

**Quantitative Untersuchungen
zur Wahrnehmung und Verarbeitung
von Körperschatten**

Dissertation

Zur Erlangung des Grades

„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich Biologie

der Johannes Gutenberg-Universität

in Mainz

Thomas Sollich

geboren in Worms

Mainz, 2001

INHALTVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	3
1.1. Die Objektkonstanz bei variabler Beleuchtung	3
1.2. Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingte Helligkeit	4
1.3. Die Quantifizierung der beiden Wahrnehmungsaspekte	5
1.4. Verschiedene Formulierungen des Phänomens Helligkeitskonstanzleistung.....	7
1.5. Die Wahrnehmungen von Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingter Helligkeit im Vergleich.	8
1.6. Fragestellung der vorliegenden Arbeit	9
2. MATERIAL UND METHODE.....	13
2.1. Das Versuchsobjekt.....	13
2.1.1. Die Remissionsgrade der verwendeten Graupapiere.....	14
2.1.2. Der Versuchsaufbau.....	17
2.1.3. Einstellung und Messung der Beleuchtungsverhältnisse.....	19
2.2. Die Aufgabe der Versuchspersonen.....	21
2.3. Das Versuchsobjekt als Modell für den Allgemeinfall.....	22
2.4. Der Schwierigkeitsgrad verschiedener Anordnungen.....	24
2.4.1. Die Quantifizierung der Stimuli durch Kendall's τ	26
2.4.2. Die Quantitative Beschreibung der Wahrnehmungsleistung.....	27
2.4.3. Die Bedeutung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_{ij}	29
2.4.4. Die Bedeutung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_{ia}	29
2.4.5. Einschränkungen durch die Verwendung von Kendall's τ	30
2.5. Die Unterteilung der verschiedenen Anordnungen in Permutationsgruppen.....	33
2.5.1. Die 20 Permutationsgruppen und ihre Rangkorrelationskoeffizienten	34
2.6. Globales und lokales Streulicht	38
2.6.1. Der durch lokales Streulicht bedingte kritische Fall	43
2.6.2. Die Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} und τ_{0b}	45

3. ERGEBNISSE	48
3.1. Experiment 1: Helligkeitskonstanzleistung bei verschiedenen Anordnungen der Graupapiere.....	48
3.2. Experiment 2: Helligkeitskonstanzleistung im invertierten Betrachtungsmodus.....	65
3.3. Experiment 3: Helligkeitskonstanzleistung nach Ausblenden der 3-D-Information.....	76
3.4. Experiment 4: Helligkeitskonstanzleistung bei variablem Streulichteinfluß.....	77
4. DISKUSSION	86
4.1. Die Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit ist abhängig von der räumlichen Interpretation.....	86
4.1.1. Die Helligkeitskonstanzleistung versagt bei Inversion vollständig.....	90
4.1.2. Inversion und Ausblenden der räumlichen Information führen zu identischen Ergebnissen.....	91
4.1.3. Vergleich der neuen und der bisherigen Interpretation des Inversionsphänomens	92
4.2. Der Einfluß der Licht/Schatten-Wechsel auf die Helligkeitskonstanzleistung.....	95
4.3. Der Einfluß des lokalen Streulichts auf die Helligkeitskonstanzleistung.....	98
4.4. Der Einfluß der Kontrastkanten auf die Helligkeitskonstanzleistung.....	100
4.5. Ausblick	103
5. ZUSAMMENFASSUNG	107
6. ANHANG	109
6.1. Die Rangkorrelationskoeffizienten von Experiment 1 für die dunklen Graupapiere.....	109
6.2. Die Rangkorrelationskoeffizienten von Experiment 1 für die hellen Graupapiere.....	110
6.3. Das Verfahren zur Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten τ nach Kendall & Gibbons	111
6.4. Mögliche Leuchtdichtezunahmen bei den 20 Permutationsgruppen	113
6.5. Formale Beschreibung des nichtlinearen Streulichteffekts.....	123
6.6. MATHEMATICA-Arbeitsblatt zur Berechnung der 720 Permutationen und den entsprechenden Rangkorrelationskoeffizienten	125
7. LITERATUR	126

1. Einleitung

1.1. Die Objektkonstanz bei variabler Beleuchtung

Die Gegenstände unserer Umwelt sind den unterschiedlichsten Beleuchtungsverhältnissen ausgesetzt. Wenn sich die Beleuchtungssituation verändert, dann stellt ein identisches Objekt für unser visuelles System eine entsprechend veränderte Reizsituation dar. Dennoch ist die visuelle Wahrnehmung von Objekten weitgehend unabhängig von der Beleuchtungssituation. Beispielsweise wird ein weißer Gegenstand sowohl im gelblichen Licht einer Kerze, unter dem bläulichen Licht eines wolkenlosen Mittagshimmels als auch bei Abendrot als weiß wahrgenommen, obwohl sich die jeweiligen physikalischen Reize für das visuelle System deutlich voneinander unterscheiden. Die verschiedenen spektralen Strahlungsleistungsverteilungen der Lichtquellen werden hierzu in geeigneter Weise verarbeitet um zu ermöglichen, daß die Wahrnehmung der Körperfarben vom Beleuchtungsspektrum unabhängig ist. Dieses Phänomen wird als Farbkonstanzleistung bezeichnet (JAENSCH, 1921; GRAHAM & BROWN, 1965). Ein Objekt kann nur dann sicher identifiziert werden, wenn die Wahrnehmung von Objekteigenschaften wie Farbe oder auch Oberflächenhelligkeit invariant gegenüber den Änderungen der Beleuchtungsverhältnisse ist. Diese sogenannte „Objektkonstanz bei variabler Beleuchtung“ (v. CAMPENHAUSEN, 1993) ist eine herausragende Leistung unseres visuellen Systems, die maßgeblich auf corticale Prozesse zurückzuführen ist.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Wahrnehmung und Verarbeitung von Körperschatten, einem achromatischen Teilaspekt der Objektkonstanz bei variabler Beleuchtung. Man unterscheidet zwischen den sog. Schlagschatten und den Körperschatten. Der Schlagschatten ergibt sich als die Projektion eines Gegenstandes durch die Lichtquelle auf den Untergrund (1), der Körperschatten hingegen entsteht auf den Bereichen des Objekts, welche der Lichtquelle abgewandt sind (2) (siehe Abbildung 1). Der Körperschatten ergibt sich auf dem Gegenstand selbst und wird daher auch als Eigenschatten oder als Selbstschatten bezeichnet.

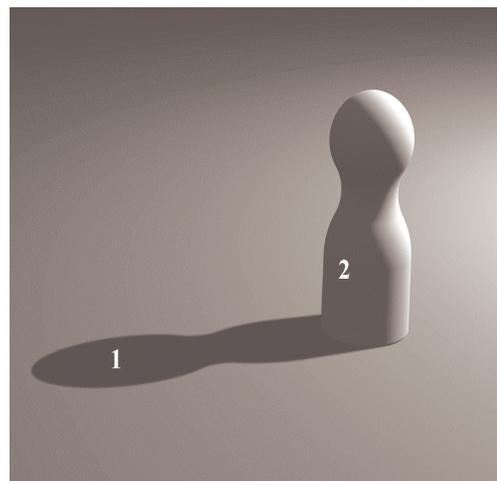


Abbildung.1: Schlag- und Körperschatten.

Das visuelle System des Menschen besitzt die Fähigkeit in den meisten Situationen sowohl die Schlag- als auch die Körperschatten als Folge der Beleuchtungsverhältnisse zu erkennen. Insbesondere wird die geringere Helligkeit im Bereich des Körperschattens in der Regel nicht als Oberflächeneigenschaft des Gegenstandes sondern als beleuchtungsbedingt beurteilt.

Das folgende Beispiel soll dieses Phänomen verdeutlichen: Ein Körper mit einheitlich grau gefärbter Oberfläche wird auch dann als einheitlich grau wahrgenommen, wenn die beleuchtete Seite des Körpers ein Vielfaches der Lichtmenge der Schattenseite remittiert. Dies ist bei den Falten eines einfarbigen Hemdes leicht nachvollziehbar. Obwohl die Schatten in den Falten wesentlich dunklere Bereiche auf der Oberfläche verursachen, wird das Hemd nicht als gefleckt sondern als einfarbig erkannt (v. CAMPENHAUSEN 1993). Die invariante Beurteilung der Remissionseigenschaften von Oberflächen trotz lokaler Beleuchtungsvariationen ist ein Teilaspekt der sogenannten Oberflächenhelligkeitskonstanzleistung des visuellen Systems. Diese wird im folgenden kurz als Helligkeitskonstanzleistung bezeichnet.

Im Rahmen der hier vorliegenden Untersuchungen werden Bedingungen erzeugt, bei denen Körperschatten zu Wahrnehmungstäuschungen führen. Wird beispielsweise der Helligkeitsunterschied zwischen Licht- und Schattenseite zu groß, versagt die Helligkeitskonstanzleistung. Dadurch kann quantitativ beschrieben werden, innerhalb welcher Grenzen unser visuelles System die Remissionseigenschaften von Oberflächen richtig beurteilt.

1.2. Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingte Helligkeit

Eine differenzierte Darstellung des Begriffs *Helligkeit* ist Voraussetzung für alle folgenden Ausführungen. Helligkeit bezeichnet eine subjektive Wahrnehmung und ist demzufolge keine objektive, physikalisch meßbare Größe. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Aspekten der Wahrnehmungsqualität *Helligkeit*, der sog. *Oberflächenhelligkeit* und der *beleuchtungsbedingten Helligkeit*.

- Die *Oberflächenhelligkeit* beschreibt die Wahrnehmung einer konstanten Objekteigenschaft, hervorgerufen durch die Remissionseigenschaften der entsprechenden Objektflächen. Dabei beurteilt ein Beobachter, ob eine Oberfläche als schwarz, weiß oder in einem bestimmten Grauton wahrgenommen wird. Der Begriff *relative Helligkeit* wird synonym verwendet, da verschiedene Oberflächen vergleichend bewertet werden.

- Die *beleuchtungsbedingte Helligkeit* beschreibt die von der jeweiligen Beleuchtungssituation abhängige und daher variable Wahrnehmung der Objektoberfläche. Hier trifft der Beobachter ein Urteil über die Lichtintensität, mit der eine Oberfläche beleuchtet wird. Die *beleuchtungsbedingte Helligkeit* wird auch als *absolute Helligkeit* bezeichnet.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Aspekten der Wahrnehmungsqualität Helligkeit kann meistens nur aus dem vorliegenden Kontext erschlossen werden. Einfacher ist diese Unterscheidung im anglo-amerikanischen Sprachgebrauch. Hier werden die Begriffe *lightness* für Oberflächenhelligkeit und *brightness* für die beleuchtungsbedingte Helligkeit verwendet (WYSZEKI & STILES, 1982).

1.3. Die Quantifizierung der beiden Wahrnehmungsaspekte

Nach der Differenzierung des Überbegriffs *Helligkeit* soll nun die Quantifizierung der beiden Wahrnehmungsaspekte erläutert werden. Diese Quantifizierung ist eine Voraussetzung für die quantitative Beschreibung der Helligkeitskonstanzleistung bei Körperschatten.

Die subjektive Wahrnehmung wird mit objektiv bestimmbar physikalischen Meßgrößen in Verbindung gebracht. Hierzu werden der *Remissionsgrad* und die *Leuchtdichte* der betrachteten Oberflächen verwendet (WISHART et al. 1997). Dies wird in den folgenden Erläuterungen genauer dargestellt:

Die Oberflächenhelligkeit korreliert mit dem Remissionsgrad (engl.: *reflectance*) dieser Oberfläche und wird daher mit dessen Hilfe quantifiziert. Die in der Praxis möglichen Werte von Remissionsgraden liegen zwischen einem minimalen Wert von ca. 0,03 und einem Maximalwert von 1,0. Es handelt sich hierbei um relative Angaben, die durch den Vergleich mit einer standardisierten Oberfläche entstehen. In der Regel wird ein sog. MgO-Standard verwendet, dieser erhält per Definition den Wert 1,0. Das bedeutet, daß 100% der einfallenden Lichtmenge reflektiert werden. Eine subjektiv als tiefschwarz wahrgenommene Oberfläche besitzt einen Remissionsgrad von etwa 0,05, ein als weiß wahrgenommenes Papier hat einen Remissionsgrad zwischen 0,8 und 0,9.

Man stellt fest, daß eine Oberfläche mit einem höheren Remissionsgrad als eine Vergleichsfläche, die benachbart unter identischen Beleuchtungsbedingungen liegt, auch als heller wahrgenommen wird.

Voraussetzung hierfür ist jedoch einerseits, daß die Differenz der Remissionsgrade oberhalb der Unterscheidungsschwelle liegt. Weiterhin müssen die beiden Flächen vor identischem Hintergrund präsentiert werden, um den Einfluß des sog. Simultankontrasts klein zu halten. Dieser hat zur Folge, daß zwei identische Graupapiere verschieden hell erscheinen, wenn sie sich vor unterschiedlichen Hintergründen befinden.

Zu beachten ist darüber hinaus, daß ein linearer Zuwachs des Remissionsgrades nicht zu einer linearen Zunahme der wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit führt. Dies ist jedoch aufgrund der Übertragungseigenschaften des visuellen Systems - näherungsweise beschrieben durch das Weber-Fechner-Gesetz¹ - auch zu erwarten. Dieses Gesetz sagt aus, daß die Empfindungsintensität proportional zum Logarithmus der Reizintensität ist (FECHNER 1877).

Als physikalische Meßgröße zur Quantifizierung der beleuchtungsbedingten Helligkeit wird die Leuchtdichte (engl.: *luminance*) verwendet. Die Leuchtdichte wird mit Hilfe eines Photometers bestimmt und in cd/m^2 angegeben. Dabei ist es besonders praktisch für die Messung, daß die Leuchtdichte bei großflächigen Objekten unabhängig vom Abstand zwischen Meßobjekt und Meßgerät ist. Die Lichtintensität I_L hingegen wird bei größer werdendem Abstand von der zu messenden Oberfläche kleiner² und ist daher weniger geeignet.

Werden zwei Objekte, deren Oberflächen einen identischen Remissionsgrad besitzen, mit ausreichend unterschiedlichen Lichtintensitäten beleuchtet, dann besitzt das stärker beleuchtete Objekt eine entsprechend höhere Leuchtdichte und wird auch als heller wahrgenommen.

Ein anglo-amerikanischer Beobachter würde die stärker beleuchtete Oberfläche als *brighter* bezeichnen, während eine Fläche mit wahrnehmbar höherem Remissionsgrad als *lighter* bezeichnet wird. Auch diese im englischen vorgenommene Differenzierung des Adjektivs *heller* durch die Begriffe *lighter* und *brighter* fehlt unserem Sprachgebrauch.

Die resultierende Leuchtdichte einer Oberfläche und damit auch die beleuchtungsbedingte Helligkeit ist von vielen Parametern abhängig. Zunächst ist der Remissionsgrad der Oberfläche von Bedeutung.

¹ Das Weber-Fechner-Gesetz beschreibt den formalen Zusammenhang zwischen der Empfindungsintensität bzw. Erregung E eines reizperzipierenden Systems und der Reizintensität I .

Es gilt: $E = k * \log I + C$, k und C sind hierbei Konstanten.

² Bei punktförmigen Lichtquellen gilt $I_L \sim 1/r^2$, die Intensität nimmt mit dem Kehrwert des Abstandsquadrates ab.

Die Intensität der Lichtquelle, die das Objekt beleuchtet, ist die Einflußgröße, welche weitaus größere Auswirkungen auf die Leuchtdichte haben kann als der Remissionsgrad. Während dieser bei einer als weiß wahrgenommenen Oberfläche höchstens dreißig mal höher sein kann als der einer schwarzen (0,9 zu 0,03), sind Änderungen der Lichtintensitäten um das tausendfache leicht möglich. Der Intensitätsunterschied zwischen Sonnenlicht und Mondschein ist noch wesentlich größer. Weiterhin ist auch der Abstand zwischen der Lichtquelle und dem Objekt mitbestimmend, da die Lichtintensität mit zunehmendem Abstand von der Lichtquelle stark abnimmt (s. o.).

Darüber hinaus hat auch noch die räumliche Abstrahlcharakteristik der Oberfläche Einfluß. Nur wenige Oberflächen besitzen die ideale Abstrahlcharakteristik eines sog. Lambert-Strahlers. In diesem Fall ist die gemessene Leuchtdichte unabhängig vom Winkel zwischen Betrachtungsrichtung und der Oberflächennormalen. Die Intensität des remittierten Lichtes ist hier zwar proportional zum Cosinus des beschriebenen Winkels, die Projektion der zu messenden Oberfläche auf die Detektorfläche eines Leuchtdichtemeßgerätes verhält sich derart, daß dies gerade ausgeglichen wird. Daher führen bei einem Lambert-Strahler Änderungen des Betrachtungswinkels nicht zu Änderungen der Leuchtdichte. Demzufolge ist in diesem Idealfall auch die wahrgenommene beleuchtungsbedingte Helligkeit unabhängig vom Betrachtungswinkel.

Diese Überlegung hat verdeutlicht, daß die Leuchtdichte einer Oberfläche durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt wird. Daher ist ein Rückschluß von der jeweiligen Leuchtdichte auf den entsprechenden Remissionsgrad im Prinzip nur bei Kenntnis aller Parameter möglich. Daraus kann man schließen, daß das visuelle System für die Bewertung der Oberflächenhelligkeit eine vergleichbar komplexe Strategie entwickeln mußte, um die beobachtete Konstanzleistung zu ermöglichen.

1.4. Verschiedene Formulierungen des Phänomens Helligkeitskonstanzleistung

Die Helligkeitskonstanzleistung soll nun in einer ersten Formulierung mit Hilfe der gewählten physikalischen Meßgrößen für zwei Objekte mit unterschiedlichem Remissionsgrad beschrieben werden:

Unser visuelles System kann zwei Objekte mit wahrnehmbar (d.h. überschwellig) verschiedenem Remissionsgrad derart beurteilen, daß die Oberfläche mit dem höheren Remissionsgrad auch dann noch als heller (*lighter*) erkannt wird, wenn die Fläche mit dem geringeren Remissionsgrad aufgrund der Beleuchtungsbedingungen eine deutlich höhere Leuchtdichte besitzt.

Diese Formulierung ist bewußt auf die Fragestellung und die Methode der vorliegenden Arbeit zugeschnitten. Sie steht jedoch in Einklang mit derjenigen von WYSZECKI (1986): „When the illuminance level on the entire display of test and inducing fields, as well as the background, is changed (either increased or decreased), the observer perceives a corresponding change (increase or decrease) in *brightness* (more or less light appears to be emitted from the different fields of the display), but the *lightness* of the test field appears to be approximately the same“ Hier wird bereits herausgestellt, daß der Beobachter die veränderte *brightness* wahrnimmt, auch wenn die *lightness* konstant erscheint.

WALLACH (1976) liefert eine allgemein gültige Definition des Begriffs Konstanzleistung:

„The term constancy refers to a situation, where a perceived quality or property is in better correspondence with a property of the physical object than with the stimulus variable by which the physical property is represented.“

Diese Definition ist selbstverständlich auf die Helligkeitskonstanzleistung übertragbar. Dabei wird verdeutlicht, daß die Konstanzleistung durch das Erkennen der Objekteigenschaft Remissionsgrad bestimmt wird. Die Leuchtdichte hingegen stellt hier nur die physikalische Reizgröße dar, welche zwar von der Oberfläche vermittelt wird, jedoch in großem Ausmaß variabel ist.

1.5. Die Wahrnehmungen von Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingter Helligkeit im Vergleich.

Bereits EVANS (1974) beschrieb, daß die Wahrnehmungen von Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingter Helligkeit simultan verfügbar sind. Die Schatten, die z.B. durch die Falten in einem Vorhang entstehen, werden selbstverständlich wahrgenommen, auch wenn wir diesen als einfarbig erkennen.

Damit wird deutlich, daß bei allen Experimenten zur Helligkeitskonstanzleistung die Instruktion der Versuchspersonen als besonders kritischer Punkt zu beachten ist. Welche der beiden Wahrnehmungsleistungen ist jedoch als die anspruchsvollere einzustufen?

Man kann voraussetzen, daß die Bewertung der beleuchtungsbedingten Helligkeit im Gegensatz zur Bewertung der Oberflächenhelligkeit vergleichsweise einfach ist. Dies begründet sich folgendermaßen:

Bei der Abbildung eines Objektes auf der Retina werden den Objektbereichen, bei denen die höchste Reizintensität für die beleuchteten Photorezeptoren vorliegt, die entsprechend größte beleuchtungsbedingte Helligkeit zuordnet. Effekte wie der bereits erwähnte simultane Helligkeitskontrast sollen hier vernachlässigt werden. Die Bewertung der beleuchtungsbedingten Helligkeit korreliert demzufolge weitgehend mit der größten sensorischen Eingangsintensität.

Die Prozesse der Informationsverarbeitung im visuellen System auf retinaler Ebene sowie auch in höheren Arealen des visuellen Cortex, die eine gute Leistung bei der Wahrnehmung der beleuchtungsbedingten Helligkeit ermöglichen, sind sicherlich bereits als komplex zu bewerten. Die Verarbeitungsprozesse, die zu einer guten Leistung bei der Beurteilung von Oberflächenhelligkeiten unter inhomogenen oder variablen Beleuchtungsbedingungen führen, müssen jedoch als wesentlich komplexer angenommen werden. Voraussetzungen für diese Leistung sind die Wahrnehmung der Beleuchtungsbedingungen, die Beurteilung der Wechselwirkung zwischen den Lichtquellen und der dreidimensionalen Struktur der Objekte, die Einschätzung der Oberflächenbeschaffenheit und Berücksichtigung möglicher wechselseitiger Beleuchtung benachbarter Oberflächen. Die invariante Beurteilung von Oberflächenhelligkeiten ist daher zwar auch auf sensorische, jedoch entscheidend auf komplexe corticale Prozesse zurückzuführen. Die Oberflächenhelligkeitskonstanzleistung ist demzufolge sicherlich eine anspruchsvollere Aufgabe als die Wahrnehmung der beleuchtungsbedingten Helligkeit

1.6. Fragestellung der vorliegenden Arbeit

Das Ziel der durchgeführten Untersuchungen war zunächst eine quantitative Beschreibung der Helligkeitskonstanzleistung bei Körperschatten des visuellen Systems des Menschen. Hierbei sollte bestimmt werden, inwieweit die Versuchspersonen in der Lage waren, die Remissions-

grade verschiedener Oberflächen trotz der vorhandenen Körperschatten fehlerfrei zu beurteilen.

Dies nimmt Bezug auf die erste Formulierung der Helligkeitskonstanzleistung in Abschnitt 1.4.. Wann wird einer Oberfläche höheren Remissionsgrades die geringere Oberflächenhelligkeit zugeordnet, weil sich diese Fläche im Bereich des Körperschattens befindet? Wie müssen die Reizsituationen variiert werden, damit dies zu einer Veränderung der Wahrnehmung führt? Mit anderen Worten, wann führen die aus der jeweiligen Reizsituation resultierenden, beleuchtungsbedingten Helligkeiten zu fehlerhaften Beurteilungen der Oberflächenhelligkeiten?

Insbesondere war jedoch von Interesse, inwieweit die Information über die räumliche Orientierung der betrachteten Objektoberflächen, also die Wahrnehmung der dreidimensionalen Struktur von Objekten (3-D-Wahrnehmung), die Beurteilung der Oberflächenhelligkeit beeinflusst. Daß hier ein Einfluß vorhanden ist, wurde unter anderem in den Arbeiten von ADELSON (1993), BERGSTRÖM (1977), GILCHRIST (1977), KNILL & KERSTEN (1991), LOGVINENKO & MENSHIKOVA (1994), SCHIRILLO et al. (1990) und WISHART et al. (1997) gezeigt. Eine umfassendere Zusammenstellung entsprechender Arbeiten befindet sich im ersten Abschnitt der Diskussion. Bis heute war jedoch noch keine quantitative Untersuchung des Zusammenhangs von 3-D-Wahrnehmung und der Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit gelungen, die eine zufriedenstellende Begründung dieser wechselseitigen Beeinflussung ermöglichte. Die Gründe hierfür sind unterschiedlich und werden in der Diskussion umfassend dargestellt.

Die Relevanz der Information über die räumliche Struktur für die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit wird in besonderem Ausmaß bei der räumlichen Inversion der betrachteten Objekte deutlich. Das Invertieren der räumlichen Tiefe ist bei sog. ambivalenten Objekten möglich. Man bezeichnet diese Objekte als ambivalent, da zwei verschiedene Betrachtungsmodi möglich sind. Der Wechsel des Betrachtungsmodus ist sehr leicht bei zweidimensionalen Abbildungen von ambivalenten Objekten durchzuführen. In der veränderten Perspektive erscheinen die zuvor als entfernter interpretierten Objektbereiche in den Vordergrund gerückt. In Abbildung 2 auf der folgenden Seite werden zwei Beispiele für ambivalente Objekte gezeigt.

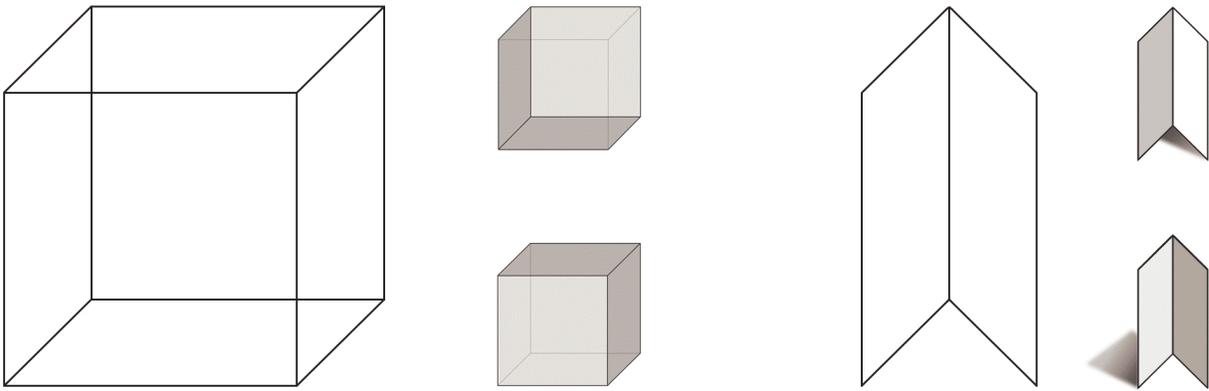


Abb. 2: Ambivalente Objekte: links: Necker Würfel rechts: ambivalente Dach-Figur

Beim Necker Würfel können beide Quadrate der Abbildung als vordere Fläche eines Würfels interpretiert werden. Der wahrgenommene Würfel verändert bei geänderter Interpretation seine scheinbare Orientierung im Raum. Dies soll mit Hilfe der beiden kleinen Würfel verdeutlicht werden.

Die ambivalente Dach-Figur kann als liegend interpretiert, jedoch auch vergleichbar einem aufrecht stehenden, geöffneten Buch wahrgenommen werden. Die zwei möglichen räumlichen Interpretationen werden durch die Schlagschatten angedeutet.

Auch bei realen, dreidimensionalen Objekten ist dieser Perspektivenwechsel möglich, jedoch schwieriger, da aufgrund der Querdiparität³ der beiden retinalen Abbildungen die tatsächliche räumliche Orientierung des Objektes favorisiert wird. Erleichtert wird der Wechsel des Betrachtungsmodus durch monokulares Betrachten des Objektes oder durch eine leicht unscharfe Abbildung des Objektes auf der Retina. Im Gegensatz zu zweidimensionalen Abbildungen kann bei dreidimensionalen Objekten zwischen dem der Realität entsprechenden, normalen Betrachtungsmodus und dem invertierten Betrachtungsmodus unterschieden werden.

Bei der Inversion geeigneter dreidimensionaler Objekte verändert sich die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit derart, daß die tatsächliche Schattenseite plötzlich dunkler erscheint, insbesondere wird jedoch die stärker beleuchtete Objektseite nun als wesentlich heller wahrgenommen. Diese Veränderung erscheint nach v. CAMPENHAUSEN (1993) unter geeigneten

³ Querdiparität ist der Abstandsunterschied korrespondierender Netzhautareale. Sie entsteht durch die unterschiedliche Abbildung eines Objekts auf beiden Retinae, denn die beiden Augen betrachten das Objekt unter verschiedenem Blickwinkel.

Umständen nahezu dramatisch, bis hin zum scheinbaren Selbstleuchten. In den durchgeführten Versuchen zeigt sich, daß das Inversionsphänomen auch Konsequenzen für die Güte der Helligkeitskonstanzleistung hat. Die räumliche Inversion ist ein mental induzierter Interpretationsprozess, dessen Auswirkungen aus folgendem Grund von besonderem Interesse für die vorliegenden Untersuchungen sind:

Die veränderte Wahrnehmung der Helligkeit der Objektoberflächen tritt auf, obwohl die Abbildung des Objektes auf der Retina unverändert bleibt. Wenn ein Stimulus bei identischem Netzhautbild zu unterschiedlichen Wahrnehmungen führt, verursacht durch die geänderte räumliche Interpretation des betrachteten Objektes, dann muß dieser Effekt corticalen Ursprungs sein.

Das Inversionsphänomen ist seit dem sog. Visitenkartenversuch von MACH (1886) bekannt und wurde über Jahrzehnte wiederholt eindrucksvoll demonstriert. Eine quantitative Beschreibung der veränderten Wahrnehmung bei Inversion ist bisher jedoch nicht gelungen. Mit dieser Arbeit soll durch Quantifizierung des Inversionsphänomens geklärt werden, nach welchen Prinzipien sich die Wahrnehmung beim Invertieren verändert und welchen Einfluß die Inversion auf die Helligkeitskonstanzleistung hat.

Mit Hilfe einer besonders geeigneten Versuchsmethode soll ein quantitativer Vergleich der Bewertungen von Oberflächenhelligkeiten im normalen und im invertierten Betrachtungsmodus durchgeführt werden. Darüber hinaus wird in einem ergänzenden Experiment durch spezielle Versuchsbedingungen ein Ausblenden der Informationen über die dreidimensionale Struktur des Objektes ermöglicht. Die Ergebnisse der Bewertung von Oberflächenhelligkeiten unter den drei genannten Versuchsbedingungen werden vergleichend ausgewertet.

Dieser Vergleich der verschiedenen Wahrnehmungen von Oberflächenhelligkeit unter den beschriebenen Bedingungen soll die Charakterisierung der corticalen Prozesse bei der Verarbeitung von Helligkeitsinformationen im visuellen System des Menschen ermöglichen. Das Ziel ist schließlich ein tiefergehendes Verständnis der Helligkeitswahrnehmung und insbesondere des Phänomens der Helligkeitskonstanzleistung.

2. Material und Methode

2.1. Das Versuchsobjekt

Den Versuchspersonen wird ein fünffach geknicktes Objekt präsentiert. Dieses bezeichnen wir als Zickzack-Figur bzw. vvv-Figur (siehe Abb.3). Das Objekt besitzt sechs rechteckige Oberflächen der Größe 36 mm x 99 mm. Auf dem Objekt werden sechs Graupapiere mit unterschiedlichem Remissionsgrad in verschiedenen Reihenfolgen angeordnet.

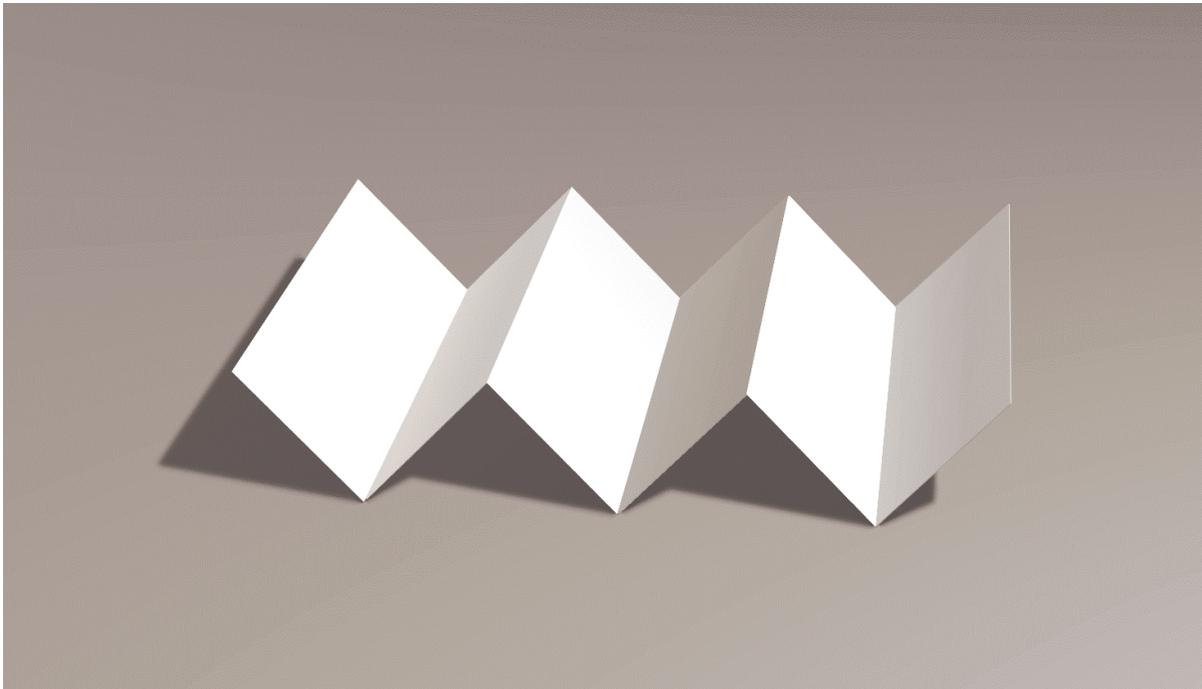


Abb. 3: Zickzack- bzw. vvv-Figur. Auf ihr werden sechs verschiedene Graupapiere angeordnet. Die vvv-Figur wird von rechts oben beleuchtet, daher befinden sich drei Papiere im Bereich des Körperschattens

Die vvv-Figur befindet sich in einer asymmetrischen Beleuchtungssituation. Die drei nach rechts orientierten Oberflächen werden mit einer höheren Lichtintensität beleuchtet und im folgenden als *Lichtseiten* bezeichnet. Die drei nach links gerichteten Oberflächen werden demnach *Schattenseiten* genannt. Wenn nun eines der Graupapiere mit einem vergleichbar geringen Remissionsgrad auf einer Lichtseite liegt, ein anderes Graupapier mit einem höherem Remissionsgrad hingegen auf einer Schattenseite, dann kann das Papier mit dem geringeren Remissionsgrad die höhere Leuchtdichte besitzen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, daß die Beleuchtungsasymmetrie größer ist als der Unterschied im Remissionsgrad der beiden Graupapiere. Diese Bedingung ist in allen durchgeführten Experimenten erfüllt.

2.1.1. Die Remissionsgrade der verwendeten Graupapiere

Insgesamt wurden 12 verschiedene Graupapiere verwendet, deren Remissionsgrade liegen zwischen 0,1 und 0,84. Der Quotient aus den Remissionsgraden benachbarter Graupapiere hat in allen Fällen einen Wert von 1,2. Der Zuwachs des Remissionsgrades der Graupapiere ist somit nicht linear, sondern logarithmisch. Die entsprechende Logarithmusfunktion stimmt dabei mit der für die menschliche Hellwahrnehmung empirisch ermittelten Funktion überein. Die nach Remissionsgrad geordneten 12 Graupapiere wurden in einer Reihe nebeneinander gelegt. Diese Anordnung wurde von allen Versuchspersonen als gleichmäßig in der Oberflächenhelligkeit zunehmend wahrgenommen.

Genauer betrachtet zeigte sich jedoch, daß die wahrgenommenen Unterschiede in der Oberflächenhelligkeit bei den Graupapieren mit den geringsten Remissionsgraden geringfügig kleiner beurteilt wurden, als bei den Papieren mit den höchsten Remissionsgraden. Die durch das Weber-Fechner-Gesetz geforderte Beziehung zwischen Reiz- und Empfindungsintensität ist bekanntlich nicht exakt erfüllt, obwohl $\Delta I/I$ konstant war. Für die vorliegende Fragestellung war dies jedoch nicht von Bedeutung.

Die Versuchspersonen sollten die Zickzack-Figur sowohl bei normaler als auch bei invertierter Betrachtungsweise bewerten (siehe Abschnitt 2.2. *Die Aufgabe der Versuchspersonen*). In Vorversuchen zeigte sich, daß die Bewertung von mehr als sechs Graupapieren bei Inversion einer entsprechend größeren Zickzack-Figur problematisch ist, da die Inversion eines Objekts mit mehr als sechs Oberflächen nicht stabil gehalten werden kann. Die 12 Graupapiere werden daher in zwei Sätze zu je sechs Papieren unterteilt. Der Satz mit den dunklen Graupapieren besitzt Remissionsgrade zwischen 0,1 und 0,25, die Remissionsgrade der hellen Graupapiere liegen zwischen 0,34 und 0,84. In Tabelle 1 sind die Remissionsgrade der beiden Graupapiersätze aufgeführt.

Remissionsgrade der Graupapiere			
Nr.	dunkle Graupapiere	Nr.	helle Graupapiere
6	0,10	6	0,34
5	0,12	5	0,41
4	0,14	4	0,49
3	0,17	3	0,59
2	0,21	2	0,70
1	0,25	1	0,84

Tabelle 1: Die Remissionsgrade der zwei Graupapiersätze

Die Remissionsgrade aus Tabelle 1 stellen die errechneten, auf zwei Nachkommastellen gerundeten Sollwerte dar, die sich aufgrund des vorgegebenen Quotienten benachbarter Graupapiere ergeben. Die gewünschten Remissionsgrade der Graupapiere konnten in ausreichender Genauigkeit erzeugt werden. Die Abweichungen waren kleiner als 1%. Eine empirische Bestimmung der Unterscheidungsschwelle ergab, dass innerhalb dieser Genauigkeit auftretenden, minimalen Variationen des Remissionsgrades nicht wahrnehmbar sind.

Die Graupapiere wurden mit Hilfe eines Druckers der Fa. EPSON, Modell STYLUS PHOTO 870 hergestellt. Als besonders geeignete Papiersorte hat sich das unbeschichtete Papier des Herstellers PAPIER CLAIREFONTAINE mit der Bezeichnung 250-PC High Definition und der Stärke 120 g/m² erwiesen. Bei diesem Papier ist die Graufärbung der bedruckten Papiere besonders homogen.

Die verschiedenen Graupapiere wurden bei Verwendung der Software COREL DRAW 7.0 erzeugt. Der Grauwert kann in dieser Software zwischen 0 und 100 gewählt werden, 0 entspricht hierbei unbedrucktem Papier, 100 bedeutet maximale Tintensättigung der bedruckten Fläche. Die entstehenden Remissionsgrade sind jedoch nicht nur von der Papiersorte, sondern zusätzlich von der verwendeten Tintenpatrone abhängig. Daher müssen gewünschte Remissionsgrade durch Ausprobieren erzeugt werden, weshalb an dieser Stelle auf eine Angabe der Grauwerte des Programms zum Erzeugen der verwendeten Remissionsgrade verzichtet wird.

Eine große Zahl von Vorversuchen wurde zu Beginn mit drei Sätzen von Graupapieren durchgeführt. Die Vorversuche dienten hierbei in erster Linie zur Festlegung der weiteren Vorgehensweise sowie der Bestimmung der geeigneten Graupapiere. Dabei zeigte sich, daß bei Verwendung von zwei Graupapiersätzen vergleichbare Ergebnisse zu beobachten waren. Der Einsatz von zwei Graupapiersätzen wurde der Reduktion auf einen Satz vorgezogen, da hierdurch eine weitere Fragestellung untersucht werden kann, die an dieser Stelle der Arbeit nur angesprochen, später aber noch ausführlich dargestellt wird. Es handelt sich hierbei um die Wahrnehmung und Verarbeitung des sogenannten lokalen Streulichts, dessen Einfluß bei den hellen Graupapieren stark ausgeprägt, bei den dunklen Graupapieren jedoch vergleichsweise gering ist⁴.

⁴ Eine Begründung für den ausgeprägteren Streulichteffect bei den hellen Graupapieren findet man in Abschnitt 2.6. *Globales und lokales Streulicht*.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Bewertung beider Sätze durch die Versuchspersonen bei identischer Anordnung der Graupapiere ermöglicht die Bestimmung des Einflusses von Streulicht auf die Helligkeitskonstanzleistung.

Die Remissionsgrade der drei Graupapiersätze sind aus Gründen der Vollständigkeit in Tabelle 2 aufgelistet. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen mit den drei Graupapiersätzen bestätigen die Ergebnisse aus den endgültigen Versuchsreihen. Die Datensätze sind jedoch unvollständig, da nur ein Teil der möglichen Graupapieranordnungen getestet wurde. Daher werden diese Ergebnisse nicht im Rahmen dieser Arbeit dargestellt.

Remissionsgrade der Graupapiere in den Vorversuchen					
Nr.	dunkle Graupapiere	Nr.	mittlere Graupapiere	Nr.	helle Graupapiere
6	0,05	6	0,13	6	0,33
5	0,06	5	0,16	5	0,40
4	0,07	4	0,19	4	0,48
3	0,09	3	0,23	3	0,57
2	0,11	2	0,27	2	0,68
1	0,13	1	0,33	1	0,82

Tabelle 2: Die Remissionsgrade der drei Graupapiersätze aus den Vorversuchen

Die in den Vorversuchen verwendeten Graupapiere hatten Remissionsgrade zwischen 0,05 und 0,82. Die Quotienten aus benachbarten Graupapieren waren identisch mit den beiden Graupapiersätzen aus den Hauptversuchen. Die drei Sätze überschneiden sich jedoch, das hellste Papier im Satz der dunklen Graupapiere wurde als dunkelstes im Satz der mittleren Graupapiere verwendet. Weiterhin wurde das hellste Papier im Satz der mittleren Graupapiere als dunkelstes im Satz der hellen Graupapiere eingesetzt. Insgesamt kamen demnach 16 verschiedene Graupapiere zum Einsatz, die Ergebnisse waren jedoch bei den dunklen und mittleren Graupapieren weitgehend identisch. Die Ergebnisse der Versuchsreihen mit den hellen Graupapieren unterschieden sich in vielen Fällen von den Ergebnissen der Versuchsreihen mit den dunklen und mittleren Graupapieren. Als Grund für die unterschiedlichen Bewertungen der Graupapiersätze bei identischer Anordnung der Graupapiere wurde der unterschiedlich stark ausgeprägte Streulichteinfluß angenommen. Daher wurde die umfassende systematische Untersuchung der Helligkeitskonstanzleistung mit zwei nicht überlappenden Graupapiersätzen durchgeführt.

Die Bestimmung der Remissionsgrade der verwendeten Graupapiere wird in Abschnitt 2.1.3. *Einstellung und Messung der Beleuchtungsverhältnisse* dargestellt.

2.1.2. Der Versuchsaufbau

Die vvv-Figur sollte während den Versuchsreihen unter genau vorgegeben, reproduzierbaren Beleuchtungsbedingungen präsentiert werden. Um dies zu ermöglichen, wurde eine Versuchskammer mit regelbaren Lichtquellen verwendet. Auf der folgenden Seite befindet sich eine Abbildung dieser Versuchskammer. Die Kammer ist mit stark lichtabsorbierendem, mattschwarzem Filzstoff ausgekleidet, 125 cm breit, 95 cm hoch, 70 cm tief und steht auf einem 75 cm hohen Tisch. Um die vvv-Figur auf eine geeignete Betrachtungshöhe zu bringen, befindet sich in der Mitte der Versuchskammer eine mit tiefschwarzem Samtstoff überzogene Präsentationsfläche der Abmessung 35 cm x 25 cm (B x T), die sich 25 cm über dem Boden der Versuchskammer befindet. Die vvv-Figur hat eine Größe von 15 cm x 10 cm (B x T), liegt mittig auf der Präsentationsfläche und wird von den Versuchspersonen in einem Abstand von ca. 75 cm betrachtet.

Die Versuchskammer ist auf einer Längsseite offen, dadurch wird den Versuchspersonen eine freie Sicht ins das Innere der Kammer sowie auf die vvv-Figur ermöglicht. In der Decke der Kammer befinden sich am linken und rechten Rand 25 cm breite rechteckige Öffnungen, die sich über die gesamte Tiefe der Kammer erstrecken. Durch diese beiden Öffnungen wird die vvv-Figur von rechts und links beleuchtet. Als Lichtquellen werden je drei Leuchtstoffröhren der Fa. OSRAM, Typ L36 W/12 DAYLIGHT verwendet. In den beiden oberen Ecken der Kammer wird diagonal von der Decke zu den Seitenwänden transparentes Grafikerpapier gespannt, das die direkten Lichtquellen verkleidet und als Streufolie dient. Dadurch wird eine sehr homogene Beleuchtung des Versuchsobjektes ohne scharfe Schattenwürfe ermöglicht.

Die offene Längsseite der Versuchskammer wird in den oberen Ecken diagonal mit schwarzem Stoff verdeckt. Dadurch wird den Versuchspersonen sowohl die Sicht auf die direkten Lichtquellen als auch auf die Streufolie genommen. Um die in die Kammer eingestrahlte Lichtintensität zu erhöhen wird über den Leuchtstoffröhren weißes Papier angebracht, dadurch wird das nach oben abgestrahlte Licht in die Kammer zurückreflektiert. Dies ist auf der Abbildung nicht dargestellt, da nur die wesentlichen Komponenten des Aufbaus gezeigt werden sollen. Auch der Bereich der Seitenwände hinter der Streufolie wird mit weißem Papier ausgekleidet, um die Lichtausbeute zu erhöhen und die Homogenität der indirekten Beleuchtung zu verbessern.

Abbildung 4 ist eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus.

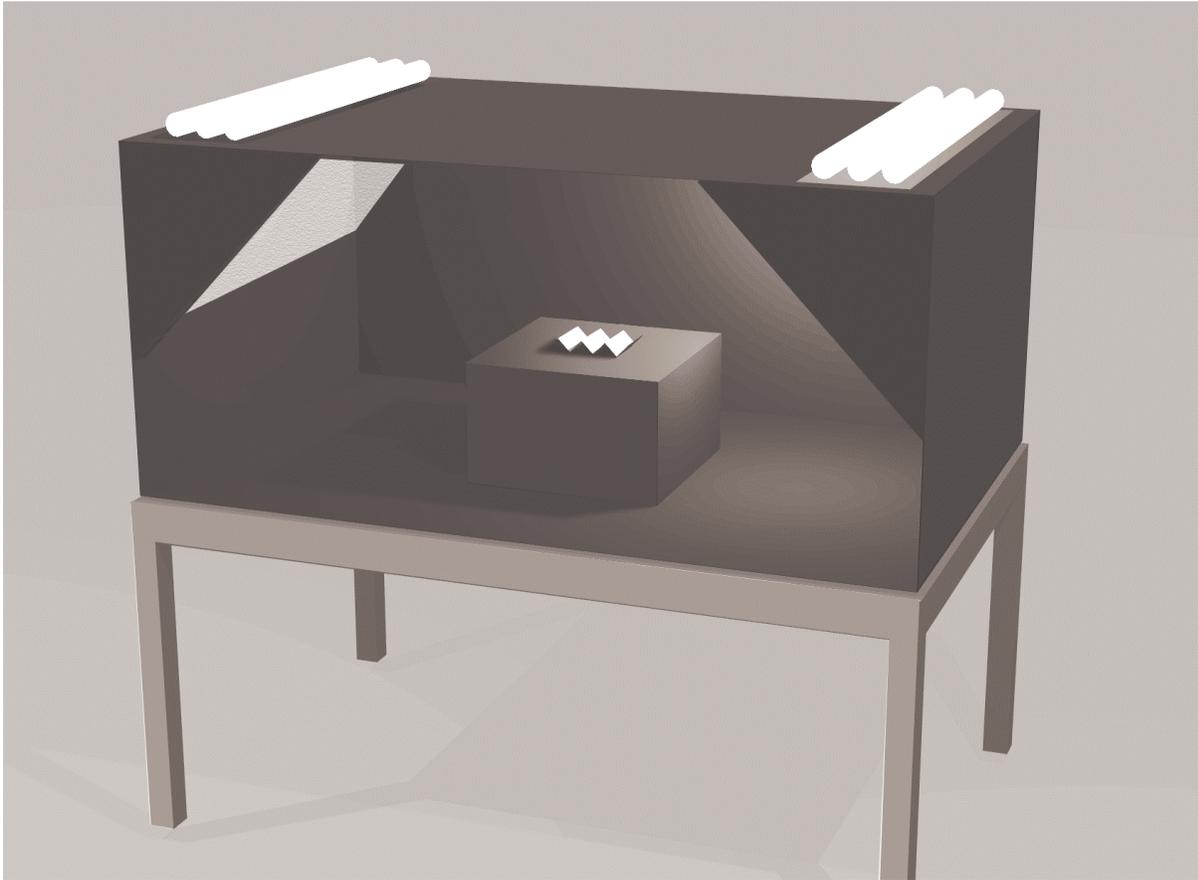


Abb. 4: Der Versuchsaufbau

In allen Versuchen war die Lichtintensität der rechten Lichtquelle höher als diejenige der linken Lichtquelle. Die nach rechts orientierten Flächen des Versuchsobjektes stellen demnach die Lichtseiten dar, die zur linken Seite der Kammer ausgerichteten Flächen sind die Schattenseiten des Objektes. Das aufgrund der stark lichtabsorbierenden Innenverkleidung der Wände fehlende Streulicht wird in diesem Aufbau durch die zweite Lichtquelle ersetzt. Ohne die schwarze Innenverkleidung der Versuchskammer wäre nur eine Lichtquelle nötig. Das an den Wänden reflektierte Licht würde die Schattenseiten des Objektes beleuchten. Unter diesen Umständen wäre die Schattenstärke jedoch nicht beliebig einstellbar, außer man verändert mit entsprechend großem Aufwand die Remissionseigenschaften der Wände der Versuchskammer. Außerdem wäre die Schattenstärke in dieser Weise nur schlecht exakt einstellbar. Da sich vor beiden Lichtquellen eine Streufolie befindet und die Lichtquellen nicht sichtbar sind, wurde bei ausreichend geringen Lichtintensitäten auf der Schattenseite das Ersetzten des Streulichtes durch eine zweite Lichtquelle von den Versuchspersonen nicht als unnatürlich wahrgenommen.

Die Versuche wurden zunächst im normalen Betrachtungsmodus und danach im invertierten Betrachtungsmodus durchgeführt. In einer zusätzlichen Versuchsreihe sollte die Information über die dreidimensionale Struktur der vvv-Figur ausgeblendet werden. Dazu wurde der Versuchsaufbau durch zwei Sichtblenden ergänzt, durch welche die vvv-Figur betrachtet werden sollte. Die erste Blende ist kreisförmig, 12 mm im Durchmesser und befindet sich auf Augenhöhe der Versuchspersonen. Dadurch wurde monokulares Betrachten der vvv-Figur unter identischem Blickwinkel erzwungen. Die zweite Blende ist rechteckig, befindet sich unmittelbar vor dem Versuchsobjekt und ist genau so groß, daß die zickzackförmigen Umrisse der vvv-Figur verdeckt werden. Der verbleibende Stimulus war dann nur noch ein Rechteck mit sechs vertikal angeordneten grauen Flächen, die aufgrund der fehlenden räumlichen Information als flach liegend erscheinen.

2.1.3. Einstellung und Messung der Beleuchtungsverhältnisse

Bei dem beschriebenen Versuchsaufbau kann über das Intensitätsverhältnis der beiden Lichtquellen die Schattenstärke annähernd beliebig variiert werden. Die Schattenstärke wird mit Hilfe einer geeigneten Steueranlage eingestellt. Diese wurde von Herrn Huber, dem am Institut beschäftigten Elektroniker, angefertigt und besitzt zwei Zehngangpotentiometer. Der Bereich zwischen minimaler und maximaler Intensität der Lichtquellen wird bei diesen Potentiometern über zehn ganze Umdrehungen eingestellt. Die Schattenstärke kann dementsprechend exakt justiert werden.

Das Verhältnis der Intensitäten der zwei Lichtquellen wird indirekt mit Hilfe einer dachförmigen, sogenannten Δ -Figur gemessen. Die zwei Oberflächen der Δ -Figur entsprechen in Größe und Orientierung denjenigen der vvv-Figur und sind demnach zu je einer der beiden Lichtquellen ausgerichtet. Beide Oberflächen sind mit unbedrucktem, weißem Papier beklebt, die Papiersorte ist identisch mit derjenigen, die zum Herstellen der Graupapiere verwendet wird.

Aus einem bestimmten Intensitätsverhältnis der beiden Lichtquellen resultiert nun ein identisches Verhältnis der Leuchtdichten der beiden Oberflächen der Δ -Figur, wenn diese symmetrisch zwischen den beiden Lichtquellen positioniert wird. Ist die Leuchtdichte auf der Lichtseite doppelt so groß wie auf der Schattenseite, dann ist auch das Intensitätsverhältnis der Lichtquellen zwei zu eins, der Schattenstärke wird der Wert 2 zugeordnet.

Variiert man nun die Intensität einer der beiden Lichtquellen, dann hat dies nur eine entsprechende Änderung der Leuchtdichte der von ihr beleuchteten Objektseite zur Folge, während die Leuchtdichte der anderen Objektseite annähernd unbeeinflusst bleibt. Die unabhängige Einstellbarkeit der Leuchtdichten von Licht- und Schattenseite der Versuchsobjekte ist durch die schwarze Innenverkleidung der Versuchskammer bedingt, da fast kein indirektes Licht von den Wänden auf das Versuchsobjekt gestreut wird. Dies ist Voraussetzung für eine kontrollierte Variation der Schattenstärke und damit auch des Schwierigkeitsgrades⁵ der Reizsituationen.

Die Leuchtdichtewerte werden mit Hilfe eines Leuchtdichtemeßgerätes der Fa. MINOLTA, Modell LUMINANCE METER LS-110 bestimmt. Bei der Bestimmung von Intensitätsverhältnissen, also bei Messung von relativen Leuchtdichten, werden je zwei ermittelte Leuchtdichtewerte miteinander verglichen. Die Meßgenauigkeit entspricht unter diesen Voraussetzungen der letzten angezeigten Dezimalstelle des Meßwertes. Hierdurch ergibt sich im verwendeten Intensitätsbereich eine sehr gute Meßgenauigkeit von ca. $\pm 0,05$ %.

Bei Messungen absoluter Leuchtdichtewerte liegt die mögliche Ungenauigkeit nach Angaben der Fa. MINOLTA bei ± 2 %. Der Meßfehler ist jedoch systematisch und die entsprechende Abweichung ist demzufolge für alle Messungen entweder nach oben oder nach unten. Da die relativen Intensitäten der beiden Lichtquellen für die vorliegenden Untersuchungen von Interesse sind, und weiterhin davon ausgegangen wird, daß der Meßfehler bei verschiedenen Intensitäten gleich groß ist, hat die mögliche Ungenauigkeit von 2 % keinen Einfluß auf die eingestellten Schattenstärken.

Das Leuchtdichtemeßgerät wird weiterhin zur Bestimmung der Remissionsgrade der Graupapiere verwendet. Es besitzt einen Modus, in dem relative Messungen durchgeführt werden können. Ein gemessener Leuchtdichtewert wird hierbei auf 100 % normiert und alle danach gemessenen Leuchtdichtewerte werden zu diesem Wert in Bezug gesetzt. Normiert man die Leuchtdichte eines MgO-Standards an einem festgelegten Ort unter konstanten Beleuchtungsverhältnissen, dann kann für beliebige Graupapiere unter identischen Bedingungen die relative Remission in % gemessen werden.

⁵ Der Schwierigkeitsgrad der Stimuli ist unter anderem abhängig von der Schattenstärke. Bei größerer Schattenstärke und identischer Anordnung der Graupapiere machen die Versuchspersonen mehr Fehler bei der Bewertung der Stimuli.

Wird der entsprechende Wert durch 100 geteilt, erhält man den Remissionsgrad des gemessenen Graupapiers. Die mögliche Ungenauigkeit liegt unter diesen Bedingungen bei ca. 0,01%. Die Meßgenauigkeit ist so gut, daß die nicht wahrnehmbaren Schwankungen im Remissionsgrad einer scheinbar völlig homogen eingefärbten Oberfläche erfaßt werden können.

Die Intensität der Leuchtstoffröhren hat nach einer Warmlaufphase von etwa einer Stunde einen konstanten Wert erreicht. Bei maximaler Potentiometereinstellung ergibt sich bei gerade eingeschalteten Leuchtstoffröhren auf der Lichtseite der Δ -Figur eine Leuchtdichte von 120 cd/m². Dieser Wert erhöht sich innerhalb einer Stunde bis zu einem Maximalwert von 160 cd/m². Wenn die Kammer keine lichtabsorbierenden Wände hätte, wäre dieser Wert wesentlich höher.

Bei allen Leuchtdichtemessungen befindet sich das Meßgerät etwa auf Kopfhöhe der Versuchspersonen. Dadurch werden die Leuchtdichtewerte unter dem Blickwinkel der Versuchspersonen erfaßt.

2.2. Die Aufgabe der Versuchspersonen.

Um die Güte der Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit quantitativ zu beschreiben, wird die Methode der eigenmetrischen Reihung angewendet. Bei dieser Methode werden verschiedene Stimuli simultan präsentiert und die Versuchspersonen sollen bezüglich der untersuchten Wahrnehmungsleistung eine Rangfolge erstellen.

Die Stimuli in den vorliegenden Untersuchungen sind die Graupapiere mit unterschiedlichem Remissionsgrad. Für verschiedene Anordnungen der Graupapiere soll die Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit bestimmt werden. Die Versuchspersonen ordnen dem Papier mit der größten wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit den Rang 1 zu. Das als zweithellstes wahrgenommene Graupapier erhält den Rang 2, so wird fortgefahren bis zur scheinbar dunkelsten Oberfläche, die den Rang 6 erhält. Dabei wird den Versuchspersonen vor der Versuchsdurchführung der Unterschied zwischen beleuchtungsbedingter Helligkeit und Oberflächenhelligkeit erläutert. Weiterhin wird nachdrücklich betont, daß dem Papier mit dem hellsten Grauton auch dann der Rang 1 zugeordnet werden soll, wenn andere Graupapiere aufgrund der Beleuchtungsverhältnisse eine höhere beleuchtungsbedingte Helligkeit besitzen.

Da die Rangfolge der Graupapiere bezüglich ihrer relativen Oberflächenhelligkeit beurteilt werden soll, wird die Aufgabe der Versuchspersonen als Reihung nach relativem Remissionsgrad bezeichnet.

Die Reihung wird sowohl im normalen als auch im invertierten Betrachtungsmodus durchgeführt. Die bereits beschriebene Änderung der wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit bei Inversion der vvv-Figur bedingt, daß die Reihung im normalen Betrachtungsmodus und die Reihung im invertierten Betrachtungsmodus zu unterschiedlichen Reihenfolgen führen. Voraussetzung für eine veränderte Reihung nach Inversion der vvv-Figur ist eine geeignete Abstufung der Remissionsgrade der Graupapiere in Verbindung mit einer ausreichenden Schattenstärke. Durch den Vergleich der Bewertungen in beiden Betrachtungsmodi kann der Einfluß der räumlichen Inversion auf die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit quantifiziert werden.

2.3. Das Versuchsobjekt als Modell für den Allgemeinfall

Die verwendete Reizsituation mit sechs Graupapieren auf der vvv-Figur erscheint zunächst sehr speziell. Trotzdem können hierbei allgemeingültige Aussagen über die Verarbeitung und Wahrnehmung von Körperschatten getroffen werden. Dies ist aufgrund der vielen Variationsmöglichkeiten bei der Gestaltung der Stimuli möglich. Eine Beschreibung der variablen Parameter soll dies verdeutlichen.

1.) Es werden Graupapiere verwendet, deren Remissionsgrade und damit auch deren Oberflächenhelligkeiten den Bereich unserer Alltagserfahrung abdecken. Das Papier mit dem geringsten Remissionsgrad wird als schwarz und das Papier mit dem höchsten Remissionsgrad als weiß wahrgenommen. Die Unterschiede in den Remissionsgraden aufeinander folgender Graupapiere sind dabei so groß, daß sie als deutlich verschieden beurteilt werden.

2.) Die Beleuchtungsasymmetrie und damit die Schattenstärke kann annähernd beliebig variiert werden. Bei größeren Schattenstärken ist die Bewertung der Oberflächenhelligkeit der Graupapiere als schwieriger einzustufen, da sich zeigt, daß die Versuchspersonen bei größeren Schattenstärken mehr Fehler bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad machen.

3.) Besonders wichtig ist jedoch die große Anzahl der möglichen Anordnungen der Graupapiere auf dem Versuchsobjekt. Insgesamt existieren 720 mögliche Anordnungen. Dies wird im folgenden Abschnitt genauer dargestellt. Die Bewertung verschiedener Anordnungen der Graupapiere erweist sich als unterschiedlich schwierig. Durch die vvv-Figur im vorliegenden Versuchsaufbau können bereits bei Einsatz von nur sechs Graupapieren alle Licht-Schatten-Verhältnisse dargestellt werden.

Bereits bei konstanter Beleuchtungsasymmetrie können nur durch die Variation der Anordnung der Graupapiere sowohl vollständig korrekte Bewertungen als auch stark fehlerhafte Bewertungen hervorgerufen werden. Ursache hierfür ist die Verteilung der Papiere auf die Licht- und Schattenseiten des Versuchsobjektes. Werden die Papiere mit hohem Remissionsgrad auf den Schattenseiten angeordnet, führt dies zu einer größeren Zahl von Fehlern, als wenn diese Papiere auf den Lichtseiten liegen und daher zusätzlich zum höchsten Remissionsgrad auch die höchste Leuchtdichte besitzen. Im zweitgenannten Fall wird einem Beobachter der Konflikt zwischen den beiden Wahrnehmungsaspekten Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingter Helligkeit erspart, eine korrekte Bewertung der Reizsituation ergibt sich daher zwangsläufig. Diese Annahme konnte empirisch bestätigt werden.

4.) Die jeweils gegenüberliegenden Graupapiere beeinflussen sich wechselseitig. Dies wird als lokaler Streulichteffekt bezeichnet und in Abschnitt 2.6. ausführlich dargestellt. Die Ausprägung des Streulichteffektes ist sehr variabel. Diese Variabilität kann zur Untersuchung des Streulichts auf die Wahrnehmung genutzt werden.

Bei der Planung der Versuche ist eine sinnvolle Auswahl von Versuchsparametern entscheidende Bedingung um mit diesen Untersuchungen repräsentative und aussagefähige Datensätze zu erhalten. Die systematische Kontrolle der Freiheitsgrade bei Variation der Reizbedingungen soll ermöglichen, daß mit einer vertretbaren Anzahl von Versuchsreihen alle Aspekte der Wahrnehmung und Verarbeitung von Licht und Schatten untersucht werden können. Ist diese Voraussetzung erfüllt kann die vvv-Figur als ein „Modell für den Allgemeinfall“ in Bezug auf die untersuchte Fragestellung gesehen werden.

2.4. Der Schwierigkeitsgrad verschiedener Anordnungen

Für sechs Graupapiere existieren $6!$ (6 Fakultät), also 720 verschiedene Anordnungen auf dem Versuchsobjekt. Wie im letzten Abschnitt bereits beschrieben erweist sich die Reihung nach Oberflächenhelligkeit für verschiedene Anordnungen jedoch als unterschiedlich schwierig, wenn das Versuchsobjekt asymmetrisch beleuchtet wird. Der unterschiedliche Schwierigkeitsgrad ist das Ergebnis der Verteilung der Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten der vvv-Figur⁶.

Die folgenden Ausführungen sollen dies verdeutlichen. Bei jeder beliebigen Anordnungen der Papiere auf der vvv-Figur werden jedem Graupapier zwei physikalische Meßwerte zugeordnet, ein Remissionsgrad und ein Leuchtdichtewert. Bei symmetrischer Beleuchtungssituation wird jede Fläche mit der gleichen Intensität beleuchtet. Ein Papier mit einem höheren Remissionsgrad besitzt dann eine entsprechend höhere Leuchtdichte, da unter diesen Voraussetzungen zwischen den beiden Größen eine strenge Proportionalität vorliegt. Die Rangfolge der Graupapiere nach Remissionsgrad und die entsprechende Rangfolge nach Leuchtdichte sind daher für alle Anordnungen identisch. Eine durch die Versuchspersonen erstellte Reihung nach Oberflächenhelligkeit stimmt mit der entsprechenden Reihung nach beleuchtungsbedingter Helligkeit vollständig überein. Diese Bedingung ist trivial und wird daher natürlich nicht eingesetzt. Es könnten hier nur Aussagen über die Fähigkeit zur Unterscheidung von Grautönen gemacht werden, Aussagen über die Güte der Helligkeitskonstanzleistung sind bei einer symmetrischen Beleuchtungssituation nicht möglich.

Ist die Beleuchtungssituation asymmetrisch, dann stimmt nur bei 36 der 720 möglichen Anordnungen die Rangfolge der Graupapiere nach Remissionsgrad vollständig mit der Rangfolge nach Leuchtdichte überein⁷. Dies ist genau dann der Fall, wenn die drei Graupapiere mit den höchsten Remissionsgraden auf den Lichtseiten liegen, die verbleibenden Graupapiere mit den geringeren Remissionsgraden demzufolge auf den Schattenseiten. Die Rangfolge der Graupapiere nach Remissionsgrad und die Rangfolge nach Leuchtdichte sind bei diesen 36

⁶ Dies wird in Abschnitt 2.5. *Die Unterteilung der verschiedenen Anordnungen in Permutationsgruppen* ausführlich dargestellt.

⁷ Die 720 Anordnungen können in 20 Permutationsgruppen eingeteilt werden. Jede Gruppe beinhaltet 36 verschiedene Anordnungen. Nur eine der 20 Gruppen erfüllt die oben genannte Bedingung. Auch dies wird in Abschnitt 2.5. detailliert beschrieben.

Anordnungen zwar identisch, die Leuchtdichtewerte machen jedoch beim Übergang von den Licht- zu den Schattenseiten einen der Beleuchtungsasymmetrie entsprechenden Sprung. Auch derartige Anordnungen mußten von den Versuchspersonen bewertet werden. Dies hat jedoch in erster Linie die Funktion eines Kontrollexperimentes. Erwartungsgemäß sollten bei der Reihung nach Oberflächenhelligkeit keine Fehler auftreten.

Bei den verbleibenden 684 Anordnungen ist die Übereinstimmung der beiden Rangfolgen der Graupapiere nach den physikalischen Größen Remissionsgrad und Leuchtdichte unvollständig. Der Grad der Übereinstimmung ist dabei unterschiedlich stark ausgeprägt und kann mit Hilfe des im nächsten Abschnitt beschriebenen Verfahrens quantifiziert werden.

Einige zunächst willkürlich ausgewählte Anordnungen mit guter Übereinstimmung der physikalischen Rangfolgen erwiesen sich als einfach in der Bewertung. Bei Reihung nach Oberflächenhelligkeit wurden hier nur selten Fehler gemacht, denn die Rangfolgen nach den beiden Wahrnehmungsaspekten Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingter Helligkeit sind entsprechend ähnlich. Anordnungen mit geringerer Übereinstimmung der beiden physikalischen Rangfolgen besitzen einen höheren Schwierigkeitsgrad, der sich in einer empirisch bestätigten, größeren Anzahl von Fehlern bei der Reihung nach Oberflächenhelligkeit äußert. Der Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Reizsituation ergibt sich dabei insgesamt aus einer komplexen Wechselwirkung zwischen den Versuchsparametern Beleuchtungsasymmetrie, Abstufung der Remissionsgrade sowie der Anordnung der Graupapiere.

Die Helligkeitskonstanzleistung kann also durch die Auswahl von bestimmten Anordnungen der Graupapiere bei geeigneter Beleuchtungsasymmetrie zum Versagen gebracht werden. Die systematische Analyse der Fehler bei der Reihung nach Oberflächenhelligkeit ist die Basis zur quantitativen Beschreibung der Helligkeitskonstanzleistung bei Körperschatten. Dazu muß den verschiedenen Anordnungen ein Schwierigkeitsgrad zugeordnet werden, denn die Fehler bei der Reihung müssen quantifiziert aber auch in Bezug zum Schwierigkeitsgrad der entsprechenden Reizsituation gebracht werden. Quantifizieren der Fehler bei der Beurteilung der relativen Remissionsgrade der Graupapiere ohne Kenntnis ihrer Ursache wäre nicht aufschlußreich.

2.4.1. Die Quantifizierung der Stimuli durch Kendall's τ

Das verwendete Verfahren zur quantitativen Beschreibung des Schwierigkeitsgrades der jeweiligen Reizsituation wird im folgenden dargestellt. Dazu betrachten wir zunächst eine beliebige Anordnung der Graupapiere mit verschiedenen Remissionsgraden auf der vvv-Figur bei konstanter Beleuchtungsasymmetrie. Für jede Anordnung werden zwei Wertefolgen mit sechs Remissionsgraden bzw. sechs Leuchtdichten ermittelt.

Diese werden Sequenz nach Remissionsgrad bzw. Sequenz nach Leuchtdichte genannt. Ein quantitativer Vergleich der Übereinstimmung dieser beiden Sequenzen soll den Schwierigkeitsgrad der präsentierten Anordnung beschreiben.

Diese Annahme ist, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, naheliegend. Eine Anordnung, bei der die Übereinstimmung der beiden genannten Sequenzen nur gering ist, sollte mit einer höheren Wahrscheinlichkeit zu Fehlern in der Beurteilung der Oberflächenhelligkeit führen, als eine andere Anordnung, bei welcher die Übereinstimmung größer ist. Da sich der angenommene Zusammenhang in einer großen Zahl von Vorversuchen bestätigte, wurde eine umfassende systematische Analyse der verschiedenen Anordnungen durchgeführt.

Als Maß für die Ähnlichkeit bzw. Übereinstimmung der beiden genannten Sequenzen wird Kendall's τ verwendet. Hierbei handelt es sich um den Rangkorrelationskoeffizienten nach KENDALL & GIBBONS (1990). Der Wertebereich von Kendall's τ ist das Intervall $[-1; 1]$, bei vollständiger Korrelation ist τ gleich eins, minus eins hingegen entspricht einer inversen Korrelation der beiden Sequenzen. Eine Darstellung des Verfahrens zur Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten findet sich im Anhang.

Die grundlegenden Bedingungen sowie das Prinzip dieses Verfahrens sollen hier kurz in einer allgemeingültigen Form beschrieben werden: Jedem Element einer betrachteten Menge werden zwei Merkmale in einer bestimmten Ausprägung zugeordnet. Diese Merkmale müssen entsprechend quantifizierbar sein. Dann können zwei Rangfolgen bezüglich der quantifizierten Merkmale erstellt werden. Die beiden Rangfolgen werden nun auf ihre Korrelation überprüft. In der vorliegenden Untersuchung sind die Elemente der betrachteten Menge die sechs Graupapiere. Die beiden quantifizierbaren Merkmale sind der Remissionsgrad und die Leuchtdichte dieser Papiere.

Die Leuchtdichten sind bei gegebenen Remissionsgraden abhängig von der Beleuchtungsasymmetrie, d.h. von der Schattenstärke. Diese hat somit auch Konsequenzen für den Wert von Kendall's τ . Wir können nun trotzdem jeder Reizsituation, bestimmt durch die Anordnung der Graupapiere, deren Remissionsgrad sowie der Beleuchtungsasymmetrie einen bestimmten Zahlenwert zuordnen, welcher eine Aussage über den Schwierigkeitsgrad der Reizsituation machen soll. Stellt sich nun heraus, daß zwischen dem Schwierigkeitsgrad der Reizsituation und der entsprechenden Wahrnehmungsleistung ein fester Zusammenhang besteht, ergibt sich hierdurch eine Möglichkeit zur quantitativen Beschreibung der Helligkeitskonstanzleistung bei Körperschatten.

2.4.2. Die Quantitative Beschreibung der Wahrnehmungsleistung

Die Güte der Wahrnehmungsleistung kann durch den Vergleich zwischen der tatsächlichen Rangfolge nach Remissionsgrad und der von den Versuchspersonen wahrgenommenen Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit ermittelt werden. Die von den Versuchspersonen wahrgenommene Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit wird im folgenden als empirische Sequenz bezeichnet. Im Gegensatz dazu wird die tatsächliche Rangfolge nach Remissionsgrad physikalische Sequenz genannt. Auch bei diesen beiden Rangfolgen wird die Übereinstimmung mit Hilfe von Kendall's τ berechnet. Sind die beiden Rangfolgen identisch, ist die Bewertung demnach fehlerfrei, dann hat τ den Wert eins.

Die Versuchspersonen machen bei einem bestimmten Schwierigkeitsgrad der Reizsituationen Fehler in der Bewertung der Oberflächenhelligkeit, die Helligkeitskonstanzleistung versagt unter diesen Umständen teilweise. Sie beurteilen Graupapiere mit einem geringeren Remissionsgrad heller, als andere mit einem höheren Remissionsgrad. Dies ergibt sich, da sich die Graupapiere geringeren Remissionsgrades auf einer Lichtseite befinden. Sie besitzen daher eine deutlich höhere Leuchtdichte und somit auch eine höhere beleuchtungsbedingte Helligkeit. Die empirische und physikalische Sequenz sind dann nicht mehr identisch. Die Anzahl der Fehler bei der Reihung nach Oberflächenhelligkeit wird durch den Wert von τ dargestellt, je mehr Fehler gemacht werden, desto schlechter also die Wahrnehmungsleistung ist, desto kleiner ist auch der Wert von τ .

Um den Zusammenhang zwischen dem Schwierigkeitsgrad der Reizsituation und der resultierenden Wahrnehmungsleistung zu formal zu beschreiben, muß zwischen zwei verschiedenen Rangkorrelationskoeffizienten unterschieden werden. Diese beiden Rangkorrelationskoeffizienten werden in diesen Untersuchungen als τ_0 und τ_1 bezeichnet.

Der Rangkorrelationskoeffizient τ_0 beschreibt die Korrelation der Sequenzen nach Leuchtdichte mit den entsprechenden Sequenzen nach Remissionsgrad. Er ergibt sich aus zwei Rangfolgen, die nur physikalische Meßgrößen enthalten. τ_0 sollte erwartungsgemäß den Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Reizsituation erfassen. Je kleiner der Wert von τ_0 ist, desto höher sollte der Schwierigkeitsgrad sein.

Der Rangkorrelationskoeffizient τ_1 ergibt aus dem Vergleich der empirischen Sequenzen mit den physikalischen Sequenzen. τ_1 beschreibt, inwieweit die Rangfolge nach wahrgenommener Oberflächenhelligkeit mit der tatsächlichen Rangfolge nach Remissionsgrad übereinstimmt. Ohne Helligkeitskonstanz ergäbe sich eine Reihung nach beleuchtungsbedingter Helligkeit, dies entspräche einer Reihung nach Leuchtdichte und nicht nach Remissionsgrad. In diesem Fall hätten τ_0 und τ_1 identische Werte. Dies ist jedoch nicht zu erwarten, aufgrund der Helligkeitskonstanzleistung ist τ_1 größer als τ_0 . Der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 wird zur Quantifizierung der Helligkeitskonstanzleistung verwendet. Dabei ist jedoch zu beachten, daß bei Werten von τ_0 gleich eins keine Verbesserung mehr zu erzielen ist, da τ_1 nicht größer als eins werden kann.

Der Zusammenhang wird zwischen τ_0 und τ_1 dann besonders interessant, wenn τ_1 bereits kleiner als eins ist, d.h. wenn bereits Fehler in der Bewertung der Oberflächenhelligkeiten gemacht werden. Um die Beziehung zwischen τ_0 und τ_1 zu ermitteln, muß eine Bewertung vieler verschiedener Stimuli unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades vorgenommen werden. Dabei sollten ab einem bestimmten Schwierigkeitsgrad fehlerhafte Bewertungen stattfinden. Im günstigsten Fall sollte eine weitere Erhöhung des Schwierigkeitsgrades die Anzahl der Fehler bei der Bewertung erhöhen.

An dieser Stelle sei vorweggenommen, daß der erwartete, direkte Zusammenhang zwischen τ_0 und τ_1 zunächst nicht gezeigt werden konnte.

τ_0 war zwar in fast allen Versuchsreihen größer als τ_1 , die Unterschiede zwischen τ_0 und τ_1 waren jedoch sehr verschieden. Es konnte aber ein weiteres Kriterium identifiziert werden, das Konsequenzen für den Schwierigkeitsgrad der entsprechenden Reizsituation hat und sich nicht im Wert von τ_0 widerspiegelt. Nachdem die Stimuli nach diesem Kriterium geordnet wurden, konnte ein fester Zusammenhang erkannt werden. Dadurch wird ermöglicht, für jede dargebotene Reizsituation gute Prognosen für die entsprechende Bewertung zu machen. Dies ist im Ergebnisteil ausführlich dokumentiert.

2.4.3. Die Bedeutung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_{1i}

Die veränderte Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit im invertierten Betrachtungsmodus und deren Quantifizierung stellen die entscheidende Aufgabenstellung der vorliegenden Untersuchungen dar.

Das bisher beschriebene Verfahren wird auch bei diesem Teil der Arbeit eingesetzt. Wie bei τ_1 wird auch bei τ_{1i} ein Vergleich der Rangfolge nach Remissionsgrad mit der Rangfolge nach wahrgenommener Oberflächenhelligkeit durchgeführt, jetzt allerdings im invertierten Betrachtungsmodus. Die im invertierten Betrachtungsmodus wahrgenommene Reihenfolge nach Oberflächenhelligkeit wird als empirische Sequenz bei Inversion bezeichnet.

Aufgrund der veränderten Wahrnehmung bei Inversion der vvv-Figur erwarten wir eine abweichende Rangfolge nach wahrgenommener Oberflächenhelligkeit. Die Inversion hat jedoch nur eine begrenzte Auswirkung auf die Wahrnehmung. Um durch Inversion eine veränderte Rangfolge zu bewirken, müssen die Differenzen der Remissionsgrade der verwendeten Graupapiere entsprechend gewählt werden. Eine geeignete Remissionsgradabstufung wurde durch Vorversuche ermittelt. Der Remissionsgradstufenfaktor von 1,2 erfüllt die geforderte Voraussetzung. Der Vergleich von τ_1 und τ_{1i} ermöglicht eine quantitative Beschreibung der Konsequenzen der räumlichen Inversion für die Helligkeitskonstanzleistung.

2.4.4. Die Bedeutung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_{1a}

Um weitere Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen räumlicher Information und Helligkeitskonstanzleistung zu erhalten wird ein weiteres Experiment durchgeführt.

Die räumliche Information wird in diesem Experiment durch die in Abschnitt 2.1.3. *Der Versuchsaufbau* beschriebenen Bedingungen ausgeblendet. Der hierdurch entstehende

Stimulus besteht aus sechs vertikal angeordneten grauen Flächen, die durch die fehlende räumliche Information als flach liegend erscheinen.

Die sechs Flächen sollen nun in der gleichen Weise nach Oberflächenhelligkeit geordnet werden. Die Reihung wird selbstverständlich im normalen Betrachtungsmodus vorgenommen, denn die Inversion dieses als flach wahrgenommenen Objektes ist nicht möglich. Wegen der ausgeblendeten räumlichen Information wird der entsprechende Rangkorrelationskoeffizient aus empirischer und tatsächlicher Sequenz τ_{ia} genannt. Der Vergleich von τ_{ii} und τ_{ia} erweist sich für die Interpretation des Inversionsphänomens als besonders aufschlußreich.

2.4.5. Einschränkungen durch die Verwendung von Kendall's τ

Wir müssen berücksichtigen, daß Kendall's τ nur die Korrelation zweier Sequenzen bezüglich ihrer Rangfolge bestimmt, die Absolutwerte der quantifizierten Merkmale werden jedoch nicht berücksichtigt. Die Anwendung dieses Verfahrens hat daher für die Auswertung der Versuchsergebnisse sowohl Vorteile als auch die im folgenden beschriebenen Einschränkungen.

Der entscheidende Vorteil zeigt sich bei der in dieser Arbeit eingesetzten Versuchsmethode der eigenmetrischen Reihung. Von den Versuchspersonen wird eine Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit erstellt und man vergleicht diese mit der Rangfolge nach Remissionsgrad. Daher ist die Verwendung des Verfahrens zur Bestimmung der Rangkorrelation für die Auswertung der empirischen Sequenzen hervorragend geeignet.

Die Einschränkungen zeigen sich insbesondere bei der quantitativen Beschreibung des Schwierigkeitsgrades verschiedener Anordnungen, also bei der Berechnung von τ_0 . Einerseits berücksichtigt Kendall's τ nicht, ob die Werte der betrachteten Sequenzen äquidistant sind oder ob die Differenzen benachbarter Werte sehr unterschiedlich ausfallen. Daraus ergibt sich, daß zwei völlig verschiedene Sequenzen nach Leuchtdichte identische Korrelation mit einer identischen Sequenz nach Remissionsgrad aufweisen können⁸.

Weiterhin hat Kendall's τ die Eigenschaft, daß dem Wert von τ nicht zu entnehmen ist, ob in den zu vergleichenden Rangfolge beispielsweise ein Wechsel über drei Positionen oder drei

⁸ Hierzu folgendes Beispiel: Die beiden Sequenzen (2,4,6,8,10,12) bzw. (8,9,70,850,1200,10000) besitzen identische Korrelation mit der Sequenz (1,3,5,7,9,11). Alle Sequenzen sind streng monoton steigend. Die Korrelation ist maximal. Kendall's τ hat hier den Wert 1.

Wechsel um je eine Position vorliegen⁹. Daraus ergibt sich, daß zwei verschiedene Anordnungen der Graupapiere gleiches τ_0 besitzen, und daher den gleichen Schwierigkeitsgrad haben sollten, die Anzahl der Fehler in der Bewertung durch die Versuchspersonen jedoch sehr verschieden ausfällt. Es ist also offensichtlich mitentscheidend für den tatsächlichen Schwierigkeitsgrad, auf welche Weise τ_0 zustande kommt.

Darüber hinaus ist im Intervall $[-1;1]$ nur eine bestimmte Anzahl an diskreten Werten möglich, deren Abstände um so größer werden, je kürzer die Länge der verwendeten Sequenzen ist. Bei den hier verwendeten 6-er Sequenzen ergeben sich mögliche Werte für τ von 1,0 ; 0,87 ; 0,73 ; 0,6 ; 0,47 ; 0,33 ; 0,2 ; 0,07 ; -0,07 ; -0,2 ; -0,33 ;-1,0. Die Differenz zwischen benachbarten Werten liegt bei ca. 0,13. Bei einer Sequenzlänge von beispielsweise 22 Werten ist der Abstand zwischen benachbarten Werten bereits kleiner als 0,01. Daher haben wir aufgrund der 6-er Sequenzen zur Quantifizierung der untersuchten Fragestellung nur ein relativ grobes Raster zur Verfügung. Es können jedoch keine längeren Sequenzen verwendet werden, da die Inversion von mehr als sechs Graupapieren von den Versuchspersonen nur schwer stabil gehalten werden kann.

Wenn nun bei einer bestimmten Parameterkombination Leuchtdichtewerte sehr dicht benachbart sind, dann kann bereits eine minimale Variation der Beleuchtungsasymmetrie die Rangfolge nach Leuchtdichte ändern. Der Wert von τ_0 springt dann zum nächstgrößeren oder nächstkleineren Wert im vorgegebenen Raster. Die geringe Variation der Beleuchtungssituation kann jedoch für das visuelle System durchaus unerschwellig, d.h. ohne Konsequenzen für die Bewertung der Oberflächenhelligkeit sein. Das bedeutet, daß zwei Stimuli, die nach diesem Verfahren einen unterschiedlichen Schwierigkeitsgrad besitzen sollten, identisch bewertet werden, also den gleichen Schwierigkeitsgrad aufweisen.

Eine weitere Einschränkung ergibt sich bei dem Bereich möglicher Beleuchtungsasymmetrien, die durch den Wert von Kendall's τ erfaßt werden. Die Variation der Schattenstärke hat Einfluß auf den Wert von τ_0 , da sich die Leuchtdichtewerte auf der Schattenseite und damit

⁹ Die beiden Rangfolgen (2,1,4,3,6,5) mit 3 Wechseln um eine Position und (2,3,4,1,5,6) mit einem Wechsel um drei Positionen besitzen identische Korrelation mit der Rangfolge (1,2,3,4,5,6). Kendall's τ hat in beiden Fällen den Wert 0,6.

auch die Rangfolge nach Leuchtdichte verändert. Größere Beleuchtungsasymmetrien führen hierbei zu kleineren Werten von τ_0 . Wird bei der Schattenstärke jedoch ein bestimmter Wert überschritten, dann hat jede weitere Vergrößerung der Schattenstärke keinen Einfluß mehr auf τ_0 . Dieser Wert entspricht genau dem Quotienten aus dem höchsten und dem geringsten Remissionsgrad der Graupapiere auf der vvv-Figur. Ist der Quotient aus den Remissionsgraden z.B. 2,5 (dies entspricht den gewählten Bedingungen), dann ist für eine beliebige Anordnung der Graupapiere bei Schattenstärken größer als 2,5 der Wert von τ_0 identisch. Der Rangkorrelationskoeffizient ändert sich nicht mehr, gleichgültig ob wir eine Schattenstärke von 3, 10 oder 30 einstellen.

Daß diese verschiedenen Reizsituationen unterschiedlich schwierig zu bewerten sind, ist nachvollziehbar und konnte empirisch bestätigt werden. Wenn man den Schwierigkeitsgrad der Reizsituation durch τ_0 beschreiben will, dann sollten die eingestellten Beleuchtungsasymmetrien den Quotienten aus höchstem und geringsten Remissionsgrad eines Graupapiersatzes nicht überschreiten. Wenn man jedoch Versuche mit größeren Schattenstärken durchführt, dann müssen die Remissionsgrade der Graupapiere entsprechend angepasst werden. In einem ergänzenden Experiment soll nun geklärt werden, ob gegebene Anordnungen der Graupapiere identisch bewertet werden, wenn man die Schattenstärke deutlich vergrößert, die Abstufung der Remissionsgrade der Graupapiere jedoch entsprechend anpaßt. Diese parallele Variation der Parameter läßt den Wert von τ_0 unverändert, die resultierende Bewertung durch die Versuchspersonen und damit der Wert von τ_1 sollten daher identisch sein.

Diese Eigenschaften von Kendall's τ und die resultierenden Einschränkungen sind sowohl bei der Wahl der Parameter der eingesetzten Stimuli als auch bei der Diskussion der Ergebnisse zu berücksichtigen. Unter diesen Voraussetzungen ist Kendall's τ zu einer quantitativen Beschreibung der Helligkeitswahrnehmung sehr gut geeignet.

2.5. Die Unterteilung der verschiedenen Anordnungen in Permutationsgruppen

Die 720 verschiedenen Anordnungen der Graupapiere entstehen durch Vertauschen der Reihenfolge der Graupapiere und werden daher auch als Permutationen bezeichnet. Um zu vermeiden, daß unsystematisch ausgewählte Permutationen die Allgemeingültigkeit der Versuchsergebnisse einschränken, werden zunächst die Unterschiede zwischen verschiedenen Permutationen charakterisiert. Dann wird eine repräsentative Auswahl von Permutationen getroffen, da den Versuchspersonen nicht zugemutet werden kann, alle 720 Anordnungen für zwei Sätze von Graupapieren in beiden Betrachtungsmodi zu bewerten.

Aufgrund der asymmetrischen Beleuchtungssituation ergeben sich auf der vvv-Figur Licht- und Schattenseiten. Ein beliebiges Graupapier besitzt jedoch bei Präsentation auf jeder der drei Lichtseiten die gleichen Leuchtdichtewerte. Daher sind alle Lichtseiten als äquivalent zu betrachten. Gleiches gilt für die Schattenseiten.

Alle 720 (6!) Permutationen entstehen also durch eine Verteilung der sechs Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten. Mathematisch kann dies als eine Verteilung von sechs Elementen (Graupapieren) auf zwei Untermengen (Licht- bzw. Schattenseiten) mit je drei Elementen beschrieben werden. Hierfür existieren $[(6!)/(3!)(3!)]$, also 20 verschiedene Möglichkeiten.

Daher können die 720 Permutationen in 20 Permutationsgruppen eingeteilt werden. In einer Gruppe befinden sich immer die gleichen Graupapiere auf den Licht- bzw. Schattenseiten. Jede Permutationsgruppe besteht somit aus 36 Permutationen $(3!)^2$, da jede der sechs Graustufen nur auf eine beliebige von je drei Licht- bzw. Schattenseiten festgelegt wird.

Da jede der 36 Permutationen einer Permutationsgruppe bezüglich der resultierenden Leuchtdichten äquivalent ist, werden die Permutationsgruppen auch als Äquivalenzgruppen bezeichnet. In einer Äquivalenzgruppe wird demnach jedem Graupapier und damit jedem Remissionsgrad ein Leuchtdichtewert zugeordnet, der innerhalb der Gruppe invariant ist. Man kann leicht nachvollziehen, daß die Berechnung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 , also der Vergleich der Rangfolge nach Leuchtdichte mit der Rangfolge nach Remissionsgrad innerhalb einer Äquivalenzgruppe zu identischen Werten führt. Diese logische Schlußfolgerung konnte mit Hilfe der Mathematik-Software MATHEMATICA 4.0 bestätigt werden.

Diese Software besitzt eine Funktion, die zunächst alle 720 Permutationen erzeugt. Dann werden für alle Permutationen die Produkte aus dem Remissionsgrad der Graupapiere und einem der Schattenstärke entsprechenden Faktor gebildet. Daraus ergibt sich eine Sequenz nach errechneter Leuchtdichte. Für diese Sequenz und der entsprechenden Sequenz nach Remissionsgrad wird der Wert von Kendall's τ berechnet. Auch die Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten kann in MATHEMATICA direkt durchgeführt werden. Wenn nun alle Permutationen durch eine Sortierfunktion des Programms nach Werten von τ_0 geordnet werden, ergibt sich die erwartete Einteilung in Gruppen.

Die Invarianz der Werte von τ_0 für alle Permutationen oberhalb einer bestimmten Beleuchtungsasymmetrie konnte auch mit Hilfe dieses Programm bestätigt werden. Das verwendete MATHEMATICA-Arbeitsblatt wurde von Herrn Dr. Schramme geschrieben und befindet sich im Anhang.

2.5.1. Die 20 Permutationsgruppen und ihre Rangkorrelationskoeffizienten

Der Wert von τ_0 ist nicht nur von der Anordnung der Graupapiere abhängig, sondern auch von der Abstufung der Remissionsgrade sowie der Beleuchtungsasymmetrie. Werden Remissionsgrade und Schattenstärke konstant gehalten, dann kann für jede der 20 Permutationsgruppen der Wert von τ_0 berechnet werden. Dabei können verschiedene Permutationsgruppen den gleichen Wert von τ_0 besitzen¹⁰. Die Gruppen werden nun nach absteigenden Werten von τ_0 geordnet, wobei die Reihenfolge der Gruppen mit gleichem τ_0 durch ein Sortierkriterium des verwendeten Computerprogramms bestimmt wird.

Äquivalenzgruppe Nr.1 ist diejenige Gruppe, bei der die drei Graupapiere mit den höheren Remissionsgraden auf den Lichtseiten liegen, die Papiere mit den geringeren Remissionsgraden auf den Schattenseiten. Hier ist der Wert von τ_0 für alle Schattenstärken gleich eins, da die Rangfolge der Graupapiere nach Remissionsgrad und die entsprechende Rangfolge nach Leuchtdichte immer identisch sind.

¹⁰ Ein bestimmter Wert von τ_0 kann auf unterschiedliche Weise zustande kommen. Siehe Abschnitt 2.4.5. *Einschränkungen durch die Verwendung von Kendall's τ*

Der Sprung der Leuchtdichtewerte beim Übergang von den Licht- zu den Schattenseiten wird jedoch für größere Schattenstärken entsprechend größer. Gruppe 1 ist die bereits erwähnte Kontrollgruppe, welche fehlerlos bewertet werden sollte. Gruppe Nr. 20 hat eine entsprechend entgegengesetzte Verteilung der Graupapiere. Bei dieser liegen die drei Papiere mit den höheren Remissionsgraden auf den Schattenseiten, die drei Papiere mit den geringeren Remissionsgraden auf den Lichtseiten. Sie ist diejenige Gruppe, bei der sich für beliebige Schattenstärken immer die kleinsten Werte von τ_0 ergeben.

Eine inverse Korrelation der Sequenz nach Remissionsgrad und der Sequenz nach Leuchtdichte mit einem τ_0 von -1 ist jedoch bei der vorliegenden Versuchsanordnung nicht möglich. Der kleinste mögliche Wert von τ_0 ist -0,2. Dies wird im folgenden erläutert. Um die Darstellung zu vereinfachen, werden den Graupapieren nach abnehmendem Remissionsgrad die Ziffern 1 bis 6 zugeordnet. Graupapier 1 ist dabei das Graupapier mit dem höchsten Remissionsgrad eines Satzes, Graupapier 6 besitzt den geringsten Remissionsgrad. Bei einer Schattenstärke, welche den Quotienten aus den Remissionsgraden der Graupapiere 1 und 6 übertrifft, ist bei Gruppe 20 die resultierende Leuchtdichte des Graupapiers 6 höher, als diejenige von Graupapier 1.

Trotzdem besitzt Graupapier 4 eine höhere Leuchtdichte als die Papiere 5 und 6, da bei Gruppe Nr. 20 die Papiere 4, 5 und 6 auf den Lichtseiten liegen. Wenn man die Wertepaare (Remissionsgrad ; Leuchtdichte) der 6 Graupapiere nach Remissionsgrad sortiert und dadurch eine nach Remissionsgrad geordnete Rangfolge der Form (1,2,3,4,5,6) erstellt, ergibt sich eine entsprechend zugehörige Rangfolge nach Leuchtdichte der Form (4,5,6,1,2,3). Der Rangkorrelationskoeffizient aus beiden Rangfolgen hat den bereits genannten Wert von -0,2. Um einen Rangkorrelationskoeffizienten von -1 zu erhalten, muß die zugehörige inverse Rangfolge nach Leuchtdichte die Form (6,5,4,3,2,1) aufweisen. Dies wäre jedoch nur dann möglich, wenn man jede der sechs Flächen der vvv-Figur unabhängig mit verschiedenen Lichtintensitäten beleuchtet.

In Tabelle 3 auf der folgenden Seite ist die Verteilung der Graupapiere für die 20 Permutationsgruppen dargestellt. Die Ziffern 1-6 sind hierbei die Ränge der Graupapiere nach Remissionsgrad. Ist ein Feld der Tabelle weiß unterlegt, liegt das entsprechende Graupapier auf einer Lichtseite, grauer Untergrund hingegen soll eine Schattenseite symbolisieren. In den beiden unteren Zeilen befinden sich die errechneten Werte von τ_0 bei einer Schattenstärke von 2 bzw. 3. Das Verhältnis der Remissionsgrade der Papiere 1 und 6 ist hier 2,5 zu 1.

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Rang	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
der Grau-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
papiere	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
nach	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Remis-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
sionsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
τ_0 bei 2	1,00	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,20
τ_0 bei 3	1,00	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,20	0,20	0,20	0,07	0,07	-0,07	-0,2

Tabelle 3: Verteilung der Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten für die 20 Äquivalenzgruppen sowie die Werte von τ_0 für Schattenstärke 2 bzw. 3.

Das folgende Diagramm 1 ist eine Darstellung der Rangkorrelationskoeffizienten aller 720 Permutationen für eine Schattenstärke von 2. Man beachte, daß jeweils alle 36 Permutationen aus einer Gruppe identische Rangkorrelationskoeffizienten besitzen.

Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 der 720 Permutationen

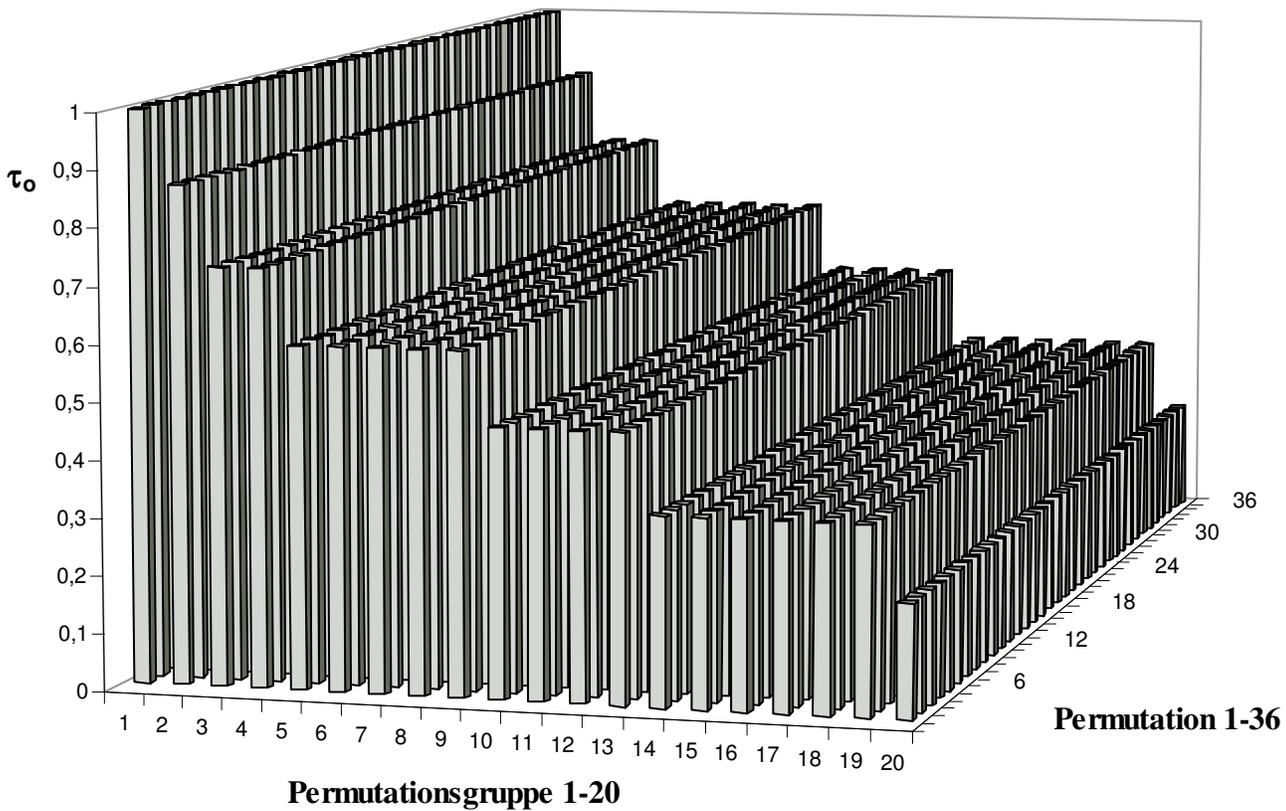


Diagramm 1: Die Rangkorrelationskoeffizienten der 720 Permutationen bei Schattenstärke 2

In den Versuchsreihen wird nun ein Querschnitt durch alle Permutationsgruppen getestet. Dabei werden aus jeder Gruppe 6 Permutationen verwendet, die nach den im nächsten Abschnitt beschriebenen Kriterien ausgewählt wurden. Diese sechs Permutationen unterscheiden sich im lokalen Streulichteinfluß, der durch die wechselseitige Beleuchtung gegenüberliegender Flächen entsteht. Weiterhin werden auch alle 36 Permutationen von zwei ausgewählten Gruppen getestet um zu bestimmen, wie homogen die Bewertungen innerhalb einer Gruppe sind.

In Diagramm 2 wird die Entwicklung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 bei Variation der Schattenstärke dargestellt. Der triviale Fall symmetrischer Beleuchtung ist durch die hintere Säulenreihe dargestellt. Diesem Fall wird die Schattenstärke eins zugeordnet. τ_0 hat unter diesen Bedingungen bei allen Permutationen den Wert eins, denn die Rangfolge nach Remissionsgrad und die entsprechende Rangfolge nach Leuchtdichte sind bei symmetrischer Beleuchtung immer identisch. Bei einer Schattenstärke von zwei ist der kleinste mögliche Wert von τ_0 gleich 0,2. Die entsprechenden Werte sind durch die mittlere Säulenreihe dargestellt und stimmen mit der ersten Reihe von Diagramm 1 überein. Bei einer Schattenstärke von drei ergeben sich die Werte für τ_0 , die durch die vorderste Säulenreihe dargestellt sind. Man erkennt, daß τ_0 einen Minimalwert von $-0,2$ erreicht.

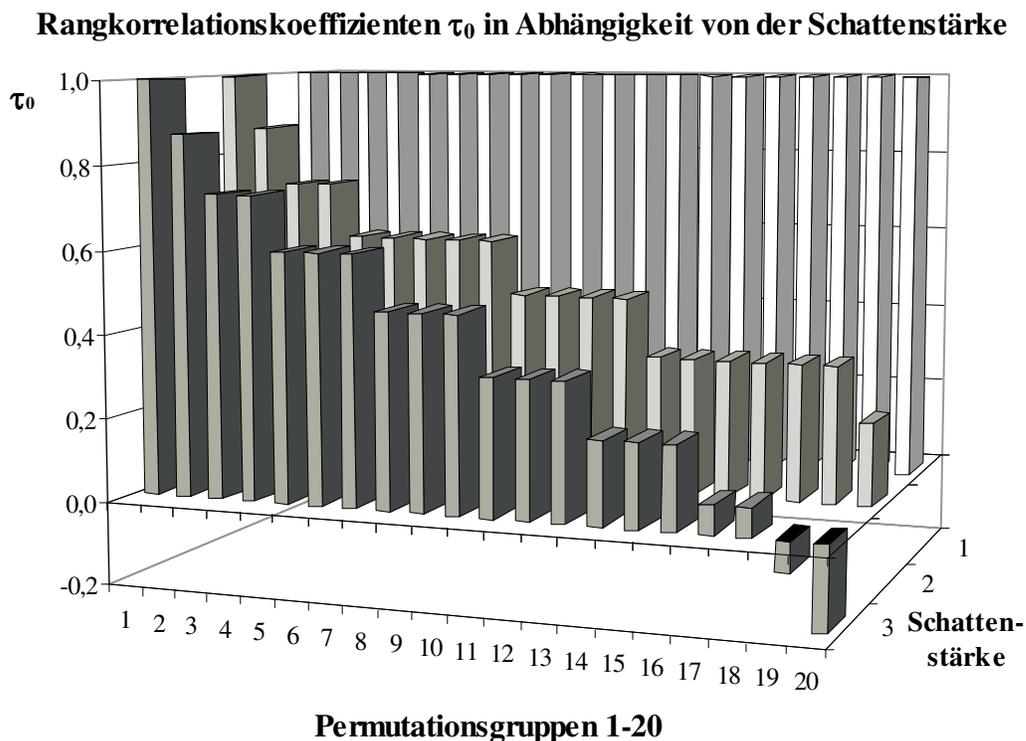


Diagramm 2: Die Rangkorrelationskoeffizienten der 20 Permutationsgruppen für verschiedene Schattenstärken. Auf die Darstellung der Werte von τ_0 für größere Schattenstärken wird verzichtet, da τ_0 für alle Schattenstärken oberhalb von 2,5 gleich ist. Dieser Wert entspricht dem Quotienten aus dem höchsten und dem geringsten Remissionsgrad eines Graupapiersatzes. Die Invarianz wurde bereits in Abschnitt 2.4.5. *Einschränkungen durch die Verwendung von Kendall's τ* beschrieben und mit Hilfe des MATHEMATICA-Arbeitsblattes im Anhang bestätigt.

2.6. Globales und lokales Streulicht

Die Einteilung der Permutationen in Äquivalenzgruppen ergibt sich aufgrund der Verteilung der Papiere auf die Licht- und Schattenseiten der vvv-Figur. Die Äquivalenz der Permutationen einer Gruppe setzt demnach voraus, daß die Beleuchtungsintensitäten einerseits auf den drei Lichtseiten sowie auch auf den drei Schattenseiten identisch sind. Innerhalb einer Gruppe sollten die Graupapiere daher identische Leuchtdichtewerte besitzen. Dies ist jedoch nur näherungsweise richtig. Die Einteilung in Äquivalenzgruppen ist zwar durchaus sinnvoll, die im folgenden beschriebene Einflußgröße muß jedoch berücksichtigt werden.

Aufgrund ihrer unmittelbaren Nachbarschaft beleuchten sich die jeweils gegenüberliegenden zwei Objektoberflächen der vvv-Figur gegenseitig. Diese wechselseitige Beleuchtung durch das von den Nachbarflächen remittierte Licht hat eine Leuchtdichtezunahme der Graupapiere zur Folge. Die Leuchtdichtezunahme ist aufgrund verschiedener Nachbarschaftsverhältnisse innerhalb einer Permutationsgruppe unterschiedlich stark ausgeprägt. Dieser zunächst unerwünschte Effekt wird als lokaler Streulichteffect bezeichnet. Da er bei den vorliegenden Versuchsbedingungen unvermeidlich ist, wird der Einfluß des lokalen Streulichtes auf die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit als ein Teilaspekt im Rahmen dieser Arbeit untersucht.

Bevor jedoch die Leuchtdichtezunahme durch das lokale Streulicht bei den verwendeten Graupapieren quantifiziert wird, soll zunächst das sogenannte globale Streulicht charakterisiert werden. Dieses ist in unserer gewohnten Umwelt für die indirekte Beleuchtung der Schattenseiten von Objekten verantwortlich und kann verschiedene Ursachen haben. Unter freiem, wolkenlosem Himmel entsteht das globale Streulicht durch das von der Atmosphäre gestreute Sonnenlicht, das die der Sonne abgewandten Objektseiten beleuchtet.

Im Gegensatz zum direkten Sonnenlicht ist dieses im kurzwelligen Bereich dominant und wird von uns daher als bläulich wahrgenommen. Wir werden also zusätzlich zu den verschiedenen Lichtintensitäten für die Beleuchtung von Licht- und Schattenseiten der Objekte auch noch mit unterschiedlichen spektralen Strahlungsleistungsverteilungen der direkten und indirekten Lichtquellen konfrontiert.

In geschlossenen Räumen werden die Schattenseiten von Objekten durch das an Wänden, Decken sowie auch von anderen Objekten reflektierte Licht beleuchtet. Auch hier sind die spektralen Strahlungsleistungsverteilungen von direkter und indirekter Beleuchtung meistens unterschiedlich. Weiterhin ist das Verhältnis der Lichtintensitäten von direkter und indirekter Beleuchtung variabel, da die Bedingungen für Streulichteffekte unterschiedlich ausfallen. Um in den durchgeführten Experimenten nicht auf eine bestimmte, aus dem Streulicht des Versuchsaufbaus resultierende Lichtintensität auf den Schattenseiten festgelegt zu sein, wurde ein geeigneter Versuchsaufbau entwickelt. Dieser ist in Abschnitt 2.1.3. *Der Versuchsaufbau* beschrieben und wird an dieser Stelle nur bezüglich der Streulichtproblematik behandelt: Die Versuchskammer ist vollständig mit mattschwarzem Filzstoff ausgekleidet. Das hierdurch auf ein Minimum reduzierte Streulicht von Wänden und Decke der Versuchskammer wird durch eine zweite Lichtquelle ersetzt. Diese befindet sich auf der anderen Seite der Kammer und ist über die gesamte Tiefe der Versuchskammer ausgedehnt. Die Lichtquelle wird zusätzlich mit einer pergamentartigen, lichtdurchlässigen Streufolie aus Grafikerpapier verkleidet. Die Beleuchtung der Schattenseiten der vvv-Figur ist durch diese Streufolie sehr homogen und frei von scharfen Schattenwürfen. Sie ist daher bei entsprechend geringen Lichtintensitäten nicht von einer indirekten Beleuchtung zu unterscheiden. Die stufenlose Einstellbarkeit der beiden Lichtquellen ermöglicht beliebige Schattenstärken, dadurch kann der Schwierigkeitsgrad der Reizsituationen variiert werden.

Der globale Streulichteffekt unterliegt demnach der Kontrolle des Versuchsleiters, der lokale Streulichteffekt hingegen ist eine durch die Remissionsgrade der jeweiligen Streulichtpaare vorgegebene Einflußgröße. Um dessen Einfluß auf die Wahrnehmung zu untersuchen, muß dieser Effekt zuvor quantitativ erfaßt werden. Entscheidend für die Leuchtdichtezunahme sind die Remissionsgrade der jeweiligen Streulichtpaare, also der Papiere, die sich gegenseitig beleuchten. Die Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers durch Streulicht ist bei Nachbarschaft

eines Papiers mit hohem Remissionsgrad größer, als wenn diesem ein Papier mit geringem Remissionsgrad gegenüber liegt.

Innerhalb einer Permutationsgruppe existieren 36 Permutationen, jedoch nur sechs verschiedene Anordnungen der Graupapiere, die sich bezüglich der Streulichtpaare unterscheiden. Das folgende Beispiel soll dies verdeutlichen:

Bei Gruppe Nr. 1 liegen die Papiere 1, 2 und 3 auf den Lichtseiten, demzufolge können jedem dieser drei Papiere nur die verbleibenden Papiere 4, 5 und 6 gegenüberliegen. Legt man nun ein Streulichtpaar fest, z.B. 1 und 4, beschrieben durch das 2-er Tupel (1;4), dann verbleiben noch zwei Möglichkeiten. Entweder die Kombination (2;5) und (3;6) oder (2;6) und (3;5). Insgesamt ergeben sich somit 3×2 mögliche Streulichtpaarkombinationen. Dies gilt natürlich in allen 20 Gruppen. Jede dieser sechs Streulichtpaarkombinationen kann nun noch sechs mal unter Beibehaltung der jeweiligen Streulichtpaare permutiert werden. Hierbei ändern sich die Leuchtdichtewerte jedoch nicht mehr, da aufgrund der beibehaltenen Streulichtpaare auch die entsprechenden Leuchtdichtezunahmen identisch sind. Diese 6×6 Möglichkeiten ergeben die 36 Permutationen einer Gruppe. In den durchgeführten Versuchsreihen sollen aus jeder Permutationsgruppe mehrere Permutationen getestet werden. Daher ist es sinnvoll, daß man hierbei die sechs Permutationen mit den verschiedenen Streulichtpaarkombinationen verwendet. Diese stellen eine repräsentative Auswahl aus einer Permutationsgruppe dar und reduzieren die Anzahl der zu testenden Permutationen auf ein den Versuchspersonen zumutbares Maß.

Um für alle möglichen Graupapierkombinationen die Leuchtdichtezunahme zu ermitteln, wird jedes Graupapier zunächst ohne einen gegenüberliegenden Streulichtpartner vermessen. Dazu wird das Graupapier unter beibehaltener Schattenstärke auf die vvv-Figur gelegt und die gegenüberliegende Seite des Objektes wird mit schwarzem Samtstoff bedeckt. Dieser streut so gut wie kein Licht auf das zu vermessende Graupapier. Die hierbei gemessene Leuchtdichte stellt den Basiswert ohne lokalen Streulichteinfluß dar. Nun werden die jeweils verbleibenden fünf Graupapiere eines Satzes auf die gegenüberliegende Objektseite gelegt und die resultierenden Leuchtdichten bestimmt. Dann wird für jede mögliche Streulichtpaarkombination die auf den Basiswert bezogene prozentuale Leuchtdichtezunahme berechnet. Diese Prozedur wird sowohl für die auf der Schattenseite liegenden Graupapiere durchgeführt, welche durch die gegenüber auf einer Lichtseite liegenden Graupapiere beleuchtet werden, als

auch umgekehrt. Die prozentualen Leuchtdichtezunahmen werden für beide Graupapiersätze ermittelt.

Daraus ergeben sich die folgenden vier 6x6-Matrizen die alle möglichen Leuchtdichtezunahmen in Prozent enthalten. Die Hauptdiagonale jeder Matrix ist leer, da sich kein Graupapier als Streulichtpartner selbst gegenüberliegen kann. Die fett gedruckten Graupapiernummern entsprechen den hellen bzw. dunklen Graupapieren, deren Leuchtdichtezunahme gemessen wird. Die kursiv gedruckten Nummern entsprechen den jeweiligen Streulichtpartnern. Sind die Nummern unterstrichen, liegen die entsprechenden Papiere auf einer Lichtseite, ansonsten befinden sie sich auf einer Schattenseite.

Helle Graupapiere im Schatten, durch das Streulicht von den Papieren auf den <u>Lichtseiten</u> beeinflusst							Helle Graupapiere im Licht, durch das Streulicht von den Papieren auf den Schattenseiten beeinflusst						
Nr.	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	Nr.	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1		54	44	38	31	25	<u>1</u>		18	15	13	11	8,7
2	60		41	35	29	24	<u>2</u>	22		15	13	12	9,6
3	58	49		33	28	21	<u>3</u>	22	18		13	9,9	8,1
4	63	52	43		30	24	<u>4</u>	22	18	15		11	8,7
5	66	58	47	39		26	<u>5</u>	22	18	16	13		9,2
6	70	60	47	40	33		<u>6</u>	22	18	15	13	12	
Dunkle Graupapiere im Schatten, durch das Streulicht von den Papieren auf den <u>Lichtseiten</u> beeinflusst							Dunkle Graupapiere im Licht, durch das Streulicht von den Papieren auf den Schattenseiten beeinflusst						
Nr.	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>	Nr.	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
1		16	13	10	8,3	6,7	<u>1</u>		5,7	4,5	3,7	2,8	1,2
2	21		14	12	9,9	7,5	<u>2</u>	7,8		5,9	5,1	4,4	2,4
3	23	20		13	11	9	<u>3</u>	8,7	6,6		5	3,8	3,1
4	26	22	17		11	9	<u>4</u>	8,8	6,9	5,4		4,2	3,1
5	28	23	19	16		9,3	<u>5</u>	9	6,6	5,7	4,7		3,8
6	28	23	19	15	13		<u>6</u>	12	9,2	6,1	4,3	3,1	

Tabelle 4: Prozentuale Leuchtdichtezunahme für alle möglichen Graupapierkombinationen

Die höchste Leuchtdichtezunahme ergibt sich bei Papier Nr. 6 der hellen Graupapiere, das im Schatten liegt und von Papier Nr. 1 auf einer Lichtseite angestrahlt wird. Die Leuchtdichte erhöht sich in diesem Fall relativ zum Basiswert ohne Streulichtpartner um 70% (siehe 1. Matrix unten links).

Grundsätzlich zeigt sich, daß die prozentuale Leuchtdichtezunahme bei den hellen Graupapieren deutlich größer ist, obwohl in beiden Graupapiersätzen identische Remissionsgradabstufungen vorliegen.

Da bei identischer Anordnung der Graupapiere 1 bis 6 in beiden Sätzen identische Remissionsgradverhältnisse vorliegen, erwartet man eine identische relative also prozentuale Leuchtdichtezunahme. Daß die Leuchtdichtezunahme offensichtlich nicht linear mit dem Remissionsgrad der Graupapiere anwächst, erscheint zunächst unverständlich.

Der Grund für die vorliegende Nichtlinearität ist, daß Licht zwischen zwei benachbarten Oberflächen mehrfach reflektiert wird. Betrachten wir nun in einem stark vereinfachten Beispiel zwei verschiedene Streulichtpaare, mit deren Hilfe der Zusammenhang prinzipiell dargestellt werden soll. Die Remissionsgrade des einen Paares seien 0,1 und die des anderen Paares 0,5. Weiterhin nehmen wir an, daß beim ersten Paar immer ein Zehntel der einfallenden Lichtmenge, beim zweiten Paar die Hälfte der einfallenden Lichtmenge auf die gegenüberliegende Fläche gestreut wird. Das ist natürlich nur in diesem vereinfachten Rechenbeispiel der Fall. Ein Remissionsgrad von 0,1 soll bedeuten, daß ein Zehntel der einfallenden Lichtmenge remittiert wird. Dies gilt einerseits nur im Vergleich zu einer normierten Standardfläche, weiterhin wird das remittierte Licht nicht vollständig auf die gegenüberliegende Oberfläche gestreut.

Die folgende Näherung soll verdeutlichen, wie sich die Leuchtdichtezunahme nach der dritten Mehrfachreflektion entwickelt hat. Dann brechen wir die Entwicklung ab. Beim ersten Streulichtpaar wird zuerst ein Zehntel, dann ein Hundertstel, danach ein Tausendstel der zu Beginn einfallenden Lichtmenge reflektiert, wenn nur eine der beiden Seiten direkt beleuchtet wird. Nur die erste Rückreflektion, also die dritte der Mehrfachreflektionen wird jedoch zur Leuchtdichtezunahme der betrachteten Oberfläche beitragen. Die Summe aus der ersten und der dritten Reflektion ist demnach 0,101. Wir beziehen dies auf den Basiswert von 0,1 indem wir durch diesen dividieren und erhalten einen Wert von 1,01. In diesem Fall ergibt sich eine Leuchtdichtezunahme von 1 %.

Beim zweiten Streulichtpaar wird zuerst die Hälfte, dann ein Viertel und dann ein Achtel der jeweiligen Lichtmenge reflektiert. Davon bleiben als wirksamer Beitrag wiederum nur die erste und die dritte Reflektion. Die Summe ergibt 0,625. Dividiert durch den Basiswert von 0,5 erhalten wir 1,25. Dies entspricht einer Leuchtdichtezunahme von 25%.

Im ersten Fall wird der Einfluß des Streulichtes nach einigen Reflektionen sehr gering, im zweiten Fall jedoch nicht, da hier nach jeder Reflektion ein wesentlich höherer Restbeitrag übrig bleibt.

Die beobachtete Nichtlinearität kann demnach schlüssig auf die mehrfache Reflektion zurückgeführt werden. In dieser sehr vereinfachten Darstellung wird die direkt einfallende Lichtintensität auf den jeweiligen Streulichtpartner nicht berücksichtigt.

Dieser Zusammenhang gilt jedoch prinzipiell auch bei beliebigen Beleuchtungssituationen und findet sich in einer mathematisch formulierten Darstellung im Anhang. Die in den vier Matrizen dargestellten Leuchtdichtezunahmen ergeben sich bei einer Schattenstärke von 2.

Weiterhin ist die Leuchtdichtezunahme in den Vertiefungen der vvv-Figur größer, als im oberen Bereich der Flächen, da sich die Papiere im angrenzenden Bereich aufgrund ihrer Nähe gegenseitig stärker beeinflussen. Da sich hierdurch ein Leuchtdichtegradient über den Oberflächen ergibt, werden alle Leuchtdichtewerte in der Mitte der jeweiligen Oberfläche gemessen. Der Leuchtdichtegradient ist in einigen Fällen so groß, daß die Leuchtdichte am unteren Rand der Papiere etwa 30% über derjenigen am oberen Rand liegt. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn Papier 1 der hellen Graupapiere auf einer Lichtseite das Papier 6 auf einer Schattenseite beleuchtet. Die aus dem Gradienten resultierende Leuchtdichtedifferenz von 30% entspricht in diesem Fall eigentlich einer Abweichung des zentral gemessenen Wertes von $\pm 15\%$ bei einer Leuchtdichtezunahme durch das lokale Streulicht von 70%. Der Gradient wurde von den Versuchspersonen jedoch nicht als störend empfunden, meistens wurde er nicht einmal bemerkt.

2.6.1. Der durch lokales Streulicht bedingte kritische Fall

Durch das lokale Streulicht resultiert auf den Oberflächen der vvv-Figur eine variable Leuchtdichtezunahme. Diese ist bei den hellen Graupapieren und insbesondere auf deren Schattenseiten besonders stark ausgeprägt. Die minimale bzw. maximale Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers ergibt sich, wenn diesem als Streulichtpartner das Graupapier mit dem geringsten bzw. höchsten Remissionsgrad gegenüberliegt.

Wenn die Differenz zwischen der maximalen Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers mit geringerem Remissionsgrad und der minimalen Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers mit

höherem Remissionsgrad größer ist als die Differenz der Remissionsgrade der Graupapiere, dann tritt der sogenannte kritische Fall ein.

Dieser ergibt sich unter den vorliegenden Bedingungen dann, wenn zwei nach Remissionsgrad aufeinander folgende Graupapiere auf den Schattenseiten der vvv-Figur liegen und als Streulichtpartner auf den Lichtseiten Papiere besitzen, deren Remissionsgrad möglichst unterschiedlich ist. Dann kann für das Graupapier mit dem geringeren Remissionsgrad eine höhere Leuchtdichte resultieren.

Daraus folgt, daß aufgrund des unterschiedlich starken lokalen Streulichteffekts innerhalb der drei Schattenseiten die Rangfolge nach Remissionsgrad nicht vollständig mit der Rangfolge nach Leuchtdichte korreliert. Dies hat selbstverständlich Konsequenzen für den Wert von τ_0 , der in diesem Fall entsprechend kleiner wird.

Ein konkretes Beispiel mit Werten aus der 1. Matrix (siehe Tabelle 4, Seite 41) soll dies verdeutlichen: Bei den hellen Graupapieren befinden sich die Papiere 3 und 4 auf den Schattenseiten, 1 und 6 hingegen als mögliche Streulichtpartner auf den Lichtseiten. Liegt nun das Papier 4 gegenüber von Papier 1, nimmt seine Leuchtdichte um 63% zu, Papier 3 wird durch die Nachbarschaft von Papier 6 jedoch nur um 21% angehoben. Die Differenz der Leuchtdichtezunahmen liegt bei 42%, Papier 4 hat daher trotz seine geringeren Remissionsgrades eine wesentlich höhere Leuchtdichte als Papier 3.

Wird diese Betrachtung für alle Permutationsgruppen und weiterhin für beide Graupapiersätze getrennt durchgeführt, so zeigt sich, daß der kritische Fall nur bei den hellen Graupapieren auftreten kann, da die Differenz möglicher Leuchtdichtezunahmen bei den dunklen Graupapieren in allen Fällen kleiner als 20% ist. Weiterhin ist der kritische Fall auch bei den hellen Graupapieren nur in einigen der 20 Permutationsgruppen möglich, da hierzu die bereits genannten Bedingungen bezüglich der Verteilung der Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten erfüllt sein müssen. Nur vier der 20 Permutationsgruppen erfüllen diese Bedingungen in der maximalen Ausprägung, vier weitere Gruppen erfüllen dies in etwas schwächerer Weise. Eine vollständige Analyse des Streulichteffektes für alle Permutationsgruppen und für beide Graupapiersätze findet sich im Anhang.

2.6.2. Die Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} und τ_{0b}

Da die Leuchtdichtezunahmen bei verschiedenen Permutationen innerhalb einer Gruppe, insbesondere bei den hellen Graupapieren sehr verschiedenen ausfallen können wird im folgenden zwischen den Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} und τ_{0b} unterschieden. Der Index „g“ steht hierbei für „gemessene“ Leuchtdichten, der Index „b“ steht für „berechnete“ Leuchtdichten.

Um τ_{0b} zu erhalten, wird zunächst für jede Permutationsgruppe berechnet, welche Leuchtdichten aus der Verteilung der Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten resultieren sollten. Dazu werden die Remissionsgrade der Graupapiere auf den Lichtseiten mit einem Faktor multipliziert, der dem Intensitätsverhältnis der beiden Lichtquellen entspricht. Die hieraus resultierenden Rangfolgen nach errechneter Leuchtdichte sind hierbei unabhängig davon, ob man die Remissionsgrade der Graupapiere auf den Schatten- bzw. Lichtseiten beispielsweise mit 1 bzw. 2 oder mit 100 bzw. 200 multipliziert, da eine lineare Transformation der Multiplikatoren die Rangfolge nach berechneter Leuchtdichte invariant läßt. Aus den Rangfolgen der berechneten Leuchtdichten und den entsprechenden Rangfolgen nach Remissionsgrad bestimmen wir nun für jede Permutationsgruppe die zugehörigen Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0b} . Diese berücksichtigen nur die Beleuchtungsasymmetrie im vorhandenen Versuchsaufbau und müssen für andere Intensitätsverhältnisse der Lichtquellen jeweils neu berechnet werden. Diese Prozedur ist identisch mit der Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten aller 720 Permutationen in MATHEMATICA. Der Einfluß des lokalen Streulichts wird hierbei nicht berücksichtigt.

Im Gegensatz dazu berechnen wir die Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} aus der Rangfolge der tatsächlich „gemessenen“ Leuchtdichtewerte und der entsprechenden Rangfolge nach Remissionsgrad.

Wegen des zusätzlichen Einflusses des lokalen Streulichts stellen wir fest, daß sich τ_{0g} und τ_{0b} bei den meisten Permutationen aus einer Gruppe voneinander unterscheiden. Dabei ist τ_{0g} in den meisten Fällen größer als τ_{0b} , da der lokale Streulichteinfluß auf den Schattenseiten ausgeprägter ist als auf den Lichtseiten und daher die vorgegebene Schattenstärke reduziert wird.

Dies ist natürlich insbesondere bei den hellen Graupapieren zu beobachten. Hier sind weiterhin die bereits beschriebenen kritischen Fälle möglich, bei denen für Papiere auf den Schattenseiten die Rangfolge nach Remissionsgrad nicht mit der Rangfolge nach Leuchtdichte übereinstimmt. In diesem Fall wird der Wert von τ_{0g} den nächstkleineren der möglichen Werte annehmen. Grundsätzlich stellt man fest, daß bei den hellen Graupapieren die Varianz von τ_{0g} bei einigen Permutationsgruppen sehr ausgeprägt ist, in manchen Gruppen sind daher bis zu drei verschiedene Werte von τ_{0g} möglich.

Bei den dunklen Graupapieren hingegen stellt man nur eine relativ geringe und weiterhin nur wenig variable Zunahme der Leuchtdichte auf den Schattenseiten fest, die der Schattenstärke entgegenwirkt. Daher ist erreichbar, daß nach einer geringfügigen Vergrößerung der Schattenstärke alle Werte von τ_{0g} mit den Werten von τ_{0b} übereinstimmen.

Um nun den Einfluß des lokalen Streulichtes auf die Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit zu untersuchen, ist es sinnvoll, zum einen die hellen Graupapiere zu verwenden und weiterhin eine Permutationsgruppe auszuwählen, die eine besonders ausgeprägte Varianz der Leuchtdichtezunahme durch Streulicht aufweist.

Wenn nun alle Permutationen aus dieser Gruppe von den Versuchspersonen bewertet werden, und das Streulicht einen Einfluß auf die Wahrnehmung hat, dann sollten entsprechend unterschiedliche Reihungen nach Oberflächenhelligkeit zu beobachten sein. Bei einer weiteren Versuchsreihe mit identischer Permutationsgruppe, jedoch mit den dunklen Graupapieren, sollte aufgrund des wesentlich geringeren Streulichteffekts eine vergleichbar homogenere Bewertung der Permutationen erfolgen. Wenn also bei der Reihung der hellen Graupapiere tatsächlich zusätzliche Fehler gemacht werden sollten, dann muß man überprüfen, ob diese auf die kritischen Fälle zurückzuführen sind. Ist dies der Fall, dann ist damit gezeigt, daß das unser visuelle System den Einfluß des lokalen Streulichtes nicht vollständig kompensiert und dies eine mögliche Fehlerquelle bei der Bewertung von Oberflächenhelligkeit darstellt. Tritt dieser Fall jedoch nicht ein, kann man folgern, daß die Helligkeitskonstanzleistung durch lokales Streulicht weitgehend unbeeinflusst bleibt.

Zur Untersuchung des Streulichteffekts wird Permutationsgruppe 14 ausgewählt. Diese ist die Gruppe mit dem kleinsten Wert von τ_0 , welche die Voraussetzungen für den kritischen Fall erfüllt. Bei ihr befinden sich die Papiere 2, 3 und 4 auf den Schattenseiten, als mögliche Streulichtpartner verbleiben demnach die Papiere 1, 5 und 6. Kombiniert man nun beispielsweise Papier 4 mit Papier 1 und gleichzeitig Papier 3 mit Papier 6, dann hat Papier 4 eine deutlich höhere Leuchtdichte als Papier 3.

Weiterhin wird eine Bewertung aller Permutationen aus Gruppe 16 durchgeführt. Diese erfüllt die Bedingungen für den kritischen Fall nicht. Die Ermittlung der Homogenität der Bewertungen bei dieser Gruppe dient jedoch zur Kontrolle. Sollten die Gruppen 16 und 14 tatsächlich unterschiedlich homogen bewertet werden, dann wird hierdurch der Einfluß des lokalen Streulichts auf die Wahrnehmungsleistung bestätigt. Darüber hinaus sind grundsätzliche Erkenntnisse über die Konsistenz der Bewertung innerhalb einer Gruppe und damit auch über die Äquivalenz der entsprechenden Permutationen möglich.

3. Ergebnisse

3.1. Experiment 1: Helligkeitskonstanzleistung bei verschiedenen Anordnungen der Graupapiere

Aufgabe der Versuchspersonen in Experiment 1 war die Reihung der Graupapiere auf der vvv-Figur nach *relativem Remissionsgrad* im normalen Betrachtungsmodus. Die Papiere sollten nach ihrer Graustufe, also nach Oberflächenhelligkeit geordnet werden. Dabei wurde überprüft, wie die Güte der Wahrnehmungsleistung bei der Beurteilung von Oberflächenhelligkeit von der Anordnung der Graupapiere auf der vvv-Figur abhängt.

Die 720 möglichen Anordnungen werden Permutationen genannt und können unter den vorliegenden Bedingungen in 20 Permutationsgruppen eingeteilt werden. Bei allen 36 Permutationen einer Gruppe befinden sich identische Graupapiere auf den Licht- bzw. Schattenseiten. Aus der Verteilung der Graupapiere, der Abstufung der Remissionsgrade und der Schattenstärke kann man für jede der 20 Gruppen den Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 berechnen. Dieser entsteht aus dem Vergleich der Rangfolge der Graupapiere nach Remissionsgrad und der jeweiligen Rangfolge nach Leuchtdichte und ist innerhalb einer Gruppe invariant¹¹. Der Wert von τ_0 sollte den Schwierigkeitsgrad der jeweiligen Gruppe beschreiben, je kleiner τ_0 , desto schwieriger ist die entsprechende Reizsituation.

Die Güte der Wahrnehmungsleistung wird durch den Rangkorrelationskoeffizient τ_1 beschrieben. Dieser ergibt sich aus dem Vergleich der wahrgenommenen Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit und der tatsächlichen Rangfolge nach Remissionsgrad. Die beiden Rangfolgen werden als empirische Sequenz und physikalische Sequenz bezeichnet. Sind die beiden Rangfolgen identisch, die vorgenommene Reihung also fehlerlos, dann hat τ_1 den Wert eins. Bei fehlerhaften Bewertungen ergeben sich Werte, die entsprechend kleiner als eins sind.

Alle aufgetretenen Fehler bei den Reihungen sind grundsätzlich durch die Rangfolge der Graupapiere nach Leuchtdichte und damit auch der entsprechenden Rangfolge nach beleuchtungsbedingter Helligkeit determiniert. Die Vertauschungen von Graupapieren bezüglich ihrer Rangfolge nach relativem Remissionsgrad sind demnach systematisch und nicht zufällig.

¹¹ Dies gilt unter der Voraussetzung, daß der Einfluß des lokalen Streulichts nicht berücksichtigt wird. Die Invarianz innerhalb einer Gruppe gilt daher nur für τ_{0b} nicht für τ_{0g} .

Das visuelle System ist offensichtlich nur innerhalb bestimmter Grenzen in der Lage, die beleuchtungsbedingte Helligkeit und die Oberflächenhelligkeit fehlerfrei zu differenzieren. Wird die Diskrepanz zwischen den beiden Wahrnehmungsaspekten aufgrund der Reizbedingungen zu groß, zeigt sich eine Dominanz der beleuchtungsbedingten Helligkeit.

In Diagramm 3.1. auf der folgenden Seite werden die Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 und τ_1 für die 20 Permutationsgruppen dargestellt. Der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 gibt an, inwieweit das visuelle System in der Lage ist eine Rangfolge nach Leuchtdichte zu tolerieren, die von der Rangfolge nach Remissionsgrad abweicht. Dieser Unterschied stellt demnach die Verbesserung aufgrund der Helligkeitskonstanzleistung dar.

Insgesamt wurden für diese Versuchsreihe mehr als 1000 Reihungen von je sechs Graupapieren nach relativem Remissionsgrad durchgeführt. Vier Versuchspersonen bewerteten jeweils 120 verschiedene Permutationen mit den dunklen Graupapieren sowie weitere 120 mit den hellen Graupapieren. Dabei wurden Meßreihen stichprobenartig wiederholt. Aus jeder Gruppe wurden sechs verschiedene Permutationen pro Graupapiersatz getestet, wobei solche Permutationen ausgewählt wurden, die sich bezüglich des lokalen Streulichteffektes unterscheiden. Dies bedeutet, daß bei jeder der sechs verwendeten Permutationen aus einer Gruppe die gegenüberliegenden und sich daher wechselseitig beeinflussenden Graupapiere in einer anderen Kombination angeordnet werden. Innerhalb einer Gruppe existieren nur sechs verschiedene Streulichtpaarkombinationen, die unterschiedliche relative Leuchtdichtezunahmen der Graupapiere bedingen. Die verbleibenden Permutationen entstehen durch paarweises Permutieren aus dieser Basisgruppe und besitzen jeweils identische Leuchtdichtezunahmen wie die entsprechenden Basispermutation.

Durch diese Auswahl wird sichergestellt, daß die verwendeten Permutationen möglichst verschieden sind und zusätzlich der Einfluß des lokalen Streulichtes untersucht werden kann. Dieser ist, wie in Abschnitt 2.6. *Globales und lokales Streulicht* beschrieben, bei den hellen Graupapieren wesentlich stärker ausgeprägt als bei den dunklen Graupapieren. Im Gegensatz zu den dunklen Graupapieren kann der lokale Streulichteffekt bei den hellen Graupapieren auf den Schattenseiten die Rangfolge nach Leuchtdichte verändern.

Reihung nach relativem Remissionsgrad, alle Gruppen
Mittelwerte aller Versuchspersonen

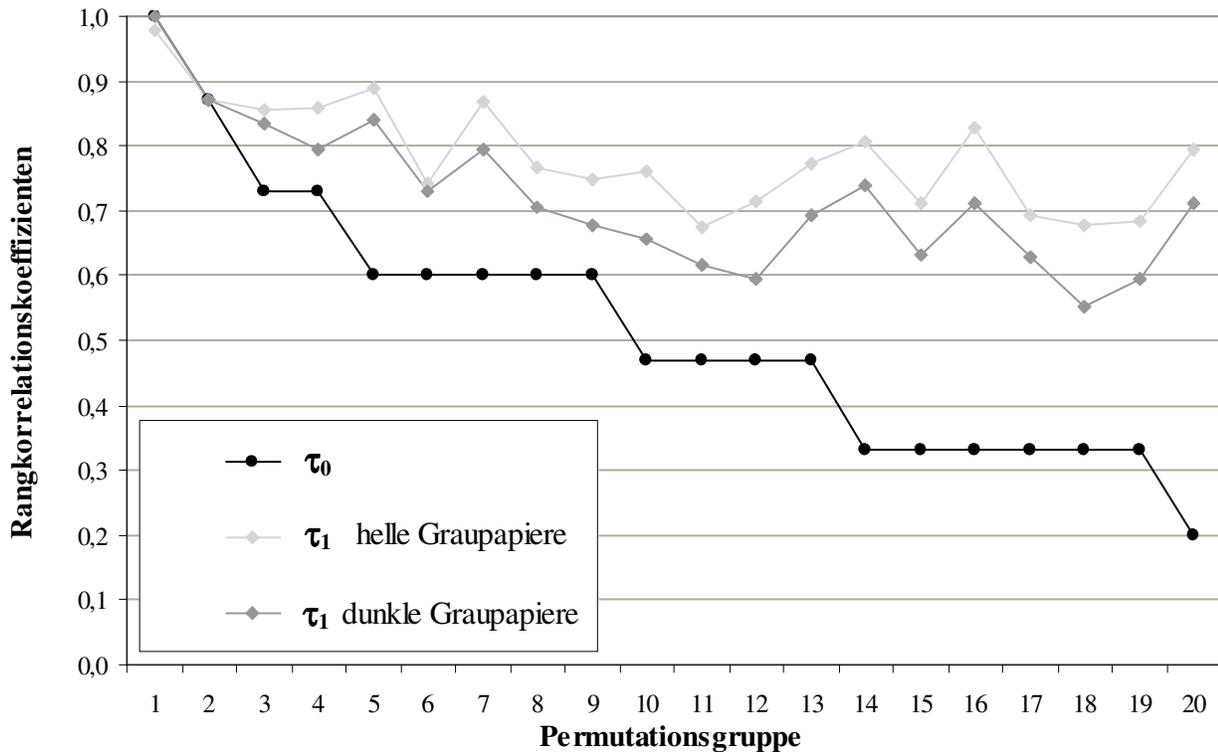


Diagramm 3.1.: Güte der Helligkeitskonstanzleistung bei den verschiedenen Permutationsgruppen

Die mit den schwarzen Symbolen dargestellten Datenpunkte in Diagramm 3.1. entsprechen den errechneten Werten von τ_0 , also τ_{0b} bei einer Schattenstärke von zwei. Die dunkelgrauen Symbole entsprechen der Wahrnehmungsleistung bei den dunklen Graupapieren, beschrieben durch den Wert von τ_1 , die hellgrauen Symbole stellen die Bewertungen bei den hellen Graupapieren dar. Jeder Wert von τ_1 ist hierbei der Mittelwert aus 24 Einzelwerten, da vier Versuchspersonen je sechs Permutationen bewerteten. Dabei zeigt sich, daß die Ergebnisse bei den hellen Graupapieren bei fast allen Permutationsgruppen deutlich besser waren, also weniger Fehler bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad gemacht wurden. Aufgrund des lokalen Streulichteffekts wäre das Gegenteil zu erwarten gewesen. Dessen Einfluß hätte zu einer größeren Anzahl von Fehlern und damit auch einen kleineren Wert von τ_1 führen müssen. Insbesondere fällt auf, daß der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 sehr verschieden ausfällt. Die Güte der Konstanzleistung ist daher nicht allein auf den Wert von τ_0 zurückzuführen, der erhoffte formale Zusammenhang zwischen τ_0 und τ_1 kann demnach nicht gezeigt werden. Eine weitere, versteckte Variable muß daher Einfluß auf die Güte der Wahrnehmungsleistung haben, die sich nicht im Wert von τ_0 widerspiegelt.

Im Verlauf von Experiment 1 war auffällig, daß die Versuchspersonen besonders viele Fehler bei der Reihung machten, wenn die Verteilung der Graupapiere auf die Licht- und Schattenseiten alternierend war. Dies bedeutet, daß beispielsweise Graupapier 1 im Schatten liegt, 2 im Licht, 3 im Schatten, 4 im Licht usw.. In diesem Fall liegen innerhalb der Anordnung der Graupapiere fünf sog. Licht/Schatten-Wechsel vor. Die Permutationsgruppen 1 und 20 hingegen besitzen nur einen L/S-Wechsel. Die Bewertungen bei Gruppe 20 waren auffällig gut. Die Anzahl der L/S-Wechsel zeigte eine Korrelation mit der Anzahl der Fehler bei der Reihung nach Oberflächenhelligkeit. Daher wurden die 20 Gruppen in drei Klassen eingeteilt, die sich in der Anzahl der L/S-Wechsel unterscheiden. Diese sind in Tabelle 5 dargestellt. Die L/S-Wechsel sind in dieser Tabelle durch Doppelstriche gekennzeichnet.

Gruppe	1	5	7	14	16	20	2	3	4	10	12	17	18	19	6	8	9	11	13	15	
Rang	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
der Graupapiere	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
nach	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Remissionsgrad	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
L/S-Wechsel	1	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	5	4	4	4	4	4	5
τ_0 bei 2	1,00	0,60	0,60	0,33	0,33	0,20	0,87	0,73	0,73	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,33

Tabelle 5: Einteilung der 20 Gruppen in drei Klassen aufgrund der Anzahl der L/S-Wechsel

Die erste Klasse beinhaltet sechs Gruppen, bei denen ein bzw. zwei L/S-Wechsel vorliegen. Die zweite Klasse besteht aus acht Gruppen mit je drei L/S-Wechseln, die verbleibenden sechs Gruppen bilden die dritte Klasse und besitzen vier bzw. fünf L/S-Wechsel.

Diese Einteilung in drei Klassen stellt einen sinnvollen Kompromiß dar, da sich der ersten und der dritten Klasse Gruppen mit verschiedener Anzahl von L/S-Wechseln befinden. Bei einer Einteilung in fünf Klassen hätte sich jedoch ergeben, daß die erste und fünfte Klasse jeweils nur zwei Gruppen enthalten. Dies wäre nicht sinnvoll gewesen, da ein Vergleich von nur zwei Gruppen, die sich darüber hinaus im Wert von τ_0 stark unterscheiden, keine Aussagen über die Entwicklung des Zusammenhangs zwischen τ_0 und τ_1 zuläßt.

Bei gleicher Art der Darstellung der Ergebnisse wie in Diagramm 3.1., jedoch für die drei Klassen getrennt betrachtet, ergibt sich ein deutlich verändertes Bild:

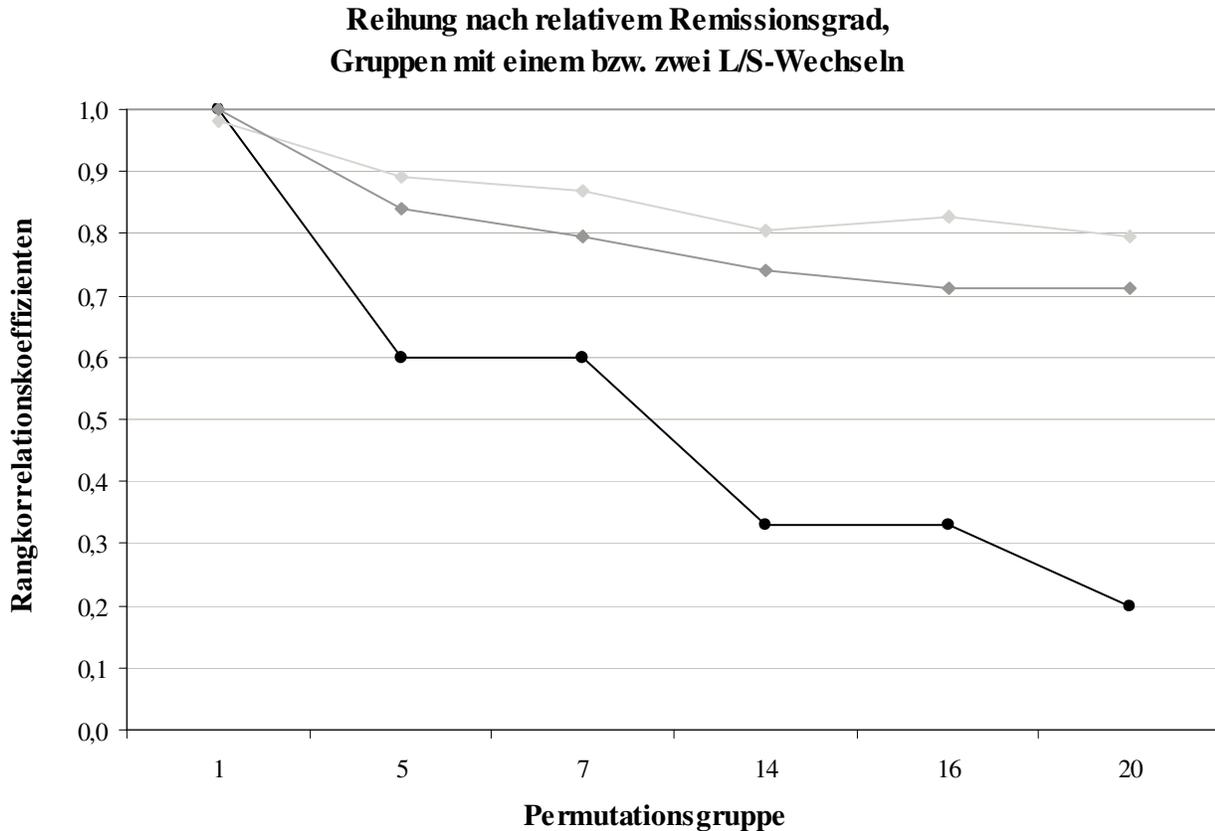


Diagramm 3.2.: Helligkeitskonstanzleistung bei den Permutationsgruppen mit einem bzw. zwei L/S-Wechseln

Bei der Klasse mit einem bzw. zwei L/S-Wechseln ist der Verlauf der Werte von τ_1 stetig und annähernd glatt. Der Verlauf der Datenpunkte von τ_0 hingegen ist stufenförmig. Dies ist zum einen durch das vorgegebene Raster an Werten für τ_0 bedingt, welches bei einer Sequenzlänge von nur sechs Werten noch sehr grob ausfällt, weiterhin existieren mehrere Gruppen mit gleichem τ_0 . Dieser unstetige Verlauf wird durch die Werte von τ_1 nur der Tendenz nach verfolgt. Man erkennt deutlich, daß der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 um so größer wird, je kleiner die Werte von τ_0 werden.

Die Gruppen 1 und 20 aus der ersten Klasse haben einen Sonderstatus, da diese im Gegensatz zu den verbleibenden vier Gruppen dieser Klasse nur einen L/S-Wechsel aufweisen. Gruppe 1 hat dabei die Funktion einer Kontrollgruppe, bei der keine Verbesserung mehr zu erzielen ist, die jedoch fehlerlos bewertet werden sollte. Dies war bei den dunklen Graupapieren bei allen 24 Versuchsdurchgängen der Fall.

Bei den hellen Graupapieren wurde 20 mal fehlerlos gereiht und vier mal wurden die Graupapiere 4 und 5 miteinander vertauscht. Daher ist der Mittelwert für τ_1 bei den hellen Graupapieren nur 0,98. Diese Fehler sind jedoch nicht mit dem lokalen Streulichteinfluß in Verbindung zu bringen, da weder eine entsprechende Anordnung der Graupapiere noch die Bedingungen für den sog. kritischen Fall¹² vorlagen. Die Fehlbewertungen wurden von den beiden Versuchspersonen gemacht, die auch insgesamt eine größere Anzahl von Vertauschungen zeigten.

Die Güte der Helligkeitskonstanzeleistung ist bei den Gruppen 16 und 20 annähernd identisch. Gruppe 20 besitzt zwar einen kleineren Wert von τ_0 , ist jedoch aufgrund nur eines L/S-Wechsels scheinbar genauso schwierig wie Gruppe 16 mit zwei L/S-Wechseln.

Auch bei der Klasse mit drei L/S-Wechseln ist zu erkennen, daß der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 um so größer wird, je kleiner die Werte von τ_0 werden.

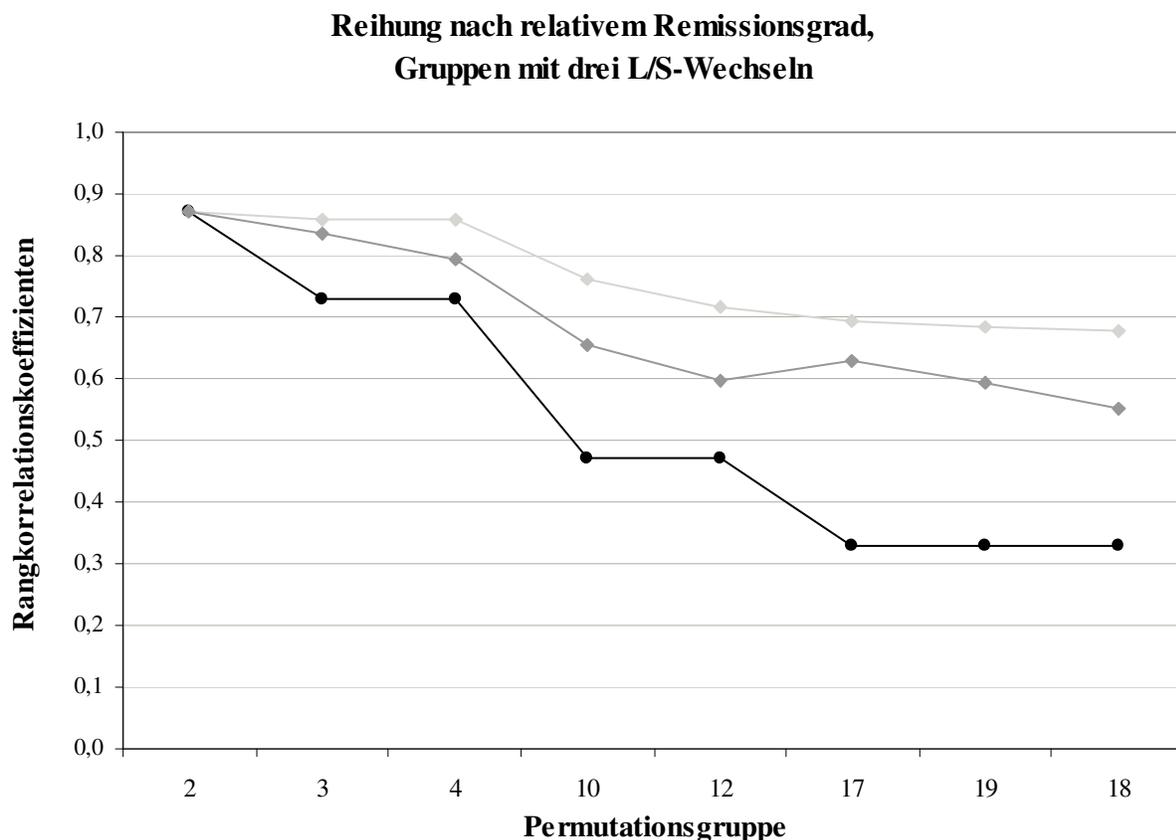


Diagramm 3.3.: Helligkeitskonstanzeleistung bei den Permutationsgruppen mit drei L/S-Wechseln

¹² Siehe Abschnitt 2.6.1. *Der durch lokales Streulicht bedingte kritische Fall*

Der Unterschied fällt jedoch insgesamt geringer aus als in der ersten Klasse, da die Permutationen aufgrund der größeren Anzahl von L/S-Wechseln offensichtlich schwieriger sind. Besonders auffällig sind die Bewertungen bei Gruppe 2, hier befinden sich die Graupapiere 1, 2 und 4 auf den Lichtseiten, 3, 5 und 6 entsprechend im Schatten (siehe Tabelle 3, S. 36). Diese aufgezählte Reihenfolge der Graupapiere entsprach in allen 48 Versuchsdurchgängen der wahrgenommenen Rangfolge, die Papiere 3 und 4 wurden demnach grundsätzlich miteinander vertauscht. Dies ist aufgrund der Verteilung der Papiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten verständlich, die Konsistenz der fehlerhaften Bewertung ist dennoch außergewöhnlich, denn τ_0 und τ_1 sind in allen Fällen identisch.

In der Klasse mit vier bzw. fünf L/S-Wechseln fällt die Wahrnehmungsleistung im Vergleich zu den anderen Klassen am schlechtesten aus. Die Bewertungen bei Gruppe 11 stellen einen Ausreißer nach unten dar, bei Gruppe 13 zeigt sich das Gegenteil. Auffällig ist, daß die Bewertungen bei den Gruppen 6 und 15 annähernd gleich gut ausfallen, obwohl Gruppe 15 einen Wert von τ_0 besitzt, der im Raster der möglichen Werte zwei Stufen tiefer liegt. Diese beiden Gruppen besitzen vollständig alternierende Verteilungen, bei denen fünf L/S-Wechsel vorliegen.

**Reihung nach relativem Remissionsgrad,
Gruppen mit vier bzw. fünf L/S-Wechseln**

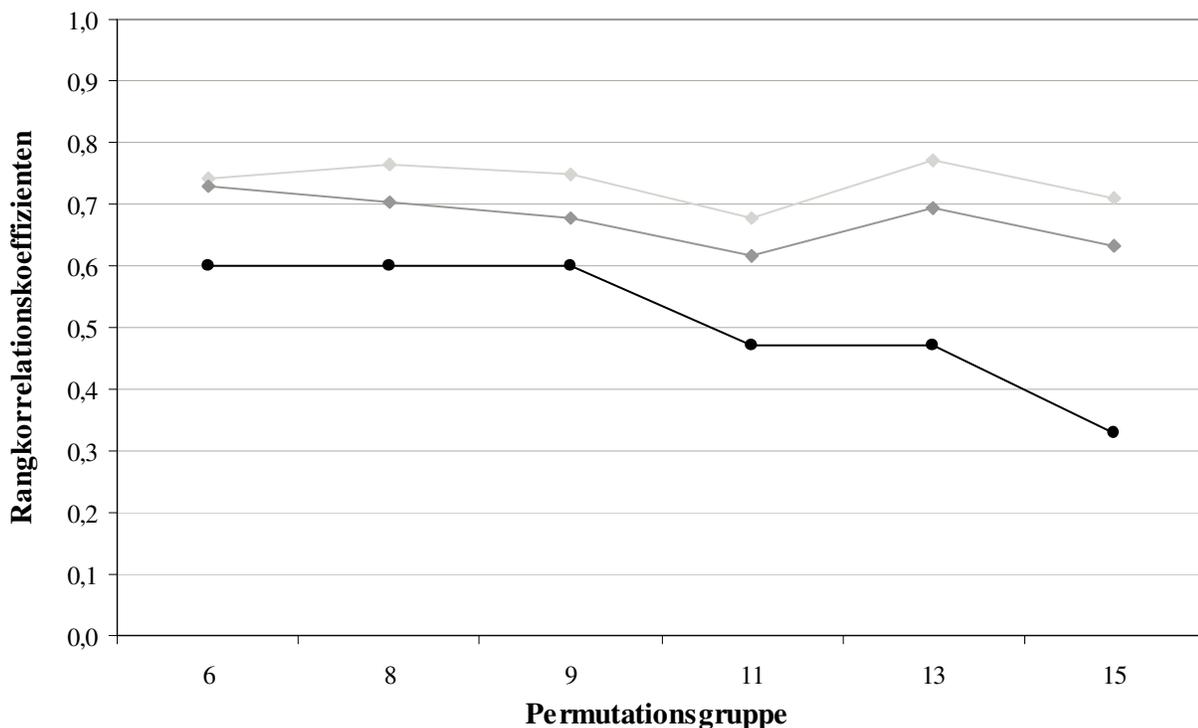


Diagramm 3.4.: Helligkeitskonstanzleistung bei den Permutationsgruppen mit vier bzw. fünf L/S-Wechseln

Insgesamt betrachtet zeigt sich, daß die Darstellung der Werte von τ_1 durch die Einteilung in Klassen einen deutlich geglätteten Verlauf erhält. Dabei ist zu erwarten, daß dieser Verlauf bei einer größeren Anzahl von Einzelmessungen noch glatter wird, da auch die Werte für τ_1 dem vorgegebenen Raster entstammen. Es wurden pro Versuchsperson jeweils nur sechs Permutationen aus einer Gruppe verwendet. Dabei zeigte sich, daß die Versuchspersonen bei einigen Permutationsgruppen in der Bewertung relativ unsicher waren. Es war nicht ungewöhnlich, daß sich bei solchen kritischen Reizsituationen aus sechs Bewertungen beispielsweise vier mal ein Wert für τ_1 von 0,6 und zwei mal von 0,73 ergab, aus einer zweiten Versuchsreihe mit der selben Versuchsperson jedoch zwei mal 0,6 und vier mal 0,73 folgte. Ein zusätzlicher Fehler bei der Reihung wurde demnach nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, jedoch ohne reproduzierbare Regelmäßigkeit gemacht.

Das grobe Raster der Werte für τ kann daher aufgrund von zufälligen Inkonsistenzen bei der Bewertung von kritischen Reizsituationen deutliche Schwankungen des Mittelwertes hervorrufen.

Weiterhin war festzustellen, daß auch bei gleicher Anzahl von L/S-Wechseln und gleichem Wert von τ_0 die Wahrnehmungsleistung etwas unterschiedlich ausfallen kann. Dies ist darin begründet, daß die Identifikation der hellsten Graustufe die Bewertung der folgenden Graupapiere weitgehend determiniert, also ein zu Beginn gemachter Fehler weitere Folgefehler bedingt. Liegt nun aber unter den genannten Umständen die hellste Graustufe auf einer Lichtseite, dann ist der sog. Einstiegsfehler damit bereits ausgeschlossen. Dieses Graupapier hat zusätzlich zur größten Oberflächenhelligkeit auch die höchste beleuchtungsbedingte Helligkeit und muß daher zwangsläufig richtig identifiziert werden. Ein gutes Beispiel hierfür sind die Gruppen 10 und 12, die drei L/S-Wechsel und einen τ_0 von 0,47 besitzen. Die Bewertungen von Gruppe 10 fallen deutlich besser aus, da hier Graupapier 1 auf einer Lichtseite liegt. Dieser Sachverhalt wird umfassender in Abschnitt 4.2. der Diskussion dargestellt. Auch die vorgenommene Einteilung der 20 Permutationsgruppen in drei Klassen wird in diesem Abschnitt schlüssig begründet.

Abschließend werden die Ergebnisse von Experiment 1 für die vier Versuchspersonen getrennt dargestellt (siehe S. 57 ff). Jeder Wert von τ_1 ist hierbei der Mittelwert aus sechs Reihungen, die Fehlerbalken entsprechen der Standardabweichung. Dadurch soll verdeutlicht werden, daß die Güte der Wahrnehmungsleistung individuell verschieden ausfällt.

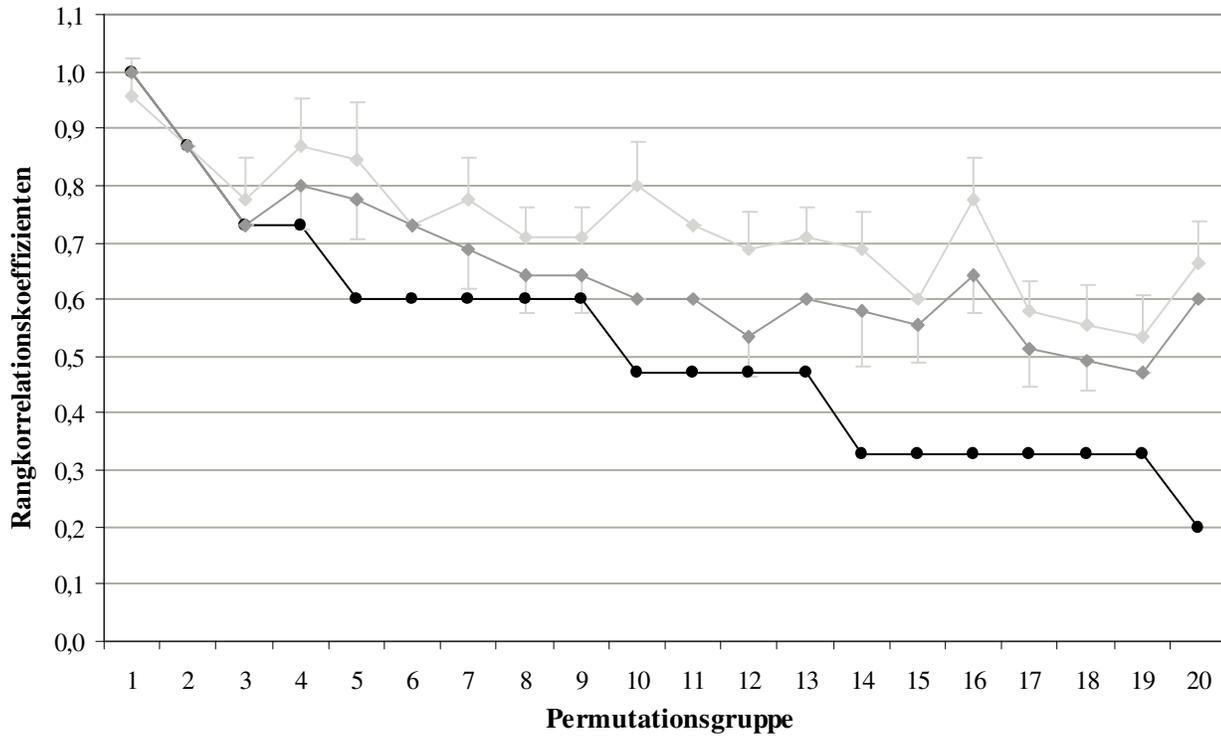
Die Versuchspersonen AK und HR lieferten sehr ähnliche Datensätze, AM war im Mittel schlechter als die beiden erstgenannten, NQ zeigte eine überdurchschnittlich gute Helligkeitskonstanzleistung. Auch bei neun weiteren Versuchspersonen zeigte sich in einer Vielzahl von Versuchsreihen, dass die Helligkeitskonstanzleistung individuell unterschiedlich gut ausgeprägt ist. Zwei der neun Versuchspersonen, JH und AN zeigten auch bei Permutationen mit sehr kleinen Werten von τ_0 außergewöhnlich häufig fehlerlose Bewertungen. Insbesondere JH konnte selbst bei einer Erhöhung der Schattenstärke auf Werte von vier oder höher in den meisten Versuchsdurchgängen fehlerlose Bewertungen durchführen. Die Ergebnisse aus diesen Versuchsreihen werden hier jedoch nicht dargestellt, da bei diesen Versuchspersonen nicht alle 20 Permutationsgruppen getestet wurden und demnach keine vollständigen Datensätze vorliegen.

Die variabel ausgeprägte Helligkeitskonstanzleistung der einzelnen Versuchspersonen blieb trotz zu erwartender Übungseffekte konstant. Die Versuchspersonen zeigten im Verlauf des Experimentes keine Verbesserung der zu Beginn gezeigten Leistung.

Die Darstellung der Vorgehensweise bei der Versuchsdurchführung belegt das Ausbleiben von Übungseffekten: Die vier Versuchspersonen mußten die 20 Permutationsgruppen in unterschiedlichen Reihenfolgen bewerten. Hierbei wurde für jede Versuchsperson im ersten Versuchsdurchgang willkürlich eine andere Permutationsgruppe ausgewählt. Deren Werte von τ_0 lagen in dem mittleren Bereich den möglichen Werte. Es handelte sich daher um Gruppen, bei denen erfahrungsgemäß bereits Fehler bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad gemacht werden. Nach der Bewertung sechs weiterer Permutationsgruppen mit jeweils sechs Permutationen wurde die bei dieser Versuchsperson zuerst getestete Gruppe erneut geprüft. Die Ergebnisse nach dieser Übungsphase waren mit den ersten Bewertungen ohne Übung identisch, es wurden die gleichen Fehler wie zu Beginn gemacht. Selbst nach Bewertung aller 20 Permutationsgruppen für beide Graupapiersätze, also nach mindestens 240 bewerteten Permutationen war bei den verwendeten Versuchspersonen kein Übungseffekt festzustellen. Dies war sowohl bei den beiden naiven Versuchspersonen festzustellen, die ihre ersten Versuchsreihen bei Experiment 1 durchführten, als auch bei den beiden anderen Versuchspersonen, die bereits an einer Vielzahl von Vorversuchen teilgenommen hatten. Weiterhin wurde regelmäßig nach einem Versuchsdurchgang mit sechs Permutationen aus einer Gruppe die Bewertung der ersten beiden Permutationen wiederholt. Auch hier zeigte sich, daß die doppelt durchgeführten Bewertungen in fast allen Fällen identisch waren.

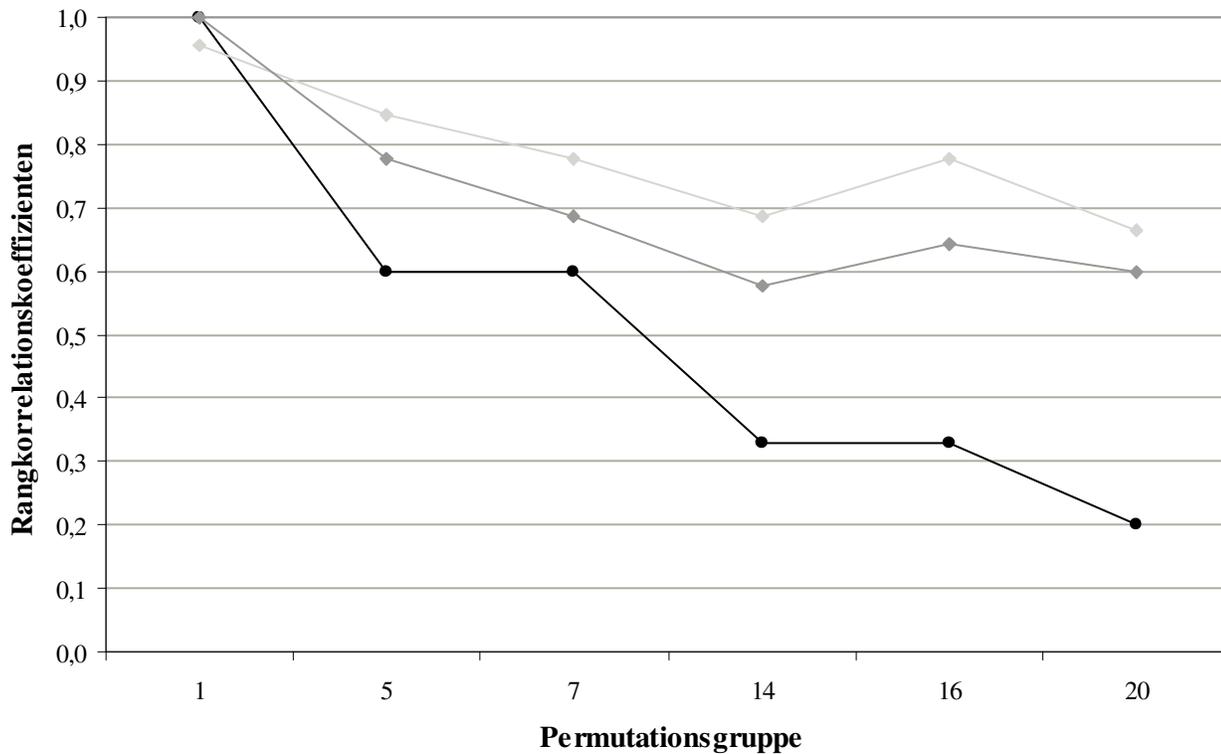
Ergebnisse von Versuchsperson AM, alle 20 Permutationsgruppen:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: AM

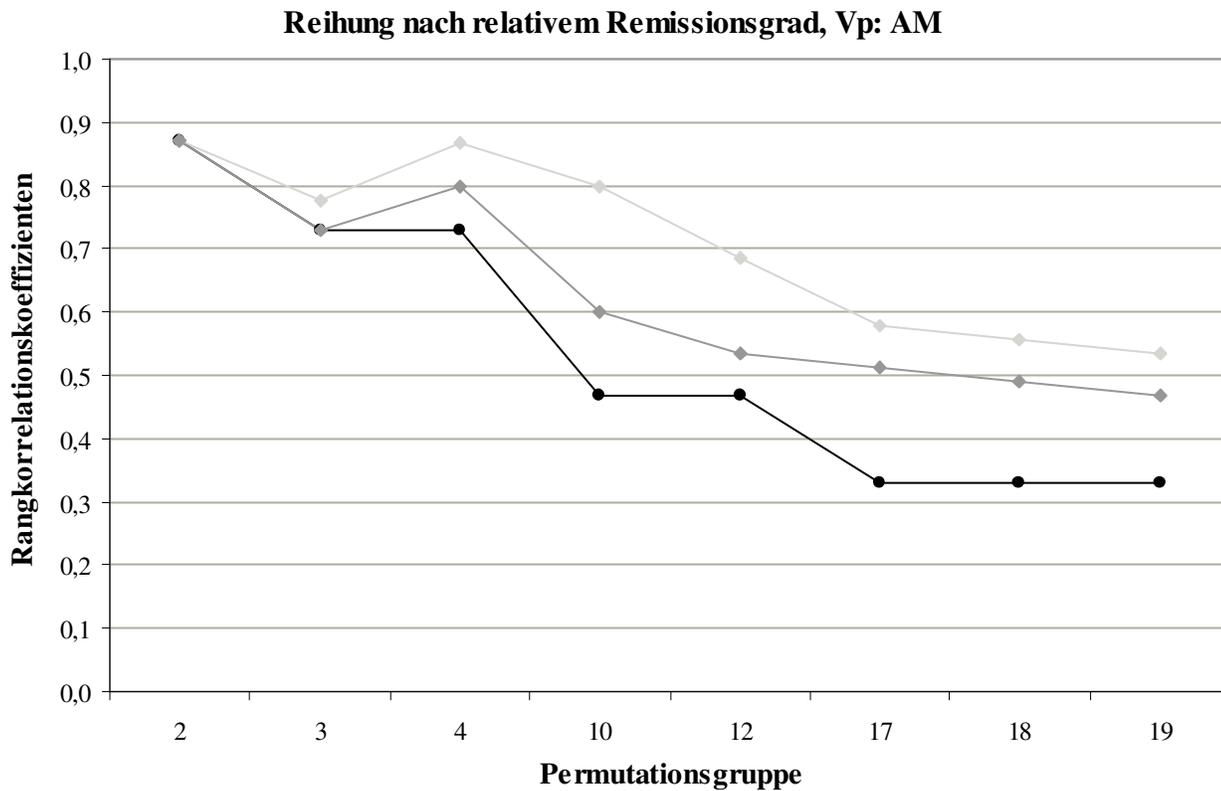


Gruppen mit einem bzw. zwei Licht/Schatten-Wechseln:

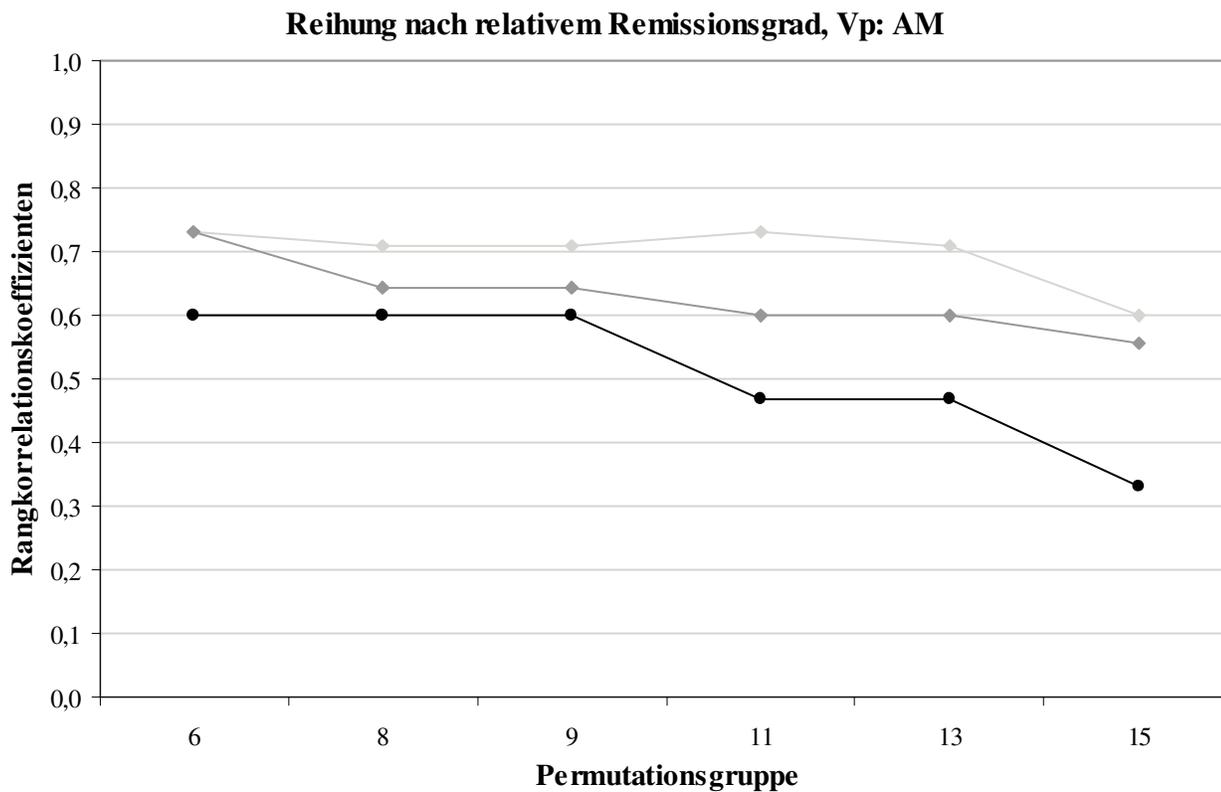
Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: AM



Gruppen mit drei Licht/Schatten-Wechseln:

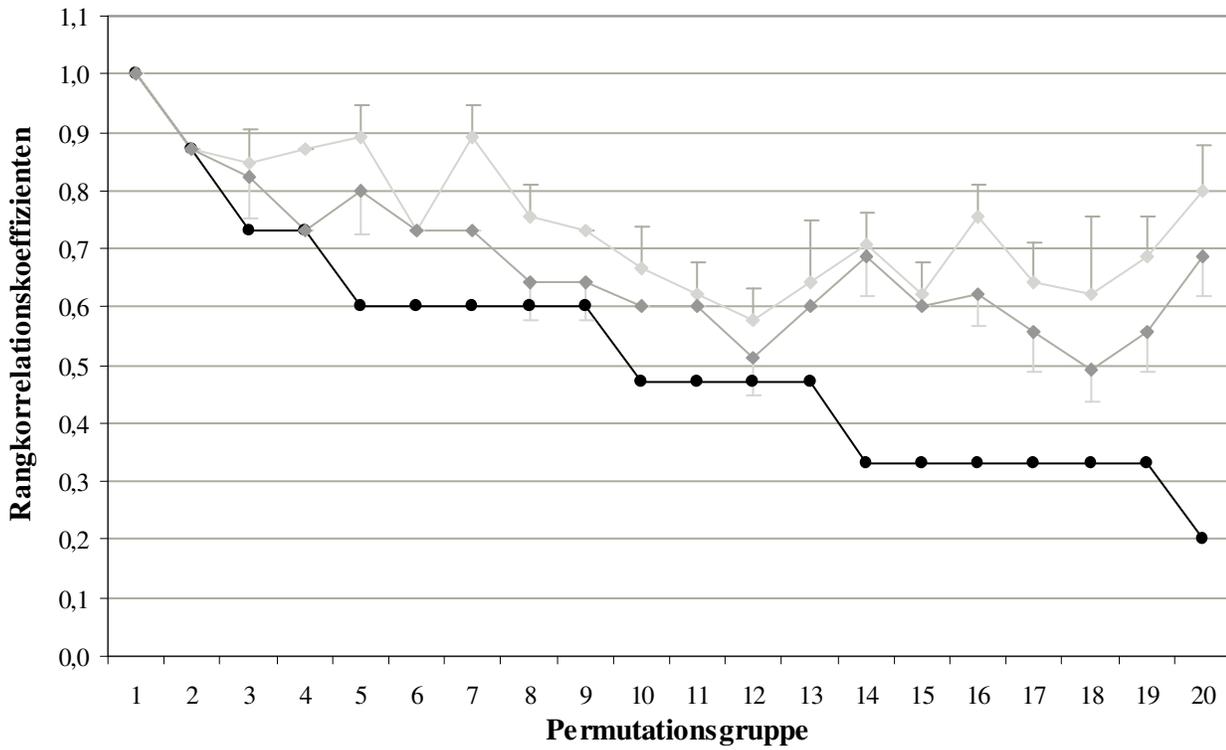


Gruppen mit vier bzw. fünf Licht/Schatten-Wechseln:



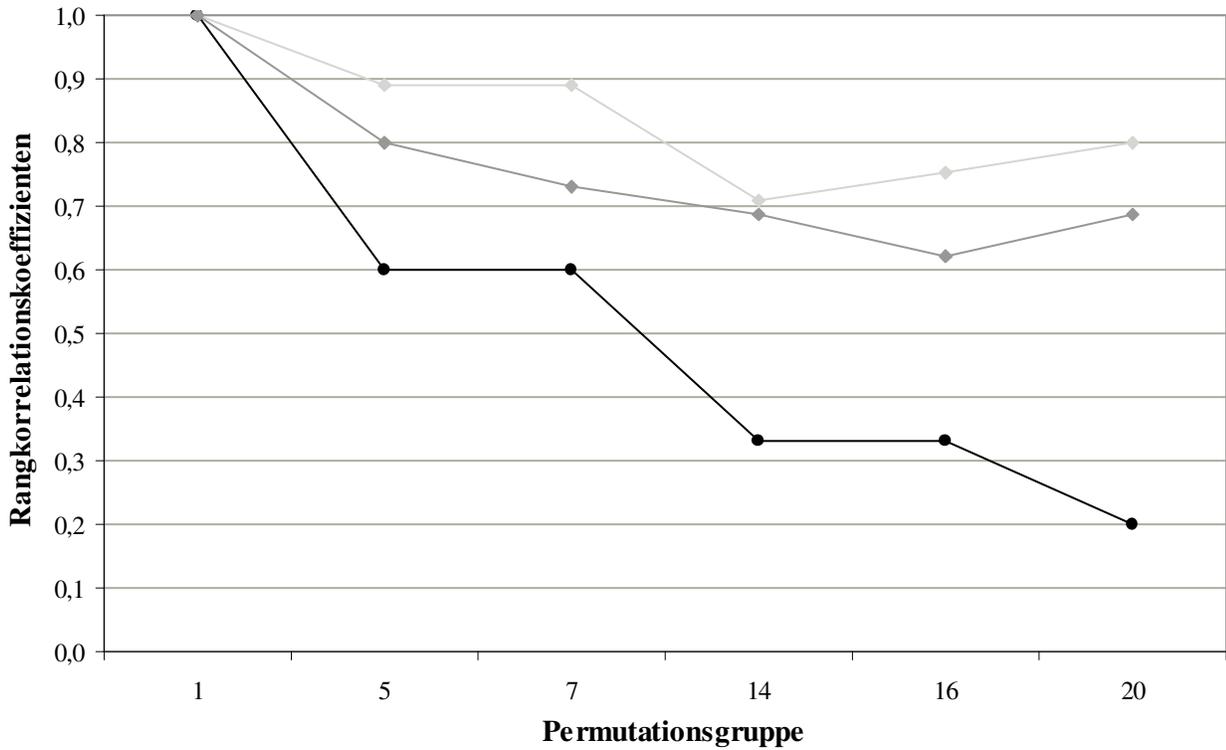
Ergebnisse von Versuchsperson AK, alle 20 Permutationsgruppen:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: AK

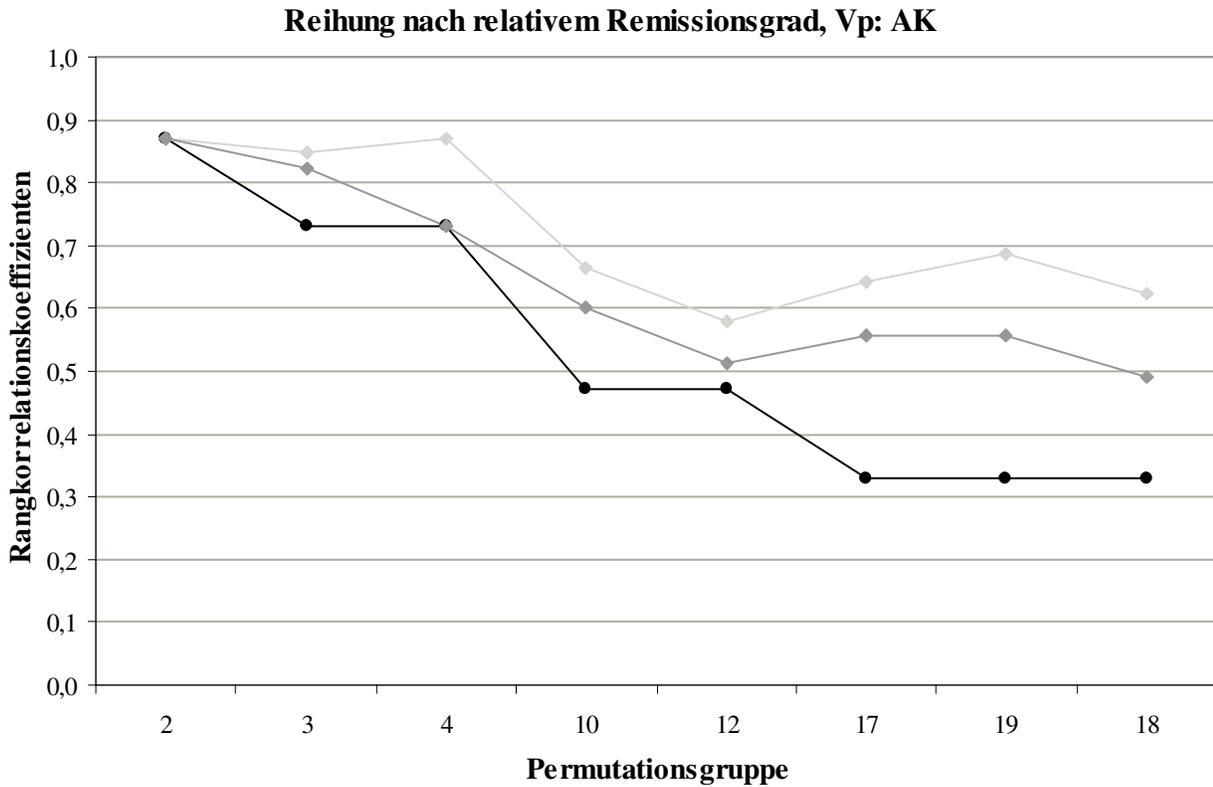


Gruppen mit einem bzw. zwei Licht/Schatten-Wechseln:

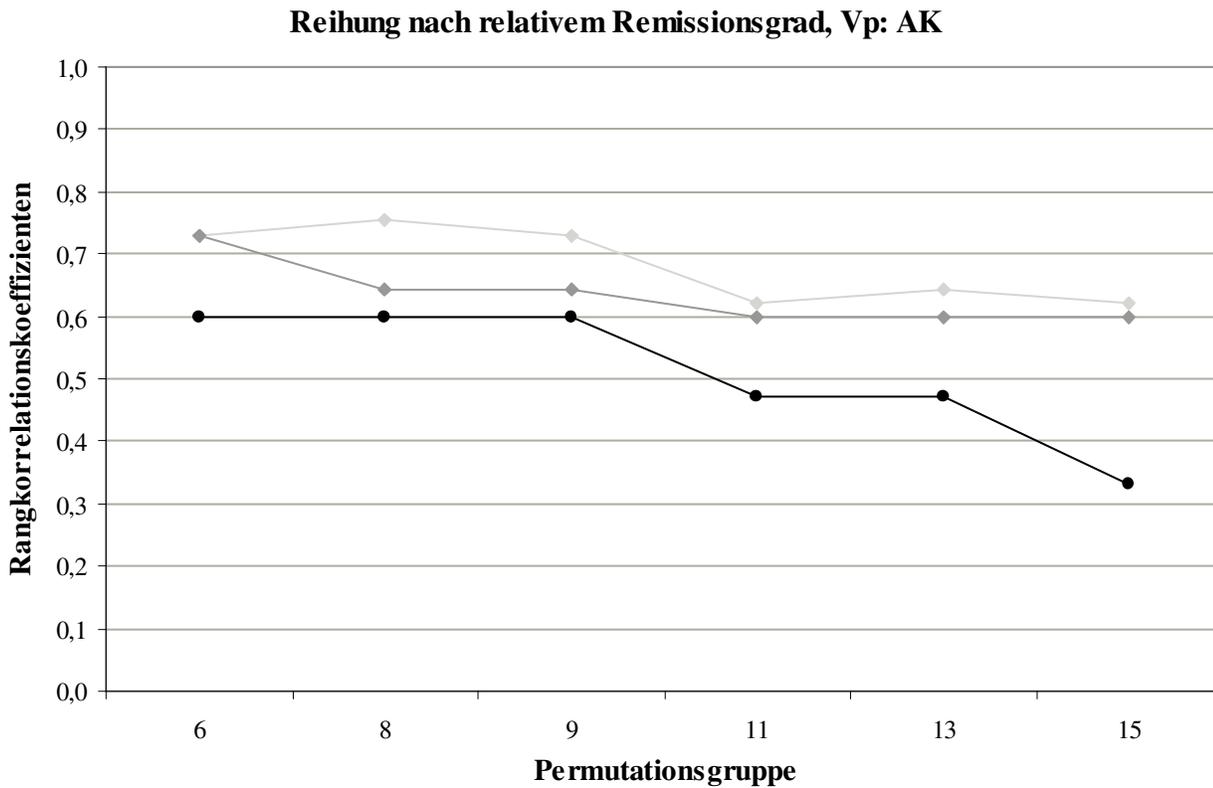
Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: AK



Gruppen mit drei Licht/Schatten-Wechseln:

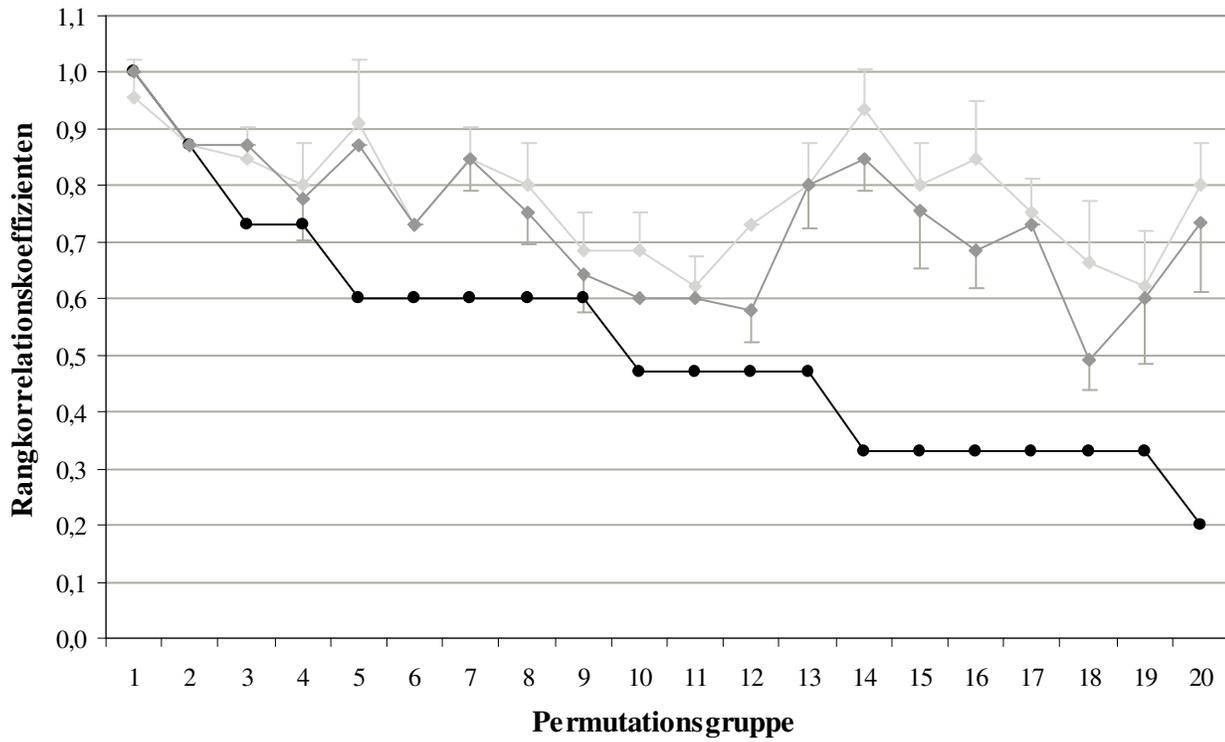


Gruppen mit vier bzw. fünf Licht/Schatten-Wechseln:



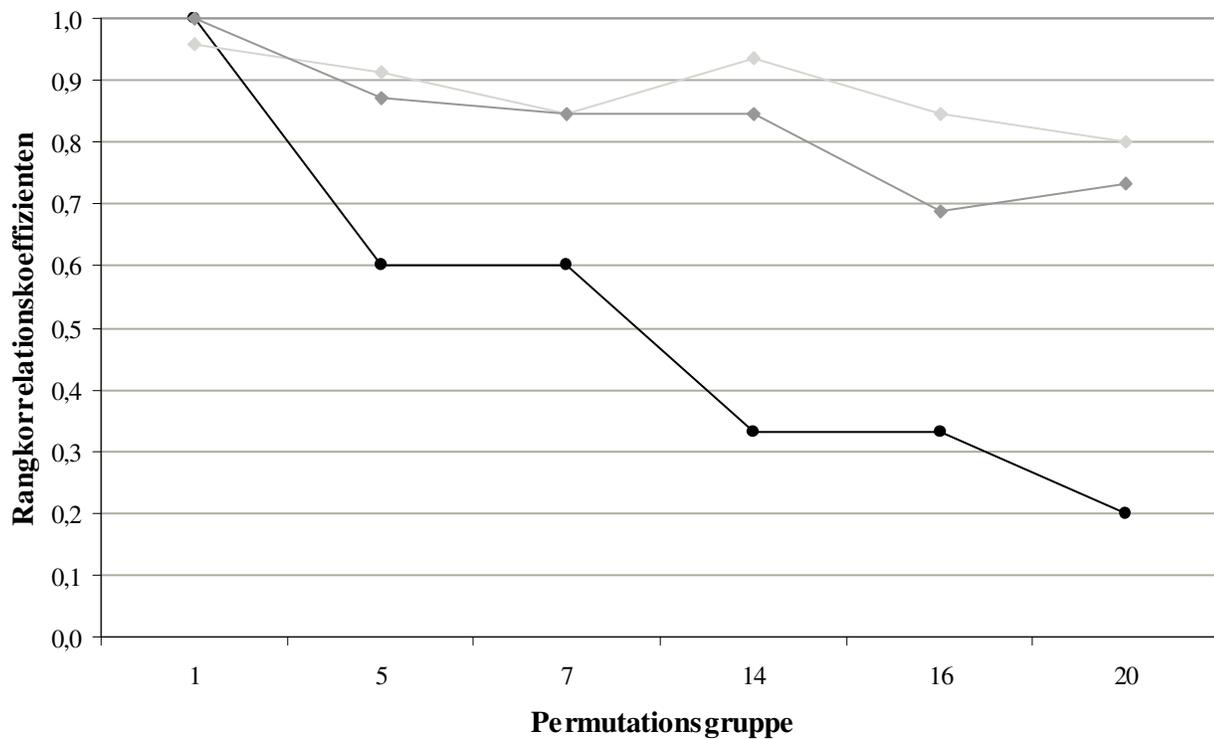
Ergebnisse von Versuchsperson HR, alle 20 Permutationsgruppen:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: HR



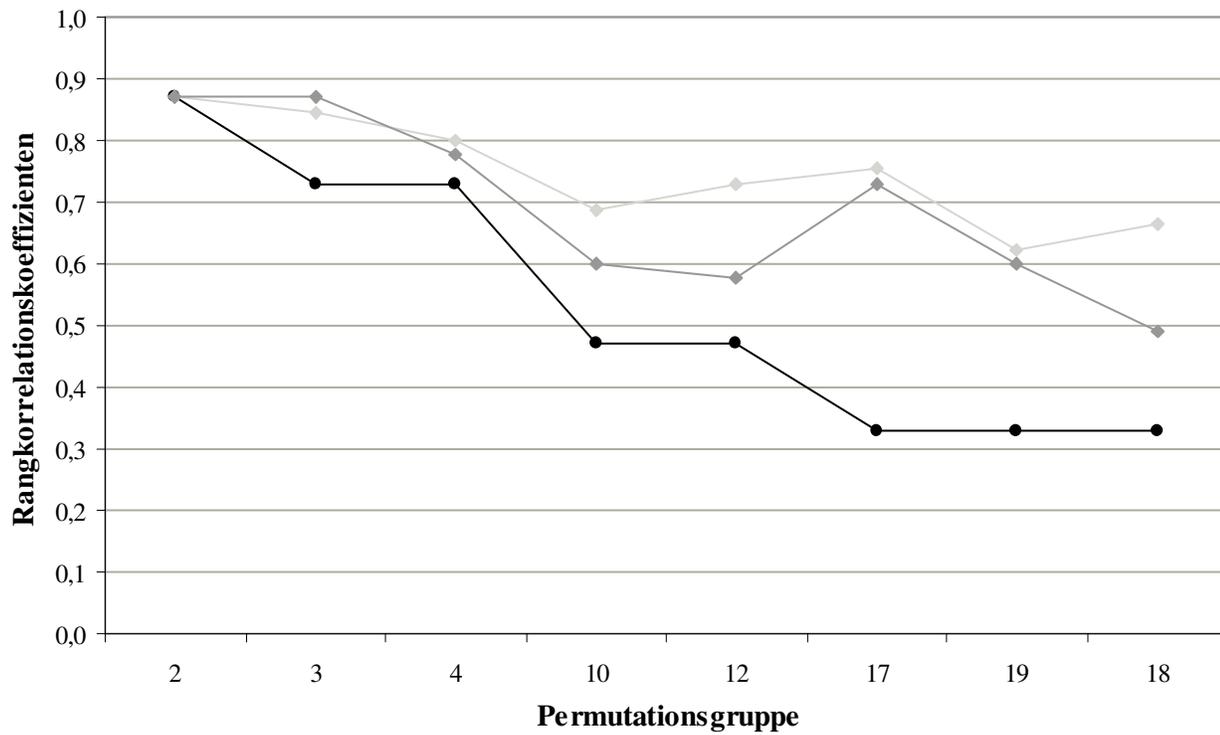
Gruppen mit einem bzw. zwei Licht/Schatten-Wechseln:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: HR



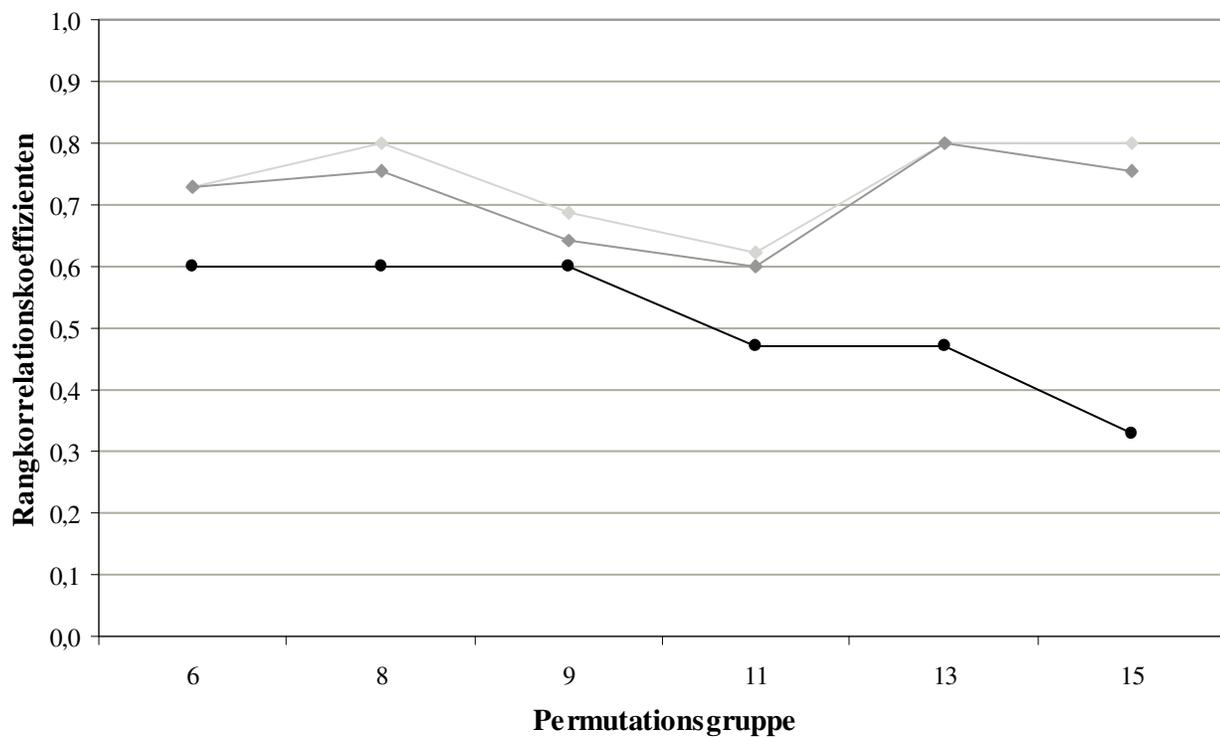
Gruppen mit drei Licht/Schatten-Wechseln:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: HR



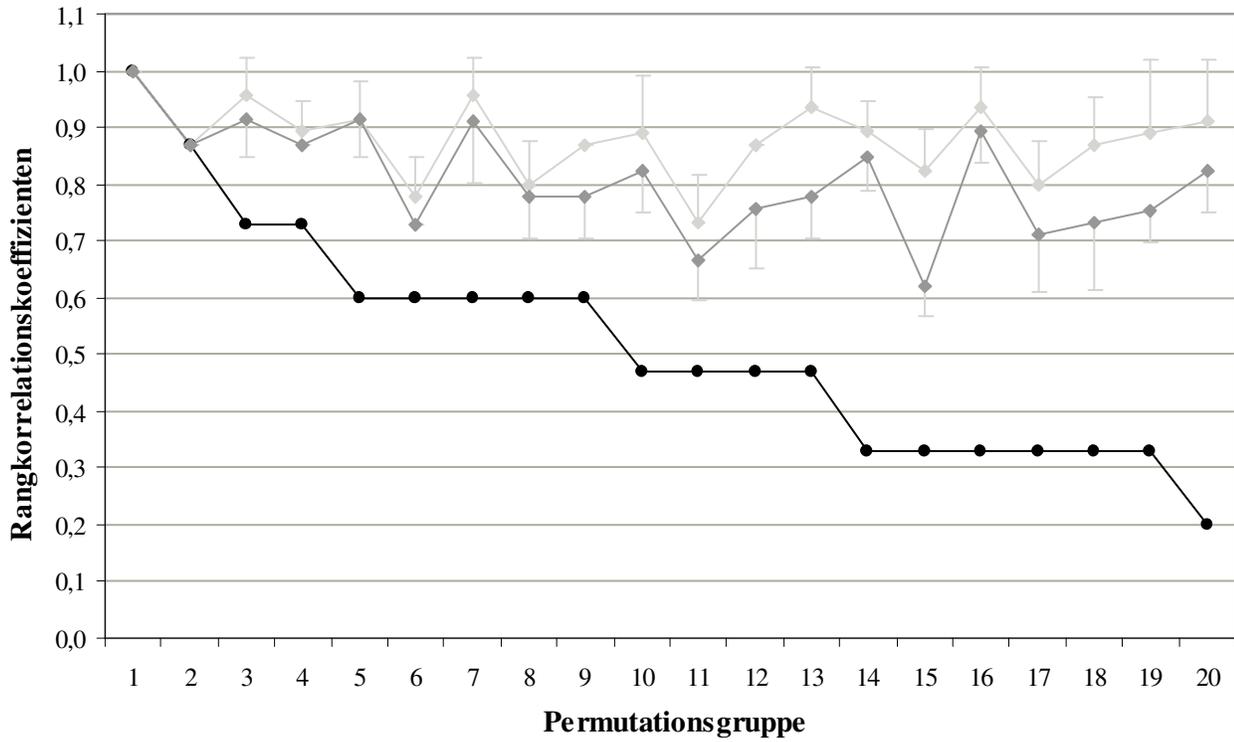
Gruppen mit vier bzw. fünf Licht/Schatten-Wechseln:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: HR



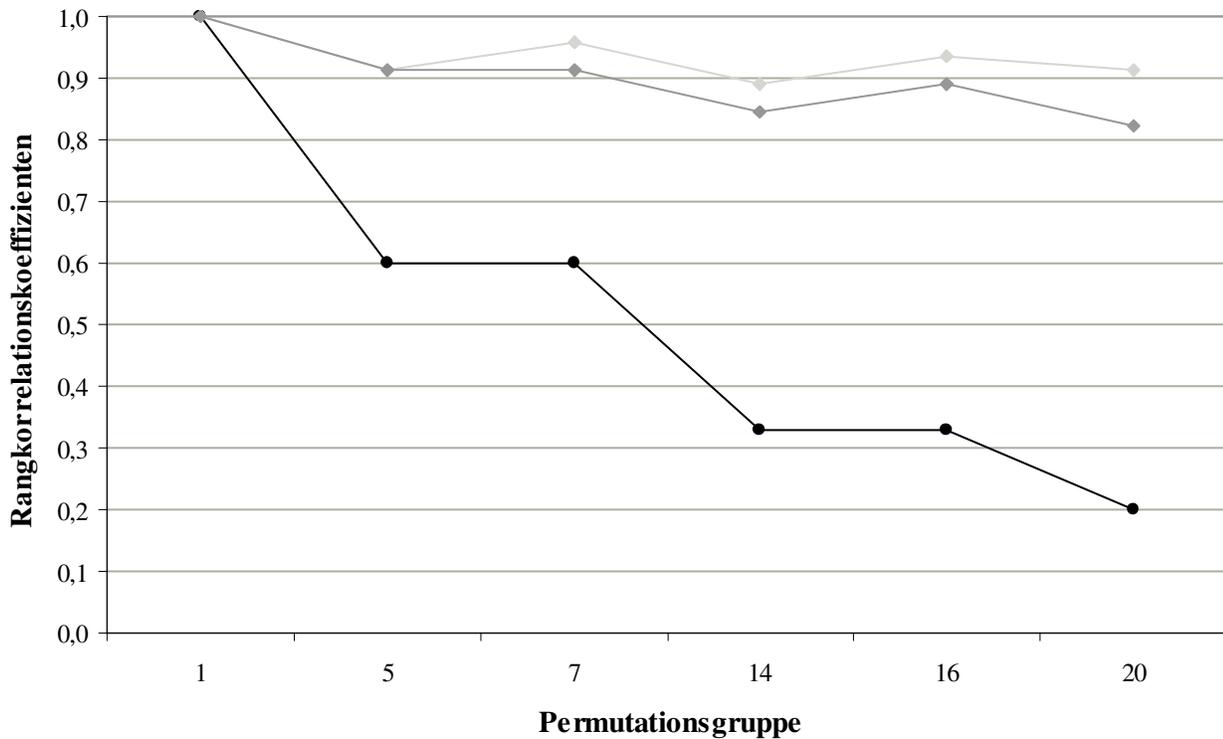
Ergebnisse von Versuchsperson NQ, alle 20 Permutationsgruppen:

Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: NQ

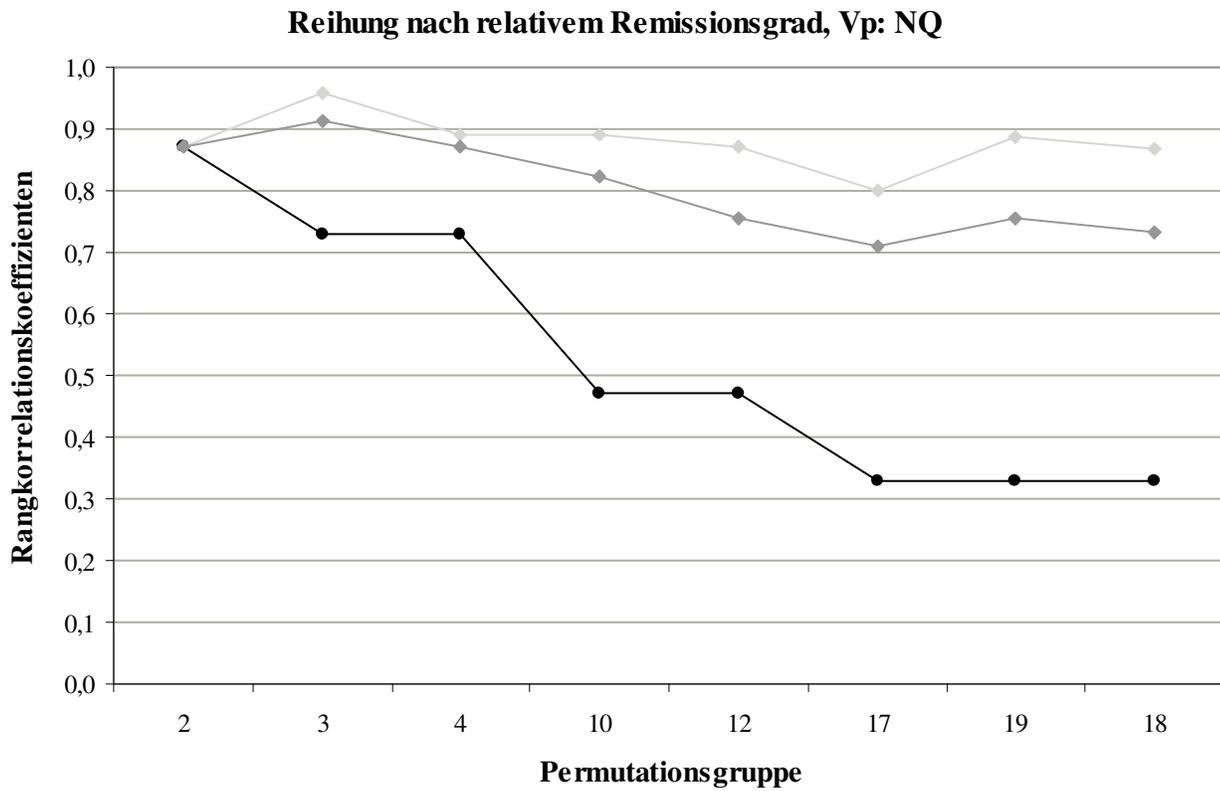


Gruppen mit einem bzw. zwei Licht/Schatten-Wechseln:

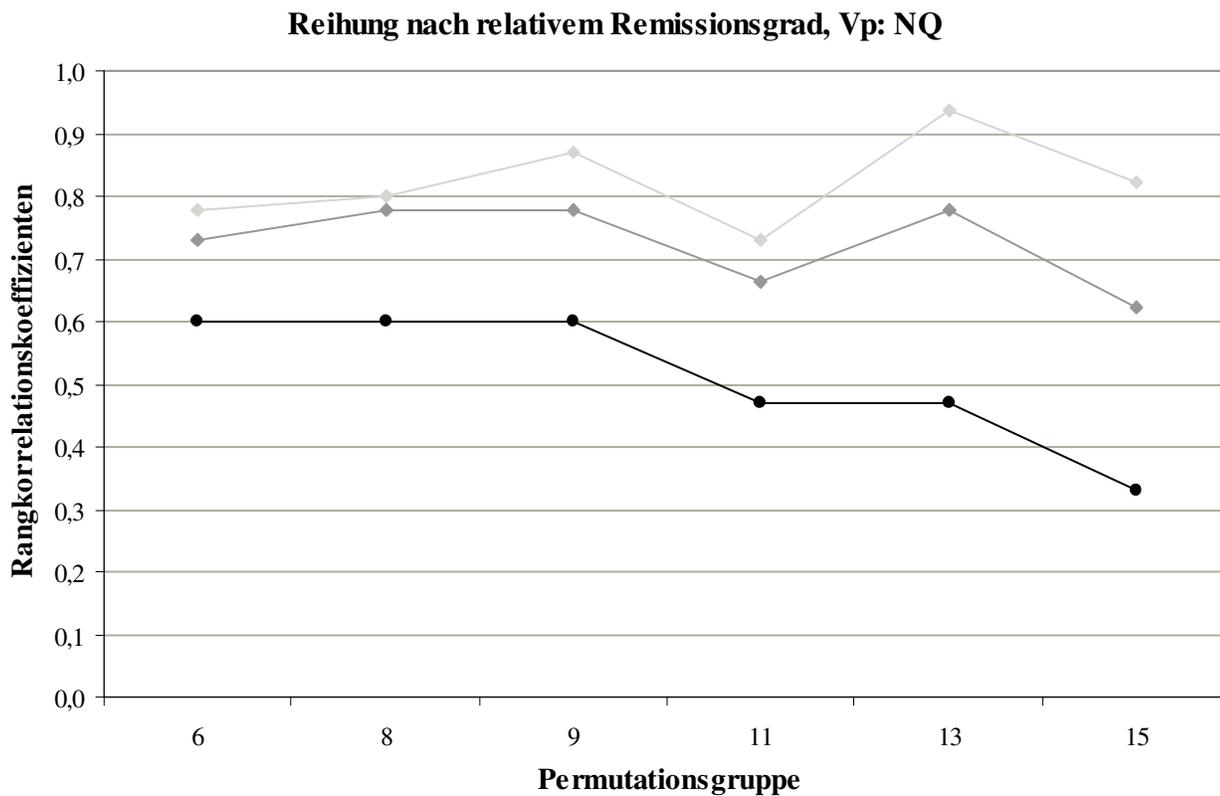
Reihung nach relativem Remissionsgrad, Vp: NQ



Gruppen mit drei Licht/Schatten-Wechseln:



Gruppen mit vier bzw. fünf Licht/Schatten-Wechseln:



3.2. Experiment 2: Helligkeitskonstanzleistung im invertierten Betrachtungsmodus

Die Versuchspersonen sollten die Rangfolge der Graupapiere nach Oberflächenhelligkeit im normalen und im invertierten Betrachtungsmodus bestimmen. Die Ergebnisse bei den verschiedenen Betrachtungsmodi wurden miteinander verglichen. Auch hier zeigte sich, daß die Helligkeitskonstanzleistung der Versuchspersonen im normalen Betrachtungsmodus individuell unterschiedlich ausgeprägt ist. Die Konstanzleistung versagte im invertierten Betrachtungsmodus bei allen Versuchspersonen vollständig. Die Reihungen bei Inversion der vvv-Figur stimmten fast ausnahmslos mit der Rangfolge der Graupapiere nach Leuchtdichte überein. Das visuelle System arbeitet unter diesen Bedingungen scheinbar ähnlich einem physikalischen Leuchtdichtemeßgerät.

Dabei wurden für diese Versuchsreihe geeignete Permutationen ausgewählt, bei denen die bei Inversion vorgenommene Reihung der Graupapiere nach Leuchtdichte eindeutig zu erkennen ist ohne durch diese Auswahl die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse zu beschränken. Verwendet man beispielsweise eine Permutation aus Gruppe 1, dann hat τ_0 bereits den Wert eins. τ_1 kann demnach nicht mehr größer werden, es ist also keine Verbesserung möglich. Weiterhin stimmen bei dieser Gruppe die Rangfolgen nach Remissionsgrad mit den Rangfolgen nach Leuchtdichte überein. Daher sollten die Ergebnisse der Reihungen in beiden Betrachtungsmodi identisch sein. Dieser triviale Fall konnte empirisch bestätigt werden. Geeignete Permutationen hatten daher die folgenden Kriterien zu erfüllen:

- Die Abstufung der Remissionsgrade der Graupapiere und die Schattenstärke mußten so gewählt werden, daß die Reihungen in den beiden Betrachtungsmodi verschieden ausfallen. Dies wurde bereits vor Durchführung von Experiment 1 sichergestellt.
- Der Wert von τ_0 sollte ausreichend klein sein, damit ein entsprechend deutlich größerer Wert von τ_1 möglich war.
- Die Permutation sollte zu einer Gruppe gehören, bei der bereits in Experiment 1 ein deutlicher Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 festzustellen war, also eine deutliche Verbesserung bei der Bewertung aufgrund der Helligkeitskonstanzleistung vorliegt.
- Aufgrund der engen Abstufung der Remissionsgrade und des lokalen Streulichteffektes war bei sehr vielen Permutationen festzustellen, daß sich zwei der sechs Leuchtdichtewerte nur minimal voneinander unterscheiden. Um eindeutige Ergebnisse zu erhalten, sollte dies bei den verwendeten Permutationen nicht der Fall sein.

Die genannten Kriterien werden von Permutationen aus den Gruppen 10, 16 und 20 erfüllt. Die Verteilungen der Graupapiere auf die Licht- bzw. Schattenseiten sind bei diesen Gruppen möglichst verschieden, weiterhin besitzen sie einen ausreichend kleinen Wert von τ_0 . Die endgültig verwendeten Permutationen wurden durch Ausprobieren ermittelt. Die Graupapiere wurden hierzu wiederholt umgeordnet, bis die resultierenden Leuchtdichtewerte möglichst unterschiedlich waren. Fünf Versuchspersonen bewerteten sechs nach diesem Verfahren bestimmte Permutationen in beiden Betrachtungsmodi. Dabei kamen aus jeder Gruppe jeweils zwei Permutationen zum Einsatz. Eine wurde mit dem dunklen Graupapiersatz erzeugt, die andere mit dem hellen.

An dieser Stelle soll ergänzend bemerkt werden, daß eine große Zahl von Vorversuchen mit zusätzlichen Versuchspersonen und Permutationen aus weiteren Gruppen durchgeführt wurde. Dabei waren jedoch einige Versuchsbedingungen anders als in den endgültigen Experimenten. Zu Beginn der Untersuchungen wurden zunächst drei Graupapiersätze verwendet, deren Remissionsgrade nicht logarithmisch sondern linear abgestuft waren. Weiterhin wurde als Versuchsobjekt eine umgedrehte vvv-Figur eingesetzt. Dadurch tritt der lokale Streulichteffekt nur bei den inneren vier Oberflächen auf, denn die beiden äußeren Graupapiere besitzen bei dieser $\Delta\Delta\Delta$ -Figur keine Streulichtpartner. Erst später wurde die vvv-Figur verwendet, zuerst mit drei logarithmisch abgestuften Graupapiersätzen, danach mit zwei Sätzen. Dabei zeigte sich grundsätzlich, daß im invertierten Betrachtungsmodus die vorgenommene Reihung nach Oberflächenhelligkeit immer mit der Rangfolge der Graupapiere nach Leuchtdichte übereinstimmt. Dies gilt daher offensichtlich unabhängig von den vorliegenden Versuchsparametern. Die endgültigen Versuchsbedingungen stellen daher das Ergebnis einer umfangreichen Entwicklungsphase dar. Hierdurch wird einerseits ermöglicht, aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten, weiterhin kann der Einfluß des unvermeidlichen lokalen Streulichts untersucht werden. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse von Experiment 2 sind demzufolge allgemeingültiger, als man ohne Kenntnis der Ergebnisse aller Vorversuche annehmen würde. Sie sind exemplarisch für alle bisher durchgeführten Versuche zur Wahrnehmung im invertierten Betrachtungsmodus. Auf eine detaillierte Beschreibung aller Versuchsparameter aus den Vorversuchen und den resultierenden Bewertungen in beiden Betrachtungsmodi wurde jedoch verzichtet, da aus diesen Daten keine neuen Erkenntnisse gewonnen werden können.

Die Ergebnisse von Experiment 2 wurden zunächst in einer tabellarischen Form dargestellt. Hierdurch soll verdeutlicht werden, auf welche Weise die entsprechenden Rangkorrelationskoeffizienten entstehen. Abschließend wurden die Mittelwerte der Rangkorrelationskoeffizienten aus den Bewertungen der fünf Versuchspersonen graphisch dargestellt.

Eine Tabelle beinhaltet in der ersten Zeile die Angabe der Permutationsgruppe, den verwendeten Graupapiersatz, die Schattenstärke und die Initialen der Versuchsperson. In der zweiten Zeile befindet sich die Anordnung der Graupapiere, beschrieben durch den Rang der Graupapiere nach Remissionsgrad an der jeweiligen Position auf der vvv-Figur. Die Lichtseiten sind hierbei hellgrau unterlegt, die Schattenseiten entsprechend dunkelgrau. In der dritten Zeile befindet sich die empirische Sequenz im normalen Betrachtungsmodus, also die von den Versuchspersonen wahrgenommene Reihenfolge nach Oberflächenhelligkeit. Die vierte Zeile enthält die empirische Sequenz im invertierten Betrachtungsmodus. Direkt darunter befindet sich die Rangfolge nach Leuchtdichte. Die entsprechenden Ränge der beiden letztgenannten Rangfolgen sind fettgedruckt, um deren Identität hervorzuheben. In der letzten Zeile befinden sich die gemessenen Leuchtdichtewerte. Tabelle 5 entstammt den Ergebnissen von Experiment 2 und soll an dieser Stelle als Beispiel betrachtet werden.

Zeile 1:	Permutationsgruppe: 10 dunkle Graupapiere Schattenstärke: 2,5 Vp: JH							
Zeile 2:	Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Zeile 3:	Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Zeile 4:	Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{1i} = 0,47$
Zeile 5:	Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Zeile 6:	Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Tabelle 5: Beispiel zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Bewertung einer Permutation aus Gruppe 10

In der rechten Spalte befinden sich vier verschiedene Rangkorrelationskoeffizienten.

τ_0 ergibt sich aus dem Vergleich der Zeilen 2 und 5.

τ_1 ergibt sich aus dem Vergleich der Zeilen 2 und 3.

τ_{1i} ergibt sich aus dem Vergleich der Zeilen 2 und 4.

Der Rangkorrelationskoeffizient τ_{iL} wird an dieser Stelle neu eingeführt, er entsteht aus dem Vergleich der Zeilen 4 und 5, also aus der empirischen Sequenz nach Inversion und der Rangfolge nach Leuchtdichte. Da diese Rangfolgen fast immer identisch sind, hat τ_{iL} meistens den Wert eins. Der Wert von τ_{iL} ist durch einen hellgrauen Hintergrund hervorgehoben.

Ergebnisse bei Permutation 1/6/5/2/4/3 aus Gruppe 10 bei Einsatz der dunklen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 10	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: AN	
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	3	2	4	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Permutationsgruppe: 10	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: JH	
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Permutationsgruppe: 10	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: NQ	
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Permutationsgruppe: 10	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: RL	
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	4	3	2	5	$\tau_1 = 0,60$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Permutationsgruppe: 10	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: SW	
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	3	2	4	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	43	7	18	16	24	14	

Ergebnisse bei Permutation 1/6/5/2/4/3 aus Gruppe 10 bei Einsatz der hellen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 10	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: AN		
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	160	39	76	71	100	64	

Permutationsgruppe: 10	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: JH		
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	160	39	76	71	100	64	

Permutationsgruppe: 10	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: NQ		
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	2	3	4	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	160	39	76	71	100	64	

Permutationsgruppe: 10	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: RL		
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	3	2	4	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	160	39	76	71	100	64	

Permutationsgruppe: 10	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: SW		
Rang nach Remissionsgrad	1	6	5	2	4	3	$\tau_0 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	1	6	5	3	2	4	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	6	3	4	2	5	$\tau_{i1} = 0,47$
Rang nach Leuchtdichte	1	6	3	4	2	5	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	160	39	76	71	100	64	

Ergebnisse bei Permutation 4/2/3/1/5/6 aus Gruppe 16 bei Einsatz der dunklen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 16	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,8				Vp: AN	
Rang nach Remissionsgrad	4	2	3	1	5	6	$\tau_0 = 0,2$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	4	3	1	2	5	6	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	2	5	1	4	3	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	2	5	1	4	3	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	13	31	18	19	6	

Permutationsgruppe: 16	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,8				Vp: JH	
Rang nach Remissionsgrad	4	2	3	1	5	6	$\tau_0 = 0,2$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	4	3	2	1	5	6	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	2	5	1	4	3	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	2	5	1	4	3	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	13	31	18	19	6	

Permutationsgruppe: 16	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,8				Vp: NQ	
Rang nach Remissionsgrad	4	2	3	1	5	6	$\tau_0 = 0,2$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	3	4	1	2	5	6	$\tau_1 = 0,6$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	2	5	1	4	3	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	2	5	1	4	3	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	13	31	18	19	6	

Permutationsgruppe: 16	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,8				Vp: RL	
Rang nach Remissionsgrad	4	2	3	1	5	6	$\tau_0 = 0,2$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	3	5	1	2	4	6	$\tau_1 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	2	5	1	4	3	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	2	5	1	4	3	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	13	31	18	19	6	

Permutationsgruppe: 16	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,8				Vp: SW	
Rang nach Remissionsgrad	4	2	3	1	5	6	$\tau_0 = 0,2$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	3	5	1	2	4	6	$\tau_1 = 0,47$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	2	5	1	4	3	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	2	5	1	4	3	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	13	31	18	19	6	

Ergebnisse bei Permutation 5/2/4/1/3/6 aus Gruppe 16 bei Einsatz der hellen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 16	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: AN		
Rang nach Remissionsgrad	5	2	4	1	3	6	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	3	4	1	2	6	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	5	2	3	1	6	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	5	2	3	1	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	71	66	100	94	113	38	

Permutationsgruppe: 16	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: JH		
Rang nach Remissionsgrad	5	2	4	1	3	6	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	2	4	1	3	6	$\tau_1 = 1,0$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	3	5	2	4	1	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	4	5	2	3	1	6	$\tau_{iL} = 0,87$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	71	66	100	94	113	38	

Permutationsgruppe: 16	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: NQ		
Rang nach Remissionsgrad	5	2	4	1	3	6	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	2	4	1	3	6	$\tau_1 = 1,0$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	3	5	2	4	1	6	$\tau_{i1} = 0,2$
Rang nach Leuchtdichte	4	5	2	3	1	6	$\tau_{iL} = 0,87$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	71	66	100	94	113	38	

Permutationsgruppe: 16	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: RL		
Rang nach Remissionsgrad	5	2	4	1	3	6	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	3	4	1	2	6	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	5	2	3	1	6	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	5	2	3	1	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	71	66	100	94	113	38	

Permutationsgruppe: 16	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: SW		
Rang nach Remissionsgrad	5	2	4	1	3	6	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	2	4	1	3	6	$\tau_1 = 1,0$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	5	2	3	1	6	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	5	2	3	1	6	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	71	66	100	94	113	38	

Ergebnisse bei Permutation 4/1/6/3/5/2 aus Gruppe 20 bei Einsatz der dunklen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 20	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: AN	
Rang nach Remissionsgrad	4	1	6	3	5	2	$\tau_0 = 0,20$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	2	1	6	4	5	3	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	2	5	6	3	4	$\tau_{i1} = 0,20$
Rang nach Leuchtdichte	1	2	5	6	3	4	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	19	14	13	18	16	

Permutationsgruppe: 20	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: JH	
Rang nach Remissionsgrad	4	1	6	3	5	2	$\tau_0 = 0,20$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	3	1	6	4	5	2	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	3	5	6	2	4	$\tau_{i1} = 0,07$
Rang nach Leuchtdichte	1	2	5	6	3	4	$\tau_{iL} = 0,87$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	19	14	13	18	16	

Permutationsgruppe: 20	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: NQ	
Rang nach Remissionsgrad	4	1	6	3	5	2	$\tau_0 = 0,20$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	2	1	6	4	5	3	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus:	1	2	5	6	3	4	$\tau_{i1} = 0,20$
Rang nach Leuchtdichte	1	2	5	6	3	4	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	19	14	13	18	16	

Permutationsgruppe: 20	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: RL	
Rang nach Remissionsgrad	4	1	6	3	5	2	$\tau_0 = 0,20$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	2	1	6	3	4	3	$\tau_1 = 0,60$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	2	5	6	3	4	$\tau_{i1} = 0,20$
Rang nach Leuchtdichte	1	2	5	6	3	4	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	19	14	13	18	16	

Permutationsgruppe: 20	dunkle Graupapiere	Schattenstärke: 2,5				Vp: SW	
Rang nach Remissionsgrad	4	1	6	3	5	2	$\tau_0 = 0,20$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	2	1	6	3	4	3	$\tau_1 = 0,60$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	1	2	5	6	3	4	$\tau_{i1} = 0,20$
Rang nach Leuchtdichte	1	2	5	6	3	4	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	21	19	14	13	18	16	

Ergebnisse bei Permutation 5/3/4/2/6/1 aus Gruppe 20 bei Einsatz der hellen Graupapiere für fünf verschiedene Versuchspersonen:

Permutationsgruppe: 20	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: AN		
Rang nach Remissionsgrad	5	3	4	2	6	1	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	4	3	2	6	1	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	6	1	3	5	2	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	6	1	3	5	2	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	70	53	98	76	68	92	

Permutationsgruppe: 20	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: JH		
Rang nach Remissionsgrad	5	3	4	2	6	1	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	3	4	2	6	1	$\tau_1 = 1,0$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	6	1	3	5	2	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	6	1	3	5	2	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	70	53	98	76	68	92	

Permutationsgruppe: 20	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: NQ		
Rang nach Remissionsgrad	5	3	4	2	6	1	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	4	3	2	6	1	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	6	1	3	5	2	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	6	1	3	5	2	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	70	53	98	76	68	92	

Permutationsgruppe: 20	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: RL		
Rang nach Remissionsgrad	5	3	4	2	6	1	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	4	5	3	2	6	1	$\tau_1 = 0,73$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	6	1	3	5	2	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	6	1	3	5	2	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	70	53	98	76	68	92	

Permutationsgruppe: 20	helle Graupapiere		Schattenstärke: 2,5		Vp: SW		
Rang nach Remissionsgrad	5	3	4	2	6	1	$\tau_0 = 0,33$
Emp. Sequenz, Betr.modus: normal	5	4	3	2	6	1	$\tau_1 = 0,87$
Emp. Sequenz, Betr.modus: invertiert	4	6	1	3	5	2	$\tau_{i1} = 0,33$
Rang nach Leuchtdichte	4	6	1	3	5	2	$\tau_{iL} = 1,0$
Leuchtdichtewerte [cd/m ²]	70	53	98	76	68	92	

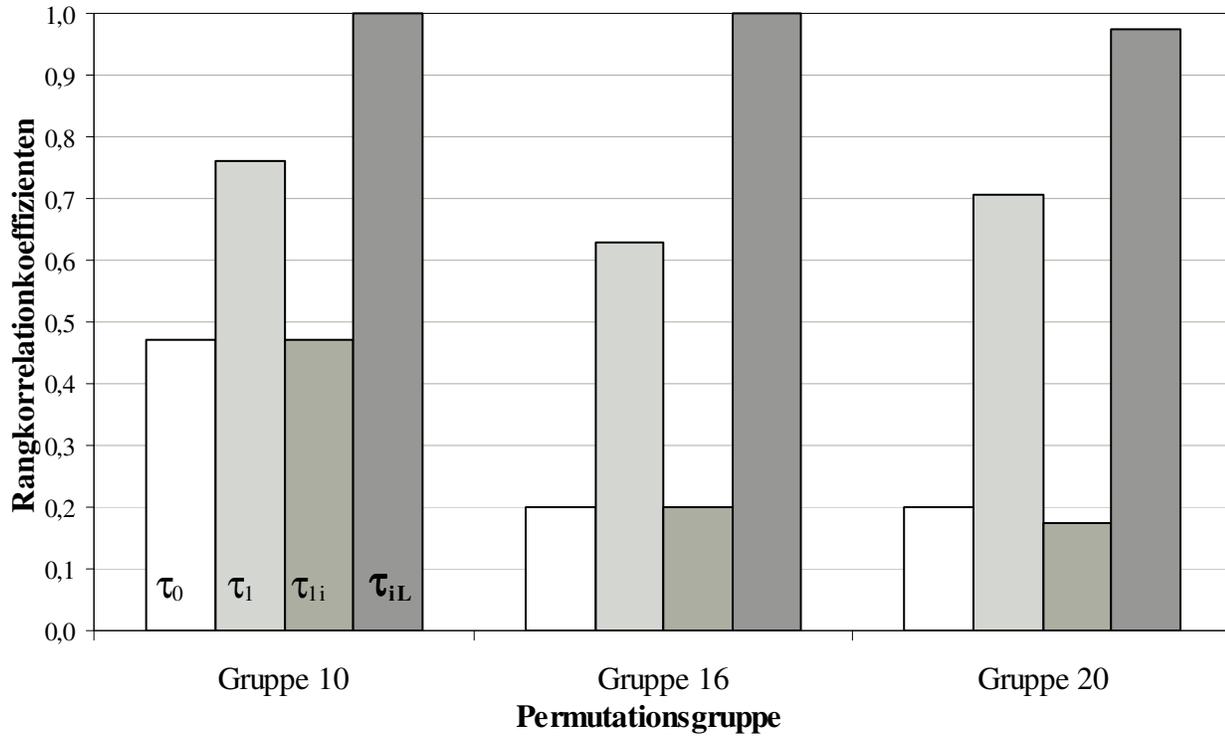
Durch die Analyse der Tabellen auf den Seiten 68-73 kann nachvollzogen werden, welche Sequenzen zu den verschiedenen Rangkorrelationskoeffizienten führen. Die Tabellen enthalten demnach die vollständigen Informationen über die Stimuli und deren Bewertung. Damit kann verdeutlicht werden, daß τ_0 und τ_{1i} nicht nur identische Werte besitzen, sondern auch eine vollständige Identität der Rangfolge nach Leuchtdichte und der wahrgenommene Rangfolge nach Oberflächenhelligkeit im invertierten Betrachtungsmodus vorliegt. Diese Identität der Rangfolgen muß jedoch nicht zwangsläufig aus der Identität der Rangkorrelationskoeffizienten folgen, da verschiedene Sequenzen zu gleichen Werten von τ führen können. Der entscheidende Grund für die Wahl einer tabellarischen Darstellung ist daher neben der Vollständigkeit der Datensätze die Möglichkeit des expliziten Sequenzvergleichs.

Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, daß durch die Einführung des Rangkorrelationskoeffizienten τ_{iL} bereits alle nötigen Informationen geliefert werden. Die Darstellung der Sequenzen ist jedoch zunächst anschaulicher als die Verwendung eines weiteren Rangkorrelationskoeffizienten. τ_{iL} vergleicht die Rangfolge nach wahrgenommener Oberflächenhelligkeit im invertierten Betrachtungsmodus mit der Rangfolge nach Leuchtdichte. Ergibt sich hier ein Wert von eins, bedeutet dies die Identität der beiden Rangfolgen. Dies war in fast allen durchgeführten Versuchsreihen der Fall.

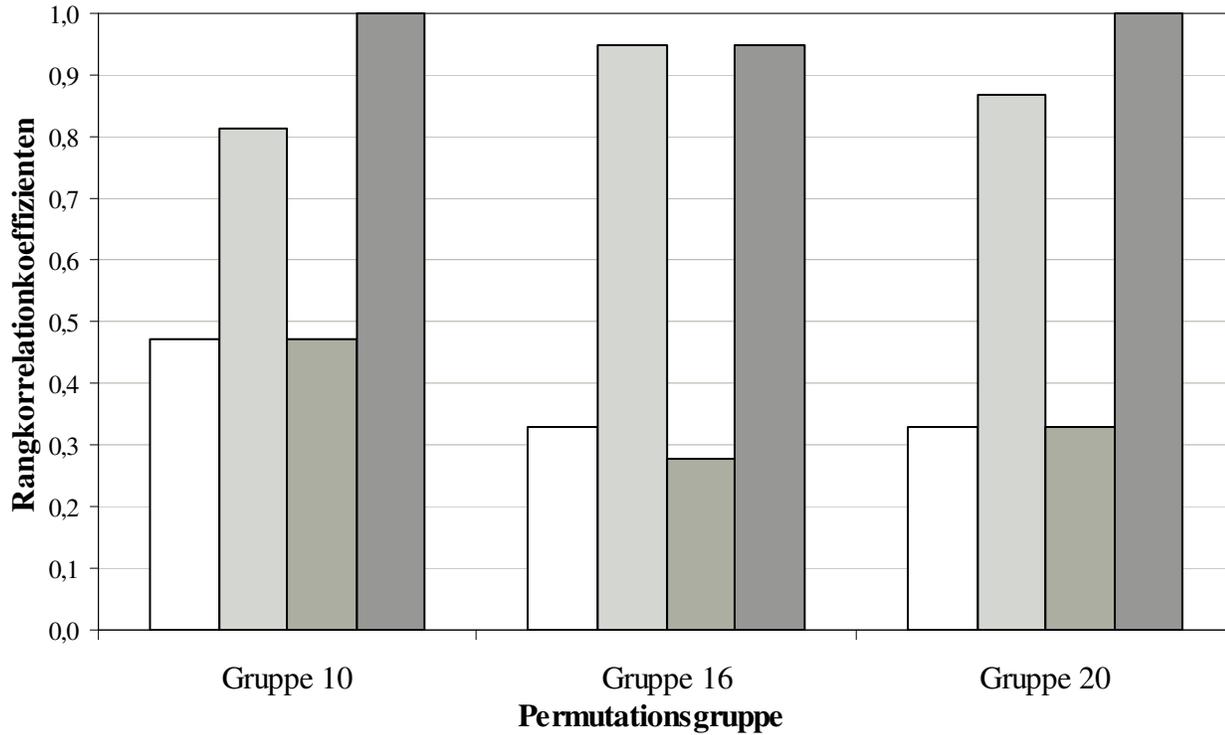
In den beiden Diagrammen auf der folgenden Seite werden die Mittelwerte der vier verschiedenen Rangkorrelationskoeffizienten von allen fünf Versuchspersonen dargestellt. Dies stellt eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse von Experiment 2 dar. In beiden Diagrammen ist deutlich zu erkennen, daß die Differenz zwischen τ_0 und τ_1 stark ausgeprägt ist. Dies entspricht der Erwartung, da Permutationen verwendet wurden, bei denen bereits in den Vorversuchen sowie auch in Experiment 1 eine deutliche Verbesserung aufgrund der Helligkeitskonstanzleistung zu beobachten war.

Im invertierten Betrachtungsmodus fiel diese Verbesserung vollständig aus. Die bei Inversion von den Versuchspersonen wahrgenommenen Rangfolgen nach relativem Remissionsgrad waren in 27 von 30 Fällen mit den Rangfolgen nach Leuchtdichte identisch. Daher stimmt in 27 Fällen τ_{1i} mit τ_0 überein, in drei Fällen ist τ_0 sogar größer als τ_{1i} . Der Wert von τ_{iL} ist demzufolge in 27 Fällen gleich eins und in den drei Fällen 0,87. Daher sind auch die Mittelwerte für τ_{iL} aus den Bewertungen von fünf Versuchspersonen entsprechend gleich eins oder geringfügig kleiner.

**Die Rangkorrelationkoeffizienten τ_0 , τ_1 , τ_{1i} und τ_{iL}
fünf Versuchspersonen gemittelt, dunkle Graupapiere**



**Die Rangkorrelationkoeffizienten τ_0 , τ_1 , τ_{1i} und τ_{iL}
fünf Versuchspersonen gemittelt, helle Graupapiere**



3.3. Experiment 3: Helligkeitskonstanzleistung nach Ausblenden der 3-D-Information.

Durch die in Abschnitt 2.1.2. *Der Versuchsaufbau* beschriebenen Sichtblenden konnten die Umrisse der vvv-Figur ausgeblendet werden. Außerdem wurde die Figur monokular betrachtet. Der entsprechende Stimulus erschien den Versuchspersonen als eine flache Anordnung sechs verschieden grau eingefärbter Flächen. Es wurden die gleichen Permutationen wie beim Inversionsexperiment verwendet. Dadurch sollte der Vergleich zwischen diesen beiden Betrachtungsmodi ermöglicht werden.

Die Ergebnisse waren eindeutig: Bei Ausblenden der räumlichen Information reiheten die Versuchspersonen die sechs Graupapiere nach Leuchtdichte, obwohl deren Aufgabe eine Reihung nach relativem Remissionsgrad war. Auch unter diesen Bedingungen versagte die Helligkeitskonstanzleistung offensichtlich vollständig. Die Bewertungen waren mit denjenigen bei Inversion identisch.

Unter den vorliegenden Versuchsbedingungen wurde von den Versuchspersonen kein Einfluß auf die Wahrnehmung aufgrund der fehlenden räumlichen Tiefe bemerkt. Die als flach wahrgenommene Anordnung der Graupapiere kann nicht räumlich invertiert gesehen werden. Daher erschien den Versuchspersonen die durch Ausblenden der 3-D-Information hervorgerufene Wahrnehmung im Gegensatz zum Inversionsphänomen als unauffällig, denn hier ist kein kurzfristiger Wechsel zwischen den beiden Interpretationen und damit auch kein direkter Vergleich möglich.

Aus der Identität der Ergebnisse bei Inversion und bei Ausblenden der 3-D-Information kann man schließen, daß es offensichtlich keinen Unterschied für die Wahrnehmungsleistung bedeutet, ob die Information über die räumliche Struktur des Objektes entweder nicht zur Verfügung steht oder ob die wahrgenommene Struktur nicht der tatsächlichen Struktur entspricht.

Für diese Versuchsreihe wurden nicht nur die bereits bei den Inversionsversuchen eingesetzten Permutationen bei identischer Schattenstärke, sondern auch die selben Versuchspersonen verwendet. Nur Versuchsperson AN stand nicht mehr zur Verfügung. Da für die verbleibenden vier Versuchspersonen Bewertungen resultierten, die mit denen aus den Versuchen bei Inversion identisch sind, ist eine erneute tabellarische und graphische Darstellung überflüssig.

3.4. Experiment 4: Helligkeitskonstanzleistung bei variablem Streulichteinfluß.

In dieser Versuchsreihe sollten die Versuchspersonen alle 36 Permutationen einer Gruppe bewerten. Weiterhin wurden beide Graupapiersätze verwendet. Der Einfluß des lokalen Streulichts ist bei den hellen Graupapieren wesentlich stärker ausgeprägt¹³. Durch den Vergleich der Ergebnisse bei den zwei verschiedenen Graupapiersätzen bezüglich der Konsistenz der Bewertungen innerhalb einer Gruppe kann festgestellt werden, inwieweit zusätzliche oder unterschiedliche Fehler bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad durch den Streulichteinfluß hervorgerufen werden.

Getestet wurden die Permutationsgruppen 14 und 16, wobei innerhalb der Gruppe 14 die Variation des Streulichteffekts bei den hellen Graupapieren in der maximal möglichen Ausprägung vorliegt. Dies ergibt aus den möglichen Kombinationen der sich wechselseitig beleuchtenden Graupapiere innerhalb der Gruppe. Da bei Gruppe 14 sowohl Papier 1 (höchster Remissionsgrad) als auch Papier 6 (geringster Remissionsgrad) auf den Lichtseiten liegen, kommen beide Papiere als Streulichtpartner für die Papiere 2, 3 und 4 auf den Schattenseiten in Frage. Dies führt bei entsprechender Anordnung der Papiere zu dem sog. kritischen Fall, bei dem beispielsweise Papier 4 eine höhere Leuchtdichte als Papier 3 aufweist, obwohl Papier 3 den höheren Remissionsgrad besitzt und daher ohne das lokale Streulicht auch die höhere Leuchtdichte besäße. Dazu muß Papier 4 gegenüber von Papier 1 liegen und dadurch die maximale Leuchtdichtezunahme erfahren, während Papier 3 durch Nachbarschaft von Papier 6 nur die minimale Leuchtdichtezunahme erhält. Die Bedingungen für den kritischen Fall sind demzufolge allein durch die Analyse der Nachbarschaftsverhältnisse zu ermitteln, da die entsprechenden Leuchtdichtezunahmen für alle möglichen Streulichtpaarkombinationen bereits empirisch ermittelt wurden¹⁴.

Bei Gruppe 16 befinden sich die Papiere 3, 4 und 5 auf den Lichtseiten. Diese unterscheiden sich in ihrem Remissionsgrad deutlich geringer. Sie haben daher als mögliche Streulichtpartner bei den Papieren 1, 2 und 6 eine vergleichbar homogene Leuchtdichtezunahme zur Folge. Diese wirkt insbesondere bei den hellen Graupapieren der Beleuchtungsasymmetrie entgegen.

¹³ siehe Abschnitt 2.6. *Globales und lokales Streulicht*

¹⁴ Siehe Tabelle 4 auf Seite 41.

Die Schattenstärke wird durch die relativ gleichmäßige Leuchtdichtezunahme reduziert, die entsprechende Reizsituation wird dadurch vereinfacht.

In den folgenden Diagrammen werden die Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 und τ_1 für alle 36 Permutationen einer Gruppe dargestellt. Dabei wird in der Darstellung nur der berechnete Rangkorrelationskoeffizient τ_{0b} verwendet, welcher den lokalen Streulichteinfluß nicht berücksichtigt und damit innerhalb der Permutationsgruppe konstant ist. Die Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} werden zunächst nicht ermittelt. Diese berücksichtigen zwar den innerhalb der Gruppe variablen Einfluß des lokalen Streulichtes, sie können nur nach Messen aller Leuchtdichten der Graupapiere berechnet werden. Dies ist jedoch nicht nötig, da die Bedingungen für den kritischen Fall direkt aus der Anordnung der Graupapiere abgeleitet werden können. Sind diese Bedingungen erfüllt, ergibt sich ein Wert von τ_{0g} , der eine Stufe tiefer im Raster der möglichen Werte liegt. Sollte sich dies auf die Wahrnehmungsleistung auswirken, dann müßte der resultierende Wert von τ_1 auch entsprechend kleiner sein.

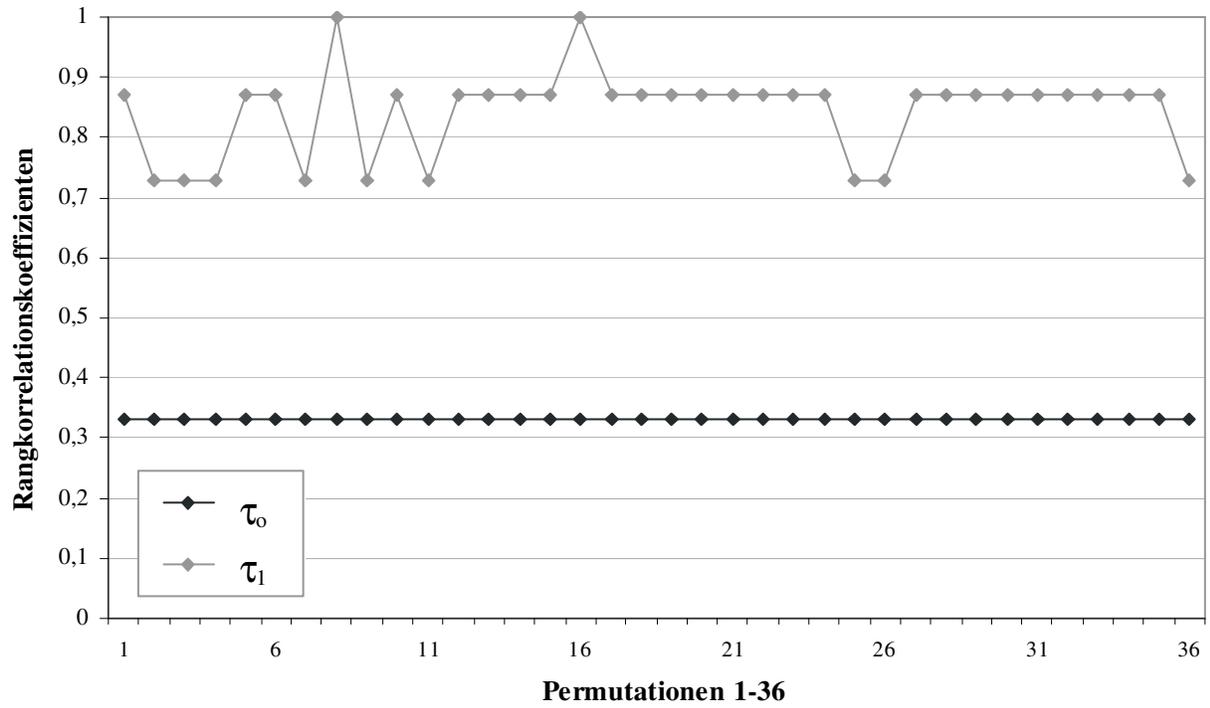
Um die Analyse der resultierenden Bewertungen aller Permutationen einer Gruppe zu vereinfachen, wurde die Numerierung der 36 Permutationen so gewählt, daß immer sechs aufeinanderfolgende Permutationen identische Streulichtpaarkombinationen aufweisen. Dementsprechend besitzen die Permutationen 1-6, bzw. 7-12, 13-18, ..., 31-36 jeweils identische Leuchtdichtezunahmen und daher auch zwangsläufig den gleichen Wert von τ_{0g} .

Wenn sich nun ein systematischer Einfluß des lokalen Streulichts auf die Wahrnehmungsleistung ergibt, dann sollte dies zu Bewertungen führen, die innerhalb dieser Subgruppen zu je sechs Permutationen identisch, zwischen den Subgruppen jedoch verschieden sind. Insbesondere bei den Permutationen 7-12 sowie 19-24 bei Permutationsgruppe 14 und den hellen Graupapieren sollte eine schlechtere Wahrnehmungsleistung zu beobachten sein, da diese die Bedingungen für den kritischen Fall erfüllen.

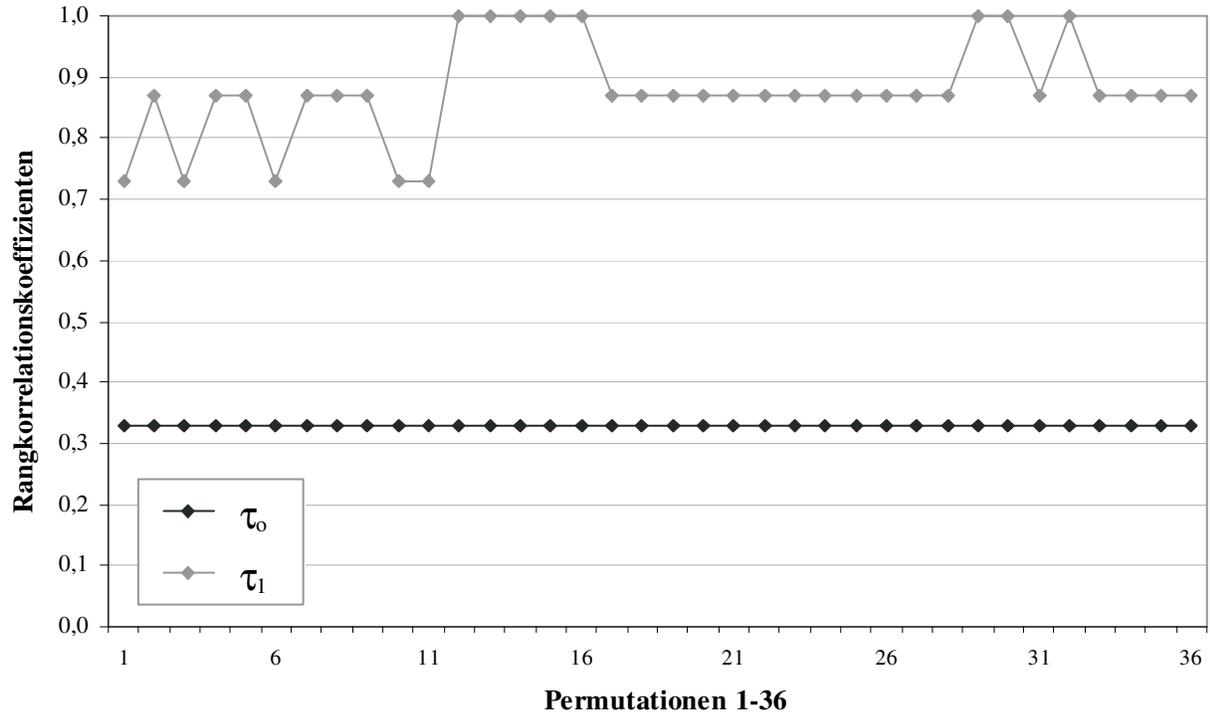
In je zwei aufeinanderfolgenden Diagrammen werden zuerst die Ergebnisse für die dunklen und dann für die hellen Graupapiere von einer Versuchsperson dargestellt. Insgesamt konnten bei Experiment 4 folgende Zusammenhänge festgestellt werden:

- Die erwartete stärkere Variation bei der Bewertung der hellen Graupapiere bei Permutationsgruppe 14 aufgrund des stark variablen Streulichteinflusses war nicht zu erkennen.
- Insbesondere konnte die beobachtete Variation nicht auf die Permutationen, welche die Bedingungen für den kritischen Fall erfüllen, zurückgeführt werden.
- Weiterhin war auch kein systematischer Zusammenhang zwischen der Güte der Wahrnehmungsleistung und den bereits beschriebenen Subgruppen mit identischen Streulichtpaarkombinationen zu erkennen.
- Die Bewertungen waren im Mittel bei den hellen Graupapieren besser. Dies bestätigt die Ergebnisse von Experiment 1.
- Bei den Versuchspersonen RL und JH wurde nur Permutationsgruppe 16 getestet. Diese zeigten eine außergewöhnliche Konsistenz bei den Bewertungen der 36 Permutationen. Bei den dunklen Graupapieren waren 32 bzw. 35 Bewertungen fehlerlos, bei den hellen Graupapieren ergaben sich bei beiden Versuchspersonen jeweils 36 fehlerlose Bewertungen. Auch Versuchsperson NQ lieferte 34 fehlerlose Reihungen bei den hellen Graupapieren bei Gruppe 16.
- Versuchsperson AK zeigte bei Gruppe 16 eine variable Wahrnehmungsleistung, deren Variabilität in etwa mit derjenigen bei Gruppe 14 übereinstimmt. Diese Unsicherheit zeigte sich bereits bei Experiment 1, was darauf hindeutet, daß diese Versuchsperson insgesamt nicht so sicher bei der Bewertung der verschiedenen Stimuli ist.
- Die Variabilität ist auch über alle 20 Permutationsgruppen im Verlauf von Experiment 1 nicht mit dem lokalen Streulichteffect in Verbindung zu bringen. Hierbei wurden aus jeder Gruppe alle sechs möglichen Streulichtpaarkombinationen getestet.

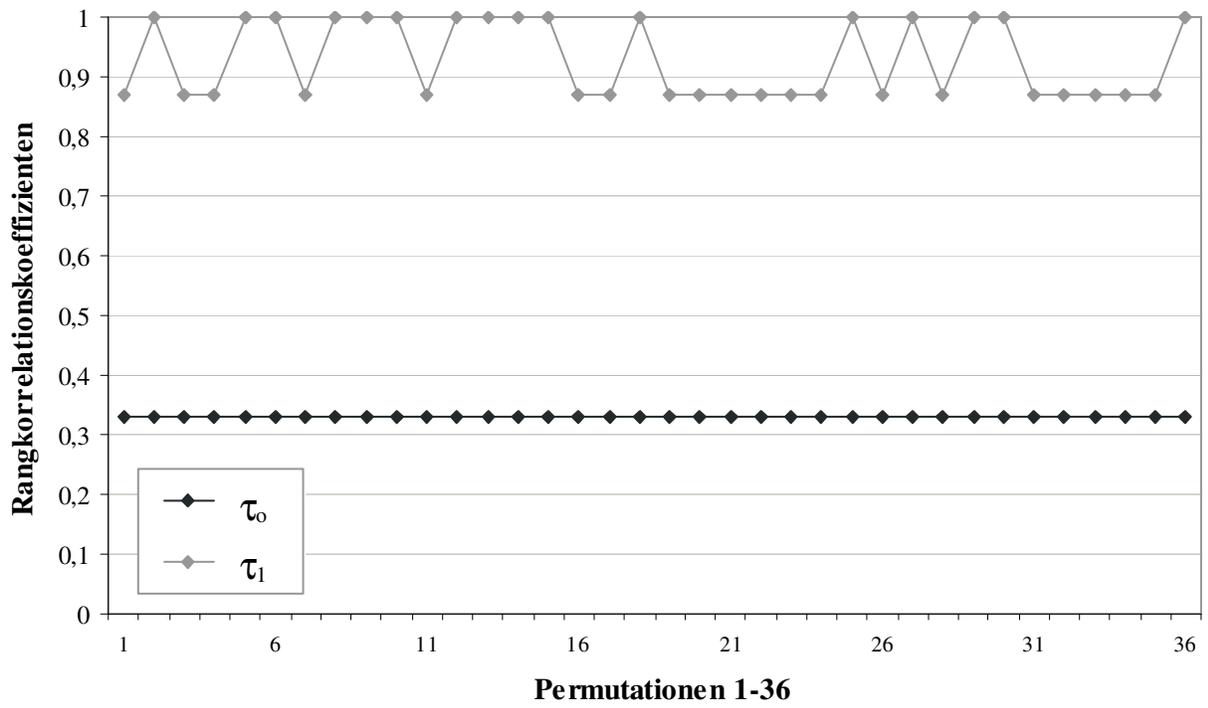
Alle Permutationen aus Gruppe 14, Vp: NQ,
dunkle Graupapiere



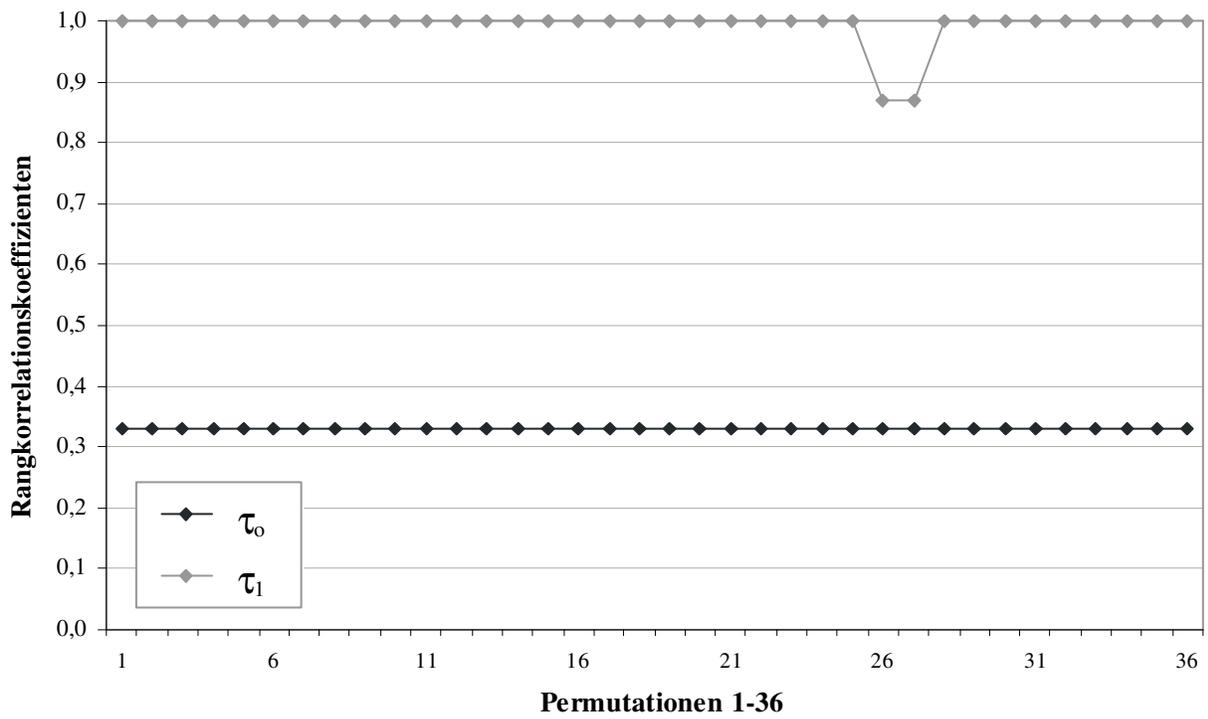
Alle Permutationen aus Gruppe 14, Vp: NQ,
helle Graupapiere



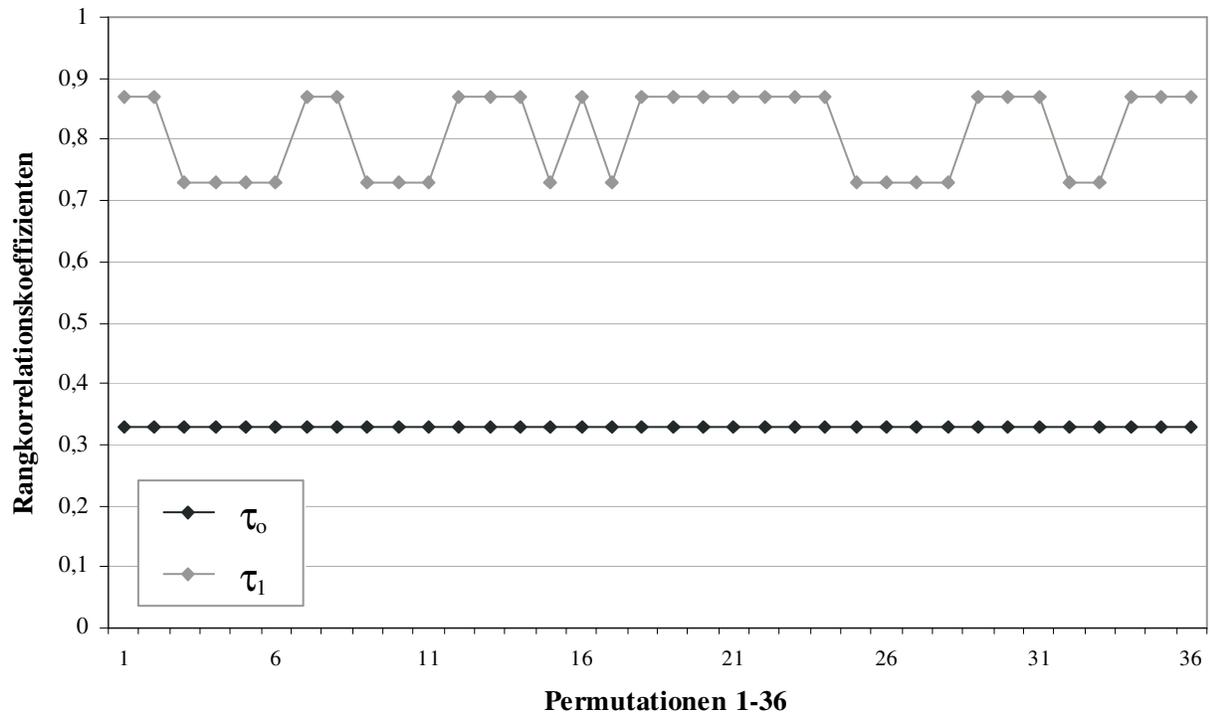
Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: NQ,
dunkle Graupapiere



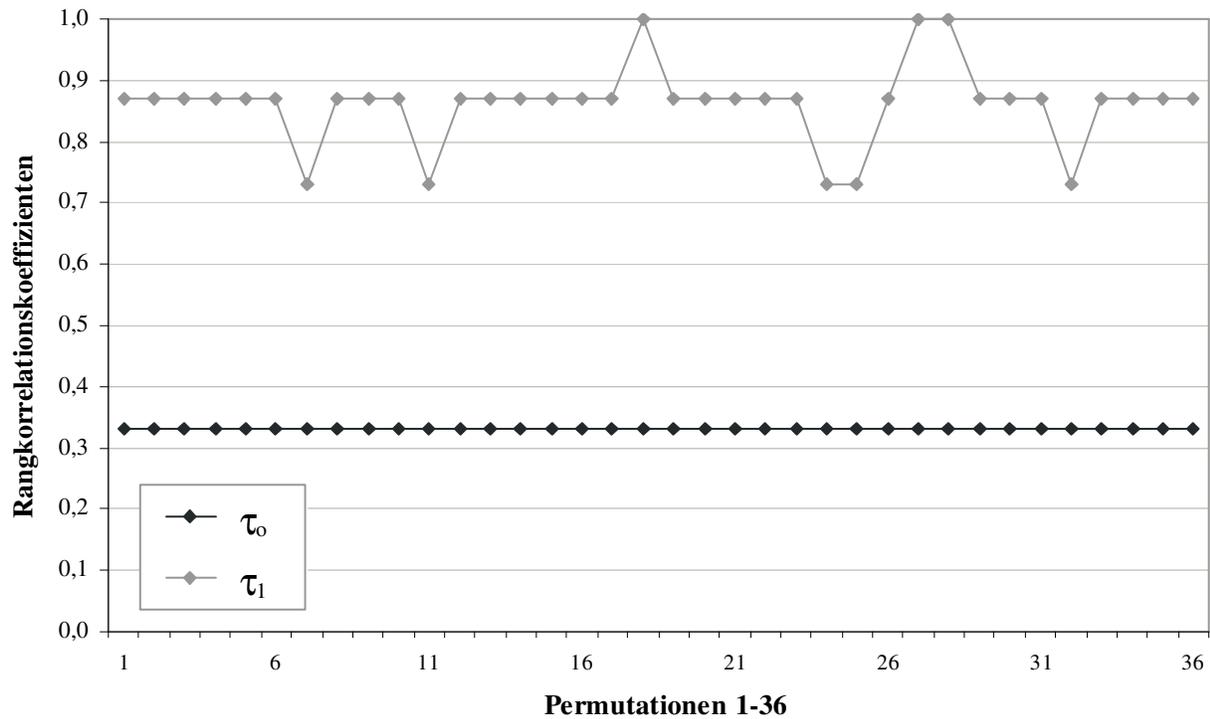
Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: NQ,
helle Graupapiere



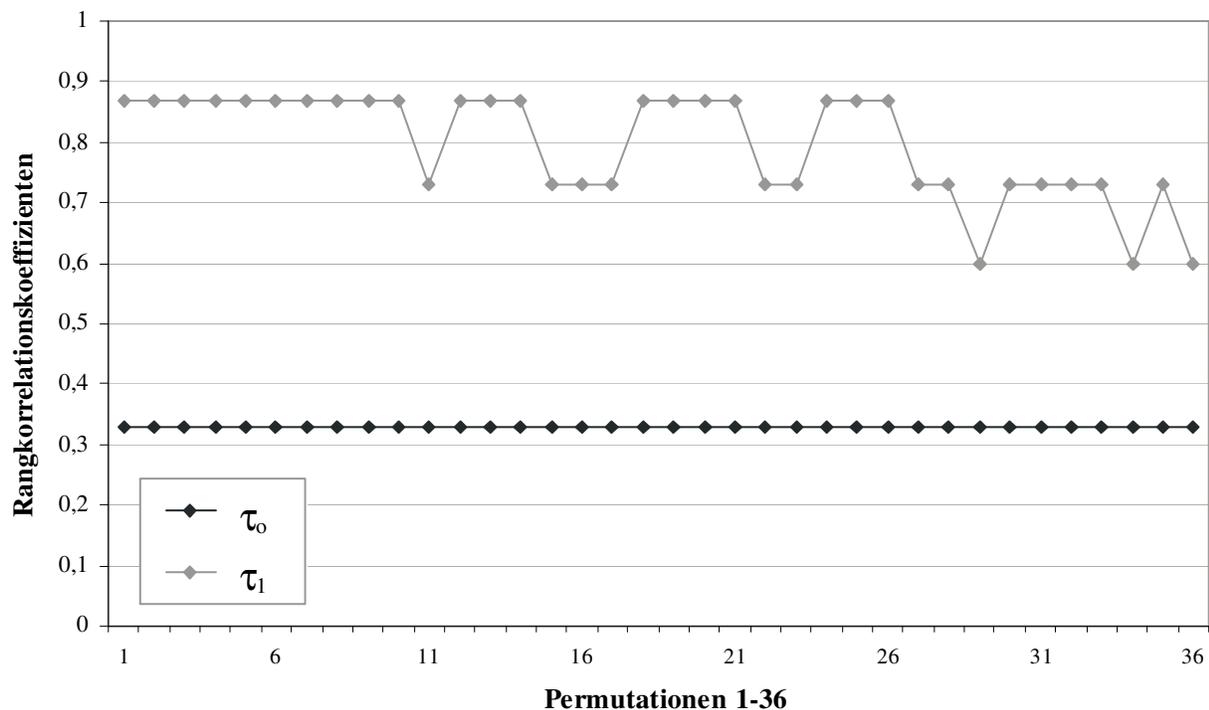
Alle Permutationen aus Gruppe 14, Vp: AK,
dunkle Graupapiere



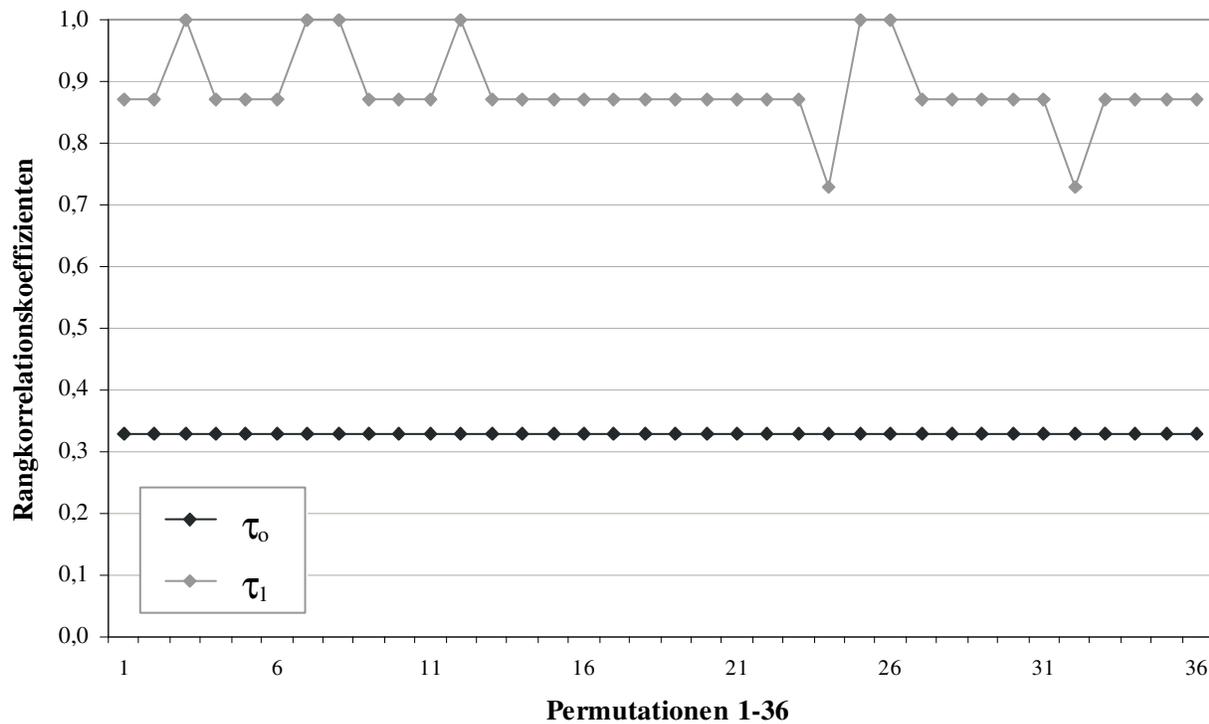
Alle Permutationen aus Gruppe 14, Vp: AK,
helle Graupapiere



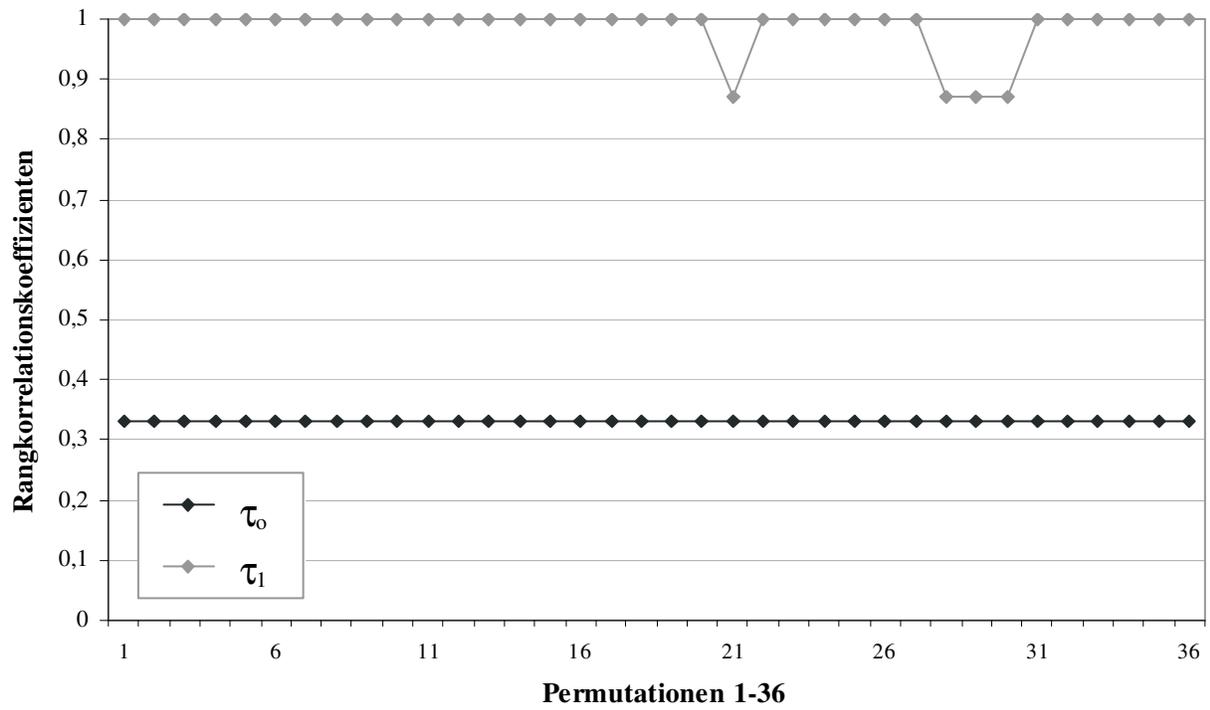
**Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: AK,
dunkle Graupapiere**



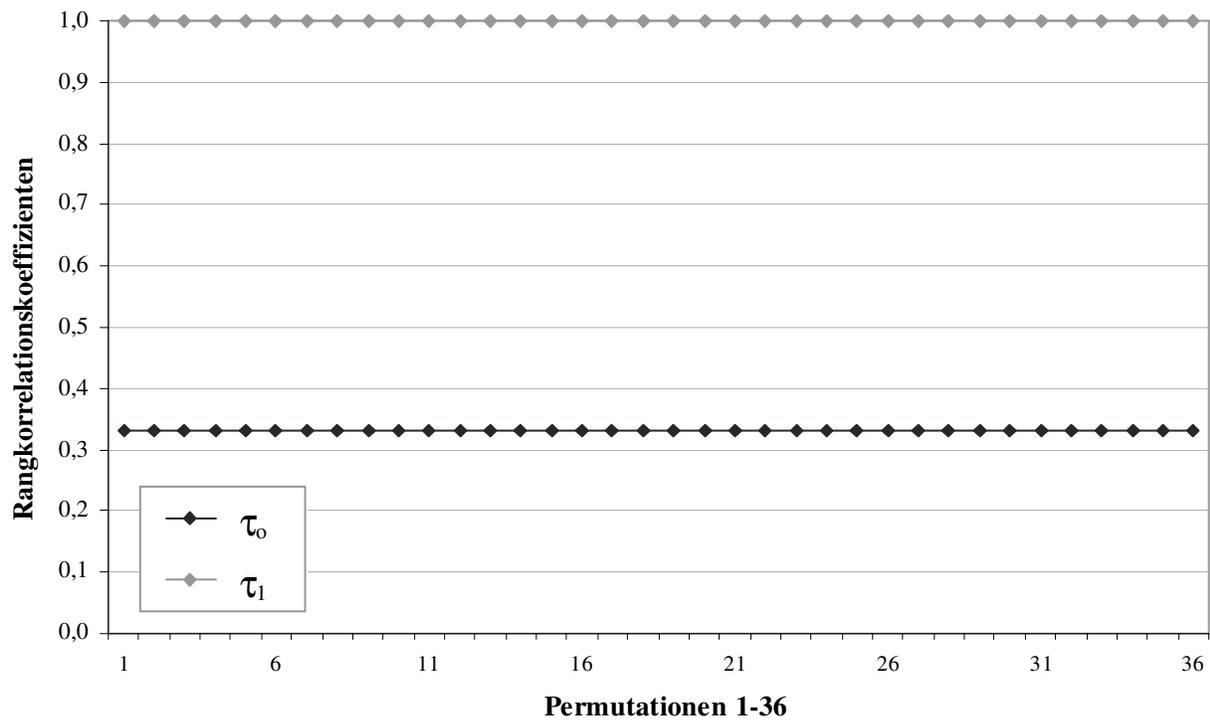
**Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: AK,
helle Graupapiere**



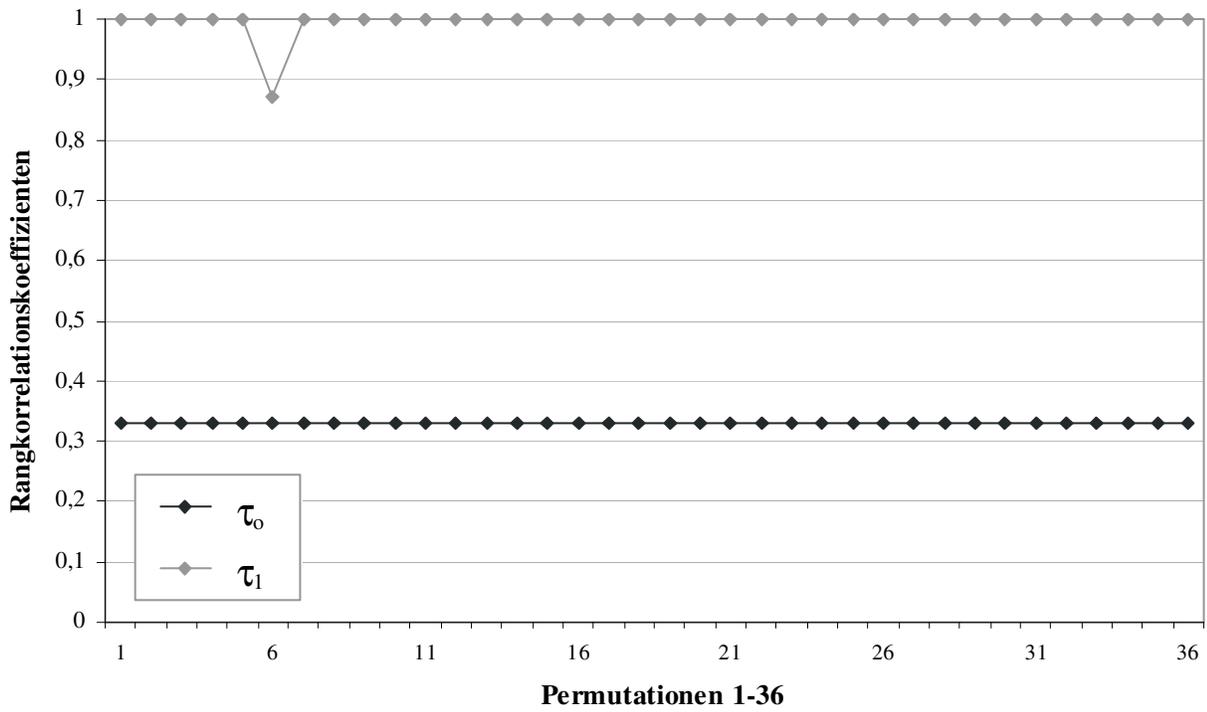
Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: RL,
dunkle Graupapiere



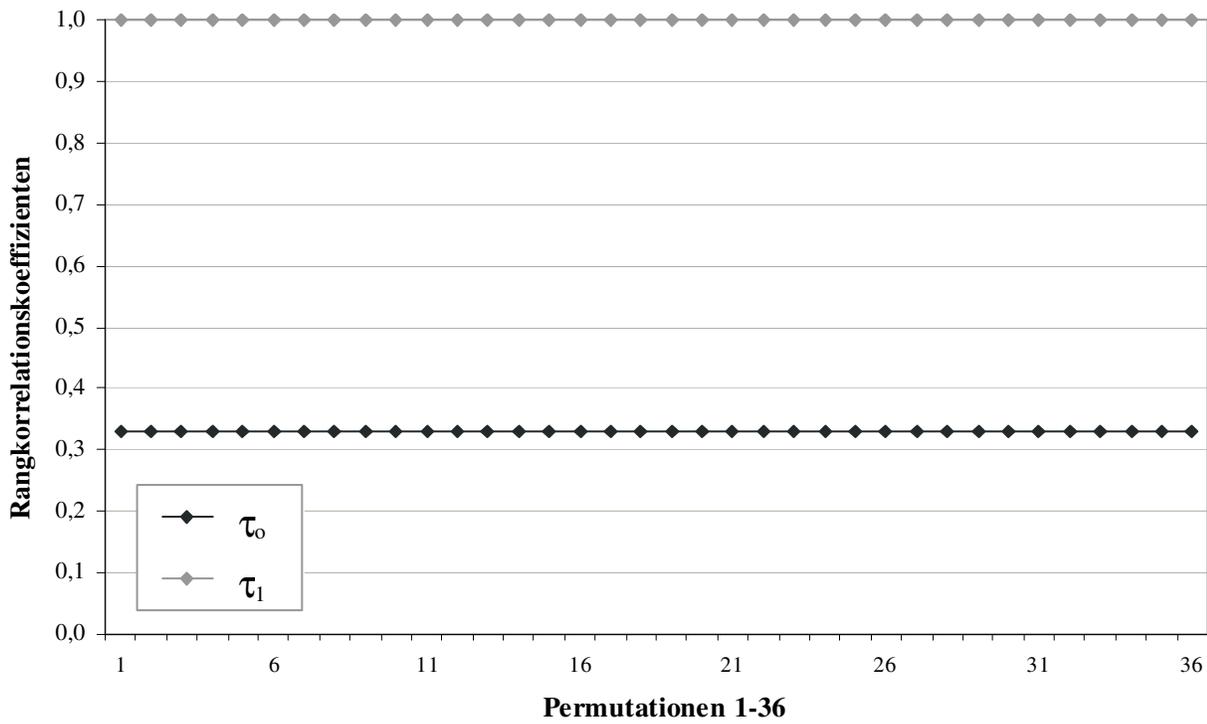
Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: RL,
helle Graupapiere



Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: JH,
dunkle Graupapiere



Alle Permutationen aus Gruppe 16, Vp: JH,
helle Graupapiere



4. Diskussion

4.1. Die Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit ist abhängig von der räumlichen Interpretation

Eine quantitative Beschreibung der Helligkeitskonstanzleistung unseres visuellen Systems bei Körperschatten ist ein wesentlicher Teil der vorliegenden Untersuchungen. Diese Beschreibung stellt jedoch nur die Grundlage für die entscheidende Fragestellung der Arbeit dar. Vorrangig sollte bestimmt werden, in welcher Weise die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit und damit auch die Helligkeitskonstanzleistung durch die Wahrnehmung der dreidimensionalen Struktur von Objekten beeinflusst wird.

Die ursprüngliche Motivation für diese Untersuchungen war der Visitenkartenversuch von MACH (1886). Bei diesem Versuch wird ein rechteckiges Stück Papier längs der Mittellinie gefaltet, die entstehende dachförmige Figur wird auf einer Seite stärker beleuchtet. Bei monokularer Betrachtung kann die dreidimensionale Struktur der Dachfigur invertiert wahrgenommen werden¹⁵. Die dem Beobachter zugewandte Kante der geknickten Figur wird jetzt als abgewandt interpretiert. Trotz identischer retinaler Abbildung des Objektes erscheint die stärker beleuchtete Objektseite bei Inversion heller als zuvor, während die lichtabgewandte Seite nun dunkler wahrgenommen wird.

In Abschnitt X.6. seiner *Analyse der Empfindungen* stellt Ernst Mach das Inversionsphänomen vor. Er beschreibt es in den einleitenden Worten dieses Abschnitts als eine derjenigen „physiologisch-optischen Erscheinungen, deren vollständige Erklärung zwar noch fern liegt, die aber als Äußerungen eines selbstständigen Lebens der Sinnesorgane relativ noch am verständlichsten sind“. Seine Annahme, daß eine vollständige Erklärung dieser Erscheinung noch lange ausstehen wird, hat sich als richtig erwiesen. Immerhin mußten mehr als 100 Jahre vergehen, bis im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine erste schlüssige, durch Daten gestützte Interpretation des Inversionsphänomens vorgestellt werden konnte.

Mach beschreibt die veränderte Wahrnehmung bei Inversion der geknickten Visitenkarte mit folgenden Worten: „Sobald es uns aber gelingt, statt der erhabenen Kante eine hohle zu sehen, erscheinen Licht und Schatten wie mit Deckfarben darauf gemalt“.

¹⁵ Inversion ist auch bei binokularer Betrachtung möglich, dies ist jedoch schwieriger und nur nach entsprechender Übung durchführbar.

Diese Aussage von Mach kann auch unter Verwendung der inzwischen gebräuchlichen Fachtermini formuliert werden: Die zuvor als beleuchtungsbedingt wahrgenommene Helligkeitsdifferenz zwischen Licht und Schattenseite der Dachfigur wird bei invertierter Betrachtung den Remissionseigenschaften der Oberflächen zugeschrieben.

In einer nur angedeuteten Interpretation dieser Erscheinung nennt er einen „Widerstreit“ zwischen der Wahrnehmung der Beleuchtungsrichtung und der wahrgenommenen räumlichen „Tiefe“ als möglichen Grund für die „auffallende Empfindung“.

Eine weitere Passage aus Abschnitt X.6. läßt sich sehr gut mit der Interpretation des Inversionsphänomens in der vorliegenden Arbeit vereinbaren. (Diese Interpretation wird jedoch erst in 4.1.3. dargestellt) Mach's Aussage lautet: „Es soll mit dem gesagten nur der Charakter der Erscheinung bezeichnet und die Richtung angedeutet werden, nach welcher eine physiologische Erklärung (mit Ausschluß psychologischer Spekulationen) zu suchen ist. Bemerken wollen wir noch, daß in Bezug auf Empfindungsqualitäten, welche miteinander in Wechselbeziehung stehen, ein dem Gesetz der Erhaltung der Energie ähnliches Prinzip zu herrschen scheint. Die Helligkeitsdifferenzen verwandeln sich teilweise in Tiefendifferenzen und werden selbst dabei schwächer. Auf Kosten von Tiefendifferenzen können umgekehrt die Helligkeitsdifferenzen vergrößert werden.“

Mach nahm also an, daß eine reziproke Wechselwirkung zwischen der Wahrnehmung der dreidimensionalen Struktur von Objekten und der Wahrnehmung der Differenzen ihrer Oberflächenhelligkeiten besteht. Er unterstützt diese Annahme mit dem folgenden anschaulichen Beispiel: „Sehr belehrend ist in dieser Hinsicht das Bild auf der matten Tafel einer photographischen Kammer. Man erstaunt hier oft über die Helligkeit der Lichter und die Tiefe der Schatten, die man an den Körpern gar nicht bemerkte, solange man nicht genötigt war, alles in einer Ebene zu sehen.“

Daß bei Inversion die stärker beleuchtete Objektseite nicht nur heller als zuvor erscheint, sondern bei geeigneten Beleuchtungsverhältnissen als selbstleuchtend wahrgenommen wird, hat zum ersten Mal v. CAMPENHAUSEN (1981) beschrieben. Auch er begründete die veränderte Wahrnehmung mit dem Konflikt aus der unbewußt wahrgenommenen Beleuchtungsrichtung und den Körperschatten. Diese Interpretation ist mit derjenigen von Mach vereinbar. Die Annahme der unbewußt wahrgenommenen Beleuchtungsrichtung deckt sich mit der Annahme des „unbewußten Schlusses“, die HELMHOLTZ (1866) bei vergleichbaren visuellen Stimuli voraussetzt.

ROCK (1977) beschäftigt sich in seiner Abhandlung „In defense of unconscious inference“ mit der Bedeutung der Annahme des „unbewußten Schlusses“. In einer vergleichenden Darstellung der beiden diametralen Theorien der Helligkeitskonstanzleistung wird die von WALLACH (1948) begründete „ratio-principle-theory“ der von Helmholtz geprägten „taking-into-account-theory“ gegenübergestellt. Obwohl Rock der erstgenannten Theorie die umfassendere experimentelle Tragweite zuschreibt, macht er deutlich, daß die unbewußte Wahrnehmung der Beleuchtungsrichtung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluß ausübt. Dabei nimmt er zwar Bezug auf den Mach'schen Visitenkartenversuch, er schreibt jedoch die erste systematische Untersuchung zu dieser Fragestellung HOCHBERG & BECK (1954) zu. In deren Experiment wurde eine trapezförmige Fläche senkrecht auf einem Tisch präsentiert. Diese konnte monokular betrachtet als flach auf dem Tisch liegendes Rechteck interpretiert werden. Bei binokularer Betrachtung wurde die tatsächliche Orientierung wahrgenommen. Bei Wechsel des Betrachtungsmodus trat auch hier eine Veränderung der wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit ein, der Effekt war jedoch vergleichsweise gering.

Auch BERGSTRÖM (1994) beschreibt den Mach'schen Visitenkartenversuch, um an diesem Beispiel die Wechselwirkung zwischen der wahrgenommenen Form der Körper und der Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit zu verdeutlichen. Er spricht jedoch im Gegensatz zu Mach nicht von einer Inversion der Visitenkarte, sondern unterscheidet zwischen der Wahrnehmung einer gefalteten Karte oder einer als flach wahrgenommenen Karte. Er beschreibt die Wahrnehmung in beiden Fällen wie folgt: Im ersten Fall werden die beiden Seiten der Karte als zwei identisch eingefärbte, jedoch unterschiedlich beleuchtete Flächen erkannt. Im zweiten Fall erscheinen sie jedoch als verschieden eingefärbt. Diese Aussagen stimmen mit denjenigen von Mach überein, obwohl Mach die Karte invertiert betrachtete, sie bei Bergström jedoch nur als flach interpretiert wird. Die Ergebnisse aus diesen beiden Betrachtungsmodi sind offensichtlich identisch. Dieser Sachverhalt bestätigt sich in den hier durchgeführten Experimenten und ist entscheidender Baustein der neuen Interpretation des Inversionsphänomens.

Die Arbeiten von QUÄSCHNING (1995 u. 1998) waren die ersten quantitativen Untersuchungen, die sich vorrangig mit dem Inversionsphänomen beschäftigten. Mit der Methode des Abgleichs der wahrgenommenen Oberflächenhelligkeiten konnte gezeigt werden, daß ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Veränderung der Wahrnehmung bei Inversion und dem Remissionsgrad der Oberflächen der verwendeten v-Figur besteht

Die Veränderung der Wahrnehmung war bei Oberflächen mit hohen Remissionsgraden ausgeprägter. Dieser nichtlineare Zusammenhang konnte weder formal gefaßt noch schlüssig interpretiert werden. Erste Versuche mit Einsatz der Methode der eigenmetrischen Reihung waren unsystematisch. Es wurden nur zwei von 720 möglichen Anordnungen verwendet. Deren Auswahl wurde nicht begründet, weiterhin fand keine physikalische Beschreibung der Reizsituation bezüglich der Schattenstärke und den resultierenden Leuchtdichten statt. Es konnte nur gezeigt werden, daß die vorgenommenen Bewertungen in den beiden Betrachtungsmodi unterschiedlich waren.

Die Wechselwirkung zwischen 3-D-Wahrnehmung und der Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit wurde bereits in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht. (ADELSON (1993), ADELSON (1999), ADELSON & PENTLAND (1990), BERGSTRÖM (1977), BLOJ & HULBERT (1999), BLOJ et al. (1999), BUCKLEY et al. (1994), EPSTEIN (1961), GILCHRIST (1977), GILCHRIST (1980), HOCHBERG & BECK (1954), HULBERT (1994), KNILL & KERSTEN (1991), LOGVINENKO & MENSHIKOVA (1994), MERSHON & GOGEL (1970), PESSOA et al. (1996), PURVES et al. (1999), SCHIRILLO et al. (1990), SCHIRILLO & AREND (1995), WISHART et al. (1997).)

In keiner der genannten Arbeiten konnte jedoch ermittelt werden, nach welchem grundlegenden Prinzip die Helligkeitswahrnehmung durch die räumliche Information beeinflußt wird. Hierfür sind mehrere Gründe verantwortlich. Ein beträchtlicher Teil der Arbeiten verwendete zweidimensionale, meistens mit Hilfe von Computermonitoren dargestellte Stimuli. Dies ist beispielsweise bei ADELSON (1993), HURLBERT (1994) sowie KNILL & KERSTEN (1991) der Fall. Derartige Stimuli können durchaus eindrucksvolle Wahrnehmungstäuschungen hervorrufen, sie besitzen jedoch weder eine wirkliche dreidimensionale Struktur, noch können den entsprechenden Oberflächen Remissionsgrade zugeordnet werden. Die jeweiligen Bereiche der Stimuli können nur über ihre Leuchtdichte quantifiziert werden, Aussagen über den Einfluß der 3-D-Information auf die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit sind daher nicht möglich. Quantitative Ergebnisse sind hier nur durch einen Abgleich der wahrgenommenen *brightness*, also der beleuchtungsbedingten Helligkeit möglich. Daher werden in einigen Arbeiten die beobachteten Wahrnehmungsphänomene sogar nur qualitativ beschrieben.

Bei den Experimenten, die echte dreidimensionale Stimuli verwendeten, wie es beispielsweise in den Arbeiten von BERGSTRÖM (1977), GILCHRIST (1977) oder HOCHBERG & BECK (1954) der Fall war, wurde meistens die Methode des Abgleichs eingesetzt. Hierbei wird in der Regel ein sog. Munsell-Chart verwendet. Dies ist eine genormte Palette verschiedener Graustufen, die sich meistens außerhalb der Versuchsanordnung in einer eigenen, hell ausgeleuchteten Kammer befindet. Die Stimuli werden von den Versuchspersonen beurteilt, indem eine zu bewertende Oberflächen des jeweiligen Stimulus durch die Graustufe des Munsell-Chart identifiziert wird, deren Oberfläche als gleich hell erscheint. Diese Methode ist typisch für die Experimente von Gilchrist, bei denen Versuchspersonen eine bestimmte Reizsituationen monokular und binokular bewerten sollten und die jeweiligen Resultate des Abgleichs verschieden ausfielen. Mit dieser Methode können die resultierenden Unterschiede in der Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit gezeigt werden, die Arbeiten bleiben jedoch meist auf einer deskriptiven Ebene. Mit der Methode des Abgleichs ist es weiterhin nicht möglich, den Zusammenhang zwischen 3-D-Wahrnehmung und wahrgenommener Oberflächenhelligkeit in der Weise systematisch zu erfassen werden, wie dies mit der eingesetzten Methode der vorliegenden Arbeit möglich war. Dies wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.1.1. Die Helligkeitskonstanzleistung versagt bei Inversion vollständig

Die hier verwendete Methode der eigenmetrischen Reihung erweist sich als hervorragendes Werkzeug zur Bearbeitung der untersuchten Fragestellungen. Durch den Einsatz dieser Methode konnte zum ersten Mal quantitativ beschrieben werden, in welcher Weise sich die Wahrnehmung bei Inversion verändert.

Bei Inversion zeigte sich, daß die zuvor im normalen Betrachtungsmodus beobachtete Helligkeitskonstanzleistung vollständig ausfällt. Die von den Versuchspersonen erstellten Rangfolgen nach Oberflächenhelligkeit stimmten nun nicht mehr mit den Rangfolgen nach Remissionsgrad überein. Statt dessen waren sie mit den Rangfolgen nach gemessener Leuchtdichte identisch. Dieses Ergebnis zeigte sich bei allen Versuchspersonen, unabhängig davon, daß deren Helligkeitskonstanzleistung im normalen Betrachtungsmodus unterschiedlich gut ausgeprägt war.

Die Versuchspersonen bildeten daher im invertierten Betrachtungsmodus eine homogene Gruppe, die sich durch identische Bewertungen ohne Helligkeitskonstanz auszeichnet. Die retinalen Abbildungen der Stimuli und damit auch die visuelle Eingangsinformation waren in beiden Betrachtungsmodi identisch. Das Resultat der Verarbeitung dieser Eingangsinformation war jedoch zum einen individuell verschieden und weiterhin abhängig von der Wahrnehmung der dreidimensionalen Struktur der betrachteten Figuren. Letztere kann vom visuellen System nur indirekt ermittelt werden, da die retinale Abbildung der Umwelt nur zwei Dimensionen besitzt. Die Wahrnehmung der tatsächlichen räumlichen Orientierung der Objektoberflächen hat die beobachtete Konstanzleistung zur Folge. Die veränderte räumliche Interpretation bei Inversion, welche natürlich nicht mit der tatsächlichen Orientierung der Objektoberflächen übereinstimmt, führt dazu, daß Oberflächenhelligkeit und beleuchtungsbedingte Helligkeit nicht mehr differenziert werden können. Die Wahrnehmungsleistung, welche ermöglicht, daß die beschattete Objektseite mit der geringeren beleuchtungsbedingten Helligkeit als diejenige mit der größeren Oberflächenhelligkeit erkannt wird, erfordert offensichtlich die Wahrnehmung der tatsächlichen räumlichen Orientierung und ist im invertierten Betrachtungsmodus nicht mehr möglich.

4.1.2. Inversion und Ausblenden der räumlichen Information führen zu identischen Ergebnissen

Aufgrund der Schlußfolgerungen aus den Ergebnissen bei invertiertem Betrachtungsmodus sollte untersucht werden, welche Auswirkungen das Ausblenden der Information über die dreidimensionale Struktur der vvv-Figur auf die Helligkeitskonstanzleistung hat. Die hieraus resultierenden Bewertungen werden mit denjenigen bei Inversion verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sollen die im folgenden Abschnitt beschriebene Interpretation des Inversionsphänomens unterstützen.

Das Ausblenden der Information über die dreidimensionale Struktur der vvv-Figur wurde durch eine Kombination von zwei Sichtblenden erreicht. Deren Anordnung ist in Abschnitt 2.1.2. *Der Versuchsaufbau* beschrieben. Die Versuchspersonen betrachteten die vvv-Figur durch diesen modifizierten Versuchsaufbau monokular und ohne die zickzackförmigen Umrisse. Der entstehende Stimulus erschien den Versuchspersonen als eine flache Anordnung von sechs unterschiedlich grau eingefärbten Flächen.

Um den Vergleich zu den Versuchsreihen im invertierten Betrachtungsmodus zu ermöglichen, wurden in diesem Experiment die gleichen Permutationen eingesetzt.

Die Versuchspersonen führten die Reihungen selbstverständlich im normalen Betrachtungsmodus durch, da eine räumliche Inversion bei diesem als flach wahrgenommenen Stimulus nicht möglich ist. Die erstellten Rangfolgen nach relativem Remissionsgrad sind identisch mit denjenigen bei Inversion. Es macht daher zumindest unter den vorliegenden Versuchsbedingungen keinen Unterschied für die Bewertung der Objektoberflächen ob die dreidimensionale Struktur der vvv-Figur falsch interpretiert oder gar nicht wahrgenommen wird. Das läßt eine im nächsten Abschnitt dargestellte, interessante Schlußfolgerung zu, die sich wesentlich vom bisherigen, von Mach selbst angedeuteten Erklärungsansatz des Inversionsphänomens unterscheidet.

4.1.3. Vergleich der neuen und der bisherigen Interpretation des Inversionsphänomens

Bisher wurde die veränderte Wahrnehmung im invertierten Betrachtungsmodus auf die Wechselwirkung zwischen der wahrgenommenen Beleuchtungsrichtung und der geändert interpretierten Orientierung der Objektoberflächen zurückgeführt. Diese können nun nicht mehr schlüssig zueinander in Bezug gesetzt werden. Mach vermutete, daß die als heller wahrgenommene Objektoberfläche in der räumlich invertierten Interpretation als von der Lichtquelle abgewandt angenommen wird und deren Helligkeit demzufolge unnatürlich erscheint. Dies bedeutet, daß die Veränderung der wahrgenommenen Helligkeit aus der nicht mehr schlüssigen Beziehung zwischen Beleuchtungsrichtung und Orientierung der Objektoberflächen resultiert. Mach bezeichnete diesen Sachverhalt als „Widerstreit“, der die beobachtete „auffallende Empfindung“ hervorruft. v. Campenhausen spricht von einer Täuschung, die dadurch entsteht, daß die Körperschatten nicht mehr den Erwartungen entsprechen.

Das Inversionsphänomen wurde also bisher als Wahrnehmungstäuschung interpretiert, da man voraussetzte, daß die Wahrnehmung unserer Umwelt sich im normalen Betrachtungsmodus näher an der physikalischen Realität befindet als bei Inversion.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen im invertierten Betrachtungsmodus und der Experimente ohne 3-D-Information lassen jedoch einen hierzu entgegengesetzten Schluß zu. Es scheint naheliegend, daß die visuelle Eingangsinformation bereits im normalen Betrachtungsmodus aufgrund der Information über die dreidimensionale Struktur der betrachteten Objekte in besonderer Weise modifiziert wird. Durch Prozesse, die hinter dem Ort der binokularen Fusion lokalisiert sein müssen, wird die Wahrnehmung in die Richtung der Helligkeitskonstanzleistung verändert. In welcher Weise dieser positive Einfluß auf die Helligkeitskonstanzleistung ermöglicht wird, soll durch die folgende Argumentation verdeutlicht werden:

In der physikalischen Reizintensitätsverteilung sind Unstetigkeiten enthalten, die sich als Sprünge in der Leuchtdichte äußern. Daraus resultiert der physikalisch meßbare Kontrast. Dieser kann nun einerseits durch die Remissionseigenschaften der entsprechenden Oberflächen bedingt sein, er wird jedoch auch maßgeblich durch die Beleuchtungsverhältnisse, also durch Licht und Schatten verursacht. Dieser Leuchtdichtekontrast wird von dem der Wahrnehmung zugehörigen Helligkeitskontrast unterschieden. Durch Einfluß der zur Verfügung stehenden Informationen, insbesondere derjenigen über die dreidimensionale Orientierung der Objektoberflächen und der Beleuchtungsverhältnisse scheinen die wahrgenommenen Helligkeitskontraste im Vergleich zu den vorliegenden physikalischen Kontrasten verringert zu werden. Bei der Informationsverarbeitung in höheren Arealen des visuellen Cortex wird für die beschatteten Bereiche die Wahrnehmungsintensität in Relation zur geringen Reizintensität angehoben, die beleuchteten Bereiche höherer Reizintensität hingegen erfahren eine entsprechende Absenkung. Durch diese Verringerung des Helligkeitskontrastes in der Wahrnehmungsintensitätsverteilung wird es dem visuellen System erleichtert, eine beschattete Oberfläche höheren Remissionsgrades aber entsprechend geringer Leuchtdichte korrekt zu identifizieren.

Da die Helligkeitswahrnehmung und die resultierende Konstanzleistung im normalen Betrachtungsmodus nicht in eindeutiger Weise mit der zugrunde liegenden Reizintensitätsverteilung verknüpft werden kann, muß das visuelle System demzufolge Prämissen über die Beleuchtungssituation machen. Dies entspricht der Helmholtz'schen Annahme des unbewußten Schlusses. Die Beleuchtungssituation ist weiterhin der Reizintensitätsverteilung übergeordnet, da schließlich nur die Verknüpfung aus der einfallenden Lichtintensität mit den Remissionseigenschaften der betreffenden Oberfläche eine gegebene Reizintensität verursacht.

Die Prämissen über die Beleuchtungsverhältnisse müssen jedoch mit der räumlichen Orientierung der zu beurteilenden Oberflächen in Verbindung gebracht werden. Ohne die räumliche Information sowie bei durch Inversion verursachter Mehrdeutigkeit der Reizsituation findet die sonst übliche Art der Verarbeitung der visuellen Eingangsinformation nicht mehr statt. Dies hat zur Folge, daß die Stimuli unter diesen Bedingungen nach sensorischer Eingangsintensität, also entsprechend ihrer Rangfolge nach Leuchtdichte bewertet werden. Dies bedeutet, daß sich die Wahrnehmung bei Inversion näher an der physikalischen Realität, also der Reizintensitätsverteilung befindet als die Helligkeitskonstante Beurteilung beschatteter Objekte.

Insgesamt läßt sich aus dieser Argumentation ableiten, daß es sich beim Inversionsphänomen eigentlich nicht um eine Täuschung im herkömmlichen Sinn handelt, bei der eine Wahrnehmung entsteht, die aufgrund der physikalischen Reizvorlage nicht zu erwarten ist. Dies ist beispielsweise bei den Mach-Bändern oder bei der Hermann-Gitter-Täuschung der Fall. Schlüssige Prämissen über die vorliegenden Beleuchtungsverhältnisse und deren Wechselwirkung mit der dreidimensionalen Struktur der Objekte hingegen erzeugen eine andauernde systematische Wahrnehmungsmodifikation, deren Sinn es ist, die Helligkeitskonstanzleistung zu ermöglichen oder zumindest zu verbessern. Das Ausbleiben dieser Modifikation bei Inversion wurde bisher aus naheliegenden Gründen, jedoch eigentlich zu Unrecht als Wahrnehmungstäuschung interpretiert.

Abschließend soll an dieser Stelle noch einmal betont werden, daß die zugrundeliegenden Prozesse der Verarbeitung nicht auf retinale Ebene begrenzt sein können. Bereits dort ergibt sich eine nur zweidimensionale Erregungsverteilung, welche erst über die binokulare Stereopsis eine dreidimensionale Wahrnehmung ermöglicht. Diese erweist sich als grundlegende Voraussetzung für die Helligkeitskonstanzleistung. Eine Beteiligung von Prozessen in nachgeschalteten Verarbeitungsebenen, welche sich hinter dem Ort der binokularen Fusion befinden müssen, ist demzufolge zwingend für die Helligkeitskonstante Wahrnehmung von Objekten. Bei Inversion sowie bei Ausblenden der 3-D-Information benutzt das visuelle System möglicherweise eine parallele Verarbeitungsbahn, die eine veränderte Wahrnehmung zur Folge hat. Da diese Bahn offensichtlich nicht den üblichen Einfluß durch die Areale des visuellen Cortex erfährt, welche für die Wahrnehmung der dreidimensionalen Struktur von Objekten zuständig sind, versagt die Helligkeitskonstanzleistung. Diese Verarbeitungsbahn bedingt eine Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit, welche streng mit der sensorischen Eingangsintensität korreliert.

4.2. Der Einfluß der Licht/Schatten-Wechsel auf die Helligkeitskonstanzleistung

Die Ergebnisse von Experiment 1 zeigten, daß der erwartete formale Zusammenhang zwischen τ_0 und τ_1 nicht abgeleitet werden kann. Der Unterschied zwischen τ_0 und τ_1 fiel in Gruppen mit gleichen τ_0 völlig verschieden aus. Dies ist unter anderem durch die Eigenschaften des Rangkorrelationskoeffizienten bedingt, bei dem ein identischer Wert auf verschiedenen Wegen zustande kommen kann¹⁶.

Um dies zu verdeutlichen, betrachten wir erneut die Tabelle 5, in der die Einteilung der 20 Permutationsgruppen in drei Klassen nach Anzahl der Licht/Schatten-Wechsel dargestellt ist.

Gruppe	1	5	7	14	16	20	2	3	4	10	12	17	18	19	6	8	9	11	13	15	
Rang	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
der Grau-	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
papiere	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
nach	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Remis-	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
sionsgrad	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
L/S-Wechsel	1	2	2	2	2	1	3	3	3	3	3	3	3	3	5	4	4	4	4	4	5
τ_0 bei 2	1,00	0,60	0,60	0,33	0,33	0,20	0,87	0,73	0,73	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,33	0,33

Tabelle 5: Einteilung der 20 Gruppen in drei Klassen aufgrund der Anzahl der L/S-Wechsel. Die Papiere auf den Schattenseiten sind grau unterlegt, die L/S-Wechsel sind durch Doppelstriche gekennzeichnet. In der letzten Zeile befinden sich die Rangkorrelationskoeffizienten τ_0 bei einer Schattenstärke von 2.

Wir vergleichen nun beispielsweise die Permutationsgruppen 15 und 16. Bei Gruppe 16 liegen zwei Licht/Schatten-Wechsel vor, sie befindet sich daher in der ersten Klasse. Gruppe 15 besitzt fünf Licht/Schatten-Wechsel und befindet sich in der dritten Klasse. Bei beiden Gruppen hat τ_0 den Wert 0,33. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl der Licht/Schatten-Wechsel sind die Sequenzen nach Leuchtdichte jedoch völlig verschieden. Im Vergleich zur Rangfolge nach Remissionsgrad unterscheiden sich die Rangfolgen nach Leuchtdichte in der Anzahl der Positionswechsel.

¹⁶ Siehe Abschnitt 2.4.5. *Einschränkungen durch die Verwendung von Kendall's τ*

Trotz gleichem τ_0 ist die Wahrnehmungsleistung, beschrieben durch den Wert von τ_1 , bei diesen beiden Gruppen deutlich verschieden. Insgesamt zeigte sich, daß die Wahrnehmungsleistung mit höherer Anzahl von Licht/Schatten-Wechseln schlechter wird. Die alternierende Verteilung der Graupapiere auf die Licht- und Schattenseiten der vvv-Figur hat eine größere Anzahl von Fehlern bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad zur Folge. Dabei war bemerkenswert, daß die Versuchspersonen die Bewertung der alternierenden Anordnungen als vergleichbar einfach empfanden, obwohl die resultierende Wahrnehmungsleistung hier am schlechtesten ausfiel. Diese subjektive Sicherheit beim Erstellen der Rangfolgen hatte eine außergewöhnlich stark ausgeprägte Konsistenz bezüglich der aufgetretenen Fehler bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad zur Folge. Die Fehler in den Bewertungen sollen im folgenden am Beispiel von Permutationsgruppe 15 genauer analysiert werden:

Bei dieser Gruppe befinden sich die Graupapiere 2, 4 und 6 auf den Lichtseiten, die Papiere 1, 3 und 5 liegen im Schatten. Aus dieser Anordnung resultiert eine typische empirische Sequenz, die in der überwiegenden Mehrzahl der Reihungen erstellt wurde: Papier 2 erschien heller als Papier 1, 4 wurde heller als 3 wahrgenommen und auch Papier 5 und 6 wurden bezüglich ihrer wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit miteinander vertauscht. In der Rangfolge nach relativem Remissionsgrad fanden demnach drei Vertauschungen um jeweils eine Position statt. Die wahrgenommene Rangfolge war dann **2,1,...**,**4,3,...**,**6,5,...**, wobei der Rang der falsch eingeordneten Graupapiere durch Fettdruck hervorgehoben ist, die korrekte Position des falsch eingeordneten Graupapiers wird durch drei Punkte angedeutet. Bei dieser empirischen Sequenz ergibt sich ein Wert für τ_1 von 0,6.

Um die unter diesen Bedingungen auftretende, vergleichbar schlechte Wahrnehmungsleistung zu verstehen, müssen die Verhältnisse bei einem geeigneten Gegenbeispiel beschrieben werden. Hierzu wird die Gruppe 16 mit identischem τ_0 , aber nur zwei L/S-Wechseln ausgewählt. Bei dieser Gruppe liegen die nach Remissionsgrad aufeinanderfolgenden Papiere 3, 4 und 5 auf den Lichtseiten, demzufolge liegen 1, 2 und 6 im Schatten. Diese Anordnung hatte folgende Konsequenzen für die vorgenommenen Bewertungen:

Obwohl die beiden Graupapiere mit den höchsten Remissionsgraden im Schatten lagen, waren die Versuchspersonen in den meisten Fällen in der Lage, Papier 1 richtig zu identifizieren. In vielen Fällen konnte auch Papier 2 richtig identifiziert werden. Die zu Beginn der Reihung erfolgten Beurteilungen der ersten zwei Graupapiere determiniert die Bewertung der verbleibenden vier Graupapiere.

Werden die ersten beiden Graupapiere bezüglich ihrer Rangfolge richtig identifiziert, folgt daraus, daß die Bewertung der folgenden Papiere fehlerlos sein muß. Die aufeinander folgenden Papiere 3, 4, und 5 befinden sich auf den Lichtseiten und müssen daher bereits aufgrund ihrer beleuchtungsbedingten Helligkeit entsprechend richtig gereiht werden. Papier 6 im Schatten kann nur als das dunkelste bewertet werden, denn es ist bezüglich beider Wahrnehmungsaspekte das dunkelste Papier in der Anordnung.

Bei Reihungen mit einem Fehler wurde Papier 3 heller als Papier 2 wahrgenommen, die wahrgenommene Rangfolge war dann 1,3,2,...,4,5,6. Daraus ergibt sich ein Wert für τ_1 von 0,87. Wenn zwei Fehler auftraten, wurde Papier 3 als hellstes bewertet, die wahrgenommene Rangfolge war dann 3,1,2,...,4,5,6. Daraus folgt für τ_1 ein Wert von 0,73. Dabei handelt es sich eigentlich nicht um zwei Fehler, sondern um die Fehlbewertung eines Graupapiers um zwei Positionen in der Rangfolge.

Man stellt demnach fest, daß die auftretenden Möglichkeiten der wahrgenommenen Rangfolgen weitgehend festgelegt sind. Die Fehler bei der Reihung sind dabei grundsätzlich systematischer Natur und durch die Reihenfolge nach Leuchtdichte determiniert. Diese kann bei der Beurteilung von Oberflächeneigenschaften vom visuellen System offensichtlich nicht in beliebigem Ausmaß toleriert werden.

Durch eine bestimmte Verteilung der Graupapiere auf die Licht- und Schattenseiten der vvv-Figur, beschrieben mit Hilfe der Permutationsgruppe, ergibt sich die Rangfolge nach Leuchtdichte, die dem visuellen System als Eingangsinformation dient. Die verschiedenen Möglichkeiten der Bewertung der Oberflächenhelligkeit werden dabei weniger variabel, je weniger L/S-Wechsel vorliegen. Umgekehrt formuliert: Je mehr L/S-Wechsel vorliegen, desto häufiger wird dem visuellen System eine Entscheidung bezüglich der weiteren Rangfolge abverlangt, die als mögliche Fehlerquelle dient.

Weiterhin kann angenommen werden, daß bei Präsentation von drei nach Remissionsgrad aufeinanderfolgenden und daher möglichst ähnlichen Graupapieren auf den Licht- oder Schattenseiten vom visuellen System bessere Prämissen über die Beleuchtungsverhältnisse, also über die Schattenstärke gemacht werden können. Die zutreffende Einschätzung der Schattenstärke ist eine wichtige Voraussetzung für eine gute Wahrnehmungsleistung. Dies ist jedoch insbesondere bei den alternierenden Verteilungen nur schlecht möglich, da sich hierbei jeweils auf den Licht und den Schattenseiten Graupapiere befinden, die sich immer über zwei Positionen in der Rangfolge nach Remissionsgrad unterscheiden.

Dadurch ist die Mehrdeutigkeit der Eingangsgröße Leuchtdichte als Produkt aus Remissionsgrad und Beleuchtungssituation vom visuellen System weniger gut auflösbar. Die ausgeprägten Unterschiede im Remissionsgrad der Graupapiere innerhalb der Licht- bzw. Schattenseiten, können der Grund für die vermeintliche Sicherheit bei der Reihung nach relativem Remissionsgrad sein, da die Unterscheidung der Graustufen hierdurch erleichtert wird. Die erschwerte Abschätzung der Schattenstärke führt jedoch zu den beobachteten Vertauschungen.

Der durch diese beiden extremen Beispiele verdeutlichte Zusammenhang zwischen Wahrnehmungsleistung und Anzahl der L/S-Wechsel gilt offensichtlich in gradueller Ausprägung auch für die verbleibenden Permutationsgruppen.

Dabei wird noch einmal darauf hingewiesen, daß, wie bereits im Ergebnisteil angesprochen, auch bei gleichem τ_0 und gleicher Anzahl von L/S-Wechseln die Wahrnehmungsleistung besser ist, wenn das Papier mit dem höchsten Remissionsgrad auf einer Lichtseite liegt und damit der sog. Einstiegsfehler ausgeschlossen wird. Diese Aussage untermauert die Hypothese über den Einfluß des Entscheidungskonfliktes bei Erstellen der Rangfolge.

4.3. Der Einfluß des lokalen Streulichts auf die Helligkeitskonstanzleistung

Bei Messung der Leuchtdichten verschiedener Permutationen aus einer Gruppe zeigte sich, daß die durch das lokale Streulicht bedingten Leuchtdichtezunahmen der Graupapiere aufgrund verschiedener Nachbarschaftsverhältnisse stark variieren. Die Leuchtdichtezunahmen waren dabei insbesondere bei den hellen Graupapiere und hier auf den Schattenseiten sehr stark ausgeprägt. Bei den dunklen Graupapieren waren die Leuchtdichtezunahmen einerseits wesentlich geringer und variierten auch nur schwach. Da der lokale Streulichteffect bei der verwendeten vvv-Figur nicht zu vermeiden war, sollte dessen Einfluß auf die Wahrnehmungsleistung systematisch untersucht werden.

Bei den hellen Graupapieren war beispielsweise eine maximale Leuchtdichtezunahme von 70% möglich, wenn das betrachtete Graupapier im Schatten lag und von dem Papier mit dem höchsten Remissionsgrad indirekt beleuchtet wurde. Die Zunahme von 70% ergab sich im Vergleich zur Leuchtdichte dieses Papiers ohne Streulichtpartner. Innerhalb einer beliebigen Anordnung sind jedoch immer Streulichtpartner vorhanden.

Daher mußte mindestens die durch das Graupapier mit dem geringsten Remissionsgrad erzeugte, minimal mögliche Leuchtdichtezunahme vom Maximalwert abgezogen werden. Diese lag auf den Schattenseiten bei 21%. Daraus folgte eine maximale Variation der Leuchtdichte durch verschiedene Nachbarschaftverhältnisse von annähernd 50%. Da die Zunahme des Remissionsgrades aufeinander folgender Graupapiere jedoch immer nur 20% beträgt, ergab sich, daß innerhalb der Schattenseiten ein Graupapier mit geringerem Remissionsgrad die höhere Leuchtdichte besitzen konnte. Dies wird in der vorliegenden Arbeit als kritischer Fall bezeichnet.

Man sollte nun annehmen, daß eine derart ausgeprägte Variation der resultierenden Leuchtdichten innerhalb einer Permutationsgruppe Einfluß auf die Wahrnehmungsleistung hat. Dies würde sich in einer Variabilität der Bewertungen von Permutationen aus einer Gruppe bei den hellen Graupapieren äußern, die sich von der entsprechenden Variabilität bei den dunklen Graupapieren deutlich unterscheidet. Dies war jedoch nicht festzustellen. Weder bei Prüfung aller Permutationen aus einer Gruppe, welche die maximale Variation der Leuchtdichtezunahmen und damit auch die Bedingungen für den kritischen Fall aufweist, noch nach Analyse der Bewertungen der sechs verschiedenen Streulichtpaarkombinationen über alle 20 Permutationsgruppen konnte der erwartete Effekt gezeigt werden. Es zeigte sich, daß die Homogenität der Bewertung bei den hellen Graupapieren ausgeprägter war. Weiterhin war die Wahrnehmungsleistung bei den hellen Graupapieren im Durchschnitt besser als bei den dunklen Graupapieren. Diese bessere Leistung bei den hellen Graupapieren kann auf die insgesamt größere Leuchtdichtezunahme durch Streulicht auf den Schattenseiten begründet werden, da diese der Schattenstärke entgegenwirkt und die Reizsituation damit vereinfacht. Bei der Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten τ_{0g} , welche den Streulichteinfluß berücksichtigen, ergeben sich trotz identischer Remissionsgradabstufung und konstanter Schattenstärke bei den hellen Graupapieren höhere Werte als bei den dunklen Graupapieren. Dadurch sind auch vergleichbar höhere Werte von τ_1 verständlich. Weiterhin könnte die Wahrnehmungsleistung auch dadurch besser ausgefallen sein, daß die hellen Graupapiere bereits ohne Körperschatten trotz identischer Remissionsgradabstufung wie bei den dunklen Graupapieren in ihrer Oberflächenhelligkeit als verschiedener beurteilt wurden.

Für die Homogenität der Bewertung wird bei den hellen Graupapieren, trotz stark variabler Leuchtdichten der Graupapiere, der simultane Helligkeitskontrast verantwortlich gemacht.

Dieser wird auch als induzierter Flächenkontrast bezeichnet und hat in der vorliegenden Versuchsanordnung folgende Auswirkungen:

Eine dunkles Graupapier wird durch ein direkt angrenzendes, helles Graupapier noch dunkler erscheinen, als das ohne die Nachbarschaft des hellen Papiers der Fall wäre. Durch das lokale Streulicht hingegen erfährt es eine Leuchtdichtezunahme, die es heller erscheinen läßt. Der Einfluß des Simultankontrastes ist daher dem Einfluß des lokalen Streulichts entgegengesetzt und scheint diesen weitgehend zu kompensieren.

Die Auswirkung des Simultankontrasts auf die Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit konnte von den Versuchspersonen direkt bestätigt werden. Dazu wurde den Versuchspersonen eine Permutation präsentiert, welche die Bedingung für den kritischen Fall erfüllte. Die Versuchspersonen beurteilten bei dieser Permutation Graupapier 3 heller als Graupapier 4, obwohl 4 die höhere Leuchtdichte besaß. Die korrekte Bewertung der entsprechenden relativen Remissionsgrade der beiden Graupapiere wurde dabei von den Versuchspersonen als einfach und eindeutig beurteilt. Danach wurden die Versuchspersonen instruiert, sich nur den wahrgenommen Unterschied der beiden Graupapier 3 und 4 einzuprägen. Direkt anschließend wurden in die Vertiefungen der vvv-Figur 6mm breite, schwarze Papierstreifen gelegt, welche die direkt angrenzenden Flächen voneinander trennten und damit den Simultankontrast deutlich reduzierten. Die Papiere berührten sich auch an den oberen Rändern nicht, da die vvv-Figur für diese Versuchsreihe entsprechend modifiziert wurde. In einer erneut vorgenommenen Bewertung der beiden Graupapiere wurde der wahrgenommene Unterschied deutlich kleiner als ohne die Trennstreifen beurteilt.

Wurde der Stimulus mit reduziertem Simultankontrast als erster präsentiert, dann hatten die Versuchspersonen keine Vergleichsmöglichkeiten mit den üblichen Reizbedingungen. Unter diesen Bedingungen zeigte sich, daß die beiden Graupapiere kaum zu unterscheiden waren. Die Versuchspersonen waren in ihrer Entscheidung bezüglich der Oberflächenhelligkeiten entsprechend unsicher.

4.4. Der Einfluß der Kontrastkanten auf die Helligkeitskonstanzleistung

Die Kante der ambivalenten Dach-Figur erzeugt Fehleinschätzungen bei der Beurteilung der Oberflächenhelligkeit. Der Einfluß der Steilheit des Helligkeitsgradienten im Bereich der

Kontrastgrenzen ist bereits seit HERING (1925) bekannt. Er verdeutlichte dies mit einem einfachen Demonstrationsversuch:

Wird der Schattenwurf eines an einem feinen Faden aufgehängten Wattebauschs auf ein weißes Papier mit Hilfe eines Bleistifts eingerahmt, so erscheint dieser Schatten auf dem Papier wie ein Fleck. Er wird demnach wie eine Remissionseigenschaft der Oberfläche beurteilt. Verschiebt man nun das Papier und damit die gezeichnete Umrahmung relativ zum Schatten, erscheint der Schattenwurf augenblicklich als Beleuchtungseffekt (siehe auch v. CAMPENHAUSEN 1993). Auch die bei den Reihungsversuchen verwendete vvv-Figur besitzt diese Kanten. Deren Einfluß auf die Helligkeitswahrnehmung wurde in einem bisher in dieser Arbeit noch nicht beschriebenen Vorversuch ermittelt. Dieser Versuch ermöglichte die Bestimmung der Schattenstärke¹⁷, bei der die Helligkeitstäuschung durch die Kanten möglichst gering ist. Der Versuch und seine Ergebnisse sollen im folgenden kurz zusammengefaßt werden:

Für dieses Experiment wurde die bereits beschriebene Versuchskammer verwendet. Die eingestellten Schattenstärken waren jedoch wesentlich größer, deren Wert wurde zwischen 25 und 5 variiert. In einer Versuchsreihe wurden sechs Dachfiguren mit Seitenflächen der Größe 10 cm x 4 cm gleichzeitig präsentiert. Die Präsentationsfläche wurde jedoch durch ein Untergestell auf eine Höhe von 60 cm über dem Boden der Versuchskammer positioniert. Dadurch wurde der Lichteinfallswinkel flacher. Dies ermöglichte stärkere Beleuchtungsasymmetrien.

Eine der sechs Dachfiguren hatte auf beiden Seiten identische Oberflächen mit einem Remissionsgrad von ca. 0,25. Bei den anderen fünf Dachfiguren befanden sich Papiere auf den Schattenseiten, deren Remissionsgrade höher waren als auf den Lichtseiten. Die Remissionsgrade auf den Schattenseiten wurden stufenweise bis hin zu einem Wert von 0,75 erhöht.

Aufgabe der neun Versuchspersonen war die Identifikation derjenigen Dachfigur, die als homogen eingefärbt wahrgenommen wird, bei welcher demzufolge der Helligkeitsunterschied zwischen der Licht- und Schattenseite als beleuchtungsbedingt erkannt wird und nicht als Oberflächeneigenschaft des Objektes erscheint. Dies wurde bei verschiedenen Schattenstärken durchgeführt.

¹⁷ Die Schattenstärke wurde bereits in Abschnitt 2.1.2. eingeführt. Sie ergibt sich aus dem Verhältnis der Leuchtdichten auf der Licht- und der Schattenseite bei einem homogen eingefärbten Objekt. Ist diese Verhältnis beispielsweise 5 zu 1 ergibt sich daraus eine Schattenstärke von 5.

Um den Einfluß der Kante zu quantifizieren wurden die kantigen Dachfiguren durch abgerundete Objekte ersetzt. Der Krümmungsradius der Rundung betrug 20 mm. Beide Objektformen besaßen Seitenflächen mit identischen Abmessungen. Durch den Vergleich sollte ermittelt werden, wie sich die Wahrnehmungsleistung durch den Einfluß der Kante verschlechtert.

Die sechs abgerundeten Objekte wurden mit Graupapieren beklebt, deren Remissionsgrade auf den Licht- und Schattenseiten mit denen der kantigen Dachfiguren identisch waren. Im Bereich der Krümmung wurde mit Hilfe der Software COREL DRAW ein fließender Übergang zwischen den jeweiligen Remissionsgraden erzeugt, der unter der Beleuchtungssituation in der Versuchskammer optimal positioniert wurde. Die Gradienten im Remissionsgrad konnten dabei so gut an die Objektform und die Beleuchtungssituation angepaßt werden, daß die wahrgenommenen Helligkeitsgradienten als beleuchtungsbedingt beurteilt wurden.

Die Versuchspersonen sollten auch bei den sechs abgerundeten Objekten dasjenige auswählen, welches ihnen als homogen eingefärbt erschien.

Begonnen wurde mit einer Schattenstärke von 25, diese wurde in jeder folgenden Versuchsreihe um 5 reduziert. Dabei zeigte sich, daß bei den Schattenstärken 25 und 20 weder bei den kantigen, noch bei den runden Objekten das homogen eingefärbte Objekt richtig identifiziert wurde. Die Versuchspersonen wählten ausnahmslos Objekte aus, bei denen die Licht und Schattenseiten mit unterschiedlichen Papieren beklebt waren.

Bei den abgerundeten Objekten und einer Schattenstärke von 15 konnten drei von neun Versuchspersonen das homogen eingefärbte Objekt als solches erkennen, bei einer Schattenstärke von 10 konnten bereits sieben der neun Versuchspersonen das homogene Objekt identifizieren. Bei Schattenstärke 5 zeigte sich ein vergleichbares Wahlverhalten.

Bei den kantigen Objekten zeigte sich ein völlig anderes Wahlverhalten. Bei keiner der verwendeten Schattenstärken, auch nicht bei der geringsten getesteten Schattenstärke von 5, wurde das homogen eingefärbte Objekt richtig identifiziert. Die ausgewählten Dachobjekte besaßen auf den Schattenseiten Papiere, deren Remissionsgrad deutlich höher war als auf der Lichtseite. Daraus konnte eine sog. virtuelle Schattenstärke errechnet werden. Die virtuelle Schattenstärke ist hierbei das Leuchtdichteverhältnis aus den Licht- und Schattenseiten der als homogen wahrgenommenen, jedoch nicht homogen eingefärbten Dachfiguren.

Die virtuelle Schattenstärke war bei den kantigen Objekten wesentlich kleiner als die tatsächliche Schattenstärke. Bei Schattenstärken von 25 bis 10 ergab sich jeweils eine mittlere

virtuelle Schattenstärke von ungefähr 5. Bei einer tatsächlichen Schattenstärke von 5 ergab sich eine virtuelle Schattenstärke von ca. 3,3. Dies zeigte, daß die Diskrepanz zwischen dem tatsächlichen und dem virtuellen Wert bei Schattenstärke 5 zwar noch deutlich ist, relativ zu den anderen untersuchten Schattenstärken ist hier bereits eine deutliche Abnahme dieser Diskrepanz zu beobachten.

Die Helligkeitstäuschung durch die Kante ist bei einer Schattenstärke von 5 immer noch nicht eliminiert. Um deren Einfluß in den weiteren durchgeführten Experimenten möglichst klein zu halten wurde eine Schattenstärke von 2 bzw. 2,5 eingestellt. Die gewünschten Schwierigkeitsgrade der Stimuli wurden durch eine entsprechend enge Abstufung der Remissionsgrade erzeugt.

4.5. Ausblick

Der für die vorliegende Arbeit entworfene Versuchsaufbau und die eingesetzte Methode der eigenmetrischen Reihung bieten sich für die Bearbeitung einer weiteren Fragestellung an. In einem ähnlichen Experiment könnte der Einfluß der 3-D-Information auf die Farbkonstanzleistung untersucht werden. Dazu müßte man den bereits beschriebenen Versuchsaufbau folgendermaßen modifizieren:

- Die beiden Lichtquellen in der Versuchskammer müßten sich in ihrer spektralen Strahlungsleistungsverteilung unterscheiden. Man könnte beispielsweise mindestens eine der drei weißen Leuchtstoffröhren auf der rechten Seite durch eine blaue ersetzen, auf der linken Seite hingegen wird eine rote Leuchtstoffröhre verwendet. Die sechs Oberflächen der vvv-Figur würden demnach zur Hälfte mit bläulichem Licht angestrahlt, die andere Hälfte würde rötlich beleuchtet.
- Die sechs Papiere unterschiedlichen Remissionsgrades müßten durch Farbpapiere ersetzt werden, die den gewählten Beleuchtungsverhältnissen in geeigneter Weise entsprechen. Die Papiere könnten beispielsweise bei einer Kombination von blauer und roter Beleuchtung von rot über violett bis blau eingefärbt sein. Bei Einsatz von rotem und gelbem Licht sollten die Papiere von Rot über Orange nach Gelb abgestuft werden. Die jeweiligen Farbpapiere könnten dann von den Versuchspersonen unter der farbigen Beleuchtung nach Farbähnlichkeit gereiht werden.

Bei entsprechender Anordnung der Farbpapiere auf der vvv-Figur könnte man erreichen, daß ein rotes Papier unter blauer Beleuchtung im kurzwelligen Bereich des sichtbaren Spektrums mehr Licht remittiert als ein blaues Papier unter roter Beleuchtung. Das rote Papier müßte wegen der relativ betrachtet stärkeren Erregung der S-Zapfen eher als blau wahrgenommen werden als das blaue Papier. Dies ist jedoch nicht zu erwarten. Aufgrund der Farbkonstanzleistung sollten die jeweiligen Farbpapiere richtig identifiziert und entsprechend nach Farbähnlichkeit geordnet werden, auch wenn aufgrund der spektralen Zusammensetzung der physikalischen Reize andere Reihenfolgen zu erwarten wären.

Entscheidend wäre jedoch die Veränderung der Wahrnehmungsleistung bei Inversion der vvv-Figur sowie bei Ausblenden der 3-D-Information. In einfachen Vorversuchen zeigte sich, daß bei Einsatz farbiger Beleuchtung die weiße Oberfläche einer ambivalenten Dachfigur bei Inversion nicht mehr als farbig beleuchtete weiße Fläche wahrgenommen wird, sondern das man die farbige Erscheinung als Oberflächeneigenschaft interpretiert. Hier liegen scheinbar vergleichbare Zusammenhänge wie bei der Helligkeitskonstanzleistung vor.

In einer Untersuchung von BLOJ et al. (1999) konnte ein ähnliches Phänomen beschrieben werden. Eine der Mach'schen Visitenkarte entsprechende ambivalente Figur wurde so orientiert, daß die Kante vom Beobachter weg zeigt. Eine Seite war weiß, die andere rot. Die beiden Objektseiten beleuchteten sich wechselseitig durch Streulicht. Die weiße Fläche wurde dadurch farbig beleuchtet, sie wurde jedoch von den Versuchspersonen immer noch als weiße Fläche wahrgenommen. Bei Inversion des Objektes mit Hilfe eines Pseudoskops erschienen die beiden Flächen voneinander abgewandt. Die weiße Fläche wurde bei Inversion als pink bis hin zu rot wahrgenommen. Auch hier wurde der Beleuchtungseffekt als Oberflächeneigenschaft beurteilt.

Bei Reihungsexperimenten mit der vvv-Figur ist daher zu erwarten, daß sich die empirischen Sequenzen nach Farbähnlichkeit im normalen Betrachtungsmodus von denjenigen bei Inversion unterscheiden. Für die untersuchten Anordnungen sollten dann die Farborte der Papiere unter der jeweiligen Beleuchtungssituation in einem geeigneten Farbraum¹⁸ bestimmt werden.

Wenn nun die Anordnung der Farborte in diesem Raum mit der Sequenz der Farbpapiere bei Inversion übereinstimmt, entspräche dies den Verhältnissen bei der Helligkeitskonstanzleistung. Auch hier wäre die Konstanzleistung vollständig ausgefallen. Die resultierende Bewertung der

¹⁸ Hier konnte beispielsweise der CIE-Farbraum verwendet werden. Es wäre jedoch auch eine Transformation in den Rezeptorerregungsraum als sinnvolle Variante zu diskutieren.

Stimuli würde jedoch unter diesen Voraussetzungen vollständig mit der physikalischen Komposition der Farbreihe korrelieren.

Zur Beschreibung der verschiedenen Reizbedingungen und der entsprechenden Wahrnehmungsleistung wäre auch hier die Verwendung von Kendall's τ geeignet. Der Schwierigkeitsgrad einer Anordnung errechnet sich dann aus dem Vergleich der Reihenfolge der Farborte bei weißer Beleuchtung und der veränderten Reihenfolge bei farbiger Beleuchtung. Die Güte der Farbkonstanzleistung ergibt sich aus der empirischen Sequenz und der Reihenfolge der Farborte bei weißer Beleuchtung. Dabei wäre sogar möglich, daß die beschriebenen Einschränkungen durch die Verwendung des Rangkorrelationskoeffizienten nach Kendall, die beispielsweise bei der Problematik der Licht/Schatten-Wechsel auftreten, hier weniger stark zum Tragen kommen.

Sollte sich weiterhin herausstellen, daß auch hier Inversion und Ausblenden der 3-D-Information zu gleichen empirischen Sequenzen führen, wäre gezeigt, daß auch hier eine Äquivalenz beider Betrachtungsmodi vorliegt. Dann könnte man die vvv-Figur durch eine größere Figur ersetzen, die anstatt sechs beispielsweise zehn Oberflächen besitzt. Diese Figur müßte dann nicht mehr invertiert, sondern nur noch um ihre 3-D-Information reduziert werden. Aus den größeren Sequenzlängen ergäbe sich ein wesentlich feineres Raster der möglichen Werte von Kendall's τ . Dadurch könnte die quantitative Beschreibung der Wechselwirkung von 3-D-Information und Farbkonstanzleistung in einer exakteren Weise durchgeführt werden.

Weiterhin ergeben sich noch einige weniger umfassende Fragestellungen aus der vorliegenden Arbeit, denn in den durchgeführten Untersuchungen sind Teilaspekte nicht vollständig geklärt worden. Beispielsweise sollte überprüft werden, ob eine Erhöhung der Schattenstärke in Verbindung mit der entsprechend angepaßten Abstufung der Graupapiere zu identischen Ergebnissen führt. Dies würde die Allgemeingültigkeit der vorliegenden Ergebnisse wesentlich erweitern. In den hierzu durchgeführten Vorversuchen konnte jedoch keine vollständige Identität gezeigt werden.

Beim Messen der Leuchtdichten in diesen zusätzlichen Versuchsreihen zeigte sich, daß die entsprechend identischen Leuchtdichteverhältnisse aufgrund des nichtlinearen Streulichteffekts nicht erzeugt werden konnten und daher auch keine Identität der Bewertungen erwartet werden kann. Eine mögliche Lösung wäre der Einsatz von sechs räumlich ausreichend voneinander entfernten Flächen, die jedoch die gleichen Orientierungen zu den Lichtquellen

besitzen, wie bei der vvv-Figur. Dadurch könnte sowohl der lokale Streulichteffekt durch die direkte Nachbarschaft der Graupapiere als auch der Simultankontrast vermieden werden. Da auch hier nur im normalen Betrachtungsmodus gearbeitet werden müßte, wäre eine Erhöhung der Anzahl der gleichzeitig präsentierten Graupapiere möglich. Dies würde sich bei Verwendung von Kendall's τ in der bereits beschriebenen Weise positiv äußern.

Neben der Variation der Schattenstärke bei angepaßter Remissionsgradabstufung könnte auch der Einfluß des Simultankontrasts systematisch untersucht werden. Auch eine Variation der Remissionseigenschaften des Inneren der Versuchskammer und der Präsentationsfläche wären von Interesse. Weiterhin könnte geprüft werden, ob die Präsentation eines Graustufen-Mondrians an der Rückwand der Versuchskammer die Wahrnehmungsleistung positiv beeinflusst.

Abschließend kann demnach festgestellt werden, daß die entscheidende Frage des Zusammenhangs zwischen 3-D-Wahrnehmung und der Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit endgültig geklärt werden konnte. Trotzdem stellt die vorliegende Arbeit die Grundlage und den Ausgangspunkt für eine weitere große Untersuchung dar. Darüber hinaus können einige weiterführende Experimente durchgeführt werden, welche die Erkenntnisse zur Wahrnehmung und Verarbeitung von Körperschatten erweitern könnten.

5. Zusammenfassung

Die Helligkeitskonstanzleistung unseres visuellen Systems bei Körperschatten wurde quantitativ beschrieben. Hierzu wurden Versuchsbedingungen erzeugt, unter denen die Helligkeitskonstanzleistung aufgrund der Körperschatten versagte.

Das Versuchsobjekt war eine mehrfach geknickte, sog. Zickzack-Figur. Diese besitzt sechs Oberflächen auf denen zwischen schwarz und weiß abgestufte Graupapiere in verschiedenen Anordnungen präsentiert wurden. Drei der sechs Objektoberflächen wurden mit einer deutlich höheren Lichtintensität beleuchtet als die verbleibenden drei. In eigenmetrischer Reihung sollten die Versuchspersonen die Graupapiere nach Oberflächenhelligkeit ordnen. Geprüft wurde, inwieweit die wahrgenommene Reihenfolge mit der tatsächlichen Reihenfolge nach Remissionsgrad übereinstimmt.

Weiterhin wurde die Wechselwirkung zwischen der Wahrnehmung der dreidimensionalen Orientierung der Objektoberflächen und der wahrgenommenen Oberflächenhelligkeit untersucht. Diese Wechselwirkung wird bei der räumlichen Inversion der verwendeten, sog. ambivalenten Objekte besonders deutlich. Die räumliche Inversion ist ein Interpretationsprozess, bei dem man sich das Objekt in einer veränderten räumlichen Orientierung vorstellt. Obwohl hierbei die Abbildung des Objektes auf der Retina unverändert bleibt, führt die Inversion zu einer deutlich veränderten Wahrnehmung der Oberflächenhelligkeit. Dieses Phänomen muß daher durch Prozesse in nachgeschalteten Verarbeitungsebenen bedingt sein. Im invertierten Betrachtungsmodus erstellten die Versuchspersonen Rangfolgen nach Oberflächenhelligkeit, die sich von den Rangfolgen im normalen Betrachtungsmodus unterschieden. Zur Quantifizierung der verschiedenen Reizsituationen sowie der Wahrnehmungsleistung wurde der Rangkorrelationskoeffizient τ nach KENDALL & GIBBONS (1990) eingesetzt.

Aufgrund der verwendeten Versuchsmethode konnte zum ersten Mal geklärt werden, nach welchem Prinzip die Veränderung in der Wahrnehmung bei Inversion stattfindet. Bei normaler Betrachtung zeigten die Versuchspersonen Helligkeitskonstanz. Sie konnten die Oberflächenhelligkeiten der Graupapiere auch unter ungünstigen Beleuchtungsverhältnissen weitgehend richtig beurteilen. Der Rangkorrelationskoeffizient τ der sich aus der Wahrnehmungsleistung ergibt war entsprechend größer, als derjenige, der aus den physikalischen Meßwerten der jeweiligen Reizsituation errechnet wurde. Der Unterschied zwischen den beiden Rangkorrelationskoeffizienten wurde hierbei als Maß für die Helligkeitskonstanzleistung verwendet.

Im Gegensatz dazu zeigte sich, daß sowohl bei Inversion der Versuchsobjekte als auch bei Ausblenden der räumlichen Information durch geeignete Versuchsbedingungen die Helligkeitskonstanzleistung vollständig versagte. Die Rangkorrelationskoeffizienten aus Wahrnehmungsleistung und physikalischer Messung waren identisch. Die von den Versuchspersonen wahrgenommen Rangfolgen nach Oberflächenhelligkeit entsprachen jetzt nicht mehr den Rangfolgen der Oberflächen nach Remissionsgrad, sondern den Rangfolgen nach Leuchtdichte. Das visuelle System arbeitet unter diesen Bedingungen demnach ähnlich einem physikalischen Leuchtdichtemeßgerät.

Aufgrund der Ergebnisse aus den Versuchen im invertierten Betrachtungsmodus sowie nach Ausblenden der räumlichen Information kann man schließen, daß die Wahrnehmung von Oberflächenhelligkeit ohne räumliche Information streng nach Intensität der sensorischen Eingangsgrößen organisiert wird. Durch die Information über die tatsächliche räumliche Orientierung von Objektoberflächen wird die visuelle Eingangsinformation geeignet modifiziert, um dadurch die Helligkeitskonstanzleistung zu verbessern.

6. Anhang

6.1. Die Rangkorrelationskoeffizienten von Experiment 1 für die dunklen Graupapiere

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
τ_{0b}	1,00	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,20	
Vp: A K																					
dunkle Graustufen																					
τ_1	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,73	0,60	0,60	0,47	0,60	0,60	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,47	0,60	0,60	0,60	0,73	0,60	0,47	0,60	0,73	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,73	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,73	
	1,00	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,73
Vp: HR																					
dunkle Graustufen																					
τ_1	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,47	0,60	0,60	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,47	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,47	0,47	0,73	
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,60	0,60	0,60	0,60	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,87	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,87	0,87	0,73	0,73	0,47	0,47	0,73	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,87	0,87	0,87	0,60	0,73	0,47	0,60	0,87	
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,47	0,73	0,60	
Vp:NQ																					
dunkle Graustufen																					
τ_1	1,00	0,87	1,00	0,87	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,87	
	1,00	0,87	1,00	0,87	1,00	0,73	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,87	0,60	0,60	0,73	0,87	
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,87	0,60	0,60	0,87	0,87	0,60	1,00	0,87	0,87	0,73	0,73	
	1,00	0,87	0,87	0,87	1,00	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,73	0,87	0,60	0,87	0,60	0,87	0,73	0,87	
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,87	0,87	0,60	0,73	0,87	0,87	0,60	0,87	0,73	0,60	0,73	0,87	
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,60	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	
Vp: AM																					
dunkle Graustufen																					
τ_1	1,00	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,47	0,47	0,73	0,47	0,47	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,47	0,60	0,47	0,47	0,60	0,60	0,47	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,60	
	1,00	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,47	0,47	0,47	0,60
M.wert	1,00	0,87	0,83	0,79	0,84	0,73	0,79	0,70	0,68	0,66	0,62	0,60	0,69	0,74	0,63	0,71	0,63	0,55	0,60	0,71	

6.2. Die Rangkorrelationskoeffizienten von Experiment 1 für die hellen Graupapiere

Gruppe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
τ_{0b}	1,00	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,47	0,47	0,47	0,47	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,20
Vp: A K																				
helle Graustufen																				
τ_1	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,73
	1,00	0,87	0,73	0,87	1,00	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,47	0,60	0,60	0,60	0,87	0,73	0,60	0,60	0,73
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,47	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,73	0,87
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,73	0,60	0,60	0,60	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,47	0,73	0,87
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60	0,73	0,60	0,73	0,73	0,87	0,73	0,87
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,73
Vp: HR																				
helle Graustufen																				
τ_1	1,00	0,87	0,87	0,87	1,00	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,87	1,00	0,87	0,87	0,73	0,47	0,60	0,73
	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,87	1,00	0,87	0,73	0,73	0,73	0,47	0,87
	1,00	0,87	0,73	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,60	0,73	0,73	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,87
	1,00	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,87	0,87	0,60	0,73	0,60	0,73	0,73	0,87	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73
	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,87	1,00	0,73	0,87	0,87	0,73	0,60	0,87
	1,00	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,87	0,73	0,60	0,60	0,73	0,73	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,73	0,73
Vp: NQ																				
helle Graustufen																				
τ_1	1,00	0,87	1,00	0,87	1,00	0,87	1,00	0,87	0,87	1,00	0,73	0,87	0,87	0,87	0,87	1,00	0,73	0,73	0,73	1,00
	1,00	0,87	1,00	0,87	0,87	0,73	1,00	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	1,00	0,87	0,87	1,00	0,87	0,87	1,00	1,00
	1,00	0,87	0,87	0,87	1,00	0,73	1,00	0,73	0,87	0,73	0,73	0,87	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	1,00	1,00	0,73
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,87	0,87	0,60	0,87	1,00	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87	0,73	0,87
	1,00	0,87	1,00	1,00	0,87	0,87	0,87	0,73	0,87	1,00	0,87	0,87	1,00	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	1,00
	1,00	0,87	1,00	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	1,00	0,87
Vp: AM																				
helle Graustufen																				
τ_1	1,00	0,87	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,73	0,60	0,87	0,73	0,6	0,73	0,73	0,60	0,87	0,47	0,47	0,47	0,73
	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60
	1,00	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,60	0,47	0,47	0,60
	1,00	0,87	0,87	0,87	0,87	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,87	0,60	0,60	0,47	0,73
	0,87	0,87	0,73	0,87	0,87	0,73	0,87	0,73	0,73	0,87	0,73	0,73	0,73	0,60	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,60
	1,00	0,87	0,73	1,00	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,73	0,73	0,60	0,73	0,73	0,60	0,73	0,60	0,60	0,60	0,73
M.wert	0,98	0,87	0,86	0,86	0,89	0,74	0,87	0,77	0,75	0,76	0,68	0,72	0,77	0,81	0,71	0,83	0,69	0,68	0,68	0,79

6.3. Das Verfahren zur Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten τ nach Kendall & Gibbons

Die Anwendungsmöglichkeiten und eine Zusammenstellung einiger Eigenschaften des Rangkorrelationskoeffizienten nach KENDALL & GIBBONS (1990) wurden bereits in den Abschnitten 2.4.1. und 2.4.5. dargestellt. Hier soll nun das mathematische Verfahren zur Berechnung der Werte von τ in der vollständigen formalen Darstellung beschrieben werden.

Das Verfahren ermöglicht, den Grad der Übereinstimmung zweier Rangfolgen \mathbf{X} und \mathbf{Y} mit je n Elementen zu quantifizieren. Der Wertebereich von Kendall's τ ist das Intervall $[-1; 1]$, bei vollständiger Korrelation ist τ gleich eins, minus eins hingegen entspricht einer inversen Korrelation der beiden Rangfolgen. Zur Berechnung werden die folgenden Schritte durchgeführt:

Zwei beliebige Paare (x_i, y_i) und (x_j, y_j) der Rangordnungen \mathbf{X} und \mathbf{Y} werden mit **+1** bewertet, wenn:

$$x_i < x_j \text{ und } y_i < y_j$$

oder

$$x_i > x_j \text{ und } y_i > y_j$$

Zwei Paare werden dagegen mit **-1** bewertet,

wenn:

$$x_i < x_j \text{ und } y_i > y_j$$

oder

$$x_i > x_j \text{ und } y_i < y_j$$

\mathbf{P} ist nun die Anzahl der Paarvergleiche, die mit **+1** bewertet wurden, \mathbf{Q} ist die Anzahl der Paarvergleiche, die mit **-1** bewertet wurden und \mathbf{S} ist die Differenz zwischen \mathbf{P} und \mathbf{Q} .

Die Anzahl der möglichen Paarvergleiche ist gleich der Anzahl der Möglichkeiten, zwei Elemente aus n auszuwählen.

Diese ist gleich:

$$[n(n-1)] / 2$$

Kendall's τ ist nun definiert als: $\tau = 2S / [n(n-1)]$

P und **Q** stellen jeweils die Gesamtheit der positiven und negativen Paarvergleiche dar.

Daher gilt:

$$\mathbf{P + Q = [n(n-1)] / 2}$$

Damit ergeben sich für folgende äquivalente Formeln:

$$\begin{aligned}\tau &= 2(\mathbf{P-Q}) / [\mathbf{n(n-1)}] \\ &= \mathbf{1-[4Q / (n(n-1))]} \\ &= \mathbf{[4P / (n(n-1))] - 1}\end{aligned}$$

Die Bestimmung von **S** und damit auch die Bestimmung von **P** und **Q** erfordert nicht das ausführliche Verfahren der Durchführung aller möglichen Paarvergleiche.

Es existieren einige abgekürzte Vorgehensweisen zur Bestimmung von **P**, **Q** und **S**. Die einfachste Methode, die daher auch in der vorliegenden Arbeit verwendet wurde, setzt voraus, das eine der beiden Rangfolgen in die natürliche Reihenfolge (1, 2, 3, 4, ...,n) gebracht wird.

Hierzu folgendes Beispiel:

Die Rangfolge **X** sei: **5 2 4 1 3 6**

Die Rangfolge **Y** sei: **4 5 3 1 6 2**

Wird **X** in die natürliche Reihenfolge gebracht,

X ist demzufolge: **1 2 3 4 5 6**

Y ergibt sich nun als: **1 5 6 3 4 2**

Die zweite, zu vergleichende Rangfolge wird nun folgendermaßen analysiert:

Für jedes Element der zweiten Rangfolge wird gezählt, wie viele Elemente rechts vom jeweils betrachteten Element größer als dieses sind. Die Summe aus diesen Vergleichen entspricht **P**.

Im gewählten Beispiel ist **P = 5 + 1 + 0 + 1 + 0 = 7**

Damit ergibt sich

$$\begin{aligned}\tau &= \mathbf{[4P / (n(n-1))] - 1} \\ &= \mathbf{[28 / 30] - 1} \\ &= \mathbf{- 2 / 30} \\ &= \mathbf{- 0,07}\end{aligned}$$

6.4. Mögliche Leuchtdichtezunahmen bei den 20 Permutationsgruppen

In den folgenden Tabellen werden die möglichen Leuchtdichtezunahmen in Prozent für die 20 Permutationsgruppen aufgeführt. Die dunkelgrau unterlegten Papiernummern symbolisieren die Lage auf einer Schattenseite, die innerhalb der Gruppe möglichen Nachbarschaftskombinationen sind hellgrau unterlegt. Die links stehenden Tabellen beinhalten die Werte für die hellen Graupapiere, rechts befinden sich die Tabellen für die dunklen Graupapiere.

Gr.1	1	2	3	4	5	6
1				13	11	8,7
2				13	12	9,6
3				13	9,9	8,1
4	63	52	43			
5	66	58	47			
6	70	60	47			

Gr.1	1	2	3	4	5	6
1				3,7	2,8	1,2
2				5,1	4,4	2,4
3				5	3,8	3,1
4	26	22	17			
5	28	23	19			
6	28	23	19			

Gr.2	1	2	3	4	5	6
1			15		11	8,7
2			15		12	9,6
3	58	49		33		
4			15		11	8,7
5	66	58		39		
6	70	60		40		

Gr.2	1	2	3	4	5	6
1			4,5		2,8	1,2
2			5,9		4,4	2,4
3	23	20		13		
4			5,4		4,2	3,1
5	28	23		16		
6	28	23		15		

Gr.3	1	2	3	4	5	6
1			15	13		8,7
2			15	13		9,6
3	58	49			28	
4	63	52			30	
5			16	13		9,2
6	70	60			33	

Gr.3	1	2	3	4	5	6
1			4,5	3,7		1,2
2			5,9	5,1		2,4
3	23	20			11	
4	26	22			11	
5			5,7	4,7		3,8
6	28	23			13	

Gr.4	1	2	3	4	5	6
1		18			11	8,7
2	60		41	35		
3		18			9,9	8,1
4		18			11	8,7
5	66		47	39		
6	70		47	40		

Gr.4	1	2	3	4	5	6
1		5,7			2,8	1,2
2	21		14	12		
3		6,6			3,8	3,1
4		6,9			4,2	3,1
5	28		19	16		
6	28		19	15		

Gr.5	1	2	3	4	5	6
1			15	13	11	
2			15	13	12	
3	58	49				21
4	63	52				24
5	66	58				26
6			18	15	13	

Gr.5	1	2	3	4	5	6
1			4,5	3,7	2,8	
2			5,9	5,1	4,4	
3	23	20				9
4	26	22				9
5	28	23				9,3
6			6,1	4,3	3,1	

Gr.6	1	2	3	4	5	6
1		18		13		8,7
2	60		41		29	
3		18		13		8,1
4	63		43		30	
5		18		13		9,2
6	70		47		33	

Gr.6	1	2	3	4	5	6
1		5,7		3,7		1,2
2	21		14		9,9	
3		6,6		5		3,1
4	26		17		11	
5		6,6		4,7		3,8
6	28		19		13	

Gr.7	1	2	3	4	5	6
1		54	44	38		
2	22				12	9,6
3	22				9,9	8,1
4	22				11	8,7
5		58	47	39		
6		60	47	40		

Gr.7	1	2	3	4	5	6
1		16	13	10		
2	7,8				4,4	2,4
3	8,7				3,8	3,1
4	8,8				4,2	3,1
5		23	19	16		
6		23	19	15		

Gr.8	1	2	3	4	5	6
1		18		13	11	
2	60		41			24
3		18		13	9,9	
4	63		43			24
5	66		47			26
6		18		13	12	

Gr.8	1	2	3	4	5	6
1		5,7		3,7	2,8	
2	21		14			7,5
3		6,6		5	3,8	
4	26		17			9
5	28		19			9,3
6		9,2		4,3	3,1	

Gr.9	1	2	3	4	5	6
1		18	15			8,7
2	60			35	29	
3	58			33	28	
4		18	15			8,7
5		18	16			9,2
6	70			40	33	

Gr.9	1	2	3	4	5	6
1		5,7	4,5			1,2
2	21			12	9,9	
3	23			13	11	
4		6,9	5,4			3,1
5		6,6	5,7			3,8
6	28			15	13	

Gr.10	1	2	3	4	5	6
1		54	44		31	
2	22			13		9,6
3	22			13		8,1
4		52	43		30	
5	22			13		9,2
6		60	47		33	

Gr.10	1	2	3	4	5	6
1		16	13		8,3	
2	7,8			5,1		2,4
3	8,7			5		3,1
4		22	17		11	
5	9			4,7		3,8
6		23	19		13	

Gr.11	1	2	3	4	5	6
1		18	15		11	
2	60			35		24
3	58			33		21
4		18	15		11	
5	66			39		26
6		18	15		12	

Gr.11	1	2	3	4	5	6
1		5,7	4,5		2,8	
2	21			12		7,5
3	23			13		9
4		6,9	5,4		4,2	
5	28			16		9,3
6		9,2	6,1		3,1	

Gr.12	1	2	3	4	5	6
1		54	44			25
2	22			13	12	
3	22			13	9,9	
4		52	43			24
5		58	47			26
6	22			13	12	

Gr.12	1	2	3	4	5	6
1		16	13			6,7
2	7,8			5,1	4,4	
3	8,7			5	3,8	
4		22	17			9
5		23	19			9,3
6	12			4,3	3,1	

Gr.13	1	2	3	4	5	6
1		54		38	31	
2	22		15			9,6
3		49		33	28	
4	22		15			8,7
5	22		16			9,2
6		60		40	33	

Gr.13	1	2	3	4	5	6
1		16		10	8,3	
2	7,8		5,9			2,4
3		20		13	11	
4	8,8		5,4			3,1
5	9		5,7			3,8
6		23		15	13	

Gr.14	1	2	3	4	5	6
1		18	15	13		
2	60				29	24
3	58				28	21
4	63				30	24
5		18	16	13		
6		18	15	13		

Gr.14	1	2	3	4	5	6
1		5,7	4,5	3,7		
2	21				9,9	7,5
3	23				11	9
4	26				11	9
5		6,6	5,7	4,7		
6		9,2	6,1	4,3		

Gr.15	1	2	3	4	5	6
1		54		38		25
2	22		15		12	
3		49		33		21
4	22		15		11	
5		58		39		26
6	22		15		12	

Gr.15	1	2	3	4	5	6
1		16		10		6,7
2	7,8		5,9		4,4	
3		20		13		9
4	8,8		5,4		4,2	
5		23		16		9,3
6	12		6,1		3,1	

Gr.16	1	2	3	4	5	6
1			44	38	31	
2			41	35	29	
3	22	18				8,1
4	22	18				8,7
5	22	18				9,2
6			47	40	33	

Gr.16	1	2	3	4	5	6
1			16	13	10	
2			14	12	9,9	
3	8,7	6,6				3,1
4	8,8	6,9				3,1
5	9	6,6				3,8
6			19	15	13	

Gr.17	1	2	3	4	5	6
1		54			31	25
2	22		15	13		
3		49			28	21
4		52			30	24
5	22		16	13		
6	22		15	13		

Gr.17	1	2	3	4	5	6
1		16			8,3	8,7
2	7,8		5,9	5,1		
3		20			11	9
4		22			11	9
5	9		5,7	4,7		
6	12		6,1	4,3		

Gr.18	1	2	3	4	5	6
1			44	38		25
2			41	35		24
3	22	18			9,9	
4	22	18			11	
5			47	39		26
6	22	18			12	

Gr.18	1	2	3	4	5	6
1			13	10		6,7
2			14	12		7,5
3	8,7	6,6			3,8	
4	8,8	6,9			4,2	
5			19	16		9,3
6	12	9,2			3,1	

Gr.19	1	2	3	4	5	6
1			44		31	25
2			41		29	24
3	22	18		13		
4			43		30	24
5	22	18		13		
6	22	18		13		

Gr.19	1	2	3	4	5	6
1			13		8,3	6,7
2			14		9,9	7,5
3	8,7	6,6		5		
4			17		11	9
5	9	6,6		4,7		
6	12	9,2		4,3		

Gr.20	1	2	3	4	5	6
1				38	31	25
2				35	29	24
3				33	28	21
4	22	18	15			
5	22	18	16			
6	22	18	15			

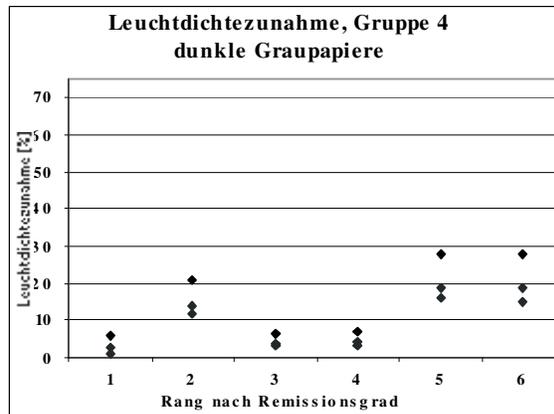
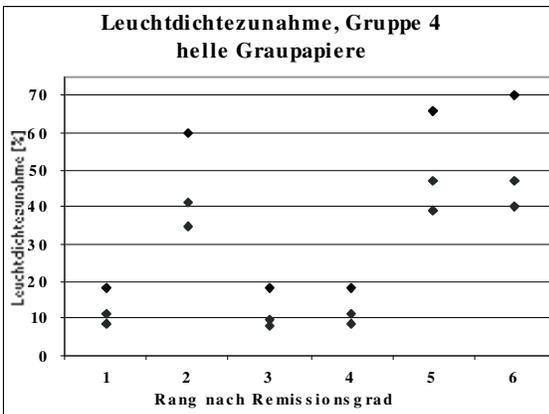
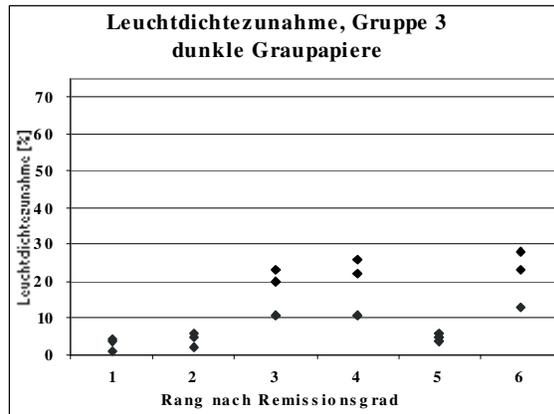
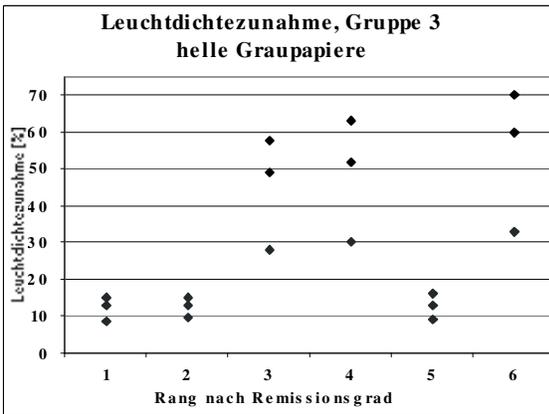
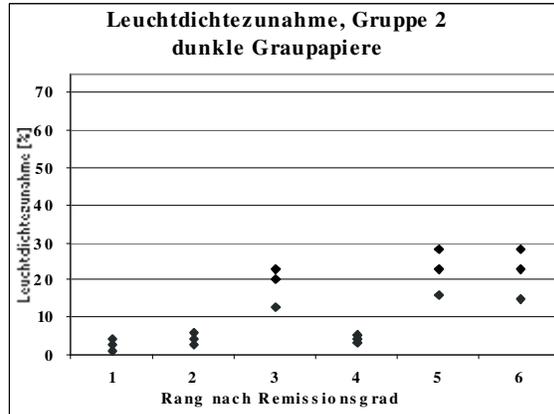
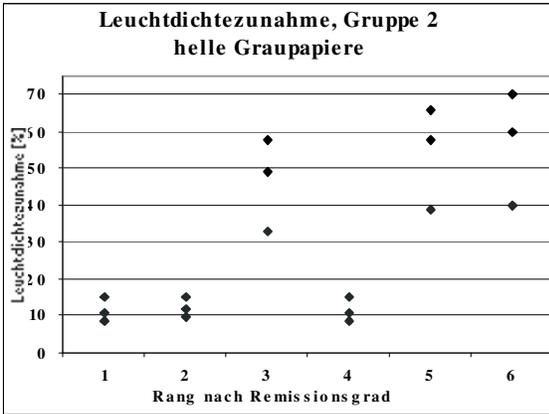
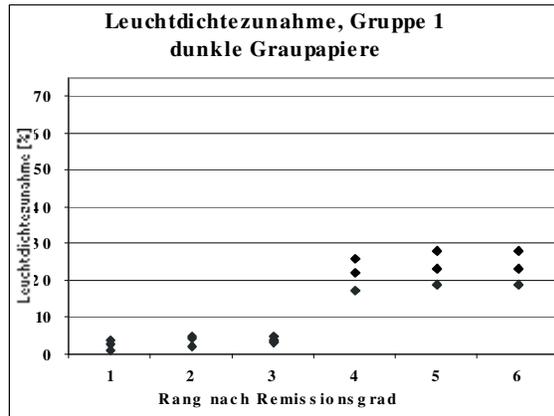
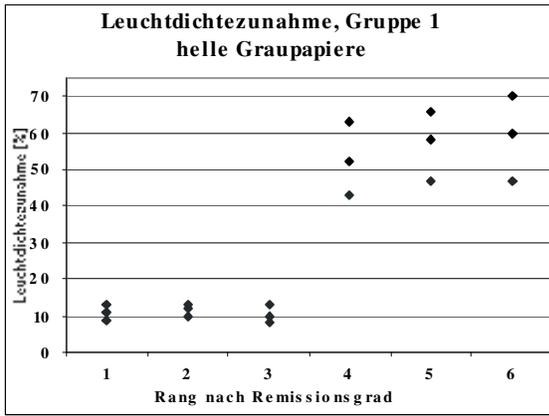
Gr.20	1	2	3	4	5	6
1				10	8,3	6,7
2				12	9,9	7,5
3				13	11	9
4	8,8	6,9	5,4			
5	9	6,6	5,7			
6	12	9,2	6,1			

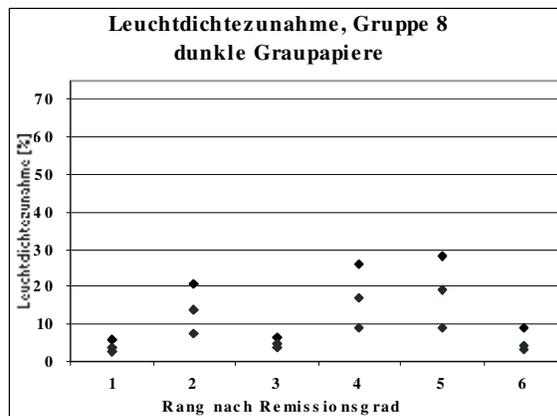
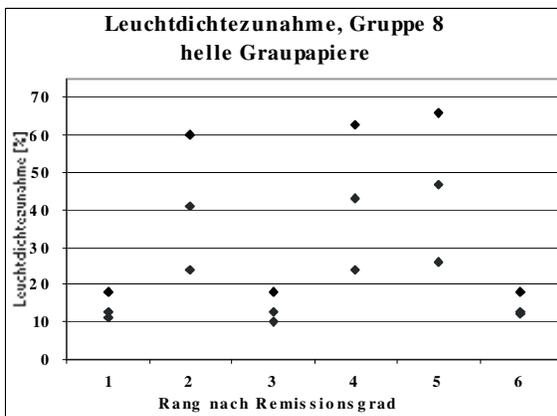
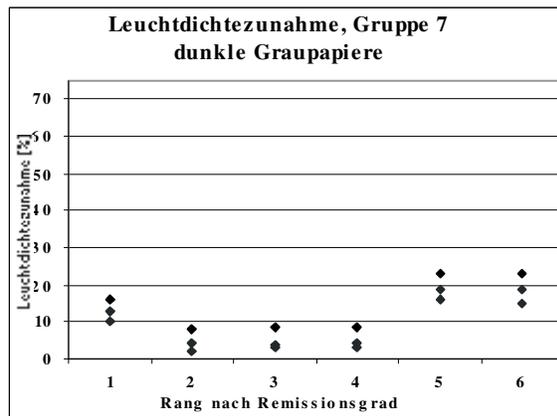
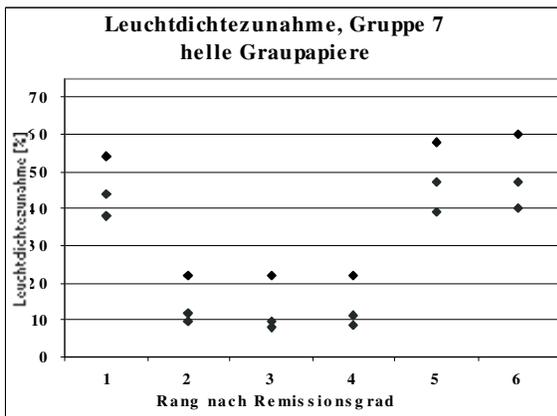
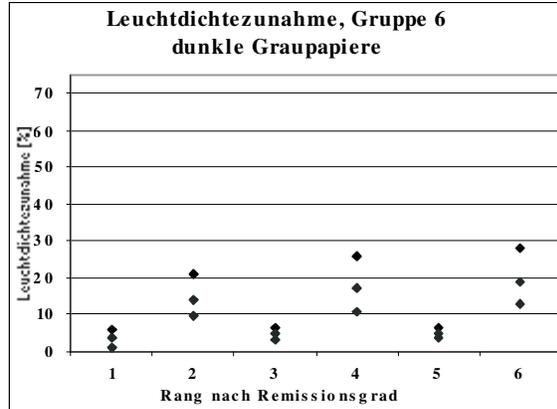
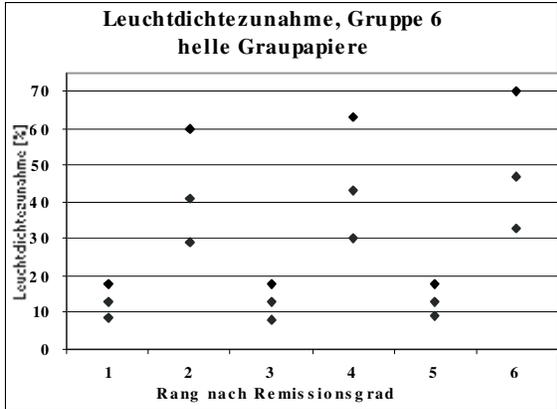
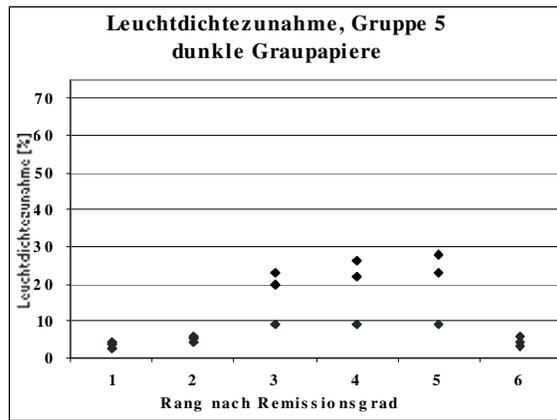
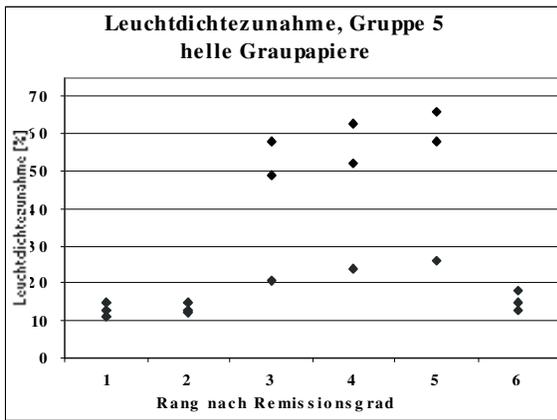
In den folgenden Diagrammen werden die möglichen Leuchtdichtezunahmen für die 20 Permutationsgruppen dargestellt. Dabei wird die stärkere Ausprägung des lokalen Streulichteinflusses bei den hellen Graupapieren im Vergleich zu den dunkeln Graupapieren deutlich. Die Leuchtdichtezunahmen sind darüber hinaus bei beiden Graupapiersätzen auf den Lichtseiten wesentlich geringer als auf den Schattenseiten.

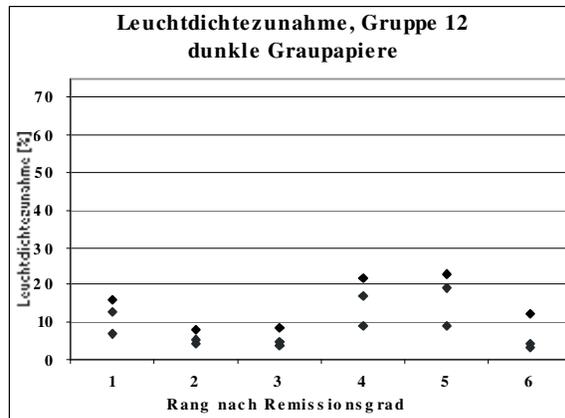
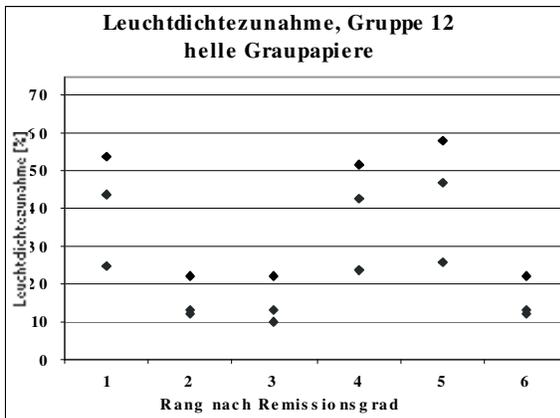
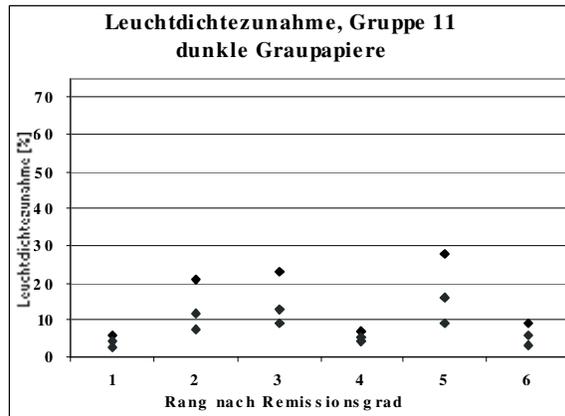
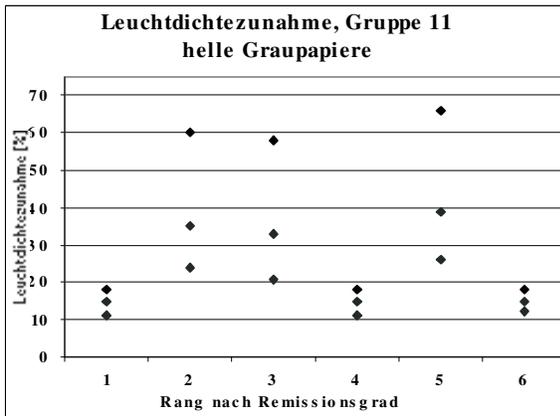
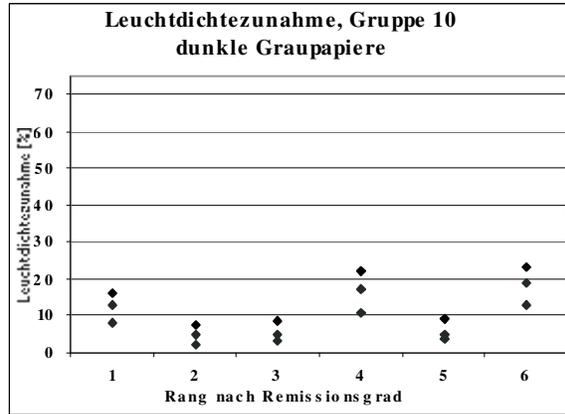
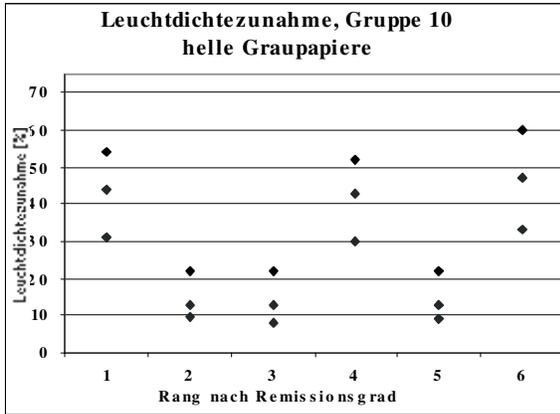
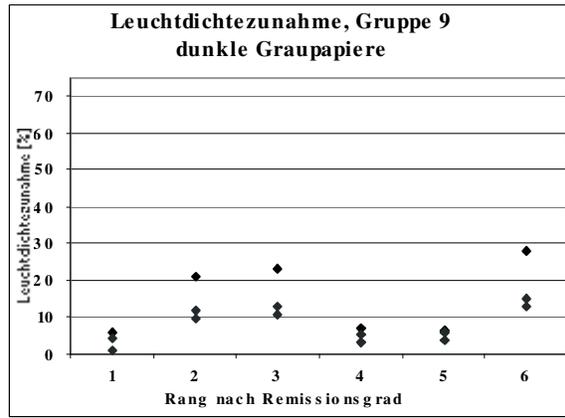
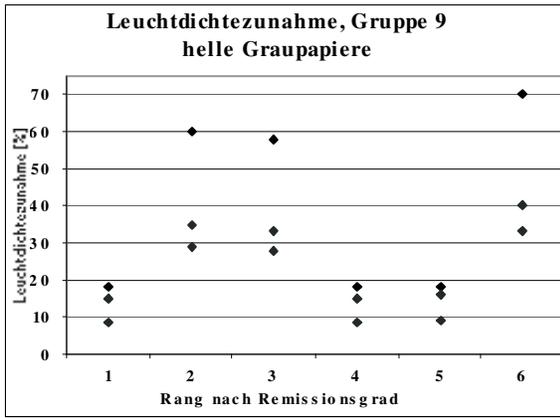
Insbesondere wird jedoch direkt sichtbar, ob in einer Permutationsgruppe die Bedingungen für den kritischen Fall erfüllt sind. Ist die mögliche Differenz der Leuchtdichtezunahmen von zwei Graupapieren, die im Rang nach Remissionsgrad aufeinander folgen, größer als 20 %, ergibt sich hieraus die Möglichkeit, daß ein Papier geringeren Remissionsgrades die höhere Leuchtdichte besitzt.

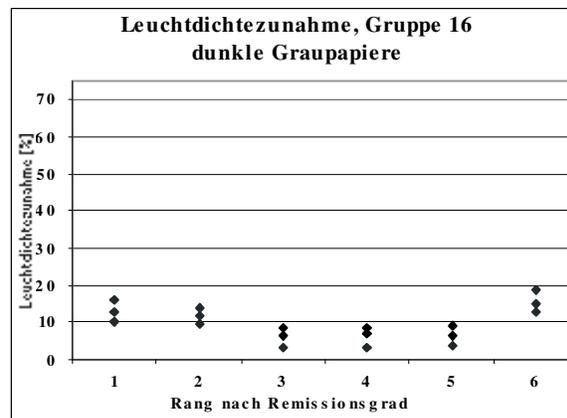
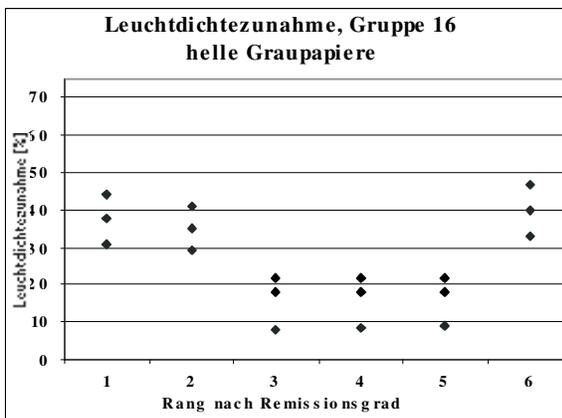
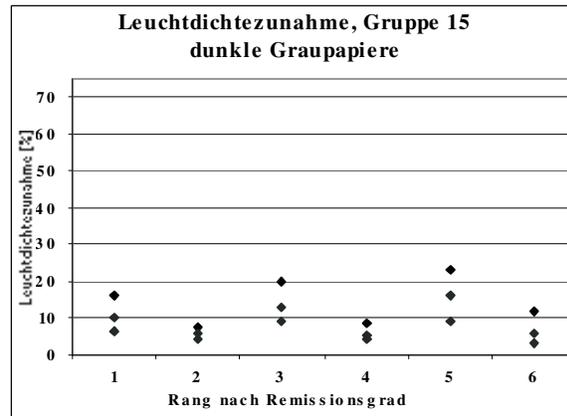
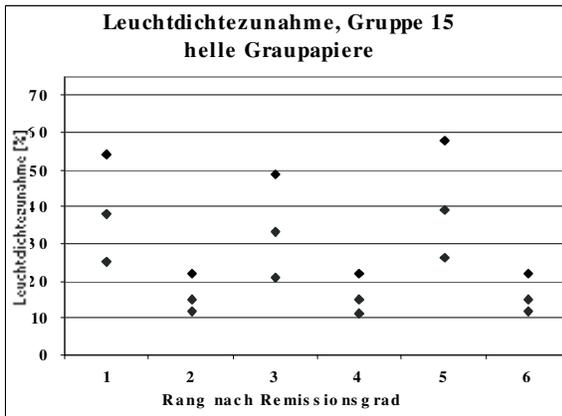
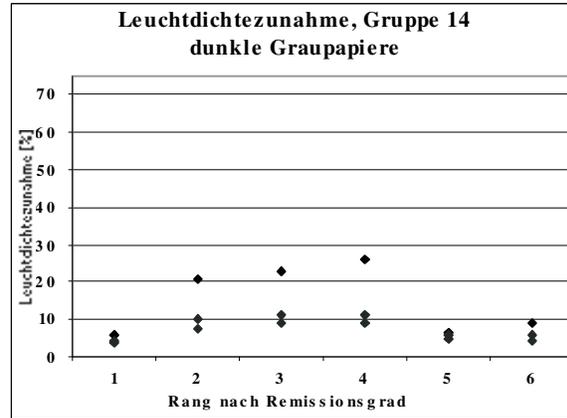
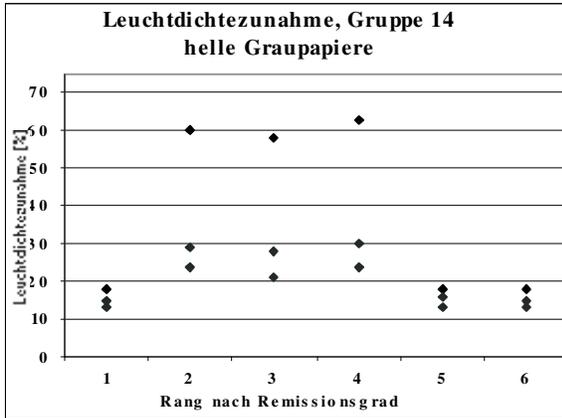
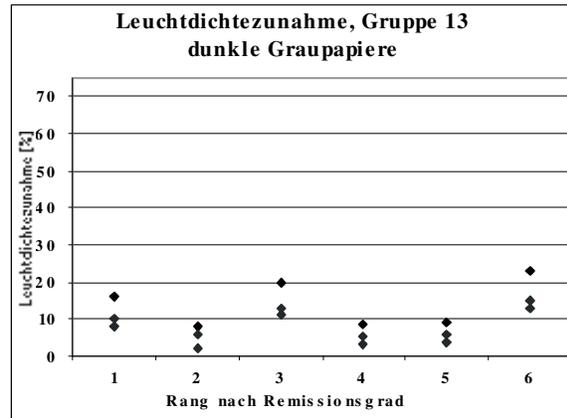
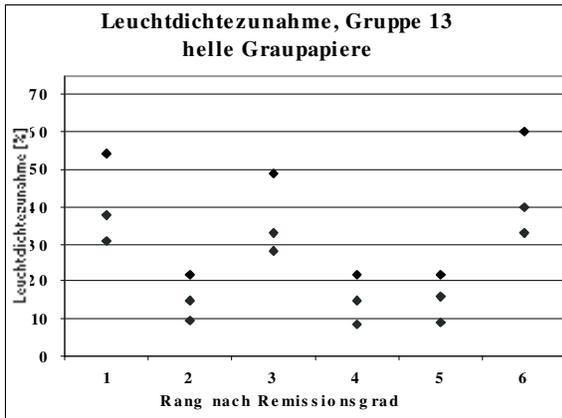
In einem Diagramm werden jedem Papier drei verschiedene Leuchtdichtezunahmen in Prozent zugeordnet, da jedes Papier drei verschiedene mögliche Streulichtpartner besitzt. Betrachtet man nun die maximale Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers auf einer Schattenseite und die minimale Leuchtdichtezunahme eines Graupapiers, welches den nächst höheren Remissionsgrad besitzt und auch auf einer Schattenseite liegt, dann müssen die entsprechenden Datenpunkte mindestens den doppelten Hilfslinienabstand besitzen.

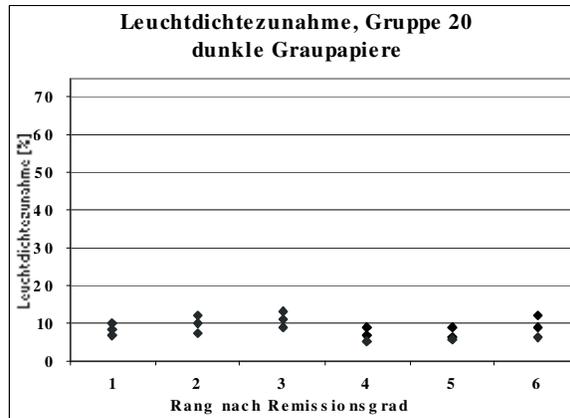
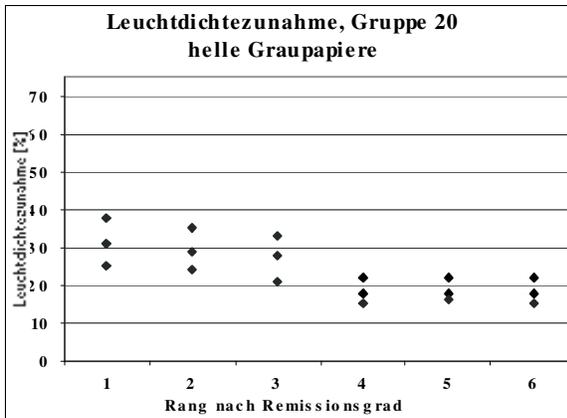
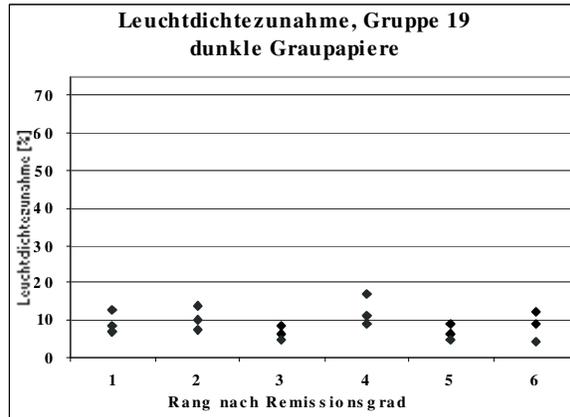
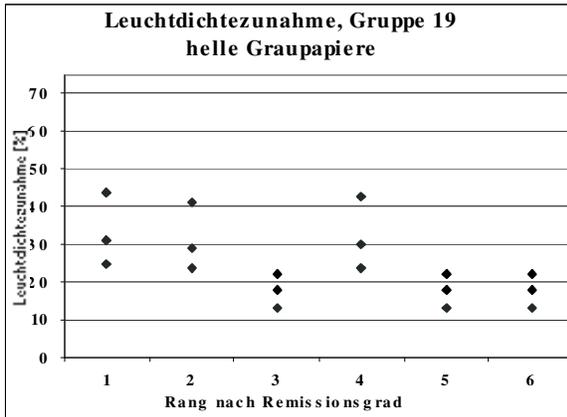
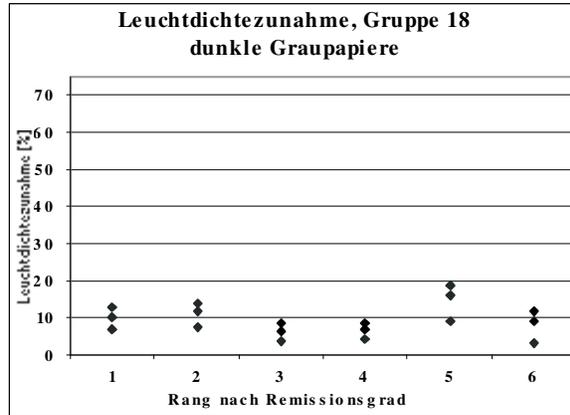
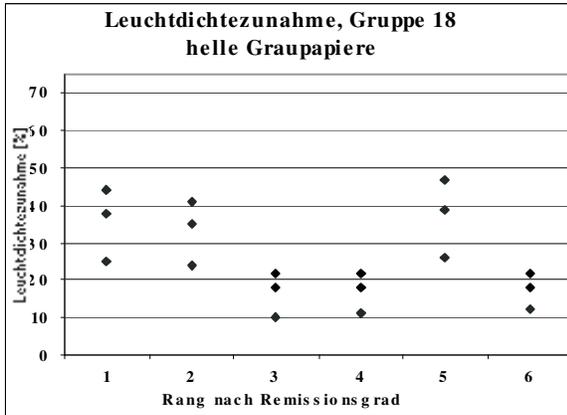
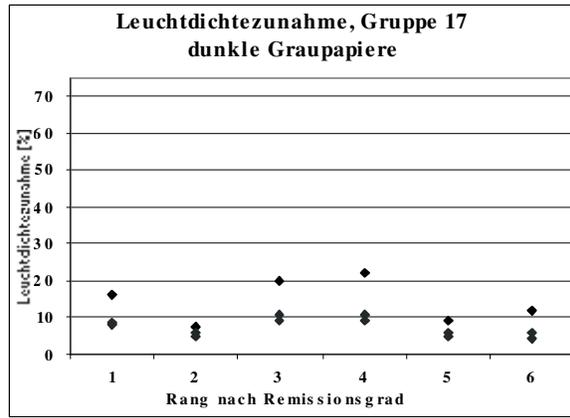
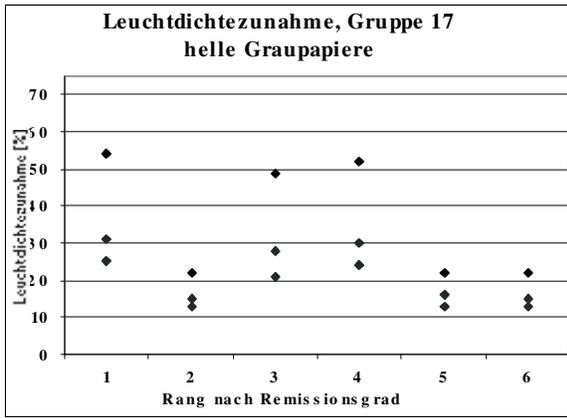
Die Diagramme zeigen weiterhin, daß bei den dunklen Graupapieren die Bedingungen für den kritischen Fall grundsätzlich nicht erfüllt werden.











6.5. Formale Beschreibung des nichtlinearen Streulichteffekts

Die prozentuale Leuchtdichtezunahme nach Mehrfachreflexion ist abhängig vom absoluten Remissionsgrad. Bei Streulichtpartnern mit höheren Remissionsgraden ergibt sich eine relativ betrachtet größere Leuchtdichtezunahme. In der folgenden Näherung wird die Leuchtdichtezunahme für sechs Reflexionen entwickelt. Die Näherung kann dann abgebrochen werden, da in der entsprechenden graphischen Darstellung bereits der asymptotische Verlauf des Graphen zu erkennen ist.

Bei der Berechnung wird eine Schattenstärke von 2, also ein Intensitätsverhältnis von 2 zu 1 eingesetzt. Demnach fällt eine Leuchtdichte der Intensität 1 auf eine Oberfläche mit Remissionsgrad β_2 , eine entsprechend halb so große Intensität von 0,5 auf eine Oberfläche mit β_1 . Die Faktoren, welche das Intensitätsverhältnis berücksichtigen müssen kleiner als eins sein, da die Summe der Folgeglieder nicht asymptotisch gegen einen Grenzwert konvergieren würde. Die Anzahl der Reflexionen sei n .

n resultierende Leuchtdichte auf der Schattenseite nach n Reflexionen

1 $0,5 \cdot \beta_1$

2 $0,5 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1$

3 $0,5 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1$

4 $0,5 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1$

5 $0,5 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1$

6 $0,5 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 0,5 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 + 1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_1$

Mit Hilfe der Mathematik-Software MATHCAD 6.0 kann diese Reihe durch die folgende Formel beschrieben werden:

$$g(N, \beta_1, \beta_2) := \sum_{n=1}^N \text{wenn} \left[\text{mod}(n, 2) = 0, \beta_1^{\frac{n}{2}} \cdot \beta_2^{\frac{n}{2}}, 0,5 \cdot \beta_1^{\frac{n-1}{2} + 1} \cdot \beta_2^{\binom{n-1}{2}} \right]$$

Die Berechnung und graphische Darstellung der relativen Leuchtdichtezunahme für Streulichtpartner, die jeweils dem hellsten und dunkelsten Graupapier aus beiden Sätzen entsprechen zeigt deutlich, daß die Zunahme bei den hellen Graupapieren wesentlich größer ist. Dies ist der Fall, obwohl das Verhältnis der Remissionsgrade in beiden Sätzen identisch ist.

z.B.: $N := 1..6$

Remissionsgrade der hellsten bzw. dunkelsten Papiere in den zwei Graupapiersätzen:

Helle Graupapiere

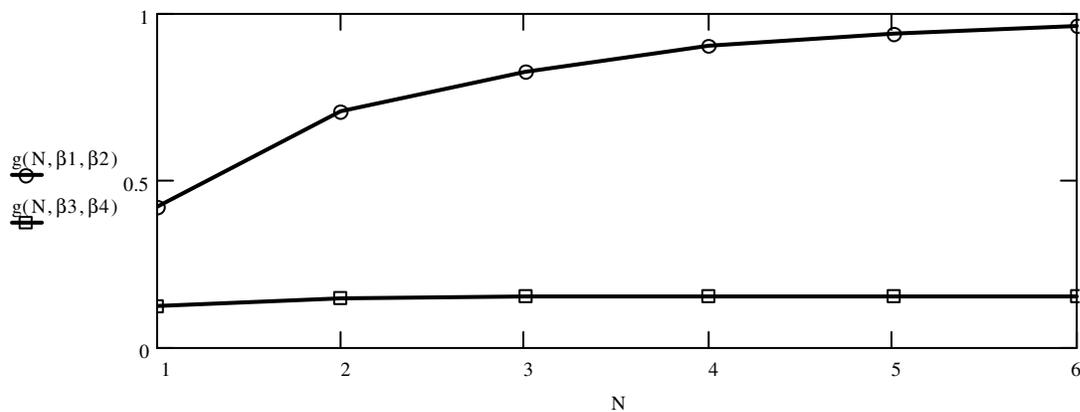
$\beta_1 := 0.84$

$\beta_2 := 0.34$

Dunkle Graupapiere

$\beta_3 := 0.25$

$\beta_4 := 0.1$



Relative Zunahme der Leuchtdichte durch mehrfache wechselseitige Beleuchtung:

$$\frac{g(6, \beta_1, \beta_2) - g(1, \beta_1, \beta_2)}{g(1, \beta_1, \beta_2)} = 129.684\%$$

$$\frac{g(6, \beta_3, \beta_4) - g(1, \beta_3, \beta_4)}{g(1, \beta_3, \beta_4)} = 23.075\%$$

Die errechneten Werte sind deutlich größer als die empirisch ermittelten Leuchtdichtezunahmen. Dies ist darin begründet, daß bei der Berechnung parallele Flächen vorausgesetzt werden, zwischen denen das Licht mehrfach reflektiert wird. Da die Flächen jedoch rechtwinklig aufeinander stehen, müßte die räumliche Abstrahlcharakteristik der Flächen berücksichtigt werden. Die Berechnung wäre dann jedoch wesentlich komplizierter. Da hier nur die Nichtlinearität des lokalen Streulichteffekts anhand eines geeigneten Beispiels belegt werden soll, ist das Berücksichtigen der räumlichen Abstrahlcharakteristik nicht nötig.

6.6. MATHEMATICA-Arbeitsblatt zur Berechnung der 720 Permutationen und den entsprechenden Rangkorrelationskoeffizienten

Das folgende Arbeitsblatt ermöglicht die Berechnung der Rangkorrelationskoeffizienten aller Permutationen für beliebige Remissionsgrade und Schattenstärken. Danach werden die Permutationen nach absteigenden Werten von τ_0 geordnet. Im vorliegenden Beispiel wurde ein Remissionsgradstufenfaktor $c = 1,2$ und eine Schattenstärke $f = 2$ eingesetzt.

```
<< Statistics`MultiDescriptiveStatistics`
c = 1,2;
P0 = Table[c^n, {n, 0, 5}];
P1 = Permutations[P0];
f = 2;
P2 = Table[{P1[[x, 1]]*f, P1[[x, 2]], P1[[x, 3]]*f,
            P1[[x, 4]], P1[[x, 5]]*f, P1[[x, 6]]},
            {x, 1, 720}];
tau = Table[{x, KendallRankCorrelation[P1[[x]], P2[[x]]]}, {x, 1, 720}];
tau >> Ordner\Dateiname 1
P0 = Table[{6, 5, 4, 3, 2, 1}];
P1 = Permutations[P0];
tau0 = ReadList["Ordner\Dateiname 1"];

tau = tau0[[1]];
tabelle =
Table[{tau[[z, 2]], Sort[{P1[[z, 1]], P1[[z, 3]], P1[[z, 5]]}, Greater],
      Sort[{P1[[z, 2]], P1[[z, 4]], P1[[z, 6]]}, Greater],
      {P1[[z, 1]], P1[[z, 2]], P1[[z, 3]], P1[[z, 4]], P1[[z, 5]], P1[[z, 6]]},
      tau[[z, 1]]}, {z, 1, 720}];
sorttabelle = Sort[tabelle];
sorttabelle
sorttabelle >> Ordner\Dateiname 2
```

7. Literatur

Adelson, E. H. (1993). Perceptual organisation and the judgement of brightness. *Science*, 262, 2042-2044.

Adelson, E. H. (1999). Lightness perception and lightness illusions. In M. Gazzaniga (Ed.), *The New Cognitive Neurosciences*, 2nd ed., (pp. 339-351). Cambridge, MA: MIT Press.

Adelson, E. H. & Pentland, A. P. (1990). *The perception of shading and reflectance* (Vision and Modeling Technical Report 140): MIT Media Laboratory.

Bergström, S. S. (1977). Common and relative components of reflected light as information about the illumination, colour, and three-dimensional form of objects. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18(3), 180-186.

Bergström, S. S. (1994). Colour constancy: Arguments for a vector model for the perception of illumination, colour, and depth. In A. Gilchrist (Ed.), *Lightness, Brightness, and Transparency*, (pp 257-286). Hillsdale: Erlbaum.

Bloj, M. G., Kersten, D. & Hurlbert, A. C. (1999). Perception of three-dimensional shape influences colour perception through mutual illumination. *Nature* 402 (December), 877-879.

Bloj, M. G. & Hurlbert, A. C. (1999). The influence of shape and illuminant position cues on surface lightness perception. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 40, S981.

Buckley, D., Frisby, P., Freeman, J. (1994). Lightness perception can be affected by surface curvature from stereopsis. *Perception*, 23, 869-881.

Campenhausen, C. v. (1981 und 1993). *Die Sinne des Menschen*. Thieme Verlag, Stuttgart, 2. Auflage 1993.

Epstein, W. (1961). Phenomenal orientation and perceived achromatic colour. *The Journal of Psychology*, 52, 51-53.

Evans, R. M. (1974). *The Perception of colour*. New York: Wiley.

Fechner, G. T. (1877). *In Sachen der Psychophysik*. Amsterdam: Bonset 1968, unveränderter Nachdruck der Ausgabe Leipzig 1877.

Gilchrist, A. L. (1977). Perceived lightness depends on perceived spatial arrangement. *Science*, 195(4274), 185-187.

Gilchrist, A. L. (1980). When does perceived lightness depend on perceived spatial arrangement? *Perception & Psychophysics*, 28(6), 527-538.

Graham, C. H. & Brown, J. L. (1965). Colour contrast and colour appearances: Brightness constancy and colour constancy. In C. H. Graham (Ed.), *Vision and Visual Perception*, (pp. 453-478). New York: Wiley.

Hering, E. (1925). Grundzüge der Lehre vom Lichtsinn. In A. Graefe & T. Saemisch (Hrsg.), *Handbuch der gesamten Augenheilkunde. Band III: Physiologische Optik*, (S. 1-294). Berlin: Springer.

Helmholtz, H. v. (1866). *Handbuch der physiologischen Optik*. Hamburg und Leipzig: Voss. 2. Auflage:1896.

Hochberg, J. E. & Beck, J. (1954). Apparent spatial arrangement and perceived brightness. *Journal of Experimental Psychology* 47, 263-266.

Hurlbert, A. C. (1994). Knowing is seeing. *Current Biology Vol. 4*(5), 423-426.

Jaensch, E. R. (1921). Über den Farbenkontrast und die sog. Berücksichtigung der farbigen Beleuchtung. *Zeitschrift Sinnesphysiologie* 52, 165-180.

Kendall, M. & Gibbons, J. D. (1990). *Rank Korrelation Methods*. London: Arnold.

Knill, D. & Kersten, D. (1991). Apparent surface curvature affects lightness perception. *Nature* 351(May), 228-230.

Logvinenko, A. & Menshikova, G. (1994). Trade-off between achromatic colour and perceived illumination as revealed by the use of pseudoscopic inversion of apparent depth. *Perception* 23(9), 1007-1024.

Mach, E. (1886). *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen*. Leipzig: Fischer. 9. Auflage, 1922, Jena: Fischer.

Mershon, D. & Gogel, W. (1970). Effect of stereoscopic cues on perceived whiteness. *American Journal of Psychology*, 83, 55-67.

Pessoa, L., Mignolla, E., Arend, L. E. (1996). The perception of lightness in 3-D curved objects. *Perception & Psychophysics*, 58(8), 1293-1305.

Purves, D., Shimpi, A., Lotto, R. B. (1999). An empirical explanation of the cornsweet effect. *The Journal of Neuroscience* 19(19), 8542-8551.

Quäschning, A. (1995). *Über die Abhängigkeit der Helligkeitswahrnehmung von der Interpretation der räumlichen Konfiguration einer invertierbaren Figur*. Diplomarbeit, Universität Mainz.

Quäschning, A. (1998). *Quantitative Untersuchungen zur Helligkeitswahrnehmung des Menschen*. Dissertation, Universität Mainz.

Rock, I. (1977) In defense of unconscious inference. In W. Epstein (Ed.), *Stability and Constancy in Visual Perception, Mechanisms and Processes*, (pp. 321-373). New York: Wiley.

Schirillo, J. A. & Arend, L. (1995). Illumination change at a depth edge can reduce constancy. *Perception & Psychophysics*, 57(2), 225-230.

Schirillo, J. A., Reeves, A., Arend, L. (1990). Perceived lightness, but not brightness, of achromatic surfaces depends on perceived depth information. *Perception & Psychophysics*, 48(1), 82-90.

Wallach, H. (1948). Brightness constancy and the nature of achromatic colours. *Journal of Experimental Psychology* 38, 310-324.

Wallach, H. (1976). *On Perception*. New York: Quadrangle/ The New York Times Book Co.

Wishart, K. A., Frisby, J. P., Buckley, D. (1997). The role of 3-D surface slope in a lightness/brightness effect. *Vision Research*, 37, 467-473.

Wyszecki, G. (1986). Color Appearance: Lightness Constancy and Lightness Contrast. In K. R. Boff, L. Kaufman, J. P. Thomas (Eds.), *Handbook of Perception and Human Performance*, Vol. I, *Sensory Processes and Perception*, (9-12). New York: Wiley.

Wyszecki, G. & Stiles, W. S. (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd ed. New York: Wiley.