



INSTITUT FÜR PSYCHOLOGIE  
CHRISTIAN-ALBRECHTS-UNIVERSITÄT ZU KIEL

**Umfeldeinflüsse auf die Wahrnehmung von Luminanzkontrasten:  
Untersuchung zur Rolle von Adaptation und Farbzerlegung  
bei der Chubb-Illusion**

Diplomarbeit  
von  
Ole Traupe

Kiel, April 2005

Betreuung: Dr. Franz Faul  
Anschrift des Verfassers: Ole Traupe, Samwerstraße 1, 24118 Kiel

## INHALT

1. Einleitung .....	5
2. Theoretischer Hintergrund .....	7
2.1 Die Chubb-Illusion .....	7
Phänomenale Aspekte .....	7
Erklärungsmodell nach lateraler Inhibition .....	8
2.2 Methodische Aspekte .....	10
Die Nulling-Methode .....	10
Verwendete Reize .....	12
Skalierung der wahrgenommenen Helligkeit .....	14
Skalierung des wahrgenommenen Kontrasts .....	17
2.3 Verschiedene Befunde zur Chubb-Illusion .....	20
Grundzüge der Kontrastinduktion .....	20
Einfluss des mittleren Infeld- und Umfeldkontrasts .....	20
Einfluss von Umfeldgröße und -abstand .....	23
Einfluss der relativen Umfeldorientierung .....	23
Einfluss der relativen Umfeldkörnung .....	26
Interokularer Transfer .....	28
2.4 Chubb-Illusion und Farbzerlegung .....	29
Farbzerlegung und Episkotister-Modell .....	29
Kontrastinduktion und Farbzerlegung .....	34
2.5 Ableitung der Fragestellung .....	37
3. Experimente .....	39
3.1 Allgemeine Methode .....	39
Versuchsaufbau .....	39
Reize .....	39
Messverfahren .....	41
Versuchspersonen .....	43

---

3.2 Replikationen .....	45
3.2.1 Einfluss der relativen Texturkörnung.....	45
Konzeptueller Rahmen.....	45
Methode.....	46
Ergebnisse.....	47
3.2.2 Einfluss der relativen Texturorientierung .....	49
Konzeptueller Rahmen.....	49
Methode.....	49
Ergebnisse.....	51
3.3 Experimente zur genaueren Untersuchung der Chubb-Illusion .....	52
3.3.1 Einfluss der Umfeldamplitude – Sinus-Nulling.....	52
Konzeptueller Rahmen.....	52
Methode.....	52
Ergebnisse.....	53
3.3.2 Einfluss der Umfeldamplitude – asymmetrischer Kontrastabgleich.....	56
Konzeptueller Rahmen.....	56
Methode.....	65
Ergebnisse.....	66
3.3.3 Vergleich der statischen und der dynamischen Methode.....	71
3.4 Weitere Experimente.....	72
3.4.1 Einfluss der Verankerung der Nulling-Kurve .....	72
Konzeptueller Rahmen.....	72
Methode.....	73
Ergebnisse.....	73
3.4.2 Einfluss des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld.....	75
Konzeptueller Rahmen.....	75
Methode.....	75
Ergebnisse.....	76
4. Diskussion und Überlegungen zur Farbinduktion.....	79
4.1 Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der Rolle von Adaptation und Farbzerlegung.....	79
Körnungs- und Orientierungsselektivität.....	79
Statische Reizdarbietung.....	80
Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld.....	82
Zusammenfassung.....	83
4.2 Überlegungen zur Rolle von Farbinduktion bei der Chubb-Illusion.....	83
Kontrastinduktion und Farbinduktion.....	83

---

Modellbildung .....	85
Überprüfung der Vorhersage.....	88
Parameterschätzung für die Farbinduktion. ....	95
Diskussion bisheriger Befunde im Rahmen des Farbinduktionsmodells.....	96
Zusammenfassung.....	99
4.3 Ausblick .....	100
Literatur.....	102
Anhang .....	104
A. MATLAB-Skript zur Erzeugung binärer Farbreize .....	104
B. MATLAB-Skript zur Erzeugung orientierter binärer Farbreize.....	105

## 1. EINLEITUNG

Wann immer bestimmte globale Eigenschaften einer visuellen Szene Einfluss auf den Wahrnehmungseindruck nehmen, den das Wahrnehmungssystem von einem in dieser Szene befindlichen Objekt erzeugt, spricht man von *Kontexteinflüssen*. Solche Kontexteinflüsse werden oft anhand von Reizanordnungen untersucht, welche aus zumindest zwei räumlich und funktional voneinander abgrenzbaren Flächenanteilen bestehen. Zum einen enthalten sie eine zumeist größere Fläche, das *Umfeld*, welches mit der Intention konstruiert wird, dass es gerade diejenigen globalen Eigenschaften der visuellen Szene aufweisen soll, welche die jeweils einflussvermittelnden Prozesse hinreichend bestimmen (seien sie im Detail bekannt oder nicht). Zum anderen enthalten sie eine kleinere Fläche, das *Infeld*, welches in das Umfeld eingebettet ist und dessen Einfluss unterliegen soll, und an welchem in der Regel über verschiedenartige Vergleichsverfahren das Ausmaß des jeweiligen Kontexteffektes gemessen wird.

In einer eher sinnesphysiologisch orientierten Sichtweise wird diese meist als *Induktion* bezeichnete „Wirkung“ des Umfelds auf das Infeld über Mechanismen erklärt, welche die räumlichen Wechselwirkungen von einzelnen oder auch Gruppen von Nervenzellen beinhalten, die für die Verarbeitung ganz bestimmter Szenenmerkmale verantwortlich gemacht werden. Solche typischerweise inhibitorischen Wechselwirkungen werden meist unter dem Begriff der *Adaptation* subsumiert, was unter anderem der Annahme Rechnung trägt, dass sie für den jeweils angesprochenen Wahrnehmungsvorgang von einem gewissen situativen Anpassungswert sind. Auf der anderen Seite existieren für viele dieser Beobachtungen jedoch auch genuin psychologische Erklärungsansätze, die sich auf funktionale Aspekte und die den Phänomenen zugrunde liegenden Informationsverarbeitungsprozesse konzentrieren, wobei offen bleibt, wie diese konkret neuronal implementiert sind. Im Bereich der Farb- und Helligkeitswahrnehmung, um die es hier vor allem geht, wird beispielsweise diskutiert, inwieweit Phänomene der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung mit dem Versuch des visuellen Systems in Verbindung stehen, eine beleuchtungsunabhängige Repräsentation von Oberflächenfarben zu ermöglichen (Farbkonstanz) oder den Einfluss transparenter Überdeckungen zu erkennen und bei der Kodierung von Farben entsprechend zu berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit soll die so genannte *Chubb-Illusion* näher untersucht werden. Bei diesem Kontexteffekt aus dem Bereich der Farbwahrnehmung handelt es sich um das Phänomen, dass sich in Infeld-Umfeld-Reizen der wahrgenommene Kontrast eines konstant gehaltenen inhomogenen Infelds invers proportional zum Kontrast des umgebenden Umfelds verhält (Chubb, Sperling & Solo-

mon, 1989). Der gleiche physikalische Kontrast erscheint also in einem Umfeld mit höherem Kontrast geringer als in einem Umfeld mit niedrigerem Kontrast. Es sollen dabei zunächst zwei in der Literatur anzutreffende Erklärungen empirisch verglichen werden: die erstmals von Chubb et al. vorgeschlagene gängige Vorstellung eines Adaptationsprozesses, wie sie bereits oben angedeutet wurde, und eine alternative Deutung (D’Zmura & Singer, 1999; Lotto & Purves, 2001; Singh & Anderson, 2002), welche die Chubb-Illusion mit wahrgenommener Transparenz in Verbindung bringt.<sup>1</sup> Dieser neuere Erklärungsansatz verweist darauf, dass die zur Untersuchung der Chubb-Illusion verwendeten Reizanordnungen in der Regel mit einer Farbzerlegungsinterpretation kompatibel sind. Aus dieser Beobachtung heraus wurde die Hypothese formuliert, dass das Wahrnehmungssystem u.a. den Einfluss einer transparenten Überdeckung als für das Zustandekommen der Szene ursächlich annimmt, und die Integration dieser Information in den Wahrnehmungseindruck sich gerade im kontrastreduzierenden Effekt der Chubb-Illusion niederschlägt. Lotto und Purves (2001) stützen diese Überlegung unter anderem durch ihren Befund, dass bei Reizen, bei denen die Bedingungen für eine Farbzerlegung nicht erfüllt waren, die Chubb-Illusion deutlich schwächer ausfiel.

Schließlich ergeben sich im Verlauf der Diplomarbeit Hinweise, dass die Chubb-Illusion möglicherweise nicht vollständig *in terminis* eines der – zunächst als konkurrierend angenommenen – Erklärungsmodelle interpretiert werden kann. Vielmehr handelt es sich vermutlich um das Zusammenwirken verschiedener Effekte, wobei u.U. ein substantieller Anteil der Kontrastinduktion auf eine Form von Farbinduktion zurückzuführen ist, wie sie beispielsweise unter dem Begriff des *Simultankontrasts* bekannt ist. Daher erfolgt im Anschluss an den Versuch einer empirischen Entscheidung zwischen Adaptations- und Farbzerlegungshypothese zunächst eine Rückkehr auf die theoretische Ebene. Es wird ein Modell entwickelt, welches Kontrastinduktion unter Zuhilfenahme multipler Farbinduktionsvorgänge beschreiben und vorhersagen kann. Anschließend werden diese Vorhersagen mit den bisherigen empirischen Befunden verglichen, um diese zusätzliche Sichtweise der Kontrastinduktion zu stützen.

---

<sup>1</sup> Beide Erklärungsansätze konnten bislang nicht hinreichend bestätigt werden, sodass sie im Folgenden mit den Begriffen der Adaptations- und der Farbzerlegungshypothese bezeichnet werden.

## 2. THEORETISCHER HINTERGRUND

### 2.1 Die Chubb-Illusion

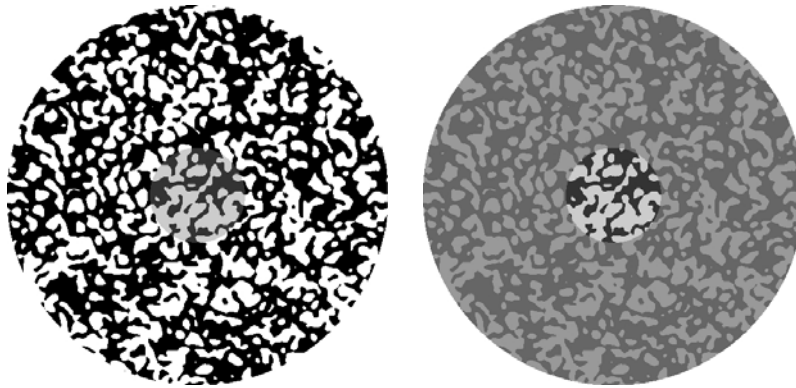
#### Phänomenale Aspekte.

Als Chubb-Illusion wird die Beobachtung bezeichnet, dass der wahrgenommene Kontrast eines inhomogenen Infelds vom Kontrast des Umfelds beeinflusst wird. Abb. 1 zeigt ein Beispiel der Chubb-Illusion anhand von Reizen, welche den von Singer und D’Zmura (1994, 1995; D’Zmura & Singer, 1996) verwendeten ähnlich sind. Die Infelder sind auf beiden Seiten physikalisch identisch; das linke Infeld in der *inkrementellen* Situation (Kontrast im Umfeld höher als im Infeld) erscheint jedoch deutlich kontrastärmer als das rechte in der *dekrementellen* Situation (Kontrast im Umfeld niedriger als im Infeld). Da bislang nicht hinreichend geklärt ist, ob es in der dekrementellen Situation zu einer Kontrasterhöhung kommt, oder ob im Rahmen der Chubb-Illusion ausschließlich eine unterschiedlich stark ausgeprägte Verringerung des wahrgenommenen Kontrasts vorliegt, soll im weiteren von dem beobachtbaren Effekt richtungsneutral als *Kontrastinduktion* gesprochen werden.

Die Chubb-Illusion wurde nicht nur in der achromatischen Situation (vgl. Abb. 1), sondern auch für chromatische Reize untersucht (Singer & D’Zmura, 1994, 1995; D’Zmura & Singer, 1996). Allerdings soll sich die Diplomarbeit ausschließlich auf achromatische Zusammenhänge beziehen, um den Umfang der durchgeführten Experimente handhabbar zu gestalten. Zudem waren die Ergebnisse für chromatische und achromatische Reize strukturell meist recht ähnlich (z.B. Singer & D’Zmura, 1994). Singer et al. schlossen hieraus, dass die verschiedenen Farbkontraste prinzipiell von den gleichen Mechanismen verarbeitet werden, und Unterschiede in der Effektgröße für die verschiedenen Chromatizitäten durch die Annahme farbspezifischer Skalierungsfaktoren erklärbar sind.<sup>2</sup> Auch wenn einige in der Literatur berichtete Studien zusätzlich farblich verschiedene Reize untersucht haben, finden somit in der Darstellung der bisherigen Befunde zur Chubb-Illusion ausschließlich Teilergebnisse aus der achromatischen Situation Erwähnung.

---

<sup>2</sup> Dieser Sachverhalt ist letztendlich ungeklärt, allerdings soll auf diese Fragestellung in der Diplomarbeit nicht eingegangen werden.



**Abbildung 1.** Die Chubb-Illusion: zwei physikalisch identische Infelder in zwei unterschiedlich kontrasthaltigen Umfeldern, eine inkrementelle (li.) und eine dekrementelle (re.) Situation; der wahrgenommene Infeldkontrast auf der linken Seite ist gegenüber dem rechten Infeld deutlich reduziert.

### **Erklärungsmodell nach lateraler Inhibition.**

Bereits Chubb et al. (1989) gingen davon aus, dass der für diesen Effekt verantwortliche Mechanismus – ähnlich der lateralen Inhibition in der Farbwahrnehmung – auf der räumlichen Wechselwirkung von Nervenzellen beruht, welche ausschließlich für die Verarbeitung von Kontrastinformationen zuständig sind und daher auch vereinfacht als *Kontrastrezeptoren* bezeichnet werden können. Diese Interpretation wurde gestützt durch ihren Befund, dass eine Kontrastmodulation im Umfeld ausschließlich einen Einfluss auf den wahrgenommenen Kontrast des Infelds zu haben scheint, und sich nicht auf deren mittlere Helligkeit auswirkt (Chubb et al., 1989). Der postulierte neuronale Mechanismus setzt voraus, dass räumlich benachbarte Rezeptoren, die den selben Aspekt des visuellen Wahrnehmungseindrucks kodieren, in inhibitorischer Weise multipel miteinander verknüpft sind. So übt jeder Rezeptor über diese Verknüpfungen einen hemmenden Einfluss auf mit ihm verbundenen Einheiten aus, und zwar gerade in dem Maße, wie es seiner momentanen Erregung entspricht. Stark erregte Rezeptoren üben demzufolge einen vergleichsweise hohen inhibitorischen Einfluss aus, wohingegen die Hemmung schwach erregter Nervenzellen in der Regel vernachlässigt wird. Auch wenn das Prinzip der lateralen Inhibition grundsätzlich auf die unterschiedlichsten Sinnesmodalitäten und -qualitäten angewendet werden kann, wurde es bislang hauptsächlich im Kontext der Farbwahrnehmung beschrieben und untersucht. Hier soll es auf genannte Weise an den Grenzen von Flächen unterschiedlicher Chromatizität zu einer Erhöhung des wahrgenommenen Kontrasts beitragen.

Der Simultankontrast ist ein solches Phänomen und gleichzeitig ein mit der Chubb-Illusion verwandter Kontexteffekt. Dieser besteht für den hier relevanten achromatischen Fall darin, dass die wahrgenommene Helligkeit eines homogenen Infelds sich (in gewissen Grenzen) invers proportional

zur Leuchtdichte des angrenzenden homogenen Umfelds verhält.<sup>3</sup> Um den Effekt zu verdeutlichen, ist in Abb. 2 dasselbe Infeld mit einem (diesmal bzgl. der Leuchtdichte) inkrementellen und einem dekrementellen Umfeld dargestellt. Ein gängiger Erklärungsansatz hierzu bedient sich ebenfalls des Mechanismus der lateralen Inhibition, welcher bereits von Mach (1865) für die Erklärung des von ihm erstmals beschriebenen Kantenphänomens der *Machschen Bänder* herangezogen wurde. Er beobachtete, dass in direkter Nähe einer Grenze zweier Flächen unterschiedlicher Leuchtdichte auf der hellen Seite ein sich von der Fläche deutlich abhebendes noch helleres Band verläuft, und auf der dunklen Seite ein dunkles Pendant hierzu zu erkennen ist.<sup>4</sup> Da allerdings beim Simultankontrast für die Helligkeitsverschiebung der gesamten Fläche dieses Kantenphänomen als Erklärung nicht auszureichen scheint, werden hierfür zumeist komplexere Inhibitionsmechanismen angenommen, auf die an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden soll (z.B. Grossberg & Mingolla, 1985).

Es liegen jedoch inzwischen einige empirische Befunde vor, die darauf hindeuten, dass eine rein auf lateraler Inhibition und Adaptationsprozessen beruhende Erklärung solcher Kontexteffekte unzulänglich ist. So konnte z.B. Gilchrist (1977) zeigen, dass die wahrgenommene Helligkeit einer Fläche deutlich von der wahrgenommenen Beleuchtungssituation einer visuellen Szene abhängt: bei gleicher Leuchtdichte wird ein Testfeld, sofern es einer starken Beleuchtung ausgesetzt scheint, als wesentlich dunkler beurteilt, als wenn es als im Schatten liegend wahrgenommen wird. Die Daten von Ekroll, Faul, Niederée und Richter (2002) und Ekroll, Faul und Niederée (2004) deuten zudem darauf hin, dass große helligkeitsinduzierende Effekte durch Simultankontrast nur bei geringen Kontrasten zu beobachten sind.<sup>5</sup> Darüber hinaus liegt in diesen Fällen im Bereich des Infelds ein dualer Farbeindruck vor, bei welchem ein Betrachter „an der selben Stelle“ der visuellen Szene zwei unterschiedliche Farben wahrnimmt. Da ein derartiger Wahrnehmungseindruck in der Regel in Situationen auftritt, die mit einer Farbzerlegungsinterpretation kompatibel sind, also einer Interpretation der visuellen Szene als teilweise transparent überdeckt, liegt der Schluss nahe, dass bereits bei solch einfachen Phänomenen wie dem Simultankontrast der Einfluss von Farbzerlegungsprozessen berücksichtigt werden muss.

---

<sup>3</sup> Analog zur Kontrastinduktion soll von diesen Änderungen der wahrgenommenen Helligkeit allgemein als von *Farbinduktion* gesprochen werden, und betreffende Flächen werden in der Regel in Farbbegriffen beschrieben, auch wenn im vorliegenden Kontext häufig Leuchtdichten und wahrgenommene Helligkeiten gemeint sind.

<sup>4</sup> Die wahrgenommene Helligkeit einer Reizfläche, welche auch als *brightness* bezeichnet wird, korrespondiert nicht immer mit der durch colorimetrische Messverfahren ermittelbaren Leuchtdichte (zB Wyszecki & Stiles, 1982). Sofern nicht explizit der Begriff der Leuchtdichte verwendet wird, ist mit dem unspezifischen Gebrauch des Wortes „Helligkeit“ stets die wahrgenommene Helligkeit einer Fläche, also deren *brightness* gemeint.

<sup>5</sup> Gemeint sind hier prozentuale Änderungen der wahrgenommenen Helligkeitsdifferenz der beteiligten Flächen.



**Abbildung 2.** *Simultankontrast: zwei physikalisch identische Infelder in zwei unterschiedlich hellen Umfeldern, eine inkrementelle (li.) und eine dekrementelle (re.) Situation; die wahrgenommene Helligkeit des Infelds auf der linken Seite ist gegenüber dem rechten Infeld deutlich reduziert.*

Somit ist nicht unbedingt davon auszugehen, dass in einer deutlich komplexeren Situation, wie sie beispielsweise die Chubb-Illusion darstellt, mittels recht einfacher – und zudem ausschließlich auf der Ebene der neuronalen Implementierung beschreibbarer – Mechanismen wie der lateralen Inhibition sämtliche Eigenschaften des Wahrnehmungseindrucks erklärbar sind. Sofern für die Erklärung von Phänomenen im Rahmen der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung ein derartiges neuronales Verschaltungsprinzip von Bedeutung ist, dann erscheint es unumgänglich das Augenmerk auf die funktionale Bedeutung des jeweils untersuchten Wahrnehmungseindrucks zu richten, um zu erkennen, unter welchen Voraussetzungen und in welcher Weise genau es zur Anwendung kommt.

## **2.2 Methodische Aspekte**

### **Die Nulling-Methode.**

Um die Stärke der Kontrastinduktion bei der Chubb-Illusion zu messen, verwendeten bereits Chubb et al (1989) statt der in Abb. 1 dargestellten statischen Reize dynamische, in denen zwar der zeitliche Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld identisch war, der Umfeldkontrast jedoch sinusförmig über die Zeit moduliert wurde: der Leuchtdichtkontrast der hellen und dunklen Flächenanteile in diesen Reizen variierte beispielsweise mit einer Frequenz von 0.5 Hz. Geht man von einer invers proportionalen Beziehung zwischen Umfeldkontrast und wahrgenommenem Kontrast im Infeld aus, so sollte die zeitliche Kontrastmodulation im Umfeld in einem konstant gehaltenen Infeld eine um 180 Grad phasenverschobene, ebenfalls sinusförmige Änderung des wahrgenommenen Kontrasts bewir-

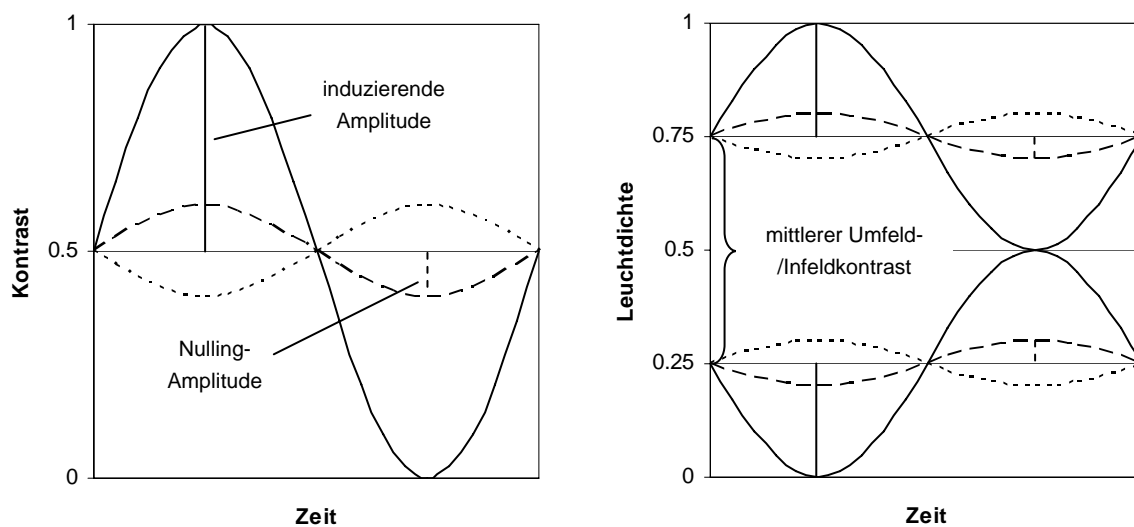
ken. Ein hoher Kontrast im Umfeld bewirkt also eine Kontrastverringern, ein niedriger Kontrast im Umfeld entsprechend eine Erhöhung des Kontrasts im Infeld.

Die dem Verfahren von Chubb et al. zugrunde liegende Idee zur Messung der Kontrastinduktion ist nun, die induzierte Kontraständerung im Infeld durch eine tatsächliche, physikalische Kontraständerung in Gegenrichtung zum induzierten Kontrast zu kompensieren (*Nulling*), und auf diese Weise das Infeld perzeptuell konstant zu machen. Anhand der von der Versuchsperson eingestellten Amplitude dieser kompensierenden Kontrastmodulation, die wiederum in Phase mit der induzierenden Kontrastmodulation im Umfeld verläuft, lässt sich nun die Stärke der Kontrastinduktion messen. Ein solches Sinus-Nulling der wahrgenommenen Kontraständerungen ist wiederholt verwendet worden, und Versuchspersonen berichteten im Rahmen solcher Experimente von perzeptuell zufrieden stellenden Ergebnissen (Singer & D’Zmura, 1994). Da allerdings bislang nicht hinreichend belegt ist, ob das Nulling mittels eines sinusförmigen Kontrastverlaufs die optimale Lösung des Nulling-Problems darstellt, soll die invers proportionale Beziehung von induzierendem zu wahrgenommenem Kontrast im weiteren zunächst als eine Annahme behandelt werden.

Die zeitlichen Kontrastverläufe von Umfeld und Infeld sind für eine maximale Kontrastmodulation im Umfeld schematisch in Abb. 3 auf der linken Seite dargestellt.<sup>6</sup> Die durchgezogene Kurve beschreibt den Verlauf der Kontrastmodulation im Umfeld, die unterbrochene den des für das Nulling verwendeten Infeldkontrastes. Die gepunktete Linie ist hypothetischer Natur und stellt den Verlauf des wahrgenommenen Kontrasts im Infeld dar, die bei konstantem physikalischem Infeldkontrast vorliegen sollte. Die horizontale Linie steht für den konstanten mittleren Kontrast von Umfeld und Infeld. Die Helligkeitsverläufe, welche sich aus den bei der Nulling-Methode verwendeten Kontrastverläufen ergeben, sind in Abb. 3 auf der rechten Seite veranschaulicht. Das obere Kurventripel stellt – der Zuordnung aus der linken Abbildung entsprechend – die Helligkeitsverläufe für die hellen Flächenanteile aus Umfeld und Infeld dar, das untere Tripel jene für die dunklen. Die horizontalen Linien stehen für die konstante mittlere Leuchtdichte der Hellanteile (oben), der Dunkelanteile (unten) und der Gesamtfläche (Mitte) des Reizes jeweils bzgl. Umfeld und Infeld. Die senkrechte Linie beim ersten bzw. zweiten Extremwert der jeweiligen Kurve entspricht der Amplitude des induzierenden (durchgezogen) bzw. kompensierenden (unterbrochen) Kontrast- bzw. Leuchtdichteverlaufes. Dieses Messverfahren stellt das Standardparadigma für die meisten weitergehenden Untersuchungen der Chubb-Illusion dar, und sofern nicht anders angegeben wurden die im Folgenden aufgeführte Ergebnisse mit einer diesem Verfahren verwandten Methode erhoben.

---

<sup>6</sup> Die hier der Anschaulichkeit halber fiktiven Werte beziehen sich in der Regel auf den mit den verwendeten Geräten maximal darstellbaren Kontrast, was durch den Wertebereich der Ordinate von 0 bis 1 angedeutet werden soll. Dies gilt für alle weiteren Kontrastangaben, sofern nicht anders beschrieben.



**Abbildung 3.** Umfeld- und Infeldmodulation bei der Nulling-Methode: abgetragen ist der Anteil des maximal darstellbaren Kontrasts/der maximal darstellbaren Leuchtdichte gegen die Zeit. Das linke Diagramm zeigt die Kontrastverläufe des Umfelds: die durchgezogene Kurve beschreibt den Verlauf des induzierenden Kontrasts im Umfeld, die gestrichelte Kurve den des Nulling-Kontrasts im Infeld; die gepunktete Kurve stellt den hypothetischen Verlauf des induzierten wahrgenommenen Kontrasts im Infeld dar. Die horizontale Linie steht für den konstanten mittleren Kontrast von Umfeld und Infeld, die vertikalen Linien repräsentieren induzierende (durchgezogen) und Nulling-Amplitude (unterbrochen). Das rechte Diagramm zeigt die Verläufe der Leuchtdichten und wahrgenommenen Helligkeiten: die durchgezogenen Kurven beschreiben den Verlauf der Leuchtdichten im Umfeld, die gestrichelten Kurven die des Infelds; die gepunkteten Kurven stellen den hypothetischen Verlauf der induzierten wahrgenommenen Helligkeiten im Infeld dar. Die beiden Kurventripel gelten für die hellen (o.) und dunklen (u.) Anteile von Umfeld und Infeld respektive. Die horizontalen Linien stehen für die konstante mittlere Leuchtdichte der Hellanteile (oben), der Dunkelanteile (unten) und der Gesamtfläche (Mitte) jeweils bzgl. Umfeld und Infeld; die vertikalen Linien stellen induzierende (durchgezogen) und Nulling-Amplituden (unterbrochen) dar. Die Differenz der mittleren Leuchtdichte der Hell- und Dunkelanteile der Textur entspricht dem mittleren Kontrast von Umfeld bzw. Infeld.

## Verwendete Reize.

Das zur Untersuchung der Kontrastinduktion verwendete Reizmaterial ist mitunter sehr verschieden, was insbesondere dann interessant ist, wenn Studien, die unterschiedliche Reize verwendet haben, auch zu unterschiedlichen oder sogar widersprüchlichen Ergebnissen gelangen. Diese Reize lassen sich anhand ihrer Textur zumindest in drei Gruppen unterteilen, über welche an dieser Stelle ein kurzer Überblick gegeben werden soll.

Die erste Gruppe bilden *Zufallspunktmuster* aus einer gleichen Anzahl heller und dunkler Bildpunkte (siehe Abb. 4a), die während der Darbietung mit einer gewissen zeitlichen Frequenz neu generiert werden (z.B. 60 Hz, vgl. Chubb et al., 1989). Dies hat zum einen den Vorteil, dass sich keine

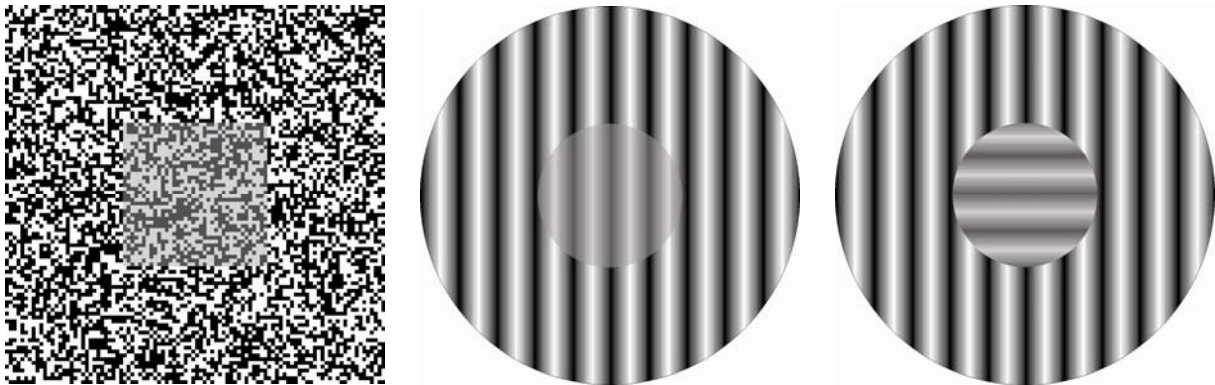
zeitlich stabilen Konturen innerhalb der Reizfläche ergeben, weshalb figurale Aspekte der Textur für die Erklärung beobachtbarer Effekte nicht berücksichtigt werden müssen. Andererseits ist der Erwartungswert der Leuchtdichte an jedem Punkt der Reizfläche identisch und entspricht der Leuchtdichte des zumeist homogen grauen Hintergrunds, wodurch keine lokale Hell-/Dunkeladaptation möglich ist und es somit bei der Betrachtung der Reize unter anderem nicht zum Auftreten von Nachbildern kommt. Darüber hinaus können an keiner Stelle der Reizfläche dauerhaft Simultankontraste entstehen, und somit sollten lokale Farbinduktionsprozesse bei der Verwendung dieser Reize nicht auftreten. Chubb et al. schlossen daraus, dass unter Verwendung von Zufallspunktmustern der beobachtete Kontrastinduktionseffekt nicht mittels gängiger auf Leuchtdichte basierender Helligkeitsmodelle erklärt werden kann. Schließlich wiesen sie darauf hin, dass aufgrund der Zufallspunktmuster leichte Augenbewegungen keinen Einfluss auf die räumlichen und zeitlichen Frequenzanteile des retinalen Bildes haben.

Die zweite Gruppe von Reizen ist die der *binären Farbmuster*, wie sie in Abb. 1 gezeigt sind. Diese Reize wurden beispielsweise von Singer und D’Zmura (1994, 1995; D’Zmura & Singer, 1996) verwendet und finden auch in den Experimenten der Diplomarbeit ihre Anwendung.<sup>7</sup> Im Gegensatz zu den im vorherigen Absatz beschriebenen regelmäßig neu generierten Punktmustern besitzen diese Reize eine zeitlich stabile Textur, was – entsprechend den Berichten verschiedener Versuchspersonen – bei längerer Darbietung und Dunkeladaptation zum Auftreten starker Nachbilder führt. Beobachtungen im Rahmen der Experimente dieser Diplomarbeit legen nahe, dass Nachbilder der Reiztextur die gezielte Beurteilung von Kontrast und Helligkeit erheblich beeinträchtigen können, und dass dieser Beeinträchtigung durch ein hinreichend lang gewähltes Interstimulusintervall vorgebeugt werden kann. Auch können bei diesen Reizen dauerhaft Simultankontraste auftreten, und Farbinduktionsprozesse sind damit nicht ausgeschlossen.

Eine dritte Gruppe von Reizen besitzt eine räumlich-sinusoidale Farbverteilung, auch bekannt als *Sinusgitter* (siehe Abb. 4b). Diese Reizklasse ist die einzige, deren Flächen nicht jeweils aus zwei diskreten Farbanteilen bestehen, sondern deren Hell- und Dunkelbereiche kontinuierlich ineinander übergehen. Hier ergeben sich zwar keine eindeutig bestimmbaren Konturen, allerdings gibt es Hinweise, dass auch hier figurale Aspekte nicht vernachlässigt werden dürfen. So fanden Solomon, Sperling und Chubb (1993), dass bei Reizen mit einer Sinusgitter-Textur die relative Orientierung der Texturanteile von Umfeld und Infeld einen Einfluss auf die Höhe des durch das Umfeld induzierten Infeldkontrasts hat (siehe Abb. 4c). Dazu kann es auch hier zu lokaler Adaptation kommen, und es ergeben sich – insbesondere wenn die Texturen von Umfeld und Infeld räumlich nicht in Phase verlaufen – u.U. erhebliche Simultankontraste und somit starke Effekte lokaler Farbinduktion.

---

<sup>7</sup> Näheres zur Generierungsmethode dieser Reize findet sich unter der Beschreibung des experimentellen Vorgehens im empirischen Teil dieser Arbeit.



**Abbildung 4.** *Verschiedene Reize zur Untersuchung der Chubb-Illusion. Links: Zufallspunktmuster, inkrementelle Situation. Mitte und rechts: Sinusgitter, inkrementelle Situation bei gemeinsamer bzw. orthogonaler Orientierung. Das erste Sinusgitter weist gegenüber dem zweiten eine deutliche Kontrastreduktion auf.*

Es sollte unmittelbar plausibel sein, dass Befunde, die mittels eines bestimmten Reizes erzielt wurden, nicht grundsätzlich auf alle Situationen übertragbar sind, in welchen Kontrastinduktion zu beobachten ist. Derartige Generalisierungen sollten stets Anlass zu gründlichen theoretischen Vorüberlegungen sein und nötigenfalls eine geeignete empirische Prüfung nach sich ziehen.

### **Skalierung der wahrgenommenen Helligkeit.**

Die wahrgenommene Helligkeit einer Fläche ist keine lineare Funktion ihrer Leuchtdichte, sondern lässt sich in grober Näherung durch eine negativ beschleunigt wachsende Kurve beschreiben. Genauer ist die wahrgenommene Helligkeit einer Fläche ungefähr proportional zur dritten Wurzel ihrer Leuchtdichte (vgl. Wyszecki & Stiles, 1982). Dieser Zusammenhang entspricht dem *Weber-Fechnerschen Gesetz*, welches für diesen Fall besagt, dass der kleinste erkennbare Leuchtdichtezuwachs (engl. „just noticeable difference“) einer Fläche mit dem Ausgangswert für diesen Zuwachs ansteigt (Fechner, 1860). Hieraus folgt, dass eine Veränderung der Leuchtdichte einer Fläche um eine definierte Schrittweite in einem niedrigen Skalenbereich eine wesentlich stärkere wahrgenommene Helligkeitsänderung bewirkt als in einem hohen Skalenbereich.

Die Amplitude für die induzierende Kontrastmodulation im Umfeld wird nun (im achromatischen Fall) typischerweise durch gleichabständige Schritte auf der Leuchtdichteskala festgelegt, wobei für die hellen und dunklen Farbanteile des Umfelds in der Regel die gleichen Schrittweiten verwendet werden.<sup>8</sup> Dies hat jedoch zur Folge, dass die Kontrastmodulation im Umfeld in den dunklen Farbantei-

<sup>8</sup> Eine gängige Methode zur Kontrastmodulation binärer Farbteile in entsprechenden Computerprogrammen impliziert die separate Änderung der zwei distinkten Farbanteile.

len des Infelds eine wesentlich stärkere Helligkeitsänderung hervorruft, als sie in den hellen Farbanteilen zu beobachten ist. Dieser Sachverhalt ist allerdings unter gewissen Voraussetzungen unproblematisch für eine Messung der Kontrastinduktion, da bei der Nulling-Methode (wie bei verschiedenen anderen Vergleichsverfahren) die Nulling-Amplitude (oder ein vergleichbares Kontrastmaß) nach der gleichen Logik bestimmt wird – ebenfalls über eine definierte Schrittweite auf der Leuchtdichteskala. So wäre zwar in den dunklen Flächenanteilen eine wesentlich stärkere Helligkeitsänderung zu beobachten, jedoch würde für die Kompensation der Helligkeitsänderungen beider Infeldfarben die gleiche Amplitude benötigt, da diese sich wiederum auf die beiden Flächenanteile entsprechend unterschiedlich stark auswirkt.

Es ist jedoch zu fordern, dass die verwendeten Reize bzgl. der relativen Flächenanteile ihrer Farben ausbalanciert sind. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass mit den hier verwendeten Reizen auch Farbinduktion stattfindet, wie sie unter dem Begriff des Simultankontrasts bekannt ist (vgl. Abschnitt 2.2, *Verwendete Reize*). Eine derartige Farbinduktion könnte eine Beeinflussung des wahrgenommenen Infeldkontrasts bewirken, welche zusätzlich zu der von Chubb et al. (1989) gemeinten *Kontrast-Kontrast-Wechselwirkung* der Chubb-Illusion zu beobachten wäre. Daher kann sie gleichsam als eine *Leuchtdichte-Kontrast-Wechselwirkung* bezeichnet werden. Ein Modell, welches Kontrastinduktion aufgrund von Farbinduktionsvorgängen beschreiben und vorhersagen kann, wird im Rahmen des Diskussionsteils dieser Arbeit entwickelt (vgl. Abschnitt 4.2).<sup>9</sup> Es ergeben sich in diesem Rahmen auch empirische Hinweise, die das Auftreten von Farbinduktion im Rahmend er Chubb-Illusion – zumindest mit den hier verwendeten Reizen – nahe legen. Sofern jedoch die Reize bzgl. der relativen Flächenanteile ihrer beiden Farben aufbalanciert sind, sollte diese Farbinduktion derart symmetrisch vorliegen, dass sie sich in ihrer Intensität bzgl. der beiden Infeldfarben nicht unterscheidet. In diesem Fall könnte zwar aus der Ermittlung einer Nulling-Amplitude für den Infeldkontrast nicht auf den Anteil einer Kontrast-Kontrast-Wechselwirkung an der Chubb-Illusion geschlossen werden, da gleichsam Leuchtdichte-Kontrast-Wechselwirkungen gemessen würden, allerdings wäre eine Erfassung des beobachtbaren Gesamteffekts der Kontraständerungen gegeben.

Sofern die Flächenanteile der Reize nicht ausbalanciert wären, würde sich möglicherweise eine größere Farbinduktionswirkung des stärker repräsentierten Farbanteils ergeben, da Farbinduktion bekanntermaßen u.a. von der Größe der induzierenden Fläche abhängt. Dies würde in einer asymmetrischen Induktion resultieren, da sich zwar der betreffende Farbanteil des Umfelds auf beide Infeldfarben auswirkt, jedoch das Ausmaß dieses Einflusses mit zunehmendem Farbunterschied der beteiligten Flächen anwächst und somit bzgl. der im Mittel verschiedenen Infeldfarbe stärker ausfällt als bzgl. der im Mittel identischen. Wäre also beispielsweise der dunkle Farbanteil der Reize flächenmäßig überrepräsentiert, so ergäbe sich eine stärkere Änderung der hellen Infeldfläche. In der stati-

---

<sup>9</sup> Das zentrale Konzept dieses Modells stellt das lineare Zusammenwirken der vier Farbinduktionswirkungen der zwei Umfeld- auf die zwei Infeldfarben dar. Hierbei ist zum einen von Bedeutung, dass jeweils eine Infeldfarbe mit einer Umfeldfarbe im Mittel identisch ist, und sich von der anderen Umfeldfarbe unterscheidet. Zum anderen spielt die nonlineare Beziehung von induzierender zu induzierter Farbe eine große Rolle.

schen Situation resultierte folglich neben einer wahrgenommenen Kontraständerung eine Verschiebung der mittleren Gesamthelligkeit des Infelds, wohingegen sich in der dynamischen Situation (beispielsweise im Rahmen eines Nulling-Experiments) unterschiedliche Nulling-Amplituden für die separaten Helligkeitsänderungen der Infeldanteile ergäben.

Eine mögliche Lösung des Nulling-Problems wäre dann ein Kompromiss zwischen dem zeitlich konstanten Erscheinungsbild der beiden Infeldanteile. Hierfür sei darauf hingewiesen, dass im Rahmen üblicher Nulling-Experimente für ein Nulling von Kontraständerungen die Leuchtdichten der separaten Infeldanteile, genauer deren Leuchtdichteamplituden, gleichmäßig geändert werden. Daher wäre ein exaktes Nulling sämtlicher Kontrast- und Helligkeitsänderungen nicht möglich. Und überdies würden dann mit einem solchen Kompromiss neben Kontrast-Kontrast- und Leuchtdichte-Kontrast-Wechselwirkungen auch *Leuchtdichte-Leuchtdichte-Wechselwirkungen* erfasst, da die ungleichmäßigen Farbinduktionseinflüsse der Umfeldfarben nicht mehr vollständig *in terminis* von Kontrast beschreibbar wären. Von Kontraständerungen lässt sich nur dann sprechen, wenn sich eine Umfeldmodulation nur auf den wahrgenommenen Infeldkontrast, nicht aber auf deren mittlere Gesamthelligkeit auswirkt.

Zusätzlich würde ein derartiger Kompromiss möglicherweise in dem Sinne zugunsten der Helligkeitsänderungen der dunkeln Infeldanteile ausfallen, dass Versuchspersonen bei einem Nulling stärker auf das konstante Erscheinungsbild der dunklen Farbanteile fokussieren. Hier vorliegende Helligkeitsänderungen sind nach Überlegungen zur nonlinearen Beziehung von induzierender zu induzierter Farbe in stärkerem Maße wahrnehmbar (s.o.). Eine Tendenz zur Fokussierung auf den dunklen Infeldanteil ließ sich im Rahmen der durchgeführten Experimente der Diplomarbeit deutlich feststellen. Darüber hinaus unterscheidet sich nicht nur die Stärke der wahrgenommenen Helligkeitsänderungen bzgl. der beiden Infeldanteile, sondern es ergibt sich aus dem Weber-Fechnerschen Gesetz über das Konzept der „just noticeable difference“ auch ein Unterschied in den Wahrnehmungsschwellen für unterschiedliche Skalenbereiche. So wäre möglicherweise eine betragsmäßig definierte Leuchtdichtemodulation, die in einem niedrigen Skalenbereich deutlich wahrnehmbar ist, in einem höheren Skalenbereich nicht mehr erkennbar. Auch hieraus ergibt sich bzgl. des vermeintlichen Nullings von Kontraständerungen für die dunklen Infeldanteile ein deutlich stärkere Bedeutung der dunklen gegenüber den hellen Infeldanteilen. Eine Kompensation leichter Helligkeitsänderungen im hellen Infeldanteil würden möglicherweise zugunsten der Kompensation im dunklen Infeldanteil vernachlässigt. Auch aus diesem Grund wäre eine Interpretation des Nullings als eine ausschließliche Kompensation von Kontraständerungen keine adäquate Betrachtungsweise.

Verschiedene Aspekte der vorgetragenen Argumentation sind spekulativ; es handelt sich hier vorwiegend um eine Verknüpfung von Vermutungen und deren möglichen Auswirkungen. Dieser Abschnitt soll allerdings zeigen, dass es aus verschiedenen Gründen sinnvoll erscheint, für die Untersuchung der Chubb-Illusion Reize zu verwenden, die bzgl. der relativen Flächenanteile der beiden enthaltenen Farben ausbalanciert sind: auf diese Weise kann der gemessene Effekt ausschließlich als Kontrastinduktion betrachtet werden. Die genannte Symmetriebedingung an die Reize dient folglich

einer Wahrung der Validität des Grundgedankens für die Messung der Chubb-Illusion. Ergebnisse von Voruntersuchungen zur Diplomarbeit haben gezeigt, dass bei Verwendung nicht ausbalancierter Reize die Höhe der Nulling-Amplitude deutlich von der abweicht, welche sich aus der Verwendung von Reizen mit gleichmäßig enthaltenen Farbanteilen ergibt. Genauer war die Nulling-Amplitude für Reize mit einem überrepräsentierten Dunkelanteil der Textur deutlich höher als für balancierte Reize.

Im Vorfeld der Diplomarbeit wurde überlegt, ob sämtliche Leuchtdichteänderungen für die experimentellen Manipulationen anhand der beschriebenen Nonlinearität in der Weise korrigiert werden sollten, dass sich stets gleichabständige Änderungen der wahrgenommenen Helligkeit (anstatt der Leuchtdichte) ergäben. Auf eine derartigen Korrektur wurde allerdings verzichtet, da – wie gezeigt werden konnte – die vorliegende Nonlinearität für solche Reize unkritisch ist, die bzgl. der beiden Farbanteile ausbalanciert sind. Darüber hinaus soll durch diesen Verzicht die Vergleichbarkeit der hier erzielten Ergebnisse mit denen aus der Literatur gewahrt werden, da bisher an keiner dem Autor bekannten Studie zur Chubb-Illusion eine derartigen Korrektur berichtet wurde.

### **Skalierung des wahrgenommenen Kontrasts.**

(a) Kontrastmaße, die den perzeptuellen (nonlinearen) Zusammenhang von Leuchtdichte und wahrgenommener Helligkeit mit einbeziehen, unterscheiden sich von der einfachen Leuchtdichtedifferenz dadurch, dass sie zusätzlich anhand eines Adaptationsparameters relativiert werden. Der Grundgedanke entspricht erneut dem Weber-Fechnerschen Gesetz, welches besagt, dass ein betragsmäßig definierter (räumlicher oder zeitlicher) Leuchtdichtezuwachs in seiner perzeptuellen Ausprägung in charakteristischer Weise von dem Ausgangswert für diesen Zuwachs abhängt (vgl. Skalierung der wahrgenommenen Helligkeit.). Genauer wird dies in Bezug auf Kontrastmaße derart verstanden, dass bei dauerhafter Betrachtung einer visuellen Szene – abhängig von ihrer speziellen Leuchtdichteverteilung – ein gewisser Adaptationszustand herrscht, der sich bei auftretenden Leuchtdichteänderungen dem Weber-Fechnerschen Gesetz entsprechend in der Änderung der wahrgenommenen Helligkeit niederschlägt. Diesem Sachverhalt soll durch die genannte Relativierung Rechnung getragen werden.

Ein Beispiel für ein derartiges Kontrastmaß ist der *Weber-Kontrast*, der sich aus der Relativierung einer Leuchtdichtedifferenz an einem Adaptationsparameter ergibt, welcher u.a. der Leuchtdichte des Szenenhintergrundes entsprechen kann. Sei  $L_s$  beispielsweise die Leuchtdichte der Buchstaben auf diesem Blatt Papier und  $L_h$  die des weißen Hintergrundes, so ergibt sich der Weber-Kontrast  $C_W$  wie folgt:

$$C_W = \frac{L_r - L_h}{L_h}. \quad (1)$$

Nun treten allerdings auch Fälle auf, in denen kein eindeutiges Maß für die Adaptation im Sinne einer in der Szene hauptsächlich enthaltenen Fläche oder Farbe zu finden ist. Ein solcher Fall ist beispielsweise durch die Reize gegeben, anhand derer die Chubb-Illusion gängigerweise untersucht wird. Hier findet über weite Anteile der Szene ein dauerhafter periodischer (Sinusgitter) oder auch unregelmäßiger (binäre Farbreize, Zufallspunktmuster) Farbwechsel statt, sodass der entsprechende Adaptationsparameter aus der vorliegenden Leuchtdichteverteilung in geeigneter Weise geschätzt werden muss. Im Falle des *Michelson-Kontrasts* handelt es sich hierbei gerade um die Summe (bzw. den zweifachen Mittelwert) der Leuchtdichten der beteiligten Flächen. Seien  $L_{min}$  und  $L_{max}$  die minimalen und maximalen in einer visuellen Szene vertretenen Leuchtdichten, so ergibt sich der Michelson-Kontrast  $C_M$  der entsprechenden Fläche wie folgt:

$$C_M = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} = \frac{L_{range}}{2 \cdot L_{mean}} . \quad (2)$$

Singh und Anderson (2002) untersuchten den Zusammenhang von Leuchtdichtekontrast und wahrgenommener Transparenz und zeigten, dass die nonlineare Beziehung von wahrgenommener Helligkeit zur Leuchtdichte für das Verständnis dieses Zusammenhangs entscheidend ist. Sie ließen Sinusgitterreize nach der wahrgenommenen Durchlässigkeit eines über dem Infeld gesehenen Filters beurteilen und stellten fest, dass gerade der Michelson-Kontrast diese Urteile derart vorhersagt, dass Reizen gleichen Michelson-Kontrasts eine gleiche wahrgenommene Durchlässigkeit zugeschrieben wurde. Die Autoren deuteten diesen Befund so, dass dem Michelson-Kontrast für die Vorhersage wahrgenommener Transparenz eine entscheidende Rolle zukommt.

Lotto und Purves (2001) untersuchten den Zusammenhang der Chubb-Illusion mit Farbzerlegung, und somit ebenfalls den Zusammenhang von Kontrast und wahrgenommener Transparenz. Aus ihren Ausführungen wurde jedoch nicht immer deutlich, auf welches Kontrastmaß sich die experimentellen Manipulationen in ihrer Studie bezogen. Doch erzielten sie zumindest verschiedene Hinweise, dass Farbzerlegung für ein Verständnis der Chubb-Illusion nicht außer Acht gelassen werden darf. Auch Singer und D’Zmura (1994, 1995; D’Zmura & Singer, 1996) verwendeten für ihre Untersuchung der Chubb-Illusion kein explizit definiertes Kontrastmaß, sondern es wird aus ihren Ausführungen deutlich, dass sie für die Vorgabe von Umfeld- und Infeldkontrast stets auf Leuchtdichtedifferenzen zurückgriffen. Es ist jedoch anzumerken, dass aufgrund dieser Festlegung möglicherweise nicht alle Befunde zufrieden stellend im Hinblick auf Farbzerlegung interpretiert werden können.

Auch in der vorliegenden Arbeit wird induzierender, kompensierender und anderweitig auftretender Leuchtdichtekontrast der Vorgabe von Singer und D’Zmura entsprechend über Leuchtdichtedifferenzen definiert, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit den in der Literatur berichteten zu gewährleisten. Darüber hinaus liegen in den Experimenten der Diplomarbeit oft Situationen vor, in denen Umfeld und Infeld einen gemeinsamen mittleren Kontrast besitzen. Aus Gleichung (2) ist nun ersichtlich, dass bei der Verhältnissbildung zweier Michelson-Kontraste die beiden Relativierungen der Leuchtdichtedifferenzen der beteiligten Flächen an ihrem zweifachen Mittelwert gerade unter der Be-

dingung aus der Gleichung entfallen, dass die Leuchtdichtemittelwerte der entsprechenden Reizanteile übereinstimmen. Anders ausgedrückt entspricht das Verhältnis der Michelson-Kontraste zweier Flächen gerade für den Fall dem Verhältnis ihrer Leuchtdichtedifferenzen, dass die mittleren Leuchtdichten der beiden Flächen identisch sind. Somit ist in dem meisten Experimenten die Verwendung des Kontrastmaßes gewährleistet, welches Singh und Anderson zur Vorhersage perzeptueller Transparenz vorschlagen.

(b) Für wahrgenommenen Kontrast gilt nun ähnliches wie für wahrgenommene Helligkeit: auch hier gibt es – einem Weber-Fechnerschen Zusammenhang entsprechend – eine nonlineare Beziehung des wahrgenommenen Kontrasts einer Fläche zu ihrem physikalischem Kontrast, beispielsweise definiert über ihren Michelson-Kontrast (Pokorny & Smith, 1997). Genauer fließen an dieser Stelle also zwei nonlineare Beziehungen in eine Beschreibung des wahrgenommenen Kontrasts ein: einerseits bzgl. des Zusammenhangs von wahrgenommener Helligkeit und Leuchtdichte beispielsweise in Form des Michelson-Kontrasts, und in einem zweiten Schritt bzgl. des Zusammenhangs von wahrgenommenem Kontrast zu physikalische beschreibbarem Kontrast.

Für die Chubb-Illusion wird angenommen, es handele sich um einen invers proportionalen Zusammenhang von induziertem Infeld- zu induzierendem Umfeldkontrast. Diese Annahme zeigt sich in dem gängigen Versuch, die wahrgenommenen Kontraständerungen des Infelds, welche mittels einer sinusoidalen Umfeldmodulation erzeugt werden, durch eine ebenfalls sinusförmige physikalische Kontraständerung zu kompensieren. Die Proportionalitätsannahme ist allerdings bislang nicht explizit untersucht wurden; es ist lediglich berichtet worden, dass Versuchspersonen das Resultat eines Sinus-Nullings als perzeptuell zufrieden stellend empfanden (Singer & D’Zmura, 1994). Bereits für wahrgenommene Helligkeit ist jedoch ein nonlinearer Zusammenhang zur Leuchtdichte bekannt, und beim simultanen Helligkeitskontrast hat sich – möglicherweise gerade deshalb – kein invers proportionaler Zusammenhang von wahrgenommener Infeldhelligkeit zur Umfeldleuchtdichte ergeben (vgl. Ekroll et al., 2002; Ekroll et al., 2004). Da nun auch für den wahrgenommenen Kontrast kein linearer Zusammenhang zum physikalisch beschreibbaren vorliegt, erscheint es nicht unbedingt sinnvoll für die Chubb-Illusion eine inverse Proportionalität des vorliegenden Induktionsgeschehens anzunehmen. Diese Fragestellung wird im Verlauf der Diplomarbeit einer genaueren Prüfung unterzogen (siehe Abschnitt 3.5).

### ***2.3 Verschiedene Befunde zur Chubb-Illusion***

#### **Grundzüge der Kontrastinduktion.**

Chubb et al. (1989) beschrieben erstmals die als Chubb-Illusion bekannte Kontrast-Kontrast-Wechselwirkung. Sie untersuchten das Phänomen zunächst anhand statischer Reize mit Zufallspunktmustern, verwendeten dann jedoch zur genaueren Untersuchung eine dynamische Variante, deren Textur während der Darbietung mit einer zeitlichen Frequenz von 60Hz neu generiert wurde. In einem Nulling-Experiment (Chubb et al., 1989) stellten Versuchspersonen deutlich von Null verschiedene Amplitudenwerte für die kompensierende Kontrastmodulation im Infeld ein, wobei die Höhe der jeweiligen Nulling-Amplitude in positiver Weise mit der Stärke der Umfeldmodulation zusammenhing. In einem Kontrollexperiment, in welchem bei bereits kompensierten Kontraständerungen ein Nulling für Gesamthelligkeitsänderungen vorgenommen wurde, zeigten Chubb et al. überdies, dass die Gesamthelligkeit des Infeldes durch die Kontrastmodulation im Umfeld nicht beeinflusst wird. Versuchspersonen stellten hier Amplitudenwerte ein, die höchstens vernachlässigbar von Null verschieden waren.

Eine nähere Untersuchung grundlegender Aspekte der Chubb-Illusion führten Singer und D’Zmura (1994) durch, indem sie diejenigen Eigenschaften der Reize und ihrer Darbietung variierten, von denen sie einen moderierenden Einfluss auf einen entsprechenden neuronalen Adaptationsmechanismus erwarteten. Ihr Interesse galt zunächst der Stärke der induzierenden Kontrastmodulation im Umfeld, und sie fanden, dass die Kontrastinduktion zunächst annähernd linear mit der Amplitude der Umfeldmodulation anwächst, woran sich im weiteren Kurvenverlauf eine Sättigung der Nulling-Amplitude anschließt. Die Ergebnisse sind in Abb. 5 dargestellt, es ist für die 5 Stufen der Umfeldmodulation die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen.

#### **Einfluss des mittleren Infeld- und Umfeldkontrasts.**

Chubb et al. (1989) testeten Infelder verschiedener mittlerer Kontraste von 0.2 bis 0.5 und fanden in allen Situationen eine konstante relative Kontrastinduktion, die einer Amplitude von ca. 45% des Infeldkontrastes entsprach. Singer und D’Zmura (1994) variierten den mittleren Infeldkontrast von 0.2 bis 0.8 und stießen auf ähnliche Ergebnisse wie in ihrem Experiment zum Einfluss der induzierenden Umfeldamplitude. Mit wachsendem mittlerem Infeldkontrast verzeichneten sie zuerst einen näherungsweise linearen Anstieg und anschließend ab einem mittleren Infeldkontrast von

0.375 erneut eine Sättigung der Nulling-Amplitude bei ca. 0.05. Im Vergleich mit den Ergebnissen von Chubb et al. betrug die Infeldamplitude für den Bereich des Anstieges lediglich ca. 25% des mittleren Infeldkontrastes, und die Sättigung entspricht in dieser relativen Sichtweise einer Abnahme des Effekts.<sup>10</sup> Der Befund von Singer und D’Zmura ist in Abb. 6 veranschaulicht, es ist für die 6 Stufen des mittleren Infeldkontrasts die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen.

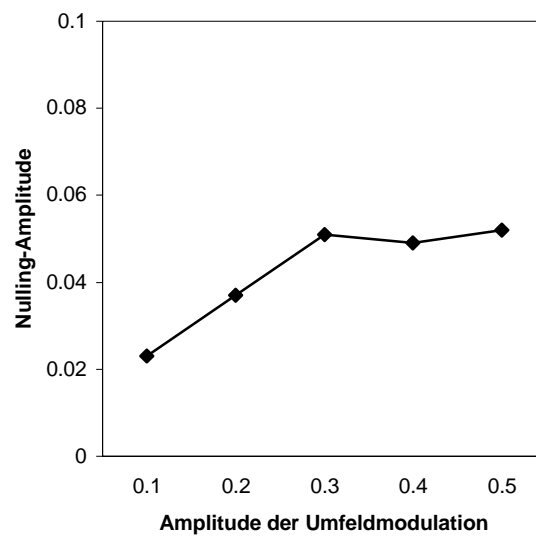
Xing und Heeger (2001) erzielten unter Verwendung einer statischer Darbietung von Reizen mit einer Sinusgittertextur und einer asymmetrischen Kontrastabgleichprozedur gegenteilig erscheinende Befunde.<sup>11</sup> Beispielsweise verringerte sich bei einem Umfeldkontrast von 0.8 mit wachsendem mittlerem Infeldkontrast die Kontrastinduktion, bis sie bei einem Kontrastwert von 0.8 nicht mehr festzustellen war. Da sich hier jedoch Meßmethode und verwendetes Reizmaterial zu den vorher genannten Experimenten drastisch unterschieden, ist eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht unbedingt gewährleistet. Vielmehr zeigen die berichteten Befunde, dass verschiedene weitere, bisher nicht beschriebene Variablen existieren, welche das Ausmaß der Chubb-Illusion beeinflussen.

Auch der Einfluss des mittleren Umfeldkontrasts (variiert von 0.2 bis 0.6) wurde von Singer und D’Zmura (1995) untersucht. Die Ergebnisse wurden von den Autoren in gewisser Weise gegenteilig zu denen interpretiert, welche sich aus der Variation des mittleren Infeldkontrasts ergaben. Mit wachsendem Umfeldkontrast scheint zunächst ein konstanter Kurvenverlauf erkennbar, an welchen sich ein näherungsweise linearer Abfall anschließt. Die Datensätze der drei dort aufgeführten Versuchspersonen sind jedoch in Verlauf und Stärke der Kontrastinduktion recht verschieden, sodass auf eine nähere Darstellung und Interpretation dieser Ergebnisse verzichtet werden soll. Schließlich sind auch aus den Daten von Xing und Heeger (2001) Aussagen abzuleiten, welche den Einfluss des mittleren Umfeldkontrasts betreffen. Mit wachsendem Umfeldkontrast nimmt hier der kontrastreduzierende Effekt zu, allerdings soll aus bereits genannten Gründen erneut von einem direkten Vergleich der zunächst widersprüchlich erscheinenden Ergebnisse abgesehen werden.

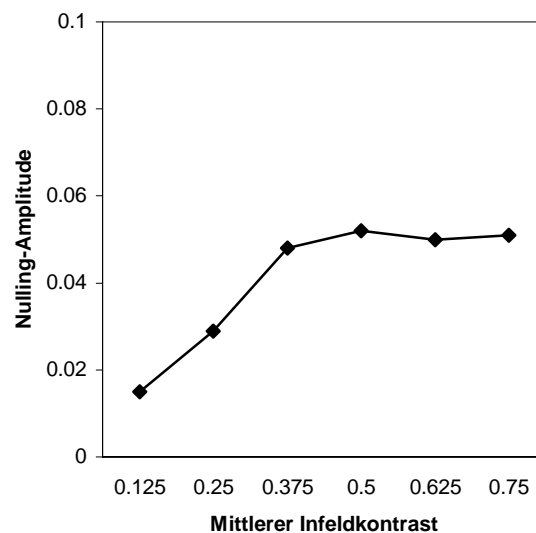
---

<sup>10</sup> Sofern nicht anders angegeben, und sofern sie nicht als unabhängige Variablen variiert werden, betragen der mittlere Umfeldkontrast und die induzierende Kontrastamplitude im Umfeld in den Experimenten von Singer und D’Zmura stets 0.5.

<sup>11</sup> Bei dieser Methode zur Messung der Kontrastinduktion wird statt einer Kompensation der induzierten Änderung des Infelds der Kontrast einer zeitgleich auf neutralem Hintergrund dargebotenen, mit dem Infeld identischen Fläche so eingestellt, dass sich das Infeld und dieses zweite *Matchfeld* perzeptuell nicht unterscheiden.



**Abbildung 5.** Daten zum Einfluss der Umfeldamplitude auf die Kontrastinduktion: es ist die Amplitude der kompensierenden Kontrastmodulation im Infeld abgetragen gegen die Amplitude der induzierenden Kontrastmodulation des Umfeldes (nach Singer & D’Zmura, 1994). Es zeigt sich mit wachsender Umfeldmodulation zunächst ein nahezu linearer Anstieg der Nulling-Amplitude, woran sich ab einer induzierenden Amplitude von 0.3 eine Sättigung des Effekts bei 0.05 anschließt.



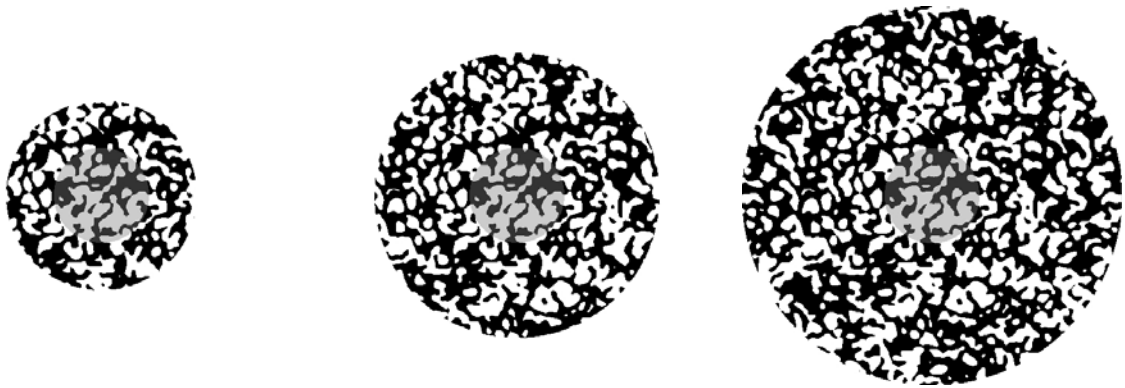
**Abbildung 6.** Daten zum Einfluss des mittleren Infeldkontrasts auf die Kontrastinduktion: es ist die Nulling-Amplitude im Infeld abgetragen gegen den mittleren Infeldkontrast (nach Singer & D’Zmura, 1994). Es zeigt sich mit wachsendem mittlerem Infeldkontrast zunächst ein linearer Anstieg der Nulling-Amplitude, woran sich ab einem Kontrastwert von 0.375 eine Sättigung des Effekts bei 0.05 anschließt.

### **Einfluss von Umfeldgröße und -abstand.**

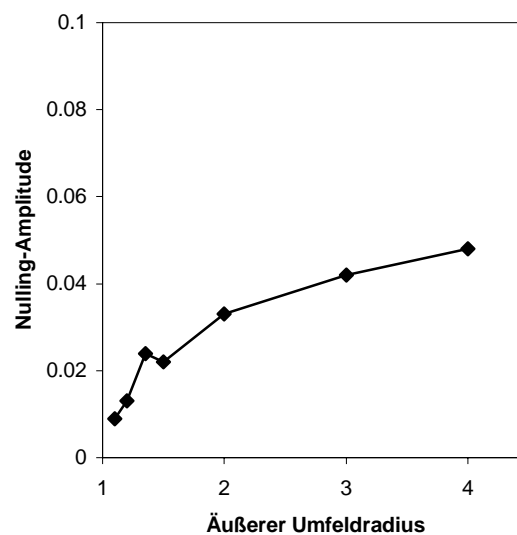
Um die Reichweite der Kontrastinduktion zu ermitteln, variierten Singer und D’Zmura (1994) zunächst die Größe des induzierenden Umfeldes, gegeben durch seinen äußeren Radius in Grad Sehwinkel. Das Infeld bestimmte mit einem Durchmesser von 1 Grad Sehwinkel gerade den minimalen Fall für die Umfeldgröße. Reize für eine Variation der Umfeldgröße sind beispielhaft in Abb. 7 dargestellt, der äußere Umfeldradius nimmt nach rechts hin zu. Es zeigte sich, dass das Ausmaß der Kontrastinduktion in positiver Weise mit der Umfeldgröße zusammenhängt: mit wachsender Umfeldgröße nimmt die Chubb-Illusion an Stärke zu. Genauer ergab sich aus den Daten eine negativ beschleunigt wachsenden Kurve, welche ab einem Radius von etwa 2 Grad Sehwinkel eine Sättigung aufzuweisen begann. Der Datenverlauf ist in Abb. 8 gezeigt, es ist für die 7 Stufen des Umfeldradius die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen.

Des Weiteren untersuchten sie den Einfluss des Umfeldabstands zum Infeld, festgelegt durch den inneren Radius des Umfeldes (bei gleich bleibendem Flächeninhalt), wobei dieser im kleinsten Fall wiederum dem Infeldradius entsprach. Reize für eine Variation des Umfeldabstands sind beispielhaft in Abb. 9 dargestellt, der innere Umfeldradius nimmt nach rechts hin zu. Die ringförmige Fläche zwischen Umfeld und Infeld wird in der mittelgrauen Hintergrundfarbe dargeboten. Mit wachsendem Abstand des Umfeldes zum Infeld verringerte sich die Kontrastinduktion im Infeld. Dieser Befund ist in Abb. 10 dargestellt, es ist für die 5 Stufen des inneren Umfeldradius die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Genauer ergab sich ein nahezu linear fallender Datenverlauf, welcher allerdings im Kontext der Ergebnisse aus den Telexperimenten mit chromatischen Reizen von Singer und D’Zmura als negativ beschleunigt fallende Kurve interpretiert wurde. Interessant ist, dass auch bei einem relativ großen Umfeldabstand von knapp 4 Grad Sehwinkel eine Kontrastinduktion noch deutlich zu beobachten war.

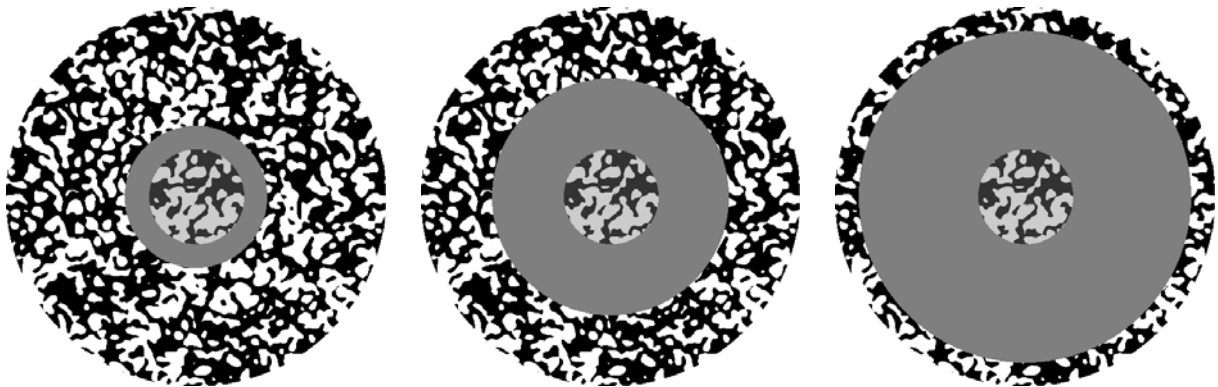
Die Daten aus diesen beiden Experimenten deuten darauf hin, dass die Umfeldfläche mit wachsender Nähe zum Infeld mit zunehmendem Gewicht in die Kontrastinduktion eingeht, da ein Flächengewinn bzw. -verlust in größerer Nähe zum Infeld eine stärkere Veränderung der Nulling-Amplitude bewirkt als es in weiterer Entfernung der Fall ist. Möglicherweise determinieren jedoch noch weitere Variablen den Einfluss des Umfeldes, sodass die Kontrastinduktion auch bei deutlichem Abstand des Umfeldes zum Infeld nicht zum Erliegen kommt.



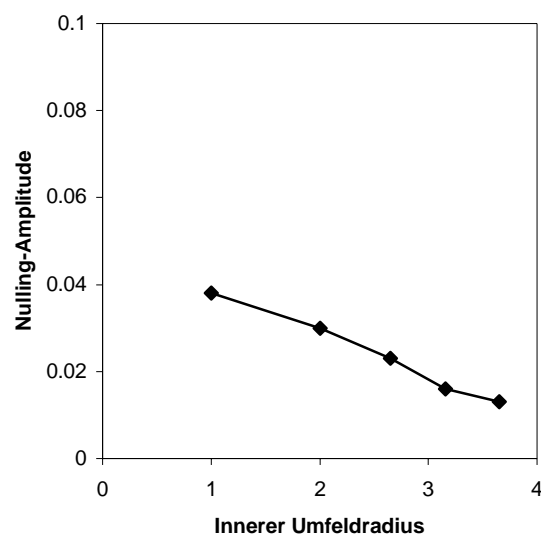
**Abbildung 7.** Reize zur Untersuchung des Einflusses der Umfeldgröße auf die Kontrastinduktion: der äußere Umfeldradius nimmt nach rechts hin zu.



**Abbildung 8.** Daten zum Einfluss der Umfeldgröße auf die Kontrastinduktion: es ist die Nulling-Amplitude abgetragen gegen den äußeren Umfeldradius in Grad Sehwinkel (nach Singer & D'Zmura, 1994). Es zeigt sich ein negativ beschleunigt wachsender Verlauf mit einer beginnenden Sättigung des Effekts bei 0.05 ab einer Umfeldgröße von 2° Sehwinkel.



**Abbildung 9.** Reize zur Untersuchung des Einflusses des Umfeldabstands auf die Kontrastinduktion: der innere Umfeldradius nimmt nach rechts hin zu.



**Abbildung 10.** Daten zum Einfluss des Umfeldabstands auf die Kontrastinduktion: es ist die Nulling-Amplitude abgetragen gegen den Umfeld den inneren Umfeldradius gemessen in Grad Sehwinkel (nach Singer & D'Zmura, 1994). Es zeigt sich mit wachsendem Umfeldabstand ein nahezu linearer Abfall des Effekts, wobei Singer et al. diesen im Kontext der Ergebnisse aus den Experimenten mit chromatischen Reizen als eine negativ beschleunigt abfallenden kurvilinearen Verlauf deuteten. Interessant ist, dass die Kontrastinduktion auch bei einem recht großen Abstand des Umfelds zum Infeld nicht zum Erliegen kommt.

### **Einfluss der relativen Umfeldorientierung.**

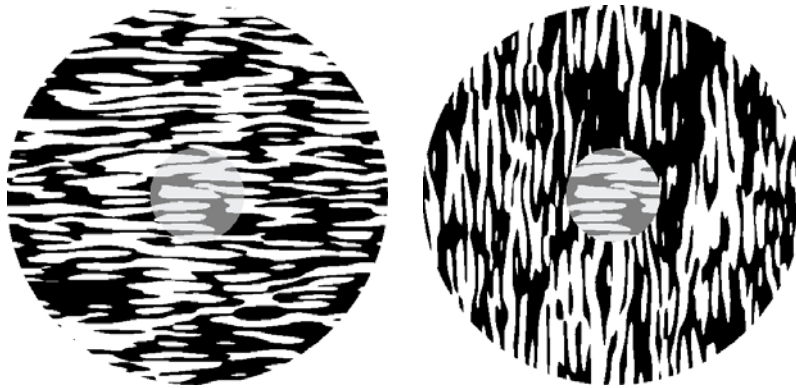
Solomon et al. (1993) untersuchten anhand von Sinusgitter-Reizen (vgl. Abb. 4b) den Einfluss der relativen Orientierung von Umfeld und Infeld, wobei sie bei gleich bleibender (horizontaler) Ori-

entierung des Infelds unterschiedliche Orientierungen der Umfeldtextur darboten. In Fällen, in denen die Orientierung des Umfeldes von der des Infeldes abwich, fanden sie eine deutliche Reduzierung der Kontrastinduktion (vgl. Abb. 4c); für diesen Befund liegen allerdings keine Daten vor. Singer und D’Zmura (1994) verwendeten für die Untersuchung der Orientierungsselektivität der Chubb-Illusion Reize, welche ein zebraähnliches Streifenmuster enthielten, dem ebenfalls (im Gegensatz zu ihren bisher verwendeten Reizen) eine räumliche Orientierung zugeschrieben werden kann. Beispiele für die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Reize zur Untersuchung der Orientierungsselektivität finden sich in Abb. 11. Dargestellt sind die Fälle gemeinsamer (links) und orthogonaler (rechts) Orientierung; die Reize besitzen große Ähnlichkeit mit den von Singer und D’Zmura verwendeten. Sie rotierten das Umfeld bezüglich des Infelds in 6 Stufen von 0 bis 150 Grad, konnten jedoch im Gegensatz zu Solomon et al. keinerlei Auswirkungen der relativen Orientierung der Reizanteile zueinander auf die Kontrastinduktion feststellen.

Auch an dieser Stelle ist wieder ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die Experimente anhand sehr verschiedener Reize durchgeführt wurden, und somit Unterschiede in den Ergebnissen nicht ungewöhnlich sind. So überrascht es nicht, dass Xing und Heeger (2001) unter Verwendung von Sinus-Gittern (und der statischen, asymmetrischen Kontrastabgleichsmethode) entsprechend den Ergebnissen von Solomon et al. eine deutliche Reduktion der Kontrastinduktion bei orthogonal zueinander orientierten Reizen feststellten. Im Vergleich zu den parallel orientierten Reizen war der Effekt in vielen Fällen um die Hälfte reduziert. Der übereinstimmende Befund von Solomon et al. und Xing und Heeger wird im Rahmen der Adaptationshypothese in der Regel durch die Zusatzannahme einer Orientierungsselektivität der beteiligten Neuronenverbände erklärt. Genauer werden Gruppen von Kontrastrezeptoren angenommen, die selektiv die Texturformation definierter räumlicher Orientierung verarbeiten, und dass auch nur innerhalb dieser Rezeptorgruppen die Nervenzellen einen inhibitorischen Einfluss aufeinander ausüben können.

### **Einfluss der relativen Umfeldkörnung.**

Chubb et al. (1989) konnten zeigen, dass die Chubb-Illusion am stärksten ist, wenn die in Umfeld und Infeld vorliegende Textur dieselbe Raumfrequenz aufweist. Wicht Umfeldtextur in ihrer Raumfrequenz um eine Oktave von der Infeldtextur ab, so war die Kontrastinduktion deutlich reduziert. Dieser Befund ist in Abb. 12 skizziert; für einen Infeldkontrast von 0.4 ist gegen das Verhältnis der Raumfrequenzen – Raumfrequenz des Umfelds  $f(um)$  zu Raumfrequenz des Infelds  $f(in)$  – die am Infeldkontrast anteilige Kontrastreduktion in Prozenten abgetragen. Dieser Befund wird aus Sicht der Adaptationshypothese erneut im Rahmen einer weiteren Zusatzannahme interpretiert. Es werden wie bei der Orientierungsselektivität Gruppen von Kontrastrezeptoren vorausgesetzt, die hier allerdings selektiv die Texturformation definierter Raumfrequenzkanäle verarbeiten. Von dem für die Kontrastinduktion verantwortlich gemachten neuronalen Verschaltungsprinzip wird angenommen, es läge vorwiegend innerhalb dieser funktional abgeschlossenen Rezeptorgruppen vor.

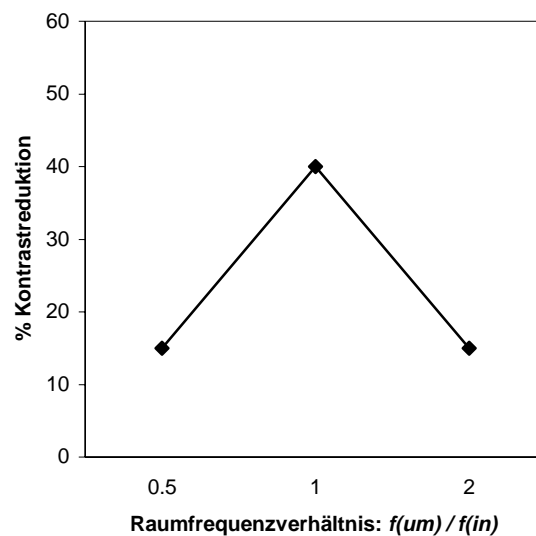


**Abbildung 11.** Reize zur Untersuchung der Orientierungsselektivität der Kontrastinduktion: dargestellt sind die Fälle gemeinsamer (links) und orthogonaler Orientierung (rechts).

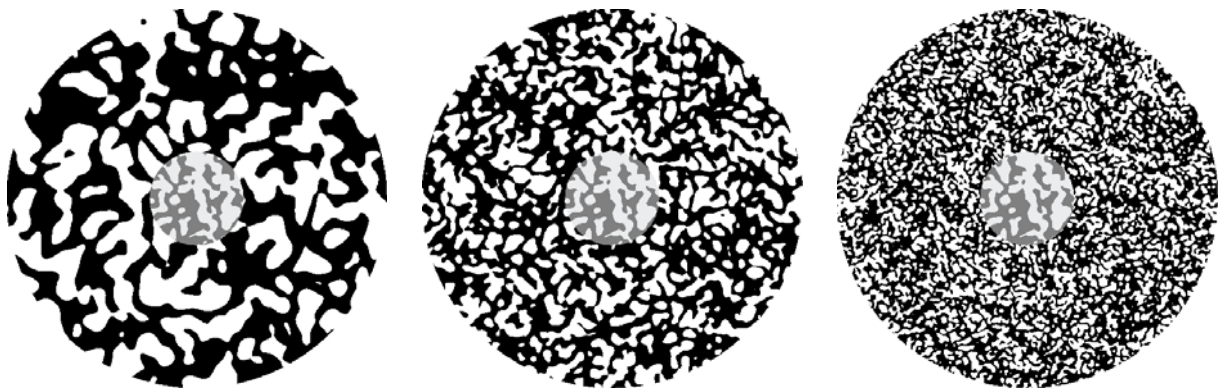
Allerdings deckt sich dieser Befund nicht mit einem Ergebnis von D’Zmura & Singer (1996), welche keinen Unterschied in der Kontrastinduktion bei der Verwendung verschiedener Körnungen der Textur in Infeld und Umfeld fanden.<sup>12</sup> Reize, wie sie in der vorliegenden Arbeit für die Untersuchung der Körnungsselektivität der Chubb-Illusion verwendet werden, finden sich in Abb. 13; sie besitzen große Ähnlichkeit mit den von Singer und D’Zmura verwendeten. Dargestellt sind die Fälle geringerer (links), gleicher (Mitte) und stärkerer Körnung (rechts) relativ zur Infeldtextur.

Dieser scheinbare Widerspruch ist möglicherweise auf die Unterschiede der in den Untersuchungen verwendeten Reize zurückzuführen. Chubb et al. verwendeten Reize, deren Leuchtdichteprofil eine Sinusform aufweist und somit tatsächlich die selektive Aktivierung einzelner „Raumfrequenzkanäle“ ermöglicht. Die in den Experimenten von Singer und D’Zmura verwendeten Reize enthielten hingegen ein binäres Helligkeitsmuster mit einem rechteckigen Leuchtdichteprofil, dessen Körnungstärke in der Literatur irreführenderweise ebenfalls häufig mit dem Terminus der Raumfrequenz bezeichnet wird. Aus einer fourieranalytischen Sicht ergeben sich diese rechteckigen Leuchtdichteprofile aber bekanntlich näherungsweise aus der Überlagerung einer Vielzahl verschiedenfrequenter Sinusverläufe und repräsentieren stets alle bei der Konstruktion der Rechtecksschwingung verwendeten Frequenzanteile gleichzeitig. Eine selektive Aktivierung einzelner neuronaler Raumfrequenzkanäle ist mit den von Singer und D’Zmura verwendeten Reizen somit trotz der Auswahl unterschiedlicher Körnungen nicht möglich. Folglich erzielten Chubb et al. möglicherweise Ergebnisse zu einem Aspekt der Kontrastinduktion, dessen Untersuchung Singer und D’Zmura mit ihren Reizen prinzipiell nicht möglich war. Es erscheint daher sinnvoll für eine Untersuchung der Chubb-Illusion zwischen Raumfrequenz und Körnung zu unterscheiden; die entsprechenden Begriffe werden im weiteren so verwendet, wie es nach den dargestellten Überlegungen gerechtfertigt erscheint.

<sup>12</sup> Der Begriff der Körnung bezieht sich bei Singer & D’Zmura auf die durchschnittliche Größe der einzelnen homogenen Flächenanteile und korrespondiert mit der Anzahl der Farbänderungen entlang des Durchmessers einer Reizfläche fester Größe.



**Abbildung 12.** Daten zur Raumfrequenzselektivität der Chubb-Illusion: für einen mittleren Infeldkontrast von 0.4 ist die relative Kontrastreduktion in Prozenten abgetragen gegen das Verhältnis der Raumfrequenzen von Umfeld und Infeld (vgl. Chubb et al., 1989). Der Effekt ist für gemeinsame Umfeld- und Infeldtextur am stärksten und verringert sich deutlich, wenn die Umfeldtextur von der Infeldtextur in der Raumfrequenz um eine Oktave nach unten oder oben abweicht.



**Abbildung 13.** Reize zur Untersuchung der Körnungselektivität der Chubb-Illusion: dargestellt sind die Fälle geringerer (links), gleicher (Mitte) und stärkerer Körnung (rechts) bzgl. der Infeldtextur.

### Interokularer Transfer.

Bereits Chubb et al. (1989) untersuchten, ob die für die Chubb-Illusion verantwortlichen neuronalen Strukturen eher retinal oder kortikal lokalisiert sind. Sie boten hierfür Umfeld- und Infeldreize entweder monokular (auf dem selben Auge) oder binokular (auf unterschiedlichen Augen) dar, und

konnten ausschließlich in ersterem Fall eine substantielle Kontrastinduktion beobachten. Die Daten hierzu sind in Abb. 14 veranschaulicht, es ist für die beiden alternativen Darbietungsarten die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Chubb et al. schlossen hieraus, dass es sich bei den die Chubb-Illusion vermittelnden neuronalen Strukturen um Zellpopulationen handeln muss, die retinal oder zumindest recht früh in der kortikalen visuellen Reizverarbeitung angesiedelt sind. Wären die relevanten Strukturen später in der Reizverarbeitung lokalisiert (nach Zusammenführung der für die beiden Augen zunächst separat verlaufenden neuronalen Verarbeitungswege), so sollte es keinen Einfluss haben, ob sämtliche Informationen auf einem Auge zur Verfügung stehen, oder ob sie auf beide Augen verteilt sind.

Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Darbietungszeit der Reize in diesem Experiment recht kurz war. Für jeweils 133ms wurde der Infeldreiz eingeblendet, worauf ein 500ms andauerndes Interstimulusintervall folgte; alternierend fand die Darbietung des Infeldes mit oder ohne den Umfeldreiz statt. Singer und D`Zmura (1994) untersuchten diese Fragestellung ebenfalls und erzielten einen gegenteiligen Befund: sie fanden keinen systematischen Unterschied zwischen der Darbietung der beiden Reize auf verschiedenen oder auf dem selben Auge. Die Darbietungsdauer der Reize war hier jedoch gegenüber dem Experiment von Chubb et al. deutlich erhöht. Dies könnte darauf hindeuten, dass ein bei der Kontrastinduktion beteiligtes kortikales Areal möglicherweise eine (bzgl. des Kontrasts) höhere zeitliche Darbietungsschwelle besitzt als es für die Strukturen der Fall ist, welche den monokularen Effekt vermitteln.

## ***2.4 Chubb-Illusion und Farbzerlegung***

### **Farbzerlegung und Episkotister-Modell.**

Es ist bekannt, dass das menschliche Wahrnehmungssystem bei der Interpretation einer visuellen Szene bestimmte Farbrelationen als Hinweise auf eine transparente Überlagerung wertet und das an solchen als transparent überdeckt angenommenen Flächen vorliegende Farbsignal gewissermaßen in Anteile des Hintergrunds und der überdeckenden Schicht zerlegt (Metelli, 1974; Colantoni D`Zmura, Knoblauch & Laget, 1997). Dieser oft als Farbzerlegung (engl. „color scission“) bezeichnete Vorgang manifestiert sich perzeptuell in einer charakteristischen Doppelwahrnehmung, die in opak wirkenden Flächen nicht beobachtet werden kann: man sieht an solchen Stellen gleichzeitig eine Hintergrund- und eine Schichtfarbe. So kann dieser Sachverhalt in gewissem Sinne als eine perzeptuelle Umkehr des physikalischen Vorgangs betrachtet werden, der mittels Farbmischung von Schicht- und

Hintergrundfarbe eine visuelle Szene generiert, die das Perzept einer transparenten Überlagerung hervorruft (vgl. Heider, 1933; Koffka, 1935).

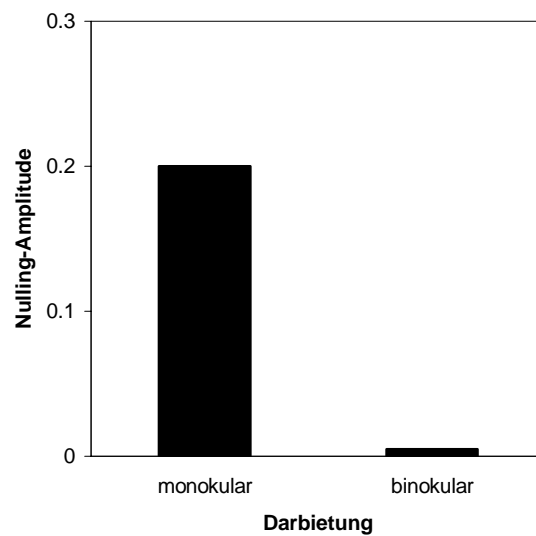
Das wohl einflussreichste Modell zur Beschreibung von Situationen, in welchen Farbzerlegung auftritt, ist das *Episkotister-Modell* von Metelli (1970). Es lieferte erstmals eine mathematische Formalisierung des Zusammenhangs von Leuchtdichterelationen achromatischer Vierfarbreize und der Wahrnehmung einer transparenten Überdeckungssituation. Auch wenn in der Literatur mittlerweile wesentlich umfassendere und differenziertere Modelle zur Beschreibung und Vorhersage von Farbzerlegungsvorgängen zu finden sind, soll das Episkotister-Modell aufgrund seiner Ökonomie (eine vergleichsweise einfache mathematische Formalisierung mit verhältnismäßig großem prädiktivem Wert) und seiner hohen Anschaulichkeit als theoretischer Überblick über Transparenzmodelle genügen. Darüber hinaus sind die vergleichsweise einfachen Kriterien für das Auftreten von Farbzerlegung, die aus dem Modell hervorgehen, für die vorliegenden Zwecke ausreichend.

Unter einem Episkotister ist ein kreisförmige Scheibe mit fehlendem Kreisabschnitt zu verstehen. Metelli setzt eine physikalische Anordnung voraus, in welcher ein Episkotister über einem mehrfarbigen Hintergrund angebracht ist; in Abb. 15a findet sich die schematische Darstellung einer entsprechenden Anordnung in der Draufsicht. Rotiert die Scheibe hinreichend schnell über dem Hintergrund, dann tritt (an einem Punkt im Gesichtsfeld) statt der alternierenden Darbietung von Hintergrund und Scheibe eine Farbmischung der Scheiben- und der Hintergrundfarbe auf.<sup>13</sup> Es handelt sich hierbei um additive Farbmischung, sodass der jeweilige Beitrag zur Mischfarbe durch die relative Dauer der Darbietung der beiden Farben determiniert ist, die gerade der relativen Größe der entsprechenden Flächenanteile von fehlendem bzw. verbleibendem Kreisabschnitt entspricht. Diese ergibt sich nun ihrerseits aus dem Winkel des fehlenden Kreisabschnittes (oder alternativ dem Winkel der Episkotisterfläche), und somit ist die Farbmischung in dieser Situation neben den Farbinformationen durch diese einzige Größe vollständig bestimmt.

Das Ergebnis der Farbmischung mittels eines Episkotisters ist als Vierfarbreiz in Abb. 15b zu sehen; aufgrund der Rotation des Episkotisters entsteht der Eindruck einer transparenten Überlagerung. Der Grundgedanke des Episkotister-Modells liegt nun in dem Umkehrschluss, dass sämtliche Reizanordnungen, die von ihren Farbrelationen her mit der Farbmischung durch einen Episkotister kompatibel sind, das Perzept eines transparenten Filters hervorrufen sollten. Ließen sich die Bedingungen für diese Kompatibilität ermitteln, so sollte es gelingen das Auftreten perzeptueller Transparenz verlässlich vorherzusagen.

---

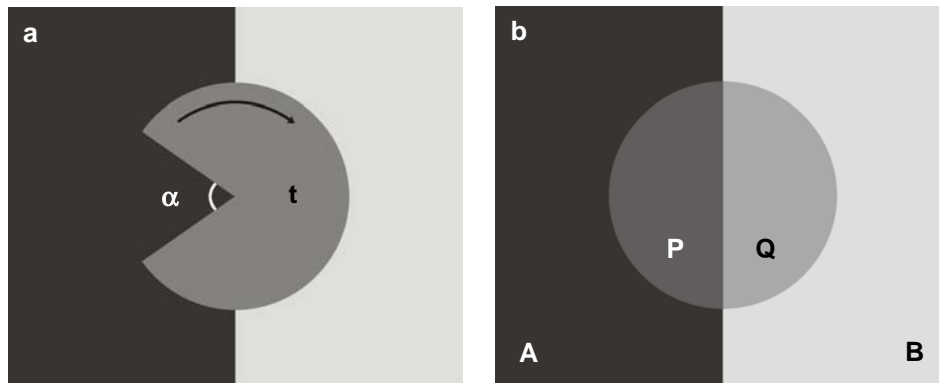
<sup>13</sup> Sofern die Frequenz der alternierenden Darbietung zweier Lichter an derselben retinalen Position die zeitliche Auflösungsfähigkeit der beteiligten Rezeptoren übersteigt, ergibt sich nach dem Talbotschen Gesetz (Talbot, 1834) ein konstantes Aktivierungssignal der Sehzellen und somit ein konstanter Farbeindruck einer Mischfarbe der beiden alternierend einwirkenden Teillichter. Die Stärke des Signals entspricht der Linearkombination der Farbkoordinaten der Einzellichter, wobei die Gewichte den relativen Zeitanteilen ihrer Einwirkung entsprechen.



**Abbildung 14.** Daten zum interokularen Transfer der Chubb-Illusion: es ist für die beiden alternativen Darbietungsarten (monokular und binokular) die Nulling-Amplitude abgetragen (nach Chubb et al., 1989). Lediglich bei monokularer Reizdarbietung findet sich eine substantielle Kontrastinduktion.

Metellis Modell bietet deswegen eine sehr anschauliche Herangehensweise an Situationen, in welchen Farbzerlegung auftritt, da zwei zentrale Eigenschaften einer transparent überdeckenden Schicht – ihre Durchlässigkeit auf der einen und ihre Reflektanz auf der anderen Seite – durch die Eigenschaften eines Episkotisters sehr einfach modelliert werden können. Durchlässigkeit und Reflektanz des durch den rotierenden Episkotister simulierten Filters hängen (neben den Farbinformationen des Episkotisters) lediglich vom Winkel des fehlenden Kreisabschnittes ab. Darüber hinaus stellt das Modell vergleichsweise einfache Bedingungen an Reize, die mit einer Farbzerlegung kompatibel sind.

Es soll nun diejenige Version von Metellis Modell näher betrachtet werden, welche Gerbino, Stultiens, Troost und De Weert (1990) für Leuchtdichten beschrieb. Metelli formulierte sein Modell zunächst für Reflektanzen, diese stellen jedoch ihrerseits Oberflächeneigenschaften dar, und müssen somit vom Wahrnehmungssystem erst aus den Lichtreizen ermittelt werden. Dazu müssen die beiden Anteile des Wahrnehmungseindrucks voneinander getrennt werden, welche durch Szenenbeleuchtung einerseits und Reflektanzeigenschaften der beleuchteten Flächen andererseits gegeben sind. Leuchtdichten hingegen stehen dem Wahrnehmungssystem unmittelbar zur Verfügung.



**Abbildung 15.** Veranschaulichung des Episkotister-Modells von Metelli (1970). **a.** Episkotisteranordnung in der Draufsicht: Kreisausschnitt vor mehrfarbigem Hintergrund. **b.** Vierfarbreiz als Ergebnis der Farbmischung bei rotierendem Episkotister: es entsteht der Eindruck einer transparenten Überlagerung.

Im Folgenden sei angenommen, es herrsche für die betrachtete visuelle Szene stets eine homogene Beleuchtung. In diesem Fall lassen sich sämtliche auf Reflektanzen basierende Eigenschaften des Episkotister-Modells mit geringfügigen Modifikationen auch für Leuchtdichten formulieren. Habe die achromatische Beleuchtung die Intensität  $l$ , seien  $\alpha$  die relative Fläche des fehlenden Kreisabschnittes,  $t$  die Reflektanz des Episkotisters und  $a$  und  $b$  die der Flächen A bzw. B (vgl. Abb. 15a, b). Die abgestrahlten Lichter  $p$  und  $q$  im Bereich der Flächen P bzw. Q an der Stelle des rotierenden Episkotisters ergeben sich aufgrund der Farbmischung wie folgt:

$$p = \alpha a l + (1 - \alpha) t l \quad (3)$$

$$q = \alpha b l + (1 - \alpha) t l . \quad (4)$$

Wird das abgestrahlte Licht, auf der rechten Seite der Gleichungen (3) und (4) also das Produkt von Beleuchtung und Reflektanz, jeweils durch die dadurch hervorgerufene Leuchtdichte ersetzt, die dann durch den Großbuchstaben bezeichnet wird, welcher die entsprechende Fläche kennzeichnet ( $T$  für den Episkotister), so ergeben sich die vollständig anhand von Leuchtdichten formulierten Versionen:

$$P = \alpha A + (1 - \alpha) T \quad (5)$$

$$Q = \alpha B + (1 - \alpha) T . \quad (6)$$

Die Gleichungen (5) und (6) können nun als physikalisches Modell gelten, das die Farbmischung an der Stelle des rotierenden Episkotisters beschreibt. Der jeweils erste Term  $\alpha A$  bzw.  $\alpha B$  beschreibt den Anteil der Hintergrundfarbe an der resultierenden Mischfarbe, wohingegen der zweite Term  $(1 - \alpha) T$  den Anteil des Episkotisters darstellt. Werden diese Gleichungen nach  $\alpha$  bzw.  $T$  aufge-

löst, so erhält man die beiden unbekannt Parameter als Funktion der dem visuellen System direkt gegebenen Leuchtdichten.

$$\alpha = \frac{P-Q}{A-B} \quad (7)$$

$$T = \frac{AQ - BP}{(A+Q) - (B+P)}. \quad (8)$$

Aus den Gesetzmäßigkeiten der im Episkotister-Modell vorliegenden physikalischen Situation ergeben sich weitere Restriktionen. Einerseits darf der relative Flächenanteil  $\alpha$  des fehlenden Kreis-ausschnitts ausschließlich Werte zwischen 0 und 1 annehmen, und die Leuchtdichte des Episkotisters muß positiv sein. So entsteht aus dem physikalischen Modell für eine additive Farbmischung durch seine Umkehrung ein sehr einfaches psychophysikalisches Modell, das vorhersagt in welcher Situation der Eindruck einer transparenten Überlagerung entsteht. Unter Berücksichtigung der Restriktionen für  $\alpha$  ergibt sich nämlich für Vierfarbreize zum einen die in Gleichung (7) dargestellte Bedingung, dass im Bereich der transparenten Schicht bzw. des Episkotisters die Kontrastpolarität erhalten bleiben muss. Zum anderen ergibt sich als Gleichung (8), dass die Leuchtdichtedifferenz der beiden Umfeldfarben betragsmäßig stets größer sein muss als die der beiden Infeldfarben.<sup>14</sup>

$$A < B \Leftrightarrow P < Q \quad (9)$$

$$|A - B| > |P - Q| \quad (10)$$

Hinzu kommt, dass die Farbzerlegungsbedingungen, die das Episkotister-Modell an Vierfarbreize stellt, mit denen kompatibel sind, welche Singh und Anderson (2002) unter Verwendung von Sinus-Gittern ermittelten. Sie zeigten, dass neben dem Verhältnis der Leuchtdichtedifferenzen von Umfeld und Infeld auch das Verhältnis der Michelson-Kontraste der beiden Flächen festlegt, in welchen Situationen das Perzept einer transparenten Überlagerung auftritt. Genauer muss das Verhältnis der Leuchtdichtedifferenzen von Infeld zu Umfeld *und* das der entsprechenden Michelson-Kontraste Werte zwischen 0 und 1 annehmen, damit es bzgl. der Infeldfläche zu einer Farbzerlegung kommt. Sie stellten heraus, dass diese Bedingungen über diejenigen des Episkotister-Modells hinausgehen, welches diese Forderung ausschließlich für das Verhältnis von Leuchtdichtedifferenzen formuliert. Eine weitere Farbzerlegungsbedingung des Episkotister-Modells allerdings, welche besagt, dass die

---

<sup>14</sup> Die beiden Bedingungen aus Gleichung (9) und (10) entsprechen zusammen genommen Gleichung (7). Es ergeben sich aus Gleichung (8) noch zwei weitere Bedingungen, die allerdings keine derart anschauliche Interpretation aufweisen und für die vorliegenden Zwecke nicht weiter von Bedeutung sind.

Leuchtdichte des Episkotisters keine negativen Werte annehmen darf, ist in einer alternativen Schreibweise gerade gleichbedeutend mit der von Singh und Anderson betonten Forderung bzgl. der Michelson-Kontraste (s.u.). Somit sind die aus dem Episkotister-Modells theoretisch hergeleiteten Bedingungen für das Auftreten von Farbzerlegung gleichbedeutend mit den von Singh und Anderson empirisch gezeigten Restriktionen.

Darüber hinaus zeigten Singh und Anderson (2002) allerdings, dass das Ausmaß perzeptueller Transparenz (im Sinne der wahrgenommenen Durchlässigkeit eines über dem Infeld gesehenen Filters) vom Verhältnis der Michelson-Kontraste in Infeld und Umfeld vorhergesagt wird (vgl. Abschnitt 2.2, Skalierung des wahrgenommenen Kontrasts.). Dieser Befund stellt die eigentliche Erweiterung gegenüber dem Modell von Metelli dar, welches statt dessen nahe legt, dass diese perzeptuelle Qualität durch das Verhältnis der Leuchtdichtedifferenzen (P-Q) und (A-B) determiniert ist, die innerhalb des Infelds bzw. innerhalb des Umfelds vorliegen (Metelli, 1974).

In den Experimenten der Diplomarbeit werden Infeld- und Umfeldkontraste zwar ausschließlich über Leuchtdichtedifferenzen definiert, jedoch ist weitgehend der Spezialfall gleicher mittlerer Umfeld- und Infeldleuchtdichte erfüllt. In diesem Spezialfall ist das Verhältnis von Leuchtdichtedifferenzen identisch zum Verhältnis von Michelson-Kontrasten. Somit sind Leuchtdichtedifferenz und Michelson-Kontrast für eine Beschreibung der Farbrelationen der Reize zumeist gleichbedeutend (vgl. Abschnitt 2.2, Skalierung des wahrgenommenen Kontrasts.). Folglich ist mit der Leuchtdichtedifferenz in den meisten Experimenten ein Kontrastmaß gewählt, welches für die Vorhersage des Auftretens und der Ausprägung von Farbzerlegung aus theoretischer und auch aus empirischer Sicht von zentraler Bedeutung zu sein scheint.

## **Kontrastinduktion und Farbzerlegung.**

Betrachtet man die von Singer und D’Zmura verwendeten Reize, erhält man leicht den Eindruck, es befände sich in der inkrementellen Situation über dem variierten Infeld eine homogene transparente Schicht (vgl. Abb. 1, links). Im dekrementellen Fall dagegen wird das Infeld als freiliegend interpretiert und es kann u.U. über dem Umfeld eine transparente Schicht gesehen werden (vgl. Abb. 1, rechts). Die jeweils transparent überlagert gesehene Textur wird in diesem Fall perzeptuell offenbar in zwei Anteile, eine variierte Hintergrund- und eine homogene Schichtfarbe zerlegt. Die Verringerung des wahrgenommenen Infeldkontrasts im inkrementellen Fall könnte dieser Argumentation folgend damit erklärt werden, dass perzeptuell eine Fokussierung auf den homogenen Schichtanteil stattfindet und der Gesamteindruck in diesem Bereich folglich in Richtung eines homogenen, d.h. kontrastärmeren, Reizes verschoben wird. Bereits D’Zmura und Singer (1999) stellten diesen Zusammenhang zwischen der Chubb-Illusion und Farbzerlegung her, indem sie bemerkten, dass eine Situation der Kontrastinduktion stets mit dem Wahrnehmungseindruck einer transparenten Überlagerung einhergeht. Singh und Anderson (2002) lassen ebenfalls, diese Beobachtungen fortführend, in der Ent-

wicklung einer perzeptuell orientierten Transparenztheorie dem Kontrast eine Schlüsselrolle zukommen. Für das Auslösen einer Farbzerlegung und die Festlegung perzeptueller Filterqualitäten stellt ihrer Ansicht nach die Kontrastrelation von Umfeld und Infeld – genauer das Verhältnis der entsprechenden Michelson-Kontraste – den entscheidenden Parameter dar. Lotto und Purves (2001) begannen jedoch erstmals den Zusammenhang von Farbzerlegung und Kontrastinduktionseffekten, wie sie bei der Chubb-Illusion auftreten, anhand von gezielten Hypothesen systematisch zu untersuchen.

Die obigen Betrachtungen machen plausibel, warum der Kontrast bei einem transparent verdeckt wahrgenommenen Infeld geringer erscheinen könnte als bei einem physikalisch identischen aber als freiliegend interpretierten Infeld. Davon unabhängig ist aber zu klären, welche Faktoren des Reizes in der speziellen Situation der Chubb-Illusion zu einer Transparenzinterpretation führen. In diesem Zusammenhang verweisen Lotto und Purves auf die Tatsache, dass die Differenz der Leuchtdichten zweier Flächen immer dann verringert ist, wenn diese durch ein unvollständig durchlässiges Medium, also durch irgendeine Art von transparenter Schicht, betrachtet werden. Des Weiteren ist das Verhältnis der Leuchtdichten zweier Flächen immer dann reduziert, wenn dieses Filtermedium zusätzlich zu einer additiven Komponente des Lichtreizes führt, welche auf seine Reflektanzeigenschaften zurückzuführen ist. Differenzen und Verhältnisse von Leuchtdichten sind wiederum mögliche Formulierungen eines Kontrastmaßes, auch wenn sie hinsichtlich verschiedener Aspekte der Skalierung eher unbefriedigend sind. Eine in den Worten von Lotto und Purves „empirische“ Erklärung der Chubb-Illusion zielt nun darauf ab, dass bei der Beurteilung des Kontrasts in einer Umfeld-Infeld-Situation dem erlernten Wissen Rechnung getragen wird, auf welche Weise solch eine Konfiguration zu Stande gekommen sein kann. Ein im Vergleich zum Umfeld verringerter Kontrast im Infeld und eine Übereinstimmung von Infeld- und Umfeldtextur soll nach dieser Überlegung vom visuellen System als starker Hinweis auf eine transparente Überdeckung gewertet werden, und der Argumentation der Autoren folgend schlägt sich dieses „perzeptuelle Vorwissen“ in Form der Kontrastinduktion im Wahrnehmungseindruck nieder.

Darüber hinaus entspricht die von Lotto und Purves vorgebrachte Vermutung über Farbzerlegungskriterien weitgehend den Bedingungen, die das Episkotister-Modell an Vierfarbreize stellt, sofern solche Reize verwendet werden, wie sie denen von Singer und D’Zmura entsprechen. Denn in diesem Fall handelt es sich gerade um Reize mit vier unterschiedlichen Farbanteilen, und diese unterscheiden sich somit lediglich figural von den Reizen, für welche Metelli (1970) das Episkotister-Modell beschrieb.<sup>15</sup>

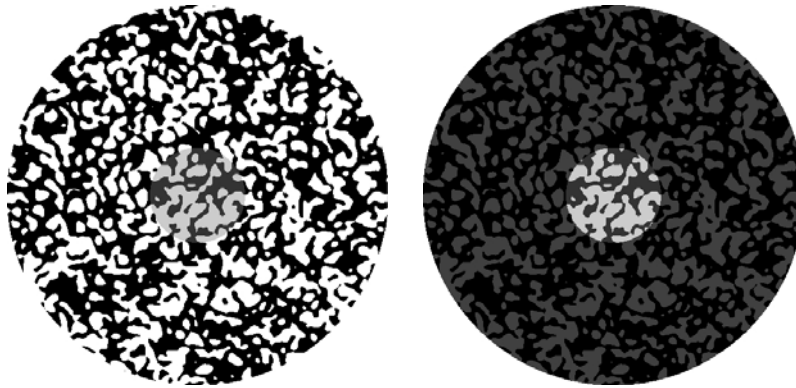
Fasst man also die Kontrastinduktion als Ergebnis einer Farbzerlegung auf, so sollte der Effekt abgeschwächt werden, wenn die Reizanordnung so verändert wird, dass ihre Zerlegungskompatibilität reduziert, und damit die Wahrscheinlichkeit einer transparenten Überdeckung als Ursache verringert

---

<sup>15</sup> Für Sinus-Gitter kann das Episkotister-Modell auch gelten, es müsste dann allerdings auf die Situation stetiger Farbwechsel zwischen zwei farblichen Extrempunkten erweitert werden (vgl. Singh & Anderson, 2002).

ist. Um diese Hypothese zu untersuchen verglichen Lotto und Purves den statischen Standardreiz, wie er der linken Seite von Abb. 16 entspricht, mit einem weiteren, bei dem das Umfeld langsam um das Infeld rotierte. Da bei einem rotierendem Umfeld der figurale Zusammenhalt von Infeld und Umfeld ständig gestört wird, ist hier von einer verringerten Zerlegungskompatibilität des Reizes auszugehen. In Übereinstimmung mit der oben genannten Hypothese zeigten Paarvergleiche, dass 19 von 20 Probanden die wahrgenommene Helligkeitsdifferenz der beiden Infeldfarben des dynamischen Reizes als größer beurteilten als die des statischen; der Reiz mit rotierendem Umfeld wies also eine erkennbar geringere Kontrastinduktion auf. Des Weiteren verglichen sie den Standardreiz mit einem zweiten, bei dem die Leuchtdichten der Umfeldfarben – den Kontrast im Sinne des Leuchtdichteverhältnisses erhaltend – um den Faktor vier reduziert war (vgl. Abb. 16, rechts). Dieser Reiz ist ebenfalls inkompatibel mit einer Zerlegungsinterpretation, da ein Farbfilter eine Erhöhung der Leuchtdichte (hier bzgl. des Infelds) nach physikalischen Gesetzmäßigkeiten nur in einem meist unwahrscheinlichen Spezialfall ermöglicht: der Filter müsste deutlich heller beleuchtet sein als das Umfeld. Ebenfalls übereinstimmend mit der oben genannten Hypothese beurteilten 15 von 20 Probanden den Infeldkontrast des Reizes mit verdunkeltem Umfeld als höher im Vergleich zu dem Reiz mit unverändertem Umfeld. Auch hier ist also eine deutliche Verringerung der Chubb-Illusion zu erkennen.

Auch wenn in den Ausführungen von Lotto und Purves nicht immer deutlich wird, auf welches Kontrastmaß sich die Urteile der Versuchspersonen beziehen (ganz abgesehen von tiefergehenden methodischen Aspekten des jeweiligen Experiments), haben sie doch mit relativ einfachen Mitteln deutliche Hinweise dafür erzielt, dass Farbzerlegung für die Erklärung der Chubb-Illusion eine wesentliche Rolle spielt. Dazu ist die Farbzerlegungshypothese vom ökonomischen Standpunkt aus betrachtet der Adaptationserklärung deutlich überlegen, da aus der Sichtweise, die Kontrastinduktion als Resultat eines Adaptationsvorgangs auffasst, beispielsweise für Orientierungs- und Raumfrequenzselektivität Zusatzannahmen über die Eigenschaften der beteiligten Kontrastrezeptoren gemacht werden müssen. Dagegen vereint die Farbzerlegungshypothese über das Konzept der Zerlegungskompatibilität diese Bedingungen in einem funktionalen Prinzip: sowohl eine Veränderung der relativen Orientierung von Umfeld und Infeld als auch ein Abweichen der Raumfrequenz/Körnung des Umfelds von der des Infelds bedeutet eine Einschränkung oder sogar Aufhebung der Zerlegungskompatibilität.



**Abbildung 16.** Reize zur Untersuchung der Farbzerlegungshypothese der Chubb-Illusion. Links: Standardreiz der inkrementellen Situation bei der Chubb-Illusion. Rechts: Reiz mit in der Leuchtdichte um den Faktor vier reduziertem Umfeld (bei erhaltenem Leuchtdichteverhältnis als ein mögliches Kontrastmaß). Versuchspersonen beurteilen die Kontrastreduktion auf der linken Seite als wesentlich stärker im Vergleich mit dem rechten Reiz (vgl. Lotto & Purves, 2001).

## 2.5 Ableitung der Fragestellung

Man könnte aufgrund dieser Überlegungen vermuten, es handele sich bei den Erklärungsmodellen anhand von Adaptation bzw. Farbzerlegung nicht um zwei konkurrierende theoretische Modelle, sondern um dasselbe, lediglich auf zwei unterschiedlichen Beschreibungsebenen formulierte, Prinzip. Dies würde plausibel machen, weshalb der Erklärungsansatz über laterale Inhibition bei Befunden zu Raumfrequenz- oder Orientierungsselektivität um eine entsprechende Zusatzannahme erweitert werden muss, wohingegen der funktional ausgerichtete Erklärungsansatz mittels transparenter Überdeckungen diese Befunde in einem Prinzip – der Zerlegungskompatibilität – vereint: es fehlt auf der Ebene der neuronalen Implementierung *per definitionem* an einer vereinheitlichenden funktionalen Interpretation der Bedingungen für das vorliegende Induktionsgeschehen.

Dieser Vermutung ist jedoch entgegenzusetzen, dass sich aus den beiden theoretischen Perspektiven Vorhersagen ableiten lassen, anhand derer sich die beiden Erklärungsmodelle eindeutig unterscheiden lassen. Hieraus ergibt sich die für die vorliegende Arbeit zunächst maßgebliche Arbeitshypothese, es handele sich bei den Erklärungsätzen um konkurrierende Modelle zu demselben perzeptuellen Phänomen. Eine dritte, jedoch etwas komplexere, Betrachtungsweise wäre, dass evtl. verschiedene quantitative Anteile oder auch qualitative Aspekte der Chubb-Illusion auf unterschiedliche funktionale Prinzipien zurückzuführen sind. Somit müssten möglicherweise sowohl Adaptation als auch Farbzerlegung (und vielleicht auch noch weitere Konzepte) für eine Erklärung des vorliegenden

Kontrastphänomens in Betracht gezogen werden. Diese Überlegungen sollen jedoch erst aufgegriffen werden, wenn keine eindeutige Entscheidung für das eine oder das andere Modell möglich ist.

Für eine empirische Entscheidung zwischen Adaptation und Farbzerlegung sind grundsätzlich zumindest zwei verschiedene Vorgehensweisen möglich. Einerseits besteht die Möglichkeit, dem Vorgehen von Lotto und Purves (2001) folgend die Reize derart zu verändern, dass eine Zerlegungskompatibilität abgeschwächt oder nicht mehr gegeben ist, ohne dass die Voraussetzungen für Adaptation reduziert sind. Sollte sich hierdurch eine Verminderung der Kontrastinduktion feststellen lassen (wofür Lotto und Purves bereits Hinweise erbracht haben), so spricht dies für eine funktionelle Bedeutung von Farbzerlegung bei der Chubb-Illusion. Allerdings muss hierzu bemerkt werden, dass grundsätzlich zu einer solchen Veränderung des Reizmaterials auch die Variation der relativen Orientierung und der Texturstärke (Körnung) von Umfeld und Infeld gehört, dass aber seitens der Adaptationshypothese derartige Hinweise für den Einfluss von Farbzerlegung unter Hinzunahme weiterer Zusatzannahmen (Orientierungs- bzw. Körnungsselektivität der Inhibitionsmechanismen) auch im eigenen theoretischen Rahmen interpretiert werden können.

Auf der anderen Seite erscheint plausibel, dass lediglich in der inkrementellen Situation, in der das Umfeld gegenüber dem Infeld einen höheren Kontrast besitzt, bzgl. des Infeldes ein kontrastinduzierender Transparenzeindruck entstehen kann. Diese Situation genügt gerade auch den Anforderungen, die das Episkotister-Modell für eine Farbzerlegung an Vierfarbreize stellt. Im gegenteiligen Fall könnte aufgrund der vorliegenden Kontrastrelationen höchstens über dem Umfeld ein Filter gesehen werden, womit das Infeld als freiliegend interpretiert werden müsste. Demzufolge sollte sich also eine Kontrastinduktion generell nur in der inkrementellen Situation finden lassen, sofern ausschließlich Farbzerlegungszusammenhänge für die Chubb-Illusion ausschlaggebend sind. Darüber hinaus sollte sich unter der Verwendung einer Methode, die selektiv die Effektanteile in der inkrementellen und der dekrementellen Situation erfassen kann, genauso eine den Effekt abschwächende oder verstärkende Veränderung des Reizmaterials lediglich im inkrementellen Fall zeigen lassen.

Diese beiden Vorgehensweisen sollen gewählt werden, um Hinweise für die Gültigkeit der Farbzerlegungshypothese zu erzielen. Sollten sich diese nicht finden lassen, so muss – bei Ermangelung einer weiteren Alternativerklärung – eine Entscheidung zugunsten der Adaptationserklärung erfolgen.

## 3. EXPERIMENTE

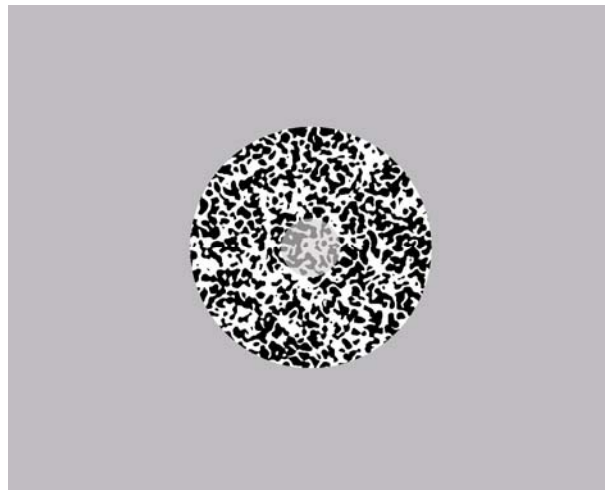
### 3.1 Allgemeine Methode

#### Versuchsaufbau.

Die im Folgenden vorgestellten Experimente wurden in Form von Computerprogrammen realisiert. Die beschriebenen Reize und Versuchsanordnungen wurden auf einem Computerbildschirm dargeboten und sämtliche Messungen erfolgten anhand von Tastendrücken auf einer PC-Tastatur. Die Experimente wurden in einem abgedunkelten Raum unter indirekter Beleuchtung durchgeführt, um unerwünschten Effekten durch Nachbilder der zeitlich stabilen Reiztextur vorzubeugen. Es hat sich gezeigt, dass diese bei dauerhafter Betrachtung binärer Farbreize insbesondere unter vollständiger Dunkeladaptation auftreten, und dass sie die selektive Beurteilung des Kontrast in Infeld-Umfeld-Reizen mitunter stark beeinträchtigen können. Der zur Steuerung der Experimente eingesetzte PC war mit einem Prozessor des Typs „Intel Pentium IV“ (2,8 GHz) und einer „Matrox Pahlia“ Grafikkarte ausgestattet; das zur Darstellung der Reize verwendete Anzeigegerät war ein 21'' CRT-Monitor vom Typ „Sony GDM-500PST9“. Mit diesem Bildschirm war zum Zeitpunkt der Experimente eine maximale Leuchtdichte von  $102\text{cd/m}^2$  darstellbar; sämtliche relative Kontrastangaben beziehen sich somit auf diesen maximal darstellbaren Kontrast. Das Reizmaterial wurde bei einer Anzeigeauflösung von  $1280 \times 960$  Bildpunkten in einer Distanz von ca. 60cm auf homogenem, achromatischem Hintergrund mittlerer Leuchtdichte ( $51\text{cd/m}^2$ ) dargeboten, welcher auch während der Pausenintervalle ohne Reizdarbietung zu sehen war; eine typische Reizdarbietung ist in Abb. 17 dargestellt.

#### Reize.

Es wurden Reize mit einem Durchmesser von 512 Bildpunkten für Umfelder und 128 Bildpunkten für Infelder dargeboten, woraus sich ein ungefährender Sehwinkel von 16 Grad für das Umfeld und 4 Grad für das Infeld ergab. Es soll nun zunächst kurz auf die Methode eingegangen werden, mittels welcher die Textur der verwendeten Reize generiert wurde.



**Abbildung 17.** Typische Darbietungsweise im Rahmen der Diplomarbeit: auf achromatischem, homogenem Hintergrund mittlerer Leuchtdichte wird ein Infeld-Umfeld-Reiz angezeigt.

Die als Reize verwendeten räumlich isotropen, binären Zufallsmuster wurden nach einem von Singer und D’Zmura (1994) beschriebenen Verfahren berechnet; die verwendeten MATLAB-Skripte sind im Anhang aufgelistet. Zunächst wird ein zufälliges Graustufenbild berechnet. Es ergibt sich als Resultat einer inversen Fouriertransformation, wobei als Amplitudenspektrum die Differenz zweier Gaussverteilungen mit gleichem Maximalwert und unterschiedlicher Streuung und als Phasenspektrum gleichverteilte Zufallswerte verwendet werden. Das Binärbild erhält man daraus durch Schwellwertbildung der Absolutwerte des Graustufenbildes. Als Schwelle wird ein Wert nahe dem Mittelwert des Zufallsmusters so gewählt, dass die beiden resultierenden Farbanteile im Bild gleich verteilt sind. Die für einen Reiz angegebene Raumfrequenz bezeichnet hier die durchschnittliche Anzahl der Farbwechsel entlang des Durchmessers eines Reizes fester Größe. Um darüber hinaus orientierte Zufallsmuster zu erzeugen (vgl. Abb. 11), wird das Amplitudenspektrum außerhalb eines Winkelbereichs von  $\pm 15$  Grad um die gewünschte Orientierung ausgeblendet, d.h. auf Null gesetzt; ansonsten wird genauso wie bei den isotropen Reize verfahren.

In einigen Bedingungen wurden Umfeld- und Infeldreiz durch einen homogenen, ringförmigen Bereich (Gap) mit einer Stärke von 8 Bildpunkten und einem Gesamtdurchmesser von 144 Bildpunkten voneinander getrennt; dieser nahm somit einen Sehwinkel von 4.5 Grad ein. Für diesen Gap wurde derselbe Grauwert gewählt wie für den homogenen Hintergrund. Diese Trennung von Umfeld und Infeld in einigen Versuchsteilen wurde vorgenommen, da bzgl. der Adaptations- und der Farbzerlegungshypothese für den Einfluss des Rings unterschiedliche Annahmen existieren. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass unter Gültigkeit der Adaptationshypothese der Gap einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Chubb-Illusion haben sollte. Von der Adaptation wird angenommen, sie hänge in starkem Maße mit der Größe der induzierenden Fläche ab. Der Gap wird nun zwar so im Reiz implementiert, dass sich die Umfeldfläche dadurch verringert, allerdings ist diese Verringerung der Umfeldfläche prozentual eher gering. Unter Gültigkeit der Farbzerlegungshypothese hingegen sollte

der Gap einen wesentlich stärkeren Einfluss besitzen, da zusätzlich zur Verkleinerung der Umfeldfläche für eine Farbzerlegung relevante figurale Aspekte der Reize derart verändert werden, dass deren Kompatibilität mit einer transparenten Überlagerung verringert wird (vgl. Abschnitt 2.4). Die Implikationen der Gap-Manipulation für die Ergebnisse der durchgeführten Experimente werden ggf. im Einzelfall diskutiert.

### **Messverfahren.**

Die Kontrastinduktion wird über zwei verschiedene Verfahren gemessen, das Einstell- und das Staircase-Verfahren. Erstere ist eine vergleichsweise einfache Methode mit geringem zeitlichem Aufwand, wohingegen das zweite Verfahren eine aufwändige Prozedur mit dem Ziel möglichst hoher Messgenauigkeit darstellt. Aus Gründen des zeitlichen Aufwands für die Experimente wird nicht durchgängig das Staircase-Verfahren angewendet. Darüber hinaus ist bislang unklar, ob und auf welche Weise sich die Wahl des Messverfahrens auf Befunde zur Chubb-Illusion auswirkt. Unter anderem sollen somit anhand der durchgeführten Experimente auch diese Messverfahren miteinander verglichen werden.

(a) *Einstellen.* Bei diesem Verfahren werden die jeweiligen Reize dauerhaft dargeboten, wobei die Versuchsperson die Aufgabe hat, mittels der Pfeiltasten auf der PC-Tastatur einen Kennwert dieser Reize so einzustellen, dass das perzeptuelle Resultat definierten Kriterien genügt. Beispielsweise konnte im Rahmen der Nulling-Experimente die Amplitude der kompensierenden Kontrastmodulation des Infeldes in einer Schrittweite von 0.005 erhöht (Hoch-Taste) bzw. verringert (Runter-Taste) werden, wobei für eine Feinabstimmung auch die Wahl einer kleineren Schrittweite von 0.001 möglich war (Rechts- bzw. Links-Taste). Bei Erreichen einer befriedigenden Lösung wird die Darbietung mit der Enter-Taste beendet, worauf sich nach einer Pause von 1s die nächste Reizdarbietung anschließt. Die interessierende Variable, im Fall eines Kontrast-Nullings die wahrgenommene Kontraständerung des Infeldes, wird über einen Rückschluss aus dem eingestellten Reizparameter gemessen. Die Versuchspersonen wurden gebeten, die Amplituden so genau wie möglich einzustellen, und zusätzlich darauf hingewiesen, dass die Reaktionszeit für das jeweilige Experiment nicht von Bedeutung ist.

(b) *Staircase.* Bei diesem Verfahren schließt sich jeweils an die kurze Darbietung eines Reizes ein Urteil mit zwei alternativen Antwortmöglichkeiten an („two-alternatives-forced-choice staircase“, kurz: „2AFC“). Bei Nulling-Experimenten war beispielsweise zu beurteilen, ob der Infeldkontrast in gemeinsamer Phase mit dem Umfeldkontrast oder gegenphasig moduliert erschien. Es handelt sich weiterhin um ein adaptives Verfahren, bei welchem der interessierende Kennwert zunächst auf einen Startwert festgelegt wird, der von dem erwarteten Ergebnis deutlich verschieden ist. Die jeweils nächste Darbietung erfolgt so, dass der Kennwert dem vorangegangenen Urteil entsprechend auf einen neuen Wert gesetzt wird, der im Fall einer erwartungskonformen Entscheidung eine geringere Diffe-

renz zum erwarteten Ergebnis aufweist. Im Fall eines Sinus-Nullings würde aufgrund einer Beurteilung des Infelds als „in Phase mit dem Umfeld moduliert“ für die nächste Darbietung die Amplitude der Infeldmodulation verringert werden. (Je nach Schrittweite für diese Amplitudenänderung könnte in der nächsten Reizdarbietung das Infeld auch gegenphasig zum Umfeld moduliert erscheinen.) Alternierend erfolgen Darbietung und Urteilsabfrage, bis ein für die Genauigkeit des Gesamturteils maßgebliches Abbruchkriterium erreicht ist. Meist liegen jedoch mehrere Kriterien für einen Abbruch vor, wobei mitunter auch die zeitliche Dauer der Gesamtmessung mit einbezogen wird.

In der Diplomarbeit erfolgten stets zwei Staircase-Prozeduren parallel, wobei für die aktuelle Darbietung aus den beiden Alternativen zufällig gezogen wurde. Mit dieser Vorgehensweise sollte verhindert werden, dass die Versuchsperson den Verlauf der adaptiven Messung nachvollziehen und sich somit entsprechend ihrer eigenen Hypothesen über die untersuchten Zusammenhänge verhalten konnten. Die beiden Staircases begannen dazu mit den Messungen auf entgegengesetzten Ausgangswerten (auf der Kontrastskala) unterhalb und oberhalb des erwarteten Ergebnisses, um eine Annäherung an das Gesamturteil von beiden möglichen Richtungen aus gleichermaßen zu ermöglichen. Bei einer erwarteten (und im Rahmen von Voruntersuchungen überprüften) kompensierenden Kontrastamplitude in den Grenzen von 0 bis 0.15 wurden die beiden Startwerte für die parallelen Staircases bei -0.1 und 0.25 für den unteren bzw. oberen Fall gewählt. In Abb. 18 ist der Verlauf einer vollständigen Messung beispielhaft anhand von Daten aus einer Voruntersuchung dargestellt, allerdings wird hier der Anschaulichkeit halber auf die Angabe von Zahlenwerten für die zu messende Nulling-Amplitude verzichtet. Die durchgezogene Linie stellt den Verlauf des bei -0.1 beginnenden Staircase dar, die unterbrochene Linie gilt für das Staircase mit dem Startwert von 0.25; die Symbole kennzeichnen die einzelnen Darbietungen mit der jeweils aktuellen Nulling-Amplitude.

Eine Reizdarbietung dauerte in den Nulling-Experimenten 2s; in diesem Intervall wurde eine vollständige, um  $-0.5\pi$  phasenverschobene, Sinusschwingung der induzierenden Kontrastmodulation mit einer Frequenz von 0.5Hz präsentiert. Der Verlauf dieser Schwingung ist für die maximale Amplitude von 0.5 als durchgezogene Linie in Abb. 19 dargestellt. Im Anschluss an die Darbietung sollten die Versuchspersonen beurteilen, ob die Kontrastmodulation im Infeld in Phase mit der des Umfeldes oder gegenphasig verlief. Sie mussten dazu mittels Tastendruck anzeigen, ob der Kontrast im Infeld in der zweiten Hälfte der Darbietung zu- oder abnahm, bzgl. der sinusoidalen Umfeldmodulation also ab dem Kontrastminimum. Eine Zunahme des Infeldkontrasts in diesem Zeitintervall entspricht einer Kontrastmodulation in Phase mit der Umfeldmodulation, eine Abnahme steht für einen gegenphasigen Verlauf; die entsprechenden Infeldkontrastverläufe sind als unterbrochene Linien ebenfalls in Abb. 19 veranschaulicht. Ein Verlauf der Infeldmodulation in Phase mit dem Umfeld sollte mit der rechten Pfeiltaste angezeigt werden, ein gegenphasiger Verlauf mit der linken. Auf die Betätigung der rechten

Pfeiltaste erfolgte in der nächsten Darbietung des jeweiligen Staircases eine Verminderung der Nulling-Amplitude, wogegen der umgekehrte Fall in einer Vergrößerung der Amplitude resultierte.<sup>16</sup>

Jede Urteilsänderung innerhalb eines Staircase (erkennbar als Richtungswechsel innerhalb der Verläufe von Abb. 18) bewirkte eine Halbierung der Schrittweite für die nächste Amplitudenänderung. Im Anschluss an das Urteil folgte zunächst eine Pause von 1s und schließlich die nächste Reizdarbietung. Auch bei diesem Verfahren wurden die Versuchspersonen gebeten, die Urteile so exakt wie möglich abzugeben, und darauf hingewiesen, dass die Reaktionszeit für das jeweilige Experiment nicht von Bedeutung ist.

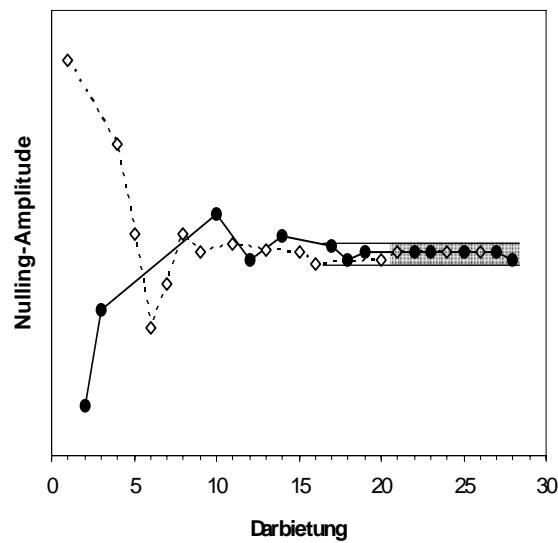
Es waren zwei Abbruchkriterien in der Staircase-Prozedur realisiert. Einerseits erfolgte ein Abbruch bei hinreichender Genauigkeit der Messung, wenn die letzten 12 Urteile beider Staircases innerhalb eines „Schlauchs“ definierter Breite lagen. Genauer durfte der maximale Unterschied der letzten 12 Nulling-Amplituden höchstens 12 Einheiten der minimalen Amplitudenänderung betragen; der entsprechende Wertebereich ist in Abb. 18 von zwei horizontalen Linien eingefasst dargestellt. Tritt diese Abbruchvariante ein, soll von einer *Konvergenz* der beiden Staircases gesprochen werden, da sie hinreichend weit auf ein gemeinsames Urteil zugelaufen sind. Allerdings endete die Messung ebenfalls, sofern nach 60 abgegebenen Urteilen das erste Kriterium noch nicht erreicht war; so wurde stets ein gewisser zeitlicher Rahmen eingehalten. Die zu messende Nulling-Amplitude ergab sich schließlich aus der Mittelung über die letzten 8 sich aus den Urteilen ergebenden Werten (in Abb. 18 grau hervorgehoben).

### **Versuchspersonen.**

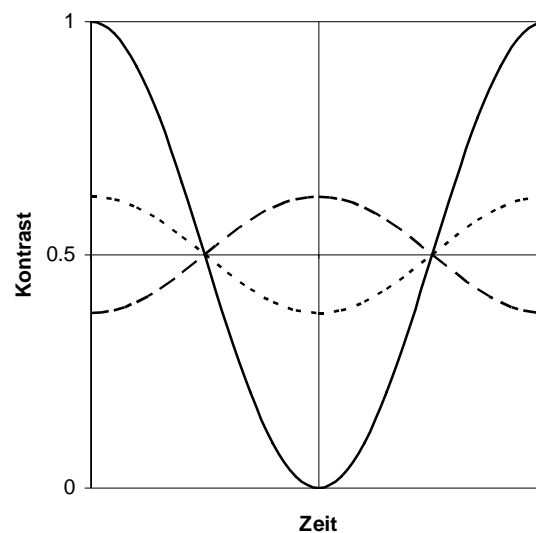
Der größte Teil der Versuchspersonen war als wissenschaftliche Hilfskräfte am Labor für visuelle Psychophysik angestellt (AP, IG, KR, MH, MP, TG, TP, TS); überdies fanden einige Erhebungen an Studenten der Psychologie statt (SA, VP, VS). Zusätzlich nahm in einigen Fällen der Betreuer dieser Arbeit an den Experimenten teil (FF), und für sämtliche Experimente liegen Datensätze des Verfassers vor (OT). Die Versuchspersonen hatten eine normale oder mit einer Sehhilfe korrigierte Sehschärfe und berichteten keine Farbfehlsichtigkeiten oder sonstige visuelle Beeinträchtigungen.

---

<sup>16</sup> Zur Festlegung der Nulling-Amplituden und der Schrittweite für deren Änderung wurde anhand der Kontrastdifferenz der beiden Ausgangssituationen ein Vektor aus der maximalen Anzahl verschiedener dazwischen liegender RGB-Koordinaten erstellt; die initiale Schrittweite für das Staircase betrug 50 Elemente dieses Vektors.



**Abbildung 18.** Verlauf zweier paralleler Staircases: die Abszisse gibt die Ordnungsnummer der aktuellen Darbietung an, auf der Ordinate ist die zugehörige Nulling-Amplitude abgetragen (hier ohne Zahlenwerte). Dem Urteil entsprechend erfolgt bei der jeweils nächsten Darbietung innerhalb desselben Staircase eine Erhöhung bzw. Verringerung der Nulling-Amplitude um einen definierten Betrag, wobei jede Urteiländerung innerhalb eines Staircase eine Halbierung dieser Schrittweite bewirkt. Die Messung endet bei hinreichender Konvergenz der Urteile der beiden parallelen Staircases, gekennzeichnet durch Hervorhebung der letzten 12 Datenpunkte (horizontale Linien). Die gemessene Nulling-Amplitude ergibt sich aus der Mittelung der letzten 8 Datenpunkte (grau hinterlegt).



**Abbildung 19.** Zeitlich-sinusoidale Kontrastverläufe im Rahmen der Staircase-Prozedur. Durchgezogene Linie: Kontrastmodulation des Umfelds für die maximale Amplitude von 0.5. Unterbrochene Linien: alternative Fälle der in Phase (lange Striche) oder gegenphasig (kurze Striche) verlaufenden Kontrastmodulation im Infeld.

## ***3.2 Replikationen***

Zunächst sollen nun in zwei Experimenten Sachverhalte untersucht werden, bzgl. derer in der Literatur widersprüchliche Ergebnisse berichtet wurden; es handelt sich um die Untersuchung der Orientierungs- und der Raumbfrequenzselektivität der Chubb-Illusion. Da hierfür Reize verwendet werden, die denen von Singer und D’Zmura (1994) bzw. D’Zmura und Singer (1996) sehr ähnlich sind, können die ersten beiden Experimente gewissermaßen als Replikationsversuche zu diesem Experimenten aufgefasst werden.

### ***3.2.1 Einfluss der relativen Texturkörnung***

#### **Konzeptueller Rahmen.**

Eine Körnungselektivität der Chubb-Illusion, also eine Abhängigkeit der Kontrastinduktion von der relativen Texturstärke von Umfeld und Infeld, ist je nach theoretischer Perspektive sehr unterschiedlich zu bewerten. Im Rahmen der Adaptationshypothese erfordert ein positiver Befund eine Zusatzannahme bzgl. der Eigenschaften der neuronalen Reizverarbeitung. Die inhibitorischen Verbindungen der Rezeptoren, welche die entsprechende Kontrastinformation verarbeiten, dürfen nur dann – oder in dem Fall besonders stark – aktiviert werden, wenn die hemmenden und die gehemmten Zellen durch Kontrastinformationen auf dem gleichen Raumbfrequenzkanal aktiviert worden sind. Allerdings lässt sich aus dieser Perspektive heraus nicht vorhersagen, ob sich ein Einfluss der Körnung einstellen sollte. Die Farbzerlegungshypothese hingegen sagt klar voraus, dass ein Abweichen der Umfeldtextur von der des Infeldes mit einer geringeren Zerlegungskompatibilität einhergeht (vgl. Abschnitt 2.4, Kontrastinduktion und Farbzerlegung.), und dies in einer Verringerung der Kontrastinduktion resultieren sollte. Da allerdings grundsätzlich ein positiver Befund im Rahmen beider konkurrierender Erklärungsansätze interpretierbar ist, lässt sich anhand der Ergebnisse dieses Experiments zunächst nicht eindeutig zwischen den beiden Modellen differenzieren (siehe auch Abschnitt 2.4, Ableitung der Fragestellung.).

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit betrifft die Frage, ob sich ein etwaiger Einfluss der Körnung in Form eines Alles-oder-Nichts-Prinzips zeigt, oder ob bei einem Abweichen der Umfeldtextur von der des Infeldes die Kontrastinduktion mit zunehmendem Unterschied graduell zurückgeht. Sofern die Adaptation von Kontrastrezeptoren für die Chubb-Illusion ausschlaggebend ist, wäre wohl

am ehesten zu erwarten, dass sich ein solcher Einfluss der Körnung in gradueller Weise zeigt. Derart graduell verlaufende Sensitivitätsfunktionen von Sinnesrezeptoren finden sich beispielsweise bei den achromatisch oder farblich spezialisierten Photozellen auf der Retina. Bei der Zerlegungskompatibilität hingegen sollte es sich vermutlich eher um ein Alles-oder-Nichts-Prinzip handeln, da die entsprechenden Kriterien/Hinweisreize entweder erfüllt sind, oder nicht. So müsste die Kontrastinduktion bei hinreichenden Texturunterschieden von Umfeld und Infeld um einen festen Betrag zurückgehen, wenn sie auf einen Farbzerlegungsmechanismus zurückzuführen wäre. Es wäre in diesem Fall jedoch nicht zu erwarten, dass die Kontrastinduktion vollständig zum Erliegen kommt, da eine gemeinsame Texturstärke von Umfeld und Infeld nicht den einzigen Hinweisreiz für eine Farbzerlegung darstellt. Vielmehr existieren verschiedene farbliche und figurale Aspekte der vorliegenden Reize, die auf eine transparente Überlagerung hinweisen. Somit sollte der Wahrnehmungseindruck eines über dem Infeld gesehenen transparenten Filters aufgrund der unterschiedlichen Texturstärke nicht vollständig aufgehoben sein.

Sollte sich also eine Abhängigkeit der Kontrastinduktion in Form eines Alles-oder-Nichts-Prinzips feststellen lassen, so läge eine Entscheidung für die Farbzerlegungshypothese nahe, wohingegen der umgekehrte Fall als Hinweis für die Gültigkeit der Adaptationshypothese zu werten wäre.

### **Methode.**

Zur Untersuchung der Körnungsselektivität der Chubb-Illusion wurden Reize verwendet, welche sich in der Feinheit der Umfeldtextur unterschieden; Beispiele hierfür sind in Abb. 20 dargestellt. Zur Bestimmung der Körnung wurde bei Singer & D’Zmura (1996) die Anzahl von Farbwechseln entlang des Durchmessers eines Reizfeldes fester Größe herangezogen. Die hier verwendeten Reize wurden zwar anhand anderer Kriterien generiert, sind mit denen von Singer und D’Zmura jedoch weitgehend identisch, sodass das Maß der Farbwechselanzahl entlang einer definierten Strecke für ein grundsätzliches Verständnis des Körnungsbegriffs auch in diesem Experiment ausreichen soll. Die Umfeldkörnung wurde in 7 Stufen so variiert, dass das Infeld gerade den mittleren Fall bildete, und sich Werte von 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.33, 2 und 4 bzgl. der Körnung des Infeldes ergaben. Das Experiment wurde von FF mit Gap unter Verwendung des Einstellverfahrens und von OT ohne Gap unter Verwendung der Staircase-Prozedur durchgeführt; die 7 Stufen der Körnungsvariation wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Unter Verwendung des Staircase wurde für jede der sieben Körnungsstufen die Kontrastinduktion nur einmal gemessen, während beim Einstellen für jede Variante 4 Messungen durchgeführt wurden; in letzterem Fall ergaben sich folglich 28 Darbietungen. Die Darbietungsweise entsprach dem Standardverfahren eines Nulling-Experiments mit zeitlich-sinusoidaler Kontrastmodulation im Umfeld mit einer Amplitude von 0.4, der zeitliche Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld betrug 0.5.

## Ergebnisse.

Es zeigte sich ein deutlicher Einfluss der relativen Texturstärke auf die gemessene Kontrastinduktion. Die Ergebnisse für die Versuchspersonen OT und FF sind in Abb. 21 dargestellt, für die 7 Stufen der Körnungsstärke ist die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Obwohl bei Verwendung zweier verschiedener Messmethoden nur wenige Messungen pro Datenpunkt und Versuchsperson durchgeführt wurden, zeigt sich in den beiden Diagrammen das gleiche Muster. Die Kontrastinduktion ist bei gleicher Körnung von Umfeld und Infeld tendenziell am stärksten, und wird mit wachsendem Unterschied in der Textur geringer. Hierbei scheint der Abfall des Effekts für eine feiner werdende Textur steiler zu sein als im gegenteiligen Fall. Diese graduelle Beziehung von Texturstärke und Kontrastinduktion gehorcht offenbar keinem Alles-oder-Nichts-Prinzip, was gegen die Gültigkeit der Farbzerlegungshypothese spricht.

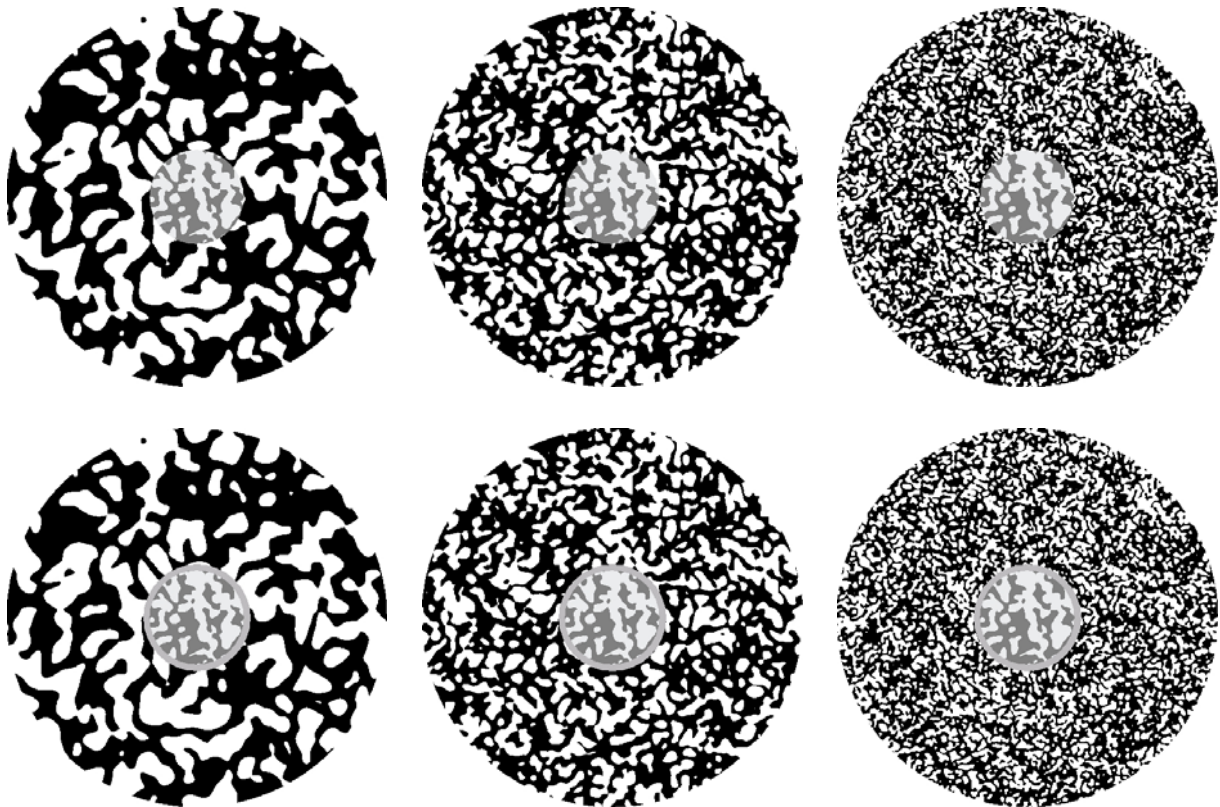
Des Weiteren findet sich in beiden Diagrammen bei der Körnungsstufe von 0.5 ein „Knick“ des Kontrastverlaufes, wobei bislang unklar ist, wie dieser genau zu interpretieren ist. Es wäre denkbar, dass es sich bei den Datenverläufen um eine Überlagerung zweier separater Einflüsse handelt: des symmetrischen Einflusses der relativen Körnung von Umfeld und Infeld einerseits, wie er den Daten von Chubb et al. (1989) entspricht (vgl. Abb. 12), und des annähernd linearen Einflusses der absoluten Körnung des Umfelds (oder evtl. einer Mittelung von Umfeld- und Infeldkörnung) andererseits. Eine Überlagerung einer symmetrischen und einer linear fallenden Kurve ergäbe möglicherweise gerade einen Verlauf, wie er den Kurven in Abb. 21 entspricht. Beobachtungen im Rahmen der Experimente lassen vermuten, dass möglicherweise tatsächlich ein derartiger linearer Einfluss der absoluten Körnung der Reize existiert.

Schließlich sind deutliche Unterschiede der beiden Kontrastverläufe bzgl. ihrer absoluten Werte erkennbar, was die nicht unwesentlichen Unterschiede zwischen den Versuchspersonen in der jeweiligen Empfindlichkeit für den untersuchten Kontexteffekt widerspiegelt. Diese interindividuelle Varianz war in den meisten Experimenten der Diplomarbeit zu beobachten.

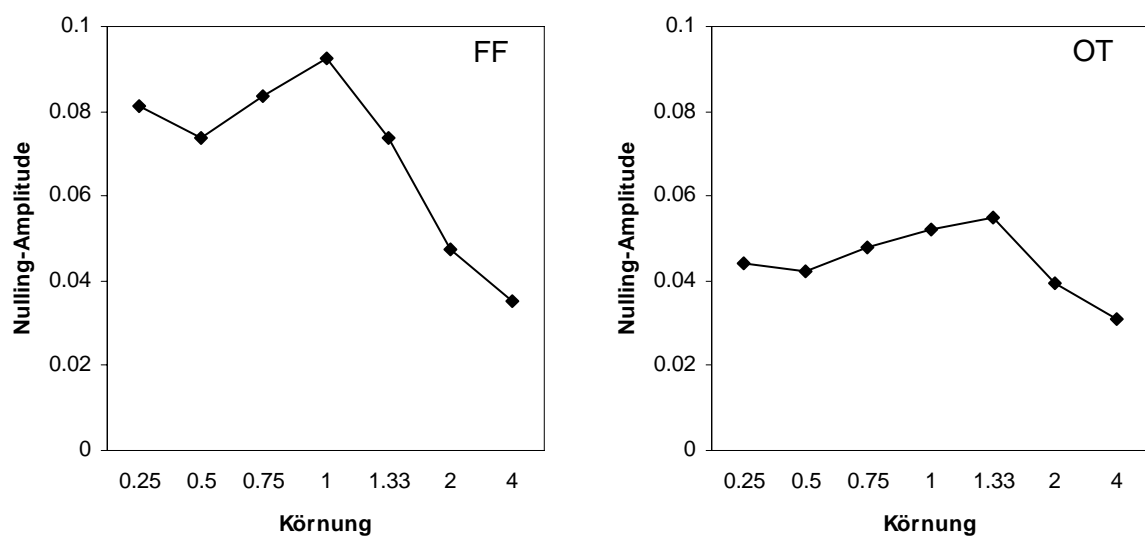
Diese Ergebnisse sind konform mit den Befunden von Chubb et al. (1989), welche ebenfalls einen deutlichen Einfluss der Raumfrequenz auf die Chubb-Illusion fanden, stehen allerdings im Widerspruch zu den Ergebnissen von Singer und D’Zmura (1996), welche keinen Effekt der Körnungsstärke feststellen konnten.<sup>17</sup> Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass die bisherigen widersprüchlichen Befunde zur Körnungsselektivität der Chubb-Illusion möglicherweise nicht – wie an anderer Stelle vermutet – auf die Unterschiede in den verwendeten Reizen zurückzuführen sind. Zumindest wurde der hier gefundene Einfluss der Körnung mit Reizen gezeigt, die den von Singer und D’Zmura verwendeten sehr ähnlich sind.

---

<sup>17</sup> Für eine genauere Erläuterung der Beziehung von Körnung und Raumfrequenz siehe 2.2 *Methodische Aspekte*, *Verwendete Reize*.



**Abbildung 20.** Reize zur Untersuchung der Körnungselektivität bei der Chubb-Illusion. Oben: Umfelddreize ohne Gap mit halber (links), einfacher (Mitte) und doppelter (rechts) Körnung bzgl. der Infeldtextur. Unten: entsprechende Reize mit Gap.



**Abbildung 21.** Ergebnisse zur Körnungselektivität der Chubb-Illusion (links: FF, rechts: OT): für die sieben Stufen der Reiztextur ist die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Trotz einer geringen Anzahl von Erhebungen zeichnet sich ab, dass die Kontrastinduktion bei gleicher Körnung von Umfeld und Infeld am stärksten ist,

*und mit wachsendem Unterschied in der Textur geringer wird. Der Abfall des Effekts ist für eine feiner werdende Textur steiler als im gegenteiligen Fall.*

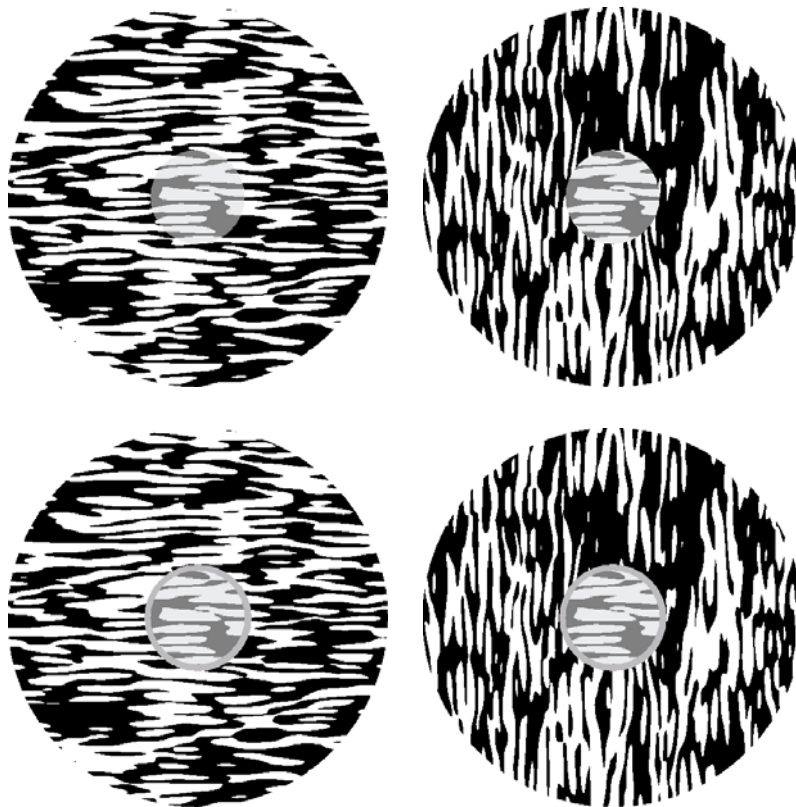
### **3.2.2 Einfluss der relativen Texturorientierung**

#### **Konzeptueller Rahmen.**

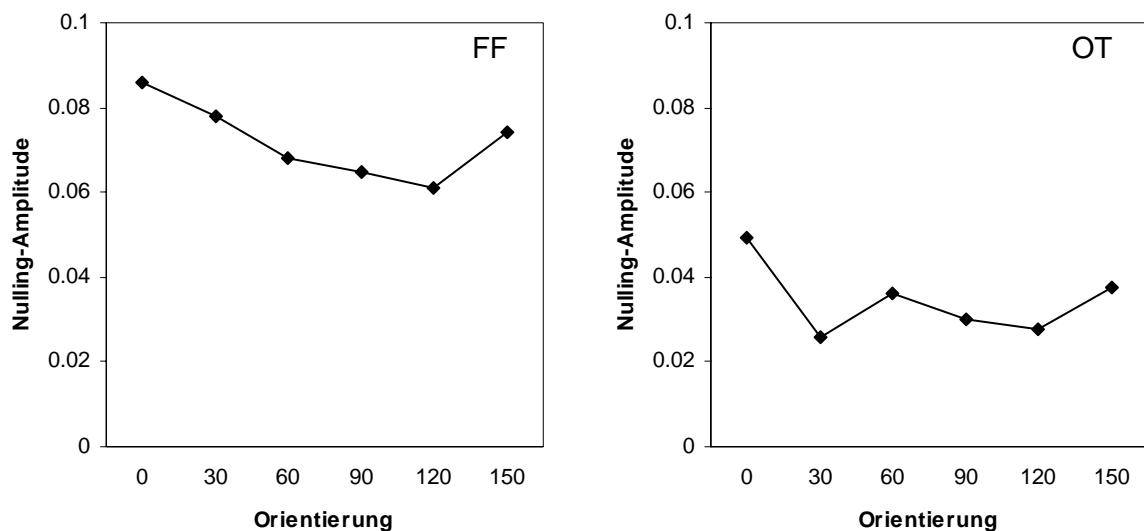
Sollte sich eine Orientierungsselektivität der Chubb-Illusion zeigen lassen, also eine Abhängigkeit der Kontrastinduktion von der relativen Orientierung von Umfeld- und Infeldtextur, so wäre wie bei der Körnungsselektivität nicht entscheidbar, ob dieses Phänomen auf Adaptation oder Farbzerlegungsvorgänge zurückgeht. Analog zur Argumentation bei der Körnung muss bei einem positiven Befund die Adaptationshypothese um eine Zusatzannahme erweitert werden, während der Erklärungsansatz mittels Farbzerlegungsmechanismen auch den Aspekt der Umfeldorientierung über das Konzept der Zerlegungskompatibilität berücksichtigt. Allerdings könnte es sich – wie bei der Körnungsselektivität – erneut entweder um ein Alles-oder-Nichts-Prinzip oder um eine graduelle Abhängigkeit handeln. Ersteres spräche für die Farbzerlegungs-, letzteres für die Adaptationshypothese.

#### **Methode.**

Zur Untersuchung der Orientierungsselektivität dienten Reize, welche im wesentlichen dem bisher beschriebenen Standardfall entsprechen, wobei die übliche Textur entlang einer Achse gestreckt ist, sodass den Reizen eine eindeutige räumliche Orientierung zugewiesen werden kann. Das Umfeld wurde in 30°-Schritten von 0° bis 150° gegenüber dem (horizontal ausgerichteten) Infeld rotiert. Abb. 22 zeigt in der oberen Reihe die Fälle gleicher (0°) und orthogonaler Orientierung (90°); in der unteren Reihe sind die entsprechenden Situationen mit Gap dargestellt, die in einer zweiten Bedingung untersucht wurden. Das Experiment wurde für FF mit und für OT ohne Gap durchgeführt, Messmethode war bei beiden Versuchspersonen die Staircase-Prozedur. Für jede Orientierungsstufe wurde die Kontrastinduktion einmal erhoben, die 6 Stufen wurden in zufälliger Reihenfolge dargeboten. Die Darbietungsweise entsprach dem Standardverfahren eines Nulling-Experiments mit zeitlich-sinusoidaler Kontrastmodulation mit einer Amplitude von 0.4 im Umfeld; der zeitliche Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld betrug 0.5.



**Abbildung 22.** Reize zur Untersuchung der Orientierungsselektivität bei der Chubb-Illusion. Oben: Umfeldreize mit gleicher (links) und orthogonaler Orientierung (rechts) zum Infeld. Unten: Entsprechende Reize mit Gap.



**Abbildung 23.** Ergebnisse zur Orientierungsselektivität der Chubb-Illusion (links: FF, rechts: OT): für die 6 Stufen der Umfeldorientierung ist die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Die Nulling-Amplitude ist bei gemeinsamer Orientierung von Umfeld und Infeld am stärksten, und abgesehen von einem Ausreißer (zweiter Datenpunkt bei OT) zeichnet sich mit wachsendem Orientierungsunterschied ein nahezu linearer Abfall des

*Effekts ab, bis der orthogonale Fall überschritten ist; hieran schließt sich ein erneuter Anstieg des Effekts an. Interessanterweise liegt das Minimum nicht bei orthogonaler Orientierung (90°), sondern erst bei der nächsten Stufe.*

## Ergebnisse.

Die Ergebnisse weisen einen deutlichen Einfluss der relativen Umfeldorientierung auf die Kontrastinduktion auf, der auch in diesem Fall keinem Alles-oder-Nichts-Prinzip gehorcht. Somit spricht auch dieser Befund gegen die Farbzerlegungs- und für die Adaptationshypothese. Die Daten für FF und OT sind in Abb. 23 veranschaulicht, für die 6 Stufen der Umfeldorientierung ist die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Der Effekt ist bei gleicher Orientierung von Umfeld und Infeld am stärksten, und nimmt abgesehen von einem Ausreißer (zweiter Datenpunkt bei OT) mit wachsendem Orientierungsunterschied nahezu linear ab, bis der orthogonale Fall überschritten ist; hieran schließt sich ein erneuter Anstieg des Effekts an. Es ist erneut darauf hinzuweisen, dass den Datenverläufen lediglich eine geringe Anzahl von Erhebungen zugrunde liegt (eine Messung pro Datum), und sich dennoch (mit einer Ausnahme) eine ziemlich genaue Übereinstimmung der beiden Diagramme ergibt.

Interessanterweise liegt das Minimum nicht bei orthogonaler Orientierung (90°), sondern erst bei der nächsten Stufe. Aufgrund der geringen Stichprobe sollte dieser Befund jedoch nicht so stark gewichtet werden; möglicherweise kommt das Minimum lediglich aufgrund von Messfehlern bei der Orientierung von 120° zu liegen. Dazu existieren verschiedene weitere Störeinflüsse, die für den unerwarteten Befund verantwortlich sein könnten. Zunächst einmal ist die Auswahl der Umfeldreize nicht symmetrisch, sondern der Fall eines um 180° rotierten Umfeldes fehlt. Dazu handelt es sich bei der verwendeten Reiztextur nicht um ein symmetrisches Muster, sondern sie beinhaltet weitgehend unregelmäßige figurale Elemente (vgl. Abb. 22). Und schließlich unterscheiden sich die verschieden orientierten Umfeldreize grundsätzlich in der Textur, da sie nicht durch Rotation immer desselben Musters erzeugt, sondern vollständig unabhängig voneinander generiert wurden. Auf jeden Fall erscheint der Schluss ungerechtfertigt, es handele sich hierbei um ein unmittelbar der Kontrastinduktion zurechenbares Ergebnis, da in diesem Fall schwerlich erklärbar wäre, weshalb gerade die 120°-Orientierung, nicht aber die hierzu prinzipiell symmetrische 60°-Orientierung (oder beide gemeinsam) das Minimum der Kurve bilden sollte.

### ***3.3 Experimente zur genaueren Untersuchung der Chubb-Illusion***

Die nun folgenden drei Experimente bilden eine Versuchseinheit, mit deren Hilfe die Beziehung von induzierendem und induziertem Kontrast genauer untersucht werden sollte. Es wurde zunächst die Kontrastinduktion in zwei Experimenten mit verschiedenen Methoden gemessen, um anschließend die Ergebnisse (und deren theoriebezogene Interpretation) in einem dritten Experiment auf ihre Vergleichbarkeit hin zu untersuchen.

#### ***3.3.1 Einfluss der Umfeldamplitude – Sinus-Nulling***

##### **Konzeptueller Rahmen.**

Im ersten Experiment sollte mit Hilfe der zwei bisher verwendeten Messverfahren (Einstellen und Staircase) die Abhängigkeit der Nulling-Amplitude von der Amplitude der induzierenden Umfeldmodulation exakt bestimmt werden. Einerseits kann auch dieses Experiment als Versuch gewertet werden, die Ergebnisse von Singer und D’Zmura (1994) zu replizieren, da erneut sehr ähnliche Reize verwendet wurden (vgl. Abb. 1). Darüber hinaus sollten die Ergebnisse als Referenz für weitergehende Untersuchungen der Chubb-Illusion in den nächsten beiden Experimenten dienen.

##### **Methode.**

Die Messung der Kontrastinduktion erfolgte in Form eines Nulling-Experiments mit sinusoidaler Kontrastmodulation. Die Amplitude der induzierenden Kontrastmodulation wurde in fünf Stufen von 0.1 bis 0.5 variiert, wobei für Umfeld und Infeld des in Abb. 1 dargestellten Standardreizes ein gleicher zeitlicher Kontrastmittelwert von 0.5 gewählt war. Das Experiment wurde für jede der 12 Versuchsperson (AP, IG, KR, MH, MP, TG, TP, TS, SA, VP, VS, OT) in zwei separaten Durchgängen mit und ohne Gap durchgeführt, wobei innerhalb dieser beiden Versuchsteile die 5 Stufen der Umfeldmodulation in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Für alle Versuchspersonen wurden diese beiden Varianten (mit und ohne Gap) mit Hilfe beider Messverfahren untersucht, somit ergaben sich insgesamt vier separat durchgeführte Telexperimente. Unter Verwendung des Staircase erfolgte pro Versuchsperson und Bedingung eine Messung, während für das Einstellen pro Bedingung 4 Dar-

bietungen, zusammen also 20 Darbietungen pro Versuchsperson, stattfanden. Hieraus ergaben sich folglich insgesamt 2x5 Messungen mit Hilfe der Staircase-Prozedur und 2x20 Darbietungen im Rahmen des Einstellens. Um Ermüdungseffekten aufgrund der langen Dauer dieses Experiments vorzubeugen, wurden die vier Teilerperimente an verschiedenen Tagen oder, wenn dies aus terminlichen Gründen nicht einzurichten war, durch hinreichend lange Pausen (> 30min) unterbrochen durchgeführt.

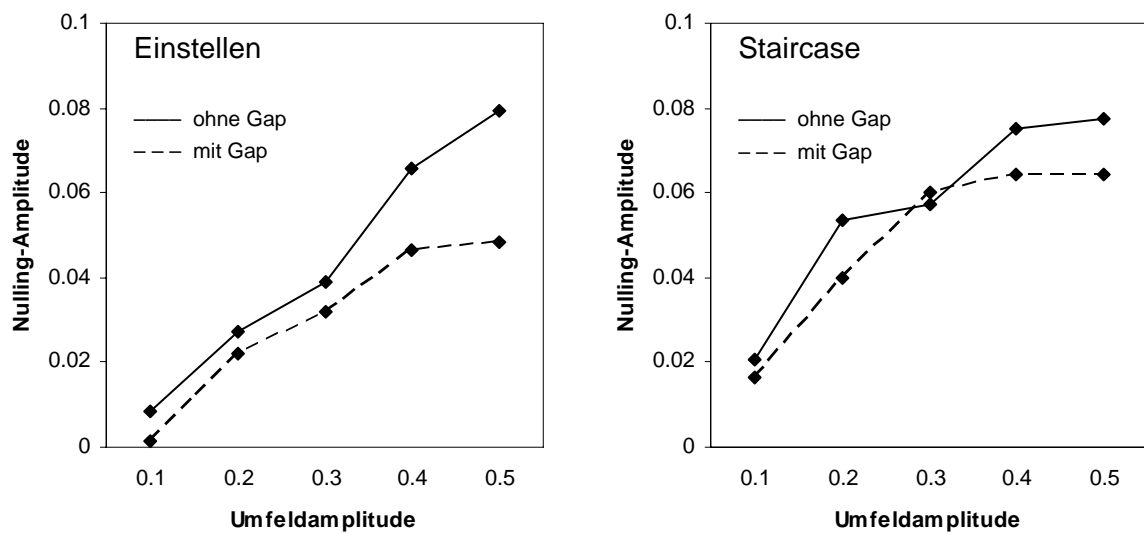
### Ergebnisse.

Singer und D'Zmura (1994) berichteten für die Beziehung der Nulling-Amplitude zur induzierenden Umfeldmodulation einen näherungsweise linearen Anstieg der Kontrastinduktion bis zu einer Amplitude von 0.3 und einen sich anschließenden nahezu konstanten Verlauf des Effekts bei einem Wert von 0.05 (vgl. Abb. 5). Die Ergebnisse des vorliegenden Experiments deuten jedoch eher auf einen durchgehend kurvilinearen Zusammenhang hin, der näherungsweise durch einen negativ beschleunigt wachsenden Verlauf beschrieben werden kann. Dieser ist tendenziell in sämtlichen Datenverläufen zu erkennen, wobei bei der mittleren Stufe der Umfeldmodulation zumeist ein leichter „Knick“ zu sehen ist. In Abb. 24 ist für die fünf Stufen der Amplitude der induzierenden Umfeldmodulation die über alle Versuchspersonen gemittelte Nulling-Amplitude abgetragen. Auf der linken Seite finden sich die Ergebnisse des Einstellens, auf der rechten die aus dem Staircase. Die durchgezogenen Linien stellen die Daten aus den Versuchsteilen ohne Gap, die unterbrochenen die der Versuchsteile mit Gap dar.

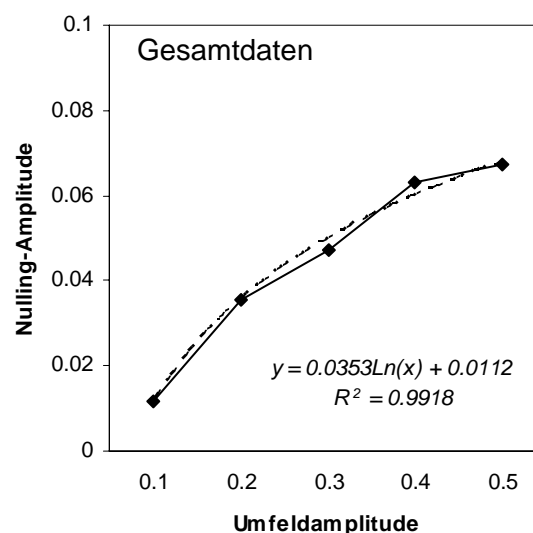
Es ist deutlich zu erkennen, dass die ohne Gap erzielten Ergebnisse erwartungskonform höhere Werte aufweisen als im gegenteiligen Fall. Der Unterschied zwischen den beiden Gap-Situationen stimmt mit den theoretischen Erwartungen überein, die sich sowohl aus der Adaptations- als auch aus der Farbzerlegungshypothese ergeben (vgl. Abschnitt 3.1, Reize.). Die Ausprägung dieses Unterschieds lässt jedoch vermuten, dass die Chubb-Illusion zumindest zu einem Teil auf Farbzerlegung zurückgeht, da ein derart deutlicher Unterschied im Effekt aus der Adaptationsperspektive heraus nicht zu erwarten ist. Aus dieser Perspektive wäre eher zu erwarten, dass der Unterschied im Effekt mit dem Unterschied des Flächeninhalts für den Umfeldreiz korrespondiert, der zwischen den beiden Gap-Situationen besteht. Dieser beträgt jedoch nur ungefähr 1.66%, wogegen der Unterschied im Effekt für die meisten Stufen der Umfeldmodulation mindestens 20% beträgt, was mehr als dem Zehnfache entspricht. Mit der Farbzerlegungshypothese ist dieser große Unterschied jedoch verträglich, da die figurale Abänderung der Reize durch den Gap mit einer deutlichen Verminderung der Zerlegungskompatibilität einhergeht. Somit ist eine deutliche Abschwächung des Transparenzeindrucks bzgl. des Infelds zu erwarten, und folglich ebenso eine Verringerung der Kontrastinduktion aufgrund von Farbzerlegung. Die Erwartung bzgl. des perzeptuellen Eindrucks konnte durch Beobachtungen während der Experimente bestätigt werden.

Darüber hinaus ist zu erkennen, dass die mittels Einstellen ermittelten Werte überwiegend geringer ausfallen als die aus dem Staircase. Dies widerspricht allerdings der theoretischen Erwartung, dass sich zwischen verschiedenen Messverfahren kein Unterschied in der Stärke der Kontrastinduktion ergeben sollte (vgl. Abschnitt 3.1). Beide Messverfahren bedienen sich desselben perzeptuellen Kriteriums und sollten sich im Grunde genommen ausschließlich dahingehend unterscheiden, dass das Staircase aufgrund der hohen Anzahl von Einzelurteilen für eine Messung dem Einstellen in der Messgenauigkeit überlegen ist. Es liegt derzeit keine theoretisch motivierte Interpretation für diesen Befund vor.

Die Daten aus allen Versuchsteilen weisen annähernd eine gleiche Struktur auf (s.o.). So erscheint es gerechtfertigt, für eine genauere Schätzung des Kontrastverlaufes, der sich aus der Variation der Umfeldamplitude ergibt, die Daten aller Versuchsteile zu mitteln; der sich hieraus ergebende Kontrastverlauf ist in Abb. 25 dargestellt. Zusätzlich ist eine an die Daten gefittete logarithmische Näherung der dargestellten Beziehung abgetragen; neben der Kurvengleichung ist auch der Determinationskoeffizient als ein Maß der Güte für die Näherung angegeben ( $R^2 \approx 0.99$ ). Diese Näherung kann allgemein als eine Beschreibung der Beziehung zwischen induzierender und induzierter Kontrastmodulation betrachtet werden, wobei hier aufgrund der Mittelung über verschiedene Versuchsbedingungen die absoluten Zahlenwerte nicht mehr interpretiert werden können. Vielmehr dient diese Kurve zur Klärung der Frage nach dem initialen Anstieg der Kontrastinduktion und einer möglichen Sättigung des Effekts. Aufgrund der Daten von Singer und D'Zmura (1994) entsteht leicht der Eindruck, der Befund zum Zusammenhang von Infeld- zu Umfeldamplitude lasse sich in zwei klar trennbare Teilbefunde unterteilen. Einerseits lasse sich eine lineare Beziehung von Infeld- zu Umfeldamplitude beobachten, und andererseits sei – gleich einem Deckeneffekt – eine spontane Sättigung der Kontrastinduktion zu beobachten. Hierbei bleibt unberücksichtigt, ob diese Sättigung intern (aufgrund der Eigenschaften der Adaptation) oder extern (beispielsweise aufgrund der Reize oder Untersuchungssituation) begründet ist. Die vorliegenden Daten stehen nun in klarem Widerspruch zu dieser Sichtweise des Einflusses der Höhe der Umfeldkontrastamplitude auf die Chubb-Illusion: es ist deutlich ein durchgehender kurvilinearere Datenverlauf zu erkennen. Dieser soll einerseits im Rahmen der Entwicklung eines Modells zur Vorhersage der Chubb-Illusion aufgrund von Farbinduktion näher betrachtet bzw. untersucht werden (siehe Abschnitt 4.).



**Abbildung 24.** Ergebnisse zum Einfluss der Stärke der induzierenden Kontrastmodulation: für die 5 Stufen der Umfeldamplitude ist gemittelt über alle Versuchspersonen die jeweilige Nulling-Amplitude des Infelds abgetragen. Auf der linken Seite finden sich die Ergebnisse des Einstellens, auf der rechten die des Staircase. Die durchgezogenen Linien stellen die Daten aus den Versuchsteilen ohne Gap, die unterbrochenen die der Versuchsteile mit Gap dar. Es zeigt sich ein kurvilinearere Zusammenhang in Form eines negativ beschleunigten Kontrastverlaufes. Erwartungsgemäß weisen die ohne Gap erzielten Ergebnisse höhere Werte auf als im gegenteiligen Fall.



**Abbildung 25.** Dargestellt ist die Mittelung über die Daten aus sämtlichen Versuchsteilen. Die unterbrochene Linie ist eine an die Daten gefittete logarithmische Näherung; zusätzlich zur Kurvengleichung ist der Determinationskoeffizient als Maß für die Güte der Näherung angegeben ( $R^2 \approx 0.99$ ).

### 3.3.2 Einfluss der Umfeldamplitude – asymmetrischer Kontrastabgleich

#### Konzeptueller Rahmen.

Im zweiten Experiment wurde anstatt des Sinus-Nullings eine alternative Form der Reizdarbietung und der Messung der Kontrastinduktion gewählt, da die sinusoidale Modulation des Infeldkontrasts bei der ersten Methode einige Beschränkungen für eine Untersuchung der Kontrastinduktion mit sich bringt. Die Beziehung von induzierendem zu induziertem Kontrast weist möglicherweise verschiedene Asymmetrien auf, welche mittels des Sinus-Nullings nicht festgestellt werden können. Diese sollen zunächst genauer betrachtet werden, bevor ein Versuch unternommen wird, entsprechende Asymmetrien der Kontrastinduktion nachzuweisen.

(a) *Asymmetrie erster Art.* Mit Hilfe des Sinus-Nullings können Unterschiede in der Kontrastinduktion zwischen der inkrementellen und der dekrementellen Situation nicht gefunden werden; derartige Unterschiede sollen im weiteren als *Asymmetrien erster Art* bezeichnet werden. Denn für die Kompensation der Kontrastinduktion im Infeld wird beim Sinus-Nulling ein sinusoidaler Kontrastverlauf verwendet, welcher stets bzgl. beider Halbschwingungen in Verlaufsform und Amplitude symmetrisch ist (vgl. Abb. 3, links). Daher wird für die Messung der wahrgenommenen Kontraständerungen im Infeld lediglich die Amplitude als die Sinusschwingung hinreichend charakterisierender Kennwert erhoben.<sup>18</sup> Es werden also prinzipiell keinerlei Informationen ermittelt, anhand derer die inkrementelle und die dekrementelle Situation separat betrachtet werden können.

Die Frage, ob eine solche Asymmetrie erster Art existiert, ist allerdings für die Untersuchung der Farbzerlegungshypothese von entscheidender Bedeutung, da sich unter deren alleiniger Gültigkeit eine Kontrastinduktion lediglich in der inkrementellen Situation finden lassen sollte, nicht aber im gegenteiligen Fall (vgl. Abschnitt 2.5).<sup>19</sup> Wird dennoch ein symmetrischer Kontrastverlauf zur Kompensation der Kontrastinduktion verwendet, so sollte sich als optimale Lösung eine Art von Kompromiss einstellen. Dieser Kompromiss beinhaltet auf der einen Seite ein Kompensieren der wahrgenommenen Kontraständerungen für den inkrementellen Fall, auf der anderen Seite allerdings das Hinzufügen einer Kontraständerung zu einem perzeptuell bereits konstanten Verlauf im dekrementellen Fall. Als optimale Lösung für einen Nulling-Versuch kann vermutlich am ehesten die Situation aufge-

---

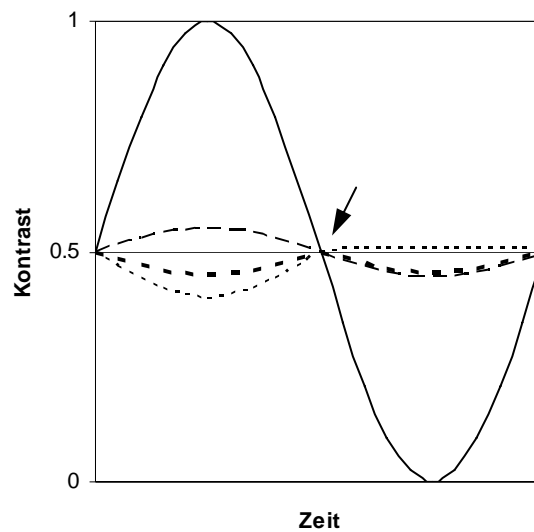
<sup>18</sup> Hier sei von Phase und Frequenz der Schwingung abgesehen, welche für Umfeld und Infeld als identisch angenommen werden, und somit nicht bestimmt werden müssen.

<sup>19</sup> Auch wenn Farbzerlegung bei der Chubb-Illusion nicht das einzige relevante Prinzip darstellen sollte, ist davon auszugehen, dass die Beziehung von Umfeld- zu Infeldkontrast bzgl. inkrementeller und dekrementeller Situation aufgrund des Transparenzeinflusses nicht symmetrisch ist.

fasst werden, in welcher die resultierenden Amplituden des wahrgenommenen Kontrasts für die inkrementelle und dekrementelle Situation identisch sind, und somit in beiden Verlaufshälften die gleiche Kontraständerung zu beobachten ist. Diese Situation ist in Abb. 26 graphisch veranschaulicht; entsprechend der Zuordnung aus Abb. 3 (links) sind hier induzierender (durchgezogene Linie), kompensierender (unterbrochene Linie) und sich ohne Kompensation ergebender hypothetischer, wahrgenommener Kontrastverlauf im Infeld (gepunktete Linie) eingezeichnet. Zusätzlich ist als vierte Kurve (stärkere gepunktete Linie) der sich nach einem Nulling-Versuch einstellende hypothetische Verlauf des wahrgenommenen Infeldkontrasts abgetragen.

Es wird zum einen deutlich, dass sich hier keine absolut zufrieden stellende Lösung ergeben kann. Im dekrementellen Fall (rechte Abbildungshälfte) soll ein linearer (konstanter) Kontrastverlauf mittels eines kurvilinearen (sinusförmigen) kompensiert werden, es entsteht somit aus dem Nulling-Versuch für den perzeptuell konstanten Kurvenabschnitt ein kurvilinearere Kontrastverlauf. In der inkrementellen Situation (linke Abbildungshälfte) ergibt sich ebenfalls kein vollständig konstanter Eindruck des Infeldes, da hier der vorliegende sinusoidale Verlauf lediglich zur Hälfte kompensiert wird. Somit sollte sich gerade am Übergang von inkrementeller zu dekrementeller Situation eine deutliche perzeptuelle Unregelmäßigkeit in Form eines vorübergehenden Kontrastanstiegs einstellen (siehe Abb. 26, Markierung). Des weiteren ist zu erkennen, dass für eine bestmögliche Lösung lediglich ungefähr die Hälfte der Nulling-Amplitude aus der symmetrischen Situation gewählt werden müsste, da die zu kompensierende maximale Kontrastdifferenz bei dieser asymmetrischen Induktion ebenfalls nur die Hälfte beträgt.

Aufgrund dieser Überlegungen liegt zunächst die Vermutung nahe, es könne bereits anhand der Höhe der Nulling-Amplitude zwischen einer symmetrischen und einer asymmetrischen Kontrastinduktion unterschieden werden. Hierfür fehlt jedoch eine geeignete Referenz, da für eine solche Schlussfolgerung für eine der beiden Varianten (Symmetrie oder Asymmetrie) des Induktionsgeschehens ein verlässlicher Messwert für die Nulling-Amplitude bereits vorliegen müsste. Folglich kann prinzipiell nicht entschieden werden, ob ein vorliegendes Ergebnis gerade eine volle oder eine (aufgrund der beschriebenen Asymmetrie vorliegende) „halbierte“ Nulling-Amplitude widerspiegelt. Eine Möglichkeit, zwischen diesen beiden Fällen zu unterscheiden, ergäbe sich allerdings im direkten Vergleich der perzeptuellen Resultate zweier Nulling-Versuche, von denen eines mit einer vollständigen und das andere lediglich mit einer halben Sinusschwingung vorgenommen würde. Eine Halbschwingung in dem hier gemeinten Sinne wäre eine Kurve, die entsprechend der asymmetrischen Kontrastinduktion im inkrementellen Fall eine Sinusform aufwiese und für den dekrementellen Fall konstant verlief (vgl. Abb. 26, gepunktete Linie). Läge tatsächlich eine asymmetrische Kontrastinduktion vor, dann sollte in Paarvergleichen das mit der asymmetrischen Nulling-Kurve erzielte Ergebnis perzeptuell als stabiler bewertet werden als das Ergebnis der Standardmethode, da bei letzterer Nulling-Variante gerade die angesprochene perzeptuelle Unregelmäßigkeit zu Tage träte. Schließlich stellt die weiter unten eingeführte Methode des asymmetrischen Kontrastabgleichs ebenfalls eine Möglichkeit dar, zwischen diesen beiden Fällen zu unterscheiden.



**Abbildung 26.** Kontrastverläufe bei asymmetrischer Kontrastinduktion unter Annahme der Gültigkeit der Farbzzerlegungshypothese: ein Kontrastinduktionseffekt ist lediglich in der inkrementellen Situation zu beobachten. Entsprechend der Zuordnung aus Abb. 3 (links) sind hier induzierender (durchgezogene Linie), kompensierender (unterbrochene Linie) und sich ohne Kompensation ergebender hypothetischer, wahrgenommener Kontrastverlauf im Infeld (gepunktete Linie) eingezeichnet. Zusätzlich ist als vierte Kurve (stärkere gepunktete Linie) der sich nach dem Nulling-Versuch einstellende hypothetische Verlauf des wahrgenommenen Infeldkontrasts abgetragen. (Die Linien sind der besseren Erkennbarkeit halber teilweise leicht versetzt eingezeichnet, die Lage der Kontrastverläufe entspricht allerdings der Formulierung im Text.) Es ergibt sich am Übergang von inkrementeller zu dekrementeller Situation eine deutliche perzeptuelle Unregelmäßigkeit im Infeldkontrast (siehe Markierung). Dazu beträgt die benötigte Nulling-Amplitude im Vergleich mit der bisher angenommenen symmetrischen Situation lediglich die Hälfte.

(b) *Asymmetrie zweiter Art.* Aufgrund eines Nulling-Experiments kann ebenfalls nicht entschieden werden, ob bei der Chubb-Illusion tatsächlich Kontrastverringern im inkrementellen und Kontrasterhöhung im dekrementellen Fall auftritt, oder ob es sich ausschließlich um eine Verringerung des wahrgenommenen Kontrasts handelt, die (je nach Umfeldkontrast) unterschiedlich stark ausfällt. Es ist also unklar, ob gerade in der Situation eines mittleren Umfeldkontrasts keine Kontrastinduktion auftritt, oder ob nicht eher der Fall eines homogenen Umfelds diesen „Nullpunkt“ darstellt. Diese beiden Alternativen sind in Abb. 27 dargestellt; entsprechend der Zuordnung aus Abb. 3 ist hier der induzierende (durchgezogene Linie), der kompensierende (unterbrochene Linie) und der hypothetische wahrgenommene Kontrastverlauf (gepunktete Linie) eingezeichnet. Der mittlere Umfeldkontrast beträgt stets 0.5. Die horizontale Linie repräsentieren jeweils die Lage des konstanten wahrgenommenen Kontrasts dar, der sich aus dem Nulling ergibt. Auf der linken Seite bildet die Situation eines mittleren Umfeldkontrasts von 0.5 den Referenzpunkt, sodass im inkrementellen Fall Kontrastreduktion und im dekrementellen Fall Kontrasterhöhung zu verzeichnen ist. Auf der rechten Seite ist diese Referenz durch das Minimum der induzierenden Kontrastkurve gegeben (Situation eines homogenen Umfelds), und es liegt zu allen übrigen Zeitpunkten ausschließlich Kontrastreduktion vor. Der resultierende kon-

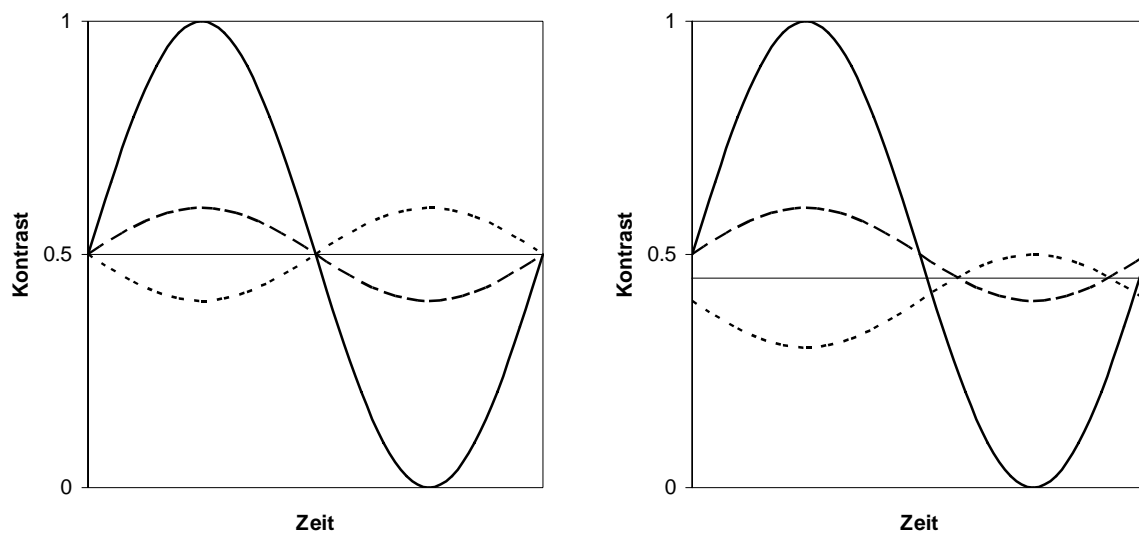
stante Infeldkontrast ist im rechten Diagramm deutlich reduziert gegenüber der Situation symmetrischer Induktion (linke Darstellung).

Eine *Asymmetrie zweiter Art* ist insofern von der Situation verschieden, der oben unter alleiniger Gültigkeit der Farbzerlegungshypothese beschrieben wurde, als es sich hier bei der Beziehung von Umfeld- zu Infeldkontrast tatsächlich um einen vollständig invers proportionalen und somit symmetrischen Zusammenhang handelt. Ein Nulling mittels einer sinusoidalen Kontrastkurve wäre also grundsätzlich eine geeignete Methode, müsste sich jedoch idealerweise ausschließlich auf den negativen Wertebereich beziehen, so dass der wahrgenommene Kontrast des Infeldes bei homogenem Umfeld den Referenzpunkt der Kontrastmodulation bildet, und nicht die Situation gleichen Kontrasts in Umfeld und Infeld. So müsste ein für das Sinus-Nulling gewählter Kurvenverlauf für jeden Umfeldkontrast festlegen, um wie viel der Infeldkontrast erhöht wird (im Vergleich zur Darbietung bei homogenem Umfeld), und es dürfte an keiner Stelle eine kompensatorische Kontrastverringern vorgenommen werden. Diese Art von Asymmetrie ist jedoch sowohl unkritisch als auch schwer festzustellen, wie im Folgenden gezeigt werden soll.

Hierfür ist entscheidend, dass es sich bei dem perzeptuellen Ergebnis eines Nulling-Experiments um die Summe zweier wahrgenommener Kontrastverläufe, d.h. um die Addition zweier Kurven handelt, von denen lediglich eine (die kompensierende) in absoluten Werten bekannt ist, beide aber in ihrer Verlaufsform. Wären bei der Addition zweier Kurven beide in absoluten Werten bekannt, so ergäben sich ebenfalls absolute Werte für die Resultierende. Sind jedoch nur für eine der Ausgangskurven absolute Werte gegeben, so liegt lediglich die Form des Ergebnisses vor; es ist also *bis auf eine additive Konstante* bestimmt. Umgekehrt könnte bei vorliegenden absoluten Werten der Summe der beiden Ausgangskurven auf die Werte der zweiten Ausgangskurve geschlossen werden. Sofern allerdings ausschließlich die Form der Resultierenden bestimmt wurde, kann nur auf die Form, nicht aber auf die absoluten Werte der zweiten Ausgangskurve geschlossen werden. Ein derartiger Sachverhalt ist im Allgemeinen mit der *fehlenden Identifizierbarkeit* eines oder mehrerer Parameter einer mathematisch beschreibbaren Beziehung gemeint. Aus der fehlenden Identifizierbarkeit der absoluten Werte der zweiten Ausgangskurve folgt in diesem Fall, dass es grundsätzlich irrelevant ist, an welchen Werten diese zweite Kurve verankert ist.<sup>20</sup> Wenn ein Ergebnis auf verschiedene Ausgangswerte zurückführbar ist, dann können auch verschiedene Ausgangswerte (oder -kurven) zu dem selben Ergebnis führen; für das Resultat ist in diesem Fall lediglich die Form der Ausgangskurven von Bedeutung.

---

<sup>20</sup> Allgemeiner gilt dies offensichtlich für die absoluten Werte beider Ausgangskurven.



**Abbildung 27.** Entsprechend der Zuordnung aus Abb. 3 ist der induzierende (durchgezogene Linie), der kompensierende (unterbrochene Linie) und der hypothetische wahrgenommene Kontrastverlauf (gepunktete Linie) eingezeichnet. Der mittlere Infeldkontrast beträgt stets 0.5. Die horizontale Linie stellt jeweils die Lage des konstanten wahrgenommenen Kontrasts dar, der sich durch das Nulling ergibt. Auf der linken Seite bildet die Situation eines mittleren Umfeldkontrasts von 0.5 den Referenzpunkt, sodass im inkrementellen Fall Kontrastreduktion und im dekrementellen Fall Kontrasterhöhung zu verzeichnen ist. Auf der rechten Seite ist diese Referenz durch das Minimum der induzierenden Kontrastkurve (Situation eines homogenen Umfelds) gegeben, und es findet zu allen übrigen Zeitpunkten ausschließlich Kontrastreduktion statt. Der resultierende konstante Infeldkontrast ist gegenüber dem linken Diagramm deutlich reduziert.

Wenn also ein Kontrastverlauf derart kompensiert werden soll, dass das Resultat perzeptuell unveränderlich erscheint, ist es unerheblich, welchen konstanten Wert der wahrgenommenen Kontrast des zeitlich stabilen Infelds annimmt: das Resultat eines Sinus-Nullings ist ebenfalls nur bis auf eine additive Konstante bestimmt. Somit ist einerseits irrelevant, um welchen absoluten Wert sich induzierter und kompensierender Kontrast im zeitlichen Mittel unterscheiden. Es ist lediglich eine Passung zwischen den Formen der beiden beteiligten Kurven in der Art gefordert, dass sich die beiden kurvulinen Verläufe gegenseitig auslöschen. Und andererseits kann wiederum aufgrund eines zeitlich stabilen Eindrucks der Infeldfläche prinzipiell nicht auf die absoluten Werte des induzierten Kontrastverlaufes geschlossen werden, auch wenn der kompensierende Kontrastverlauf bekannt ist. Es folgt allerdings auch, dass sich diese absoluten Werte bestimmen ließen, sofern der absolute Wert des konstanten wahrgenommenen Infeldkontrasts gemessen werden könnte. Eine Möglichkeit hierfür – auch wenn sie in dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt werden soll – wäre, an ein perzeptuell zufriedenstellendes Nulling einen Kontrastabgleich für das nun statische Infeld anzuschließen, um auf diese Weise die konstante Höhe des wahrgenommenen Infeldkontrast nach dem Nulling zu ermitteln. Der weiter unten vorgestellte asymmetrische Kontrastabgleich stellt – entgegen einer ersten Intuition – keine Methode dar, derartige Unterschiede festzustellen; dies soll an entsprechender Stelle näher erläutert werden soll.

Eine Asymmetrie zweiter Art ist zwar für die Farbzerlegungshypothese nicht von Bedeutung, könnte jedoch aus der Perspektive eines Adaptationsmechanismus von theoretischem Interesse sein. Der Befund eines symmetrischen Induktionsgeschehens – also die Existenz von sowohl Kontrastverringering als auch Kontrasterhöhung – würde diesen Erklärungsansatz zumindest zu einer Erweiterung zwingen, da mit den üblichen Mechanismen der lateralen Inhibition dem Begriff entsprechend ausschließlich hemmende Prozesse vereinbar sind. Für eine Kontrasterhöhung wären allerdings Mechanismen zu fordern, welche auch einen exzitatorischen Einfluss vermitteln könnten. Zwar sind entsprechende Verbindungen von Nervenzellen ohne weiteres denkbar (grundsätzlich existieren hemmende und erregende synaptische Verbindungen), allerdings wurden sie in den theoretischen Rahmen der lateralen Inhibition bislang nicht aufgenommen.

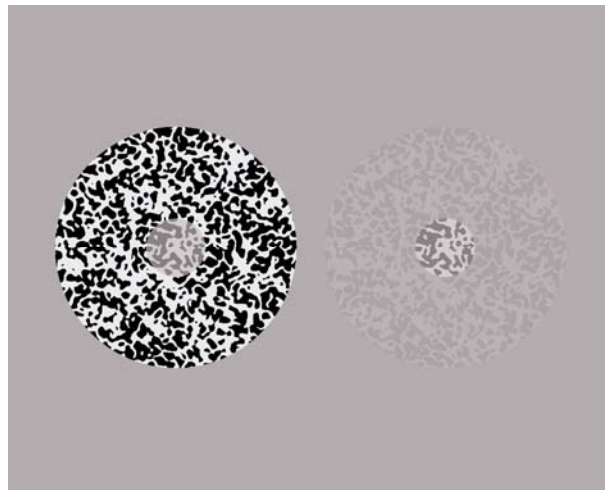
(c) *Asymmetrie dritter Art.* Schließlich soll der Vollständigkeit halber noch eine dritte Asymmetrie genannt werden, welche für die durchgeführten Experimente allerdings nicht von Bedeutung ist: auch bzgl. der Leuchtdichteverläufe in den Flächenanteilen des Infelds, die sich aus der Kontrastmodulation ergeben, könnten asymmetrische Beziehungen zur Leuchtdichte der Umfeldanteile existieren, welche über ein Sinus-Nulling nicht feststellbar wären. Aus dem Rückschluss der Leuchtdichten aus dem sinusförmig modulierten Infeldkontrast könnte sich erneut ausschließlich eine symmetrische Situation ergeben (vgl. Abb. 3, rechts). Diese Asymmetrien könnten innerhalb der Leuchtdichteverläufe der hellen und dunkeln Flächenanteile, aber auch zwischen ihnen bestehen.

Alternativ zu einer zeitlich modulierten Darbietung von Infeld-Umfeld-Reizen können zur Untersuchung von Kontrastinduktionseffekten auch statische Reize verwendet werden. Xing und Heeger (2001) untersuchten beispielsweise die Chubb-Illusion anhand statisch dargebotener Reize mit einer Sinusgitter-Textur. Hierbei wird eine Veränderung des wahrgenommenen Infeldkontrasts nicht mittels einer kompensierenden physikalischen Kontraständerung gemessen, sondern in der Regel durch eine Vergleichsprozedur, welche als *asymmetrischer Abgleich* bezeichnet wird. Beispielsweise kann hierfür eine Auswahl von Flächen unterschiedlichen Kontrasts dargeboten werden, aus welchen die Versuchspersonen dasjenige Exemplar auswählen sollen, welches hinsichtlich des wahrgenommenen Kontrasts mit dem *Testfeld* (Fläche, die bei einem Nulling als Infeld bezeichnet wird) am ehesten übereinstimmt. Singh & Hoffman (2002) verwendeten ein derartiges Verfahren für ihre Untersuchung des Zusammenhangs von Kontrast und wahrgenommener Transparenz. Hier soll jedoch eine andere Form des Kontrastabgleichs gewählt werden, bei welchem zeitgleich mit dem üblichen Infeld-Umfeld-Reiz eine zweite Fläche dargeboten wird, die zunächst mit dem Testfeld identisch ist. Im Verlauf der Messung soll der Kontrast dieser Fläche von den Versuchspersonen so eingestellt werden, dass das Testfeld und dieses zweite *Matchfeld* bzgl. des Kontrasts perzeptuell ununterscheidbar sind. Anhand des zugehörigen physikalischen Kontrastunterschieds von Testfeld und Matchfeld wird dann auf den wahrgenommenen Kontrast des Testfeld geschlossen. Die Bezeichnung dieses Abgleichverfahrens als „asymmetrisch“ rührt daher, dass das Matchfeld von einem Umfeld (Matchumfeld) umgeben ist, welches nicht mit dem Umfeld für das Testfeld (Testumfeld) identisch ist.

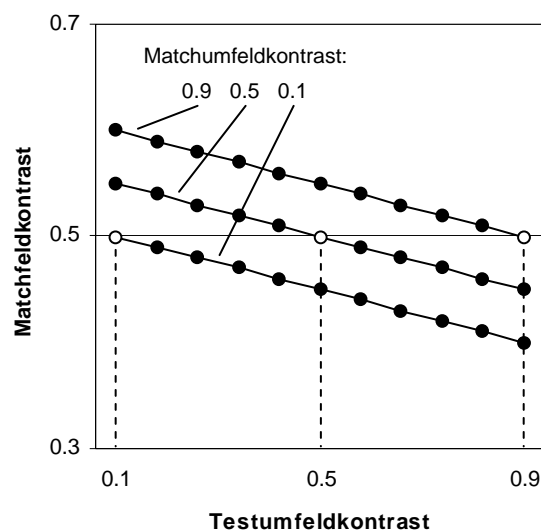
Bislang ist nicht hinreichend geklärt, ob ein homogenes Umfeld, welches auch als binärer Farbreiz bei Nullkontrast betrachtet werden kann, nicht eine qualitativ andere Situation darstellt als ein texturiertes Umfeld. Daher wird in der vorliegenden Arbeit für das Matchfeld das gleiche Umfeld wie für das Testfeld dargeboten, jedoch auf einen niedrigen Kontrastwert festgelegt; eine entsprechende Darstellung ist in Abb. 28 gezeigt. Zumindest nach der Farbzerlegungshypothese kann davon ausgegangen werden, dass ein solches Umfeld keinerlei Einfluss auf den wahrgenommenen Kontrast des Infelds hat, wobei dieser Sachverhalt aus der Adaptationsperspektive bislang ungeklärt ist. Je nach Sichtweise könnte hier eine sehr geringe Kontrastreduktion oder auch eine starke Kontrasterhöhung erwartet werden (vgl. Asymmetrie zweiter Art).

In einer Art von Momentaufnahme können bei diesem Verfahren nun Situationen dargeboten werden, welche einzelnen Zeitpunkten der Umfeldmodulation eines Nulling-Experiments entsprechen. Im nachhinein kann dann aus den Ergebnissen dieser Einzelmessungen ein Verlauf zusammengesetzt werden, welcher hinsichtlich Form und Größe des Effekt mit der üblichen Kontrastkompensation verglichen werden kann. Im Gegensatz zum Sinus-Nulling ermöglicht die Kombination von statischer Darbietung und asymmetrischem Kontrastabgleich jedoch das Auffinden von Asymmetrien erster Art, da der aus den einzelnen Situationen rekonstruierte Verlauf des wahrgenommenen Kontrasts keinerlei Symmetriebeschränkungen unterliegt.

Allerdings ist es auch mit dieser Methode nicht ohne weiteres möglich, Asymmetrien zweiter Art festzustellen, da je nach gewähltem Umfeld für die Darbietung des Matchfelds die sich ergebende Beziehung von induzierendem zu wahrgenommenem Kontrast an unterschiedlichen absoluten Werten verankert ist. In Abb. 29 sind drei verschiedene mögliche Kontrastverläufe abgetragen, die sich aus einem asymmetrischen Abgleichsverfahren ergeben können. Testfeldkontrast und initialer Matchfeldkontrast hierfür betragen 0.5 (horizontale Linie); Testumfeld (Abszisse) und Matchumfeld (separate Verläufe) nehmen hohen (0.9), mittleren (0.5) und geringen (0.1) Kontrast an. Dargestellt sind hypothetische Ergebnisse für einen maximalen Effekt von 0.1. Hierfür wird angenommen, es handele sich bei der Kontrastinduktion um eine invers proportionale Beziehung zwischen Umfeldkontrast und wahrgenommenem Kontrast des Infelds. Daher ergeben sich aus der Darstellung des abgeglichenen Matchfeldkontrasts – und somit im Rückschluss für den wahrgenommenen Testfeldkontrast – lineare Graphen. Genauer ergeben sich linear fallende Kontrastverläufe vollständig oberhalb, symmetrisch zu und vollständig unterhalb des Testfeldkontrasts. Die Situationen mit identischen Displays für Testfeld und Matchfeld sind durch ein leeres Symbol gekennzeichnet; hier ergibt sich gerade ein identischer wahrgenommener Kontrast von Testfeld und Matchfeld, und somit kein Abweichen des abgeglichenen Kontrasts vom Testfeldkontrast. In diesen Fällen ist folglich mit dem Abgleichverfahren keine Kontrastinduktion feststellbar.



**Abbildung 28.** Versuchsaufbau für den asymmetrischen Kontrastabgleich: wie beim Nulling-Verfahren werden die Reize auf homogenem Hintergrund mittlerer Leuchtdichte gezeigt. Auf der linken Seite findet sich der übliche Infeld-Umfeld-Reiz in welchem die Kontrastinduktion hervorgerufen wird; das Umfeld wird nicht zeitlich moduliert, sondern statisch dargeboten. Auf der rechten Seite ist der Reiz zu erkennen, an dem die Messung vorgenommen wird; dieser ist bis auf den Kontrast mit dem linken Reiz identisch. Der Kontrast des rechten Infelds (Matchfeld) soll so eingestellt werden, dass es vom linken Infeld (Testfeld) hinsichtlich des wahrgenommenen Kontrasts ununterscheidbar ist. Der eingestellte physikalische Kontrastunterschied zwischen Matchfeld und Testfeld ergibt ein Maß für die Kontrastinduktion.



**Abbildung 29.** Hypothetische Kontrastverläufe eines asymmetrischen Abgleichverfahrens für einen maximalem Effekt von 0.1: es sind die für den Matchfeldkontrast ermittelten Werte gegen den induzierenden Kontrast im Testumfeld abgetragen. Dargestellt sind die Ergebnisse für ein Matchumfeld mit hohem (0.9), mittlerem (0.5) und niedrigem Kontrast (0.1); Infeldkontrast und initialer Matchfeldkontrast betragen 0.5. Es liegt die Annahme zugrunde, es handle sich bei der Kontrastinduktion um eine invers proportionale Beziehung von Umfeld- zu wahrgenommenem Infeldkontrast. Hieraus ergeben sich linear fallende Kontrastverläufe vollständig oberhalb, symmetrisch zu und vollständig unterhalb des Testfeldkontrasts. Die Situationen mit identischen Displays für Testfeld und Matchfeld – und somit ohne mit dieser Methode feststellbare Kontrastinduktion – sind jeweils durch ein leeres Symbol gekennzeichnet

Für den oberen Kontrastverlauf stimmt der wahrgenommene Matchfeldkontrast mit dem des Testfelds gerade dann überein, wenn das Testumfeld ebenfalls den größten Kontrast aufweist (Datenpunkt ganz rechts), da hier die beiden Displays völlig identisch sind. Zu allen anderen Zeitpunkten erscheint der Kontrast im Testfeld für sich genommen weniger reduziert und somit im Vergleich größer als im Matchfeld. Für den unteren Kontrastverlauf liegt ein identisches Display bei der geringsten Kontraststufe des Testumfelds vor (Datenpunkt ganz links), und somit ergibt sich gegenüber dem Matchfeld in allen übrigen Situationen eine Kontrastverringerng. Für den mittleren Verlauf schließlich ergibt sich ein für Testfeld und Matchfeld identisches Display gerade bei mittlerem Umfeldkontrast (mittlerer Datenpunkt), und somit tritt im Vergleich mit dem Matchfeld eine Kontrasterhöhung im dekrementellen und eine Kontrastverringerng im inkrementellen Fall auf. Aus dieser Veranschaulichung folgt, dass die Verankerung des wahrgenommenen Kontrasts für das Testfeld – rückgeschlossen aus dem physikalischen Kontrastunterschied von Testfeld und Matchfeld – in direkter Weise von der Wahl des Kontrasts für das Matchumfelds abhängt, und somit eine Asymmetrie zweiter Art so grundsätzlich nicht feststellbar ist.

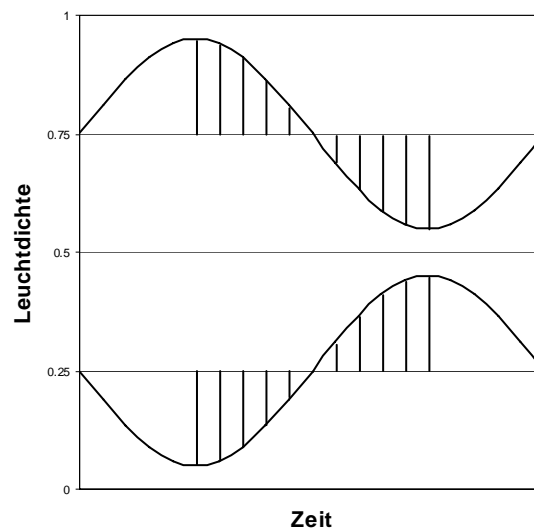
Eine Asymmetrie zweiter Art wäre nur dann erkennbar, wenn *a priori* eine der Situationen der Umfeldmodulation als absolute Referenz betrachtet werden könnte, an der sich die Veränderungen des wahrgenommenen Kontrasts anhand von absoluten Werten verankern ließen. Diese Situation wäre dadurch ausgezeichnet, dass hier der wahrgenommene Kontrast keinerlei Kontexteinflüssen unterläge. Selbst ein homogener Hintergrund kann jedoch als binärer Farbreiz bei Nullkontrast aufgefasst und somit nicht als „neutrales“ Umfeld angesehen werden. Daher kann auch in dieser Situation grundsätzlich nicht von der Abwesenheit kontrastbezogener Kontexteinflüsse ausgegangen werden. Möglicherweise könnte ein Umfeld mit sehr vielen unterschiedlichen achromatischen (oder auch chromatischen) Farbanteilen den Zweck einer Referenz erfüllen, da in einem solchen kein Kontrastmaß auf eine vergleichbare Weise festgelegt werden kann, wie es bei den binären Farbreizen der Fall ist. Hier wäre zwar eine Art von Maximalkontrast bestimmbar, beruhend auf der maximal enthaltenen Leuchtdichtedifferenz, allerdings wäre näherungsweise jeder Kontrast in einem solchen Umfeld realisiert. Aus Sicht der Adaptationshypothese gäbe es somit keinen eindeutigen Ausgangspunkt für eine laterale Inhibition der Kontrastrezeptoren, und die für eine Farbzerlegung notwendige Zerlegungskompatibilität wäre aufgrund der figuralen Unterschiede von Umfeld und Infeld ebenfalls stark herabgesetzt.

Es kann jedoch grundsätzlich in Zweifel gezogen werden, ob das Konzept eines absoluten wahrgenommenen Kontrasts für eine Untersuchung der Chubb-Illusion überhaupt in Betracht gezogen werden sollte. Es wäre eine Vergleichbarkeit von physikalischem und wahrgenommenem Kontrast vorauszusetzen, um von wahrgenommenem Kontrast als von etwas Absolutem sprechen zu können, was zumindest eine zweifelhafte Herangehensweise darstellt. Es erscheint sinnvoller, von der induzierten Änderung des wahrgenommenen Kontrasts als von einer relativen Kontraständerung bzgl. verschiedener Situationen zu sprechen (und die Kompensation dieser Änderungen somit als relative Änderungen des physikalischen Kontrasts zu begreifen), als entscheiden zu wollen, ob der wahrgenommene Kontrast über die gesamte Modulationsperiode des Umfelds unterschiedlich stark verringert, oder auch teilweise erhöht wird.

## Methode.

Es wurde bzgl. zweier Amplituden des induzierenden Umfeldkontrasts (0.2 und 0.4) eines Nulling-Experiments der jeweilige Kontrastbereich in 11 Stufen unterteilt, und in diesen Stufen bei Verwendung der statischen Darbietungsvariante anhand des Standardreizes vorgegeben. Die 11 Stufen des Umfeldkontrasts sind in Abb. 30 für eine Amplitude von 0.4 (bei dynamischer Reizdarbietung) durch senkrechte Markierungen zu den Leuchtdichteverläufen des Umfelds angedeutet. Die Wahl der zwei unterschiedlichen Kontrastbereiche erfolgte unter anderem, um den mittleren Bereich der Kontraststufen für die Amplitude von 0.4 anhand einer höheren Dichte von Messpunkten für die Amplitude von 0.2 genauer untersuchen zu können. Aus der Unterteilung ergaben sich für die Kontraststufen der Amplitude von 0.2 die Werte 0.3, 0.34, 0.38, 0.42, 0.46, 0.5, 0.54, 0.58, 0.62, 0.66, 0.7 und für die Amplitude von 0.4 die Werte 0.1, 0.18, 0.26, 0.34, 0.42, 0.5, 0.58, 0.66, 0.74, 0.82, 0.9. Beide Bereiche wurden für jede der 5 Versuchspersonen (KR, MH, MP, TG, OT) ohne und mit Gap in insgesamt vier separaten Versuchsteilen untersucht, wobei innerhalb der Versuchsteile die einzelnen Stufen in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Zur Bestimmung der Kontrastinduktion im Rahmen des asymmetrischen Kontrastabgleichs wurde die Staircase-Prozedur gewählt, welche pro Versuchsperson und Kontraststufe einmal durchgeführt wurde; hieraus ergaben sich insgesamt  $4 \times 11$  Messungen. Für die Darbietung wurden Testfeldkontrast und initialer Matchfeldkontrast auf einen Wert von 0.5 festgelegt, der Umfeldkontrast bzgl. des Matchfelds betrug 0.1.

Die Staircase-Prozedur wurde nach den gleichen Vorgaben durchgeführt, wie in den Experimenten mit dynamischer Reizdarbietung. Lediglich die Ausgangswerte wurden abweichend auf 0.15 und 0.65 festgelegt, da tendenziell Werte  $< 0.5$  erwartet wurden. Dies war der Fall, da aufgrund der Wahl eines niedrigen Umfeldkontrasts bzgl. des Matchfelds nahezu ausschließlich mit einer Kontrastreduktion zu rechnen war (vgl. Konzeptueller Rahmen.), und der gemessene Kontrast aufgrund des Abgleichverfahrens dem wahrgenommenen und nicht wie bisher dem kompensierenden Kontrast für das Testfeld entsprach. Die Versuchspersonen sollten beurteilen, ob der Kontrast im Matchfeld höher oder geringer als im Testfeld war. Die Reizdarbietung war allerdings dahingehend ausbalanciert, dass das Matchfeld mit seinem Umfeld zufällig auf der rechten oder der linken Seite des Bildschirms dargeboten wurde (und das Testfeld entsprechend auf der jeweils anderen Seite). Daher wurde die obige Instruktion derart abgeändert, dass die Versuchspersonen mittels der rechten bzw. linken Pfeiltaste angeben sollten, ob die jeweils kontrastreichere Infeldfläche rechts oder links auf dem Bildschirm zu sehen war; je nach Darbietungsseite wurde ein abgegebenes Urteil dann entsprechend der ersten Instruktion umgepolt. Anhand der Urteile erfolgte erneut eine adaptive Annäherung an den gesuchten Kennwert (den wahrgenommenen Kontrast des Testfelds, geschlossen aus dem physikalischen Kontrast des Matchfelds), wobei eine Messung nach den bereits beschriebenen Abbruchkriterien endet.

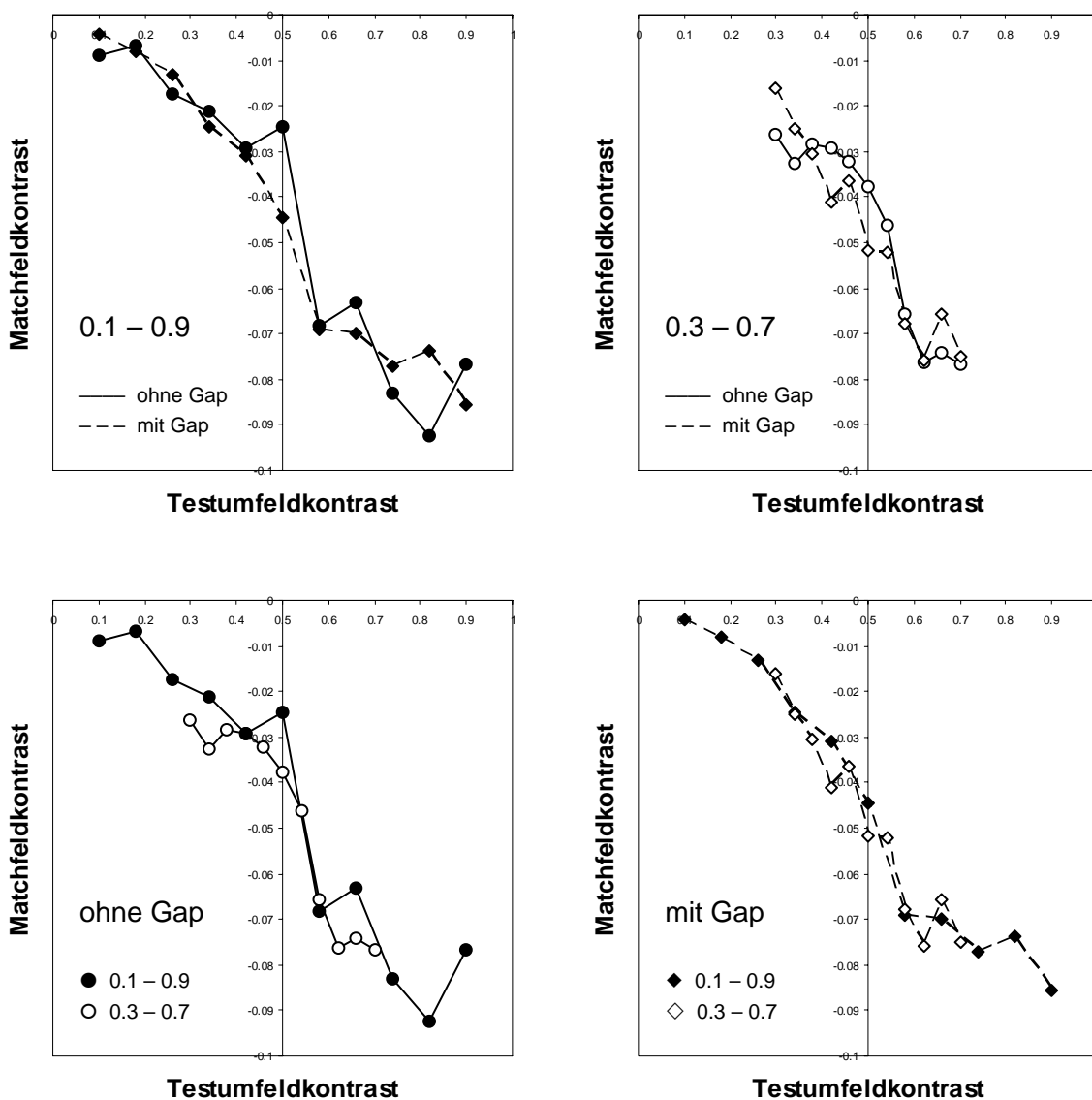


**Abbildung 30.** Leuchtdichteverläufe des Umfelds bei dynamischer Reizdarbietung. Die 11 Stufen des Umfeldkontrasts für den asymmetrischen Abgleich sind durch senkrechte Markierungen zu den Leuchtdichteverläufen angedeutet.

### Ergebnisse.

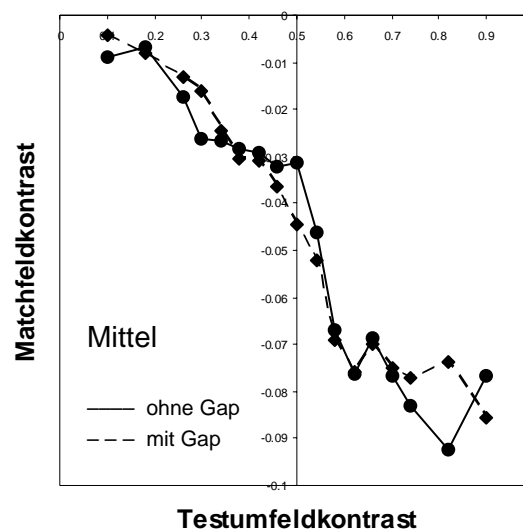
Die Ergebnisse für den asymmetrischen Kontrastabgleich sind in Abb. 31 dargestellt, es ist für die jeweils 11 Stufen des Umfeldkontrastes der gemessene Matchfeldkontrast abgetragen. Die Diagramme in der oberen Zeile enthalten die nach Range zusammengestellten Ergebnisse (links: 0.1 – 0.9, rechts: 0.3 – 0.7), wohingegen die Diagramme der unteren Zeile dieselben Ergebnisse nach Gap-Situation gruppiert darstellen (links: ohne Gap, rechts: mit Gap). Die durchgezogenen Linien repräsentieren hierbei die Verläufe ohne, die unterbrochenen Linien die mit Gap erzielten Ergebnisse, die gefüllten Symbole stellen die Werte für den größeren, die leeren Symbole die für den kleineren Kontrastbereich dar.

Der Übersichtlichkeit halber sind diese Daten in Abb. 32 so gemittelt, dass sich zwei separate Kurven für die zwei unterschiedlichen Gap-Situationen ergeben. Dies ist grundsätzlich vertretbar, da in den gemittelten Versuchsbedingungen die gleichen Situationen lediglich anhand unterschiedlicher „Ausschnitte“ aus der Kontrastmodulation des Umfelds untersucht wurden. Dazu wurde die Mittelung ausschließlich über gleiche Stufen vorgenommen, sodass die Daten für nicht in beiden Bedingungen vorkommende Stufen unverändert dargestellt sind.



**Abbildung 31.** Ergebnisse des Experimentes mit asymmetrischem Kontrastabgleich: es ist für die jeweils 11 Stufen der Umfeldkontrastvariation der über die Versuchspersonen gemittelte Matchfeldkontrast abgetragen. In der oberen Zeile finden sich die Ergebnisse für gleiche Ranges, auf der linken Seite für 0.1-0.9, auf der rechten für 0.3-0.7. In der unteren Zeile sind die Ergebnisse für gleiche Gap-Situation zu sehen; links die Daten ohne, rechts die mit Gap. Durchgezogene Linien stehen für ohne Gap, unterbrochene Linien für mit Gap erzielte Ergebnisse. Ausgefüllte Symbole repräsentieren den größeren, leere Symbole den kleineren der beiden Ranges.

Die beiden Kurven verlaufen grundsätzlich recht ähnlich; es ist jedoch gut zu erkennen, dass im Bereich um die mittlere Umfeldkontraststufe (0.5) die Werte für den ohne Gap abgeglichenen Kontrast deutlich größer ausfallen als die der zweiten Kurve, wohingegen bei Kontraststufen > 0.7 die ohne Gap erzielten Werte tendenziell unterhalb der mit Gap gemessenen liegen. Der Kurvenverlauf ohne Gap scheint somit zunächst einen leicht flacheren, und anschließend einen steileren Verlauf zu nehmen als sein Pendant mit Gap.

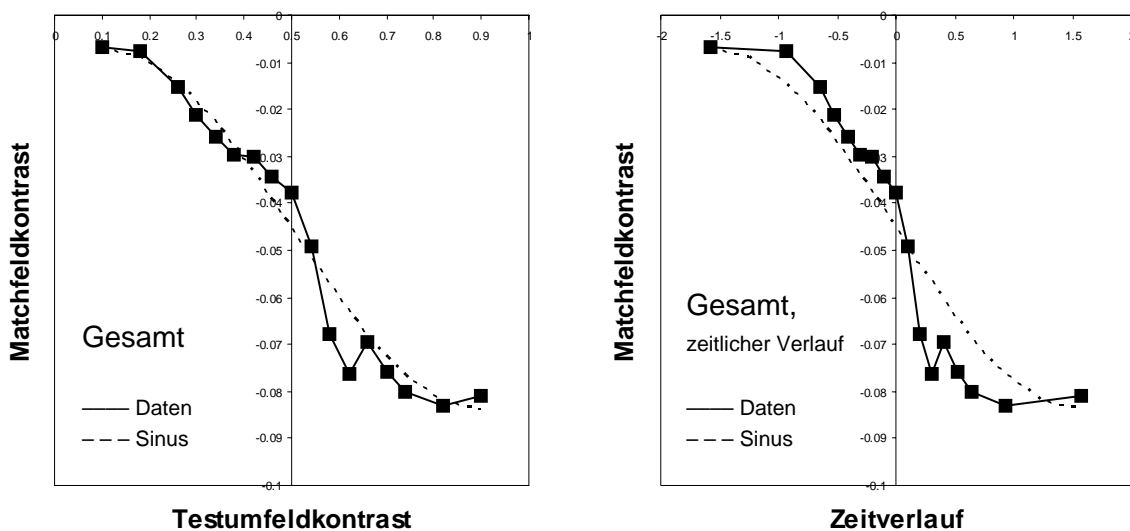


**Abbildung 32.** Über die beiden Ranges gemittelte Ergebnisse des asymmetrischen Kontrastabgleichs: die durchgezogene Linie stellt die ohne Gap erzielten Ergebnisse dar, die unterbrochene Linie die aus den Versuchsteilen mit Gap. Grundsätzlich verlaufen die beiden Kurven recht ähnlich, wobei sich zum einen andeutet, dass bei der mittleren Kontraststufe von 0.5 die Daten für die Experimente ohne Gap einen leicht geringeren Kontrastinduktionseffekt aufweisen, wohingegen im weiteren Verlauf für Kontraststufen  $> 0.7$  die Werte ein wenig niedriger ausfallen, und somit auf eine stärkere Kontrastinduktion hindeuten. So scheint diese Kurve zunächst (bis 0.5) einen leicht flacheren Verlauf zu nehmen, als es bei dem zweiten mit Gap ermittelten Datenverlauf der Fall ist, und anschließend (für Werte  $> 0.5$ ) steiler abzufallen.

Schließlich ist in Abb. 33 eine Mittelung über alle Daten dieses Experiments abgebildet. Dies ist nicht völlig unkritisch zu betrachten, da hier über verschiedene Versuchsbedingungen gemittelt wird. Allerdings sind die beiden Kurvenverläufe grundsätzlich recht ähnlich und nur in einigen oben beschriebenen Aspekten verschieden, sodass eine erhöhte Genauigkeit der Verlaufsschätzung zumindest für einige sich anschließende Betrachtungen erzielt werden kann. Es sei ausdrücklich gesagt, dass dieses Gesamtmittel nicht als Grundlage einer Schätzung der Beziehung von Umfeld- zu Matchfeldkontrast in weiteren Experimenten verwendet werden darf, sondern für derartige Zwecke auf die separaten Verläufe für die zwei unterschiedlichen Gap-Situationen zurückgegriffen werden muss.

Auf der linken Seite findet sich der Matchfeldkontrast gegen die Stufen des induzierenden Umfeldkontrasts abgetragen, auf der rechten Seite sind dieselben Daten in korrekter zeitlicher Reihenfolge dargestellt, wie sie dem Ablauf der Kontraständerungen im Rahmen eines Nulling-Experiments entspräche.<sup>21</sup> Zusätzlich ist auf beiden Seiten eine sinusoidale Näherung der Daten des linken Diagramms eingezeichnet.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Im linken Diagramm von Abb. 22 ist der induzierende Kontrast auf der Abszisse in äquidistanten Schritten angegeben, wobei im Rahmen eines üblichen Nulling-Experiments die Kontrastmodulation sinusoidal erfolgt,



**Abbildung 33.** Über alle Versuchsbedingungen gemittelte Ergebnisse des Experimentes für den asymmetrischen Kontrastabgleich: auf der linken Seite ist gemittelt über alle Bedingungen der im Matchfeld gemessene Kontrast für die nun insgesamt 17 Stufen der Kontrastmodulation abgetragen. Auf der rechten Seite finden sich dieselben Daten, hier jedoch in korrekter zeitlicher Abfolge entsprechend der Darstellung im Rahmen eines Nulling-Experiments (jeweils durchgezogene Linie). Zusätzlich ist links eine an die Daten gefittete Sinuskurve eingezeichnet, die auf der rechten Seite erneut unverändert abgebildet ist. Die Daten auf der linken Seite besitzen gewisse Ähnlichkeit mit einem Sinusverlauf, jedoch sollte sich bei Gültigkeit der Proportionalitätsannahme in dieser Darstellungsform ein linearer Kontrastverlauf ergeben. Eine Sinusform sollte lediglich in der korrekten zeitlichen Darstellung (rechtes Diagramm) erkennbar sein, dort weicht jedoch der Datenverlauf erkennbar von einem Sinus ab. Des weiteren sticht die „Zacke“ bei der Stufe 0.58 als Besonderheit hervor, da sie tendenziell in jeder der vier Einzelverläufe zu sehen ist (vgl. Abb. 31), und somit offensichtlich eine systematische Abweichung von einer monotonen Beziehung des Infeldkontrasts zum Umfeldkontrast darstellt.

Der Verlauf im linken Diagramm von Abb. 33 zeigt eine starke Ähnlichkeit mit einem Sinus, jedoch sollte sich in dieser Darstellung unter Gültigkeit der Proportionalitätsannahme vielmehr ein linearer Zusammenhang von Matchfeld- und Umfeldkontrast ergeben. Dieser würde dann in der rechten Abbildung der zeitlich korrekten Darstellung einer Sinuskurve entsprechen, wobei hier gut zu erkennen ist, dass die Daten deutlich von einem sinusoidalen Verlauf verschieden sind. Interessant ist des weiteren die „Zacke“ bei der Kontraststufe 0.58, da sie tendenziell in jeder der vier Einzelverläufe zu sehen ist (vgl. Abb. 31), und somit offensichtlich eine systematische Abweichung von einer monotonen Beziehung des Infeldkontrasts zum Umfeldkontrast darstellt. Möglicherweise ist diese Abwei-

und somit äquidistante Kontraständerungen nicht in gleichen Zeitabständen erfolgen. Daher ist der Matchfeldkontrast im rechten Diagramm gegen Einheiten im Bogenmaß abgetragen, welche bei einem Nulling gerade äquidistanten zeitlichen Abständen entsprechen.

<sup>22</sup> Auf die Angabe der Funktionsvorschrift und eines Maßes für die Güte der Näherung wird hier verzichtet, da diese im vorliegenden Zusammenhang lediglich Anschauungszwecken dient und keinesfalls einer bestmöglichen Rekonstruktion der Daten im Sinne eines minimalen Fehlers entspricht.

chung auf ein dem *Crispening-Effekt* verwandtes Phänomen zurückzuführen, welcher den Sachverhalt bezeichnet, dass beim Simultankontrast gerade dann eine besonders starke Farbinduktion auftritt, wenn die beteiligten Flächen bzgl. ihrer Farbe nur geringfügig verschieden sind (Takasaki, 1966).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit Hilfe des asymmetrischen Kontrastabgleichs verschiedene Ergebnisse erzielt werden konnten, welche von den Annahmen bzw. Befunden unter Verwendung des Sinus-Nullings mehr oder weniger abweichen. Erstens scheint es sich zwar bei der Beziehung von induzierendem zu wahrgenommenem Kontrast (ermittelt über den Kontrast des Matchfelds) in gewissen Grenzen – genauer im abfallende Kurvenabschnitt im Bereich um die mittlere Kontraststufe – um einen näherungsweise proportionalen Zusammenhang zu handeln (vgl. Abb. 33, links). Betrachtet man jedoch die vollständigen Verläufe, dann ist vielmehr ein kurvilinearere Zusammenhang erkennbar, der auf den ersten Blick eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Sinus aufweist, jedoch bei genauerer Betrachtung erkennbar von einer sinusoidalen Näherung abweicht (vgl. Abb. 33, rechts). Dieser kurvilineare Zusammenhang verhält sich darüber hinaus nicht vollständig monoton; genauer ergibt sich für die Kontraststufe von 0.58 ein vorübergehender erneuter Anstieg des wahrgenommenen Kontrasts, welcher möglicherweise auf den *Crispening-Effekt* zurückzuführen ist.

Auch unter Ausschluss der Gültigkeit der Proportionalitätsannahme könnte eine symmetrische Beziehung zwischen induzierendem und wahrgenommenem Kontrast vorliegen, was zumindest näherungsweise in Abb. 33 erkennbar scheint. Bei genauerer Betrachtung fällt allerdings auf, dass sich bei den ohne Gap erzielte Ergebnisse zunächst ein geringfügig flacherer und anschließend (Umfeldkontrast  $> 0.5$ ) ein steilerer Verlauf zeigt als bei den mit Gap erzielten Ergebnisse. Auch wenn in letzterer Situation die Kontrastinduktion einen annähernd symmetrischen Verlauf nimmt, so liegt doch im Fall der ohne Gap erzielten Ergebnisse eine deutliche Asymmetrie erster Art zwischen inkrementeller und dekrementeller Situation vor (vgl. Konzeptueller Rahmen). Schließlich sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass der vollständig unterhalb des mittleren Kontrasts verlaufenden wahrgenommene Kontrast nicht als Asymmetrie zweiter Art interpretiert werden kann, da die absolute Lage der Daten eines asymmetrischen Kontrastabgleichs – zumindest unter Verwendung eines binären Umfelds für das Matchfeld – vom Kontrast abhängt, der für das Matchumfeld gewählt wird (vgl. Abb. 29). Dies schließt jedoch nicht aus, dass eine entsprechende Asymmetrie existiert und mit Hilfe einer alternativen Messmethode festgestellt werden könnte.

Somit erscheint das Sinus-Nullings zwar als ein praktikables und gleichzeitig ökonomisches Untersuchungsparadigma für die Kontrastinduktion, da zum einen für eine definierten Amplitude der Umfeldkontrastmodulation die Größe des maximalen Effekts recht genau bestimmt werden kann (Nulling-Amplitude), und zum anderen über den Sinus-Verlauf des stetig modulierten Umfeldkontrasts viele verschiedene Situationen im Rahmen einer einzigen Messung erfasst werden können. Jedoch erscheint die Anwendung dieser Methode bei genauerem Hinsehen nicht ganz unproblematisch, da verschiedene Annahmen, die für die Verwendung der Sinuskurve unerlässlich sind, einer genaueren Untersuchung nicht standhalten; zu nennen sind die oben beschriebenen Symmetrieeigenschaften der Sinuskurve und die Proportionalität der Kontrastinduktion.

### ***3.3.3 Vergleich der statischen und der dynamischen Methode***

An den asymmetrischen Kontrastabgleich sollte sich eigentlich ein Experiment anschließen, in welchem zum einen die Ergebnisse der statischen und der dynamischen Untersuchungsmethode auf ihre Vergleichbarkeit hin untersucht werden sollten, d.h. ob unter Verwendung beider Methoden derselbe Effekt gemessen wird. Zum anderen sollte geklärt werden, ob es sich bei den Ergebnissen aus dem statischen Experiment aufgrund fehlender Symmetriebeschränkungen der Befunde möglicherweise um eine adäquatere Beschreibung der Kontrastinduktion handelt. Dieses Experiment wurde jedoch nicht durchgeführt, da sich die Ergebnisse der beiden Versuchsvarianten nicht deutlich genug unterschieden und somit ein eindeutiger Vorteil einer der beiden Methoden von vornherein als unwahrscheinlich einzustufen war. Die grundsätzliche Idee dieses Experiments soll aber dennoch im Folgenden in wenigen Worten beschrieben werden, um die Zielsetzung dieses Experimentalblocks zu verdeutlichen.

Genauer muss an dieser Stelle zunächst zwischen der Rolle der Reizdarbietung (statisch vs. dynamisch) auf der einen und der Messmethode (Nulling vs. asymmetrischer Abgleich) auf der anderen Seite unterschieden werden. Die Art der Reizdarbietung beeinflusst die Genauigkeit der Ergebnisse insofern, dass sich mit der statischen Darbietungsvariante auch eine in verschiedener Hinsicht asymmetrische Beziehung von Umfeld- zu Infeldkontrast ergeben kann, während dies bei Verwendung der dynamischen Variante mittels einer sinusoidalen Modulation nicht möglich ist. Die Messmethoden ihrerseits unterschieden sich darin, dass für die Messung der Kontrastinduktion beim Nulling die dem Effekt zugrunde liegende visuelle Szene verändert wird, wohingegen dies für die asymmetrische Abgleichmethode nicht der Fall ist. Auf diese Weise präzisiert lautete die Fragestellung also einerseits, ob mit der statischen Reizdarbietung genauere Ergebnisse erzielt werden können als mit der zeitlich-sinusoidalen. Dies ist demnach eine Frage nach der Kontrastinduktionsbeziehung von Umfeld und Infeld, und somit nach der Existenz von Asymmetrien, welche prinzipiell mit der statischen Darbietungsvariante aufgedeckt werden können. Andererseits sollte dieses Experiment klären ob der asymmetrische Kontrastabgleich denselben Aspekt des Wahrnehmungseindrucks untersucht wie ein Nulling.

Für den vorliegenden Zweck wären zunächst mit der üblichen Sinuskurve einerseits und einer Näherung der Kontrastinduktionskurve aus dem statischen Abgleichexperiment andererseits jeweils die Amplitude für ein Kontrast-Nulling bestimmt worden. Über Paarvergleiche hätte anschließend die perzeptuelle „Güte“ dieser beiden Nullings anhand des Stabilitätseindrucks des Infelds miteinander verglichen werden sollen. Hierfür wären nacheinander (in zufälliger Reihenfolge) jeweils das Ergebnis eines Nullings mit der Sinuskurve und das eines Nullings mit der neuen Kurve dargeboten worden, und die Versuchspersonen hätten angeben sollen, welche der beiden Darbietungen den zeitlich stabilen Eindruck vermittelt.

Hätte sich nun ergeben, dass die neue Kurve in einem Nulling einen perzeptuell stabileren Eindruck vom Infeld liefert als die Sinuskurve, dann wäre zum einen die Überlegenheit der statischen Darbietung im dem Sinne gezeigt worden, dass sie Ergebnisse erzielt, die unter der dynamischen Variante nicht beobachtet werden können. Zum anderen wäre ersichtlich, dass der asymmetrische Abgleich Ergebnisse liefert, welche mit denen des Nullings in der oben genannten Bedeutung grundsätzlich vergleichbar sind. Ansonsten hätte die Verwendung von Ergebnissen eines asymmetrischen Abgleichs in einem Nulling-Experiment nicht zu zufriedenstellenden und sogar überlegenen Resultaten führen dürfen. Im Fall fehlender Unterscheidbarkeit der Nulling-Resultate beider Kurven läge zumindest die Vergleichbarkeit der Messmethoden nahe, da ununterscheidbare Resultate aufgrund von Experimenten zu unterschiedlichen Aspekten des Wahrnehmungseindrucks nicht zu erwarten wären. Eine Überlegenheit der Sinus-Kurve könnte schließlich bedeuten, dass trotz ihrer geringeren Beschränkungen die statische Reizdarbietung keinerlei Asymmetrien aufdecken konnte, aufgrund derer sich eine Überlegenheit hätte einstellen können. Andererseits wäre allerdings nicht auszuschließen, dass der asymmetrische Kontrastabgleich nicht denselben Aspekt des Wahrnehmungseindrucks der verwendeten Reizanordnungen untersucht wie das Sinus-Nulling und somit anhand der Ergebnisse aus dem asymmetrischen Abgleich kein adäquates Kontrast-Nulling erzielbar ist.

### ***3.4 Weitere Experimente***

#### ***3.4.1 Einfluss der Verankerung der Nulling-Kurve***

##### **Konzeptueller Rahmen.**

Innerhalb der Konzeptbildung zum asymmetrischen Kontrastabgleich wurde theoretisch hergeleitet, dass es prinzipiell ohne Belang ist, an welchen absoluten Werten eine für ein Nulling verwendete Kurve verankert ist. Diese Vorhersage soll jedoch nun auch empirisch überprüft werden. Hierfür werden drei unterschiedlich verankerte Sinus-Kurven hinsichtlich der für ein Nulling benötigten Kontrastamplitude miteinander verglichen. Diese drei kompensierenden Kontrastverläufe sind in Abb. 34 in einem dem Nulling entsprechenden zeitlichen Verlauf dargestellt (durchgezogene Linien). Die mittlere Kurve stellt den Standardfall eines symmetrischen Nullings dar, die zugehörige Amplitude wird auf gewohnte Weise ermittelt. Die anderen beiden Kurven verlaufen vollständig oberhalb bzw. unterhalb des mittleren Infeldkontrasts (horizontale Linie), und sind mit ihrem Minimum bzw. Maximum an diesem verankert (leere Symbole). Bei diesen Kurven wird von der jeweiligen Verankerung aus der

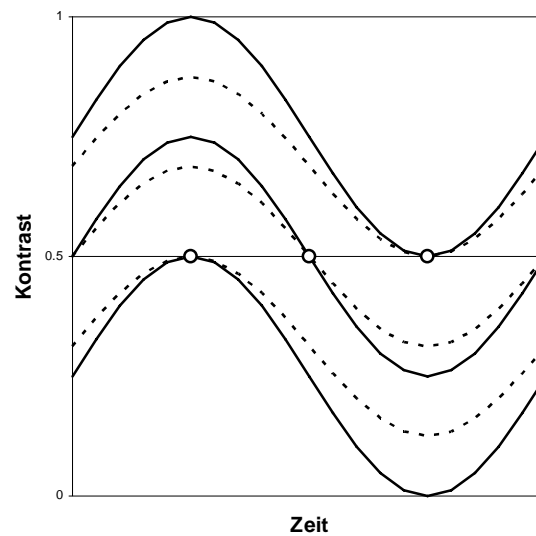
Range (statt der Amplitude) für die Kontrastmodulation bestimmt. Um die Verankerungen weiter zu verdeutlichen, ist jeweils eine zugehörige Nulling-Kurve geringerer Höhe eingezeichnet (unterbrochene Linien). Sofern es keinen Einfluss hat, an welchem absoluten Wert die Kurven verankert sind, sollte sich die Nulling-Amplitude beim symmetrischen Fall nicht von den halben Ranges für die beiden asymmetrischen Varianten unterscheiden.

### **Methode.**

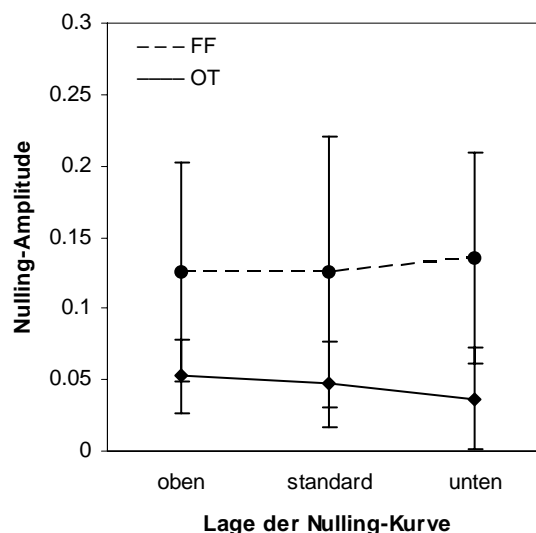
Der Einfluss der Verankerung der Nulling-Kurve wurde anhand der Standardreize (vgl. Abb. 1) untersucht, und die absolute Lage der kompensierenden Infeldkontrastmodulation wie oben beschrieben variiert. Das Experiment wurde für jede Versuchsperson (FF, OT) für den Fall mit Gap durchgeführt, da sich gezeigt hat, dass die Ergebnisse nur unwesentlich von dieser Variable abhängen und die Versuchspersonen die Urteile bzw. das Einstellen anhand der mit Gap dargebotenen Reize subjektiv als einfacher und weniger anstrengend beurteilten. Die 3 Stufen der Verankerung wurden in separaten Experimenten anhand des Einstellverfahrens untersucht. Jeder dieser Versuchsteile bestand aus 20 Replikationen derselben Situation (insgesamt 60 Darbietungen pro Versuchsperson). Die Darbietungsweise entsprach dem Standardverfahren eines Nulling-Experiments mit zeitlich-sinusoidaler Kontrastmodulation im Umfeld mit einer Amplitude von 0.4. Der zeitliche Kontrastmittelwert des Umfelds betrug 0.5, der des Infelds war lediglich in der Standardsituation mit 0.5 genau bestimmbar, da in den beiden anderen Versuchsteilen der Kontrastmittelwert linear mit dem Range der Infeldmodulation variierte, und somit von der gewählten Einstellung abhing.

### **Ergebnisse.**

Die Ergebnisse für die beiden Versuchspersonen sind in Abb. 35 dargestellt; es ist für die 3 Stufen der Verankerung die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Die obere Kurve repräsentiert die Daten von FF, die untere diejenigen von OT. Die leichten Trends, die in den beiden Kurven erkennbar sind, verlaufen bei den beiden Versuchspersonen in entgegengesetzter Richtung. Zieht man außerdem den Standardfehler des Mittelwerts mit in Betracht, kann anhand der Daten nicht auf einen Einfluss der Lage der Nulling-Kurve auf die Kontrastinduktion geschlossen werden. Allerdings wurde in die Überlegungen nicht einbezogen, dass mit der unterschiedlichen Verankerung der Nulling-Kurve auch der mittlere Infeldkontrast variiert. Für eine Variation des mittleren Umfeldkontrasts zeigten bereits Singer und D'Zmura (1994) einen Einfluss auf die Kontrastinduktion. Die aus der unterschiedlichen Verankerung der Nulling-Kurve resultierende Variation des mittleren Infeldkontrasts war hier allerdings eher gering, was der Grund dafür sein könnte, dass kein Einfluss der Verankerung auf die Kontrastinduktion gefunden wurde.



**Abbildung 34.** Verläufe dreier alternativ verankerter Sinuskurven für ein Nulling-Experiment: der symmetrische Standardfall (Mitte), eine vollständig oberhalb und eine vollständig unterhalb des mittleren Infeldkontrasts (horizontale Linie) verlaufende Nulling-Kurve. Die jeweilige Verankerung ist durch ein leeres Symbol gekennzeichnet, und zusätzlich ist jeweils eine Nulling-Kurve geringerer Höhe eingezeichnet. Beim Standardfall wird wie gewohnt die Nulling-Amplitude ermittelt. Die obere und untere Kurve sind mit ihrem Minimum bzw. Maximum am mittleren Infeldkontrast verankert, sodass statt der Amplitude von der Verankerung aus der für das Nulling benötigte Range bestimmt wird.



**Abbildung 35.** Ergebnisse des Experiments zur Verankerung der Nulling-Kurve; es ist für die 3 Stufen der Verankerung die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Die obere Kurve repräsentiert die Daten von FF, die untere diejenigen von OT. Wird der Standardfehler des Mittelwerts mit in Betracht gezogen (vertikale Balken), dann kann anhand der Daten nicht auf einen Einfluss der Lage der Nulling-Kurve auf die Kontrastinduktion geschlossen werden.

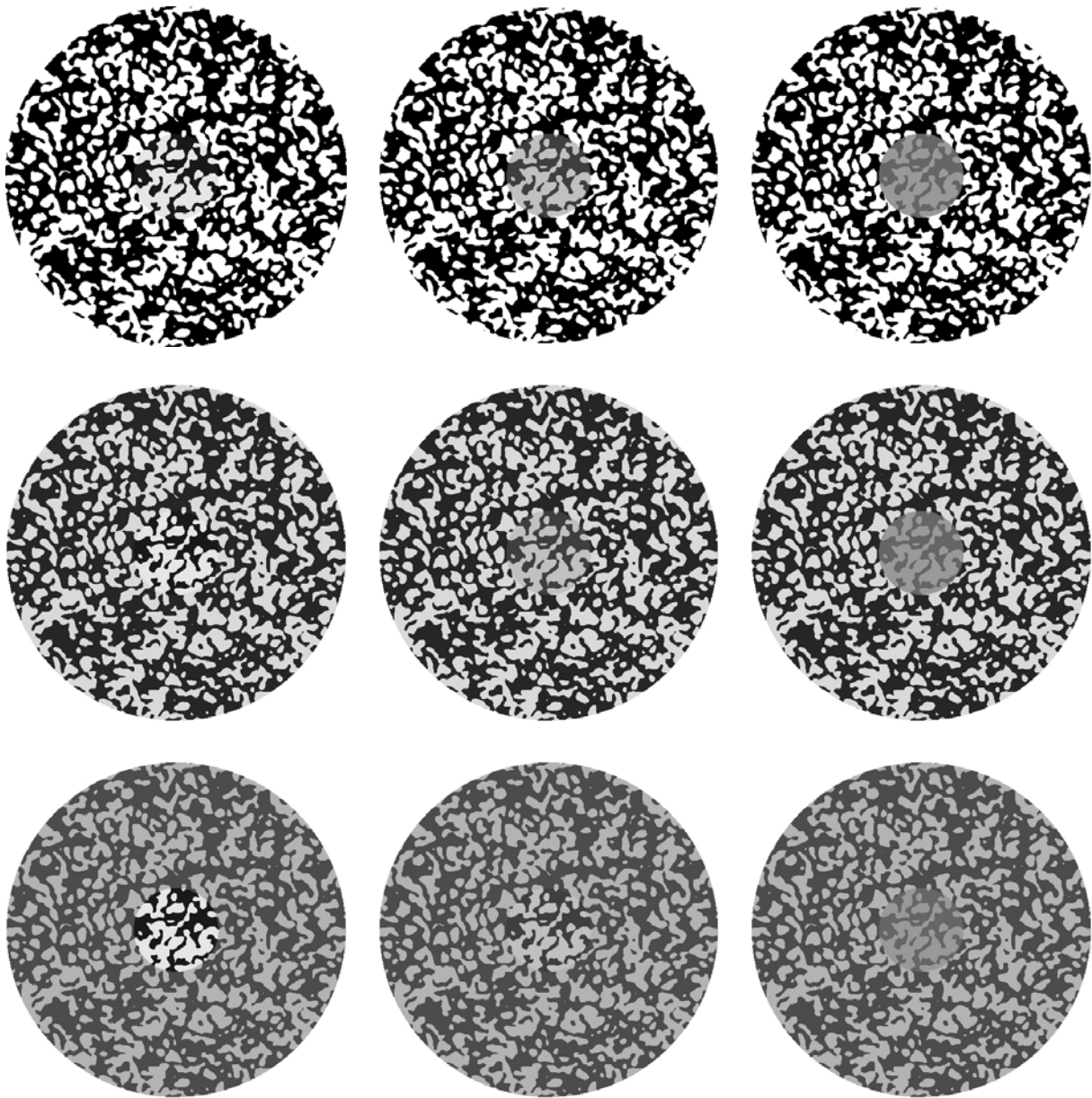
### ***3.4.2 Einfluss des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld***

#### **Konzeptueller Rahmen.**

Die Farbzerlegungshypothese sagt vorher, dass sich inkrementelle und dekrementelle Situation bzgl. der Kontrastinduktion unterscheiden sollten, genauer dass ausschließlich in der inkrementellen Situation Kontrastinduktion auftreten sollte, sofern Farbzerlegung das einzige Prinzip ist, welches für die Chubb-Illusion ursächlich ist (vgl. Abschnitt 2.5). Auch wenn das Experiment zum asymmetrischen Kontrastabgleich gezeigt hat, dass dies vermutlich nicht der Fall ist, kann trotzdem davon ausgegangen werden, dass Farbzerlegung an dem Prozess der Kontrastinduktion beteiligt ist. Daher soll überprüft werden, ob sich für den relativen zeitlichen Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld – anders formuliert also für deren Inkrement-Dekrement-Beziehung – ein systematischer Einfluss zeigen lässt. Es werden dazu die Kontrastmittelwerte von Umfeld und Infeld derart variiert, dass beide Reizflächen über die Zeit einen hohen, mittleren oder niedrigen Kontrast besitzen, woraus sich 9 Kombinationen von Kontrastmittelwerten für den Infeld-Umfeld-Reiz ergeben. Das Umfeld nimmt also in einigen dieser Fälle über die gesamte Modulationsperiode eine inkrementelle und in anderen Fällen eine durchgehend dekrementelle Stellung gegenüber dem Infeld ein. In der dritten Art von Situationen findet permanent der übliche Inkrement-Dekrement-Wechsel statt wie in der Standardsituation eines zeitlichen Kontrastmittels von 0.5 für Umfeld und Infeld. Sofern sich ein Farbzerlegungseinfluss in den Daten niederschlägt, so sollte die Kontrastinduktion in den durchgehend inkrementellen Fällen größer ausfallen als in den gegenteiligen Fällen.

#### **Methode.**

Der Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld nahm Werte von 0.8, 0.5 und 0.3 an; die 9 Kombinationen der Kontrastmittelwerte sind in Abb. 36 dargestellt. Horizontal ist der mittlere Infeldkontrast variiert (absteigend von links nach rechts), und vertikal findet sich die Variation des Umfeldkontrasts (absteigend von oben nach unten); abgebildet ist jeweils der Maximalkontrast der Umfeldmodulation. Das Experiment wurde für jede Versuchsperson (KR, MH, MP, TG, FF, OT) für die Fälle ohne und mit Gap in separaten Versuchsteilen durchgeführt, in denen die 9 Stufen der Kontrastvariation jeweils 4 mal wiederholt in zufälliger Reihenfolge dargeboten wurden. Die verwendete Messmethode war das Einstellverfahren, und es ergaben sich somit pro Versuchsperson 2x36 Darbietungen. Die gewählte Umfeldamplitude war 0.2, was aufgrund der Verschiebung des Kontrastmittelwerts gerade den maximal realisierbaren Fall darstellte.



**Abbildung 36.** Die 9 Kombinationen für Reize zur Untersuchung des relativen mittleren Umfeldkontrasts: horizontal ist der mittlere Infeldkontrast variiert (absteigend von links nach rechts), und vertikal findet sich die Variation des Umfeldkontrasts (absteigend von oben nach unten). Dargestellt ist jeweils der Maximalkontrast der Umfeldmodulation für eine Amplitude von 0.2.

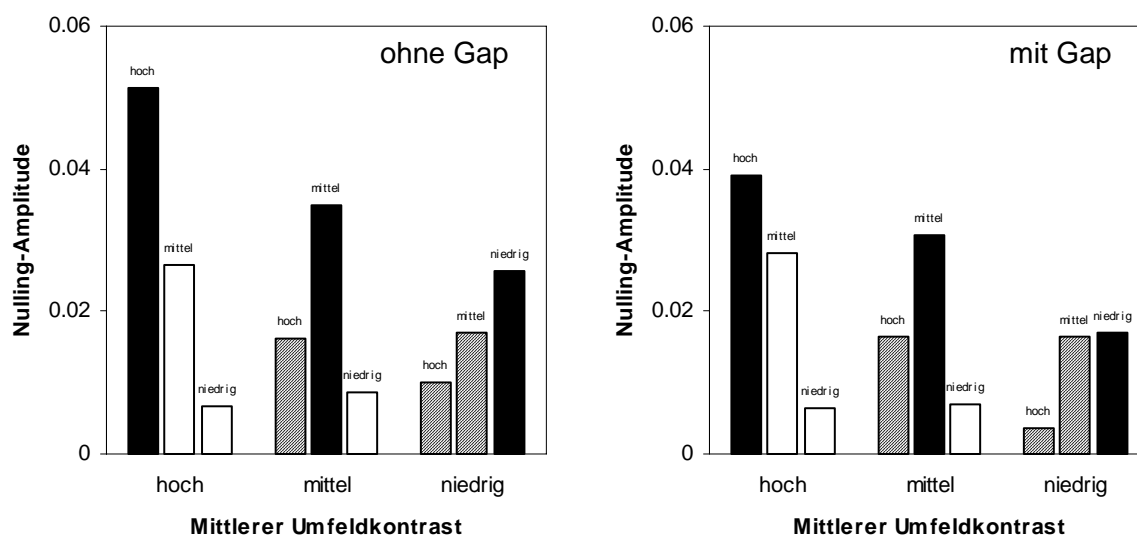
### Ergebnisse.

In Abb. 37 sind die Ergebnisse zur Variation von Umfeld- und Infeldkontrastmittel dargestellt; für die 9 Kombinationen von mittlerem Umfeld- und Infeldkontrast ist die über die Versuchspersonen gemittelte Nulling-Amplitude abgetragen. Die drei Balkengruppen entsprechen der Kontrastvariation des Umfelds, innerhalb der Gruppen finden sich die drei Stufen der Infeldvariation. Die ausgefüllten

Balken stellen die Situationen für gleichen Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld dar, die leeren Balken stehen für dekrementelle und die schraffierten für inkrementelle Situationen. Das linke Diagramm repräsentiert die ohne Gap erzielten Daten, auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse der mit Gap durchgeführten Versuchsteile.

Die Daten zeigen keinen Einfluss der Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld, der mit der Farbzerlegungshypothese vereinbar wäre. Es ist lediglich zu erkennen, dass die Daten aus dekrementellen Situationen leicht größere Werte aufweisen als die aus inkrementellen, wobei dies eher im Widerspruch zu den Überlegungen zum Zusammenhang von Kontrastinduktion und wahrgenommener Transparenz steht (vgl. Abschnitt 2.5), und möglicherweise im Kontext der Farbinduktion besser interpretiert werden kann (vgl. Abschnitt 4.2). Allerdings lässt sich einerseits ein „Haupteffekt“ bzgl. des mittleren Umfeldkontrasts feststellen, für welchen sich eine proportionale Beziehung zur Nulling-Amplitude abzeichnet. Andererseits ergibt sich ein Einfluss des mittleren Infeldkontrasts auf die Kontrastinduktion, der allerdings komplexerer Natur zu sein scheint. Die Beziehung von mittlerem Infeldkontrast zur Nulling-Amplitude entspricht scheinbar einem umgekehrt U-förmigen Zusammenhang, wobei die Situation gleichen Umfeld- und Infeldkontrastmittels möglicherweise gerade das Maximum bildet; weiterhin scheint die Abnahme des Effekts in Richtung dekrementell steiler zu verlaufen als im gegenteiligen Fall. Es handelt sich also bzgl. der Rolle des Infeldkontrastmittels offensichtlich um eine Wechselwirkung mit dem mittleren Umfeldkontrast.

Singer und D’Zmura untersuchten ebenfalls den Einfluss des Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld (vgl. Abschnitt 2.3, Einfluss des mittleren Infeld- und Umfeldkontrasts.). Bzgl. des Infeldkontrasts gelangten sie zu dem Ergebnis, dass sich mit wachsendem mittlerem Infeldkontrast an einen zunächst nahezu linearen Anstieg der Nulling-Amplitude eine Sättigung des Effekts anschließt (Singer & D’Zmura, 1994). Sie fanden somit keine erneute Abnahme des Effekts, wie sie den hier vorliegenden Ergebnissen zu entnehmen ist. Aufgrund der vorliegenden Daten ist jedoch zu vermuten, dass Singer und D’Zmura hier nur den Anstieg des umgekehrt U-förmigen Zusammenhangs ermittelt haben, und sich mit einer weiteren Steigerung des Infeldkontrasts eine erneute Abnahme der Kontrastinduktion eingestellt hätte. Gegen die geäußerte Vermutung spricht, dass Singer und D’Zmura Infeldkontrastmittel von 0.2 bis 0.8 untersuchten, was den zur Verfügung stehenden Kontrastbereich bereits nahezu vollständig ausschöpft. Überdies war für den mittleren Umfeldkontrast ein Wert von 0.5 gewählt, sodass das Maximum der Kontrastinduktion auch bei ihnen ungefähr bei der mittleren Stufe des Infeldkontrastmittelwerts hätte liegen müssen, handelte es sich auch dort um einen entsprechenden umgekehrt U-förmigen Zusammenhang.



**Abbildung 37.** Ergebnisse zur Variation des Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld; es ist für die 9 Kombinationen von Umfeld- und Infeldkontrast die über die Versuchspersonen gemittelte Nulling-Amplitude abgetragen. Die drei Balkengruppen entsprechen der Kontrastvariation des Umfelds, innerhalb der Gruppen finden sich die drei Stufen der Infeldvariation. Die ausgefüllten Balken stellen die Situationen für gleiches Umfeld- und Infeldkontrastmittel dar; die leeren Balken stehen für dekrementelle, die schraffierten für inkrementelle Situationen. Das linke Diagramm repräsentiert die ohne Gap erzielten Daten, auf der rechten Seite finden sich die Ergebnisse des mit Gap durchgeführten Versuchsteils. Der bzgl. der Farbzerlegung erwartete Einfluss der Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld ist nicht erkennbar. Jedoch lässt sich einerseits ein „Haupteffekt“ bzgl. des mittleren Umfeldkontrasts feststellen, für welchen sich ein proportionaler Einfluss auf die Nulling-Amplitude andeutet. Andererseits ergibt sich ein Einfluss des mittleren Infeldkontrasts auf die Kontrastinduktion, der allerdings komplexerer Natur zu sein scheint. Die Beziehung von mittlerem Infeldkontrast zur Nulling-Amplitude nimmt eher eine kurvilineare Form an, wobei die Situation gleichen Umfeld- und Infeldkontrastmittels gerade das Maximum bildet; die Abnahme des Effekts in Richtung dekrementell scheint steiler zu verlaufen als für inkrementelle Fälle. Es handelt sich also bzgl. des mittleren Umfeldkontrasts um eine Wechselwirkung mit dem mittleren Umfeldkontrast.

Für ihre Untersuchung des mittleren Umfeldkontrasts berichteten Singer und D’Zmura für zunehmende Kontrastwerte zuerst einen Bereich konstanten Effektes und anschließend eine näherungsweise lineare Abnahme der Kontrastinduktion, als zumindest teilweise einen umgekehrt proportionalen Zusammenhang. Dies steht in deutlichem Widerspruch zu den vorliegenden Daten, in denen mit wachsendem mittlerem Umfeldkontrast eine Zunahme der Kontrastinduktion erkennbar ist. Derart weitgreifende Unterschiede in den Befunden zur Chubb-Illusion zeigen, dass hierfür bei weitem keine erschöpfenden Modellvorstellungen existieren. Für weitere Untersuchungen der Kontrastinduktion sollte unter anderem im Vordergrund stehen diejenigen Aspekte der Versuchsplanung zu isolieren, welche für die große Varianz in der Empirie verantwortlich gemacht werden können.

## 4. DISKUSSION UND ÜBERLEGUNGEN ZUR FARBINDUKTION

### *4.1 Diskussion der Ergebnisse hinsichtlich der Rolle von Adaptation und Farbzerlegung*

Aufgrund der Ergebnisse aus den Experimenten zur Rolle von Adaptation und Farbzerlegung ist es nicht möglich eine eindeutige Entscheidung zugunsten eines der beiden Erklärungsansätze zu treffen. Vielmehr liegen Hinweise vor, dass die Chubb-Illusion zu unterschiedlichen Anteilen sowohl auf Adaptation als auch auf Farbzerlegung beruht. Diese Hinweise sollen zunächst einzeln diskutiert und anschließend in einen Gesamtkontext gestellt werden.

#### **Körnungs- und Orientierungsselektivität.**

In den beiden ersten Experimenten wurde ein Einfluss der relativen Körnung und der relativen Orientierung des Umfelds (zum Infeld) auf die Kontrastinduktion gezeigt. Diese Ergebnisse zwingen die Adaptationshypothese zur Chubb-Illusion zu weiteren Zusatzannahmen, welche die spezielle Wechselwirkung der entsprechenden Kontrastrezeptoren betreffen. Genauer muss für die Kontrastrezeptoren eine spezielle Verschaltung angenommen werden, aufgrund welcher diejenigen Rezeptoreinheiten bei ihrer Aktivierung in starke Wechselwirkung treten, die Kontrastinformationen derselben Raumfrequenz/Körnung bzw. Orientierung verarbeiten. An Theorien wird jedoch in der Regel die Forderung der Einfachheit gestellt, und somit spricht die notwendige Erweiterung eines bestehenden Erklärungsansatzes meist nicht für seine Plausibilität. Vielmehr erweckt ein derartiges Vorgehen den Eindruck einer „ad hoc“-Erklärung, also einer Wahrung der Gültigkeit eines Theoriegebäudes durch unmittelbar nicht widerlegbare Hilfskonzepte, wie sie in diesem Fall die Körnungs- und Orientierungsselektivität der Kontrastinduktion darstellen. Der Farbzerlegungsansatz vereint hingegen diese unterschiedlichen Eigenschaften in dem funktionalen Prinzip der Zerlegungskompatibilität, sodass er – gleiche Erklärungskraft vorausgesetzt – der Adaptationshypothese durch seine Einfachheit überlegen ist.

Andererseits zeigt sich in diesen ersten Experimenten kein einem Alles-oder-Nichts-Prinzip entsprechender Einfluss von Körnung und Orientierung, sondern eine graduelle Abhängigkeit der Kontrastinduktion von diesen Parametern. Unter Gültigkeit der Farbzerlegungshypothese wäre allerdings eher zu erwarten, dass für alle Fälle unterschiedlicher Körnung oder Orientierung des Umfelds relativ zum Infeld der Kontrastinduktionseffekt gleichermaßen geringer ausfällt als bei gemeinsamer Texturbeschaffenheit. Das Kriterium der Zerlegungskompatibilität wird in der Regel bzgl. eines Hinweisreizes für perzeptuelle Transparenz als erfüllt oder nicht erfüllt betrachtet; eine graduelle Erfüllung widerspricht somit der gängigen Vorstellung von Situationen, die eine Farbzerlegung durch das Wahrnehmungssystem auslösen.

Dagegen entspricht ein gradueller Einfluss von Parametern wie Körnung und Orientierung gerade den Annahmen welche gängigerweise für Adaptationsmechanismen wie der lateralen Inhibition gemacht werden. Die Selektivität eines Verarbeitungsmechanismus für definierte Eigenschaften der visuellen Szene wird meist in Analogie zu den Eigenschaften eines physikalischen Filters beschrieben, der an den Grenzen seines Wirkungsbereichs eine gewisse Unschärfe aufweist. Diese Unschärfe lässt sich in der Regel durch einen kurvilinearen Gradienten beschreiben, der angibt, auf welche Weise mit abnehmender Passung der zu filternden Signale zum Wirkungsbereich des Filters dessen Einfluss abnimmt. Insofern sprechen die Ergebnisse der ersten beiden Experimente letztendlich eher für die Adaptations- als für die Farbzerlegungshypothese.

### **Statische Reizdarbietung.**

Zuerst ist die Annahme zu überprüfen, bei der Beziehung von Umfeld- zu Infeldkontrast handele es sich um einen invers proportionalen Zusammenhang, wie es die Adaptationshypothese besagt. Nach dieser Annahme nimmt der wahrgenommene Infeldkontrast mit zunehmendem Umfeldkontrast linear ab. Stellte man den wahrgenommenen Infeldkontrast in Abhängigkeit vom Umfeldkontrast dar, sollte sich eine lineare Beziehung ergeben. Diese nähme in einer zeitlichen Darstellung, wie sie den Kontraständerungen des Umfelds im Rahmen eines dynamischen Nulling-Experiments entspricht, die Form einer Sinuskurve an. Die Ergebnisse aus dem statischen Experiment unter Verwendung des asymmetrischen Kontrastabgleichs zeigen allerdings, dass die Beziehung von Umfeld- zu Infeldkontrast deutlich von einer solchen Proportionalität abweicht. Dieser Befund macht jedoch lediglich die Verallgemeinerung des Adaptationskonzepts vom Spezialfall eines linearen Zusammenhangs auf eine nonlineare Induktionsbeziehung notwendig und stellt nicht grundlegend die Gültigkeit dieses Erklärungsansatzes in Frage.

Die Verwendung der statischen Reizdarbietung, kombiniert mit einem asymmetrischen Abgleich anstatt der dynamischen Nulling-Methode, ermöglicht es jedoch zusätzlich verschiedene Asymmetrien festzustellen, welche bzgl. der Abhängigkeit des wahrgenommenen Infeldkontrasts vom Umfeldkontrast bestehen können. Mit dem üblichen Sinus-Nulling können diese Asymmetrien nicht

gefunden werden, da durch die sinusoidale – und somit in verschiedener Hinsicht symmetrische – Kontrastmodulation von Umfeld und Infeld asymmetrische Befunde grundsätzlich ausgeschlossen sind. Wenigstens eine dieser Asymmetrien ist für eine Unterscheidung zwischen Adaptations- und Farbzerlegungshypothese von diagnostischem Wert.

Als Asymmetrie erster Art könnte sich ein Unterschied in der Kontrastinduktion zwischen inkrementeller und dekrementeller Situation ergeben. Die Farbzerlegungshypothese sagt diesbezüglich vorher, dass lediglich in der inkrementellen Situation Kontrastinduktion auftreten sollte, da ausschließlich hier eine Farbzerlegung bzgl. der Infeldfläche zu beobachten ist. Der Adaptationshypothese hingegen – in ihrer nonlinearen Form – entspräche der Befund eines zumindest symmetrischen Induktionsgeschehens. Die Ergebnisse bzgl. der Asymmetrie erster Art zeigen nun allerdings keinen eindeutigen Befund. Vielmehr ergibt sich für die Untersuchungssituation, in welcher Umfeld und Infeld von einer ringförmigen Fläche (Gap) getrennt sind, ein recht symmetrisches Bild der Kontrastinduktion, sodass zwischen inkrementeller und dekrementeller Situation kein nennenswerter Unterschied besteht. Allerdings scheint für den Fall ohne Gap die Kontrastinduktion mit wachsendem Umfeldkontrast zunächst geringer auszufallen, und anschließend für inkrementelle Situationen stärker zu sein als für den Fall mit Gap. Der Einfluss der Gap-Situation sollte unter Gültigkeit der Adaptationshypothese jedoch kaum feststellbar sein, und somit spricht dieser Unterschied für einen Einfluss von Farbzerlegung auf die Chubb-Illusion.

Darüber hinaus ist aus der Adaptationshypothese nicht ersichtlich, warum sich die Gap-Situation auf die Symmetrie der beobachteten Beziehung auswirken sollten. In den Versuchsteilen mit Gap sollte sich aus dieser Perspektive lediglich ein gleichmäßig geringerer Effekt einstellen. Dagegen sind die gefundenen Symmetrieunterschiede mit der Farbzerlegungshypothese durchaus verträglich. Sowohl der flachere Verlauf in der dekrementellen als auch der steilere in der inkrementellen Situation entspricht der Vorhersage dieses Erklärungsansatzes zumindest für den Fall, dass nur ein Teil der Kontrastinduktion auf Farbzerlegung beruht. Läge – gewissermaßen als Basiseffekt – ein symmetrischer Anteil der Chubb-Illusion vor, dann ergäbe sich eine Veränderung des beobachteten Zusammenhangs in Richtung der vorliegenden Asymmetrie gerade für den Fall, dass die Hinweisreize für eine transparente Überdeckung verstärkt würden (beispielsweise durch Weglassen des Gaps): in der inkrementellen Situation fiel der Effekt größer aus, und in der dekrementellen Situation würde sich der Verlauf der Kontrastinduktion dem durch die Farbzerlegungshypothese vorhergesagten konstanten Verlauf annähern. Somit spricht die Asymmetrie zwischen inkrementeller und dekrementeller Situation (in den ohne Gap erzielten Ergebnissen) im allgemeinen und die genaue Ausprägung der gefundenen Unterschiede im speziellen dafür, dass die Chubb-Illusion teilweise auf Farbzerlegung beruht.

### **Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld.**

Eine Variation der zeitlichen Kontrastmittelwerte von Umfeld und Infeld für ein Nulling-Experiment resultiert in grundsätzlich verschiedenen Situationen für die Untersuchung der Chubb-Illusion. Einerseits ergeben sich vollständig inkrementelle Anordnungen, in denen also über die gesamte Periode der Kontrastmodulation das Umfeld einen höheren Kontrast aufweist als das Infeld. Andererseits ergeben sich auch vollständig dekrementelle Situationen, bei denen der Umfeldkontrast zu jedem Zeitpunkt niedriger ist als der des Infelds. Die dritte Variante entspricht dem Standardfall des gemeinsamen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld, bei dem ein permanenter periodischer Wechsel der Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld vorliegt. Die Farbzerlegungshypothese macht bezüglich der Variation der Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld die eindeutige Vorhersage, dass ausschließlich in der Situation eines zum Infeld inkrementellen Umfelds der Eindruck perzeptueller Transparenz und somit Kontrastinduktion aufgrund von Farbzerlegung auftreten sollte. Die Adaptationshypothese hingegen macht diesbezüglich keine unmittelbare Vorhersage.

Die Ergebnisse zur Variation des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld weisen nun keinen deutlichen Unterschied zwischen der dauerhaft inkrementellen und der dauerhaft dekrementellen Anordnung auf, es zeigt sich lediglich eine leicht stärkere Kontrastinduktion für die dekrementellen Fälle. Dieser Befund steht allerdings im genauen Gegensatz zu der Vorhersage des Farbzerlegungsansatzes, und ist auch im Rahmen der Adaptationshypothese nicht ohne weiteres einzuordnen.

Weiterhin ist zunächst ein nahezu linearer Einfluss des mittleren Umfeldkontrasts zu beobachten, sodass mit abnehmendem Umfeldkontrastmittel auch die Kontrastinduktion zurückgeht. Dazu erscheint bei konstantem mittlerem Umfeldkontrast die Kontrastinduktion für die Fälle am stärksten, in welchen der mittlere Infeldkontrast mit dem des Umfelds übereinstimmt und sich ein periodischer Wechsel der Inkrement-Dekrement-Beziehung von Umfeld und Infeld einstellt. Schließlich ist festzustellen, dass die Abnahme der Kontrastinduktion von diesem Maximum aus in Richtung inkrementell steiler zu verlaufen scheint als für die dekrementellen Fälle, sodass sich der oben genannte Befund einer leicht stärkeren Kontrastinduktion für dekrementelle Reizanordnungen ergibt. Für derartige Befunde steht innerhalb der Farbzerlegungshypothese kein theoretischer Rahmen bereit, und auch mit dem Adaptationsansatz sind diese Ergebnisse nicht ohne weiteres verträglich. Es bliebe lediglich die Möglichkeit, letzteren Erklärungsansatz erneut zu erweitern, und eine Selektivität bzgl. des mittleren zeitlichen Kontrasts der Reiztextur für die Adaptationsmechanismen anzunehmen; eine Rechtfertigung hierfür ist allerdings nicht unmittelbar ersichtlich.

### **Zusammenfassung.**

Aus den Experimenten zur Körnungs- und Orientierungsselektivität der Chubb-Illusion ergaben sich Hinweise, dass die Kontrastinduktion (zumindest zum Teil) auf einem der lateralen Inhibition verwandten Adaptationsvorgang beruht. Zumindest zeigt sich der Einfluss der Körnung und der Orientierung in gradueller Weise, was mit den gängigen Vorstellungen über die Zerlegungskompatibilität im Rahmen der Farbzerlegungshypothese nicht verträglich ist. Die statische Reizdarbietung förderte jedoch für einige Fälle eine asymmetrische Beziehung von Umfeld- und Infeldkontrast zu Tage, welche für den zusätzlichen Einfluss von Farbzerlegungsvorgängen auf den wahrgenommenen Infeldkontrast spricht. Dies legt nahe, dass sich in der Chubb-Illusion möglicherweise verschiedene Einflüsse zeigen: einerseits ein Anteil an der Kontrastinduktion, der auf Adaptation zurückgeht, und ein weiterer Anteil, der aus einer Farbzerlegung hervorgeht. Die Annahme einer derartigen Überlagerung verschiedener Teilursachen für ein beobachtetes Phänomen bietet meist einen ersten Ansatzpunkt, um zunächst widersprüchlich erscheinende Befunde, wie sie für die Chubb-Illusion in der Literatur berichtet wurden, widerspruchsfrei zu interpretieren. Wie genau dies bei der Chubb-Illusion geschehen kann, müssen allerdings weitere theoretische und empirische Bemühungen zeigen.

Schließlich ergaben sich aus der Variation der zeitlichen Kontrastmittel von Umfeld und Infeld Ergebnisse, die nicht eindeutig im Rahmen eines der beiden untersuchten Erklärungsansätze interpretierbar sind. Dies könnte dafür sprechen, dass zusätzlich zu den Einflüssen von Adaptations- und Farbzerlegungsvorgängen – zumindest mit den hier verwendeten Reizen – noch weitere Ursachen für die Chubb-Illusion vorliegen. Das im folgenden vorgeschlagene Modell zur Vorhersage von Kontrastinduktion durch Farbinduktion beschreibt möglicherweise einen dieser weiteren Beiträge.

## ***4.2 Überlegungen zur Rolle von Farbinduktion bei der Chubb-Illusion***

### **Kontrastinduktion und Farbinduktion.**

Bei der Variation des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld ergab sich ein umgekehrt U-förmiger Zusammenhang der Höhe der Nulling-Amplitude zur Höhe der induzierenden Kontrastamplitude des Umfelds. Im Fall eines gleichen mittleren Kontrasts von Umfeld und Infeld ergibt sich das Maximum der Kontrastinduktion, und die Abnahme des Effekts in Richtung dekrementell verläuft flacher als in Gegenrichtung. Es gibt Hinweise, dass sich eine derartige Abhängigkeit der Kontrastinduktion vom relativen mittleren Infeldkontrast über Mechanismen erklären lassen, welche zu der Art von Farbinduktion ähnlich sind, wie sie im Rahmen des Simultankontrasts auftritt. Mit

Farbinduktion sind allgemein Einflüsse der Farbe oder in diesem speziellen Fall der Leuchtdichte einer Fläche auf die wahrgenommene Farbe bzw. Helligkeit einer anderen Fläche gemeint. Beim simultanen Helligkeitskontrast verhält sich beispielsweise die wahrgenommene Helligkeit eines Infelds (in gewissen Grenzen) umgekehrt proportional zur Leuchtdichte seines Umfelds. Es existieren zwar verschiedene funktionale Interpretationen für dieses Helligkeitsphänomen, eine gängige Vorstellung zielt jedoch – über eine Beleuchtungsschätzung der visuellen Szene – auf eine beleuchtungsunabhängige Repräsentation von Oberflächenfarben (Farbkonstanz) ab.

Chubb et al. (1989) untersuchten die Chubb-Illusion anhand permanent neu generierter Zufallspunktmuster und folgerten aufgrund des Fehlens einer zeitlich stabilen Textur, dass Farbinduktion zur Erklärung der beobachteten Kontrastinduktion nicht in Betracht gezogen werden muss. Die von Singer und D’Zmura (z.B. 1994) verwendeten Reize besaßen jedoch eine zeitlich stabile Textur, und somit waren verschiedene Störeinflüsse möglich, die Chubb et al. durch ihre speziellen Reize ausgeschlossen hatten. Es konnte unter anderem zu lokaler Adaptation und somit zum Auftreten von Nachbildern der Reiztextur kommen, welche die selektive Beurteilung des Kontrast beeinträchtigen können. Allerdings traten auch lokale (an den Grenzen direkt benachbarter Flächen) und globale Simultankontraste (ohne unmittelbare Nachbarschaft der Flächen) auf, und somit hätte Farbinduktion zur Erklärung des von Singer und D’Zmura beobachteten Effekts in Betracht gezogen werden müssen. Diese Überlegung wird im folgenden zum Anlass genommen, für das Zustandekommen von Kontraständerungen aufgrund von Farbinduktion ein vergleichsweise einfaches Modell zu entwickeln und dessen Vorhersagen mit vorliegenden empirischen Befunden zu vergleichen.

Auch bei der Situation von Chubb et al. (1989) sind Einflüsse von Farbinduktion nicht ausgeschlossen. Sie zeigten nämlich nur, dass sich bei ihren Reizen die wahrgenommene Helligkeit der gesamten Infeldfläche durch die Kontrastmodulation des Umfelds nicht verändert. Sie wiesen nicht nach, dass die wahrgenommene Helligkeit der einzelnen Farbanteile des Infelds unverändert bleibt, was auch in gewisser Weise einer Änderung des wahrgenommenen Kontrast widerspräche. Sofern einzelne Sehzereptoren oder relativ kleine, funktional isolierte rezeptive Felder die Verarbeitung der Helligkeitsinformationen der verwendeten Punktmusters vornehmen, dann entspräche deren mittlere Erregung der vom mittelgrauen Hintergrund für die Reizdarbietung; die Argumentation der Autoren zum Ausschluss der Farbinduktion wäre somit korrekt und nachvollziehbar. Würden allerdings die Helligkeitsinformationen der Reiztextur in komplexerer Weise miteinander verrechnet, dann wäre möglicherweise von Bedeutung, dass für einen definierten retinalen Bereich stets ein fester Anteil der Sehzereptoren durch die hellen bzw. dunklen Anteile des Punktmusters erregt ist. Somit ständen in gewissem Sinne „virtuelle“ Flächen fester Größe für eine Farbinduktion zur Verfügung, und es müsste erneut ein Einfluss der Leuchtdichte dieser Flächen auf die wahrgenommene Helligkeit der Infeldanteile berücksichtigt werden.

Derartig komplexe Informationsverarbeitungsprozesse sind nicht unplausibel, betrachtet man die Chubb-Illusion im Kontext von Farbkonstanz und ähnlichen funktionalen Interpretationen beobachtbarer Farbphänomene. Für solche Zwecke sind differenziertere Informationen über eine Fläche

oder ein Objekt möglicherweise von größerer Bedeutung als ein global gemitteltes Erregungsmuster im Sinne der mittleren Leuchtdichte einer Fläche. Diese Betrachtungen sind zugegebenermaßen spekulativ; sie sollen jedoch verdeutlichen, dass auch bei Verwendung von Zufallspunktmustern die Informationen für Farbinduktionsvorgänge grundsätzlich gegeben sind und es weitreichender Annahmen über die Verschaltung und somit über die Informationsverarbeitung des Sehsystems bedarf um solche Vorgänge ausschließen zu können.

### Modellbildung.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die wahrgenommenen Helligkeit eines homogenen Infelds zur Leuchtdichte eines homogenen Umfelds (für ein in der Leuchtdichte dekrementelles Umfeld) einem mit ansteigender Leuchtdichtedifferenz negativ beschleunigt wachsenden kurvilinearen Zusammenhang entsprechend verhält. Pokorny und Smith (1997) stellten fest, dass die entsprechende Induktionsbeziehung formal der Michaelis-Menten-Gleichung entspricht (vgl. Michaelis & Menten, 1913). Sei  $\lambda_{diff}$  die positive Leuchtdichtedifferenz von Infeldfarbe zu Umfeldfarbe und  $a$  ein konstanter reeller Wert  $> 0$ , dann ergibt sich bei geeigneter Wahl von  $a$  die Änderung der wahrgenommenen Helligkeit  $\Delta h$  des Infelds nach der folgenden Gleichung:

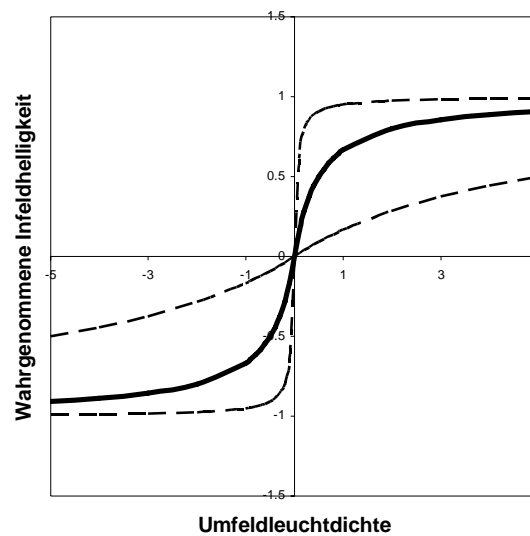
$$\Delta h = \frac{\lambda_{diff}}{a + \lambda_{diff}}. \quad (11)$$

Dieser Ausdruck nähert sich mit wachsendem  $\lambda_{diff}$  asymptotisch einem konstanten Wert von 1, wobei sich die Steilheit dieser Annäherung gerade umgekehrt proportional zum Parameter  $a$  verhält.

Für die Einbeziehung der inkrementellen Situation in das Farbinduktionsmodell wird allerdings eine zum Ursprung symmetrische Kurve benötigt; eine solche ergibt sich, setzt man die Kurve im dritten Quadranten durch eine Punktspiegelung des Kurventeils im ersten Quadranten fort. Diese punktsymmetrische Fortsetzung der Induktionskurve wird dadurch erreicht, dass im Nenner der Wert der Leuchtdichtedifferenz durch seinen Betrag eingesetzt wird:

$$\Delta h = \frac{\lambda_{diff}}{a + |\lambda_{diff}|}. \quad (12)$$

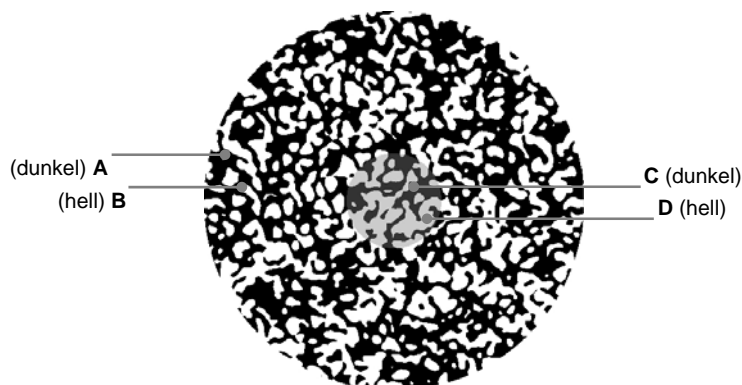
Eine derartige Induktionsbeziehung ist in Abb. 38 dargestellt, in der die wahrgenommene Helligkeit des Infelds gegen die Leuchtdichtedifferenz von Umfeld und Infeld abgetragen ist. Die durchgezogene Linie entspricht einem Wert von 0.5 für  $a$ , die unterbrochenen Linien repräsentieren die Werte von 0.05 und 5, resultierend in einer steileren bzw. flacheren asymptotischen Annäherung an den Wert 1.



**Abbildung 38.** Farbinduktionsbeziehung eines homogenen Infelds zu einem homogenen Umfeld: es ist gegen die Leuchtdichtedifferenz von Umfeld und Infeld die wahrgenommene Helligkeit des Infelds abgetragen. Die durchgezogene Linie entspricht einem Wert von 0.5 für  $a$ , die unterbrochenen Linien repräsentieren die Werte von 0.05 und 5, welche in einer steileren bzw. flacheren asymptotischen Annäherung an den Wert 1 resultieren.

Bei den Reizen zur Untersuchung der Chubb-Illusion handelt es sich nun um binäre Farbflächen, sodass insgesamt vier Farbinduktionswirkungen der zwei Umfeldfarben auf die zwei Infeldfarben berücksichtigt werden müssen.<sup>23</sup> Genauer wird angenommen, dass die Farbänderungen des Umfelds über Farbinduktion wahrgenommene Helligkeitsänderungen der beiden Infeldanteile bewirken, was perceptuell in einer Modulation des wahrgenommenen Infeldkontrasts resultiert. Für das Zusammenwirken der jeweils zwei Induktionsanteile zum Wahrnehmungseindruck einer Infeldfarbe sei im folgenden Linearität angenommen, sodass sich der entsprechende Induktionsvorgang durch eine Linearkombination der zwei Einzelwirkungen ausdrücken lässt. Die vier Farbeinteile sind in Abb. 39 mit den Großbuchstaben A und B für die Umfeld- und C und D für die Infeldfarben gekennzeichnet.

<sup>23</sup> Für eine exaktere Formulierung der Farbinduktion sollten auch die Einflüsse der beiden Infeldanteile aufeinander in Betracht gezogen werden, worauf der Einfachheit halber jedoch an dieser Stelle verzichtet wird. Dies zöge Überlegungen zum Einfluss von Abstand und relativem Flächenanteil der beteiligten Farben nach sich, und würde eine mathematische Formalisierung der vermuteten Farbinduktion deutlich komplexer gestalten.



**Abbildung 39.** An der Farbinduktion beteiligte Umfeld- und Infeldfarben: die beiden Umfeldfarben A und B beeinflussen die wahrgenommene Helligkeit der beiden Infeldfarben C und D.

Für die Linearkombination werden mit  $b_1$  und  $b_2$  Gewichte gewählt, die aufgrund der gleichen Flächeninhalte der beiden Umfeldfarben als gleich groß angenommen und beispielsweise auf  $1/2$  festgelegt werden können. Seien mit A und B die beiden Umfeldfarben und mit C und D die beiden Infeldfarben gekennzeichnet, und sei die jeweilige Leuchtdichtedifferenz  $\lambda_{diff}$  mit den für die entsprechenden Farben gewählten Großbuchstaben indiziert, so ergeben sich die Änderungen der wahrgenommenen Helligkeiten  $\Delta h_C$  und  $\Delta h_D$  der Infeldfarben C bzw. D nach den folgenden beiden Gleichungen:

$$\Delta h_C = b_1 \frac{\lambda_{diff C,A}}{a + |\lambda_{diff C,A}|} + b_2 \frac{\lambda_{diff C,B}}{a + |\lambda_{diff C,B}|} \quad (13)$$

$$\Delta h_D = b_1 \frac{\lambda_{diff D,A}}{a + |\lambda_{diff D,A}|} + b_2 \frac{\lambda_{diff D,B}}{a + |\lambda_{diff D,B}|}. \quad (14)$$

Für eine Vorhersage der kompensierenden Kontrastamplitude im Rahmen eines Nulling-Experiments muss nun zunächst separat für die beiden Infeldfarben die maximale Differenz der wahrgenommenen Helligkeiten ermittelt werden. Dies ist also eine Frage nach dem wahrgenommenen Helligkeitsunterschied der Situationen minimalen und maximalen Umfeldkontrasts, da in diesen Situationen die maximale bzw. minimale wahrgenommene Helligkeitsänderung zu erwarten ist.<sup>24</sup> Die Hälfte dieses maximalen wahrgenommenen Helligkeitsunterschieds für eine Infeldfarbe determiniert die

<sup>24</sup> Dieser Sachverhalt ergibt sich gerade aus Gleichung (10) als der Grundgleichung der Kontrastinduktion und der Tatsache, dass bei einem typischen Nulling ein Infeldanteil die mittlere Leuchtdichte mit einem Umfeldanteil gemeinsam hat und vom anderen diesbezüglich verschieden ist. So sind die beiden Farbinduktionsanteile in der Situation minimalen Infeldkontrasts gleich und in der Situation maximalen Umfeldkontrasts entgegengesetzt ausgerichtet.

Amplitude für ein Nulling der dortigen Helligkeitsänderungen. Sei  $h_0$  die mittlere wahrgenommene Helligkeit einer Infeldfarbe im Rahmen eines Nulling-Experiments, und  $\max(\Delta h)$  und  $\min(\Delta h)$  die maximale bzw. minimale wahrgenommene Helligkeitsänderung der Infeldanteile (entsprechend der Situationen minimalen bzw. maximalen Umfeldkontrasts), so ergibt sich die Nulling-Amplitude  $A_h$  für die wahrgenommenen Helligkeitsänderungen der einzelnen Infeldanteile aus der halben Differenz der entsprechenden wahrgenommenen Infeldhelligkeiten:

$$A_h = \frac{[h_0 + \max(\Delta h)] - [h_0 + \min(\Delta h)]}{2} = \frac{\max(\Delta h) - \min(\Delta h)}{2}. \quad (15)$$

Für ein Nulling der mit den Helligkeitsänderungen korrespondierenden Kontraständerungen wird nun allgemein angenommen, dass ein Kompromiss zwischen der Kompensation der Helligkeitsänderungen der hellen und der dunklen Infeldanteile die beste Lösung für das Nulling-Problem darstellt (vgl. Abschnitt 2.4, Skalierung der wahrgenommenen Helligkeit). Diesem postulierten Kompromiss entsprechend wird als Nulling-Amplitude bzgl. der Kontraständerungen der Mittelwert aus den Nulling-Amplituden bzgl. der einzelnen Helligkeitsänderungen verwendet. Es handelt sich hier allerdings um eine symmetrische Situation in dem Sinne, dass jeweils eine Umfeld- und eine Infeldfarbe denselben zeitlichen Leuchtdichtemittelwert besitzen. Somit ist das Induktionsgeschehen bzgl. beider Infeldanteile ebenfalls symmetrisch, und die Farbinduktion bzgl. beider Infeldanteile fällt gleich stark aus. Demzufolge entspricht die Nulling-Amplitude  $A_k$  für die Kontraständerungen gerade dem doppelten Betrag der beiden (betragsmäßig gleichen) Nulling-Amplituden  $A_h$  für die Helligkeitsänderungen der einzelnen Infeldanteile. Die Notwendigkeit des Faktor 2 sollte leicht ersichtlich sein, ruft man sich die Zusammenhänge von Kontrast und Leuchtdichte in Erinnerung, wie sie in Abb. 3 dargestellt sind: für eine Überführung von Leuchtdichten in Kontrastwerte wird die Leuchtdichteskala gewissermaßen halbiert, was durch die Verdopplung der Zahlenwerte gerade kompensiert wird.

$$A_k = 2A_h = 2 \left| \frac{\max(\Delta h) - \min(\Delta h)}{2} \right| = |\max(\Delta h) - \min(\Delta h)|. \quad (16)$$

### Überprüfung der Vorhersage.

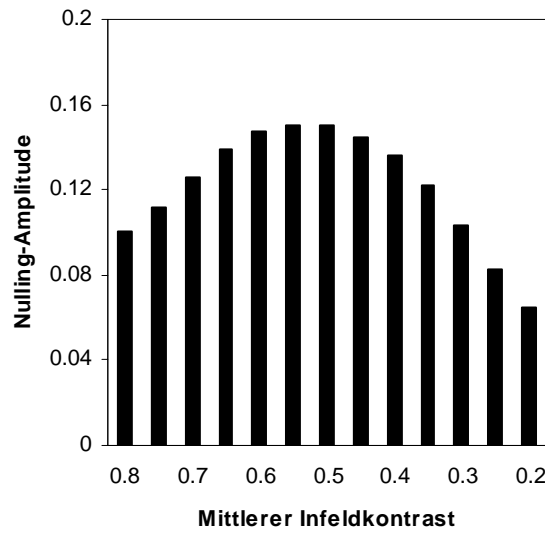
Eine Vorhersage empirisch ermittelter Werte für die Nulling-Amplitude kann das Modell nicht ohne weiteres leisten, da der Parameter  $a$  der einzelnen Induktionsanteile zunächst nicht bekannt ist. Allerdings kann überprüft werden, ob sich qualitative Eigenschaften bisheriger Befunde aus der Modellvorhersage ergeben. So fanden sich im Verlauf der Diplomarbeit Befunde zur Chubb-Illusion, welche zwar nicht unmittelbar im Rahmen eines der beiden untersuchten Erklärungsansätze interpretiert, jedoch möglicherweise mit Farbinduktionsmechanismen von beschriebener Form in Verbindung

gebracht werden können. Insbesondere soll versucht werden, die Befunde zum Einfluss des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld unter Verwendung des obigen Modells zur Farbinduktion vorherzusagen. Dazu wird für ein konstantes Umfeld und ein im mittleren Kontrast variiertes Infeld entsprechend Gleichung (16) die vorhergesagte Nulling-Amplitude berechnet. Diese Vorhersage bezieht sich somit auf die Situation, welche in Abb. 37 den Daten des mittleren Säulentripels zugrunde liegt. Der mittlere Infeldkontrast wird hier jedoch (statt der 3 Stufen) in 13 Stufen mit einer Schrittweite von 0.05 von 0.2 bis 0.8 variiert. Der mittlere Umfeldkontrast und die Kontrastamplitude des Umfelds seien auf 0.5 festgelegt, der Parameter  $a$  betrage 0.4. Die ermittelte Vorhersage ist in Abb. 40 dargestellt; für den variierten mittleren Infeldkontrast ist die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen.

Zusätzlich soll beispielhaft die Nulling-Amplitude für einen mittleren Infeldkontrast von 0.7 explizit berechnet werden. Die mittleren Leuchtdichten der beiden Umfeldfarben betragen 0.25 und 0.75, die der beiden Infeldfarben 0.15 und 0.85 (vgl. Abb. 3, rechts). Aus der Amplitude für den Umfeldkontrast von 0.2 ergibt sich eine Leuchtdichteamplitude für die beiden Umfeldfarben von 0.1. Diese resultiert für den dunklen Umfeldanteil in einer maximal und einer minimal geänderten Leuchtdichte von 0.15 bzw. 0.35 und für den dunklen Umfeldanteil in Werten von 0.85 bzw. 0.65. Die vier beteiligten Farben sind durch die Großbuchstaben aus Abb. 39 indiziert. Somit ergeben sich die maximalen und minimalen Änderungen der wahrgenommenen Helligkeiten der beiden Infeldanteile nach Gleichung (12) bzw. (13) wie folgt:

$$\begin{aligned}
 \max(\Delta h_C) &= b_1 \frac{\max(\lambda_{diff C,A})}{a + |\max(\lambda_{diff C,A})|} + b_2 \frac{\max(\lambda_{diff C,B})}{a + |\max(\lambda_{diff C,B})|} & (17) \\
 &= \frac{1}{2} \frac{0.15 - 0.15}{0.4 + |0.15 - 0.15|} + \frac{1}{2} \frac{0.15 - 0.85}{0.4 + |0.15 - 0.85|} \\
 &= \frac{1}{2} \left( 0 + \frac{-0.7}{0.4 + 0.7} \right) = \frac{1}{2} \left( -\frac{7}{11} \right) \approx -0.3182,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \min(\Delta h_C) &= b_1 \frac{\min(\lambda_{diff C,A})}{a + |\min(\lambda_{diff C,A})|} + b_2 \frac{\min(\lambda_{diff C,B})}{a + |\min(\lambda_{diff C,B})|} & (18) \\
 &= \frac{1}{2} \frac{0.15 - 0.35}{0.4 + |0.15 - 0.35|} + \frac{1}{2} \frac{0.15 - 0.65}{0.4 + |0.15 - 0.65|} \\
 &= \frac{1}{2} \left( \frac{-0.2}{0.4 + 0.2} + \frac{-0.5}{0.4 + 0.5} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{-3}{9} + \frac{-5}{9} \right) \approx -0.4444,
 \end{aligned}$$



**Abbildung 40.** Vorhersage der Nulling-Amplituden durch das Farbinduktionsmodell bei einem Wert von 0.4 für  $a$  für ein festes Umfeld und ein im mittleren Kontrast variiertes Infeld. Es ist für den mittleren Infeldkontrast die jeweilige Nulling-Amplitude abgetragen. Es ergibt sich eine deutlich asymmetrische Vorhersage, wie sie dem empirischen Befund zur Variation des relativen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld entspricht. In der Situation eines gleichen Kontrastmittelwerts stellt sich näherungsweise der stärkste Effekt ein, und in Richtung inkrementell nimmt dieser stärker ab als in der Gegenrichtung.

$$\begin{aligned}
\max(\Delta h_D) &= b_1 \frac{\max(\lambda_{diff D,A})}{a + |\max(\lambda_{diff D,A})|} + b_2 \frac{\max(\lambda_{diff D,B})}{a + |\max(\lambda_{diff D,B})|} & (19) \\
&= \frac{1}{2} \frac{0.85 - 0.15}{0.4 + |0.85 - 0.15|} + \frac{1}{2} \frac{0.85 - 0.85}{0.4 + |0.85 - 0.85|} \\
&= \frac{1}{2} \left( \frac{0.7}{0.4 + 0.7} + 0 \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{7}{11} \right) \approx 0.3182 \text{ und}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\min(\Delta h_D) &= b_1 \frac{\min(\lambda_{diff D,A})}{a + |\min(\lambda_{diff D,A})|} + b_2 \frac{\min(\lambda_{diff D,B})}{a + |\min(\lambda_{diff D,B})|} & (20) \\
&= \frac{1}{2} \frac{0.85 - 0.35}{0.4 + |0.85 - 0.35|} + \frac{1}{2} \frac{0.85 - 0.65}{0.4 + |0.85 - 0.65|} \\
&= \frac{1}{2} \left( \frac{0.5}{0.4 + 0.5} + \frac{0.2}{0.4 + 0.2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{5}{9} + \frac{3}{9} \right) \approx 0.4444.
\end{aligned}$$

Die Nulling-Amplituden für die Helligkeitsänderungen ergeben sich zu:

$$\begin{aligned}
 A_{h_c} &= \frac{\max(\Delta h_c) - \min(\Delta h_c)}{2} & (21) \\
 &\approx \frac{(-0.3182) - (-0.4444)}{2} = 0.0631 \text{ und}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A_{h_D} &= \frac{\max(\Delta h_D) - \min(\Delta h_D)}{2} & (22) \\
 &\approx \frac{0.3182 - 0.4444}{2} = -0.0631,
 \end{aligned}$$

und die Nulling-Amplitude für die Kontraständerungen beträgt folglich

$$\begin{aligned}
 A_k &= 2 \left| A_{h_{c,D}} \right| & (23) \\
 &= 0.1262.
 \end{aligned}$$

Die absoluten Zahlenwerte unterscheiden sich zwar deutlich von den gemessenen empirischen Werten (vgl. Abb. 37, mittleres Säulentripel), lassen sich jedoch durch die eine geeignete Skalierung ziemlich genau angleichen. Genauer wird zunächst der Parameter  $a$  so gewählt, dass die Stelle des maximalen Effekts für die Vorhersage mit der für die empirischen Werte übereinstimmt, wie es in Abb. 40 annähernd zu sehen ist (mittlerer Infeldkontrast von 0.55). Anschließend kann für Gleichung (16) ein positiver Koeffizient  $c$  und eine additive Konstante  $d$  so gewählt werden, dass Vorhersage und Empirie bestmöglich übereinstimmen. Es ergibt sich eine Modifikation der Nulling-Amplitude für Kontraständerungen wie folgt:

$$A_k = c \left| \max(\Delta h) - \min(\Delta h) \right| + d. \quad (24)$$

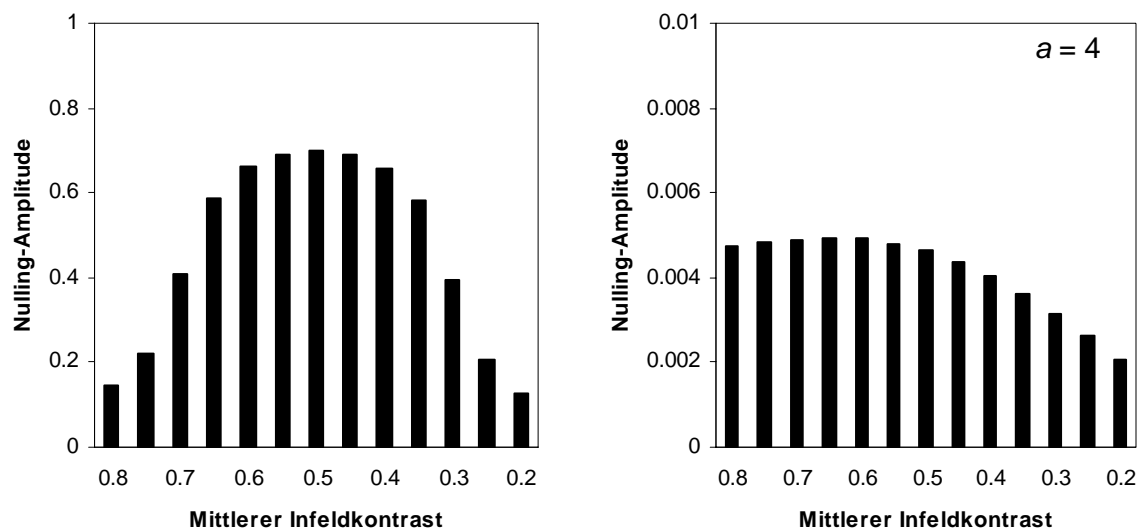
Interessanter ist jedoch, dass sich in den Vorhersagen eine Asymmetrie einstellt, welche auch in den empirischen Ergebnissen erkennbar ist: das Maximum der Kontrastinduktion ist näherungsweise in der Situation eines gleichen Kontrastmittelwerts von Umfeld und Infeld gegeben, und der vom Maximum ausgehend linksseitige Abfall der Kontrastinduktion verläuft flacher als der rechtsseitige. Diese Schiefe der dargestellten Beziehung ist nun vom Parameter  $a$  abhängig. Mit sinkendem  $a$  nähert

sich die in Abb. 38 dargestellte Induktionskurve schneller der Asymptote an, was im Rahmen der Farbinduktion als eine Zunahme der Empfindlichkeit gegenüber Helligkeitsänderungen interpretiert werden kann. Demzufolge entspräche der gegenteilige Fall eines wachsenden  $a$  einer Abnahme der Empfindlichkeit für den Einfluss der Umfeldfarbe auf die Beurteilung der Infeldfarbe.

Im Rahmen des Farbinduktionsmodells resultiert nun eine Änderung von  $a$  in verschiedenen Änderungen der in Abb. 40 dargestellten Vorhersage. Wird  $a$  größer gewählt, so nimmt die Nulling-Amplitude generell kleinere Werte an, die dargestellte kurvilineare Beziehung nimmt einen flacheren Verlauf (die Werte unterscheiden sich um geringere absolute Beträge) und das Maximum der Kontrastinduktion liegt weiter links, also weiter in Richtung dekrementell. Werden für  $a$  kleinere Werte gewählt, so ergibt sich bzgl. dieser drei Auswirkungen gerade das Gegenteil. Geht  $a$  ferner gegen 0, so nähert sich die in Abb. 40 dargestellte Vorhersage einer symmetrischen Beziehung von relativem mittlerem Infeldkontrast und Nulling-Amplitude. Vorhersagen für Werte von 0.04 und 4 für  $a$  sind in Abb. 41 auf der linken bzw. rechten Seite dargestellt. Die Vorhersage im linken Diagramm ergibt sich bei größerer Empfindlichkeit für Helligkeitsänderungen, die rechte Vorhersage entsprechend bei geringerer Empfindlichkeit. Beobachtungen während der Entwicklung des Farbinduktionsmodells legen nahe, dass eine dauerhafte Betrachtung der Standardreize (vgl. Abb. 1) tatsächlich zu einer Verstärkung der vorliegenden Asymmetrie führt, wie sie in Abb. 41 auf der rechten Seite dargestellt ist. Dies könnte auf eine Ermüdung der beteiligten Verarbeitungsstrukturen und somit auf eine verminderte Empfindlichkeit für Helligkeitsänderungen zurückzuführen ist, was gerade der entsprechenden Interpretation eines verringerten Wertes für  $a$  entspricht.

Grundsätzlich geht die Asymmetrie in der Vorhersage allerdings auf das asymmetrische Zusammenwirken der zwei Umfeldfarben zur Farbinduktion bzgl. eines Infeldanteils zurück. Es sei daran erinnert, dass in den Nulling-Experimenten bei gleichem mittlerem Umfeld- und Infeldkontrast eine Infeldfarbe den zeitlichen Leuchtdichtemittelwert mit jeweils einer Umfeldfarbe gemeinsam hat und zu der zweiten diesbezüglich verschieden ist (vgl. Abb. 3, rechts). Wird der mittlere Infeldkontrast variiert, so trifft dies zwar nur noch für dessen mittlere Stufe zu, allerdings nimmt die mittlere Leuchtdichte einer Umfeldfarbe über diese Variation hinweg gleichmäßig Werte zu beiden Seiten der entsprechenden mittleren Infeldleuchtdichte an, wohingegen dies für die andere Umfeldfarbe nicht der Fall ist. Diese asymmetrische Beziehung der zeitlichen Leuchtdichtemittelwerte der beiden Umfeldfarben zu jeweils einer Infeldfarbe ist ursächlich für die Asymmetrie der in Abb. 40 dargestellten Vorhersage.

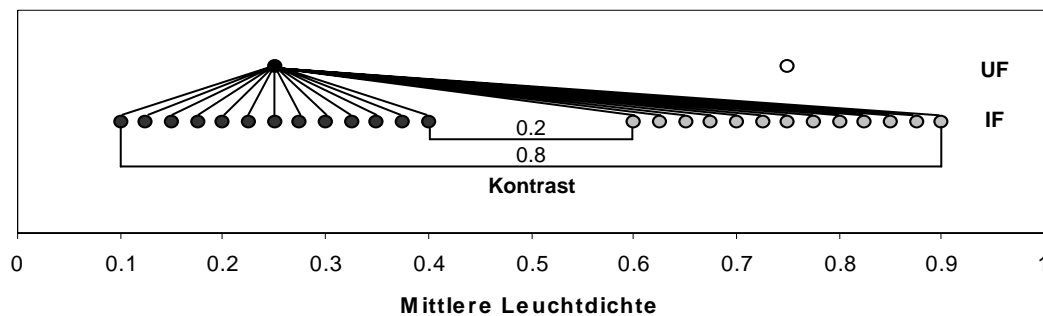
Dies soll im Folgenden näher erläutert werden; hierfür sind in Abb. 42 die mittleren Leuchtdichten der Umfeld- und Infeldfarben über die Variation des mittleren Infeldkontrast hinweg dargestellt. Die separaten Symbole (obere Reihe) repräsentieren die Leuchtdichten der Umfeldfarben (UF, schwarz bzw. weiß), die beiden Reihen von Symbolen stellen die variierten Leuchtdichten der Infeldfarben dar (IF, dunkelgrau bzw. hellgrau). Der mittlere Infeldkontrast nimmt für Paare von Infeldfarben von innen (0.2) nach außen (0.8) zu.



**Abbildung 41.** Vorhersagen für Werte von 0.04 (links) und 4 (rechts) für den Parameter  $a$ . Auf der linken Seite zeigt sich eine nahezu symmetrische Beziehung von relativem mittlerem Infeldkontrast zur Nulling-Amplitude, auf der rechten Seite findet sich die in Abb. 40 erkennbare Asymmetrie stärker ausgeprägt. Die Vorhersage im linken Diagramm ergibt sich bei größerer Empfindlichkeit für Helligkeitsänderungen, die rechte Vorhersage entsprechend bei geringerer Empfindlichkeit. Dazu fallen die Werte im rechten Diagramm wesentlich geringer aus als auf der linken Seite.

Die Umfeld- und Infeldsymbole verbindenden Linien verdeutlichen die jeweiligen Differenzen der mittleren Leuchtdichten (senkrechte Verbindungen stehen demnach für eine Differenz von 0). Es ist ersichtlich, dass jeweils eine Infeldfarbe mit einer Umfeldfarbe in der mittleren Leuchtdichte im Mittel (über die Variation) übereinstimmt, und hierin zur anderen Umfeldfarbe durchgehend verschieden ist. Abb. 43 zeigt die separaten Vorhersagen für die Nulling-Amplituden, welche sich für die Helligkeitsänderungen der hellen Infeldfläche aufgrund der Farbinduktion durch die beiden Umfeldanteile ergeben. Für den jeweiligen mittleren Infeldkontrast ist die Nulling-Amplitude bzgl. der Helligkeitsänderungen von Infeldfarbe D abgetragen; schraffierte Balken repräsentieren die Farbinduktion durch die Umfeldfarbe A (dunkel), ausgefüllte Balken stellen die Werte für die Farbinduktion durch die Umfeldfarbe B (hell) dar.<sup>25</sup> Die Werte unterscheiden sich im Vorzeichen, da für eine Kontrastmodulation des Umfelds die beiden Umfeldanteile gerade gegenphasig in der Leuchtdichte moduliert werden, und daher die resultierenden separaten Helligkeitsänderungen ebenfalls gegenphasig verlaufen. Es ist ersichtlich, dass die wahrgenommene Helligkeitsänderung aufgrund der Modulation des Umfeldfarbe B einen symmetrischen Verlauf nimmt, wohingegen der zweite Anteil der Farbinduktion (bzgl. Farbe A) asymmetrisch ist.

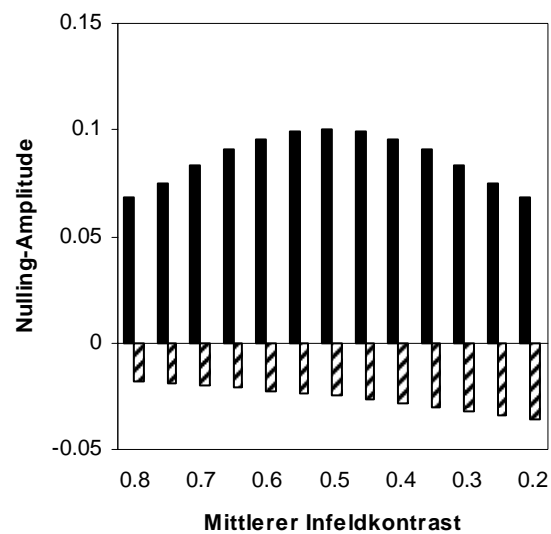
<sup>25</sup> Diese Vorhersage ergibt sich, betrachtet man die einzelnen in Gleichung (14) zusammenwirkend beschriebenen Farbinduktionen getrennt und berechnet im Folgenden die Nulling-Amplituden für die wahrgenommenen Helligkeitsänderungen der Infeldfarbe D ebenso getrennt für die beiden Induktionswirkungen.



**Abbildung 42.** Mittlere Leuchtdichten der Umfeld- und Infeldfarben für eine Variation des mittleren Infeldkontrasts. Die separaten Symbole (obere Reihe) repräsentieren die Leuchtdichten der Umfeldfarben (UF, schwarz bzw. weiß), die beiden Reihen von Symbolen stellen die variierten Leuchtdichten der Infeldfarben dar (IF, dunkelgrau bzw. hellgrau). Der mittlere Infeldkontrast nimmt für Paare von Infeldfarben von Innen (0.2) nach Außen (0.8) zu. Die Umfeld- und Infeldsymbole verbindenden Linien verdeutlichen die jeweiligen Differenzen der mittleren Leuchtdichten: es wird deutlich, dass jeweils eine Infeldfarbe mit einer Umfeldfarbe in der mittleren Leuchtdichte im Mittel (über die Variation) übereinstimmt, und hierin zur anderen Umfeldfarbe durchgehend verschieden ist.

Die in Abb. 40 dargestellte Vorhersage ergibt sich nun gerade aus einer Addition der separaten Vorhersagen für die beiden Umfeldanteile. Die Summe dieser zwei Vorhersagen bezieht sich zwar zunächst auf die wahrgenommenen Helligkeitsänderungen für Infeldfarbe D, aufgrund von Gleichung (16) ist sie jedoch (bis auf den Faktor 2) identisch mit der vorhergesagten Nulling-Amplitude bzgl. der Kontraständerungen. Die Asymmetrie dieser Vorhersage ergibt sich somit aus der Tatsache, dass ein Anteil der Farbinduktion eine asymmetrische Form aufweist, wobei beide Anteile der Farbinduktion jedoch auf demselben Prinzip beruhen. Einerseits nimmt zwar – entsprechend der Darstellung in Abb. 38 – die Farbinduktion mit wachsendem Leuchtdichteunterschied der betreffenden Umfeld- und Infeldfarbe zu. Gleichzeitig nimmt jedoch der Unterschied der Induktionswirkung zwischen den Situationen maximaler und minimaler Umfeldmodulation ab (und somit auch die Nulling-Amplitude), da sich die Unterschiede von Umfeld- zu Infeldfarbe für diese beiden Situationen einander stetig annähern. Somit resultiert die Asymmetrie der Vorhersage in Abb. 40 aus der Tatsache, dass sich eine an der Induktion beteiligte Umfeldfarbe in der mittleren Leuchtdichte im Mittel (über die Variation des mittleren Infeldkontrasts) von der betreffenden Infeldfarbe unterscheidet, was zu einer asymmetrischen Vorhersage für diesen separaten Induktionsanteil führt.

Dies ist deswegen von entscheidender Bedeutung, da somit die Übereinstimmung von Vorhersage und Empirie nicht nur auf die spezielle angenommene Induktionsbeziehung zurückzuführen ist, sondern auch allgemein auf die grundlegende Idee des Modells. Die beobachtete Asymmetrie der Vorhersage geht den obigen Überlegungen zufolge speziell auf die vorliegende Reizanordnung zurück. Es wird also durch die gezeigte Übereinstimmung von Vorhersage und empirischen Daten u.a. der Teil des beschriebenen Farbinduktionsmodells gestützt, welcher die Annahme von insgesamt vier Wirkungen der zwei Umfeldfarben auf die zwei Infeldfarben, und somit grundsätzlich die Erwägung eines multiplen Farbinduktionsgeschehens betrifft.



**Abbildung 43.** Separate Farbinduktionsanteile der beiden Umfeldfarben bzgl. des hellen Infeldanteils: es ist für den jeweiligen mittleren Infeldkontrast die Nulling-Amplitude bzgl. der Helligkeitsänderungen der Infeldfarbe  $D$  abgetragen. Schraffierte Balken repräsentieren die Umfeldfarbe  $A$ , ausgefüllte Balken stellen die Werte für die Umfeldfarbe  $B$  dar. Für erstere ergibt sich eine asymmetrische, für letztere eine symmetrische Vorhersage.

### Parameterschätzung für die Farbinduktion.

Sollte Farbinduktion in beschriebener Form für die Chubb-Illusion von Bedeutung sein, dann bliebe lediglich die Schätzung des Parameters  $a$  (und eine anschließende Festlegung der Werte von  $c$  und  $d$ ), um das vorgeschlagene Modell vollständig zu bestimmen. Ein solches Experiment wird im Rahmen der Diplomarbeit zwar nicht durchgeführt, ein denkbares Vorgehen für die Parameterschätzung soll an dieser Stelle jedoch kurz skizziert werden. Dazu ist die grundsätzliche Methode für dieses Experiment nicht unbedingt abhängig von der tatsächlichen Induktionsbeziehung in Gleichung (10), und kann somit möglicherweise auch dann angewendet werden, wenn diese für eine etwaige Weiterentwicklung des Modells modifiziert wird. Das Vorgehen soll jedoch der Anschaulichkeit halber am Beispiel der speziell angenommenen Farbinduktionsbeziehung erläutert werden.

Es kann für das Modell eine Induktionsbeziehung mit definiertem Parameter  $a$  so bestimmt werden, dass der maximale Effekt für die mittlere Infeldkontraststufe vorhergesagt wird. Anschließend werden die Parameter  $b$  und  $c$  so gewählt, dass die resultierende Vorhersage die Daten aus Abb. 37 bestmöglich approximiert; das Modell wird also zunächst gewissermaßen an die Daten gefittet. Nach der *Methode der konstanten Reize* werden in einem zweiten Schritt für jede der 13 Stufen des mittleren Infeldkontrasts (in Form eines Nulling-Experiments) Nulling-Amplituden dargeboten, welche leicht von den durch das Modell vorhergesagten Werten abweichen. Die Versuchspersonen haben nun die

Aufgabe zu beurteilen, ob das Infeld in Phase mit dem Umfeld oder gegenphasig moduliert erscheint. Der Wert, für welchen sich eine Entscheidungswahrscheinlichkeit von 50% für die beiden Antwortmöglichkeiten ergibt, kann dann als die Amplitude betrachtet werden, welche eine bestmögliche Lösung für das Nulling-Problem darstellt. Auf diese Weise kann die in Abb. 40 schematisch dargestellte Vorhersage recht genau überprüft und ggf. korrigiert werden.

Die Induktionsbeziehung, welche nun in einem dritten Schritt (erneute Festlegung von  $a$ ,  $b$  und  $c$  analog zum anfänglichen Vorgehen) die Daten aus diesem Experiment bestmöglich approximiert, kann als gute Schätzung der „wahren“ Farbinduktion betrachtet werden. Die Schätzung der Induktionsbeziehung aufgrund der hier ermittelten 13 Datenpunkte ist deswegen genauer als die erste Schätzung durch die drei Datenpunkte (vgl. Abb. 37), da aufgrund der größeren Anzahl von Datenpunkten u.a. die Lage der maximalen Kontrastinduktion genauer ermittelt werden kann. Diese muss nicht zwingend bei gleichem Kontrastmittelwert von Umfeld und Infeld vorliegen, da ihre Lage mit dem Parameter  $a$  der Empfindlichkeit für die Farbinduktion variiert (vgl. Modellbildung.). Darüber hinaus ist aufgrund der größeren Anzahl von Datenpunkten auch die Verlaufsform der Vorhersage genauer an die empirischen Werte angleichbar.

Abschließend sei bemerkt, dass für die Versuchsperson OT die durch das Modell vorhergesagten Nulling-Amplituden (bei geeigneten Werten für  $a$  und  $b$ , und einem Wert von 0 für  $c$ ) recht gute Lösungen für das Nulling-Problem darstellten, das im Rahmen eines Experiments zur Variation des mittleren Infeldkontrasts vorgegeben wurde.

### **Diskussion bisheriger Befunde im Rahmen des Farbinduktionsmodells.**

Das Modell zur Vorhersage wahrgenommener Kontraständerungen durch Farbinduktion beschreibt nicht alle in der Diplomarbeit erzielten Befunde zur Chubb-Illusion. Es muss im einzelnen untersucht werden, welche Ergebnisse sich über die vermuteten Farbinduktionsvorgänge erklären lassen, und für welche Ergebnisse dies nicht möglich ist. Letztere Aspekte der Chubb-Illusion gehen möglicherweise auf andere Mechanismen zur Kontrastinduktion zurück, wobei zwei potentielle Alternativmodelle hierfür gerade durch Adaptation und Farbzerlegung gegeben sind.

Der Befund zum Einfluss der induzierenden Kontrastamplitude auf die Chubb-Illusion im Rahmen eines Nulling-Experiments lässt sich durch das Farbinduktionsmodell vorhersagen. Eine Vorhersage der Nulling-Amplitude für die von 0.1 bis 0.5 in einer Schrittweite von 0.1 variierte Kontrastamplitude des Umfelds ist in Abb. 44 dargestellt.<sup>26</sup> Es ist für die induzierende Kontrastamplitude des

---

<sup>26</sup> Hierfür werden grundsätzlich die gleichen Rechenschritte durchgeführt wie bei der Vorhersage für die Variation des mittleren Infeldkontrasts, es wird jedoch statt dessen die induzierende Kontrastamplitude variiert.

Umfelds die jeweilige Nulling-Amplitude bzgl. der Helligkeitsänderungen der Infeldfarbe D abgetragen. Auf der linken Seite finden sich die Vorhersagen für die separaten Induktionswirkungen der Umfeldfarben A (unterbrochene Linie) und B (durchgezogene Linie), auf der rechten Seite ist die aus einer Addition der Einzelanteile resultierende Gesamtinduktion dargestellt.<sup>27, 28</sup> Der vorhergesagte negativ beschleunigt wachsende Kurvenverlauf der Gesamtinduktion im rechten Diagramm entspricht recht genau der Form des empirischen Datenverlaufs (vgl. Abb. 25). In diesem Fall geht die Übereinstimmung jedoch weitgehend auf die spezielle Induktionsbeziehung zurück, welche an sich einen negativ beschleunigt wachsenden Verlauf beschreibt. Die Umfeldfarbe C hat auf die vorhergesagte Kontrastinduktion einen (eher geringen) annähernd linearen Einfluss, sodass die Form der Resultierenden nur geringfügig auf die binäre Reiztextur zurückgehen kann. Dies zeigt sich in der großen Übereinstimmung der durchgezogenen Kurven aus Abb. 44 (linke und rechte Seite).

Darüber hinaus ist die genaue Beziehung von Umfeld- und Infeldkontrast aus der statischen Reizdarbietung (und dem asymmetrischen Kontrastabgleich), ebenfalls mit der Vorhersage der Kontrastinduktion durch das Farbinduktionsmodell verträglich. Um dies zu zeigen, soll ausschließlich auf die Ergebnisse aus den ohne Gap durchgeführten Versuchsteilen Bezug genommen werden (vgl. Abb. 32, durchgezogene Linie), die für das Modell zur Farbinduktion unklar ist, auf welche Weise der Gap für eine Vorhersage berücksichtigt werden müsste. Die Daten weisen in der dekrementellen Situation einen flacheren und in der inkrementellen Situation einen steileren Verlauf auf, als es einer zur mittleren Umfeldkontraststufe punktsymmetrischen Kurve entspräche. Eine derartige Asymmetrie ergibt sich nun gerade aus der Vorhersage der Kontrastinduktion durch das Farbinduktionsmodell. Die Vorhersage für die Leuchtdichte der Matchfeldfarbe D (Benennung wie gehabt) im Rahmen eines statischen, asymmetrischen Kontrastabgleichs – und somit für die wahrgenommene Helligkeit der entsprechenden Testfeldfarbe – ist in Abb. 45 gezeigt. Links finden sich die vorhergesagten Induktionswirkungen der Umfeldfarben A (unterbrochene Linie) und B (durchgezogene Linie), rechts ist die aus einer Addition der Einzelanteile resultierende Gesamtinduktion dargestellt.<sup>29</sup> Die Vorhersagen ergeben sich im Prinzip aus Gleichung (14), wobei hier statt die Änderung die resultierende wahrgenommene Helligkeit betrachtet wird. Für die Einzelvorhersagen im linken Diagramm werden die beiden Induktionsanteile in Gleichung (14) separat dargestellt. Die Summe der beiden Vorhersagen (rechts) bezieht sich zwar zunächst auf die wahrgenommene Helligkeit von Infeldfarbe D, ist aber (bis auf den Faktor 2) identisch mit einer Vorhersage für Änderungen des wahrgenommenen Kontrasts.<sup>30</sup>

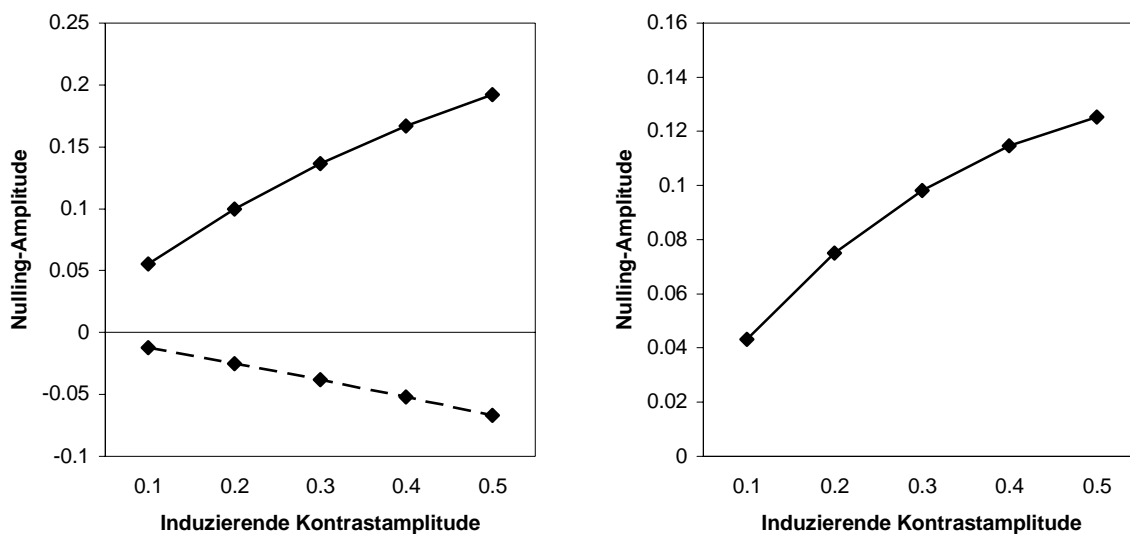
---

<sup>27</sup> Die Datenverläufe im linken Diagramm besitzen erneut unterschiedliche Vorzeichen, die entsprechende Argumentation ist analog zu der für die Variation des mittleren Infeldkontrasts (s.o.).

<sup>28</sup> Die Summe dieser zwei Vorhersagen bezieht sich zunächst wieder auf die wahrgenommenen Helligkeitsänderungen für Infeldfarbe D, aufgrund von Gleichung (16) ist sie jedoch auch hier bis auf den Faktor 2 identisch mit der vorhergesagten Nulling-Amplitude bzgl. der Kontraständerungen.

<sup>29</sup> Die Zahlenwerte sind der Anschaulichkeit halber mittels einer additiven Konstante von -1.2 dem Wertebereich der empirischen Daten angeglichen.

<sup>30</sup> Die Begründung entspricht der für die Beziehung von Leuchtdichte und Kontrast in Gleichung (16).

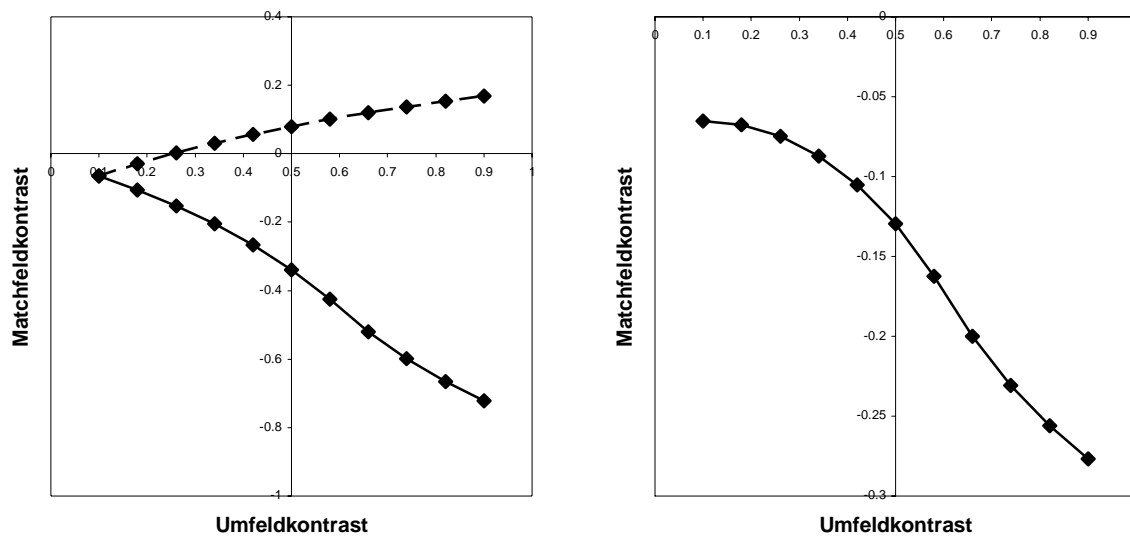


**Abbildung 44.** Vorhersage des Einflusses der induzierenden Umfeldamplitude auf die Nulling-Amplitude: es ist für die induzierende Kontrastamplitude die jeweilige kompensierende Infeldamplitude abgetragen. Auf der linken Seite finden sich die Vorhersagen für die separaten Induktionswirkungen der Umfeldfarben A (unterbrochene Linie) und B (durchgezogene Linie) auf die Infeldfarbe D, auf der rechten Seite ist die aus einer Addition der Einzelinduktionen resultierende Gesamtinduktion dargestellt. Der vorhergesagte negativ beschleunigt wachsende Kurvenverlauf der Gesamtinduktion im rechten Diagramm entspricht recht genau der Form des empirischen Datenverlaufs (vgl. Abb. 25).

Die Vorhersage für die Gesamtinduktion weist nun gerade die für die empirischen Daten beschriebene Asymmetrie auf, und diese ergibt sich erneut aufgrund der binären Reiztextur und ist unabhängig von der genauen Induktionsvorschrift in Gleichung (10).<sup>31</sup> Auch diese Asymmetrie stützt somit die Annahme, die Chubb-Illusion ginge zumindest zu einem Teil auf die vier Farbinduktionseffekte der zwei Umfeld- auf die zwei Infeldanteile zurück. Darüber hinaus stimmt die genaue Form der Vorhersage recht gut mit den empirischen Daten überein, was zusätzlich für die Eignung der gewählten Induktionsbeziehung zur Vorhersage der Farbinduktion spricht.

Die Befunde zur Körnungs- und Orientierungsselektivität lassen sich über das vorgeschlagene Farbinduktionsmodell allerdings nicht erklären. Es ist nicht ersichtlich, warum das Zusammenwirken der vier einzelnen Induktionseffekte zur Modulation des wahrgenommenen Kontrasts zu einem derartigen Einfluss der relativen Körnung und Orientierung der Umfeldtextur führen sollte. Es ist eher davon auszugehen, dass diese Zusammenhänge auf andere Einflüsse zurückgehen. Diesbezüglich hat sich bereits herausgestellt, dass – aufgrund der graduellen Natur des moderierenden Einflusses von Körnung und Orientierung – hierfür eher Adaptation als Farbzerlegung in Frage kommt.

<sup>31</sup> Die Argumentation ist hier analog zu der aus dem vorherigen Abschnitt, in welchem dieselbe Unabhängigkeit der Asymmetrie bzgl. der Vorhersage für eine Variation des relativen Umfeldkontrastmittelwerts begründet ist.



**Abbildung 45.** Vorhersagen für den asymmetrischen Kontrastabgleich durch das Farbinduktionsmodell: es ist für den in 11 Stufen variierten Umfeldkontrast die Leuchtdichte der Matchfeldfarbe  $D$  abgetragen (Benennung wie gehabt). Auf der linken Seite finden sich die Vorhersagen für die Induktionswirkungen von Umfeldfarbe  $C$  (unterbrochene Linie) und  $D$  (durchgezogene Linie), auf der rechten Seite ist die aus einer Addition der Einzelanteile resultierende Gesamtinduktion dargestellt. Die Kurvenform der Gesamtinduktion entspricht qualitativ den empirischen Befunden aus dem Experiment zur statischen Reizdarbietung: es zeigt sich zunächst ein flacherer und anschließend ein steilerer Verlauf der Kontrastinduktion, als es einer zur mittleren Umfeldkontraststufe punktsymmetrischen Kurve entspräche (vgl. Abb. 32, durchgezogene Linie).

### Zusammenfassung.

Bis auf die Befunde zur Körnungs- und Orientierungselektivität der Chubb-Illusion stimmen somit sämtliche Befunde der Diplomarbeit qualitativ mit den Vorhersagen des Farbinduktionsmodells überein. Genauer lassen sich im Vergleich der Vorhersagen mit den entsprechenden empirischen Daten Hinweise finden, welche die Gültigkeit der allgemeinen Modellannahme einerseits und der speziellen Induktionsbeziehung andererseits stützen. Ein substantieller Teil des Kontrastinduktionseffekts scheint somit über die vier Farbinduktionswirkungen der zwei Umfeld- auf die zwei Infeldanteile erklärbar zu sein. Die genaue Vorschrift für die Farbinduktion, also für den Einfluss des Umfelds auf die wahrgenommene Infeldfarbe, beschreibt ferner eine negativ beschleunigt wachsende Kurve (zumindest für den ansteigenden Kurvenast), und stimmt formal mit der Michaelis-Menten-Gleichung überein.

Das vorgeschlagene Modell zur Vorhersage von Kontrastinduktion aufgrund multipler Farbinduktionsvorgänge kommt also mit sehr geringen Voraussetzungen aus: eine Annahme betrifft den Einfluss einer Farbe auf die Wahrnehmung einer zweiten Farbe und eine weitere das genaue Zusam-

menwirken der verschiedenen Farbanteile der vorliegenden Reize. Bei dieser hohen Einfachheit ist das Modell jedoch in der Lage, verschiedene Eigenschaften bisheriger Befunde ziemlich genau abzubilden. Darüber hinaus handelt es sich vor allem um solche Eigenschaften, die bisher nicht (oder nur unzureichend) über alternative theoretische Ansätze erklärt werden konnten. Des weiteren ist interessant, dass die im Modell implementierten Farbwirkungen von Chubb et al. (1989) für die Erklärung des von ihnen gefundenen Effekts von theoretischer Seite ausgeschlossen wurden. Aufgrund der speziellen von ihnen verwendeten Reize ist dieser Ausschluss zwar möglicherweise gerechtfertigt, jedoch hätte Farbinduktion als Erklärungsmodell mit der Verwendung binärer Farbreize wie bei Singer und D’Zmura (1994) wieder aufgegriffen werden müssen. Diese Notwendigkeit wird durch die Vorhersagekraft des Modells mehr als deutlich.

Abschließend muss darauf hingewiesen werden, dass das hier unabhängig entwickelte Farbinduktionsmodell gewisse Ähnlichkeiten mit einem Modell aufweist, welches Spehar, De Bonet und Zaidi für die Helligkeitsinduktion in Bezug auf homogene Infelder formulierten (1996; De Bonet & Zaidi 1997). In wieweit dieses Modell und seine Vorhersagen mit dem Farbinduktionsmodell übereinstimmen muss einer näheren Prüfung unterzogen werden.

### **4.3 Ausblick**

Zahlreiche Befunde deuten darauf hin, dass sich die Chubb-Illusion nicht durch ein einziges Erklärungsprinzip vollständig beschreiben lässt. Die Ergebnisse der Diplomarbeit lassen vermuten, dass zumindest zwei, möglicherweise sogar drei verschiedene Anteile des Effekts existieren, die sich in der beobachteten Kontrastinduktion überlagern. Des weiteren existieren Hinweise dass die Ausprägung der einzelnen Effekttanteile möglicherweise stark von der speziellen Wahl der Reize abhängt. Beispielsweise tritt Farbinduktion möglicherweise nur dann auf, wenn keine permanent neu generierten Zufallspunktmuster, sondern Reize mit einer zeitlich stabilen Textur gewählt werden. Für ein genaueres Verständnis und eine Vorhersage der Chubb-Illusion ist es demnach unumgänglich die Ausprägung der unterschiedlichen Effekttanteile bei Verwendung der verschiedenen Reize zu untersuchen. Darüber hinaus wäre es interessant die genauen Bedingungen zu kennen, die für das Auftreten der einzelnen Effekttanteile der Chubb-Illusion entscheidend sind.

Schließlich ist weitgehend ungeklärt, welchen adaptiven Wert – im Sinne einer funktionalen Bedeutung – eine Kontrastinduktion für das menschliche Sehsystem besitzt. Der einzige untersuchte Erklärungsansatz, der teilweise auf einer funktionalen Ebene beschreibbar ist, stellt Kontrastinduktion in den Kontext von Farbinduktion. Und auch hier wird bislang nicht hinreichend deutlich, aus welchem Grund sich das Perzept einer transparenten Überdeckung in Form der Chubb-Illusion auf den

Wahrnehmungseindruck auswirken sollte. Im Rahmen des Farbzerlegungsansatzes wird lediglich die Vermutung geäußert, der über dem Infeld gesehene Filter (in der inkrementellen Situation) stehe perceptuell gewissermaßen im Vordergrund, sodass die Beurteilung des Infeldkontrasts in Richtung der als homogen wahrgenommene Filterfläche beeinflusst wird. Möglicherweise stellt eine funktionale Herangehensweise auch einen vielversprechenderen Versuch dar, die Relationen von verwendetem Reizmaterial und den unterschiedlichen Einzelbeiträgen zur Chubb-Illusion aufzuklären.

## LITERATUR

- CHUBB, C., SPERLING, G. & SOLOMON, J. (1989). Texture interactions determine perceived contrast. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 9631-9635.
- COLANTONI, P., D'ZMURA, M., KNOBLAUCH, K. & LAGET, B. (1997). Detection of color transparency. In Rogowitz, B. & Allenbach, J. (Eds.) *Human Vision and Electronic Imaging II*, 3016, 360-368.
- D'ZMURA, M. & SINGER, B. (1996). The spatial pooling of contrast in contrast gain control. *Journal of the Optical Society of America*, 13, 2135-2140.
- D'ZMURA, M. & SINGER, B. (1999). Contrast gain control. In Sharpe, L. T. & Gegenfurtner, K. R. (Eds.) *Color Vision: From Genes to Perception* (pp. 369-385). Cambridge: Cambridge University Press.
- DE BONET, J. S. & ZAIDI, Q. (1997). Comparison between spatial interactions in perceived contrast and perceived brightness. *Vision Research*, 37, 1141-1155.
- EKROLL, V., FAUL, F. & NIEDERÉE, R. (2004). The peculiar nature of simultaneous colour contrast in uniform surrounds. *Vision Research*, 44, 1765-1786.
- EKROLL, V., FAUL, F., NIEDERÉE, R. & RICHTER, E. (2002). The natural centre of chromaticity space is not always achromatic: A new look at colour induction. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99, 13352-13356.
- FECHNER, G. T. (1860). *Elemente der Psychophysik*. Leipzig: Breitkopf und Härtel.
- GERBINO, W., STULTIENS, C., TROOST, J. & DE WEERT, C. (1990). Transparent layer constancy. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 3-20.
- GILCHRIST, A. L. (1977). Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement. *Science*, 195, 185-187.
- GROSSBERG, S. & MINGOLLA, E. (1985). Neural dynamics of perceptual grouping: Boundary completion, illusory figures, and neon color spreading. *Psychological Review*, 92, 173--211.
- HEIDER, G. M. (1933). New studies in transparency, form and color. *Psychologische Forschung*, 17, 13-56.
- KOFFKA, K. (1935). *Principles of Gestalt psychology*. London: Kegan, Paul, Trench & Trubner.

- LOTTO, R. B. & PURVES, D. (2001). An Empirical Explanation of the Chubb Illusion. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 13, 547-555.
- MACH, E. (1865). Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut. *Akademie der Wissenschaften, Wien, mathematisch- naturwissenschaftliche Klasse*, 52, 303-322.
- METELLI, F. (1970). An algebraic development of the theory of perceptual transparency. *Ergonomics*, 13, 59-66.
- METELLI, F. (1974). The perception of transparency. *Scientific American*, 230, 90-98.
- MICHAELIS, L. & MENTEN, M. L. (1913). Die Kinetik der Invertinwirkung. *Biochemische Zeitung*, 49, 333-369.
- POKORNY, J. & SMITH, V. C. (1997). Psychophysical signatures associated with magnocellular and parvocellular pathway contrast gain. *Journal of the Optical Society of America*, 14, 2477-2486.
- SINGER, B. & D'ZMURA, M. (1994). Color contrast induction. *Vision Research*, 34, 3111-3126.
- SINGER, B. & D'ZMURA, M. (1995). Contrast gain control. A bilinear model for chromatic selectivity. *Journal of the Optical Society of America*, 12, 667-685.
- SINGH, M. & ANDERSON, B. (2002). Toward a perceptual theory of transparency. *Psychological Review*, 109, 492-519.
- SOLOMON, J. A., SPERLING, G. & CHUBB, C. (1993). The lateral inhibition of perceived contrast is indifferent to on-center/off-center segregation, but specific to orientation. *Vision Research*, 33, 2671-2683.
- SPEHAR, B., DE BONET, J. S. & ZAIDI, Q. (1996) Brightness Induction from Uniform and Complex Surrounds: A General Model. *Vision Research*, 36, 1893-1906.
- TAKASAKI, H. (1966). Lightness change of grays induced by change in reflectance of gray background. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 504-512.
- TALBOT, H. F. (1834). Experiments on light. *Philosophical Magazine*, 5, 321-334.
- WYSZECKI, G. & STILES, W. S. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. New York: Wiley.
- XING, J. & HEEGER, D. J. (2001). Measurement and modeling of center-surround suppression and enhancement. *Vision Research*, 41, 571-583.

## ANHANG

### *A. MATLAB-Skript zur Erzeugung binärer Farbreize*

```
% Erzeugt ein binary random noise pattern
% wie in Singer & D'Zmura 94 beschrieben.

%% Zufallswerte für das Phasenspektrum
% "random phase spectrum"
rand('state',sum(100*clock));
phase = (rand(512,512)-0.5)*pi*2;
mi = min(min(phase))
mx = max(max(phase))
figure(1);
clf;
imshow(phase);

% Differenz zweier Normalverteilungen als Amplitudenspektrum
% "difference of gaussian amplitude"
amp = ones(512,512);
scale = 1.0;           % Skalierungsfaktor für "Ortsfrequenz"
name = 's1_00';
s1 = 1.875/8*scale;
s2 = 0.625/8*scale;
for i=1:size(amp,1)
    for j=1:size(amp,2)
        dv = [i-256 j-256]/256*4;
        dl = norm(dv);
        vp = exp(-dl.^2 / (2*s1.^2));
        vm = exp(-dl.^2 / (2*s2.^2));
        amp(i,j) = vp - vm;
    end
end
figure(2);
clf;
imshow(amp);

% Kombination von Phasen- und Amplitudenspektrum in
% komplexe Fouriertransformierte
res = amp .* complex(cos(phase),sin(phase));

% Inverse Fouriertransformation
ns = abs(ifft2(res));
```

```

%% Wert in der Nähe des Mittelwerts ist Weiß/Schwarzschwelle.
% Der genaue Wert wird so bestimmt, daß Weiß- und Schwarzanteile
% gleich groß sind
avg = mean(mean(ns))
thres = avg*0.935;
ri = im2bw(ns,thres);
figure(3);
clf;
imshow(ri);

% Ortsfrequenz und Weiß/Schwarz-Anteil ermitteln
nbwg = [];
sumw = 0;
for i=1:size(ri,1)
    nbw = 0;
    sumw = sumw+ ri(i,1);
    for j=2:size(ri,2)
        sumw = sumw + ri(i,j);
        if ri(i,j) ~= ri(i,j-1), nbw = nbw+1, end
    end
    nbwg = [nbwg nbw];
end
mean(nbwg)
sumw / (size(ri,1)*size(ri,2))

%% Bild speichern
dlmwrite([name '.res'],ri, ' ')

```

## ***B. MATLAB-Skript zur Erzeugung orientierter binärer Farbreize***

```

% Erzeugt ein orientiertes binary random noise pattern
% wie in Singer & D'Zmura 94 beschrieben.

%% Zufallswerte für das Phasenspektrum
% "random phase spectrum"
phase = (rand(512,512)-0.5)*pi*2;
mi = min(min(phase))
mx = max(max(phase))
figure(1);
clf;
imshow(phase);

%% Differenz zweier Normalverteilungen als Amplitudenspektrum
% "difference of gaussian amplitude"
for mo=0:30:150

    as1 = 15                % Startwinkel 1. Sektor
    ae1 = 180-15;          % Endwinkel 1. Sektor

```

```

as2 = 180+15;           % Startwinkel 2. Sektor
ae2 = 360-15;         % Endwinkel 2. Sektor

% Blende Amplitudenspektrum außerhalb des gewählten Sektors aus
% (Werte werden auf Null gesetzt)
amp = ones(512,512);
s1 = 1.875/8;
s2 = 0.625/8;
for i=1:size(amp,1)
    for j=1:size(amp,2)
        dv = [i-256 j-256]/256*4;
        a = rad2deg(atan2(dv(2),dv(1)))-mo;
        if (a < 0)
            a = 180+(180+a);
        end
        if (a > as1 && a < ae1 ) || (a > as2 && a < ae2)
            amp(i,j) = 0;
        else
            dl = norm(dv);
            vp = exp(-dl.^2 / (2*s1.^2));
            vm = exp(-dl.^2 / (2*s2.^2));
            amp(i,j) = vp - vm;
        end
    end
end
figure(2);
clf;
imshow(amp);

%% Kombination von Phasen- und Amplitudenspektrum in
% komplexe Fouriertransformierte
res = amp .* complex(cos(phase),sin(phase));

%% inverse fourier transform on res
ns = abs(ifft2(res));
avg = mean(mean(ns))
thres = avg;
ri = im2bw(ns,thres);
figure(3);
clf;
imshow(ri);

%% save image
nam = ['stimmat_' int2str(mo) '.res'];
dlmwrite(nam,ri, ' ');
end

```

## **ERKLÄRUNGEN**

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbständig verfasst und keine als die angegebenen Hilfsmittel verwandt habe.

Mit der Einstellung dieser Arbeit in die Fachbibliothek des Instituts für Psychologie der CAU bin ich einverstanden.

---

(Datum, Unterschrift)