung) wurden vier Messwiederholungen angestellt. Die einzelnen Reizmuster wurden während des Gesamtumfangs des Experiments von 128 Durchgängen in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Für jeden Durchgang hatten die Beobachter unbegrenzt viel Zeit, um einen Abgleich herzustellen. Nach Fertigstellung eines Abgleichs wurde der Durchgang seitens des Beobachters mit dem Betätigen der Eingabetaste beendet. Der nächste Durchgang startete dann nach einer eine Sekunde anhaltenden Dunkeladaptationsphase.

Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen, neben dem Autor dieser Arbeit, zwei weitere Versuchspersonen teil, die sich schon für die beiden vorangegangenen Experimente als Beobachter zur Verfügung gestellt hatten (TK und CG).

Ergebnisse

Abbildung 3.24 zeigt zunächst die über alle drei Beobachter gemittelten Ergebnisse für die Gruppe I, d.h. für die Bedingungen, bei denen der Einfallswinkel des Lichtes relativ zur konstanten Orientierung der Oberfläche variiert wurde. Getrennt nach den beiden 3D-Formen für die Abgleichsfläche (Zeilen) und den beiden einzustellenden Reflexionsparametern (Spalten), sind für jeden Winkel des einfallenden Lichtes jeweils die mittleren Abweichungen zwischen dem vorgegebenen Wert des Testreizes und dem eingestellten Wert des Abgleichsreizes für die diffuse Komponente (linke Spalte), bzw. für den Phong-Index (rechte Spalte) als Balken dargestellt (die zugehörigen Fehlerbalken repräsentieren in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler). Um einen Vergleich zu der Bedingung herstellen zu können, bei der sowohl die Abgleichs- als auch die Vorgabefläche in einer Rotationsbewegung präsentiert wurden, wurden die über dieselben drei Beobachter gemittelten entsprechenden Daten aus dem ersten Experiment der Experimentalreihe II in den Diagrammen in Abbildung 3.24 hinzugefügt: Die jeweils aus den beiden 3D-Bedingungen (3.0, 0.1) und (3.0, 0.2) des ersten Experiments unter der Oberflächenrotations-Bedingung stammenden mittleren Abweichungen für das entsprechende Reflexionsparameterpaar (0.3 für den Anteil der diffusen Komponente und 1.8 für den Phong-Index) sind in den jeweiligen Diagrammen in Abbildung 3.24 als gestrichelte Linie dargestellt – berücksichtigt wurden für diesen Referenzwert nur die Daten der drei Versuchspersonen aus Experiment 1, die auch an dem hiesigen Experiment teilgenommen haben (der zugehörige zweifache Standardschätzfehler ist hier als grau schattierter waagerechter Balken hinzugefügt worden). Somit lassen sich die hier gewonnenen Daten, die aus einem Experiment stammen, bei dem die Vorgabereize statisch dargeboten wurden, mit solchen vergleichen, in denen der mögliche Einfluss von Bewegungsinformationen auf die Glanzkonstanzeistung enthalten sind (siehe aber die Anmerkungen in Fußnote 12).

Sollten Bewegungsinformationen, die dazu führen, dass die Glanzlichter während der Rotation des Reizes auf der Oberfläche „umherwandern“, tatsächlich einen Einfluss auf die Glanzkonstanzeistung haben (weil dem visuellen System eine bessere Zergliederung in die beiden Oberflächenattribute *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* gelingt, so dass beide in einer durch die jeweils andere Komponente weniger verfälschten Weise in Erscheinung treten), so ist zu erwarten, dass die Beobachter bei Reizmustern, die diesen Hinweisreiz nicht enthalten, größere Fehler produzieren, wenn es darum geht, die Reflexionsbeschaffenheit zwischen zwei unterschiedlich geformten Oberflächen abzugleichen. Ein Blick auf die Ergebnisdiagramme in Abbildung 3.24 zeigt, dass dies in der Regel nicht der Fall war (obwohl auch diesbezüglich Unterschiede zwischen den Beobachtern bestehen): Nimmt man zunächst die Einstellungen bezüglich der diffusen Komponente in Augenschein, die für die beiden getesteten Form-Bedingungen für das einzige untersuchte Reflexionsparameterpaar schon während des ersten Experiments sehr geringe Fehler aufwiesen, so stellt sich heraus, dass auch dann, wenn der Testreiz statisch präsentiert wird, kaum nennenswerte Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten auftreten (linke Spalte in Abb. 3.24). Bezogen auf den Reflexionsparameter *Phong-Index* muss allerdings zwischen den beiden Form-Bedingungen unterschieden werden: Während unter dem bezüglich der 3D-Form asymmetrischen Abgleich (Vorgabe- und Abgleichsoberfläche weisen unterschiedliche Formparameter auf; s. das Diagramm in der rechten oberen Ecke in Abb. 3.24) beinahe alle Einstellungen unter statischer Darbietung sich im Mittel nicht bedeutend von den Werten unter dynamischer Präsentation unterscheiden, scheint unter dem symmetrischen Abgleich der Vorgabewert in manchen Fällen sogar besser getroffen worden zu sein, wenn der Vorgabereiz ohne Bewegungsinformationen dargeboten wurde (s. das Diagramm rechts unten in Abb. 3.24).

Ein ähnliches Bild ergibt sich für die zur Gruppe II gehörigen Ergebnisse, also für die Gruppe von statischen Testreizen, bei denen die Lichtrichtung konstant gehalten und die Orientierung der Oberfläche variiert wurde. (Abb. 3.25).

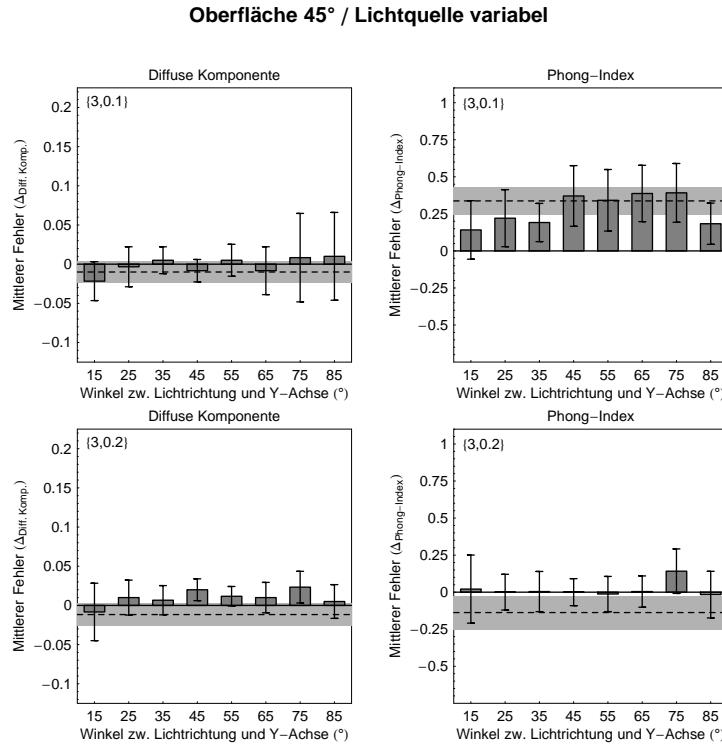


Abbildung 3.24: Ergebnisse zu den Reizmustern aus Gruppe I (über alle drei Beobachter gemittelt). Getrennt nach den beiden 3D-Bedingungen für den Abgleichsreiz (Zeilen) und den beiden Reflexionsparametern (Spalten) wurde für jeden Winkel zwischen Oberfläche und einfallendem Licht die mittlere Abweichung des eingestellten Reflexionsparameters vom zugehörigen Wert des Vorgabereizes als Balken dargestellt (die Fehlerbalken repräsentieren in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler). Die gestrichelte Linie repräsentiert jeweils den korrespondierenden, über die Datensätze derselben drei Versuchspersonen gemittelten Wert aus Experiment 1. Der zweifache Standardschätzfehler dieser zusammengefassten Daten ist in beide Richtungen durch einen schattierten waagerechten Balken gekennzeichnet.

Insgesamt scheinen die Ergebnisse dieses Experiments aber, entgegen den Mutmaßungen, die zu den Befunden aus der ersten Experimentalreihe angestellt wurden, darauf hinzudeuten, dass die Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen offenbar keine bedeutende Verbesserung der Glanzkonstanzeistung bewirkt. Dieser Befund erscheint auf den ersten Blick etwas verwunderlich, zumal zu erwarten gewesen wäre, dass zumindest unter solchen Bedingungen, bei denen der statische Oberflächenreiz in einem sehr extremen Winkelabstand zwischen Oberflächennormalen und Beobachterrichtung erscheint (wenn etwa der Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der y-Achse 15° beträgt, was gleichbedeutend mit einem Winkel von 75° zwischen der Normalen und der Blickrichtung des Beobachters ist), schon deshalb eine zuverlässige Schätzung der Materialeigenschaft dieser Fläche erschwert wird, weil die Oberfläche für den Beobachter nur begrenzt sichtbar ist. Was sich aber zeigt, ist, dass unter solchen Bedingungen offenbar größere Unsicherheiten während des Abgleichs bestanden – gemessen an den relativ starken Streuungen, die insbesondere bezogen auf die Phong-Index-Einstellungen auftraten. Unter dynamischer Reizpräsentation wurden dagegen in der Regel deutlich geringere Streuungen erzeugt (s. jeweils die grau schattierten waagerechten Balken in den Diagrammen).

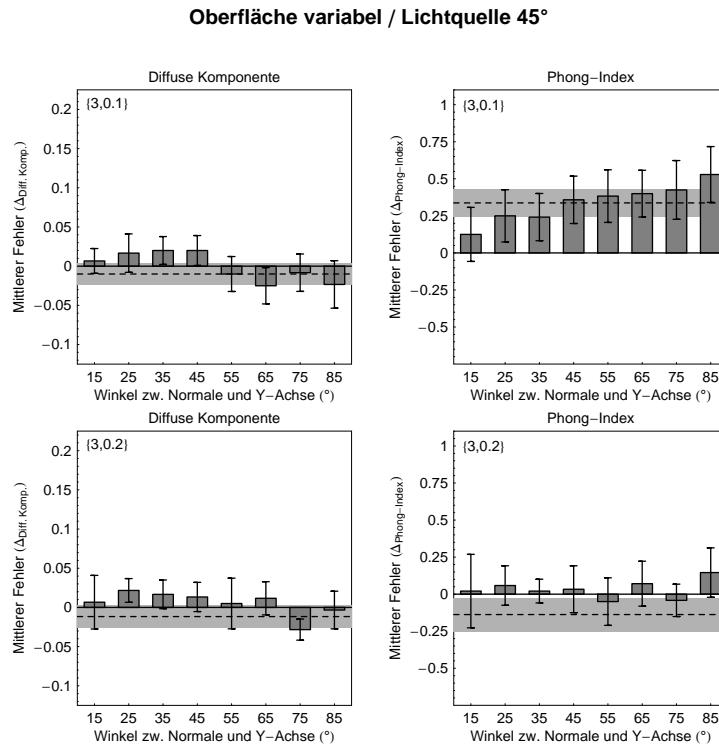


Abbildung 3.25: Ergebnisse zu den Reizmustern aus Gruppe II (über alle drei Beobachter gemittelt). Getrennt nach den beiden 3D-Bedingungen für den Abgleichsreiz (Zeilen) und den beiden Reflexionsparametern (Spalten) wurde für jeden Winkel zwischen Oberfläche und einfallendem Licht die mittlere Abweichung des eingestellten Reflexionsparameters vom zugehörigen Wert des Vorgabereizes als Balken dargestellt (die Fehlerbalken repräsentieren in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler). Die gestrichelte Linie repräsentiert jeweils den korrespondierenden, über die Datensätze derselben drei Versuchspersonen gemittelten Wert aus Experiment 1. Der zweifache Standardschätzfehler dieser zusammengefassten Daten ist in beide Richtungen durch einen schattierten waagerechten Balken gekennzeichnet.

Betrachtet man rückblickend noch einmal das Ursprungsexperiment von Nishida und Shinya (1998), sowie die hier angestellte Replikation ihres Versuchs (s. Experiment 1 der Experimentreihe II), so zeigt sich, dass für eine angemessene Schätzung der Reflexionseigenschaften der Reizoberflächen oftmals sehr ungünstige Konstellationen zwischen der Lichtrichtung, der Oberflächenorientierung und, als weitere Bedingungskomponente, der Beobachterrichtung bestanden. Während der gesamten Rotationsbewegung der Oberfläche um ihre horizontale Mittelachse, boten die durch jene Bedingungskomponenten mitbestimmten Luminanzverteilungen nur ausschnittsweise genügend Informationen, um darauf aufbauend eine angemessene Schätzung der Materialeigenschaft anzustellen. So trat beispielsweise bei einigen Stellungen zwischen Lichtrichtung und Oberflächenorientierung der Fall auf, dass kaum Glanzlichter auf der Oberfläche erschienen, was dazu führte, dass der Beobachter bestimmte Stellungen während des Rotationsvorgangs abwarten musste, um überhaupt Anhaltspunkte für die Glanzausprägung der Oberfläche zu bekommen. Es ist daher nicht auszuschließen, dass die Art der verwendeten Rotation bei Nishida und Shinya (1998), und damit auch bei der hier durchgeföhrten Replikation, zu der damit festgestellten schlechten Glanzkonstanzeleistung beigetragen haben. Die von Nishida und Shinya gewählte Art,

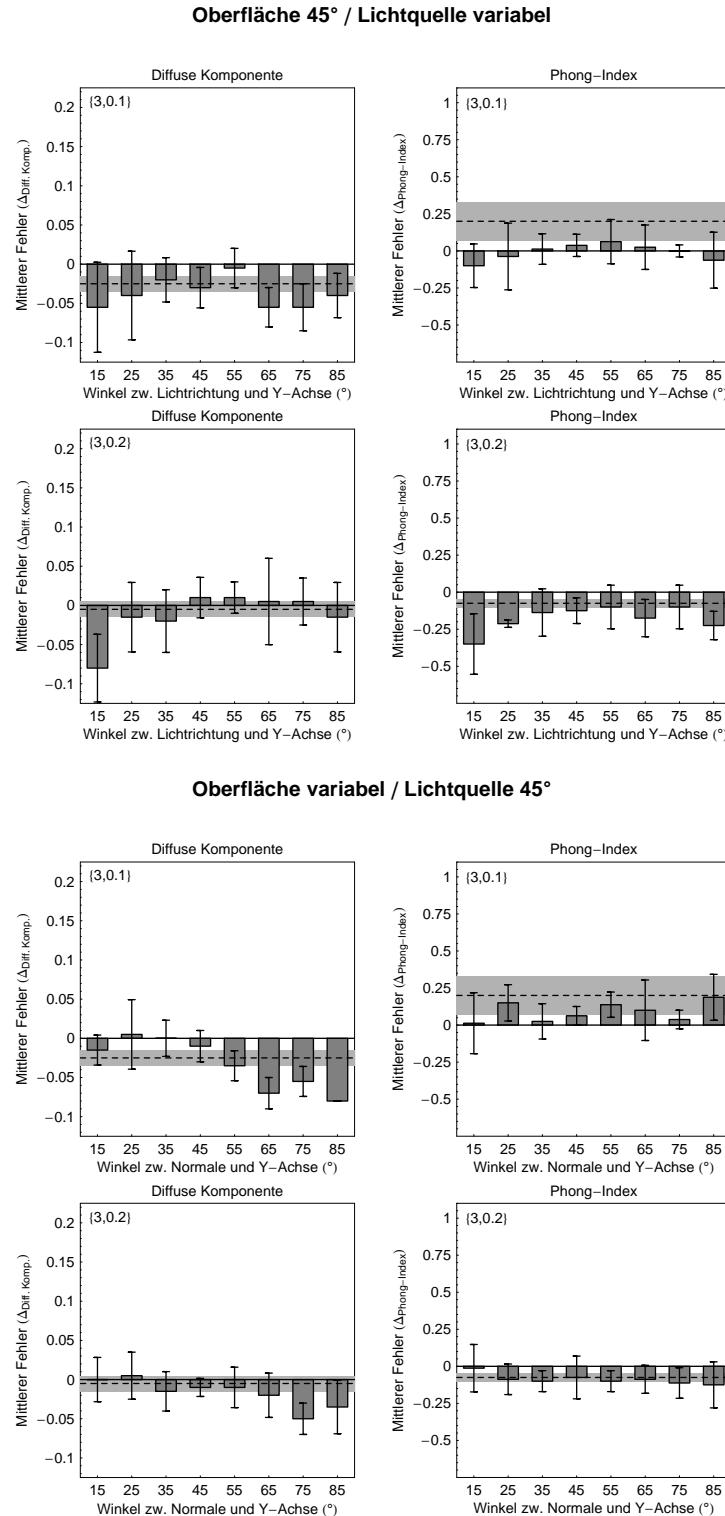


Abbildung 3.26: Ergebnisse der Versuchsperson GW zu den Reizmustern aus Gruppe I (oben) und Gruppe II (unten, für Erläuterungen s. Abb. 3.24, bzw. Abb 3.25).

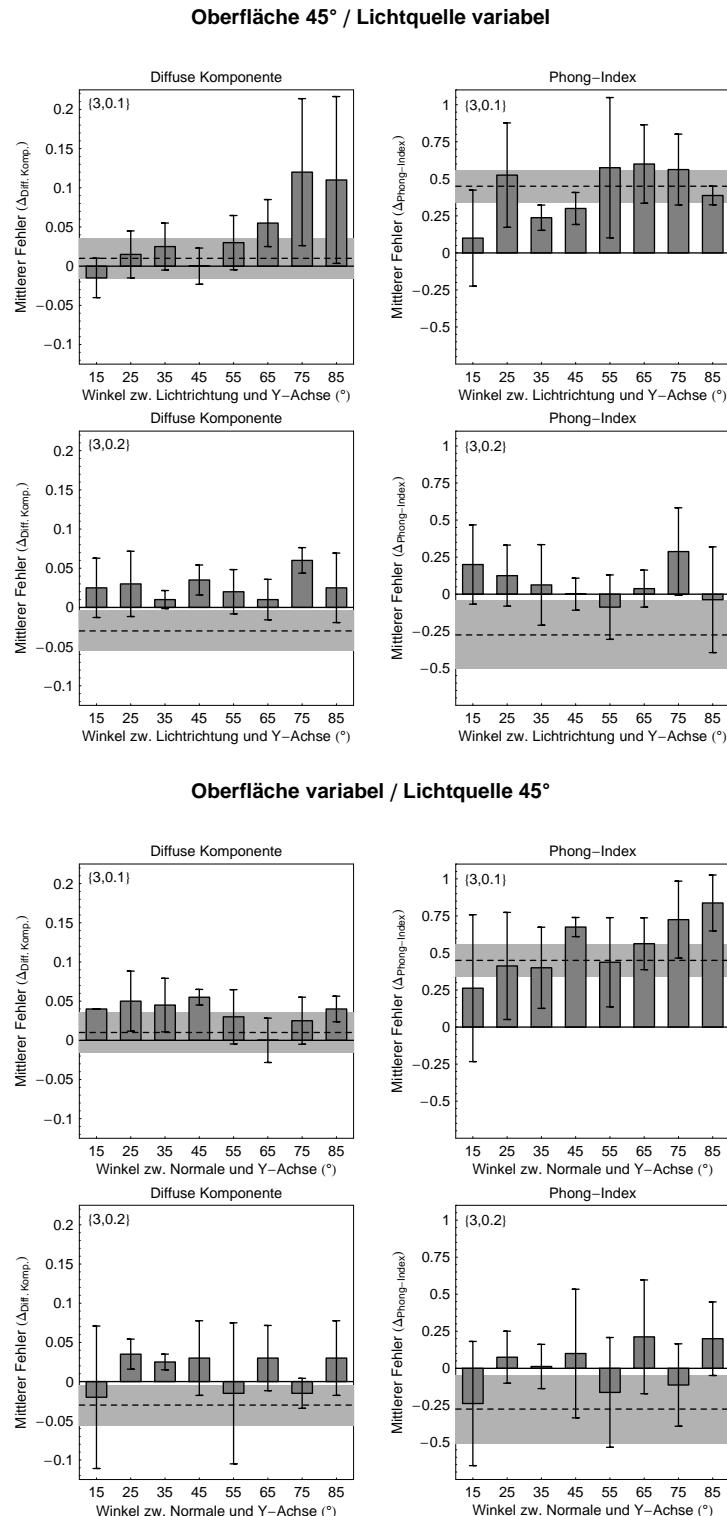


Abbildung 3.27: Ergebnisse der Versuchsperson CG zu den Reizmustern aus Gruppe I (oben) und Gruppe II (unten, für Erläuterungen s. Abb. 3.24, bzw. Abb 3.25).

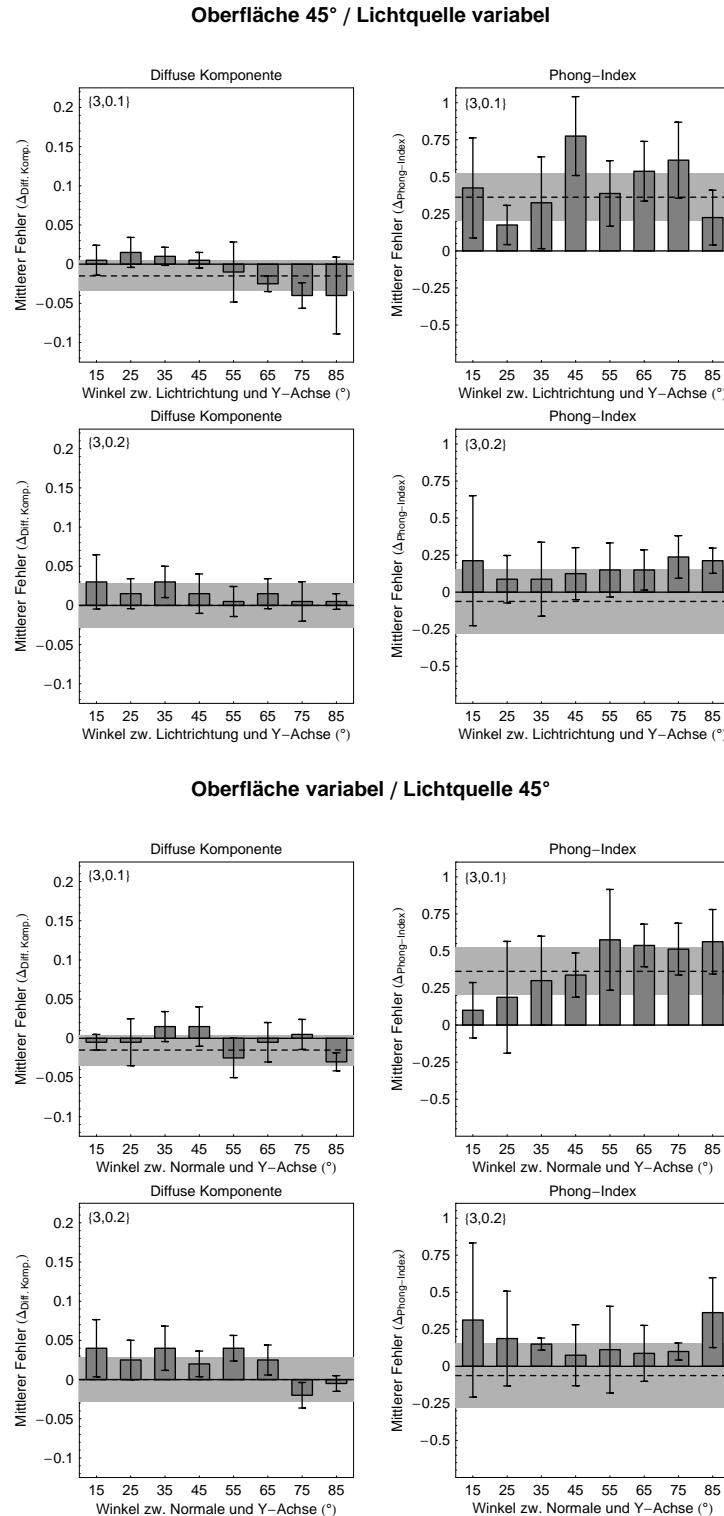


Abbildung 3.28: Ergebnisse der Versuchsperson TK zu den Reizmustern aus Gruppe I (oben) und Gruppe II (unten, für Erläuterungen s. Abb. 3.24, bzw. Abb 3.25).

das Reizmuster in einem dynamischen Verlauf zu präsentieren, mag sich somit also gar nicht allzu sehr von einer statischen Darbietung unterschieden haben – zumindest hinsichtlich des Angebots von Informationen, die zu einer besseren Schätzung der Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche dienen könnten. Daher wäre es möglich, dass Bewegungsinformationen, trotz der hier wie dort gefundenen Ergebnisse, einen Beitrag zur Glanzkonstanz leisten, sofern die Art der verwendeten Objektbewegung eine durchgehend bessere Sicht auf das dynamische Spiel der Intensitäten erlaubt – ein Aspekt, mit dem sich nachfolgend beschriebene Experiment 4 befasste.

3.2.5 Experiment 4: Der Beitrag von Bewegungsinformationen zur Glanzkonstanz II

Die Ergebnisse des Experiments 3 und die Analyse der verfügbaren Information legen die Vermutung nahe, dass die Art der Rotation der verwendeten Reizmuster in der Untersuchung von Nishida und Shinya (1998) dazu geführt haben könnte, dass das visuellen System die durch Bewegung bereitgestellte Information nicht ausreichend nutzen konnte, um den damit verbundenen potentiellen Hinweisreiz für eine Glanzkonstanzeistung zu berücksichtigen. Durch die Rotation um ihre horizontale Mittelachse blieb das Auftreten von Glanzlichtern auf der Oberfläche nur auf einen verhältnismäßig kleinen Ausschnitt während der Rotationsbewegung begrenzt. Die bis dato einzige empirische Untersuchung, die sich mit dem möglichen Beitrag von bewegungsabhängigen Informationen zur Glanzwahrnehmung befasst hat (Sakano & Ando, 2008) ergab, dass solche Informationen offenbar bei der Einschätzung der Glanzausprägung einer Oberfläche berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu der von Nishida und Shinya gewählten Rotationsart verwendeten diese Forscher jedoch eine Bewegungsart, die eine laterale Bewegung des Beobachters simulierte – die Textur der Oberflächen selbst war während der gesamten Präsentation für den Beobachter uneingeschränkt sichtbar. Dieser Befund, gemeinsam mit den Ergebnissen aus den Experimenten der ersten Experimentalreihe der vorliegenden Arbeit, lassen die Vermutung zu, dass bei geeignet gewählter Darbietungsart, wenn also die in Frage stehende Information dem visuellen System in vollem Umfang zur Verfügung steht, gegenüber statisch präsentierten Reizmustern eine Verbesserung der Glanzkonstanzeistung möglich ist.

Um diese Hypothese zu prüfen, wurden die Reizmuster, die während des ersten Experiments der Experimentalreihe II verwendet wurden, dahingehend verändert, dass sie nun, statt um ihre horizontale Mittelachse, um ihre vertikale Mittelachse rotierten. Die Oberflächen wurden zuvor um 45° zur Beobachterrichtung geneigt (vgl. Abb. 3.29). Die Oberflächen rotierten nun mit einer Geschwindigkeit von ca. $38^\circ/\text{sec}$ um diese Raumachse, die der Winkelhalbierenden zwischen der y -Achse und der z -Achse (=Beobachterrichtung) entspricht. Erneut wurde ein monokularer Reizaufbau verwendet, d.h. der Vorgabereiz und der Abgleichsreiz wurden nebeneinander auf dem Monitor präsentiert, wobei der Vorgabereiz immer auf der linken, der Abgleichsreiz immer auf der rechten Bildhälfte erschien. Untersucht wurde hier lediglich die Simulation einer Oberflächenrotation, da sich im ersten Experiment gezeigt hatte, dass sich die Art der Rotation (Oberflächen- und Beobachterrotation, s.o.) offenbar kaum auf die Abgleichseinstellungen auswirkt. Es wurden dieselben sieben 3D-Parameterkombinationen und dieselben neun Paare von Reflexionsparametern getestet wie in Experiment 1. Jede der insgesamt 63 Bedingungskombinationen (7 unterschiedliche Form-Bedingungen \times 3 Werte für die diffuse Komponente \times 3 Werte für den Phong-Exponenten) wurde während des gesamten Versuchs vier Mal dargeboten. Die einzelnen Bedingungskombinationen erschienen innerhalb des Gesamtumfangs der Durchgänge in zufälliger Reihenfolge. Die Versuchspersonen führten das Experiment, unter Beibehaltung der Prozedur aus Experiment 1, in zwei getrennten Sitzungen mit jeweils 126 Durchgängen durch.

Versuchspersonen

An diesem Experiment beteiligten sich dieselben drei Beobachter, die sich schon für das vorangegangene Experiment 3 zur Verfügung gestellt hatten.

Ergebnisse

Abbildung 3.30 zeigt zunächst in gewohnter Darstellungsweise die über alle drei Beobachter gemittelten Ergebnisse des Experiments: Unterteilt in die sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen für den Abgleichsreiz, finden sich in jedem Diagramm für jeweils alle neun getesteten Parame-

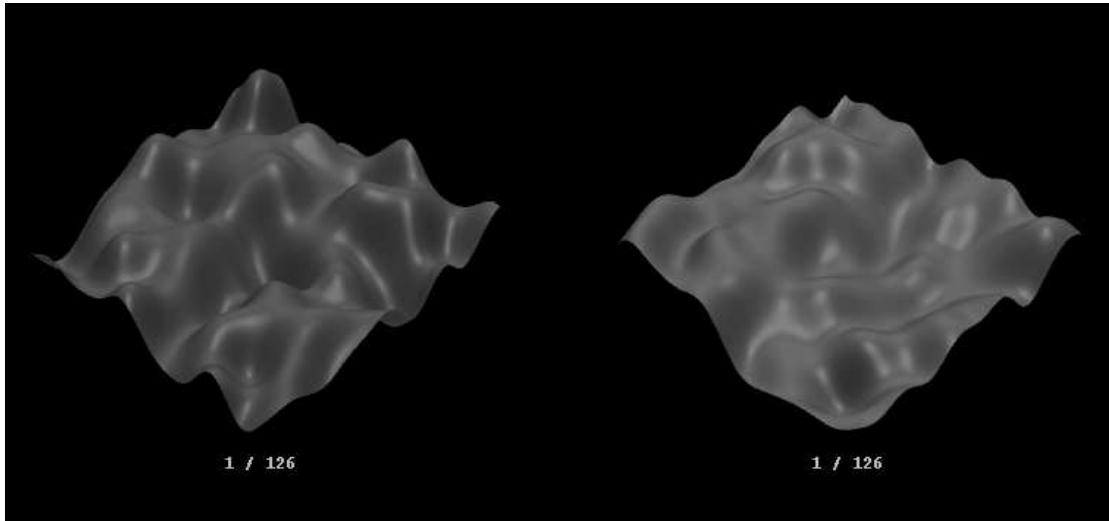


Abbildung 3.29: Screenshot des Versuchsdisplays unter monokularen Beobachtungsbedingungen (hier verkleinert dargestellt). Testreiz (links) und Abgleichsreiz (rechts) rotierten während der Präsentation um ihre vertikale Mittelachse.

terkombinationen für das Reflexionsverhalten der Oberflächen, sowohl die entsprechenden Paare für die vorgegebenen Reflexionsparameter (offene Kreise), sowie die zugehörigen Paare für die mittleren Einstellungen (Pfeilspitzen). Erneut zeigt sich, dass unter den drei Form-Bedingungen, welche dadurch gekennzeichnet waren, dass sie sich bezogen auf ihre 3D-Struktur lediglich hinsichtlich ihrer Skalierung unterscheiden (siehe die drei Diagramme in der Diagonalen in Abb. 3.30) ein nahezu perfekter Abgleich erreicht wurde. Die beiden Form-Bedingungen (3.0, 0.4) und (6.0, 0.2), die bereits während der vorangegangenen Experimente als diejenigen identifiziert wurden, unter denen erhebliche Abweichungen zwischen den vorgegebenen und den eingesetzten Reflexionswerten auftraten, sind auch hier wieder durch verhältnismäßig große Fehler in den Abgleichseinstellungen gekennzeichnet. Allerdings scheint sich der Trend des Fehlers hier gegenüber den Ergebnissen aus dem Experiment 1 umgekehrt zu haben: Traten die Fehler zuvor in erster Linie entlang der Shininess-Dimension auf (Phong-Index), während die Einstellungen bezüglich der diffusen Komponente relativ nahe an den Vorgabewerten lagen, so zeigt sich nun, dass vor allem die Einstellungen bezüglich der diffusen Komponente große Fehler aufweisen, während die eingestellten Phong-Index-Werte im Mittel relativ gut mit den entsprechenden Vorgabewerten übereinstimmen.

Dies wird insbesondere deutlich, wenn man die Ergebnisdaten in einer etwas komprimierteren Art darstellt: In Abbildung 3.31 wurden die über alle drei Beobachter und über jeweils alle neun Reflexionsparameterpaare einer jeden Form-Bedingung gemittelten Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten, getrennt nach den beiden Reflexionsparametern *diffuse Komponente* und *Phong-Index* als Balken dargestellt und den entsprechenden Daten aus Experiment 1 der Experimentalreihe II gegenübergestellt (die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler der über die drei Beobachter zusammengeführten Stichproben). Lässt man die beiden oben beschriebenen Form-Bedingungen, unter denen eine starke Verschlechterung der Glanzkonstanzeistung gegenüber den Bedingungen in Experiment 1 (Rotation um die horizontale Mittelachse der Reizoberflächen) zu beobachten ist, außer Acht, so scheint die hier verwendete Art der Oberflächenrotation offenbar keinen Unterschied bezüglich der Erkennensleistung der *Eigenfarbe* der Oberflächen bewirkt zu haben. Ein Blick auf die für

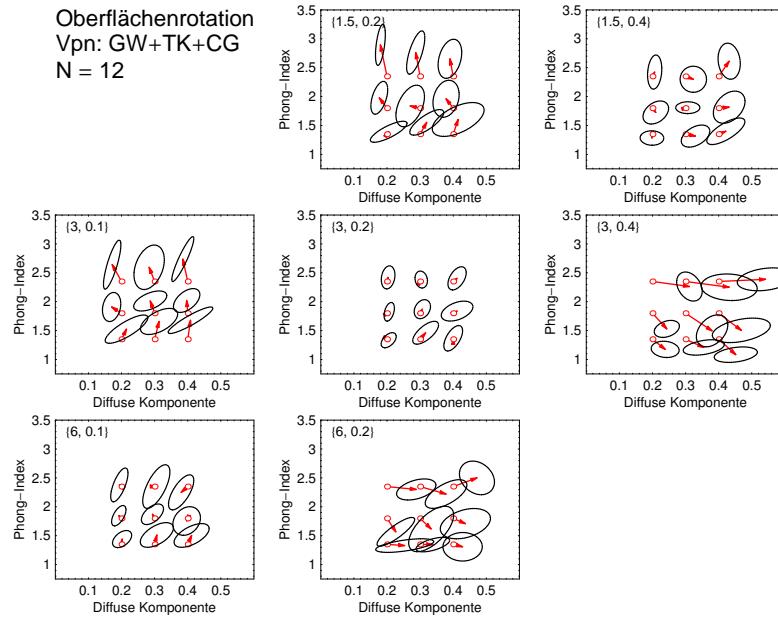


Abbildung 3.30: Ergebnisse des Experiments 4 (über alle drei Beobachter gemittelt). Getrennt nach den sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden durchschnittlichen Wertepaare für den jeweiligen Abgleichsreiz (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren jeweils auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der für die drei Beobachter zusammengefassten Stichproben.

die einzelnen Beobachter getrennt aufgeföhrten Ergebnisdiagramme (Abb. 3.32) legt den Schluss nahe, dass insgesamt eher eine Verschlechterung der Erkennensleistung der *Eigenfarbe* der Oberflächen durch die geänderte Art der Objektbewegung eingetreten ist: In dem Diagramm, welches die über alle drei Beobachter gemittelten Daten zeigt (Abb. 3.31 links), wurden diese Fehler offensichtlich dadurch verringert, dass sich der Trend, d.h. die Richtung der Abweichungen zwischen eingestellten und vorgegebenen Werten für die diffuse Komponente zwischen den Versuchspersonen, zumindest unter einigen 3D-Bedingungen unterscheidet, so dass Fehler, die in gegensätzliche Richtungen verlaufen, sich bei einer Gesamtbetrachtung über alle Beobachter zum Teil aufgehoben haben.

Bezogen auf die Glanzcharakteristik der Oberflächen scheint hingegen tatsächlich eine z.T. erhebliche Verbesserung der Glanzkonstanzeistung durch die hier verwendete Art der Oberflächenrotation eingetreten zu sein: Wie ein Vergleich der jeweils zwei korrespondierenden Balken in Abbildung 3.31 rechts zeigt, treten zwar weiterhin unter einigen Form-Bedingungen deutliche Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Phong-Index-Werten auf (siehe jeweils die absolute Distanz zur Nulllinie), allerdings ist der Fehler unter der hier gewählten Präsentationsform der Reizmuster in der Regel sehr viel kleiner, als unter der ursprünglichen Darbietungsbedingung in Experiment 1 – ein Trend, der sich auch bei Betrachtung der Ergebnisse jedes einzelnen Beobachters zeigt.

Insgesamt deuten die Befunde aus diesem Experiment darauf hin, dass das visuelle System, zumindest bezüglich einer Einschätzung der reinen Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche, tatsächlich Informationen berücksichtigt, die durch einen dynamischen Wechsel der Intensitäten im proximalen Reiz geliefert werden. Die Beurteilung des Glanzcharakters erweist sich unter Verwen-

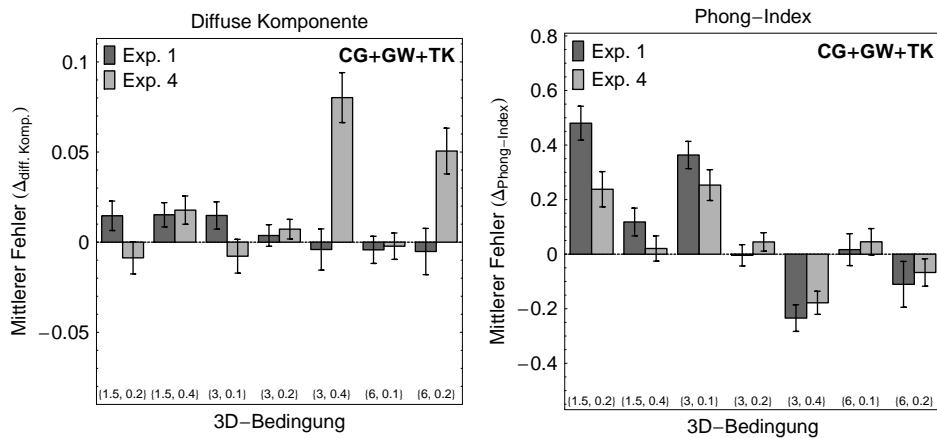


Abbildung 3.31: Die Ergebnisse von Experiment 4 im Vergleich zu denen aus Experiment 1 (gemittelt über alle drei Beobachter). Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern sind in den Diagrammen für jede der sieben 3D-Bedingungen die mittleren Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten dargestellt (die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler).

dung eines solchen Hinweisreizes als zuverlässiger, wenn es darum geht, die Glanzbeschaffenheit zwischen Oberflächen mit unterschiedlicher 3D-Struktur zu bestimmen – zumindest dann, wenn solcherlei Informationen auch in ausreichendem Maße verfügbar sind. Die Ergebnisse werfen jedoch gleichzeitig die Frage auf, weshalb die Bestimmung der *Eigenfarbe* einer Oberfläche durch die hier gewählte Rotationsart eher behindert zu werden scheint. Doch möglicherweise lässt sich dieser Aspekt damit erklären, dass auch zur genaueren Einschätzung der *Eigenfarbe* einer Oberfläche solche dynamischen Informationen eine Rolle spielen: Bei der in diesem Experiment verwendeten Rotationsart, bei der die Oberfläche um ihre vertikale Mittelachse rotierte, stand die globale Oberflächennormale immer in einem konstanten Winkel zur Lichtrichtung. Da die von einer Oberfläche rückgestrahlte Lichtintensität (neben der Reflektanz dieser Fläche) gemäß des Lambertschen Gesetzes (s. Abschnitt 2.2) nur von dem Winkel zwischen der Normalen und der Lichtrichtung abhängt, bedeutet dies nichts anderes, als dass die Grundhelligkeit der Oberflächen, d.h. der allein durch die ambiente und diffuse bestimmte Reflexionsanteil, in diesem Experiment immer annähernd konstant war. Im Gegensatz dazu veränderte sich dieser Winkel zwischen Oberflächennormale und Lichtrichtung stetig für die Reizmuster, die im ersten Experiment während der Oberflächenrotations-Bedingung benutzt wurden, so dass für jene Flächen entsprechende dynamische Informationen vorlagen, die möglicherweise eine genauere Beurteilung der *Eigenfarbe* ermöglichten. Eine weitere Erklärung könnte darin liegen, dass bei den Reizmustern in Experiment 1 in zahlreichen Einzelbildern während des Rotationslaufs offenbar nur die diffuse Komponente für den Beobachter zugänglich war (diese konnte dann sehr genau reproduziert werden), während in Experiment 4 die diffuse und spiegelnde Reflexion immer in kombinierter Form vorlagen, so dass der diffuse Anteil also ‚aktiv‘ separiert werden musste (vgl. dazu aber auch Todd, Norman & Mingolla, 2004).

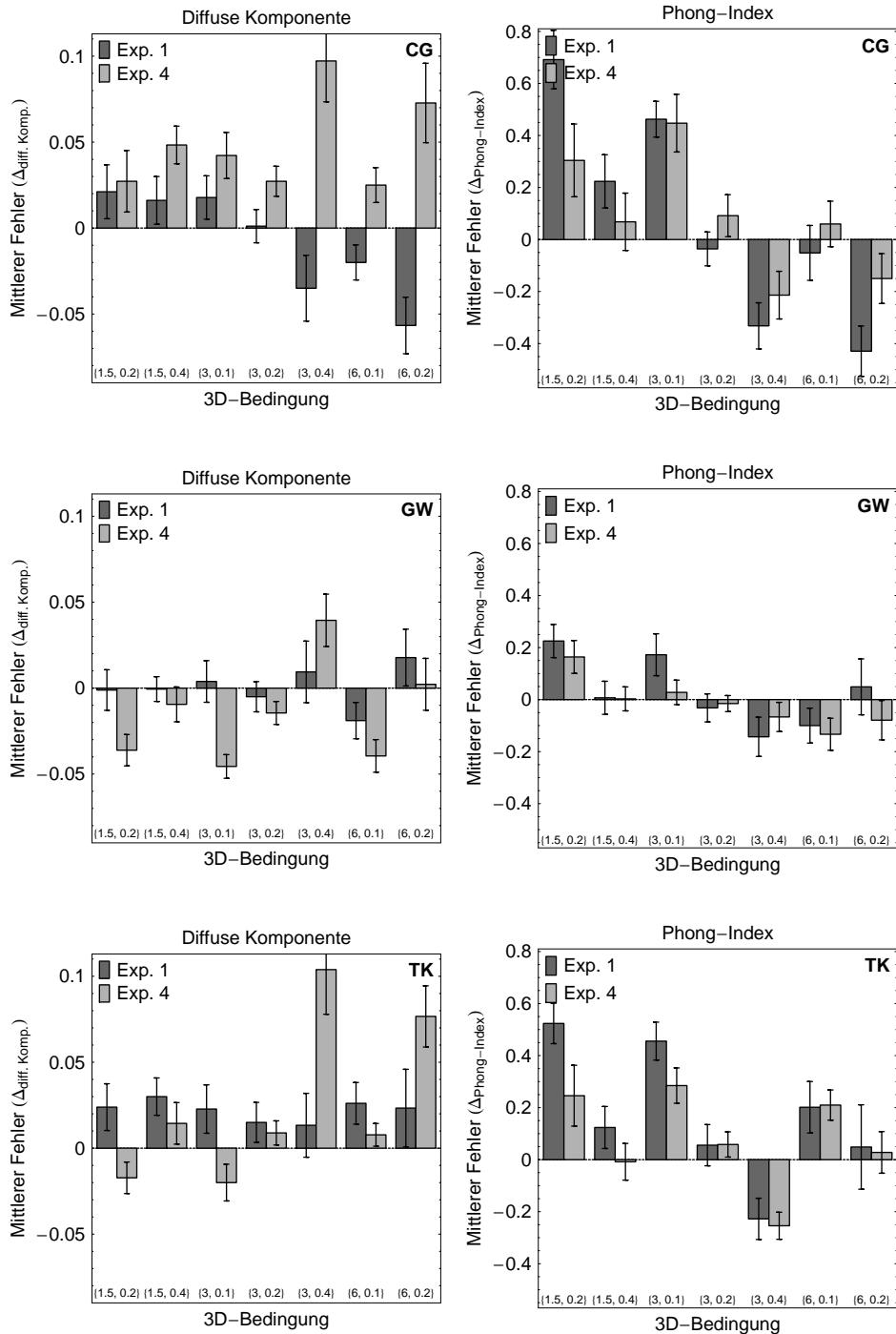


Abbildung 3.32: Die Ergebnisse von Experiment 4 im Vergleich zu denen aus Experiment 1 (getrennt für die einzelnen Beobachter). Unterteilt nach den beiden Reflexionsparametern sind in den Diagrammen für jede der sieben 3D-Bedingungen die mittleren Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten dargestellt (die Fehlerbalken repräsentieren jeweils in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler).

3.2.6 Experiment 5: Der Beitrag von binokularen Hinweisreizen zur Glanzkonstanz

In Abschnitt 2.4.2 des theoretischen Teils dieser Arbeit wurden bereits einige Studien vorgestellt, welche darauf hindeuten, dass binokulare Hinweisreize vom visuellen System bei der Glanzwahrnehmung genutzt werden. Im proximalen Reiz liegen diese binokularen Hinweisreize in Form von Disparitätsinformationen vor: Im Allgemeinen weisen die Glanzlichter auf zum Teil spiegelnd reflektierenden Oberflächen eine andere Disparität auf als die Oberflächen selbst (vgl. Abb. 2.17), was, abhängig von den lokalen Krümmungen der Oberfläche, dazu führt, dass die Glanzschicht in einer anderen Tiefenebene wahrgenommen wird als die Objektoberfläche. Wie auch die Experimente der Experimentalreihe I der vorliegenden Arbeit zeigten, scheint sich das Vorhandensein dieses Hinweisreizes der Glanzlicht-Disparität sowohl auf die empfundene Authentizität als auch auf die Stärke des Glanzeindrucks auszuwirken: Reizmuster, die diesen Hinweisreiz enthielten, wurden gegenüber monokularen Reizmustern als sehr viel realistischer in ihrem Glanzcharakter empfunden und höher in ihrer Glanzausprägung bewertet. Inwieweit binokulare Hinweisreize einen Einfluss auf die Glanzkonstanzeistung ausüben können, wurde bereits einleitend angesprochen: Schon Nishida und Shinya (1998) vermuteten, dass ein besserer Abgleich der Reflexionsbeschaffenheit zwischen zwei Oberflächen mit unterschiedlicher 3D-Form gelingen könnte, wenn die Reizmuster in einer stereoskopischen Darbietungsvariante mit Oberflächen-Disparität ausgestattet würden, da dadurch die Erkennung der 3D-Struktur erleichtert sei. Wie bereits einige Befunde der vorliegenden Arbeit nahe legen, scheint sich die Verfügbarkeit von Glanzlicht-Disparität ebenfalls auf eine bessere Glanzkonstanzeistung auszuwirken; wie vermutet wurde dadurch, dass die beiden phänomenalen Oberflächenbestandteile *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* klarer voneinander getrennt erscheinen, womit also das visuelle System ein starkes potentielles Hilfsmittel zur Verfügung hätte, um die miteinander vermischten Komponenten zu separieren.

In Experiment 2 dieser Experimentalreihe wurden bereits Reizmuster verwendet, die mit Glanzlicht-Disparität ausgestattet waren. Die dort erzielten Ergebnisse zeigten – in erster Linie für die wahrgenommene Glanzausprägung der Oberflächen –, dass eine deutliche Verbesserung der Glanzkonstanzeistung auftrat. Allerdings wurde in jenem Experiment, welches dazu dienen sollte, durch die Anreicherung der Reizmuster mit einer Vielzahl von potentiellen Informationsquellen, den „maximalen“ zu erwartenden Effekt zu bestimmen, auch ein weiterer potentieller Hinweisreiz getestet, nämlich die farbliche Trennung von *Eigenfarbe* und *Glanzschicht*. Das nachfolgend beschriebene Experiment 5 sollte dazu dienen, den Beitrag zu einer Glanzkonstanzeistung zu bestimmen, der durch das Vorhandensein von Disparitätsinformationen im Reizmuster geliefert wird. Hierbei soll einerseits geprüft werden, inwieweit bereits das Vorliegen von einfacher Oberflächen-Disparität (ohne Glanzlicht-Disparität) zur Glanzkonstanzeistung beiträgt, da eine solche binokulare Information, wie schon von Nishida und Shinya angenommen, eine bessere Schätzung der 3D-Struktur einer Oberfläche ermöglicht. Andererseits soll hier untersucht werden, ob das zusätzliche Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität (neben der Oberflächen-Disparität) eine weitere Steigerung der Glanzkonstanzeistung bewirkt, da eine solche im proximalen Reiz enthaltene Information, wie oben bereits ausgeführt, zu einer besseren Zergliederung in die Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* führen könnte.

Der hier verwendete Versuchsaufbau unterschied sich nur geringfügig von dem in Experiment 2: Erneut wurde mit stereoskopischen Reizmustern gearbeitet, um diese mit den entsprechenden binokularen Informationen auszustatten zu können. Daher wurden für jedes darzubietende Reizmuster zwei nebeneinander angeordnete Halbbilder auf dem Monitor dargeboten (Abb. 3.33), welche während des Versuchs mit Hilfe eines Spiegelstereoskops zur Fusion gebracht wurden. Wurden die Reizmuster in Experiment 2 dieser Experimentalreihe immer mit beiden Disparitätsarten dargeboten, wird nun in einigen Bedingungen nur Oberflächen-Disparität verwendet. Die Oberflächen-

Disparität wurde dadurch erzeugt, dass die beiden Halbbilder eines Reizmusters in perspektivischer Darbietung präsentiert wurden. Für die Verwendung von Glanzlicht-Disparität, bzw. deren Nichtverwendung im Reiz, wurden unterschiedliche Beobachtervektoren für die beiden Augen des Beobachters definiert, die danach dem Beleuchtungsmodell, mit dessen Hilfe die Einfärbung der Reizmuster bestimmt wurde, übergeben wurden (vgl. Formel 3.4). Für Reizmuster, die neben der Oberflächen-Disparität auch Glanzlicht-Disparität als binokulare Information enthielten, wurden die beiden mit dem linken und dem rechten Auge des Beobachters assoziierten Vektoren gemäß dem Augenabstand und der Distanz zwischen dem Beobachter und dem Zentrum des Reizmusters im virtuellen Raum berechnet. Im anderen Fall, bei dem die Glanzlicht-Disparität der Oberflächen-Disparität entsprach, wurde für beide Augen des Beobachters derselbe Beobachtervektor verwendet, welcher sich aus dem Mittelwert der beiden Vektoren ergab, für deren Berechnung der Augenabstand berücksichtigt wurde (vgl. hierzu die Erläuterungen zur Reizkonstruktion für die erste Experimentalreihe dieser Arbeit in Abschnitt 3.1.1).

Für die Abgleichsaufgabe, die die Beobachter in diesem Experiment zu bewältigen hatten, wurde simultan ein Vorgabe- und ein Abgleichsreiz (beide bestehend aus jeweils einem Paar von monokularen Halbbildern) untereinander auf dem Monitor präsentiert, mit einem Zentrum-zu-Zentrum-Abstand von 12 cm. Die Vorgabeoberfläche wies dabei immer dieselben 3D-Parameter auf: 3.0 für die mittlere Frequenz und 0.2 für die Amplitude (s. Formel 3.3) und wurde in den üblichen neun Reflexionsparameterkombinationen dargeboten (0.2, 0.3 und 0.4 für die diffuse Komponente \times 1.35, 1.8 und 2.35 für den Phong-Index; s. Formel 3.4). Die Abgleichsoberfläche wurde, ebenfalls in gewohnter Weise, in sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen dargeboten. Die Aufgabe der Beobachter war es, den Abgleichsreiz durch interaktive Manipulation der beiden Reflexionsparameter *diffuse Komponente* und *Phong-Index* so einzustellen, dass die wahrgenommene Reflexionsbeschaffenheit der des Vorgabereizes entsprach. Es wurde dieselbe Rotationsbedingung verwendet wie zuvor in Experiment 1 dieser Experimentalreihe, d.h. beide Reizmuster rotierten synchron in einem Ausschnitt von 90° mit einer Geschwindigkeit von ca. 56° pro Sekunde um ihre horizontale Mittelachse, wobei bei der Ausgangsstellung die Oberflächennormale der Reizoberflächen in die *y*-Richtung des virtuellen Raums ausgerichtet war und bei der anderen Extremstellung in die Beobachterrichtung (*z*-Achse) zeigte. Verwendet wurde hier nur die Variante einer Oberflächenrotation, d.h. die Lichtquelle befand sich an einem statischen Ort im virtuellen Raum (die Lichtrichtung war durch die Winkelhalbierende zwischen der *y*-Achse und der *z*-Achse des Raumes bestimmt; die Punktlichtquelle wies eine Distanz von 100 cm zum Zentrum des Raumes, bzw. des Reizmusters auf).

Die für Experiment 5 zentrale unabhängigen Variable bestand in der Verfügbarkeit von binokularen Informationen: In der Hälfte aller Bedingungen wiesen Vorgabe- und Abgleichsreiz gleichermaßen Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität auf, in der anderen Hälfte wurden beide lediglich mit Oberflächen-Disparität dargeboten (bzw. entsprach die Glanzlicht-Disparität hier exakt der Oberflächen-Disparität, s.o.). Durch Kombination mit den weiteren unabhängigen Variablen ergaben sich für dieses Experiment somit 126 Bedingungs-Kombinationen (7 unterschiedliche 3D-Formen für die Abgleichsoberfläche \times 9 unterschiedliche Reflexionsparameterkombinationen für die Vorgabeoberfläche \times 2 unterschiedliche Arten von Disparitätsinformationen), die jeweils vier Mal wiederholt wurden, so dass ein Gesamtumfang von 504 Durchgängen resultierte. Um möglichen räumlichen Inhomogenitäten in den Emissionseigenschaften des verwendeten Monitors Rechnung zu tragen, wurden die Positionen von Abgleichs- und Vorgabereiz balanciert, d.h. in der Hälfte der Durchgänge erschien der Abgleichsreiz auf der oberen (bzw. unteren) Bildhälfte, während der Vorgabereiz auf der unteren (bzw. oberen) Bildhälfte dargeboten wurde. Die Versuchspersonen bearbeiteten den gesamten Satz von 504 Durchgängen, die innerhalb des Gesamtumfangs in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden, in vier getrennten Sitzungen zu je 126 Durchgängen. Für die Fertigstellung eines Abgleichs hatte die Versuchsperson in jedem Durch-

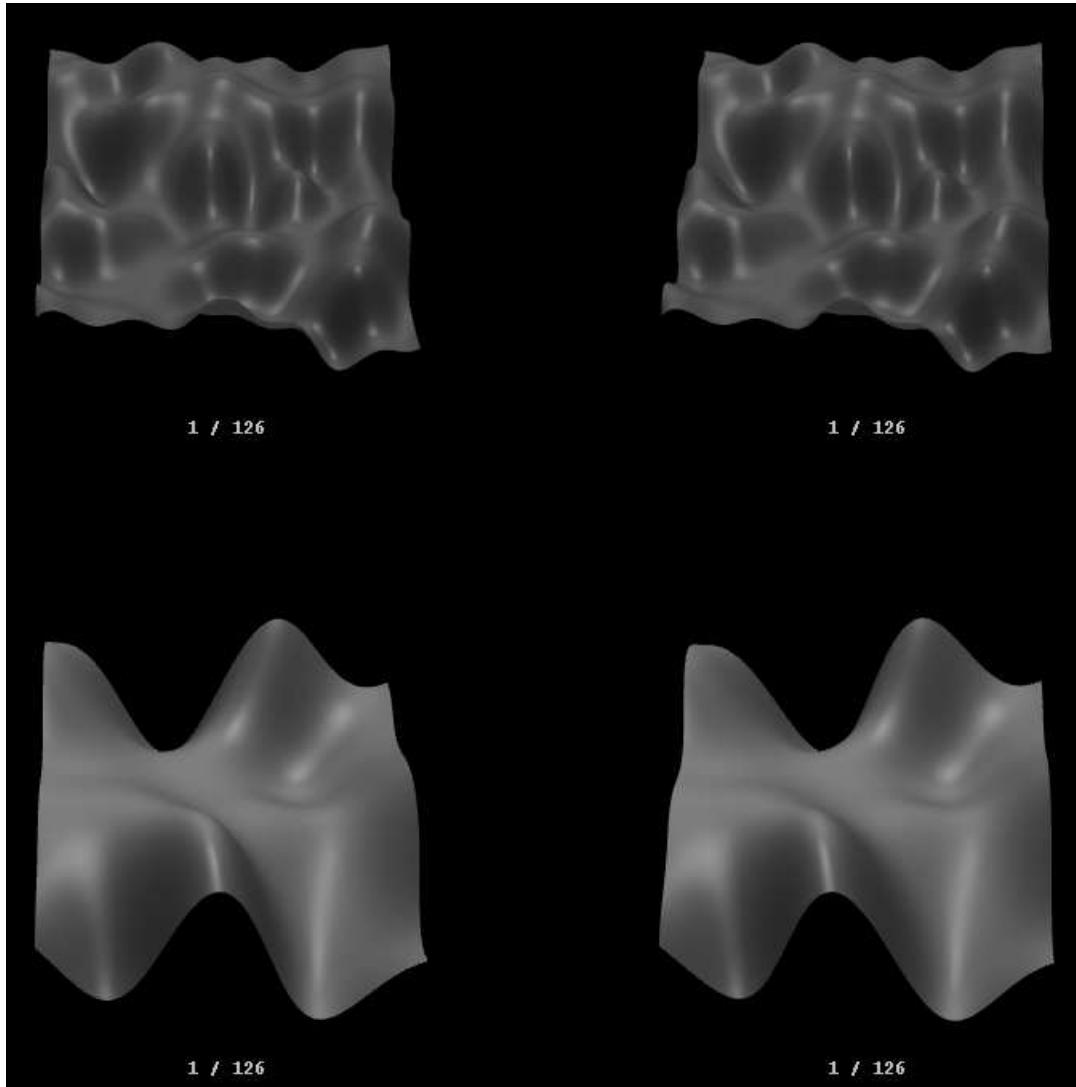


Abbildung 3.33: Beispiel für ein Paar von Reizmustern (Screenshot des Versuchsdisplays). Oben: Die beiden monokularen Halbbilder des Vorgabereizes. Unten: Die entsprechenden Halbbilder des Abgleichsreizes (mit den Formparametern 1.5 für die mittlere Frequenz und 0.4 für die Amplitude). Die Glanzlicht-Disparität entspricht bei beiden Reizmustern der Oberflächen-Disparität.

gang unbegrenzt viel Zeit. Wurde ein Durchgang seitens des Beobachters durch Drücken der Eingabetaste beendet, wurde für eine Dauer von einer Sekunde ein Dunkeladaptationsintervall eingeschoben, bevor der nächste Reiz präsentiert wurde.

Versuchspersonen

An diesem Experiment nahmen dieselben Versuchspersonen teil, die sich bereits für die ersten beiden Experimente der Experimentalreihe II als Beobachter zur Verfügung gestellt hatten.

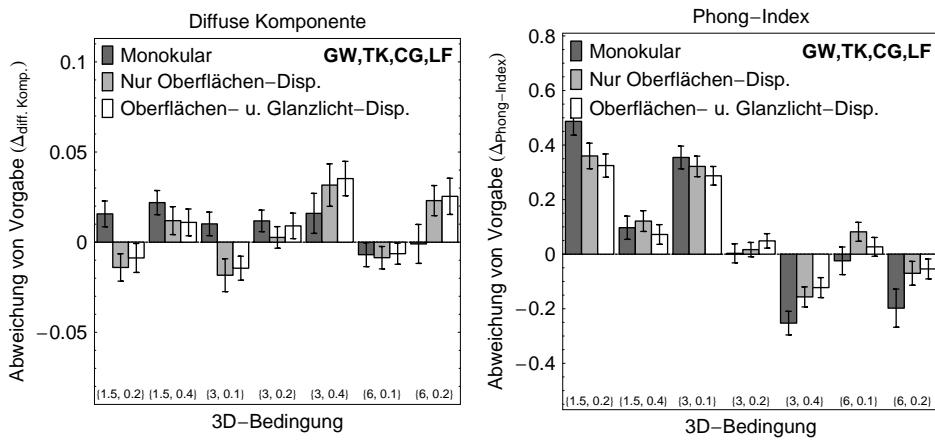


Abbildung 3.34: Über alle Beobachter gemittelte Ergebnisse des Experiments 5: Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern sind für jede der sieben untersuchten 3D-Bedingungen jeweils die Abweichungen zwischen den eingestellten und den vorgegebenen Werten (zusammengefasst für jeweils alle neun Reflexionsparameterkombinationen) separat für die drei Hinweisreiz-Bedingungen dargestellt (die Fehlerbalken repräsentieren in beide Richtungen den zweifachen Standardschätzfehler). Die Daten zu der monokularen Bedingung stammen hierbei aus Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe.

Ergebnisse

Abbildung 3.34 zeigt zunächst die über alle vier Beobachter gemittelten Daten des Experiments: Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern *diffuse Komponente* und *Phong-Index* sind hier jeweils für alle sieben untersuchten Form-Bedingungen (Abszisse) die mittleren Abweichungen der eingestellten Reflexionsparameterwerte von den entsprechenden Vorgabewerten als Balken dargestellt (die jeweils neun unterschiedlichen Reflexionsbedingungen sind hierbei zusammengefasst worden). Unter jeder Form-Bedingung sind jeweils drei unterschiedliche Balken aufgeführt, die mit den drei verschiedenen Hinweisreiz-Bedingungen assoziiert sind: Die dunklen Balken geben hier jeweils die Bedingung wieder, bei der die Reizmuster monokular präsentiert wurden (diese Daten stammen aus dem ersten Experiment der Experimentalreihe 2 und wurden hier als Referenzwerte hinzugenommen), die hellgrauen Balken zeigen die Daten für die Bedingung, bei der die Reizmuster ausschließlich mit Oberflächen-Disparität ausgestattet waren und die weißen Balken repräsentieren die mittleren Werte, die unter der Bedingung erhoben wurden, bei der die Reizeroberflächen sowohl mit Oberflächen- als auch mit Glanzlicht-Disparität ausgestattet waren.

Betrachtet man zunächst die Daten zur diffusen Komponente, so scheint sich hier kein einheitliches Bild zu ergeben, was eine mögliche Veränderung der Glanzkonstanzeistung unter Zugabe von weiteren, binokularen Informationsangeboten betrifft: Unter einigen Bedingungen scheinen hier leichte Verbesserungen, d.h. bessere Übereinstimmungen zwischen den eingestellten und den vorgegebenen Werten für die diffuse Komponente aufzutreten, wenn binokulare Hinweisreize im Reiz enthalten sind, unter anderen wiederum scheint sich eher eine Verschlechterung einzustellen. Zusätzlich zeigen bei den über alle vier Beobachter gemittelten Daten wenigstens zwei 3D-Bedingungen ((1.5, 0.2) und (3, 0, 0.1)) einen Trendwechsel in der Richtung der Abweichung zwischen der monokularen und den binokularen Darbietungsvarianten. Ein Blick auf die für jeden Beobachter getrennt aufgeführten Daten (Abbildungen 3.35 und 3.36) zeigt dabei, dass solche gegenläufigen Trends nicht nur zwischen den einzelnen Stufen der Variablen „Verfügbarkeit von

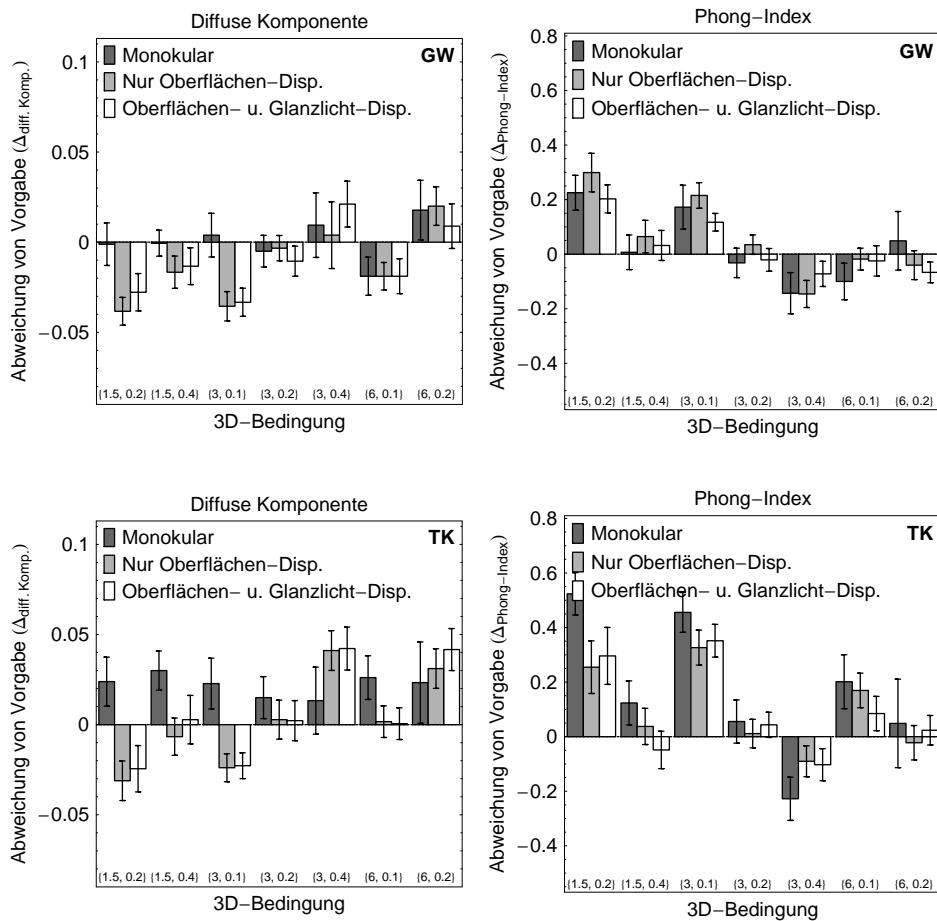


Abbildung 3.35: Individuelle Ergebnisse für die Beobachter GW und TK (vgl. Abb. 3.34).

Disparitätsinformationen“ bei ein und demselben Beobachter auftreten, sondern ebenfalls zwischen verschiedenen Beobachtern. Da somit die über alle Beobachter gemittelten Daten bezüglich der Abweichungen der eingestellten von den vorgegebenen Werten für die diffuse Komponente keinen einheitlichen Trend widerspiegeln, sondern in einigen Fällen eine Nivellierung der Effekte eben durch diese interindividuellen Unterschiede in der Richtung der Abweichungen auftritt, lassen sich die in Abbildung 3.34 links präsentierten Ergebnisdaten nicht sinnvoll interpretieren. Ein nicht minder unscharfes Bild ergibt sich aus einer Betrachtung der individuellen Daten: Unter einigen 3D-Bedingungen treten für einzelne Beobachter offenbar Verbesserungen in der Glanzkonstanzeistung auf, unter anderen scheint wiederum eine Verschlechterung in der Bestimmung der Eigenfarbe einer Oberfläche aufzutreten, wenn die Reizmuster Disparitäts-Informationen enthalten – ein Ergebnis, dass sich zwischen zwei verschiedenen Beobachtern jedoch auch wieder umkehren kann (man vergleiche z.B. die zur 3D-Bedingung (6.0, 0.2) gehörigen Daten zwischen den Beobachtern CG und LF in Abb. 3.36). Auch lassen sich aufgrund dieser uneinheitlichen Datenlage keine klaren Hinweise darauf ablesen, ob möglicherweise das weitere Hinzufügen von Glanzlicht-Disparität (neben der Oberflächen-Disparität) zu einer Steigerung der Erkennungsleistung der Eigenfarbe beiträgt.

Anders verhält es sich aber bezüglich des wahrgenommenen Glanzcharakters der Oberflächen (rechtes Diagramm in Abb. 3.34): Hier zeigt sich bei den über alle Beobachter gemittelten Er-

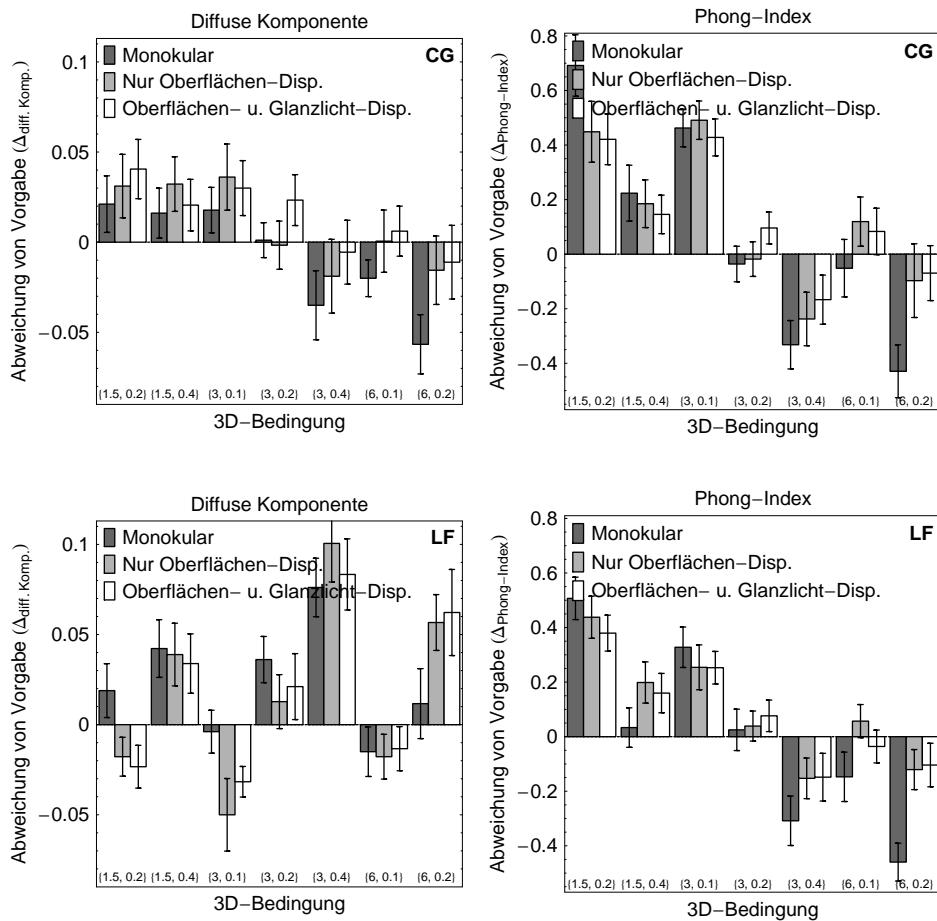


Abbildung 3.36: Individuelle Ergebnisse für die Beobachter CG und LF (vgl. Abb. 3.34).

gebnissen, dass die Verfügbarkeit von binokularen Hinweisreizen offenbar zu einer zum Teil erheblich verbesserten Glanzkonstanzleistung führt – insbesondere unter den 3D-Bedingungen, die zuvor (s. Experiment 1 der Experimentalreihe II) durch verhältnismäßig große Abweichungen zwischen den Phong-Indices der Abgleichs- und der Vorgabefläche aufgefallen waren (dies betrifft die 3D-Bedingungen (1.5, 0.2), (3.0, 0.1), (3.0, 0.4) und (6.0, 0.2)). Auch zeigen die individuellen Datensätze zu den Abweichungen des Phong-Index (jeweils die rechten Diagramme in den Abbildungen 3.34 bis 3.36) in diesem Fall vergleichbare Profile, so dass die über alle Beobachter gemittelten Ergebnisdaten einen allgemeinen Trend wiederzugeben scheinen: Allein die Verfügbarkeit von Oberflächen-Disparität in den Reizmustern scheint demnach bereits eine deutliche Steigerung in der Erkennensleistung der Glanzbeschaffenheit zu bewirken. Zusätzlich scheint die Zugabe von Glanzlicht-Disparität (zu den Reizmustern, die bereits Oberflächen-Disparität aufweisen) eine weitere Reduktion der Abweichungen zur Folge zu haben – obwohl dieser Effekt nur verhältnismäßig schwach ausgeprägt ist, deutet die Stabilität dieses Trends (sowohl bei den über alle Beobachter gemittelten Daten als auch – mit wenigen Ausnahmen – bei den individuellen Ergebnissen) darauf hin, dass die im proximalen Reiz enthaltene binokulare Information in Gestalt von Glanzlicht-Disparität zu einer Steigerung der Glanzkonstanzleistung beiträgt.

Insgesamt muss allerdings einschränkend festgestellt werden, dass die Daten, welche hier miteinander verglichen wurden (auf der einen Seite die beiden unter den Disparitäts-Bedingungen und

auf der anderen Seite die unter der monokularen Darbietungsvariante erhobenen Daten aus Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe) zu unterschiedlichen Messzeitpunkten erhoben wurden: Zwischen diesen beiden Erhebungszeitpunkten lagen mehrere Monate, so dass nicht auszuschließen ist, dass beispielsweise Übungseffekte zu einer Überschätzung des oben festgestellten Effektes beigetragen haben (so nahmen beispielsweise dieselben Versuchspersonen in der Zwischenzeit an weiteren Experimenten mit ähnlichem Reizmaterial teil). Um diese potentielle Fehlerquelle auszuschließen, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, bei dem alle miteinander zu vergleichenden Daten gleichzeitig erhoben wurden.

3.2.7 Experiment 6: Der Beitrag von binokularen und bewegungsinduzierten Informationen zur Glanzkonstanz

Die Versuchsbedingungen im vorangegangenen Experiment 5 waren so festgelegt, dass die damit erzielten Daten mit den bereits unter Experiment 1 der Experimentalreihe II erhobenen Ergebnissen verglichen werden konnten: Erweitert wurden die Reizmuster dort um das Vorhandensein von Disparitätsinformationen (was also einen stereoskopischen Reizaufbau erforderte), um den Einfluss solcher binokularer Informationen auf die Glanzkonstanzeistung gegenüber einer rein monokularen Reizpräsentation zu ermitteln. Die damit erzielten Ergebnisse waren teilweise schwer zu interpretieren, was möglicherweise mit dem verhältnismäßig großen zeitlichen Abstand zwischen der Durchführung des Experiments 5 und des Experiments 1 zusammenhängt. Um solche zeitabhängigen Einflüsse wie beispielsweise Übungseffekte auszuschließen, wurde ein weiteres Experiment durchgeführt, bei dem die Beobachter alle miteinander zu vergleichenden Bedingungen zur selben Zeit bearbeiteten. Da somit auch nicht weiter der Zwang bestand, bezüglich einiger Reizmerkmale identische Bedingungen zu Experiment 1 herzustellen (aus dem die Referenzdaten stammen), wurden hier nun außerdem einige Modifikationen an dem Reizmaterial vorgenommen, die durch die Ergebnisse des einen oder anderen vorangegangenen Experiments der Experimentalreihe II nahe gelegt wurden: Statt einer Objektrotation entlang der horizontalen Mittelachse der Reizmuster, wie sie bereits in den Experimenten von Nishida und Shinya (1998) verwendet wurde, rotierten die Oberflächen hier nun um ihre vertikale Mittelachse (vgl. Abb. 3.37). In Experiment 3 (Abschnitt 3.2.4) hatte sich gezeigt, dass bei der ursprünglichen Rotationsart, die aus einer Kippbewegung bestand, nur innerhalb eines verhältnismäßig eng umgrenzten Ausschnitts der Rotationsbewegung überhaupt genügend Informationen bezüglich der Glanzbeschaffenheit der Oberfläche zur Verfügung standen: Die Beziehung zwischen der Lichtrichtung, der Beobachterposition und der jeweiligen Oberflächenorientierung war in großen Intervallen der Rotationsbewegung derart ungünstig, dass die Oberfläche gar keine Glanzflecken aufwies und somit keinerlei Anhaltspunkte für die Beurteilung der Glanzeigenschaft bot.

Weiterhin sollte in dem nachfolgend beschriebenen Experiment 6 nicht nur der Einfluss von Disparitäts-Informationen auf die Glanzkonstanzeistung getestet werden, sondern gleichzeitig der mögliche Beitrag von durch Bewegung vermittelte Informationen. Diese potentielle Informationsquelle wurde zwar bereits in den Experimenten 3 und 4 der zweiten Experimentalreihe untersucht, jedoch wurden auch die dort erhobenen Daten mit den Ergebnissen aus dem ersten Experiment verglichen – ein Vorgehen, das sich, zumindest bezogen auf den Einfluss von Disparitäts-Informationen, als problematisch erwiesen hat.

Es ergab sich somit ein 2-faktorielles Design: Der erste Faktor besteht in der Verfügbarkeit von Disparitäts-Informationen, mit den folgenden Faktorstufen:

- „Monokular“ (beide Halbbilder eines stereoskopischen Reizpaars sind identisch, s. unter Experiment 5, Abschnitt 3.2.6),
- „mit Oberflächen-Disparität“ (die beiden Halbbilder werden perspektivisch dargestellt, gemäß des Abstands zwischen den beiden Augen des Beobachters und des Abstands zwischen Beobachter und Reizmuster im virtuellen Raum – die Glanzlichter erscheinen hierbei jedoch auf korrespondierenden Oberflächenpunkten und weisen somit keine Glanzlicht-Disparität auf) und
- „mit Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ (neben dem Vorhandensein von Oberflächen-Disparität, werden hier auch die Glanzlichter in den beiden Halbbildern an den entsprechenden, physikalisch korrekten Position auf der virtuellen Oberfläche des Reizmusters dargestellt – dies führt im Allgemeinen dazu, dass sich die Disparität eines jeden Glanzlichtes von der Oberflächen-Disparität unterscheidet, vgl. Abb. 2.17).

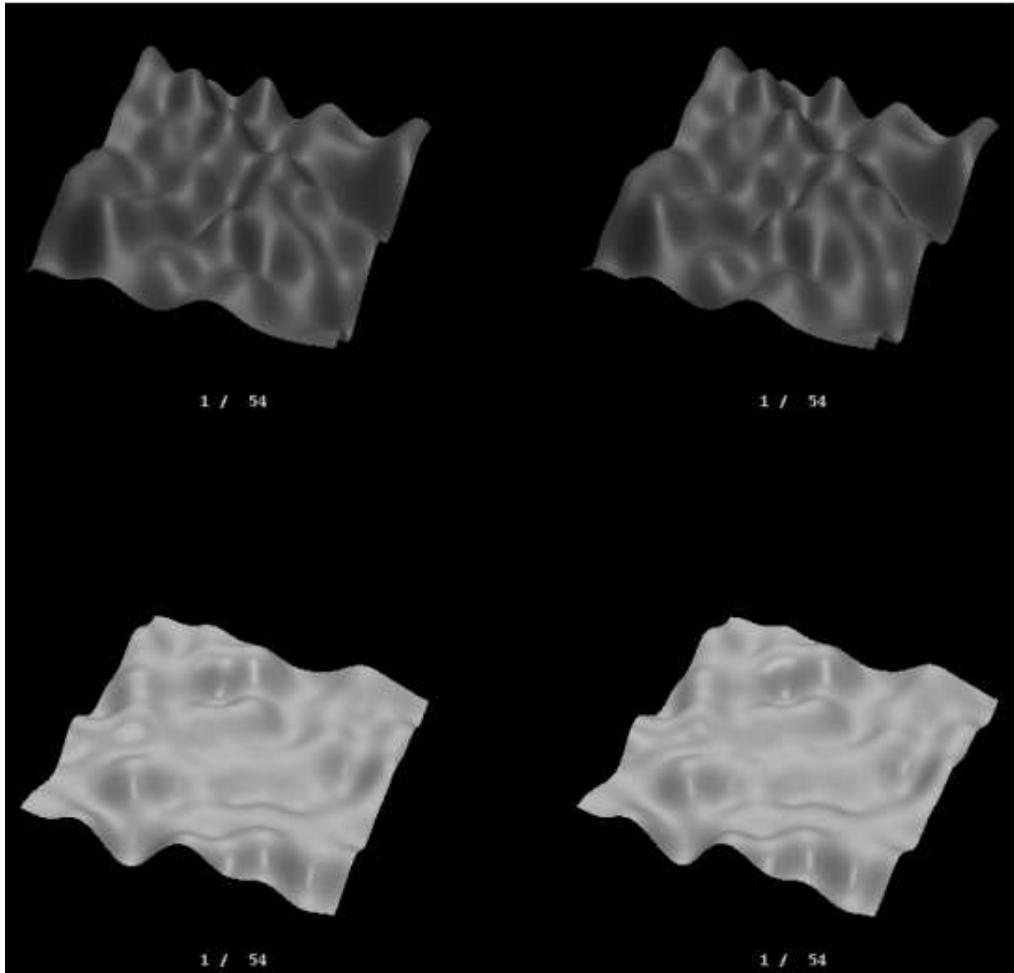


Abbildung 3.37: Beispiel für ein Paar von Reizmustern des Experiments 6 (Screenshot des Versuchsdisplays). Oben: Die beiden monokularen Halbbilder des Vorgabereizes. Unten: Die entsprechenden Halbbilder des Abgleichsreizes (mit den Formparametern 3.0 für die mittlere Frequenz und 0.1 für die Amplitude). Die Reizmuster rotierten während der Darbietung um ihre globale Oberflächennormale.

Der zweite Faktor besteht in der Verfügbarkeit von Bewegungsinformation mit den beiden Stufen:

- “Statisch“ (d.h. die Reizmuster werden ohne Bewegung dargestellt) und
- “dynamisch“ (hier werden die Reizmuster bewegt präsentiert, wobei die Oberflächen um ihre, um 45° zur Beobachterrichtung geneigte, vertikale Mittelachse rotieren).

Beide Faktoren wurden vollständig miteinander gekreuzt, so dass sich sechs unterschiedliche Bedingungskombinationen hinsichtlich der Verfügbarkeit der beiden verschiedenen Informationsquellen ergaben.

Für das nachfolgende Experiment wurden die Vorgabeoberfläche, die wie üblich die 3D-Parameter 3.0 für die mittlere Frequenz und 0.2 für die Amplitude der zugrunde liegenden, miteinander kombinierten Sinusgitter aufwies (vgl. Formel 3.3), und die entsprechende Abgleichsoberfläche jeweils als Paare stereoskopischer Halbbilder simultan auf dem Monitor präsentiert. Die Beobachtungsbedingungen und verwendeten Geräte waren dieselben wie in Experiment 5 der

zweiten Experimentalreihe. Sofern die Reizmuster Bewegungsinformationen enthielten (d.h. in der Hälfte aller Bedingungen, s.o.) rotierten die Oberflächen hier mit einer Geschwindigkeit von ca. 90° pro Sekunde um ihre vertikale Mittelachse, die, gemessen an der Ursprungsorientierung der globalen Oberflächennormale, welche entlang der Höhenachse (y) des virtuellen Raumes verlief, um 45° in die Beobachterrichtung geneigt war. Während der anderen Hälfte der Bedingungen wurden die Oberflächen in statischer Form präsentiert, wobei die globale Oberflächennormale ebenfalls um 45° zur Beobachterrichtung geneigt war.

Die virtuelle Punktlichtquelle befand sich in diesem Fall an den Koordinaten (0, 100, 0) des virtuellen 3D-Raums. Die 3D-Form der Abgleichsflächen wurde in 2 Stufen variiert: Die Formparameter waren entweder (3.0, 0.1) oder (1.5, 0.2), wobei also erstere gegenüber der Vorgabeoberfläche (3.0, 0.2) eine geringere Amplitude und letztere eine geringere Raumfrequenz aufwies (vgl. Abb. 3.12). Aus dem ursprünglichen Pool von insgesamt sieben unterschiedlichen 3D-Bedingungen, wurden diese beiden aus folgenden Gründen ausgewählt: Zum einen hatte sich während des Experiments 1 der zweiten Experimentalreihe gezeigt, dass unter diesen beiden Form-Bedingungen die größten und gleichzeitig systematischsten Fehler erzeugt wurden (vgl. Abb. 3.13), womit diese 3D-Bedingungen den größten Spielraum für eine mögliche Reduktion des systematischen Fehlers geben. Zum anderen wird durch die Reduktion auf nur zwei unterschiedliche 3D-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche die Gesamtzahl der Durchgänge während des Experiments verringert, was eine erhebliche Entlastung für die teilnehmenden Versuchspersonen darstellt.

Die exakte Oberflächenstruktur der untersuchten Reizmuster wurde bei diesem Experiment nicht gänzlich dem Zufall überlassen – eine Einschränkung gegenüber den meisten anderen Experimenten dieser Arbeit, die sich deshalb nicht vermeiden ließ, weil aufgrund des hier verwendeten Szenenaufbaus (mit festgelegten Richtungen für den Beobachter, die Lichtquelle und die globale Oberflächennormale) unter statischer Darbietung der Reizmuster nicht alle Oberflächen genügend Glanzflecken aufwiesen, um darauf aufbauend eine Einschätzung hinsichtlich der Glanzbeschaffenheit der Reizmuster seitens des Beobachters zu ermöglichen. Aus diesem Grund wurde im Vorfeld für jede, durch ein festes Paar von 3D-Parametern charakterisierte 3D-Bedingung ein Satz von jeweils vier verschiedenen Pseudozufallszahlenreihen für die zugehörigen Orientierungen und Phasenverschiebungen der zugrunde liegenden Sinusgitter bestimmt, die im Endergebnis eine Oberflächenstruktur bildeten, welche auch unter statischer Darbietung der Reizmuster genügend Glanzflecken enthielten. Somit wurden für jede der hier verwendeten 3D-Bedingungen (sowohl die Bedingung (3.0, 0.2) für den Vorgabereiz, als auch für jede der beiden 3D-Bedingungen (3.0, 0.1) und (1.5, 0.2) für die Abgleichsreize) vier verschiedene Oberflächenstrukturen verwendet, die während des Abgleichsexperiments in festen Paaren präsentiert wurden, so dass für jede Messwiederholung innerhalb einer Bedingungskombination ein anderes Paar von Oberflächenstrukturen des Vorgabe- und des Abgleichsreizes verwendet wurde.

Die Vorgabefläche wurde erneut in den neun üblichen Reflexionsparameterkombinationen dargeboten (mit den Werten 0.2, 0.3 und 0.4 für den Anteil der diffusen Komponente \times den Werten 1.35, 1.8 und 2.35 für den Phong-Index). Aufgabe der Beobachter war es, einen perzeptuellen Abgleich der wahrgenommenen Materialbeschaffenheit zwischen dem Abgleichs- und dem Vorgabereiz herzustellen, wofür die beiden Reflexionsparameter interaktiv mit Hilfe der Pfeiltasten auf der Tastatur manipuliert werden konnten. Jede der 108 Bedingungskombinationen (2 unterschiedliche 3D-Parameterkombinationen für die Abgleichsfläche \times 3 Werte für die diffuse Komponente \times 3 Werte für den Phong-Index des Vorgabereizes \times 3 Varianten von binokularen Informationen in den Reizmustern \times 2 Stufen zur Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen) wurde viermal wiederholt. Es ergab sich somit ein Gesamtumfang von 432 Durchgängen, welche, aufgeteilt auf vier Sitzungen zu je 108 Durchgängen, in randomisierter Reihenfolge präsentiert wurden.

Versuchspersonen

Auch an diesem Experiment nahmen dieselben vier Beobachter teil wie im vorangegangenen Experiment.

Ergebnisse

Die beiden Diagramme der oberen Reihe in Abbildung 3.38 zeigen zunächst in gewohnter, fein aufgelöster Weise die über alle vier Beobachter gemittelten Ergebnisse für eine der untersuchten 3D-Bedingungen (hier wies die Abgleichsoberfläche eine Frequenzparameter von 3.0 und eine Amplitude von 0.1 auf – gegenüber der 3D-Struktur der Vorgabefläche wies die Abgleichsfläche also lediglich eine verminderte Amplitude auf), wobei also für jede Bedingungskombination die im Abgleichsreiz eingestellten Paare von Reflexionsparametern (jeweils die Pfeilsspitzen) mit den entsprechenden Werten für die Vorgabefläche (Ursprung der Pfeile) in Beziehung gesetzt sind. Die beiden Diagramme zeigen jeweils für eine der beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ (linkes Diagramm für die statisch präsentierten Reizmuster, das rechte für die dynamisch dargebotenen Oberflächen) die mit dieser Faktorstufe kombinierten drei Stufen des anderen untersuchten Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“, die jeweils farblich voneinander getrennt in den Diagrammen repräsentiert sind. Während sich bezüglich der diffusen Komponente (Abszisse) offenbar keine klare Struktur hinsichtlich der Richtungen der Abweichungen der eingestellten Werte vom Vorgabewert erkennen lässt – diese teilweise mit dem Vorgabewert des Phong-Index zu variieren scheinen – ergibt sich für eine isolierte Betrachtung der Abweichungen bezüglich des „Glanz-Parameters“ Phong-Index eine gewisse Systematik: Hier scheint eine deutliche Abhängigkeit der Fehlerabweichungen von den einzelnen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ zu bestehen, insofern, dass unter der Stufe „monokular“ die größten Abweichungen vom Vorgabewert aufzutreten scheinen, gefolgt von der Stufe „nur Oberflächen-Disparität“, während die geringsten systematischen Fehler bezüglich des Phong-Index unter der Stufe „Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ auftreten. Vergleicht man weiterhin diese Fehlerabweichungen zwischen den beiden Diagrammen, so scheinen diese systematischen Fehler zudem unter statischer Reizpräsentation (linkes Diagramm) durchgängig größer auszufallen als unter dynamischer Reizdarbietung (rechtes Diagramm), bei der die Reizmuster während der Versuchsdurchführung in einer Rotationsbewegung präsentiert wurden. Zusätzlich zeigt sich hier, dass die Abweichung des eingestellten Wertes für den Phong-Index von dem entsprechenden Vorgabewert im Schnitt immer positiv ist, d.h. eine Oberfläche, die gegenüber einer Vorgabefläche eine geringere Amplitude aufweist, bedarf offenbar einer größeren objektiven Glanzausprägung, um als gleich hinsichtlich ihrer Glanzbeschaffenheit empfunden zu werden.

Dieses Ergebnis zeigt sich unter Verwendung einer anderen, komprimierteren Darstellungsform in noch deutlicherer Weise in den beiden unteren Diagrammen in Abbildung 3.38: Hier sind die einzelnen Abweichungen über alle neun Reflexionsparameterkombinationen gemittelt und getrennt nach den beiden Reflexionsparametern und den jeweiligen sechs Faktorstufen-Kombinationen (im linken Diagramm für den Phong-Index, im rechten für die diffuse Komponente) gemäß eines klassischen, zweifaktoriellen varianzanalytischen Designs aufgeführt. Der rote Linienzug innerhalb eines jeden Diagramms verbindet hierbei die so zusammengefassten Daten für die drei unterschiedlichen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ (Abszisse) mit der zum übrigen Faktor „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ gehörigen Stufe „statisch“, der grüne Linienzug entsprechend für die Stufe „dynamisch“. Bezogen auf die Fehlerabweichungen des Phong-Index ergab eine varianzanalytische Auswertung dieser Daten einen signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ ($p < 6 \times 10^{-8}$) und einen ebenfalls signifikanten Haupteffekt für den Faktor „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ ($p < 0.00013$). Allein die Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen in einer dynami-

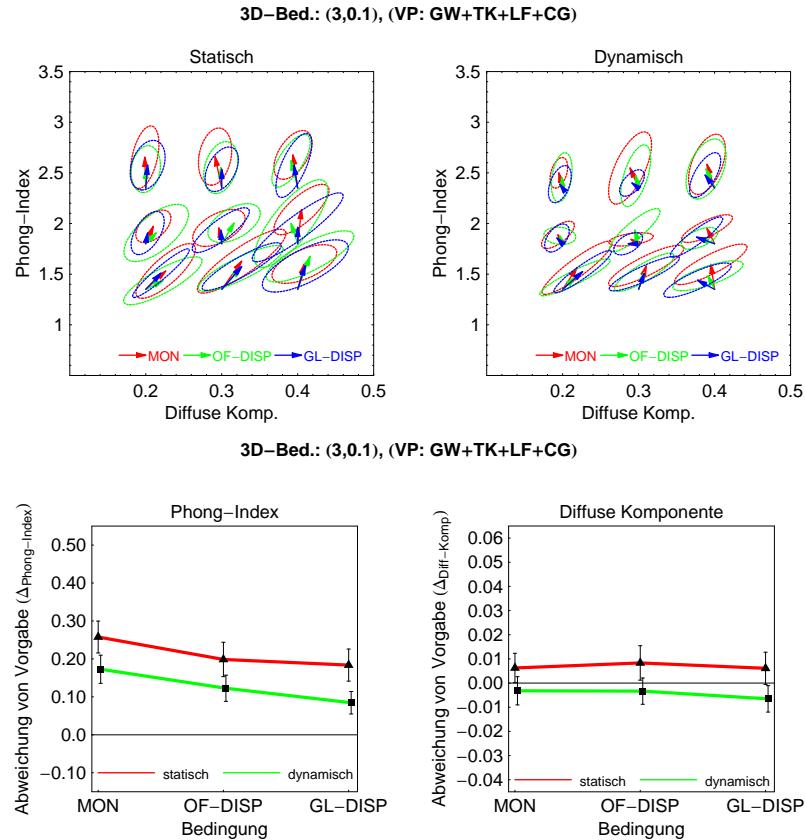


Abbildung 3.38: Ergebnisse zur Abgleichsoberfläche mit den 3D-Parametern (3.0, 0.1), über alle Beobachter gemittelt: In der oberen Reihe sind, getrennt nach den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“, für jeweils jede der drei (hier farblich getrennten) Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ die Werte der eingestellten Reflexionsparameterpaare (Pfeilspitzen) gemeinsam mit den entsprechenden Werten des Vorgabebereizes (Ursprung der Pfeile) dargestellt. Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen über alle Beobachter zusammengeführten Stichproben. Die untere Reihe zeigt, getrennt nach den beiden Reflexionsparametern „Phong-Index“ (links) und „diffuse Komponente“ (rechts), die über alle Reflexionsparameterkombinationen gemittelten systematischen Fehler. Die Abszissenposition kennzeichnet hierbei die Zugehörigkeit zu den einzelnen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“: „MON“ = „monokular“, „OF-DISP“ = „mit Oberflächen-Disparität“ und „GL-DISP“ = „mit Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ (weitere Erläuterungen im Text).

schen Reizpräsentation führt demnach zu einer bedeutsamen Reduktion des systematischen Fehlers gegenüber einer statischen Reizpräsentation und zwar in gleichem Ausmaß unter allen Stufen des übrigen Faktors. Hinsichtlich des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ zeigt sich im Trend eine Reduktion des systematischen Fehlers bezogen auf den Phong-Index, je mehr Disparitätsinformationen im Reizmuster enthalten sind: Demnach werden unter monokularer Reizdarbietung die größten Abweichungen zwischen dem Vorgabe- und dem Abgleichswert erreicht, während die Zugabe von Disparitätsinformationen (zunächst nur Oberflächen-Disparität, dann zusätzlich Glanzlicht-Disparität) schrittweise zu einer immer besseren Annäherung des eingestellten an den vorgegebenen Wert erfolgt (nach Durchführung eines Einzelvergleichstest nach

Bonferroni ergibt sich ein signifikanter Unterschied zwischen der Stufe „monokular“ und der Stufe „Oberflächen-Disparität“ mit $p < 0.02$; sowie ein signifikanter Unterschied zwischen den Stufen „monokular“ und „Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ mit $p < 0.0001$.

Betrachtet man diese systematischen Fehler bezüglich des Phong-Index getrennt für die einzelnen Beobachter (das jeweils linke Diagramm in Abb. 3.39), so zeigen sich nur wenige Abweichungen von diesem Gesamttrend: Beobachter GW zeigt beispielsweise keinen signifikanten Haupteffekt hinsichtlich des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“. Dies lässt sich aber angesichts der Daten damit erklären, dass für diesen Beobachter allein die Verfügbarkeit von Bewegungsinformation schon hinreichend war, um einen nahezu perfekten Abgleich des Glanzparameters zwischen dem Vorgabe- und dem Abgleichsreiz herzustellen; bei statischen Reizmustern hingegen folgen die Daten dieses Beobachters dem allgemeinen Trend. Der Beobachter TK wiederum zeigt (als einzige Ausnahme) keinen Unterschied in den systematischen Fehlern zwischen den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“, wohl aber den allgemeinen Trend hinsichtlich des anderen Faktors. Eine schwer zu erklärende Abweichung im Datenprofil tritt bei Beobachter CG auf: Bezogen auf die systematischen Fehler unter der statischen Darbietungsvariante (roter Linienzug) kommt hier offenbar eine zum allgemeinen Trend gegenläufige Tendenz zum Vorschein – hier scheint es demnach, dass für diesen Beobachter das Zufügen von Disparitätsinformationen in den Reizmustern zu einer Verschlechterung der Abgleichseinstellungen bezüglich dieses Reflexionsparameters führt, sofern die Reizmuster statisch präsentiert werden. Bei einer dynamischen Reizdarbietung hingegen profitiert auch Beobachter CG wieder (in Übereinstimmung mit dem Gesamttrend) von zusätzlich im Reizmuster enthaltenen Disparitätsinformationen.

Zu den systematischen Fehlern bezogen auf die diffuse Komponente (die jeweils rechten Diagramme in Abb. 3.38 unten und in Abb. 3.39) ist es demgegenüber, mit Blick auf die einzelnen Datenprofile in Abb. 3.39, schwer, einen allgemeinen Trend zu definieren: Augenscheinlich macht es für einen Beobachter keinen Unterschied, ob die Reizmuster mit oder ohne Disparitätsinformationen ausgestattet sind. Die Richtungen der Abweichung schwanken zudem zwischen den einzelnen Beobachtern: Während die Beobachter GW und TK dem Abgleichsreiz durchweg geringere Werte für die diffuse Komponente zuweisen, als die Vorgabefläche aufweist, zeigt Beobachter CG einen Trend in die andere Richtung (der verbleibende Beobachter LF trifft hingegen den Vorgabewert im Mittel recht genau). Was aber als allgemeine Tendenz unter allen Beobachtern auftritt, ist, dass für statisch präsentierte Oberflächen immer höhere Werte für die diffuse Komponente vergeben werden als für dynamisch dargebotene Reizmuster: Eine unbewegte Oberfläche scheint in diesem Zusammenhang demnach hinsichtlich ihrer *Eigenfarbe* als dunkler wahrgenommen werden als eine rotierende Oberfläche.

Ein nahezu identisches Bild ergibt sich für die Daten, die unter Verwendung einer anderen 3D-Struktur für die Abgleichsoberfläche gewonnen wurden (s. Abb. 3.40 und Abb. 3.41 – der Abgleichsreiz (1.5, 0.2) wies hier gegenüber dem Vorgabereiz (3.0, 0.2) eine geringere Raumfrequenz auf): Wieder liegen bezogen auf die Einstellungen zum Reflexionsparameter Phong-Index signifikante Haupteffekte für die beiden Faktoren „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ ($p < 3 \times 10^{-9}$) und „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ vor ($p < 0.00047$). Bei einem Einzelvergleichstest nach Bonferroni zwischen den einzelnen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ zeigt sich hier jedoch nur ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Stufen „monokular“ und „mit sowohl Oberflächen- als auch Glanzlicht-Disparität“ ($p < 0.0003$).

Auch bei einer separaten Betrachtung der Daten für die einzelnen Beobachter zeigt sich, dass diese ihrem individuellen Einstellverhalten im Allgemeinen treu geblieben sind: Erneut lässt sich feststellen, dass dem Abgleichsreiz bezogen auf den Phong-Index im Schnitt durchgängig höhere Werte zugewiesen wurden, als der entsprechende Vorgabereiz aufwies, d.h. eine Oberfläche

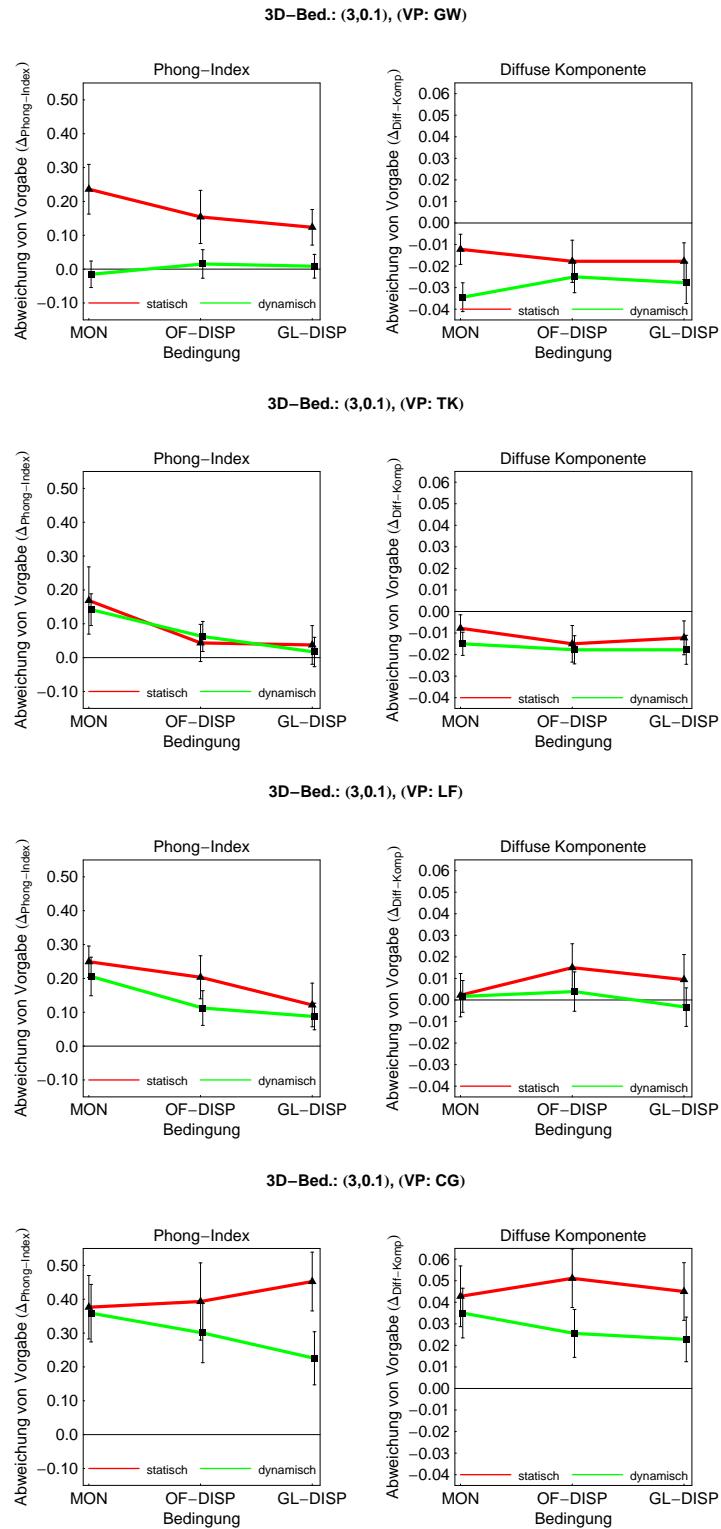


Abbildung 3.39: Ergebnisse zur Abgleichsoberfläche mit den 3D-Parametern (3,0,0,1), getrennt für die einzelnen Beobachter (Zeilen, vgl. Abb. 3.38).

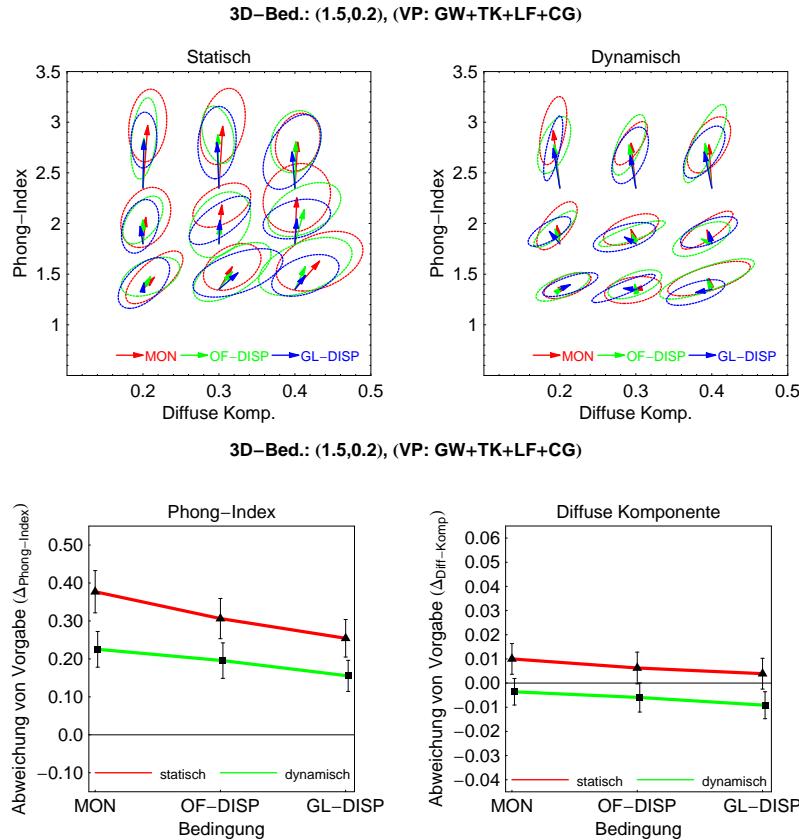


Abbildung 3.40: Ergebnisse zur Abgleichsoberfläche mit den 3D-Parametern (1.5, 0.2), über alle Beobachter gemittelt: In der oberen Reihe sind, getrennt nach den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“, für jeweils jede der drei (hier farblich getrennten) Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ die Werte der eingestellten Reflexionsparameterpaare (Pfeilspitzen) gemeinsam mit den entsprechenden Werten des Vorgabebereizes (Ursprung der Pfeile) dargestellt. Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der jeweiligen über alle Beobachter zusammengeführten Stichproben. Die untere Reihe zeigt, getrennt nach den beiden Reflexionsparametern „Phong-Index“ (links) und „diffuse Komponente“ (rechts), die über alle Reflexionsparameterkombinationen gemittelten systematischen Fehler. Die Abszissenposition kennzeichnet hierbei die Zugehörigkeit zu den einzelnen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“: „MON“ = „monokular“, „OF-DISP“ = „mit Oberflächen-Disparität“ und „GL-DISP“ = „mit Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ (weitere Erläuterungen im Text).

mit einer geringeren Raumfrequenz scheint bei gleicher Reflexionsbeschaffenheit als weniger stark in ihrem Glanz wahrgenommen zu werden, als eine Oberfläche, die eine vergleichsweise höherfrequente Raumstruktur aufweist. Und wieder zeigen sich hier hinsichtlich der Einstellungen zur diffusen Komponente dieselben individuellen Tendenzen wie in der zuvor behandelten 3D-Bedingung: Alle Beobachter vergeben unter statischer Reizpräsentation im Mittel höhere Werte für die diffuse Komponente als unter dynamischer Darbietung der Reizmuster, wobei im Vergleich zu den jeweiligen Vorgabewerten zwischen den Beobachtern kein einheitlicher Trend bezüglich der Richtung dieser Abweichungen besteht.

Zusammenfassend lässt sich als Ergebnis für dieses Experiment nun festhalten, dass offen-

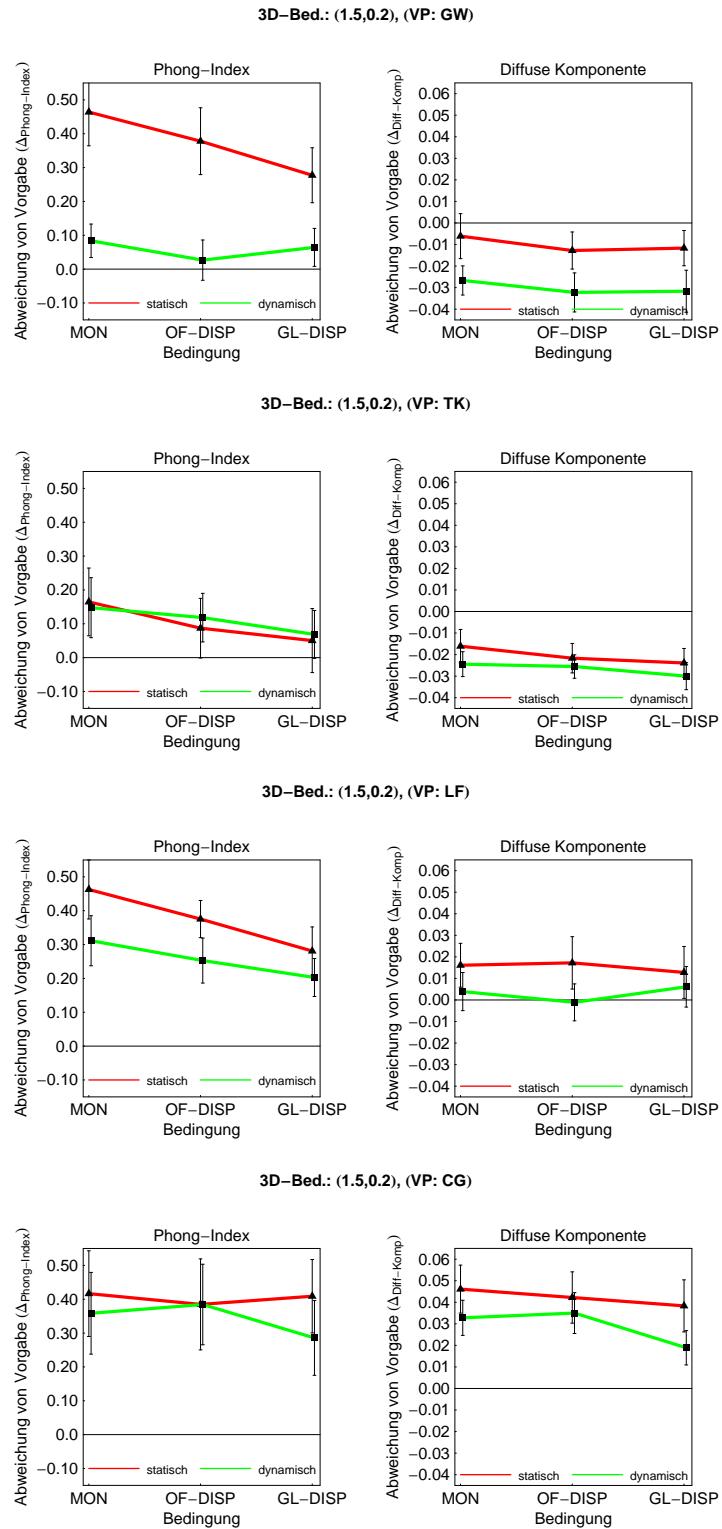


Abbildung 3.41: Ergebnisse zur Abgleichsoberfläche mit den 3D-Parametern (1.5, 0.2), getrennt für die einzelnen Beobachter (Zeilen, vgl. Abb. 3.40).

bar beide Faktoren, also die Verfügbarkeit von Bewegungs- und Disparitätsinformationen einen Einfluss auf die Glanzkonstanzleistung ausüben, in der Form, dass unter dynamischer Reizdarbietung (bezogen auf den Glanzwert des Vorgabereizes) geringere Abweichungen erzielt wurden und dass eine solche Verbesserung der Glanzkonstanzleistung ebenfalls durch die Verfügbarkeit von zumindest sowohl Oberflächen- als auch Glanzlicht-Disparität gegenüber einer rein monokularen Präsentation erreicht wird. Diese Effekte traten jedoch nur bezüglich des einen untersuchten Reflexionsparameters auf, dem Phong-Index, welcher mit der wahrgenommenen Glanzausprägung assoziiert ist – hier scheinen sich die Effekte der beiden Faktoren zudem additiv zu verhalten (siehe die annähernd parallelen Verläufe zwischen den entsprechenden Datenreihen in den Diagrammen der Abbildungen 3.38 und 3.40 unten links und den linken Spalten in den Abbildungen 3.39 und 3.41). Hinsichtlich des anderen Reflexionsparameters (diffuse Komponente) zeigen sich hingegen keine vergleichbaren Effekte – ein Einfluss der untersuchten Informationsquellen auf eine Konstanz-Leistung der Eigenfarbe von Oberflächen konnte hier im Allgemeinen nicht festgestellt werden.

3.2.8 Experiment 7: Der Beitrag von Farbinformationen zur Glanzkonstanz

In einem weiteren Experiment wurde der Einfluß einer zusätzlichen Informationsquelle, nämlich Farbinformation, untersucht, die in einem Glanzmechanismus potentiell genutzt werden kann. Der zusätzliche Faktor „Verfügbarkeit von Farbinformation“ hat die beiden Stufen:

- „Keine farbliche Trennung“ (d.h. alle im Phongschen Beleuchtungsmodell (1975) enthaltenen Reflexionskomponenten werden wie im vorherigen Experiment in derselben achromatischen Farbe gehalten, deren Farbvektor auf der Raumdiagonalen im RGB-Raum liegt) und
- „mit farblicher Trennung“ (hier wurde sowohl die ambiente als auch die diffuse Komponente in einem gelblichen Farbton gehalten, d.h. es wurden nur der R- und der G-Phosphor des Monitors verwendet, während die spiegelnde Komponente wie gewohnt als achromatische Farbe definiert war, vgl. dazu Formel 3.5).

Im zweiten Experiment dieser Reihe, mit dem überprüft werden sollte, mit welchem maximalen Effekt aufgrund der Verfügbarkeit von mehreren potentiellen Informationsquellen bezüglich einer Glanzkonstanzeistung gerechnet werden könne, wurden bereits Reizmuster verwendet, deren Reflexionskomponenten nach dem Phongschen Beleuchtungsmodell (1975) mit unterschiedlichen Gewichten für die Farbkanäle des Monitors belegt waren. Wie in der Einführung zur zweiten Experimentalreihe schon angesprochen, wurde angenommen, dass eine Aufspaltung in die beiden phänomenalen Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* durch eine solche farbliche Trennung der beteiligten Reflexionskomponenten erleichtert werden könnte.

In diesem Experiment wurden also, wie im vorangegangenen Experiment 6, als unabhängige Variablen erneut die Faktoren „Verfügbarkeit von Disparitätsinformation“ (mit den drei Stufen „monokular“, „mit Oberflächen-Disparität“ und „mit Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“, vgl. Abschnitt 3.2.7) und „Verfügbarkeit von Bewegungsinformation“ (mit den beiden Stufen „statisch“ und „dynamisch“, vgl. Anschnitt 3.2.7) hinsichtlich ihres Beitrags zu einer Glanzkonstanzeistung untersucht, diesmal aber in Kombination mit dem zusätzlichen Faktor „Verfügbarkeit von Farbinformation“ (mit den oben bereits erläuterten beiden Stufen „keine farbliche Trennung“ und „mit farblicher Trennung“). Um die Anzahl von Durchgängen in diesem Experiment auf ein handhabbares Maß zu bringen, wurde hier nur eine 3D-Struktur für den Abgleichsreiz untersucht, nämlich die, bei der der Frequenzparameter mit 1.5 und die Amplitude des Reizmusters mit 0.2 festgelegt ist (vgl. Formel 3.5). Bei dieser 3D-Bedingung handelt es sich zudem um diejenige der beiden im vorhergehenden Experiment verwendeten, bei der, mit Blick auf die dortigen Ergebnisse, der größere Spielraum für eine Verbesserung in der Glanzkonstanzeistung besteht. Die Vorgabefläche wurde wie gewohnt mit den 3D-Parametern (3.0, 0.2) dargeboten, erneut in neun unterschiedlichen Reflexionsbedingungen, die sich aus einer Kombination von drei Werten für die diffuse Komponente (0.2, 0.3, 0.4) und drei Werten für den Phong-Index (1.35, 1.8, 2.35) ergaben.

Für die Realisierung der beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformation“ wurde auf die bereits in Experiment 2 (s. Abschnitt 3.2.3) verwendete Formel für die Einfärbung eines jeden Pixels zurückgegriffen (vgl. Formel 3.5): Jede der drei Komponenten des Phongschen Beleuchtungsmodells („ambiente“, „diffuse“ und „spiegelnde“ Komponente) wurde dort zusätzlich mit einem Vektor kombiniert, dessen drei Komponenten die Gewichte für die Farbkanäle des Monitors repräsentieren. Für die Reizmuster, welche keine farbliche Trennung zwischen den einzelnen Komponenten des Beleuchtungsmodells aufwiesen, wurden alle drei Reflexionskomponenten mit demselben Farbvektor gewichtet (mit $(1, 1, 1)^T$, vgl. Formel 3.5). Für die andere Bedingung, bei der eine farbliche Trennung zwischen den Komponenten vorgenommen wurde, wurde sowohl die ambiente als auch die diffuse Komponente des Beleuchtungsmodells mit dem Farbvektor $(1, 1, 0)^T$ gewichtet, womit ein gelblicher Farbton für diese Reflexionskomponenten

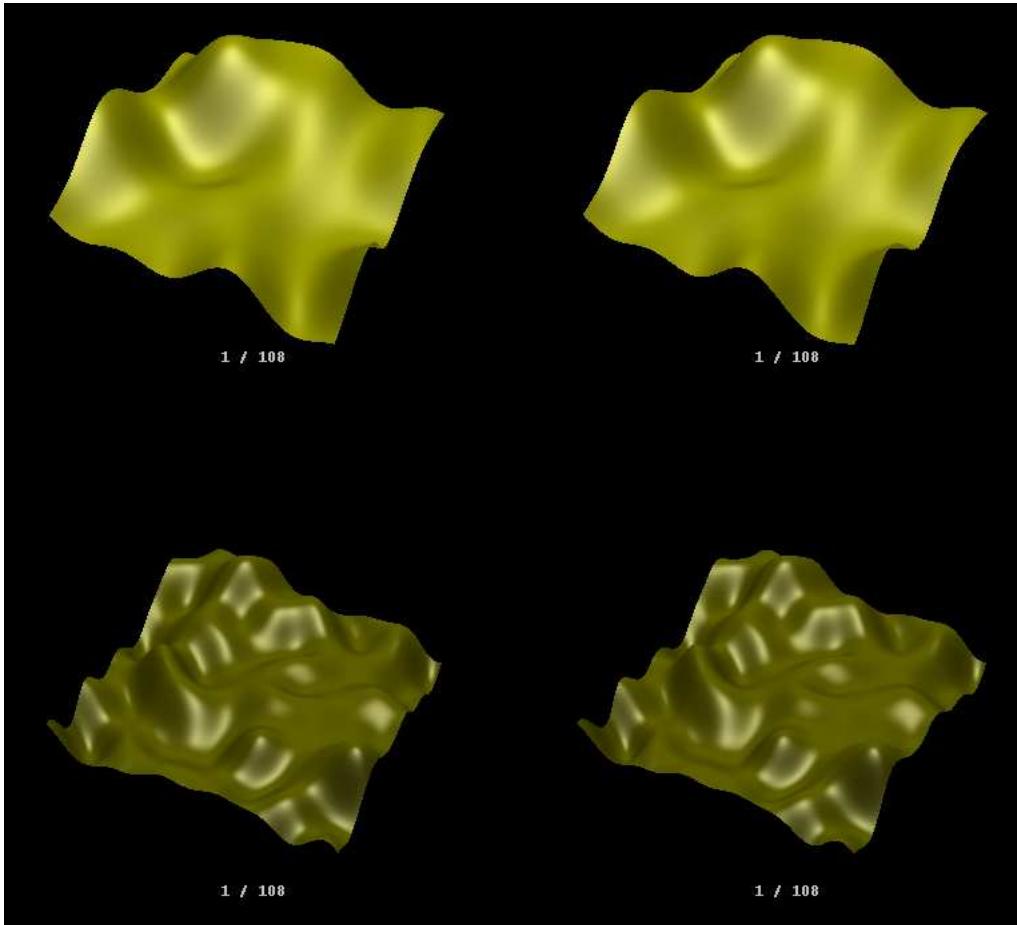


Abbildung 3.42: Screenshot des Versuchsdisplays (hier verkleinert dargestellt). Die Reizmuster des Vorgabe- (untere Hälfte) und des Abgleichsreizes (obere Hälfte) sind hier unter der Bedingung „mit farblicher Trennung“ dargestellt.

resultierte, während die spiegelnde Komponente weiterhin eine weiße Farbe aufwies (mit dem Farbvektor $(1, 1, 1)^T$; s. Abb. 3.42).

Der Grund für die Wahl eines gelblichen Farbtons für die ambiente und die diffuse Komponente bestand einfach darin, dass unter der ausschließlichen Verwendung der beiden Monitorlichter R und G noch eine genügend hohe Maximalintensität zur Verfügung steht, die der eines weißen Lichtes bei voller Auslenkung aller Farbkanonen recht nahe kommt. Zudem wurde dafür gesorgt, dass unter den beiden verschiedenen Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ vergleichbare Reizmuster auch immer vergleichbare Luminanzverteilungen aufwiesen, was durch eine entsprechende Skalierung der Pixelluminanzen bei dem Reizmuster erreicht wurde, welches eine farbliche Trennung der Reflexionskomponenten enthielt: Bei den Reizmustern unter der Faktorstufe „mit farblicher Trennung“ wurde zunächst für jedes Pixel die Luminanz der Summe aus den beiden Komponenten „ambient“ und „diffus“ berechnet, welches es unter der Stufe „keine farbliche Trennung“, also bei rein achromatischer Einfärbung aufweisen würde (die spiegelnde Komponente wurde bei diesem Anpassungsverfahren nicht berücksichtigt, da diese als additiver Beitrag zur Gesamtluminanz eines jeden Pixels unter beiden Faktorstufen gleich war). Nach anschließender pixelweiser Ermittlung der tatsächlichen Luminanz der Summe aus den beiden in einem gelblichen Farbton gehaltenen Komponenten konnte dann der jeweilige Skalierungsfaktor

errechnet werden, der dazu verwendet wurde, jedes Pixel des farbigen Reizmusters auf einen Luminanzwert zu heben, den dieses Pixel unter rein achromatischen Farbbedingungen aufgewiesen hätte. Auf diese Weise wurde also sichergestellt, dass ein bezüglich seiner 3D-Struktur und Reflexionsbeschaffenheit unverändertes Reizmuster unter den beiden unterschiedlichen Farbbedingungen auch immer eine annähernd identische räumliche Luminanzverteilung aufwies. Weiterhin wurde in diesem Experiment, abweichend zu den vorangegangenen dieser Experimentalreihe, bei denen dieselben Gewichte für die unterschiedlichen Reflexionskomponenten (d.h. für die Komponenten k_a , k_d und k_s , vgl. Formel 3.5) verwendet wurden wie bei Nishida und Shinya (1998), statt des ursprünglichen Wertes von 0.2 für die spiegelnde Komponente k_s der Wert 0.45 verwendet, da sich gezeigt hat, dass sich bei den Reizmustern unter der Bedingung „mit farblicher Trennung“ des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ die Glanzflecken kaum farblich von der Eigenfarbe der Oberfläche abhoben¹³ (man vergleiche z.B. die Reizmuster in Abb. 3.18 mit denen in Abb. 3.42: In Experiment 2 dieser Experimentalreihe wurde noch der Wert 0.2 für k_s beibehalten, was dazu führte, dass die als weiß definierte Farbe für die Glanzlichter merklich durch das Übergewicht der andersfarbigen übrigen Komponenten an der Gesamtmasse verwässert wurde, so dass auch die Glanzlichter in einer stark gelblichen Farbe erschienen). Die Realisierung der einzelnen Stufen der beiden übrigen Faktoren „Verfügbarkeit von Disparitätsinformation“ und „Verfügbarkeit von Bewegungsinformation“ wurde wie in Experiment 6 vorgenommen.

Der weitere Aufbau des Experiments war ebenfalls identisch mit dem des vorangegangenen Experiments: Für jede der insgesamt 108 Bedingungskombinationen (3 Stufen für den Faktor „Verfügbarkeit von Disparitätsinformation“ \times 2 Stufen für den Faktor „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ \times 2 Stufen für den Faktor „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ \times 3 unterschiedliche Werte für die diffuse Komponente des Vorgabereizes \times 3 entsprechende Werte für den Phong-Index) wurden vier Messwiederholungen durchgeführt, woraus ein Gesamtumfang von 432 Durchgängen resultierte, die in randomisierter Reihenfolge dargeboten wurden (aufgeteilt in vier getrennte Sitzungen zu je 108 Durchgängen). Wie in Experiment 6 wurden sowohl für die Vorgabe- als auch für die Abgleichsoberfläche vier verschiedene 3D-Strukturen gewählt, wobei für jede der vier Messwiederholungen einer Bedingungskombination jeweils ein festes Paar von 3D-Strukturen für die beiden Oberflächen präsentiert wurde. Die Aufgabe der Beobachter bestand darin, einen perzeptuellen Abgleich der wahrgenommenen Eigenfarbe und Glanzausprägung zwischen der Vorgabe- und der Abgleichsoberfläche vorzunehmen, und zwar durch interaktive Manipulation der Werte für die diffusen Komponente und den Phong-Index mittels der Pfeiltasten auf der Tastatur. Die Beobachter hatten für die Herstellung eines Abgleichs unbeschränkt viel Zeit; nach Beendigung eines jeden Abgleichsvorgangs, die seitens des Beobachters durch Betätigen der Eingabetaste vollzogen wurde, wurde ein eine Sekunde anhaltendes Dunkeladaptations-Intervall eingeschoben, bevor der nächste Reiz präsentiert wurde.

¹³Diese Änderung des Wertes für die spiegelnde Komponente, unter Beibehaltung der übrigen Größen, barg allerdings die Gefahr, dass die maximal erzeugbare Pixelintensität im Experiment überschritten wird: Um innerhalb des verfügbaren Intensitätsbereichs des Monitors zu bleiben, darf die Summe der einzelnen Gewichte für die Reflexionskomponenten ($I_a k_a$, $I_p k_d$ und $I_p k_s$) in Formel 3.5 den Wert 1.0 nicht übersteigen. Für den Vorgabereiz, dessen diffuse Komponente k_d maximal den Wert 0.4 annimmt, käme diese Summe unter dem veränderten Gewicht für k_s auf den Wert 0.91 (bei $I_a = 0.2$, $k_a = 0.3$, $I_p = 1.0$ und $k_d = 0.4$), welcher gleichzeitig den höchsten relativen Intensitätswert darstellt, den ein Pixel des Vorgabereizes überhaupt annehmen kann. Problematisch wird es jedoch für den Abgleichsreiz, für dessen diffuse Komponente k_d seitens des Beobachters Werte von bis zu 0.7 vergeben werden können. Für einen Abgleichsreiz würde dies bedeuten, dass die relative Pixelintensität maximal den Wert 1.21 annehmen kann. Würde der Wert von 1.0 tatsächlich überschritten, würde die relative Pixelintensität an diesem Grenzwert einfach gekappt, was sich aber in gewisser Weise auf die Erscheinungsform der Glanzflecken im Reizmuster auswirken könnte. Da sich aber bei den vorangegangenen Experimenten gezeigt hat, dass die von den Beobachtern der diffusen Komponente zugewiesenen Werte praktisch nie höher waren als 0.48, was bedeutet, dass sich die relative Gesamtintensität eines Pixels unterhalb des Grenzwertes von 1.0 befand, wurde dieses Risiko eingegangen, damit eine deutlichere farbliche Trennung zwischen den Glanzlichtern und der Eigenfarbe im Reizmuster hergestellt werden konnte.

Versuchspersonen

Auch an diesem letzten Experiment der zweiten Experimentalreihe nahmen wieder dieselben vier Beobachter teil, die schon an den vergangenen Experimenten mitgewirkt hatten.

Ergebnisse

Abbildung 3.43 zeigt zunächst in fein aufgelöster Darstellungsweise die über vier Beobachter gemittelten Ergebnisse des Experiments: Getrennt nach den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ (Zeilen) und den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ (Spalten) sind hier für alle drei Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ (hier farblich getrennt in den einzelnen Diagrammen dargestellt) die mittleren Werte für die beiden Reflexionsparameter *diffuse Komponente* (Abszissenposition) und *Phong-Index* (Ordinatenposition) sowohl für die eingestellten Werte (Pfeilspitzen) als auch für die jeweiligen Vorgabewerte (Ursprung der Pfeile) wiedergegeben.

Was zunächst ins Auge fällt, ist eine offensichtliche Verkleinerung der Streuungsellipsen zwischen den jeweils korrespondierenden Diagrammen unter den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“. Dies deutet darauf hin, dass bei Reizmustern, die eine farblichen Trennung zwischen den Reflexionskomponenten aufweisen, eine größere Sicherheit bei der Herstellung eines Abgleichs besteht, im Vergleich zu solchen Reizmustern, deren Reflexionskomponenten keinen farblichen Unterschied zeigen. Dies scheint insbesondere für die Einstellungen bezüglich der diffusen Komponente zu gelten. Es wurde bereits bei früheren Experimenten dieser Experimentalreihe darauf hingewiesen, dass offenbar eine positive Korrelation zwischen den eingestellten Werten der beiden Reflexionsparameter besteht, vor allem für solche Reizkonstellationen, bei denen der Vorgabereiz einen geringen Wert für den Phong-Index aufweist. Wie bei den dortigen Ergebnisdarstellungen diskutiert wurde, lässt sich die Korrelation in plausibler Weise damit erklären, dass es bei Reizmustern mit verhältnismäßig geringem Phong-Index (die damit sehr breite, stark verwaschene Glanzflecken aufweisen, die sich weiträumig überlappen und somit große Bereiche der Oberfläche abdecken) für den Beobachter schwierig ist zu entscheiden, ob die Helligkeitsverteilung nun auf eine intensivere Eigenfarbe zurückzuführen ist, oder aber auf eine geringe Glanzausprägung, da beide Varianten ähnliche Helligkeitsmuster erzeugen können: Wird ein geringer Phong-Index gewählt, führt dies zu einer Aufhellung des gesamten Reizmusters, so dass ebenfalls eine geringere diffuse Komponente gewählt werden muss, um einen bestimmte Helligkeitsausprägung herstellen zu können. Umgekehrt führt auch eine höhere diffuse Komponente zu einer globalen Aufhellung, die durch ein gleichzeitiges Erhöhen des Glanzgehalts durch den Phong-Index wieder reduziert werden muss. Wie die hier gewonnenen Daten nahe legen, scheint die Verfügbarkeit von Farbinformationen diese Ambiguität nun zu einem gewissen Grad auflösen zu können.

Zur Beurteilung der Frage, ob diese zusätzlich im Reiz angebotenen Farbinformationen auch zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzeistung beitragen, sollen die erhobenen Daten in einer etwas komprimierteren Form dargestellt werden: Abbildung 3.44 zeigt, getrennt für die beiden von den Beobachtern einzustellenden Reflexionsparameter, die nach ihrer Zugehörigkeit zu den einzelnen Bedingungskombinationen gruppierten systematischen Fehler (d.h. die mittleren Abweichungen zwischen den eingestellten und den vorgegebenen Parameterwerten), die zuvor über jeweils alle neun verwendeten Reflexionsparameterkombinationen des Vorgabereizes gemittelt wurden. Die gestrichelten Linienzüge repräsentieren jeweils die Zugehörigkeit zur Stufe „ohne farbliche Trennung“ des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformation“, die durchgezogenen Linienzüge die zur Stufe „mit farblicher Trennung“. Die grünen, bzw. roten Linienzüge kennzeichnen die Zugehörigkeit zur Stufe „dynamisch“, bzw. „statisch“ des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“. Die Abszissenposition in diesen Diagrammen markiert ferner die Zugehörigkeit

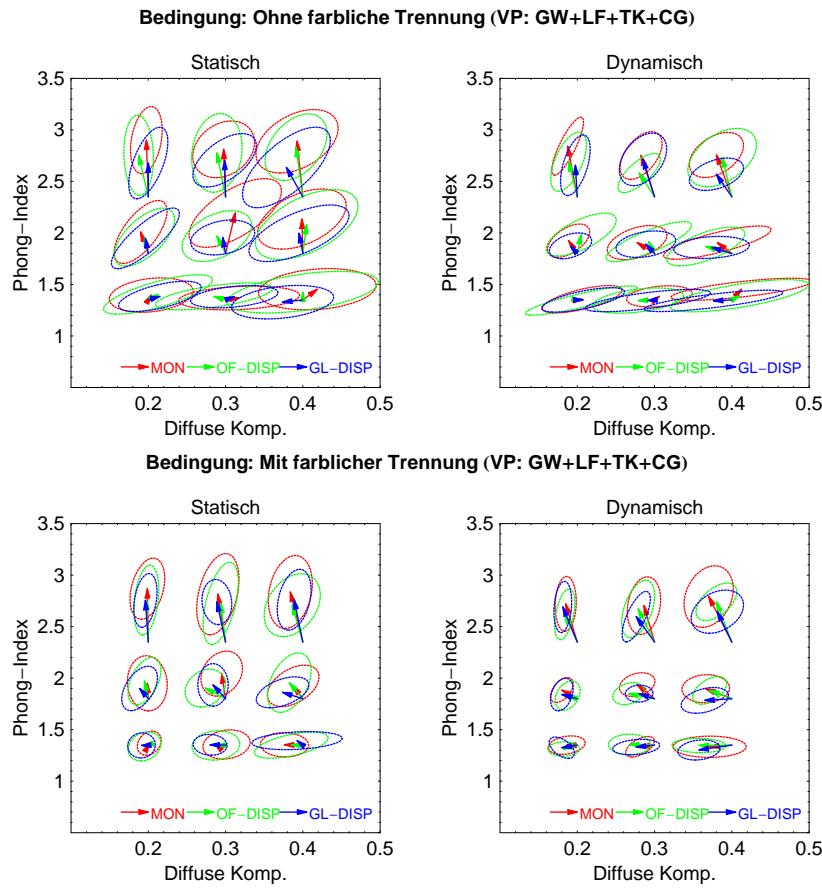


Abbildung 3.43: Die über alle Beobachter gemittelten Ergebnisse: Dargestellt sind, getrennt nach den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ (Zeilen) und den beiden Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ (Spalten), für jeweils jede der drei (hier farblich getrennten) Stufen des Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ die Werte der eingestellten Reflexionsparameterpaare (Pfeilspitzen) gemeinsam mit den entsprechenden Werten des Vorgabereizes (Ursprung der Pfeile). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der einfachen Stichproben.

der Datenpunkte zu den drei Stufen des übrigen Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“.

Zunächst lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse, wie sie im vorangegangenen Experiment unter vergleichbaren Reizbedingungen erzielt wurden (vgl. Abb. 3.40), hier recht gut repliziert werden konnten: Die in den beiden Diagrammen in Abbildung 3.44 jeweils als gestrichelte Linienzüge dargestellten Datenreihen entsprechen hinsichtlich der ihnen zugrunde liegenden Reizbedingungen nämlich denen aus Abbildung 3.40, da in beiden Fällen rein achromatische Reizmuster mit den denselben Formparametern (1.5 für den Frequenzparameter und 0.2 für die Amplitude, vgl. Formel 3.3) verwendet wurden. Allenfalls eine geringere Fehlerabweichung bezüglich des Phong-Index unter der statischen Reizpräsentation (roter gestrichelter Linienzug im linken Diagramm in Abb. 3.44) lässt sich im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem vorherigen Experiment feststellen. Und erneut zeigen sich hier klarer zu interpretierende Ergebnisse bezüglich des Reflexionsparameters Phong-Index: Die eingestellten Werte sind generell höher als die im

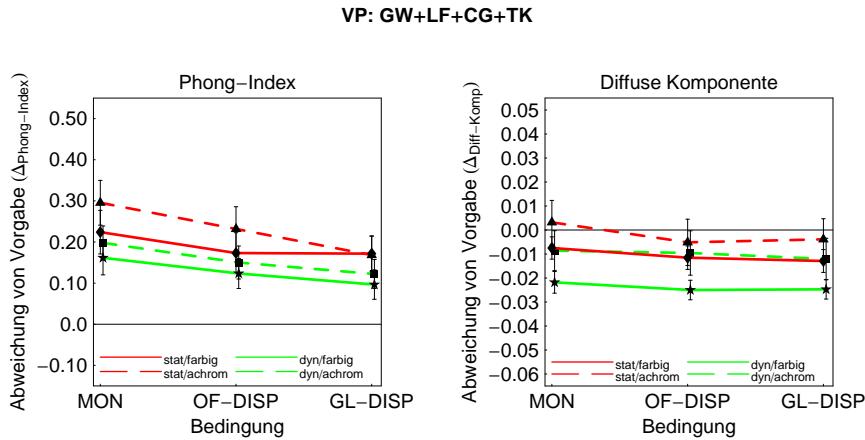


Abbildung 3.44: Die über alle Beobachter gemittelten Ergebnisse: Getrennt nach den beiden Reflexionsparametern „Phong-Index“ (links) und „diffuse Komponente“ (rechts), zeigen die beiden Diagramme die über jeweils alle Reflexionsparameterkombinationen gemittelten systematischen Fehler für die verschiedenen Kombinationen der Stufen der Faktoren „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ und „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ als unterschiedlich gekennzeichnete Linienzüge. Die Abszissenposition kennzeichnet hierbei die Zugehörigkeit zu den einzelnen Stufen des übrigen Faktors „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“: „MON“ = „monokular“, „OF-DISP“ = „mit Oberflächen-Disparität“ und „GL-DISP“ = „mit Oberflächen- und Glanzlicht-Disparität“ (weitere Erläuterungen im Text).

Vorgabereiz vorliegenden. In einer dreifaktoriellen varianzanalytische Auswertung ergeben sich signifikante Haupteffekte bezüglich der beiden Faktoren „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ ($p < 1.2 \times 10^{-7}$) und „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ ($p < 2.3 \times 10^{-6}$). Inhaltlich lassen sich diese so interpretieren, dass dynamisch präsentierte Reizmuster gegenüber statischen zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzeistung beitragen wie auch solche, die Disparitätsinformationen enthalten. Zwar ergibt sich auch für den Reflexionsparameter „diffuse Komponente“ ein signikanter Haupteffekt für den Faktor „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ ($p < 2 \times 10^{-7}$), jedoch spiegelt dieser offenbar eine bedeutsame Verschlechterung der Erkenntnisleistung der Eigenfarbe einer Oberfläche wider, wenn ein Reizmuster dynamisch statt statisch präsentiert wird.

Was nun aber den Einfluss von Farbinformationen auf die Glanzkonstanzeistung angeht, so führt auch dieser Faktor unter beiden Reflexionsparametern zu einem signifikanten Haupteffekt, zumindest bezogen auf die über alle vier Beobachter gemittelten Daten ($p < 0.0056$ für den Phong-Index und $p < 4.42 \times 10^{-8}$ für die diffuse Komponente): Die systematischen Fehler bezüglich des Phong-Index werden im Vergleich zu Reizbedingungen mit rein achromatischen Oberflächen weiter reduziert, wenn das Reizmuster eine farbliche Trennung zwischen den Reflexionskomponenten aufweist – und das gleichermaßen für statisch und dynamisch präsentierte Reizmuster. Allerdings zeigen sich hier interindividuelle Unterschiede zwischen den Einstellungen der einzelnen Beobachter: Ein deutlicher Effekt des Faktors „Verfügbarkeit von Farbinformationen“ scheint sich, mit Blick auf die für jeden Beobachter einzeln aufgeföhrten Daten in den Abbildungen 3.45 und 3.46, nur bei den Beobachtern LF und CG zu zeigen, während die beiden übrigen Beobachter keinen bedeutsamen Unterschied zwischen den beiden Stufen dieses Faktors zeigen. Auch die beiden übrigen Faktoren „Verfügbarkeit von Bewegungsinfomationen“ und „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ scheinen zwischen den verschiedenen Beobachtern nicht die-

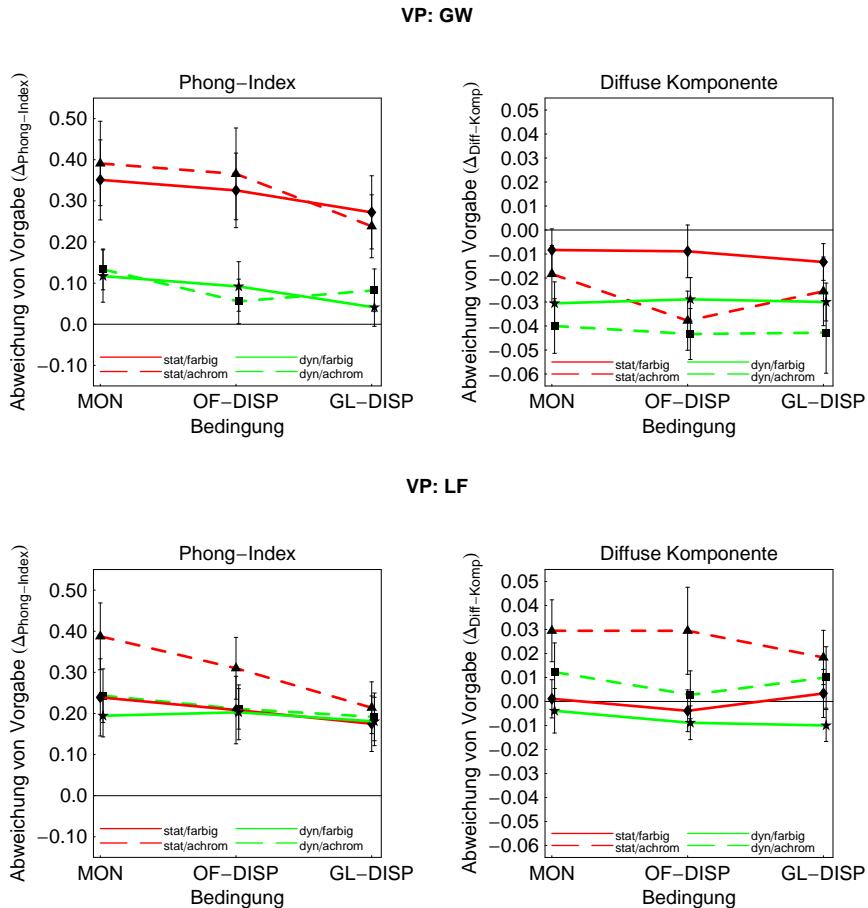


Abbildung 3.45: Die Ergebnisse für die Beobachter GW (obere Reihe) und LF (untere Reihe, Erläuterungen siehe Abb. 3.44).

selbe Wirkung auf eine Glanzkonstanzzleistung ausüben zu können: Bei Beobachter TK weichen, anders als bei den anderen Vpn, die eingestellten Phong-Indizes bei statischen Reizmustern weniger von den vorgegebenen Werten ab, als bei dynamischen. Jedoch muss zu diesem Beobachter gesagt werden, dass dieser insgesamt nur verhältnismäßig geringe systematische Fehler bezogen auf diesen Reflexionsparameter zeigt, die unter allen Bedingungskombinationen recht nahe beieinander liegen. Auch zeigt der Beobachter, wie schon im vorangegangenen Experiment, weder für den Faktor „Verfügbarkeit von Bewegungsinformationen“ noch für den Faktor „Verfügbarkeit von Disparitätsinformationen“ einen signifikanten Haupteffekt.

Demgegenüber scheint, wenn man die über alle Beobachter gemittelten Daten betrachtet, das Vorhandensein von Farbinformationen bezogen auf den Reflexionsparameter der diffusen Komponente eine signifikante Vergrößerung des systematischen Fehlers zu bewirken (s. das rechte Diagramm in Abb. 3.44). Tatsächlich werden bei Betrachtung der über alle Vpn aggregierten Daten die größten systematischen Fehler hinsichtlich der Einstellungen der diffusen Komponente unter der Bedingung erzeugt, bei welcher die Reizmuster dynamisch und mit einer farblichen Trennung zwischen den Reflexionskomponenten präsentiert werden. Betrachtet man jedoch auch hier die für alle vier Beobachter einzeln aufgeführten Ergebnisdiagramme (Abb. 3.45 und 3.46), so zeigt sich ein ganz anderes Bild: Bezogen auf die diffuse Komponente ergibt sich für jeden Beobachter ein signifikanter Haupteffekt bezüglich des Einflusses von Farbinformationen auf die Erkennensle-

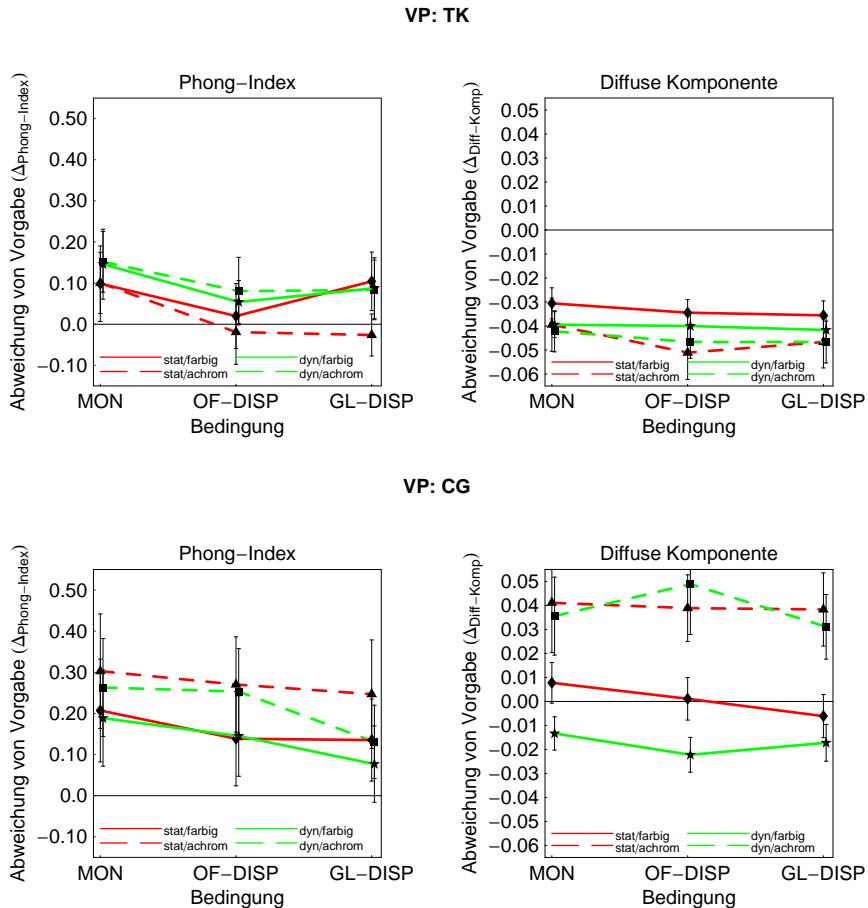


Abbildung 3.46: Die Ergebnisse für die Beobachter TK (obere Reihe) und CG (untere Reihe, Erläuterungen siehe Abb. 3.44).

stung der Eigenfarbe einer Oberfläche – und zwar in Richtung einer Reduktion des systematischen Fehlers bei Verfügbarkeit von Farbinformationen, d.h. das Vorhandensein von getrennten Farbinformationen für die Reflexionskomponenten führt bei allen Beobachtern zu einer Verbesserung der Helligkeitskonstanzleistung! Dieser scheinbare Widerspruch zu den aggregierten Daten lässt sich durch unterschiedliche Richtungen der Abweichung bei den einzelnen Beobachtern erklären (rechtes Diagramm in Abb. 3.44): Beobachter GW und TK wählten im Vergleich zum Vorgabebereich generell geringere Werte für die diffuse Komponente des Abgleichsreiz, wohingegen die Beobachter LF und CG einen gegenteiligen Trend zeigen, wobei zusätzlich das Ausmaß dieser Abweichungen zwischen den Beobachtern teils deutlich variierte. In der Summe kompensieren sich diese Abweichungen gegenseitig und suggerieren damit fälschlicherweise eine gute Übereinstimmung mit den Vorgabewerten. Die über alle Beobachter gemittelten Daten können aufgrund dieser interindividuellen Differenzen also nicht sinnvoll interpretiert werden. Was allerdings ebenfalls für alle Beobachter als gemeinsame Tendenz besteht, ist die Tatsache, dass die Abweichungen bei dynamischer Darbietung geringer sind als bei statischer: Bei allen Beobachtern werden unter statischer Reizdarbietung, mit einer farblichen Trennung der beiden Reflexionskomponenten, die geringsten Abweichungen der diffusen Komponente zwischen dem Vorgabe- und dem Abgleichsreiz produziert; größtenteils sind die diesbezüglichen Einstellungen so genau, dass kein signifikanter Unterschied zu dem Vorgabewert besteht (mit Ausnahme der Daten von Beobachter TK; s.

Abb. 3.46 oben).

3.3 Simulationen

Die Ergebnisse aus den Experimenten der vorangegangenen Experimentalreihe II liefern deutliche Hinweise dafür, dass das visuelle System u.a. binokulare und bewegungsinduzierte Informationen nutzt, um die Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche auch unter wechselnden 3D-Formen zu bestimmen. Nishida und Shinya (1998) glaubten jedoch Hinweise dafür gefunden zu haben, dass das visuelle System bei solch einer Leistung, die ja unter den von ihnen verwendeten Reizbedingungen eher schlecht ausfiel (vgl. die Einführung zu Abschnitt 3.2), von einer anderen Information Gebrauch macht, nämlich von einfachen Bildstatistiken: Die beiden Forscher fanden, dass ihre empirischen Daten sehr gut durch die Annahme erklärt werden konnten, dass Beobachter dann zwei Oberflächen als gleich hinsichtlich ihrer Reflexionsbeschaffenheit wahrnehmen, wenn sich die zugehörigen Pixelhistogramme der Reizmuster ähneln. Mit Hilfe einer Simulation ermittelten die beiden Forscher für eine Anzahl von Oberflächen mit unterschiedlichen 3D-Formen jeweils für jede mögliche Reflexionsparameterkombination, die innerhalb ihres empirischen Experiments seitens des Beobachters einer Abgleichsfläche zugewiesen werden konnte, die, unter verschiedenen Oberflächenorientierungen erfassten, zugehörigen Pixelhistogramme. Anschließend wurde dasjenige Reizmuster herausgesucht, dessen Pixelhistogramme die geringsten Unterschiede zu den Pixelhistogrammen des Vorgabereizes aufwiesen. Verglich man daraufhin die Reflexionsparameter, unter denen das Reizmuster mit der hinsichtlich der Pixelhistogramme größten Ähnlichkeit zum Vorgabereiz erzeugt wurde, mit den Einstellungen aus dem empirischen Experiment, so zeigte sich eine hohe Übereinstimmung. Die beiden Forscher nehmen daher an, dass das visuelle System für die Beurteilung der Materialbeschaffenheit einer Oberfläche die zugehörigen Pixelhistogramme zu Rate zieht – oder genauer auf die experimentelle Situation abgestimmt: dass zwei Reizmuster dann als gleich bezüglich ihrer Reflexionscharakteristik beurteilt werden, wenn auch die entsprechenden Pixelhistogramme gleich sind. Auch die Ergebnisse eines zusätzlichen Abgleichsexperiments stützten diese Annahme der Autoren: Für einige der in ihrem ursprünglichen Abgleichsexperiment verwendeten 3D-Formen wurden für jeden Vorgabereiz, der sich bezüglich seiner Form von der Abgleichsoberfläche unterschied, zunächst zwei Abgleichsreize definiert. Diese waren hinsichtlich ihrer 3D-Form identisch, unterschieden sich jedoch in ihrer räumlichen Intensitätsverteilung: Der eine Abgleichsreiz war so festgelegt, dass er dieselben Reflexionsparameter aufwies wie der Vorgabereiz. Der andere Abgleichsreiz hingegen war so beschaffen, dass sein zugehöriges Pixelhistogramm mit dem des Vorgabereizes übereinstimmte. Diese beiden Abgleichsreize wurden nun so miteinander kombiniert, dass ein neuer Abgleichsreiz entstand, dessen Textur sich aus einer konvexen Mischung der beiden Ursprungsreize ergab. Die Aufgabe der Beobachter bestand nun darin, die wahrgenommene Reflexionsbeschaffenheit zwischen Vorgabe- und Abgleichsreiz anzugeleichen, indem sie das Mischungsverhältnis zwischen den beiden Ursprungsvarianten interaktiv verändern konnten. Hier zeigte sich, dass die Beobachter tendenziell solche Gewichte zur Herstellung eines Abgleichs wählten, die einen Abgleichsreiz mit annähernd gleichen Pixelhistogrammen erzeugten. Zwar glauben Nishida und Shinya (1998) nicht, dass das visuelle System tatsächlich das Pixelhistogramm ermittelt und es als Hinweisreiz für die Materialbeschaffenheit verwendet, wohl aber, dass es irgendeinen Kennwert aus der Intensitätsverteilung bilde, der die Aufgabe eines solchen Hinweisreizes erfüllen könnte¹⁴. Wie dieser postulierte Kennwert aussieht, darüber machten Nishida und Shinya zu dem Zeitpunkt ihrer ersten Studien keine Angaben. Durch nachfolgende Untersuchungen von Motoyoshi et al. (2007) wurden jedoch verschiedene Hinweise

¹⁴ Die Verwendung von Bildstatistiken als Hinweisgeber auf bestimmte Szeneneigenschaften wurde auch bereits in der Farbdomäne in Betracht gezogen: Höhere Szenenstatistiken, wie die Varianz von Farbcodes einer räumlichen Farbverteilung (Mausfeld & Andres, 2002) oder die Korrelation zwischen Luminanz- und Farbinformationen im proximalen Reiz (Golz & MacLeod, 2002), scheinen demnach relevante Informationen über die chromatische Beschaffenheit einer Beleuchtung zu liefern – eine Information, die zur Gewährleistung von Farbkonstanz eine Rolle spielen könnte.

dafür gefunden, dass möglicherweise die Schiefe der Verteilung, als ein Maß für die Asymmetrie des Pixelhistogramms, die Rolle eines Hinweisreizes für die Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche spielen könnte. So fanden sie beispielsweise, dass bei entsprechenden Reizmustern die Schiefe der Verteilung der zugrunde liegenden Pixelintensitäten positiv mit der Glanzausprägung und negativ mit der Eigenfarbe (diffuse Komponente) der Oberfläche korrelierte. Auch Manipulationen von Reizmustern durch systematische Änderung der Form der Pixelhistogramme (vgl. auch Motoyoshi, Nishida & Adelson, 2005) deuten darauf hin, dass Reizmuster, deren Pixelverteilungen eine positive Schiefe aufweisen, eher als glänzend und bezüglich ihrer Eigenfarbe als dunkler empfunden werden, als vergleichbare Reizmuster mit einer geringeren Schiefe der Intensitätsverteilung. Zudem konnten diese Forscher mit Hilfe eines Adaptationsexperiments Hinweise dafür finden, dass möglicherweise ein physiologischer Detektor für die Schiefe der Intensitätsverteilung existiert.

Zusammengenommen scheinen diese Befunde darauf hinzudeuten, dass das visuelle System in irgendeiner Form die globale räumliche Intensitätsverteilung im proximalen Reiz auswertet, um eine Aussage über die Materialbeschaffenheit einer Objektoberfläche zu machen. Nishida und Shinya fanden, wie oben dargestellt, Hinweise darauf, dass die Nutzung solcher Informationen die Ergebnisse ihres Abgleichsexperimentes erklären könnte. Es ist jedoch a priori klar, dass sich diese Information nicht als Hinweisreiz eignet, um die Reflexionseigenschaft einer Oberfläche unter veränderten 3D-Formen zuverlässig zu bestimmen, denn die Pixelhistogramme eines Reizmusters mit konstanter Reflexionscharakteristik sind nicht invariant gegenüber Veränderungen in der räumlichen Struktur einer Oberfläche. Wie immer der genaue Beitrag eines solchen potentiellen Hinweisreizes für die Wahrnehmung von Oberflächeneigenschaften sein mag – es steht außer Frage, dass dieser Hinweisreiz allein nicht hinreicht, um einer Oberfläche eine bestimmte Reflexionsbeschaffenheit zuzuschreiben: „*Histogram statistics are not the whole story for the perception of lightness, contrast or gloss.*“ (Landy, 2007, S. 159). Am einfachsten lässt sich dies dadurch veranschaulichen, dass man ein entsprechendes, einen Glanzeindruck auslösendes Reizmuster nimmt und die gesamte Menge an Pixeln in randomisierter Ordnung neu zusammenstellt. In Abbildung 3.47 ist ein solches Beispiel dargestellt: Ausgehend von einem Glanzreiz, dem Bild einer Münze mit dem eingeprägten Konterfei Napoleons, wurde zunächst das zugehörige Pixelhistogramm ermittelt. Diese Verteilung der Pixelintensitäten ist gekennzeichnet durch eine positive Schiefe, was nach den Überlegungen von Motoyoshi et al. (2007) einen Hinweis auf eine eher glänzende Oberflächenbeschaffenheit darstellt. Werden dieselben Pixel des Ursprungsbilds hinsichtlich ihrer Position nun so umverteilt, dass sich eine zufällige Anordnung ergibt, so behält das neu entstandene Reizmuster zwar dieselben Bildstatistiken wie das Ursprungsbild, einen Glanzeindruck ruft dieser Reiz jedoch nicht hervor. Wie Motoyoshi et al. (2007, S. 209) selbst anmerken, müssten durch den retinalen Input bereits solche Konzepte wie „*Objektoberfläche*“ und „*Glanzfleck*“ aktiviert worden sein (was bei dem rechten Reizmuster in Abb. 3.47 offenbar nicht geschieht), bevor ein Mechanismus greifen kann, der – aufbauend auf solchen Bildstatistiken – diesem internen Objekt eine konkrete Materialeigenschaft zuweist.

Vor diesem Hintergrund stellt sich vor allem die Frage, welchen Beitrag zu einer Verbesserung einer Glanzkonstanzleistung man nun von anderen potentiellen Hinweisreizen, wie etwa binokularen Informationen, erwarten darf¹⁵. Wären tatsächlich einfache Bildstatistiken die alleinigen Informationsquellen, die das visuelle System diesbezüglich nutzt, so wären binokulare Hinweisreize nahezu bedeutungslos. Die Bildstatistiken lassen sich eben schon aus dem monokularen

¹⁵Einen Beitrag von bewegungsabhängigen Informationen könnte man hingegen auch für den von Nishida und Shinya vorgeschlagenen Mechanismus erwarten: In ihrer Simulation wurden ja die einzelnen Reizmuster durch eine Anzahl von mehreren Pixelhistogrammen, die mit unterschiedlichen Orientierungen der Oberflächen assoziiert waren, charakterisiert, so dass dadurch möglicherweise eine bessere Beschreibung des gesamten (von bestimmten Oberflächenorientierungen unabhängigen) Reizmusters erreicht wurde.

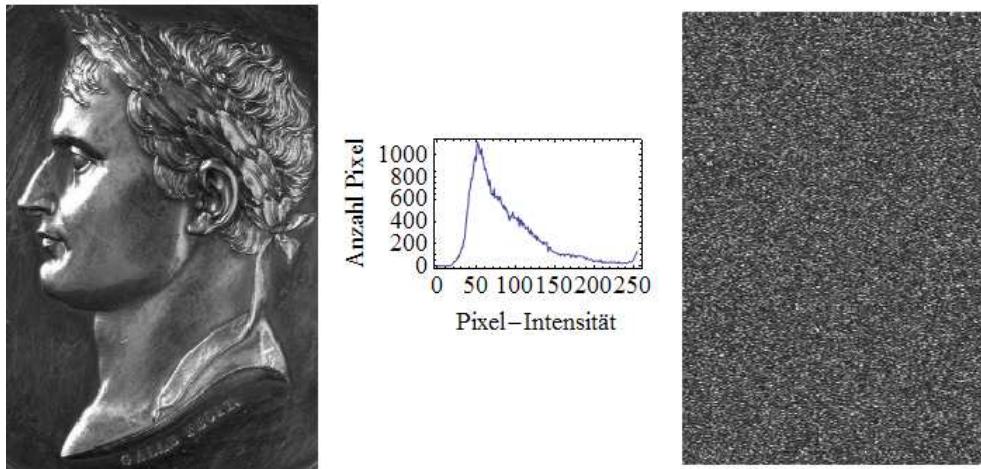


Abbildung 3.47: Die begrenzte Bedeutung von Bildstatistiken bei der Wahrnehmung von Materialeigenschaften. Die Bilder links und rechts weisen dieselbe Verteilung von Pixel-Intensitäten auf (Mitte). Das rechte Bild erzeugt beim Betrachter gegenüber dem linken Bild jedoch weder einen Glanzeindruck, noch vermag es überhaupt eine Objektinterpretation auszulösen.

Input ermitteln. Die Ergebnisse aus der vorangegangenen Experimentalreihe der vorliegenden Arbeit deuten jedoch darauf hin, dass zumindest das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität im Reizmuster zu einer signifikanten Verbesserung der Glanzkonstanzeistung führt. Aufgrund dieser augenscheinlichen Unvereinbarkeit der hiesigen Befunde mit dem von Nishida und Shinya vorgeschlagenen, auf einfachen Bildstatistiken fußenden Mechanismus, sollen im Folgenden ähnliche Simulationen mit dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Reizmaterial durchgeführt werden.

3.3.1 Simulation zur Bedeutung von Bildstatistiken bei der Glanzkonstanz I

Genau wie in der empirischen Untersuchung (s. Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe in Abschnitt 3.2.2) wurden für jeden Durchgang der Simulation jeweils eine Vorgabe- und eine Abgleichsoberfläche bestimmt (wenngleich an letzterer nicht tatsächlich ein Abgleich vorgenommen wurde – jedoch soll der Begriff „Abgleichsreiz“ der besseren Übersicht halber im folgenden weiter verwendet werden). Für die Vorgabeoberfläche wurde immer ein Reiz verwendet, dessen 3D-Struktur durch die Parameter-Kombination (3.0, 0.2; entsprechend für den Frequenzparameter und die Amplitude, vgl. Formel 3.3) gekennzeichnet war. Der Vorgabereiz wurde unter den üblichen neun verschiedenen Reflexionsparameterkombinationen gerendert (die diffuse Komponente nahm hierbei die Werte 0.2, 0.3 und 0.4 an, der Phong-Index die Werte 1.35, 1.8 und 2.35; vgl. Formel 3.4). Von den so generierten Reizmustern wurden nun die zugehörigen Pixelhistogramme gebildet, wobei für jede der auf dem Monitor erzeugbaren Intensitätsstufen die Anzahl der entsprechenden Pixel aus dem zweidimensionalen Bild des Reizmusters ermittelt wurde (mit Hilfe der `glReadPixels`-Methode des OpenGL-Pakets für 3D-Grafik-Anwendungen). Da die Reizmuster allesamt in einem achromatischen Farbton gehalten waren, d.h. die drei Farbkanäle des Monitors für jedes einzelne Pixel immer identische 8-Bit-Werte (zwischen 0 und 255) aufwiesen, wurde die Intensitätsstufe jedes entsprechenden Pixels durch eben diesen Wert gekennzeichnet (und nicht etwa durch den Luminanzwert).

Weil die Reizmuster in Experiment 1 der Experimentalreihe II in einer Rotationsbewegung präsentiert wurden, wurde für die Simulation jedes Reizmuster nicht nur durch ein einzelnes Pixelhistogramm präsentiert, sondern jeweils durch neun Pixelhistogramme: Für jedes Reizmuster wurde für neun unterschiedliche Winkelstellungen der Oberflächennormalen das zugehörige Pixelhistogramm ermittelt, angefangen mit einer Orientierung des Reizmusters, bei der die Oberflächennormale einen Winkel von 10° zur Höhenachse (y) des virtuellen Raums bildete, in Schritten von 10° Grad bis zu einer Orientierung von 90° (wo dann die Oberflächennormale kollinear mit der z -Achse bzw. der Blickrichtung des Beobachters war, vgl. Abb. 3.23). Somit war jedes einzelne Reizmuster gekennzeichnet durch einen Satz von neun Pixelhistogrammen, die jeweils mit der unterschiedlichen Orientierung der Oberfläche assoziiert waren. In gleicher Weise wurde für die Bestimmung der Pixelhistogramme der Abgleichsflächen verfahren: Für jede der sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen (vgl. Abb. 3.12) wurde die entsprechende Abgleichsoberfläche in allen möglichen Reflexionsparameterkombinationen gerendert. Die Reflexionsparameter, die den Abgleichsoberflächen während des hier durchgeführten Experiments 1 der Experimentalreihe II zugewiesen werden konnten, ergaben sich aus einer Kombination von insgesamt 36 unterschiedlichen Werten für die diffuse Komponente (Werte zwischen 0.0 und 0.7 in Schritten zu 0.02) und 51 unterschiedlichen Werten für den Phong-Index (Werte zwischen 1 und 3.5 in Schritten zu 0.05) – die übrigen Parameter des verwendeten Beleuchtungsmodells (s. Formel 3.4) wurden während der Simulation konstant gehalten, mit denselben Werten, die auch in Experiment 1 der Experimentalreihe II verwendet wurden. Betrachtet wurde während der Simulation nur die Rotationsvariante einer Oberflächenrotation, wobei die Lichtquelle sich an demselben fixen Punkt im virtuellen Raum befand, wie auch in dem empirischen Experiment. Somit wurde jede Abgleichsfläche in insgesamt 1836 unterschiedlichen Reflexionsparameterkombinationen gerendert. Da auch hier, wie schon beim Vorgabereiz, für jeden Abgleichsreiz unter jeder betrachteten Reflexionscharakteristik neun verschiedene Oberflächenorientierungen berücksichtigt wurden, ergab sich letztendlich für jede der sieben untersuchten Form-Bedingungen ein Satz von insgesamt 16524 Pixelhistogrammen (für einen Beispielreiz samt zugehörigem Pixelhistogramm, s. Abb. 3.48). Die für die Simulation verwendeten Reizmuster wiesen dieselbe Größe auf, wie im Experiment, d.h., bei einer frontoparallelen Ausrichtung der Oberflächen in Beobachterrichtung, betrug die Seitenlänge der Reizmuster ca. 6.5 cm. Für die Erfassung der jeweiligen Pixelhistogramme für jede Winkel-

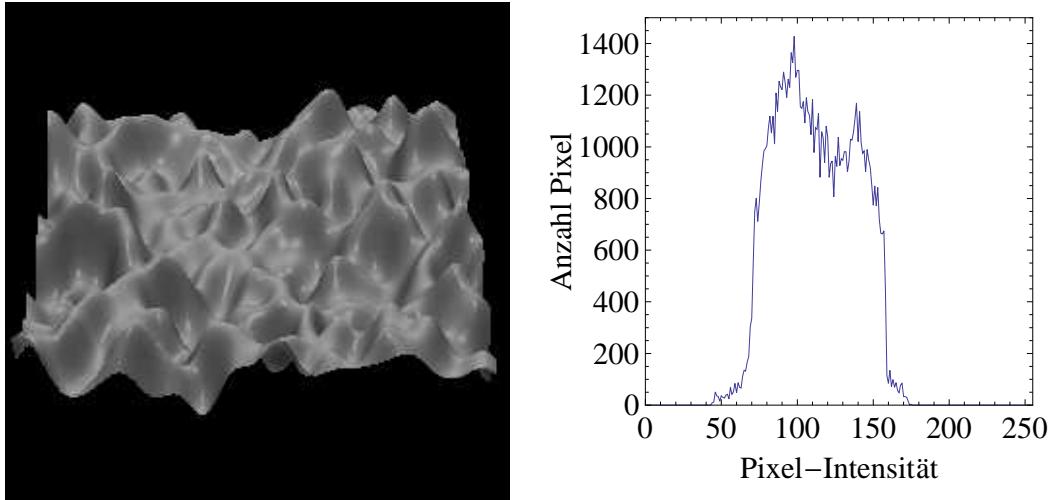


Abbildung 3.48: Links: Verkleinerte Darstellung eines Beispielsreizes für eine Abgleichsoberfläche mit den Formparametern $(6.0, 0.2)$ und den Reflexionsparametern 0.56 für die diffuse Komponente und 3.25 für den Phong-Index. Die globale Oberflächennormale weist hier einen Winkel von 40° zur Höhenachse (y) des virtuellen Raumes auf. Rechts: Das zugehörige Pixelhistogramm (für jede Intensitätsstufe ist die Anzahl der entsprechenden Pixel aufgeführt).

stellung der Oberfläche, wurde immer ein das gesamte Reizmuster einschließender quadratischer Ausschnitt des Monitors, mit einer Seitenlänge von 300 Pixeln, ausgelesen. Die Pixel mit einem RGB-Farbvektor von $(0, 0, 0)$ wurden bei der anschließenden Bildung der Pixelhistogramme nicht berücksichtigt, da diese vollständig dem Hintergrund und nicht dem Reizmuster selbst angehörten (der kleinste Grauwert, den die Oberfläche annehmen konnte, wurde durch den Wert der ambienten Komponente in Formel 3.4 bestimmt, der hier von Null verschieden war).

In einem weiteren Schritt wurde nun für jede einzelne der neun Reflexionsparameterkombinationen, in denen der Vorgabereiz präsentiert wurde, dasjenige Abgleichsreizmuster herausgesucht, welches bezüglich seiner (neun, mit den verschiedenen Winkelstellungen der Oberflächennormalen assoziierten) Pixelhistogramme die beste Übereinstimmung zu den Pixelhistogrammen der jeweiligen Vorgabeoberfläche zeigte. Für die Bestimmung der Ähnlichkeit von Pixelhistogrammen wurde von Nishida und Shinya ein Maß eingeführt, das auch in der hier durchgeföhrten Simulation verwendet wurde (vgl. Nishida & Shinya, 1998, S. 2958):

$$D_{12} = \sum_{F=1}^{F_{max}} \sum_{I=1}^{I_{max}} |N_{1,F}(I) - N_{2,F}(I)|. \quad (3.6)$$

Die Distanz, bzw. die Ähnlichkeit D_{12} zwischen zwei betrachteten Reizmustern (‘1’, bzw. ‘2’) ergibt sich hierbei aus der Summe der absoluten Abweichungen zwischen den jeweiligen Pixelanzahlen (N) über jede Intensitätsstufe (I , mit $I_{max} = 255$) sowie über jedes der neun ($= F_{max}$) unterschiedlichen Frames (F), bzw. Oberflächenorientierungen¹⁶. Je geringer also der

¹⁶Unberücksichtigt bleibt hierbei jedoch, dass sich die Gesamtzahlen der Pixel zwischen zwei zu vergleichenden Reizmustern durchaus unterscheiden können, da diese, wie leicht einzusehen ist, von der Reizgröße abhängen. Die Reizgröße wiederum, d.h. der Teil innerhalb des quadratischen Ausschnitts, der von Pixeln eingenommen wird, welche zur

Wert von D_{12} , desto ähnlicher sind sich die beiden betrachteten Oberflächen hinsichtlich ihrer Intensitätsverteilungen.

Unter jeder der sieben Form-Bedingungen wurden auf diese Weise 1836 Ähnlichkeitsmaße errechnet, von denen jeweils wiederum diejenigen zugehörigen Abgleichsoberflächen ermittelt wurden, die den geringsten Distanzwert zu den unter den neun unterschiedlichen Reflexionsparameterkombinationen gerenderten Vorgabereizen aufwiesen.

Die gesamte oben beschriebene Prozedur wurde sechs Mal mit unterschiedlichen, zufällig erzeugten 3D-Strukturen (bei jeweils vorgegebenen globalen Formparametern) für den Vorgabe- und Abgleichsreiz wiederholt, so dass sich für jede der insgesamt 63 Bedingungskombinationen (7 unterschiedliche 3D-Formen \times 3 Werte für die diffuse Komponente des Vorgabereizes \times 3 entsprechende Werte für den Phong-Index) eine Stichprobe von 6 Schätzungen für die bestpassenden Parameterkombinationen ergaben.

Ergebnisse

Die nach dem beschriebenen Verfahren ermittelten Reflexionsparameter-Paare der Abgleichsoberflächen mit der „besten Übereinstimmung“ zur jeweiligen, unter den neun Reflexionsbedingungen gerenderten Vorgabefläche wurden für die Auswertung nun genau so behandelt, wie die empirisch erhobenen Reflexionswerte für die diffuse Komponente und den Phong-Index in Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe. In Abbildung 3.49 oben sind die über die sechs Messwiederholungen gemittelten Wertepaare als Pfeilspitze mit den entsprechenden Werten für die jeweilige Reflexionsparameterkombination des Vorgabereizes (offene Kreise in Abb. 3.49) in Beziehung gesetzt worden (für die Streuungsellipsen wurden die jeweiligen einfachen Stichprobenstreuungen verwendet). Um einen besseren Vergleich zwischen den Simulationsdaten und den aus dem empirischen Experiment erhobenen Daten zu ermöglichen, wurden in Abbildung 3.49 neben ersteren (obere Hälfte) auch gleichzeitig die Ergebnisse aus Experiment 1 der Experimentalreihe II erneut dargestellt (untere Hälfte, vgl. Abb. 3.13).

Bei einem Vergleich der Simulationsdaten mit den empirischen Daten fällt sofort ins Auge, dass es, im Gegensatz zu der von Nishida und Shinya berichteten Übereinstimmung, keinerlei Ähnlichkeit in der Datenstruktur gibt: Unter nahezu allen betrachteten Bedingungen, d.h. den sieben Form-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, sowie jeweils den neun Reflexions-Bedingungen für die Vorgabeoberfläche, treten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Vorgabe- und Abgleichswerten auf: Fast ausnahmslos wurde im Mittel genau die Werte-Kombination für die Reflexionsparameter der Vorgabeoberfläche getroffen. Insbesondere hinsichtlich der diffusen Komponente traten kaum Unterschiede zum Vorgabewert auf. Vergleichsweise größere Variationen ergaben sich für die Werte des Phong-Index, die sich jedoch ebenfalls bei einer Mitteilung über die sechs Messwiederholungen in der Regel in der Nähe des Vorgabewertes zentrierten.

Mit anderen Worten: Würde das visuelle System tatsächlich für die Beurteilung der Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche auf einen Mechanismus zurückgreifen, der lediglich die Pixelhistogramme berücksichtigt, so wäre nach der hier durchgeföhrten Simulation zu erwarten gewesen, dass die Beobachter während des empirischen Experiments im Mittel einen nahezu perfekten Abgleich zwischen zwei Oberflächen mit unterschiedlichen 3D-Strukturen herstellen. Die systematischen Abweichungen, wie sie unter einigen 3D-Bedingungen für den Abgleichsreiz nach dem empirischen Experiment vorgefunden wurden, lassen sich durch einen solchen, auf Bildstatistiken beruhenden Mechanismus zumindest nicht erklären. Tatsächlich wäre, nach den vorliegenden

dargestellten Oberfläche gehören, hängt von der konkreten Form der Oberfläche ab. Selbst wenn zwei miteinander zu vergleichende Oberflächen durch dieselben globalen Formparameter gekennzeichnet sind, werden sie im Allgemeinen unterschiedliche 3D-Strukturen aufweisen, so dass sie sich auch bezüglich ihrer Pixelanzahlen unterscheiden können. Allerdings wurde bei der Berechnung des Distanzmaßes darauf geachtet, dass bei jedem Schritt über den Index F die beiden miteinander zu vergleichenden Oberflächen jeweils dieselbe Orientierung aufwiesen.

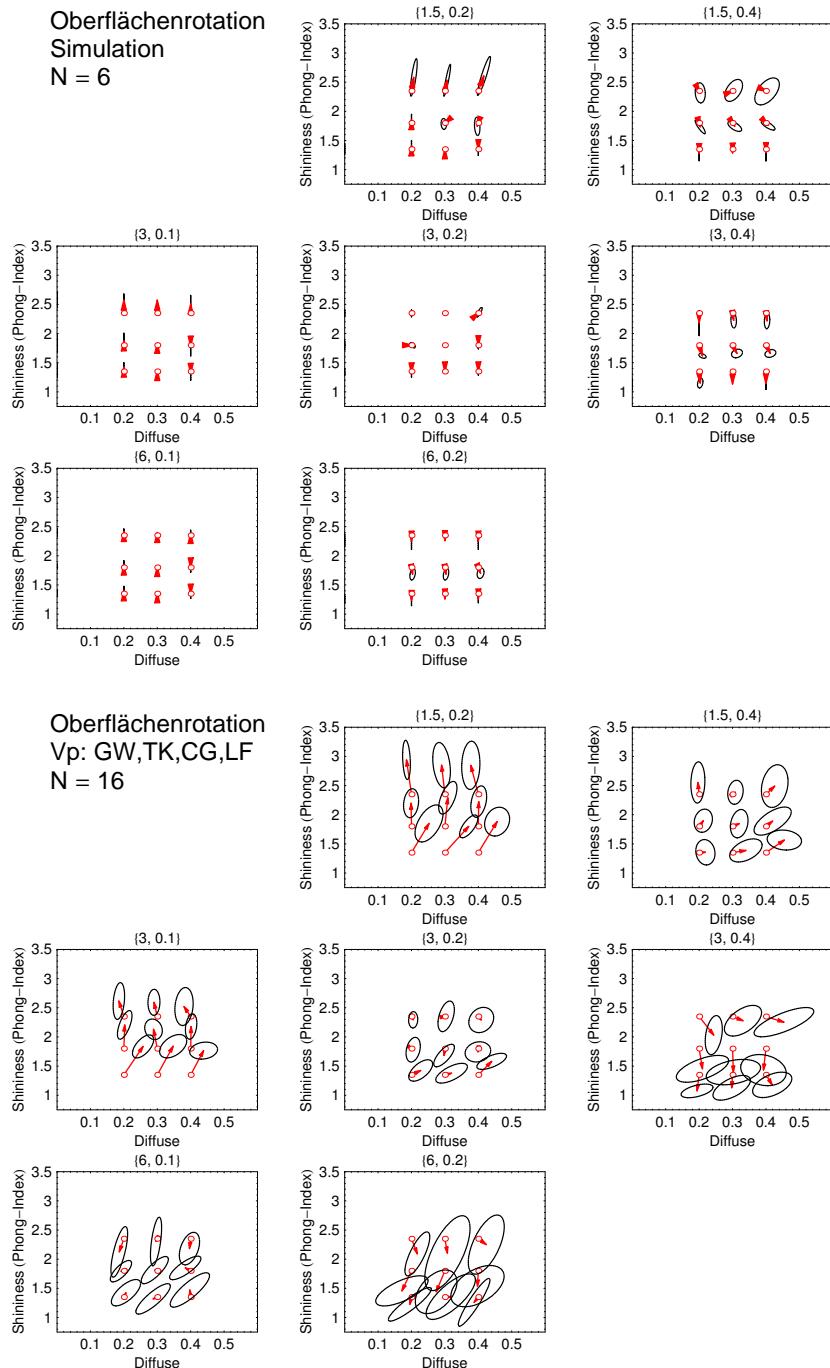


Abbildung 3.49: Oben: Ergebnisse der Simulation (über alle sechs Messwiederholungen gemittelt). Unterteilt nach den sieben unterschiedlichen Form-Bedingungen für die Abgleichsoberfläche, enthält jedes Diagramm die neun verschiedenen Paare von Reflexionsparameterkombinationen für die Testoberfläche (Kreise), sowie die entsprechenden Wertepaare, die dem zugehörigen Abgleichsreiz zugeordnet wurden (Pfeilspitzen). Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der einfachen Stichproben. Unten: Die entsprechenden Ergebnisse des Experiments 1 (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Simulationsdaten zu urteilen, ein solcher Mechanismus sogar ein verhältnismäßig zuverlässiger Mechanismus zur Gewährleistung von Glanzkonstanz¹⁷!

¹⁷Anzumerken bleibt hierbei allerdings, dass die Übereinstimmung zwischen den Pixelhistogrammen der Abgleichsoberfläche mit der größten Ähnlichkeit zu den Pixelhistogrammen der Vorgabeoberfläche keinesfalls perfekt war, wie eine zusätzliche Auswertung des Datenmaterials dieser Simulation zeigt: Wählt man für jede Abgleichsoberfläche (d.h. für jeden Satz von 1836 unterschiedlichen Reflexionsparameterkombinationen) jeweils das kleinste aufgefunde-ne Distanzmaß, welches also die beste Übereinstimmung zu dem entsprechenden Vorgabereiz zeigt, und relativiert es an dem größten Distanzmaß innerhalb dieses Satzes, so dass sich alle Ähnlichkeitsmaße in einem normierten Bereich zwischen 0 und 1 bewegen, so zeigt sich, dass die Abgleichsoberflächen, die hinsichtlich ihrer Intensitätsverteilung am besten zu den entsprechenden Vorgabereizen passen, im Durchschnitt ein normiertes Distanzmaß von ca. 0.18 aufwei-sen (gemittelt über eine Stichprobe von 252 Fällen).

3.3.2 Simulation zur Bedeutung von Bildstatistiken bei der Glanzkonstanz II

Die Ergebnisse aus den über eine Simulation gewonnenen Daten aus dem vorangegangenen Abschnitt deuten darauf hin, dass die in Experiment 1 gefundenen Abweichungen der Einstellungen der Beobachter von den Werten im Vorgabereiz schwerlich mit einem Mechanismus vorhergesagt werden können, nach welchem das visuelle System bei der Bestimmung der Materialbeschaffenheit einer Oberfläche auf die Ähnlichkeit von Pixelhistogrammen zurückgreift – wie von Nishida & Shinya (1998) angenommen (für eine weitere Kritik an diesem, bzw. weiterentwickelten Ansätzen zur Verwendung von Bildstatistiken bei der Wahrnehmung von Materialeigenschaften, siehe z.B. Anderson & Kim, 2008). Tatsächlich hat sich, zumindest bei den hier verwendeten Reizmustern, gezeigt, dass offenbar zwei hinsichtlich ihrer 3D-Struktur unterschiedliche Oberflächen oftmals gerade dann eine relativ hohe Ähnlichkeit bezogen auf ihre Pixelhistogramme aufweisen, wenn die entsprechenden Reizmuster unter Verwendung derselben Reflexionsparameter gerendert werden. Der von Nishida und Shinya postulierte Mechanismus hätte demnach – im Unterschied zu den empirisch vorgefundenen Abweichungen (s. Experiment 1 der Experimentalreihe II) – zu einer annähernd perfekten Glanzkonstanzeistung führen müssen. Um diesen Befund der Unangemessenheit des von Nishida und Shinya vorgeschlagenen Mechanismus zur Erklärung der empirischen Daten zusätzlich zu festigen, soll hier nun eine weitere Analyse angestellt werden, die auf folgender Überlegung aufbaut: Den Vorhersagen von Nishida und Shinya zufolge müsste zwischen den Pixelhistogrammen einer Vorgabe- und einer als hinsichtlich ihrer Reflexionsbeschaffenheit als gleich empfundene Abgleichsoberfläche eine höhere Übereinstimmung bestehen, als zwischen den Pixelhistogrammen zweier Reizmuster, die objektiv dieselben Reflexionseigenschaften aufweisen.

Um diese Annahme zu prüfen, wurde nun eine Analyse angestellt, die sich aus zwei Teilen zusammensetzte. Zunächst wurden in einem Experiment erneut empirische Daten erhoben, wobei der Beobachter in altbewährter Weise einen Abgleich der wahrgenommenen Reflexionsbeschaffenheit zwischen einer Vorgabe- und einer Abgleichsoberfläche vornahm (der experimentelle Aufbau war wie in Experiment 1 der Experimentalreihe II, d.h., die Vorgabe- und die Abgleichsfläche wurden nebeneinander in monokularer Darstellung auf dem Monitor präsentiert, als Rotationsvariante wurde die Oberflächenrotation gewählt). In diesem Falle wurden als Vorgabeflächen wiederum solche gewählt, welche die Formparameter 3.0 für den Frequenzparameter und 0.2 für die Amplitude aufwiesen, und die im Experiment wieder in den üblichen neun Reflexionsparameterkombinationen dargeboten wurden (die Werte 0.2, 0.3 und 0.4 für die diffuse Komponente \times die Werte 1.35, 1.8 und 2.35 für den Phong-Index, vgl. Formel 3.4). Jede Vorgabeoberfläche einer bestimmten Reflexionsparameterkombination wurde zehn Mal dargeboten, jeweils mit unterschiedlichen Pseudozufallswerten für die Frequenzen und die Orientierungen für die dem Reizmuster zugrunde liegenden Sinusgitter (vgl. Formel 3.3). Die jeweiligen Reihen von Pseudozufallszahlen für die Frequenzen und Amplituden der Sinusgratings einer jeden der insgesamt 90 Vorgabeoberflächen war, durch die Verwendung einer ganzzahligen so genannten „Seed Number“¹⁸ vollständig determiniert, so dass die 3D-Struktur einer nach dem hier verwendeten Verfahren (s. Formel 3.3) erzeugten Oberfläche exakt rekonstruiert werden konnte. Die exakte 3D-Form einer Oberfläche war also, neben dem Formparameter für die Raumfrequenz und der Amplitude, durch ihre „Seed Number“ vollständig charakterisiert, was für eine spätere Berechnung der zugehörigen Pixelhistogramme dieser Oberfläche von Bedeutung war.

In gleicher Weise wurden 90 unterschiedliche 3D-Strukturen für die Abgleichsoberflächen gewählt, die allesamt die Formparameterkombination von (3.0, 0.1) aufwiesen und ebenfalls jeweils durch eine feste „Seed Number“ gekennzeichnet waren. Jeder konkreten Vorgabeoberfläche

¹⁸Hierbei handelt es sich um den Ausgangswert, der dem Generierungsalgorithmus von Pseudozufallszahlenreihen vorgegeben wird.

war als fester Partner eine bezüglich ihrer 3D-Struktur konkrete Abgleichsoberfläche zugewiesen. Nachdem nun der Beobachter zwischen diesen 90 Paaren von Reizmustern einen Abgleich hinsichtlich der wahrgenommenen Reflexionseigenschaft vorgenommen hatte (s. Abb. 3.50), wurden anschließend für jedes Reizmusterpaar die zugehörigen Pixelhistogramme ermittelt – für die Vorgabeoberfläche mit den entsprechenden vorgegebenen Reflexionsparameterkombinationen, für die Abgleichsoberfläche mit den jeweiligen von dem Beobachter eingestellten Werten für die diffuse Komponente und den Phong-Index. Hierauf wurde für jedes Paar von Vorgabe- und Abgleichsreiz der Distanzwert D_{12} nach Formel 3.5 berechnet. Diese Stichprobe von 90 Distanzwerten, welche die Ähnlichkeiten der Pixelhistogramme zwischen dem jeweiligen Vorgabe- und Abgleichsreiz eines Paars repräsentieren, wobei also für die Reflexionsbeschaffenheit der Abgleichsflächen die von dem Beobachter zuvor eingestellten Werte beim Rendern verwendet wurden, soll im Folgenden als $D_{empirisch}$ bezeichnet werden.

Dieselbe Prozedur wurde anschließend noch einmal durchgeführt, nur mit dem Unterschied, dass für die jeweiligen Abgleichsoberflächen diesmal nicht die während des Abgleichsexperiments erhobenen Reflexionswerte benutzt wurden, sondern dieselben Reflexionsparameter, die die jeweilige Vorgabefläche eines Reizpaars aufwies. Auf diese Weise wurde also eine weitere Stichprobe von 90 Distanzwerten erzeugt (im Folgenden als $D_{identisch}$ bezeichnet), bei der sich die untersuchten Reizpaare hinsichtlich ihrer 3D-Strukturen nicht von den korrespondierenden Reizpaaren unterschieden, aus denen die Stichprobe $D_{empirisch}$ gewonnen wurde, sondern lediglich in der Reflexionscharakteristik der Abgleichsoberflächen (empirisch erhobene vs. zur Vorgabefläche identische Reflexionswerte).

Versuchspersonen

Die aus dem empirischen Teil der Analyse gewonnenen Daten wurden von dem Autor dieser Arbeit (GW) geliefert.

Ergebnisse

Abbildung 3.50 zeigt zunächst die Ergebnisse für den empirischen Teil des Experimentes, bei dem also die Reflexionsparameter-Paare erhoben wurden, die seitens des Beobachters den Abgleichsflächen für einen perzeptuellen Abgleich der Materialeigenschaft zugeordnet worden waren. Dargestellt ist, nach alter Manier, für alle neun untersuchten Wertepaare für den Vorgabereiz (offene Kreise) die jeweils über alle zehn Messwiederholungen gemittelten Reflexionsparameter-Paare der zugehörigen Abgleichsoberflächen (Pfeilspitzen; die Streuungsellipsen basieren jeweils auf der einfachen Stichprobenstreuung).

Hier zeigt sich erneut, allerdings im Vergleich zu den ursprünglichen Daten aus Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe (vgl. das entsprechende Diagramm in Abb. 3.14) in einem etwas geringerem Ausmaß, dass die von dem Beobachter eingestellten Reflexionswerte (Pfeilspitzen) sich im Mittel von den vorgegebenen Werten (offene Kreise) unterscheiden – somit also keine Glanzkonstanz im oben angegebenen Sinne besteht, wenn sich die zu vergleichenden Flächen in ihrer 3D-Form unterscheiden (hier bezüglich der Amplituden): Die Abgleichsdaten zeigen hier eine systematische Verschiebung hin zu geringeren Werten für die diffuse Komponente und gleichzeitig höheren Werten für den Phong-Index, im Vergleich zu den Werten des Vorgabereizes. Ein Reizmuster, welches bezüglich einer Abgleichsoberfläche eine geringere Amplitude aufweist, wird also offenbar hinsichtlich seiner Glanzbeschaffenheit als geringer und hinsichtlich seiner Eigenfarbe als heller wahrgenommen.

Eine solche mangelnde Glanzkonstanzeileistung ließe sich aber, nach Nishida und Shinya, dadurch erklären, dass das visuelle System, möglicherweise wegen des Nichtvorhandenseins oder

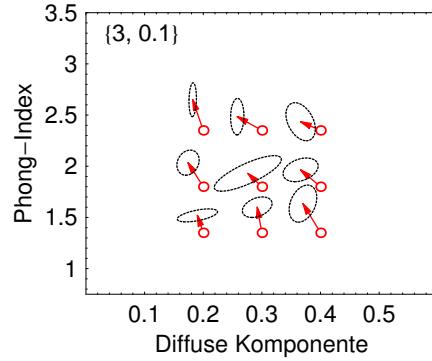


Abbildung 3.50: Ergebnisse aus dem empirischen Teil der Analyse: Für jede Reflexionsparametkombination des Vorgabereizes (offene Kreise) ist das über zehn Messwiederholungen gemittelte Paar von Reflexionsparametern (Pfeilspitzen) angegeben, die dem Abgleichsreiz zugeordnet wurden. Die Streuungsellipsen basieren auf den entsprechenden Kovarianzmatrizen der einfachen Stichproben.

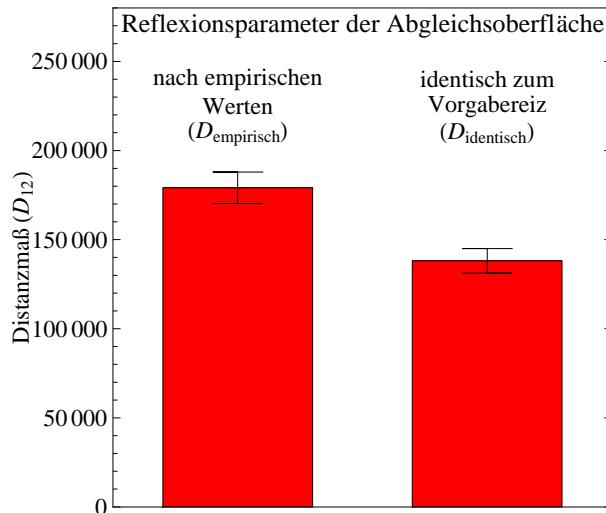


Abbildung 3.51: Ergebnisse der Analyse. Verglichen werden hier die Pixelhistogramm-Distanzen zwischen den Stichproben $D_{\text{empirisch}}$ und $D_{\text{identisch}}$ (s. Text).

Nichtberücksichtigens reliablerer Hinweisreize, sich bei der Beurteilung der Materialbeschaffenheit einer Oberfläche auf einfache Bildstatistiken stützt, eben auf die globale Intensitätsverteilung, wie sie durch die Pixelhistogramme dargestellt wird. Bei einem Vergleich der Pixelhistogramm-Ähnlichkeiten zwischen solchen Abgleichsflächen, deren Reflexionseigenschaften mit den empirischen Abgleichswerten gerendert wurden (und die demnach unter Anwendung dieses von Nishida und Shinya postulierten Mechanismus zustande gekommen sein müssten) und denen, die dieselben Reflexionswerte aufwiesen, wie die entsprechende Vorgabefläche, ergibt sich hier jedoch ein anderes Bild (Abb. 3.51): Offenbar waren solche Abgleichsflächen, die dieselbe (simulierte) objektive Reflexionsbeschaffenheit aufwiesen wie die Vorgabefläche ($D_{\text{identisch}}$, s. den rechten Balken in Abb. 3.51), im Mittel durch signifikant geringere Distanzmaße zum Vorgabereiz gekennzeichnet ($p < 10^{-11}$, zweiseitiger t-Test) als die korrespondierenden Abgleichsflächen, deren Reflexionsei-

genschaften durch die Abgleichsdaten bestimmt waren ($D_{empirisch}$, linker Balken). Dieser Befund steht im Einklang mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Abschnitt – und damit erneut im Widerspruch zu den Resultaten von Nishida & Shinya (1998): Nach den hier gewonnenen Erkenntnissen spricht nichts für die Annahme, dass das Einstellverhalten der an den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Experimenten beteiligten Beobachter durch einen Mechanismus geleitet wurde, welcher eine Minimierung von Unterschieden zwischen den Pixelhistogrammen der zu vergleichenden Reizmuster beinhaltet. Warum aber die Ergebnisse der hier durchgeführten Analysen so gravierend von den Ergebnissen abweichen, die von Nishida und Shinya vorgelegt wurden, ist nicht ersichtlich, zumal die verwendeten Reizmuster in beiden Untersuchungen vergleichbar waren.

Kapitel 4

Zusammenfassung und allgemeine Diskussion

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, Hinweisreize im proximalen Reiz zu identifizieren, die das visuelle System in irgendeiner Form bei der Zuschreibung von Glanzeigenschaften berücksichtigt. Die einzelnen Fragen, die Gegenstand dieser Arbeit waren, sollen der Übersichtlichkeit halber im Folgenden einzeln abgehandelt und unter Berücksichtigung der vorliegenden Befunde diskutiert werden.

Berücksichtigt das visuelle System den potentiellen Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität bei der Zuschreibung von Glanzeigenschaften? Und wenn ja, auf welche perzeptuellen Dimensionen wirkt sich dieser aus?

In einer ersten Experimentalreihe wurde der Frage nachgegangen, ob das visuelle System bei der Glanzwahrnehmung von der binokularen Information der Glanzlicht-Disparität Gebrauch macht – einem potentiellen Hinweisreiz, der schon früh als bedeutend für die Glanzwahrnehmung angenommen wurde (z.B. Kirschmann, 1895; Gräper, 1922), zu dem jedoch bislang kaum empirische Befunde vorlagen (s. aber Blake & Bühlhoff, 1990; Hurlbert et al., 1991). Hier deuten die Befunde des Experiments 1 der ersten Experimentalreihe (s. Abschnitt 3.1.2) darauf hin, dass sich dieser Hinweisreiz auf zwei, mutmaßlich unabhängige perzeptuelle Dimensionen auswirkt, nämlich auf die wahrgenommene Glanzstärke und auf die wahrgenommene Authentizität des Glanzeindrucks. Reizmuster, die diesen binokularen Hinweisreiz enthielten, wurden gegenüber solchen, die lediglich Oberflächen-Disparität enthielten, als weitaus realistischer in ihrer Glanzerscheinung beurteilt und von den Beobachtern vereinzelt als „plastischer“, „handgreiflicher“, „lebendiger“ bezüglich ihres phänomenalen Charakters beschrieben. Dieselben Reizmuster wurden zudem als höher hinsichtlich ihrer Glanzausprägung empfunden, d.h. Reize, die neben dem Vorhandensein von Oberflächen-Disparität ebenfalls Glanzlicht-Disparität enthielten, erschienen den Beobachtern als stärker glänzend verglichen mit Reizmustern, die zwar dieselbe objektive Glanzstärke aufwiesen, bei denen jedoch Glanzlicht-Disparität fehlte.

Welche Merkmale des proximalen Reizes nutzt das visuelle System zur Bestimmung der Glanzstärke einer Oberfläche?

Wie die Daten zu dem Experiment 1 der ersten Experimentalreihe nahe legen, nutzt das visuelle System zur Bestimmung der Glanzstärke verschiedene Merkmale der auf einer Oberfläche auftretenden Glanzflecken: Zum einen wurden Oberflächen bezüglich ihrer Glanzausprägung umso höher bewertet, je höher der Intensitätskontrast zwischen dem Glanzlicht und benachbarten,

vornehmlich diffus reflektierenden Bereichen der Oberfläche war (der im Reizmuster über den Mischungsanteil zwischen der diffusen und spiegelnden Komponente des Beleuchtungsmodells nach Phong (1975) realisiert wurde). Zum anderen wurden auch umso höhere subjektive Glanzwerte für die verwendeten computersimulierten Oberflächen vergeben, je geringer die räumliche Ausdehnung der zugehörigen Glanzflecken und je schärfer deren Konturen waren (die letzteren Eigenschaften wurden in den Reizmustern hauptsächlich durch die Größe des Phong-Exponenten beeinflusst).

Ist das visuelle System in der Lage, die Glanzausprägung einer Oberfläche unabhängig von ihrer konkreten 3D-Struktur zuverlässig zu erkennen? Mit anderen Worten: Verfügt das visuelle System über einen entsprechenden Glanzkonstanz-Mechanismus?

Ein weiteres, ebenfalls zur ersten Experimentalreihe gehörendes Abgleichsexperiment (s. Abschnitt 3.1.3) erbrachte nicht nur einen weiteren Hinweis darauf, dass das Vorhandensein von Glanzlicht-Disparität im Reizmuster zu einer Erhöhung der subjektiven Glanzstärke führt. Zusätzlich legen die erhobenen Daten die Vermutung nahe, dass das visuelle System über einen Glanzkonstanz-Mechanismus verfügt, der dazu führt, dass unabhängig von der konkreten Beschaffenheit der dreidimensionalen Form einer Oberfläche die Glanzausprägung dieser Oberfläche zuverlässig erkannt wird: Die jeweiligen Vorgabe- und Abgleichsreize wiesen in diesem Experiment niemals gleiche 3D-Strukturen auf, jedoch gelang es den Beobachtern, zwischen zwei unterschiedlich geformten Oberflächen einen nahezu perfekten Abgleich bezüglich ihrer Reflexionsbeschaffenheit herzustellen. Dieser Befund ist deshalb alles andere als trivial, weil den Beobachtern als Hinweisreiz zur Einschätzung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche eben nur die räumliche Beschaffenheit der Glanzflecken zur Verfügung stand. Diese räumlichen Merkmale der Glanzflecken hängen jedoch nicht nur von der objektiven Reflexionscharakteristik, sondern ebenfalls von den lokalen Krümmungen der Oberfläche ab: Oberflächen mit geringeren lokalen Krümmungen würden gegenüber stärker gekrümmten Oberflächen Glanzflecken enthalten, die räumlich weiter ausgedehnt wären und deren Konturen sanftere Gradienten aufweisen würden.

Nun lag eine Einschränkung dieses Abgleichsexperimentes aber darin, dass die Vorgabe- und Abgleichsreize zwar niemals identisch hinsichtlich ihrer 3D-Struktur waren, jedoch global recht ähnliche Krümmungen aufwiesen, da die zur Reizkonstruktion verwendeten Formparameter (d.h. die Raumfrequenz und die Amplitude der zugrunde liegenden Sinusgitter) nur aus einem vergleichsweise engen Intervall zufällig ausgewählt wurden. Tatsächlich fanden bereits Nishida und Shinya (1998), in deren Experimenten ähnliche Reizmuster verwendet wurden wie in der vorliegenden Arbeit, dass zwischen Oberflächen, die ähnliche Krümmungen aufweisen, ein nahezu perfekter Abgleich bezüglich der Reflexionseigenschaften hergestellt werden konnte. Es stellt sich damit die Frage, ob ein Abgleich der Reflexionscharakteristik zwischen zwei Oberflächen auch dann noch zufriedenstellend möglich ist, wenn sich die beiden Oberflächen stärker bezüglich ihrer 3D-Struktur unterscheiden.

Wie zuverlässig ist eine solche Glanzkonstanzleistung, wenn man Oberflächen betrachtet, die sich stark hinsichtlich ihrer 3D-Strukturen unterscheiden?

Wie oben bereits dargestellt, fanden Nishida und Shinya (1998) für Oberflächen, die sich bezüglich ihrer lokalen Krümmungen ähneln, dass es Beobachtern möglich ist, zwischen ihnen einen hinsichtlich der Reflexionseigenschaften annähernd perfekten Abgleich herzustellen. Unterschieden sich die Oberflächen aber zu einem gewissen Grad in ihrer Raumfrequenz und/oder Amplitude, so traten bei den Untersuchungen dieser beiden Autoren deutliche systematische Fehler in den Abgleichseinstellungen auf. In einem ersten Experiment der Experimentalreihe II, das eine Replikation der Untersuchung von Nishida und Shinya darstellte (s. Abschnitt 3.2.2), konnte dieser Befund

weitestgehend bestätigt werden. Abweichend von deren Ergebnissen zeigte sich hier jedoch, dass es offenbar bestimmte Paare von 3D-Formen gibt, zwischen denen auch dann ein zuverlässiger Abgleich der Reflexionsbeschaffenheit hergestellt werden kann, wenn sich der Vorgabe- und der Abgleichsreiz deutlich bezüglich ihrer Form-Parameter (d.h. bezüglich ihres Frequenzparameters und ihrer Amplitude) unterscheiden. Dies betraf solche Paare von Reizmustern, deren 3D-Formen sich lediglich hinsichtlich ihrer Skalierung unterschieden, d.h. wenn sich das eine Reizmuster durch eine Skalierung der ihm zugrunde liegenden Vertices (wodurch das gesamte Reizmuster also gleichmäßig entlang der drei Raumdimensionen vergrößert oder verkleinert wird) in eine Form überführen lässt, die ähnliche Krümmungen aufweist wie das andere Reizmuster. Für alle übrigen untersuchten Paare von 3D-Formen zeigten sich jedoch zu den von Nishida und Shinya gelieferten Ergebnissen vergleichbare systematische Fehler. Diese Befunde deuten also darauf hin, dass der Konstanzmechanismus des visuellen Systems zumindest unter den hier realisierten Bedingungen nicht in der Lage ist, bei der Zuschreibung von Glanz Änderungen der 3D-Form komplett zu kompensieren.

Gegen eine solche verallgemeinernde Interpretation dieser Ergebnisse lässt sich jedoch einwenden, dass die verwendeten Reizmuster nicht das volle Angebot an Informationen enthielten, welches in der Regel unter ökologischen Bedingungen bereitgestellt wird: So untersuchten Nishida und Shinya beispielsweise ausschließlich monokular präsentierte Reizmuster, deren Reflexionskomponenten zudem dieselbe Chromatizität aufwiesen, d.h. die Farbe des Glanzes (die für nicht-leitende Materialien unter ökologischen Bedingungen durch die Farbe der Beleuchtung bestimmt wird, vgl. Abschnitt 2.2) und die Eigenfarbe der Oberflächen waren hier identisch. Wie im folgenden Abschnitt noch einmal dargestellt werden wird, ist anzunehmen, dass durch eine Anreicherung der Reizmuster mit weiteren Informationsquellen, die unter natürlichen Beobachtungsbedingungen zur Verfügung stehen, eine Verbesserung der Glanzkonstanzeistung erreicht werden kann.

Lässt sich eine solche Glanzkonstanzeistung verbessern, wenn die Reizmuster mit weiteren Informationsquellen angereichert werden?

Alle weiteren Experimente der zweiten Experimentalreihe widmeten sich der Frage, ob durch eine Anreicherung der Reizmuster mit weiteren Informationsquellen eine Verbesserung der von Nishida und Shinya als mangelhaft herausgestellten Glanzkonstanzeistung erreicht werden kann. Konkret wurde hier untersucht, ob das visuelle System hierfür von drei unterschiedlichen Informationsquellen Gebrauch macht: (1) Von Disparitätsinformationen, die über das binokulare Sehen verfügbar gemacht werden, (2) von bewegungsinduzierten Informationen und (3) von Farbinformationen. Der mögliche Beitrag der einzelnen Informationsquellen zu einer Veränderung der Glanzkonstanzeistung wurde im Vorfeld diskutiert, wobei zwei unterschiedliche Wirkweisen in Betracht gezogen wurden (für eine detailliertere Darstellung siehe Abschnitt 3.2):

1. Unter der Annahme, dass das visuelle System zur Beurteilung der räumlichen Beschaffenheit der Glanzflecken die lokalen Krümmungen der Oberfläche, an denen die Glanzlichter erscheinen, berücksichtigt, wurde vermutet, dass sowohl Disparitätsinformationen (hier in erster Linie die Oberflächen-Disparität) als auch Bewegungsinformationen vom visuellen System für eine bessere Schätzung der 3D-Struktur der Oberfläche herangezogen werden (*structure from stereo*, bzw. *structure from motion*).
2. Das von einer Oberfläche zum Beobachter reflektierte Licht setzt sich (für jeden Punkt auf der Oberfläche) additiv aus zwei Anteilen zusammen, die durch die beiden unterschiedlichen Reflexionskomponenten bestimmt sind und die zumindest lokal unauflösbar miteinander

vermischt sind. Offenbar scheint das visuelle System aber unter günstigen Reiz- und Beobachtungsbedingungen in der Lage zu sein, dieses zusammengesetzte Muster an Intensitäten in die beiden perzeptuellen Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* zu zerlegen. Wie an der entsprechenden Stelle ausführlich dargelegt wurde (s. Abschnitt 3.2), könnte ein solcher Zerlegungsprozess durch das Vorhandensein der oben genannten Informationsquellen unterstützt werden (genauer: durch das Vorliegen von Bewegungsinformationen, Glanzlicht-Disparität und/oder eine farbliche Trennung zwischen den Reflexionskomponenten).

Die Ergebnisse eines Abgleichsexperiments (Experiment 2, s. Abschnitt 3.2.3), bei dem Reizmuster dargeboten wurden, in denen alle diese Informationen verfügbar waren, zeigten, dass tatsächlich eine deutliche Verbesserung der Glanzkonstanzleistung (im Vergleich zu den Ergebnissen, die in der Replikation der Untersuchung von Nishida und Shinya erzielt wurden) erreicht werden konnte. Jedoch bezieht sich diese deutliche Verbesserung ausschließlich auf die Wahrnehmung der Glanzausprägung, wohingegen die Ergebnisse zur Wahrnehmung der Eigenfarbe der Oberfläche keine eindeutige Interpretation erlauben. Die weiteren Experimente der zweiten Experimentalreihe dienten dazu, den Beitrag jeder einzelnen dieser drei Informationsquellen zur Glanzkonstanzleistung zu spezifizieren.

Welchen Beitrag leisten Bewegungsinformationen zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzleistung?

Die in dieser Arbeit erhobenen Daten deuten darauf hin, dass sich das Vorhandensein von Bewegungsinformationen unterschiedlich auf die beiden wahrgenommenen Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* auswirkt (s. Experiment 3, 4 und 6 in den Abschnitten 3.2.4, 3.2.5 und 3.2.7). Zusätzlich scheint ein solcher Effekt von der gewählten Rotationsart abzuhängen: Bei einer Kippbewegung, wie sie auch bei Nishida und Shinya verwendet wurde, zeigt sich eine Verbesserung hinsichtlich der Wahrnehmung der Eigenfarbe. Bezüglich der Wahrnehmung der Glanzausprägung zeigt sich jedoch kein Unterschied zwischen dieser Art der Objektrotation und einer statischen Reizdarbietung. Letzteres lässt sich möglicherweise damit erklären, dass die Oberfläche bei dieser Art der Rotation nur in einem eng begrenzten Ausschnitt der Rotationsbewegung überhaupt Glanzflecken aufwies, so dass diesbezüglich kaum ein Unterschied zu einer statischen Reizpräsentation vorhanden war. Wurden die Reizmuster jedoch in einer dynamischen Variante präsentiert, bei der die Oberfläche um ihre (in die Beobachterrichtung geneigte) vertikale Mittelachse rotierte, so kehrte sich der Effekt auf die beiden wahrgenommenen Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* um: Gegenüber einer statischen Präsentation zeigte sich eine deutlich verbesserte Glanzkonstanzleistung, jedoch waren die Einschätzungen der *Eigenfarbe* nun mit größeren Fehlern belastet. Bezogen auf die wahrgenommene Glanzbeschaffenheit ist zu vermuten, dass die beobachtete Verbesserung der Glanzkonstanzleistung durch die Verwendung einer Rotationsart erreicht wurde, bei der im Gegensatz zur ursprünglichen Variante einer Kippbewegung Reizmuster geschaffen wurden, die über weite Strecken der Rotationsbewegung Glanzflecken enthielten. Die mangelnde Konstanzleistung bezüglich der wahrgenommenen Eigenfarbe hingegen könnte damit erklärt werden, dass bei der neuen Rotationsart (Rotation um die vertikale Mittelachse) die globale Oberflächennormale immer in einem festen Winkel zur Lichtrichtung stand, was dazu führte, dass die durch die ambiente und diffuse Komponente bestehende Grundhelligkeit eines jeden Punktes der Flächen während des gesamten Rotationslaufs deutlich geringere Intensitätschwankungen aufwies als unter der Kippbewegung¹. Es ist demnach also zu vermuten, dass auch bei der Einschätzung der *Eigenfarbe* einer Oberfläche dynamische Informationen berücksichtigt werden.

¹Wie im Abschnitt 2.2 ausgeführt, ist bei diffus reflektierenden Flächen die rückgestrahlte Lichtenergie allein abhängig von dem Winkel zwischen der Lichtrichtung und der Oberflächennormalen.

Weiterhin gaben einige Beobachter der entsprechenden Experimente an, dass auch die wahrgenommene Geschwindigkeit der Glanzlichter, mit der diese während des Rotationslaufs über die Oberfläche wanderten, als Hinweis auf die Glanzbeschaffenheit der Oberfläche verwendet wurde: Während sich bei schwach glänzenden Oberflächen die über weite Flächenbereiche ausgedehnten Glanzlichter behäbig über die Hügel und Täler zu wälzen schienen, führten die spitzen, eng umrissenen Glanzlichter auf stark glänzenden Flächen zu dem Eindruck, als würden sich diese in einer deutlich höheren Geschwindigkeit bewegen. Jedoch bedarf es gesonderter Untersuchungen, um zu überprüfen, ob diese Unterschiede in der wahrgenommenen Bewegungsgeschwindigkeit der Glanzflecken tatsächlich verwertbare Informationen enthalten, die für die Einschätzung der Glanzausprägung einer Oberfläche von Nutzen sind (vgl. Hurlbert et al., 1991).

Welchen Beitrag leisten Disparitätsinformationen zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzeistung?

Wie schon bei dem Einfluss von Bewegungsinformationen auf die Glanzkonstanzeistung wurden auch für die Disparitätsinformationen zwei unterschiedliche Wirkweisen in Betracht gezogen: Wieder könnte eine Verbesserung der Glanzkonstanzeistung darauf zurückgehen, dass eine bessere 3D-Präsentation ermöglicht werden könnte, wenn die Reizmuster Oberflächen-Disparität aufweisen. Alternativ oder zusätzlich könnte dies aber auch darauf zurückgehen, dass das Vorliegen von Glanzlicht-Disparität eine Verbesserung der Aufspaltung in die beiden Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* bewirkt. Der mögliche Beitrag von Disparitätsinformationen zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzeistung wurde in den Experimenten 5-7 (Abschnitt 3.2.6 - 3.2.8) untersucht. Hinsichtlich der wahrgenommenen Glanzbeschaffenheit einer Oberfläche zeigte sich, dass offenbar allein durch das Vorhandensein von Oberflächen-Disparität eine deutliche Verbesserung der Glanzkonstanzeistung erzielt werden konnte, verglichen mit Reizsituationen, bei denen die Oberflächen unter rein monokularen Beobachtungsbedingungen präsentiert wurden. Eine weitere Verbesserung stellte sich ein, wenn zusätzlich Glanzlicht-Disparität im Reizmuster angeboten wurde. Bezogen auf die wahrgenommene Eigenfarbe einer Oberfläche hingegen zeigte sich kein vergleichbarer Effekt: Unter allen Disparitätsbedingungen blieb die Konstanzeistung auf dem Niveau der monokularen Darbietungsform.

Welchen Beitrag leisten Farbinformationen zu einer Verbesserung der Glanzkonstanzeistung?

In Abschnitt 3.2 wurde die Möglichkeit diskutiert, dass das Vorliegen einer farblichen Trennung zwischen der diffusen Komponente (welche mit der Eigenfarbe einer Oberfläche assoziiert ist) und der spiegelnden Komponente (welche die Glanzschicht bestimmt und die bei nicht-leitenden Materialien die Farbe der Beleuchtung aufweist) eine Aufspaltung in die perzeptuellen Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* erleichtert. Tatsächlich deuten die Ergebnisse des Experiments 7 (Abschnitt 3.2.8) darauf hin, dass eine solche Farbinformation vom visuellen System innerhalb eines Glanzkonstanze-Mechanismus genutzt wird: Es zeigte sich, dass die Bestimmung sowohl des Glanzanteils als auch der Eigenfarbe einer Oberfläche im Vergleich zu einfarbigen Reizmustern durch einen deutlich geringeren systematischen Fehler gekennzeichnet waren, wenn solche Farbinformationen vorlagen. Weiterhin deuten die Ergebnisse darauf hin, dass auch die Sicherheit bei der Bestimmung der beiden Komponenten bedeutend stieg, wenn statt rein achromatischer Oberflächen Reizmuster vorlagen, die eine farbliche Trennung zwischen den Reflexionskomponenten aufwiesen.

Welche Mechanismen können für die gefundenen Effekte verantwortlich gemacht werden?

Die Ergebnisse der Experimente der Experimentalreihe II liefern starke Indizien dafür, dass das visuelle System von einer Vielzahl von Hinweisreizen Gebrauch macht, um die Reflexionsbeschaffenheit von Oberflächen auch unter wechselnden 3D-Formen zu bestimmen. Wie sich gezeigt hat, zieht das visuelle System für solch eine Glanzkonstanzeistung offenbar Hinweisreize aus dem proximalen Reiz heran, die durch Bewegungs-, Disparitäts- und Farbinformationen geliefert werden. Bezüglich einer Integration dieser Hinweisreize deuten die Befunde außerdem darauf hin, dass sich die Beiträge der verschiedenen Informationsquellen zur Glanzkonstanz weitgehend additiv verhalten und sich gegenseitig teilweise kompensieren können. Im Vorfeld wurden zwei mögliche Mechanismen postuliert, welche diese Informationsquellen nutzen könnten, um im weiteren Verlauf des visuellen Verarbeitungsprozesses einen Glanzkonstanz-Mechanismus zu unterstützen: Zum einen ein Formerkennungs-Mechanismus, zum anderen ein Zerlegungs-Mechanismus (s.o., sowie Abschnitt 3.2). Jedoch liefern die hier durchgeführten Experimente keine klaren Hinweise darauf, welcher der vermuteten Wirkweisen der jeweils vorgefundene Effekt zuzuschreiben ist (wobei natürlich weder auszuschließen ist, dass beide die angebotenen Informationen verwerten, noch, dass keiner dieser vorgeschlagenen Mechanismen überhaupt eine Rolle bei der Glanzwahrnehmung spielt).

Insbesondere ist nicht sicher, inwieweit die angebotenen Bewegungs- und Disparitätsinformationen für eine verbesserte Bestimmung der 3D-Struktur einer Oberfläche genutzt werden. Zwar konnte von einigen Forschern auf dem Gebiet der Formwahrnehmung formal gezeigt werden, dass die vorhandenen Informationen im proximalen Reiz, die entweder aus Bewegung oder aus einer Kombination von Bewegung und Oberflächen-Disparität gewonnen werden (Ullman, 1979; Richards, 1985; s. auch Johnston, Cumming & Landy, 1994), hinreichend wären, um darauf aufbauend eine „veridikale“ Repräsentation der 3D-Struktur einer Oberfläche zu bilden. Jedoch ist zum einen die empirische Datenlage auf diesem Gebiet sehr uneinheitlich hinsichtlich der Frage, ob das visuelle System solche Hinweisreize für die Bestimmung der 3D-Struktur einer Oberfläche auch tatsächlich nutzt (Todd & Norman, 2003). Zum anderen ist es auch als fraglich anzusehen, ob das visuelle System überhaupt eine „veridikale“, d.h. metrisch exakte Repräsentation der 3D-Struktur einer Oberfläche besitzt².

Bezogen auf die Hinweisreize, von denen angenommen wurde, dass diese ihren Beitrag zu einer verbesserten Glanzkonstanzeistung in erster Linie durch eine Unterstützung der Zerlegung in die beiden Komponenten *Eigenfarbe* und *Glanzschicht* leisten, namentlich die *Glanzlicht-Disparität* und die *farbliche Trennung* der Reflexionskomponenten, ist überdies nicht gewiss, ob sie nicht ebenfalls eine bessere Formerkennung unterstützen könnten. Neben Blake und Bülfhoff (1990), die Hinweise dafür fanden, dass der Hinweisreiz der Glanzlicht-Disparität zumindest Ambiguitäten bezüglich der Richtung der Oberflächenkrümmung aufzulösen in der Lage ist, fanden auch Todd, Norman, Koenderink und Kappers (1997, S. 808) „*clear evidence [...] that specular highlights can be a useful source of information for the process of stereoscopic form perception*“. Todd et al. (1997) vermuten außerdem, dass auch eine farbliche Trennung zwischen den beiden Reflexionskomponenten indirekt zu einer verbesserten Formwahrnehmung beitragen könnte, nämlich dadurch, dass die Glanzlichter besser als eben solche interpretiert werden – womit die Intensitätsspitzen nicht als Störfaktoren auftreten (s. auch Nefs, 2008), die dann zu verzerrten Krümmungsschätzungen führen, wenn sie statt als Glanzlichter als stark gekrümmte Orte auf einer vollkommen diffus reflektierenden Oberfläche aufgefasst werden.

²Während dies offenbar von Li, Pizlo und Steinman (2009, S. 979) angenommen wird („*Human observers perceive shapes of 3D objects veridically, that is, as they actually are 'out there'.*“), legt Todd (2004, S. 120) die Vermutung nahe, „*[...] that the perceptual representation of 3D shape involves a relatively abstract data structure based on qualitative surface properties [...]*“.

Zusammengenommen liefern die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente also starke Hinweise darauf, *dass* das visuelle System bei der Beurteilung der Reflexionsbeschaffenheit einer Oberfläche von den genannten Informationsquellen Gebrauch macht, jedoch bleibt weiterhin offen, *wie* diese Informationen vom visuellen System genutzt werden, bzw. welche Verarbeitungsmechanismen sich ihrer bedienen.

Wie sind die vorliegenden Befunde mit dem von Nishida und Shinya (1998) vorgeschlagenen, auf Bildstatistiken basierenden Ansatz zur Erkennung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche zu vereinbaren?

Nishida und Shinya (1998) nahmen an, dass das visuelle System zur Beurteilung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche auf einfache Bildstatistiken in Form von Pixelhistogrammen zurückgreift (s. Abschnitt 3.3). Wie schon mit den Experimenten der zweiten Experimentalreihe gezeigt werden konnte (Abschnitt 3.2), lässt sich die von Nishida und Shinya als mangelhaft herausgestellte Glanzkonstanzeistung deutlich verbessern, wenn bestimmte Informationsquellen im Reiz vorliegen. Dies allein deutet bereits darauf hin, dass das visuelle System zumindest nicht ausschließlich Bildstatistiken für die Bestimmung der Reflexionseigenschaften einer Oberfläche verwendet. Zwar wurde in der vorliegenden Arbeit nicht analysiert, wie stark sich beispielsweise das Zufügen von Disparitäts-Informationen auf die Pixelhistogramme der Reizmuster auswirkt, jedoch ist anzunehmen, dass eine solche mögliche Änderung kaum so stark ausfallen dürfte, dass damit der beobachtete Effekt in Richtung einer bedeutend verbesserten Glanzkonstanzeistung erklärt werden kann.

Die Ergebnisse einer Replikation der von Nishida und Shinya durchgeführten Simulation (Abschnitt 3.3.1), sowie die einer weiteren Simulation (Abschnitt 3.3.2) stehen zudem in einem starken Kontrast zu deren Ergebnissen: Nishida und Shinya fanden in ihren Simulationsdaten Hinweise darauf, dass die Reflexionsparameter-Einstellungen ihrer Beobachter sehr gut durch einen Mechanismus erklärt werden konnten, nach dem zwei Oberflächen dann als gleich bezüglich ihrer Reflexionscharakteristik wahrgenommen werden, wenn sie ähnliche Pixelhistogramme aufweisen. Die in der vorliegenden Arbeit erzeugten Simulationsdaten zeigen hingegen keine Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Experiment 1 der zweiten Experimentalreihe (welches wiederum eine Replikation des Experiments von Nishida und Shinya darstellte, s. Abschnitt 3.2.2). Die Ursache für diese Diskrepanz ist bisher nicht auszumachen, zumal die Replikation sowohl des Experiments als auch der Simulation sich sehr eng an die Originaluntersuchungen von Nishida und Shinya gehalten hat³.

Insgesamt liefern die hier durchgeführten Experimente (Abschnitt 3.2) wie auch die Simulationen (Abschnitt 3.3) somit keine Hinweise, die den von Nishida und Shinya vorgeschlagenen Ansatz stützen, nach dem das visuelle System bei der Bestimmung der Reflexionseigenschaft einer Oberfläche von einfachen Bildstatistiken Gebrauch macht. Dieser Befund steht damit vielmehr im Einklang mit neueren Ergebnissen von Anderson und Kim (2009), die Hinweise dafür fanden, dass das visuelle System bei der Wahrnehmung der Reflexionseigenschaften von Oberflächen weitaus komplexere Analysen durchführt, zu denen Bildstatistiken im Allgemeinen keinen wesentlichen Beitrag leisten können.

³Die wohl stärkste Abweichung der hier durchgeführten Simulation (Abschnitt 3.3.1) von der entsprechenden Analyse bei Nishida und Shinya (1998) bestand in dem Auflösungsgrad, in dem die Reflexionsparameter untersucht wurden: Während Nishida und Shinya für jede ihrer 3D-Oberflächen lediglich 117 unterschiedliche Reflexionsparameterkombinationen verwendeten, waren es in der vorliegenden Arbeit 1836. Dennoch ist nicht anzunehmen, dass hierin die Ursache für die deutliche Abweichung zwischen Nishida und Shinyas und den vorliegenden Simulationsergebnissen zu finden ist.

Kapitel 5

Literatur

- Adelson, E.H. (2001). On Seeing Stuff: The Perception of Materials by Humans and Machines. *Proceedings of the SPIE*, Vol. 4299, 1-12.
- Akenine-Möller, T. & Haines, E. (2002). *Real-Time Rendering* (2nd Ed.). Natick: A K Peters.
- Anderson, B.L. & Kim, J. (2008). Coupled computations of lightness, 3-D shape, and gloss. *Perception*, 37, 38.
- Anderson, B.L. & Kim, J. (2009). Image statistics do not explain the perception of gloss and lightness. *Journal of Vision*, 9(11):10, 1-17.
- Angelopoulou, E. & Poger, S. (2003). The Color of Specular Highlights. *Proceedings SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging VIII*, Vol. 5007, 298-309.
- Anstis, S.M. (2000). Monocular lustre from flicker. *Vision Research*, 40, 2551-2556.
- Bancroft, W.D. & Allen, R.P. (1925). Metallic Luster II. *J. Phys. Chem.*, 29, 564-586.
- Barkas, W.W. (1939). Analysis of Light Scattered from a Surface of Low Gloss into its Specular and Diffuse Components. *Proc. Phys. Soc*, 51, 274-295.
- Bartlett, N. (1998). Relativistic Effects and the Chemistry of Gold. *Gold Bulletin*, 31(1), 22-25.
- Beck, J. (1972). *Surface Color Perception*. Ithaca: Cornell University Press.
- Beck, J. & Prazdny, S. (1981). Highlights and the perception of glossiness. *Perception & Psychophysics*, 30(4), 407-410.
- Bertamini, M., Latto, R. & Spooner, A. (2003). The Venus effect: people's understanding of mirror reflections in paintings. *Perception*, 32, 593-599.
- Berzhanskaya, J., Swaminathan, G., Beck, J. & Mingolla, E. (2002). Highlights and surface gloss perception. *Journal of Vision* 2(7), 93a.
- Berzhanskaya, J., Swaminathan, G., Beck, J. & Mingolla, E. (2005). Remote effects of highlight on gloss perception. *Perception*, 34, 565-575.
- Billmeyer, F.W. & O'Donnell, F.X.D. (1987). Visual gloss scaling and multidimensional scaling analysis of painted specimens. *Color Research and Application*, 12(6), 315-326.
- Bixby, F.L. (1928). A phenomenological Study of Luster. *Journal of General Psychology*, 1, 136-174.

- Blake, A. (1985). Specular Stereo. *Proc. Int. Joint Conf. on Artificial Intelligence*, 973-976.
- Blake, A. & Bülthoff, H. (1990). Does the brain know the physics of specular reflection? *Nature*, 343, 165-168.
- Blake, R. (1989). A Neural Theory of Binocular Rivalry. *Psychological Review*, 96(1), 145-167.
- Blake, R. & Logothetis, N.K. (2001). Visual Competition. *Nature Reviews*, 3, 1-11.
- Blinn, J.F. (1977). Model of Light Reflection for Computer Synthesized Pictures. *Computer Graphics*, 11(2), 192-198.
- Brewster, D. (1852). Examination of Doves theory of lustre. *Cosmos*, 1, 577-578.
- Brewster, D. (1861). On Binocular Lustre. *Rep. Of Brit. Assoc.*, 2, 29-31.
- Brewster, D. (1971). *The stereoscope: its history, theory and construction*. N.Y: Morgan & Morgan. (Original: 1856, London: Murray.)
- Brücke, E. (1861). Über den Metallglanz. *Wiener Sitzungsber.*, XLIII, 2, 177-192.
- Bühler, K. (1922). *Die Erscheinungsweisen der Farben*. Jena: Fischer.
- Burr, D.C., Ross, J. & Morrone, M.C. (1986). A spatial illusion from motion rivalry. *Perception*, 15, 59-66.
- Cavanagh, P. (2005). The artist as neuroscientist. *Nature*, 434, 301-307.
- Christie, J.S. (1986). Evaluation of the attribute of appearance called gloss (Publication CIE 118/1). *CIE-Journal*, 5(2), 41-56.
- CIE (1970). *Vocabulaire International de L'Éclairage* (3e Edition). CIE Publ. No. 17 (E-1.1.). Paris: Bureau Central de la CIE.
- CIE (1987). *Vocabulaire International de L'Éclairage*. CIE Publ. No. 17.4. Genève: Bureau Central de la CIE.
- Cook, R.L. & Torrance, K.E. (1982). A Reflectance Model for Computer Graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 1(1), 7-24.
- Croucher, C.J., Bertamini, M. & Hecht, H. (2002). Naive Optics: Understanding the Geometry of Mirror Reflections. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 546-562.
- Czepluch, W. (1976). Zusammenhänge zwischen binokularer Betrachtungsweise und visuellem Glanzeindruck. *Lichttechnik*, 28, 16-18.
- Da Vinci, L. (1990). *Sämtliche Gemälde und die Schriften zur Malerei*. Herausgegeben von André Chastel. Wiss. Buchges.
- Dayan, P. (1998). A Hierarchical Model of Binocular Rivalry. *Neural Computation*, 10, 1119-1135.
- DelPozo, A., Savarese, S., Baker, D., & Simons, D. J. (2008). Why do we see some surfaces as reflective? *Journal of Vision*, 8(6):338, 338a.

- Doerschner, K., Wijntjes, M.W.A., Kucukoglu, G. & Pont, S.C. (2009). Effects of surface material on perceived 3-D shape: comparing velvet and matte reflectances. *Perception*, 38, 29.
- Dove, H.W. (1850). Ueber die Ursachen des Glanzes und der Irradiation, abgeleitet aus chromatischen Versuchen mit dem Stereoskop. *Poggendorffs Annalen*, 83, 169-183.
- Dove, H.W. (1853). *Darstellung der Farbenlehre und optische Studien*. Berlin: Müller.
- Dove, H.W. (1859). *Optische Studien, Fortsetzung der in der „Darstellung der Farbenlehre“ enthaltenen*. Berlin: Müller.
- Dove, H.W. (1861). Über den Glanz. *Monatsberichte der kgl. Preuss. Akad. der Wissenschaften*, 522-525.
- Dror, R.O., Adelson, E.H. & Willsky, A.S. (2001). *Surface Reflectance Estimation and Natural Illumination Statistics*. In: Proceedings of IEEE Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision, Vancouver, Canada.
- Dror, R.O., Willsky, A.S. & Adelson, E.H. (2004). Statistical characterization of real-world illumination. *Journal of Vision*, 4, 821-837.
- D'Zmura, M. & Lennie, P. (1986). Mechanisms of color constancy. *Journal of the Optical Society of America A*, 3(10), 1662-1672.
- Ferwerda, J.A., Pellacini, F., & Greenberg, D.P. (2001). A psychophysically-based model of surface gloss perception. *Proceedings of SPIE*, 4299, 291-301.
- Fleming, R.W. & Bülthoff, H.H. (2005). Low-level image cues in the perception of translucent materials. *ACM Transactions on Applied Perception*, 2, 346-382.
- Fleming, R.W., Dror, R.O. & Adelson, E.H. (2003). Real-world illumination and the perception of surface reflectance properties. *Journal of Vision*, 3, 347-368.
- Fleming, R.W., Torralba, A., & Adelson, E.H. (2004). Specular reflections and the perception of shape. *Journal of Vision*, 4(9):10, 798-820.
- Foley, J.D., van Dam, A., Feiner, S.K. & Hughes, J.F. (2004). *Computer Graphics - Principles and Practice*. Boston: Addison-Wesley.
- Forbus, K. (1977). *Light source effects*. Massachusetts Institute of Technology Artificial Intelligence Laboratory Memo No. 422.
- Formankiewicz, M.A. & Mollon, J.D. (2009). The psychophysics of detecting binocular discrepancies of luminance. *Vision Research*, 49, 1929-1938.
- Golz, J. & MacLeod, D.I.A. (2002). Influence of scene statistics on colour constancy. *Nature*, 415, 637-640.
- Gräper, L. (1922). Über den physiologischen Eindruck des Glanzes. *Die Naturwissenschaften*, 49, 1056-1066.
- Gregory, R.L. (1998). *Mirrors in Mind*. London: Penguin.

- Hara, K., Nishino, K. & Ikeuchi, K. (2005). Light Source Position and Reflectance Estimation from a Single View without the Distant Illumination Assumption. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(4), 493-505.
- Harrison, V.G.W. (1945). *Definition and Measurement of Gloss*. Cambridge: Heffer & Sons.
- Harrison, V.G.W. & Poulter, S. (1951). Gloss measurement of papers – the effect of luminance factor. *British Journal of Applied Physics*, 2, 92-97.
- Hartung, B. & Kersten, B. (2002). Distinguishing shiny from matte. *Journal of Vision*, 2, 551.
- Hecht, H. (2001). Regularities of the physical world and the absence of their internalization. *Behavioral and Brain Sciences*, 24, 608-617.
- Helmholtz, H. von (1867). *Handbuch der physiologischen Optik*. Hamburg: Voss.
- Helmholtz, H. von (1959). *Die Tatsachen in der Wahrnehmung. Zählen und Messen erkenntnistheoretisch betrachtet*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Hering, E. (1879). Der Raumsinn und die Bewegungen des Auges. In: L. Hermann (Hrsg.), *Handbuch der Physiologie der Sinnesorgane*, Bd. 3 (1), S. 343-601. Leipzig: F. C. W. Vogel.
- Heron (1900). De Speculis. In: L. Nix & W. Schmidt (Hrsg.), *Herons von Alexandria Mechanik und Katoptrik*. Leipzig: Teubner.
- Hoffman, D.D. (2003). *Visuelle Intelligenz - Wie die Welt im Kopf entsteht*. München: DTV.
- Howard, I.P. (1995). Depth from binocular rivalry without spatial disparity. *Perception*, 24, 67-74.
- Hunter, R.S. (1937). Methods of Determining Gloss. *Proc. ASTM*, 36, 783-806.
- Hunter, R.S. (1975). *The Measurement of Appearance*. New York: Wiley.
- Hurlbert, A.C., Cumming, B.G. & Parker, A.J. (1991). Recognition and Perceptual Use of Specular Reflections. *Inv. Ophth. Vis. Sci. Suppl.*, Vol. 32 (4).
- Ingersoll, L.R. (1914). A Means to Measure the Glaze of Papers. *Electrical World*, 63, 645-647.
- Jacobi, H. & Stahl, R. (1968). Über die Farbe von Metallen und Legierungen. *Naturwissenschaften*, 55(6), 272-276.
- Johnston, E.B., Cumming, B.G. & Landy, M.S. (1994). Integration of Stereopsis and Motion Shape Cues. *Vision Research*, 34(17), 2259-2275.
- Judd, D.B. (1937). Gloss and Glossiness. *Am. Dyest. Rep.*, 26, 234-235.
- Kersten, D., Mamassian, P. & Yuille, A. (2004). Object Perception as Bayesian Inference. *Annual Review of Psychology*, 55, 271-304.
- Khang, B.G., Koenderink, J.J. & Kappers, A.M.L. (2006). Perception of illumination direction in images of 3-D convex objects: Influence of surface materials and light fields. *Perception*, 35, 625-645.
- Kirschmann, A. (1892). Die psychologisch-ästhetische Bedeutung des Licht- und Farbenkontrastes. *Wundts Philosophische Studien*, 7, 362-393.

- Kirschmann, A. (1895). Der Metallglanz und die Parallaxe des indirekten Sehens. *Wundts Philosophische Studien*, 11, 147-189.
- Kirschmann, A. (1921). Der Metallglanz und die Farbe der Metalle. *Wundts Philosophische Studien*, 41, 90-115.
- Landy, M.S. (2007). Visual perception: A gloss on surface properties. *Nature*, 447, 158-159.
- Lee, H.-C. (1986). Method for computing the scene-illuminant chromaticity from specular highlights. *Journal of the Optical Society of America A*, 3(10), 1694-1699.
- Li, Y., Pizlo, Z. & Steinman, R.M. (2009). A computational model that recovers the 3D shape of an object from a single 2D retinal representation. *Vision Research*, 49, 979-991.
- Locke, J. (1897). *Über den menschlichen Verstand (Bd. I)*. Leipzig: Reclam.
- Logothetis, N.K., Leopold, D.A. & Sheinberg, D.L. (1996). What is rivalling during binocular rivalry? *Nature*, 380, 621-624.
- Lu, R., Koenderink, J. & Kappers, A.M. (1999). Surface roughness from highlight structure. *Applied Optics*, 38, 2886-2894.
- Ludwig, I., Pieper, W. & Lachnit, H. (2007). Temporal integration of monocular images separated in time: Stereopsis, stereoacuity, and binocular luster. *Perception & Psychophysics*, 69 (1), 92-102.
- Maloney, L. T. (2002). Illuminant estimation as cue combination. *Journal of Vision*, 2(6):6, 493-504.
- Mausfeld, R. (2002). The Physicalistic Trap in Perception Theory. In: D. Heyer & R. Mausfeld (Eds.), *Perception and the Physical World* (pp. 75-112). Chichester: Wiley.
- Mausfeld, R. (2005). Vom Sinn in den Sinnen. Wie kann ein biologisches System Bedeutung generieren? In: Elsner, N. & Lüer, G. (Hrsg.). „... sind eben alles Menschen“ - Verhalten zwischen Zwang, Freiheit und Verantwortung (pp. 47-80). Göttingen: Wallstein.
- Mausfeld, R. (im Druck). The perception of material qualities and the internal semantics of the perceptual system. In: L. Albertazzi, F. Fol Leymarie, G. van Tonder & D. Vishwanath (eds.). *Information in Perception*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Mausfeld, R. & Andres, J. (2002). Second-order statistics of colour codes modulate transformations that effectuate varying degrees of scene invariance and illumination invariance. *Perception*, 31, 209-224.
- Möller, E.F. (1925). The ‚Glassy Sensation‘. *American Journal of Psychology*, 36, 249-285.
- Motoyoshi, I., Nishida, S. & Adelson, E.H. (2005). Luminance re-mapping for the control of apparent material. *ACM Proceedings of the 2nd Symposium on Applied Perception in Graphics and Visualization*, 95, 165.
- Motoyoshi, I., Nishida, S., Sharan, L. & Adelson, E.H. (2007). Image statistics and the perception of surface qualities. *Nature* 447, 206-209.
- Nassau, K. (2001). *The Physics and Chemistry of Color - The Fifteen Causes of Color (2nd Edition)*. New York: Wiley.

- Nefs, H.T. (2008). Three-dimensional object shape from shading and contour disparities. *Journal of Vision*, 8(11):11, 1-16.
- Nicodemus, F., Richmond, P., Hsia, J., Ginsberg, I. & Limperis, T. (1977). *Geometric Considerations and Nomenclature for Reflectance*. National Bureau of Standards (US) Monograph 161.
- Nishida, S., Motoyoshi, I., Nakano, L., Li, Y., Sharan, L., & Adelson, E. (2008). Do colored highlights look like highlights? [Abstract]. *Journal of Vision*, 8(6):339, 339a.
- Nishida, S. & Shinya, M. (1998). Use of image-based information in judgments of surface-reflectance properties. *Journal of the Optical Society of America A*, 15(12), 2951-2965.
- Norman, J.F., Todd, J.T., & Orban, G.A. (2004). Perception of three-dimensional shape from specular highlights, deformations of shading, and other types of visual information. *Psychological Science*, 15(8), 565-570.
- Obein, G., Knoblauch, K. & Viénot, F. (2004). Difference scaling of gloss: No linearity, binocularly, and constancy. *Journal of Vision*, 4, 711-720.
- Obein, G., Pichereau, T., Harrar, M., Monot, A., Knoblauch, K. & Viénot, F. (2004). Does binocular vision contribute to gloss perception? *Journal of Vision* (4), 11, 73a.
- Oppel, J.J. (1854). Ueber die Entstehung des Glanzes bei zweifarbigem, insbesondere bei schwarzen und weißen stereoskopischen Bildern. *Jahresber. d. Frankf. Vereins*, 1854-1855, 52-55.
- Oppel, J.J. (1857). Ueber das „Glitzern“, eine eigenthümliche Art des Glanzes, und die stereoskopische Nachahmung desselben. *Jahresber. d. Frankf. Vereins*, 1856-1857, 56-62.
- Phong, B.T. (1975). Illumination for Computer Generated Pictures. *Communications of the ACM*, 18 (6), 311-317.
- Pieper, W. & Ludwig, I. (1999). Differences in temporal integration for binocular lustre and stereopsis. *Perception*, 28, 132.
- Pieper, W. & Ludwig, I. (2001). Binocular Vision: rivalry, stereoscopic luster, and sieve effect. *Perception*, Supl. 30, 75-76.
- Pieper, W. & Ludwig, I. (2002). The minimum luminance-contrast requirements for stereoscopic lustre. *Perception*, 31, Supplement, 185.
- Pinna, B., Spillmann, L. & Ehrenstein, W.H. (2002). Scintillating lustre and brightness induced by radial lines. *Perception*, 31, 5-16.
- Pont, S.C. & te Pas, S.F. (2006). Material-illumination ambiguities and the perception of solid objects. *Perception*, 35, 1331-1350.
- Preston, J.M. (1931). Theories of lustre. *J. Soc. Dy. Col. Bradford*, 47, 136-143.
- Pylyshyn, Z.W. (2003a). *Seeing and Visualizing: It's Not What You Think*. Cambridge: MIT Press.
- Pylyshyn, Z.W. (2003b). Return of the mental image: are there really pictures in the brain? *TRENDS in Cognitive Sciences*, 7(3), 113-118.
- Richards, W. (1985). Structure from stereo and motion. *Journal of the Optical Society of America*, 2, 343-349.

- Rogers, B. & Graham, M. (1982). Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270.
- Rood, O.N. (1861). Upon some experiments connected with Dove's theory of luster. *Silliman Journal*, 31(2), 339-345.
- Rood, O.N. (1862). On Some Stereoscopic Experiments. *Silliman's Journal*, Series II, 34, 199-202.
- Ruete, C.G.Th. (1860). *Das Stereoscop*. Leipzig: Teubner.
- Sakano, Y. & Ando, H. (2008). Effects of self-motion on gloss perception. *Perception*, 37, ECPV Abstract Supplement, 77.
- Schopenhauer, A. (1977). *Die vierfache Wurzel des Satzes vom zureichenden Grunde - Über den Willen in der Natur*. Zürich: Diogenes.
- Schumann, F. (1920). Die Repräsentation des leeren Raumes im Bewußtsein. Eine neue Empfindung. *Zeitschrift für Psychologie*, 85, 224-244.
- Sève, R. (1993). Problems Connected with the Concept of Gloss. *Color Research and Application*, 18(4), 241-252.
- Sheedy, J.E. & Stocker, E.G. (1984). Surrogate color vision by luster discrimination. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 61 (8), 499-505.
- Shepard, R.N. (1994). Perceptual-Cognitive Universals as Reflections of the World. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1, 2-28.
- Simmons, D.R. (1998). The minimum contrast requirements for stereopsis. *Perception*, 27(11), 1333-1343.
- Todd, J.T. (2004). The visual perception of 3D shape. *TRENDS in Cognitive Sciences*, 8(3), 115-121.
- Todd, J.T. & Norman, J.F. (2003). The visual perception of 3-D shape from multiple cues: Are observers capable of perceiving metric structure? *Perception & Psychophysics*, 65, 31-47.
- Todd, J.T., Norman, J.F., Koenderink, J.J. & Kappers, A.M.L. (1997). Effects of texture, illumination, and surface reflectance on stereoscopic shape perception. *Perception*, 26, 807-822.
- Todd, J.T., Norman, J.F. & Mingolla, E. (2004). Lightness constancy in the presence of specular highlights. *Psychological Science*, 15(1), 33-39.
- Tominaga, S. & Tanaka, N. (2000). Estimating Reflectance Parameters from a Single Color Image. *IEEE Computer Graphics & Applications*, 20 (5), 58-66.
- Torrance, K.E. & Sparrow, E.M. (1967). Theory for Off-Specular Reflection From Roughened Surfaces. *Journal of the Optical Society of America*, 57(9), 1005-1114.
- Ullman, S. (1979). *The Interpretation of Visual Motion*. Cambridge: The MIT Press.
- Ward, G. J. (1992). Measuring and modeling anisotropic reflection. *Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92)*, 26, 265-272.

- Wehr, G. (2002). *Jakob Böhme. Mit Selbstzeugnissen und Bilddokumenten.* (8. Aufl.). Reinbek: Rowohlt.
- Wolfe, J.M. (1986). Stereopsis and Binocular Rivalry. *Psychological Review*, 93(3), 269-282.
- Wundt, W. (1862). Ueber die Entstehung des Glanzes. *Poggendorffs Annalen*, 116, 627-631.
- Wyszecki, G. & Stiles, W.S. (1982). *Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae.* 2nd ed. New York, NY: Wiley.
- Yang, J.N., & Maloney, L.T. (2001). Illuminant cues in surface color perception: Tests of three candidate cues. *Vision Research*, 41, 2581-2600.
- Yang, J.N., & Shevell, S.K. (2002). Stereo disparity improves color constancy. *Vision Research*, 42, 1979-1989.
- Zocher, H. & Reinicke, F. (1925). Über die Entstehung des Glanzeindrucks. *Z. Phys.*, 33, 12-27.

Anhang A

Danksagung

Zuallererst sei meinem Doktorvater Rainer Mausfeld gedankt für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen während der gemeinsamen Arbeit in dem Bereich der visuellen Wahrnehmung von Materialeigenschaften. Außerordentlichen Dank schulde ich zudem Franz Faul, der immer mit wertvollen Ratschlägen und Ideen zur Seite stand, sowie Johannes Andres, der mich um die Jahrtausendwende überhaupt erst mit dem Forschungsbereich der visuellen Wahrnehmung in Kontakt gebracht hat. Ferner geht mein Dank an Vebjørn Ekroll, Reinhard Niederée, Tom Scherzer, Daniel Wollschläger, Jürgen Golz und Jascha Jaworski, die in gelegentlichem Austausch einige Anregungen geben konnten. Diese Arbeit wurde gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Anhang B

Lebenslauf (Curriculum Vitae)

Persönliche Daten

- Name: Gunnar Wendt
- Geburtsdatum: 22.08.1971
- Geburtsort: Flensburg, Deutschland
- Nationalität: Deutsch
- Familienstand: Ledig

Schulausbildung

- 1978 - 1982: Grundschule, Falkenbergsschule, Flensburg
- 1982 - 1992: Gymnasium, Altes Gymnasium, Flensburg
- Mai 1992: Erlangung der allgemeinen Hochschulreife

Hochschulstudium

- 1998 - 2004: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Diplomstudiengang Psychologie
- Oktober 2000: Vordiplom
- März 2004: Diplom

Berufliche Erfahrungen

- 2000 - 2004: Wissenschaftliche Hilfskraft für Prof. Dr. Mausfeld, Institut für Psychologie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
- seit Oktober 2004: Wissenschaftlicher Mitarbeiter von Prof. Dr. Mausfeld, Institut für Psychologie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel