

Technische Universität Berlin  
Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik  
Institute of Computer Engineering and Microelectronics  
Dept. Computational Psychology  
Prof. Dr. Marianne Maertens



# **Eine erneute Betrachtung von Kontrastkonstanz mit MLDS: wahrgenommener Kontrast von Sinusgittern variiert mit der Ortsfrequenz**

Thesis zur Erlangung des Grades  
Bachelor of Science (B. Sc.)  
im Studiengang Informatik

**Gutachter:** Maertens, Marianne, Prof  
Wichmann, Felix, Prof

**Betreuer:** Aguilar, Guillermo, Dr

**Eingerichtet von:** Zhang, Wenwen  
Dauerwaldweg 1, Haus 9  
14055, Berlin  
015738775660  
wenwenzhang28@gmail.com  
391912



## **Selbständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Berlin, 26.07.2022

.....

(Wenwen Zhang)



# Abstrakt

Mit Hilfe der Maximum Likelihood Difference Scaling Methode wurde ein Experiment zur überschwelligen Kontrastempfindlichkeit durchgeführt, um zu untersuchen, ob die überschwellige Kontrastwahrnehmung von Sinusgitter mit der Ortsfrequenz variiert, und um die Ergebnisse mit dem 1975 von Georgeson und Sullivan durchgeführten Kontrast Matchingexperiment zu vergleichen. Zwei Versuchspersonen führten MLDS Experiment mit Sinusgitter mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen und konstantem Kontrast (0,04, 0,08 und 0,6) durch. Die Ergebnisse zeigten, dass die Versuchspersonen signifikant unterschiedliche Kontrastwahrnehmungen für Stimuli mit demselben überschwelligen physikalischen Kontrast, aber unterschiedlichen Ortsfrequenzen hatten und empfindlicher auf Wahrnehmungsunterschiede vom Kontrast für Stimuli mit niedrigen oder hohen Ortsfrequenzen reagierten als für Stimuli mit mittleren Ortsfrequenzen. Ich komme zu dem Schluss, dass die überschwellige Kontrastwahrnehmung von der Ortsfrequenz beeinflusst wird, was im Gegensatz zu dem in dem Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan beobachteten Phänomen des konstanten Kontrasts eher mit den Vorhersagen der aus den Kontrastempfindlichkeitsfunktionen abgeleiteten Schwellendaten übereinstimmt.



# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst möchte ich mich vor allem bei Frau Prof. Marianne Maertens bedanken, die es mir ermöglicht hat, über dieses spannende Thema zu schreiben.

Weiteres gebührt mein Dank Dr. Aguilar, der meine Bachelorarbeit betreut, begutachtet, technisch stark unterstützt. Ein besonderer Dank gilt an seinen Teilnehmern meines Experiments.

Ich danke den beiden oben genannten Personen sehr herzlich für ihre hilfreichen Anregungen und konstruktive Kritik bei der Erstellung dieser Arbeit.

Wenwen Zhang

Berlin, 26. 07. 2022





# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
1.1 Kontrast und Kontrastempfindlichkeitsfunktion.....	2
1.1.1 Definition von Kontrast .....	2
1.1.2 Definition von Kontrastempfindlichkeitsfunktion .....	3
1.2 Kontrastkonstanz.....	4
1.2.1 Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan (1975) .....	5
1.2.2 Ergebnisse und Kontrastkonstanz Phänomen .....	6
1.3 Maximum Likelihood Difference Scaling .....	9
1.4 Motivation, Fragestellung und Hypothese .....	10
2. Methode .....	13
2.1 Versuchspersonen .....	13
2.2 Gerät.....	13
2.3 Stimuli.....	14
2.3.1 Erzeugen von Stimuli.....	14
2.3.2 Das Prinzip der Kontrastdarstellung von Stimuli auf dem Bildschirm .....	15
2.4 Design .....	17
3. Ergebnisse .....	19
3.1 Simulation .....	19
3.1.1 Daten Ablesung.....	19
3.1.2 Simulationsverfahren .....	20
3.1.3 Ergebnisse der Simulation .....	22
3.2 Experimentelle Ergebnisse.....	25
4. Diskussion.....	27
4.1 Interpretation der Ergebnisse .....	27
4.2 Kritik.....	29
4.3 Offene Frage .....	30
4.4 Fazit.....	31
5. Literaturverzeichnis .....	33
Liste der Abkürzungen.....	35



# 1. Einleitung

Auf dem Gebiet der visuellen Wahrnehmungsforschung ist die Kontrastwahrnehmung der am umfangreichsten untersuchte Aspekt. In diesem Gebiet wird häufig die Frage gestellt, inwieweit die aus Schwellendaten von Kontrastempfindlichkeitsfunktionen vorhergesagten überschwelligem Kontrastwahrnehmungsunterschiede und die tatsächlichen Kontrastwahrnehmungsunterschiede über der Schwelle, beides Aspekte der visuellen Wahrnehmung, auf denselben Mechanismen beruhen. In dieser Bachelorarbeit entwarf ich dazu ein Experiment, um den Zusammenhang zwischen überschwelligem Kontrastwahrnehmungsunterschieden und der Ortsfrequenz für Sinusgitter mit Hilfe der Maximum Likelihood Difference Scaling Methode zu untersuchen.

In den folgenden Abschnitten werden wichtige Konzepte im Zusammenhang mit diesem Experiment vorgestellt: In 1.1 wird zunächst die Definition von Kontrast und Kontrastempfindlichkeitsfunktionen erläutert, in 1.2 wird das Phänomen der Kontrastkonstanz beschrieben, das bei einem Matchingexperiment vom Georgeson und Sullivan im Jahr 1975 zur Untersuchung der überschwelligem Kontrastwahrnehmung auftritt, und in 1.3 wird die in dieser Bachelor Arbeit verwendete experimentelle Methode Maximum Likelihood Difference Scaling (MLDS) im Detail beschrieben. Schließlich werden in 1.4 die Motivation, die Fragestellung und die Hypothesen für die Gestaltung des Experiments der Bachelorarbeit vorgestellt.

# 1.1 Kontrast und Kontrastempfindlichkeitsfunktion

## 1.1.1 Definition von Kontrast

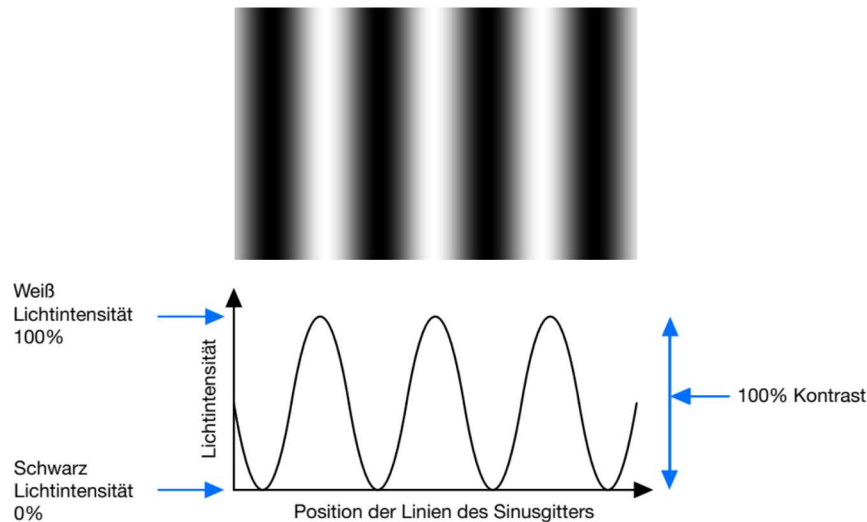


Abbildung 1: Die obere Abbildung zeigt ein Sinusgitter mit einem Kontrast von 1 und einer Ortsfrequenz von 3 Zyklen/Grad. Die untere Abbildung zeigt die Visualisierung der Lichtintensität des Sinusgitters, wobei die y-Achse die steigende Lichtintensität und die x-Achse die horizontale Position jeder Linie des Sinusgitters darstellt. Die weißesten Punkte haben eine Luminanz von 100 % bzw. eine maximale Lichtintensität und die schwärzesten Punkte eine Luminanz von 0 % bzw. eine minimale Lichtintensität. Nach der Berechnung ist der Michelson Kontrast 1 (100%).

Der Kontrast ist der Unterschied in der Lichtintensität zwischen dem hellsten und dem dunkelsten Punkt eines Objekts. Der Kontrast eines Bildes ist ein wichtiger Faktor bei der Beurteilung der wahrgenommenen Bildqualität, da er sich auf das Ausmaß auswirkt, in dem der Inhalt des Bildes erkannt und unterschieden werden kann. Abbildung 1 zeigt ein Sinusgitter mit einem Kontrast von 1 und einer Ortsfrequenz von 3 Zyklen/Grad (die Anzahl der Sinuszyklen pro Sehgrad definiert die Ortsfrequenz des Sinusgitters). Aus der Visualisierung der Lichtintensität lässt sich ableiten, dass jeder Sinuszyklus ein einheitliches Maximum und Minimum der Luminanz aufweist. Die Positionen des Maximums und Minimums der Luminanz entsprechen der hellsten und dunkelsten Linie des Sinusgitters. Die maximalen und minimalen Licht Intensitäten des Sinusgitters sind daher relativ einfach einzustellen und zu erhalten. Um die Einstellung und Berechnung des Kontrasts der Stimuli in dieser Bachelorarbeit zu vereinfachen, habe mich ich dafür entschieden, das Sinusgitter als Stimuli zu behandeln, dessen Kontrast in Form des Michelson-Kontrasts berechnet wird: Der Michelson-Kontrast misst die Differenz zwischen der Summe der maximalen Luminanz  $L_{max}$

und der minimalen Luminanz  $L_{min}$  des Sinusgitters und wird durch die folgende Gleichung gegeben:

$$\text{Kontrast} = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$$

### 1.1.2 Definition von Kontrastempfindlichkeitsfunktion

Die Kontrastempfindlichkeit ist ein sehr wichtiges Maß für die Sehfunktion und wird verwendet, um die Fähigkeit des Menschen zu messen, zwischen hell und dunkel zu unterscheiden, was für alltägliche Aktivitäten wie Lesen, Suchen und Identifizieren von Objekten bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen, Fahren bei Nebel oder in der Nacht und andere Aktivitäten wichtig ist.

Die Kontrastempfindlichkeitsfunktion liefert mehr Informationen über das örtliche Sehen eines Betrachters als die Sehschärfe. Sie beschreibt die Empfindlichkeit des visuellen Systems für verschiedene Ortsfrequenzen. Der niedrigste Kontrast, den das visuelle System unterscheiden kann, wird als Kontrastschwelle entsprechend der Ortsfrequenz bezeichnet, deren Kehrwert die Kontrastempfindlichkeit ist. (Wooten & Renzi et al., 2010)

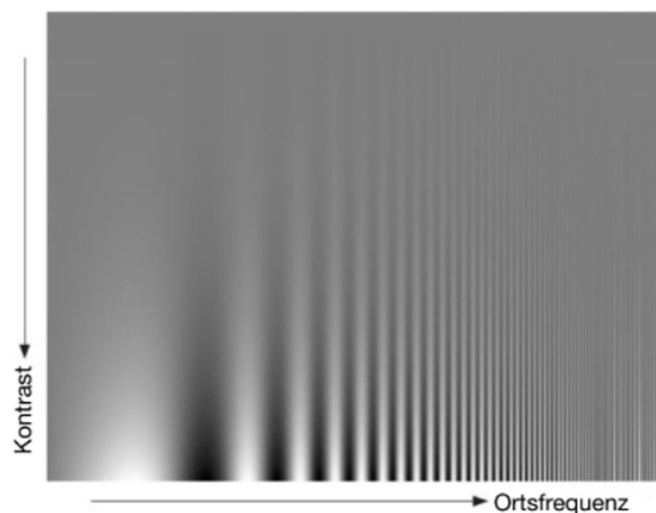


Abbildung 2: Kontrastempfindlichkeitsfunktion für einen durchschnittlichen menschlichen Beobachter (Campbell & Robson, 1964). Die x-Achse stellt in aufsteigender Reihenfolge die Ortsfrequenzen und die y-Achse in absteigender logarithmischer Reihenfolge den Kontrast dar.

Abbildung 2 zeigt die Kontrastempfindlichkeitsfunktion (Campbell & Robson, 1964) für einen durchschnittlichen menschlichen Beobachter, gemessen mit Sinusgittern. Sie zeigt, dass der

menschliche Beobachter typischerweise eine umgekehrte U-Form mit einer Spitze um 2-4 Zyklen/Grad wahrnimmt, obwohl die Positionen mit demselben y-Wert den gleichen physischen Kontrast bei allen verschiedenen Ortsfrequenzen besitzen. Dies bedeutet, dass die Kontrastwahrnehmung des visuellen Systems bei mittleren Ortsfrequenzen empfindlicher ist als bei hohen oder niedrigen Ortsfrequenzen.

Abnahme der Empfindlichkeit bei hohen Ortsfrequenzen kann auf zwei Hauptursachen für die Unschärfe zurückgeführt werden: Optische Beschränkungen des Auges und räumliche Überlagerung im Nervensystem. Campbell & Green (1965) trennten diese beiden Faktoren experimentell und quantifizierten ihren relativen Beitrag zur gesamten Kontrastempfindlichkeitsfunktion.

Der Rückgang bei niedrigen Ortsfrequenzen wird von der lateralen Hemmung verursacht (Cornsweet, 1970), aber es kann in der Anzeige auch einen kleinen Effekt aufgrund der abnehmenden Anzahl von Zyklen geben (Estevez & Cavonius, 1975). Bei niedrigen Luminanzen und beim peripheren Sehen kommt es zu einer Abnahme der absoluten Empfindlichkeit sowie zu einer Verschiebung der Kontrastempfindlichkeitsfunktion zu niedrigen Ortsfrequenzen (Campbell & Green, 1965; Daitch & Green, 1969; Hilz & Cavonius, 1974). Dies steht im Einklang mit der Vorstellung, dass das visuelle System unter diesen Bedingungen eine gröbere "Körnung" und größere rezeptive Felder aufweist.

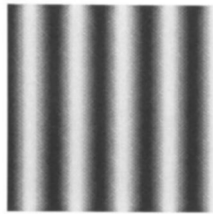
Die Form der Funktion kann auf zugrunde liegende Sehstörungen wie altersbedingte Makuladegeneration, Glaukom, Amblyopie oder auf die meisten Zapfendystrophien hinweisen. Der Test der Kontrastempfindlichkeit ist nicht auf die Prüfung des zentralen Sehens beschränkt, sondern kann auch zur Erkennung und Überwachung von Störungen des peripheren Sehens eingesetzt werden.

## **1.2 Kontrastkonstanz**

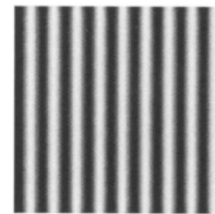
Im Jahr 1975 entdeckten Georgeson und Sullivan im Matchingexperiment ein Phänomen: Für überschwellige Sinusgitter mit demselben physikalischen Kontrast, aber unterschiedlichen Ortsfrequenzen, konnten Versuchspersonen einen ähnlichen Kontrast wahrnehmen. Sie bezeichneten dieses Phänomen als Kontrastkonstanz. Ihr Experiment und dessen Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten ausführlich beschrieben.

### 1.2.1 Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan (1975)

Georgeson und Sullivan veröffentlichten 1975 ihre Studie zur überschwelligen Kontrastwahrnehmung anhand eines Matchingexperiments. Ziel des Matchingexperiments war es, den Zusammenhang zwischen der Ortsfrequenz und der überschwelligen Kontrastwahrnehmung zu untersuchen. Im Experiment wurde getestet, welche physische Kontrast der Stimuli an verschiedenen Ortsfrequenzen variiert wurden, die mit dem gegebenen Kontrast des Standardstimuli an 5 Zyklen/Grad identisch wahrgenommen wurden.



Stimuli A: Standardstimulus  
Ortsfrequenz: 5 Zyklen/Grad



Stimuli B: Stimulus für Anpassung  
Ortsfrequenz: 10 Zyklen/Grad

Abbildung 3: Zwei Stimuli (Sinusgitters), die für das Matchingexperiment verwendet wurden. Stimulus A: der Standardstimuli mit einer Ortsfrequenz von 5 Zyklen/Grad und einem Kontrast von 0,60. Stimulus B: Stimulus mit einer Ortsfrequenz von 10 Zyklen/Grad, der im Experiment hinsichtlich des Kontrasts angepasst werden soll. Nach der Anpassung sollte Stimulus B die gleiche Kontrastwahrnehmung haben wie der Standardstimulus. Nach der Anpassung beträgt der Kontrast des Stimulus B 0,62.

In jedem Durchlauf des Matchingexperiments wurden zwei Sinusgitter auf den Bildschirm gezeigt: Der erste war ein Standardstimulus mit einer Ortsfrequenz von 5 Zyklen/Grad mit einem beliebigen und festen physikalischen Kontrast, z.B. Stimulus A in Abbildung 3; der zweite war ein Stimulus zum Matching, der die andere Ortsfrequenz besaß, z.B. Stimulus B in Abbildung 3.

Die Versuchsperson sollte den Kontrast des Standardstimulus wahrnehmen und dann den Kontrast des zweiten Stimulus so variieren, dass die beide Stimuli schließlich mit demselben Kontrast wahrgenommen werden.

## 1.2.2 Ergebnisse und Kontrastkonstanz Phänomen

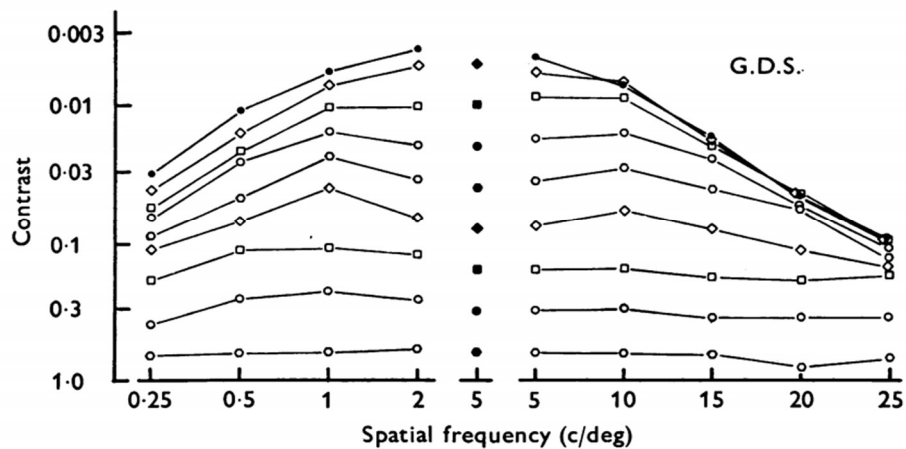


Abbildung 4: Ergebnisse für die Versuchsperson Sullivan (1975). aus dem Matchingexperiment der Originalstudie von Georgeson und Sullivan (1975). Die x-Achse stellt in aufsteigender Reihenfolge die Ortsfrequenzen und die y-Achse in absteigender logarithmischer Reihenfolge den Kontrast dar. Die obere Kurve ist die Kontrastempfindlichkeitsfunktion für die Versuchsperson. Die anderen Kurven stellen die Ergebnissfunktionen des Matchingexperiments dar. Wobei die schwarzen ausgefüllten Punkte die Daten der Standardstimuli darstellen und gestrichelte Punkte die Daten der variierten Stimuli beschreiben.

Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für eine Versuchsperson (G.D.S.) im Matchingexperiment, wobei die x-Achse die aufsteigende Ortsfrequenz und die logarithmische y-Achse den absteigenden Kontrast darstellt. Die obere Kurve zeigt die Kontrastempfindlichkeitsfunktion der Versuchsperson, alle anderen Kurven sind die Ergebnisse des Matchingexperiments. Für jede Ergebniskurve beschreibt die schwarz ausgefüllten Punkt die Ortsfrequenz mit dem x-Wert und den Kontrast mit dem y-Wert der Standardstimuli. Die gestrichelten Punkte beschreiben die variierten Stimuli nach dem Kontrastmatching.



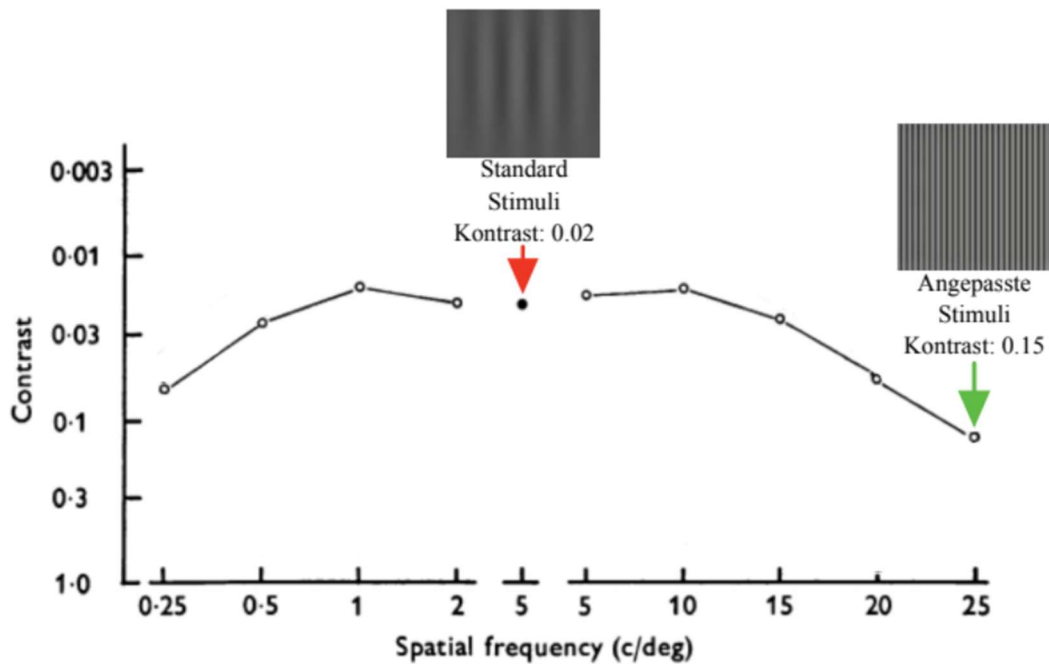


Abbildung 5: Eine Ergebnisfunktion des Matchingexperimentes für die Versuchsperson Sullivan (1975), ausgeschnitten aus Abbildung 4. Der Standardstimulus hatte einen niedrigen physikalischen Kontrast von 0,02 und eine Ortsfrequenz von 5 Zyklen/Grad. Ein angepasster Stimulus mit einer hohen Ortsfrequenz von 25 Zyklen/Grad wurde hier dargestellt, die Versuchsperson passte den Kontrast des Stimulus auf 0,12 an, so dass sie für beide Stimuli den gleichen Kontrast wahrnahm.

Wenn der Standardstimulus einen niedrigen Kontrast besitzt, steigt die Funktionskurve im niedrigen Ortsfrequenzbereich an, flacht im mittleren Ortsfrequenzbereich ab und fällt im hohen Ortsfrequenzbereich. Das Ergebnis für einen Standardstimulus mit einer Ortsfrequenz von 5 Zyklen/Grad und einem Kontrast von 0,02 ist beispielsweise in Abbildung 5 zu sehen. Dieses Ergebnis impliziert, dass der Stimulus mit niedrigen Ortsfrequenzen oder hohen Ortsfrequenzen einen hohen Kontrast als der Standardstimulus erfordert, damit die Versuchsperson die gleiche Kontrastwahrnehmung hat. Je niedriger oder höher die Ortsfrequenz des Stimulus ist, desto größer ist der Kontrast, der variiert werden muss. Bei Stimuli mit mittlerer Ortsfrequenz nehmen die Versuchspersonen einen ähnlichen Kontrast wahr, so dass der Kontrast des angepassten Stimulus dem Kontrast des Standardstimulus ähnelt. Die Form der Gesamtkurve ähnelt der Kontrastempfindlichkeitsfunktion, was mit der höheren Kontrastempfindlichkeit des visuellen Systems bei mittleren Ortsfrequenzen vereinbar ist.

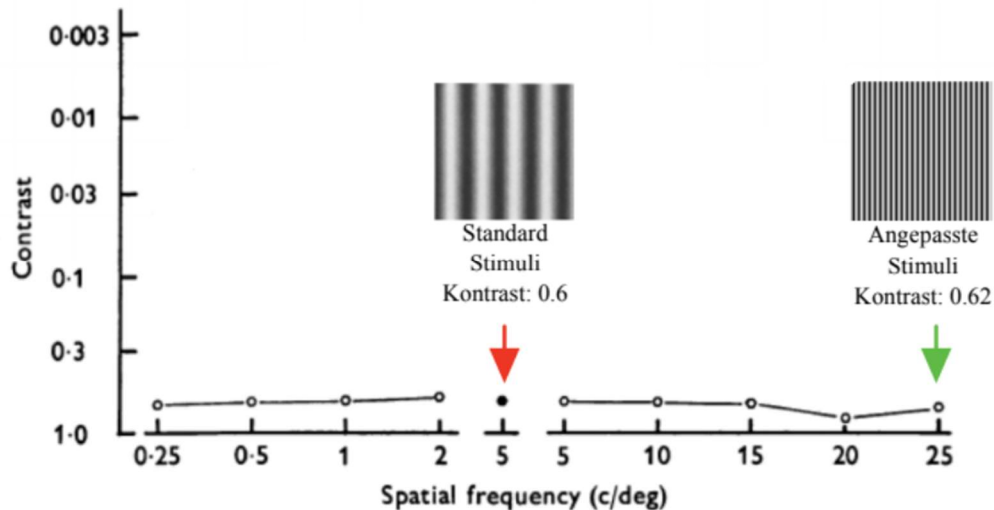
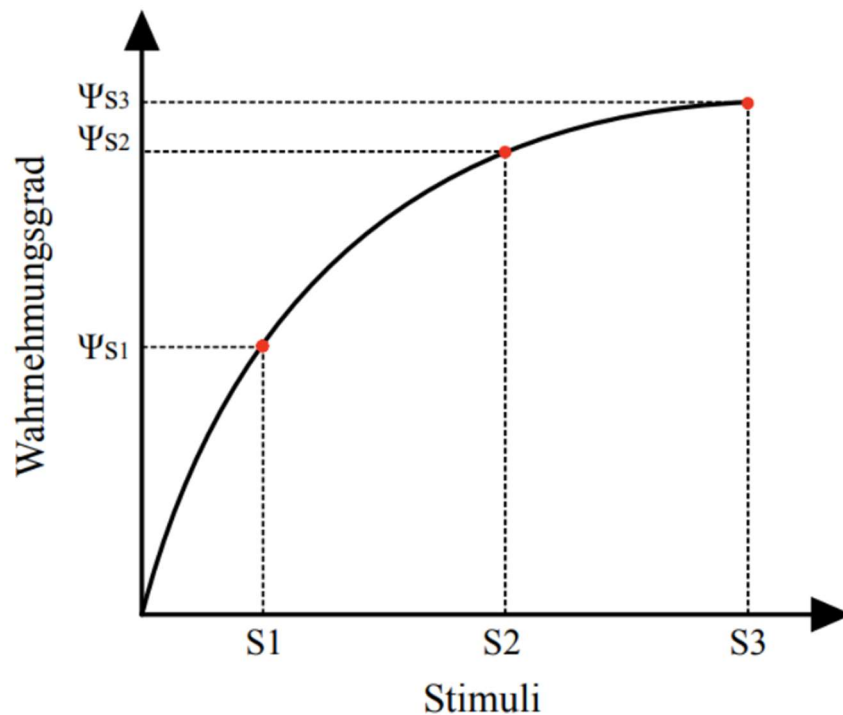


Abbildung 6: Eine Ergebnisfunktion des Matchingexperiments für die Versuchsperson Sullivan (1975), ausgeschnitten aus Abbildung 4. Der Standardstimulus hatte einen hohen physikalischen Kontrast von 0,6 und eine Ortsfrequenz von 5 Zyklen/Grad. Ein angepasster Stimulus mit einer hohen Ortsfrequenz von 25 Zyklen/Grad wurde dargestellt, und die Versuchsperson stellte den Kontrast auf 0,62 ein, so dass sie für beide Stimuli den gleichen Kontrast wahrnahm.

Wenn die Standardstimuli einen hohen Kontrast besitzen, sind die Ergebniskurven flach, die Versuchsperson passte Stimuli mit sehr ähnlichem Kontrast bei verschiedenen Ortsfrequenzen an. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, passte die Versuchsperson bei einem physikalischen Kontrast des Standardstimulus von 0,6 den Kontrast des Stimulus bei einer Ortsfrequenz von 25 Zyklen/Grad auf 0,62 an. Das bedeutet, dass Sinusgitter mit überschwelligem und hohem Kontrast der gleiche physikalische Kontrast bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen von Versuchsperson als gleicher Kontrast wahrgenommen wird. Dieses Phänomen wird als Kontrastkonstanz bezeichnet.

### 1.3 Maximum Likelihood Difference Scaling



$$\Delta = | \Psi_{s3} - \Psi_{s2} | - | \Psi_{s2} - \Psi_{s1} | + \varepsilon$$
$$\varepsilon \sim N ( 0, \sigma^2 )$$

Abbildung 7: Ein repräsentatives Beispiel für eine MLDS-Skala: Die y-Achse steht für den zunehmenden Wahrnehmungsgrad und die x-Achse für ein beliebiges, aber feste Dimension, nach dem sich die Stimuli unterscheiden sollen. Die Formel für die Entscheidungsvariable ist unterhalb der Skala angegeben, die den Abstand zwischen den wahrgenommenen Unterschieden zweier Stimulus-Paare mit addierten Gaußschen Rauschen berechnet.

Neben der oben erwähnten Matchingmethode von Georgeson und Sullivan (1975) ist die Maximum Likelihood Difference Scaling (MLDS) Methode eine moderne und effiziente Methode für überschwellige Experimente. Im Gegensatz zur Matchingmethode ist die MLDS Methode eine 2-Forced-Choice-Methode, die die Variation der Antwortmöglichkeiten reduziert und die Faktoren, die die Entscheidung der Versuchsperson beeinträchtigen, verringert. Ich entwarf daher ein überschwelliges Experiment zur Kontrastwahrnehmung unter Verwendung der MLDS Methode.

MLDS ist eine Differenzskalierungsmethode, die in psychophysischen überschwelligen Experimenten verwendet wird, um die Wahrnehmungsskalierung auf der Grundlage von Beurteilungen der Differenz zwischen den Stimuli abzuschätzen (Maloney & Yang, 2003). Die Versuchsperson wird aufgefordert, bei jedem Durchgang wahrzunehmen und zu entscheiden,

welches der beiden gezeigten Stimulus-Paare den größeren Kontrastunterschied aufweisen. Basierend auf all seinen Entscheidungen kann mit dem R-Programmpaket MLDS (Knoblauch & Maloney, 2008), das ein stochastisches Modell beschreibt, eine Wahrnehmungsskala erstellt werden: Die Versuchsperson entscheidet, welches der beiden Stimulus-Paare den größeren Kontrastwahrnehmungsunterschied besitzt, und die Parameter des Modells werden mittels eines Maximum Likelihood Kriteriums geschätzt. (Knoblauch & Maloney, 2008).

Abbildung 7 zeigt ein repräsentatives Beispiel für eine Skala. Die drei roten Punkte repräsentieren die Stimuli  $S_1$ ,  $S_2$  und  $S_3$ , die sich durch ihre x-Werte voneinander unterscheiden, ihre y-Werte bilden den Wahrnehmungsgrad ab, also wie stark die Stimuli wahrgenommen werden. Es ist zu erkennen, dass der Abstand zwischen  $\psi_{S_3}$  und  $\psi_{S_2}$ :

$|\psi_{S_3} - \psi_{S_2}|$  deutlich geringer ist als der Abstand zwischen  $\psi_{S_2}$  und  $\psi_{S_1}$ :  $|\psi_{S_2} - \psi_{S_1}|$ .

Dieser Abstand wird mit  $\Delta$  gekennzeichnet und nach der mathematischen Formel berechnet:

$\Delta = |\psi_{S_3} - \psi_{S_2}| - |\psi_{S_2} - \psi_{S_1}| + \varepsilon$  mit Rauschen  $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ , das als Gaußverteilung mit Mittelwert Null und Varianz  $\sigma^2$  angenommen wird (Knoblauch & Maloney, 2008; Maloney & Yang, 2003). Der Abstand  $\Delta \geq 0$  bedeutet, dass die Versuchsperson im Experiment das Paar( $S_3, S_2$ ) mit größerem Unterschied als das Paar( $S_1, S_2$ ) wahrnimmt, und ihre Entscheidung wird mit 1 bewertet; Wenn  $\Delta < 0$ , wird ihre Entscheidung mit 0 bewertet. Somit wird  $\Delta$  die Entscheidungsvariable genannt.

## 1.4 Motivation, Fragestellung und Hypothese

Einerseits deutet die Kontrastempfindlichkeitsfunktion für normale menschliche Beobachter darauf hin, dass das visuelle System für die Kontrastwahrnehmung der Stimuli mit mittleren Ortsfrequenzen empfindlicher ist als für Stimuli mit niedrigen und hohen Ortsfrequenzen. Dabei variiert die Kontrastwahrnehmung für sinusförmige Gitter mit der Ortsfrequenz an der Schwelle. Andererseits deutet das Phänomen der Kontrastkonstanz, das in dem Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan (1975) auftrat, darauf hin, dass die Kontrastwahrnehmung von sinusförmigen Gittern mit hohem überschwelligen Kontrast unabhängig von der Ortsfrequenz ist.

In dieser Bachelorarbeit untersuche ich erneut mittels der MLDS Methode die Abhängigkeit zwischen dem wahrgenommenen überschwelligen Kontrast und der Ortsfrequenz und vergleiche und analysiere die Ergebnisse mit denen des Matchingexperiments von Georgeson und Sullivan (1975). Die experimentelle Fragestellung dieser Arbeit lautet daher: Variiert der

wahrgenommene überschwellige Kontrast von Sinusgittern in MLDS-Experimenten mit der Ortsfrequenz? Wird das Phänomen der Kontrastkonstanz gefunden oder sind die Ergebnisse ähnlich wie die Vorhersagen von Schwellendaten von der Kontrastempfindlichkeitsfunktion in diesem MLDS Experiment?

Im nächsten Abschnitt werden die auf der Fragestellung basierende Hypothesen mit Skizzen der MLDS Skalen vorgestellt.

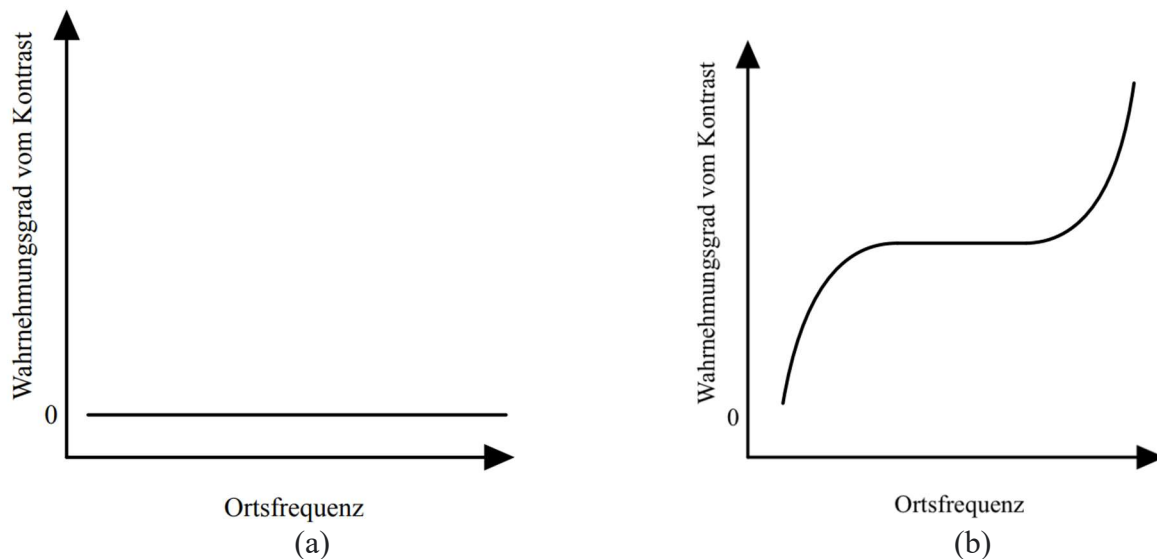


Abbildung 8(a): MLDS Skala, die entsprechend den zwei hypothetischen Ergebnissen des Experiments erstellt wird: 1. Das Phänomen der Kontrastkonstanz tritt im MLDS Experiment auf, wenn der Kontrast der Stimuli sehr hoch ist. 2. Der Kontrast der Stimuli ist sehr niedrig und liegt unter der Schwelle. Abbildung 8(b): MLDS Skala, die entsprechend den zwei hypothetischen Ergebnissen des Experiments erstellt wird: 1. Die Stimuli besitzen einen niedrigen Kontrast. 2. Wenn der Kontrast der Stimuli sehr hoch ist, tritt im MLDS Experiment das Phänomen der Kontrastkonstanz nicht auf. Die x-Achse beschreibt die Zunahme der Ortsfrequenz und die y-Achse den Kontrastwahrnehmungsgrad.

Unter der Annahme, dass im MLDS Experiment Kontrastkonstanz auftritt, wenn die Stimuli einen hohen Kontrast haben, ergibt das MLDS Experiment die Wahrnehmungsskala in Abbildung 8(a). Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Versuchspersonen alle Stimuli als sehr ähnlich im Kontrast wahrnehmen und nicht fähig sind, die Kontrastunterschiede zu differenzieren. Außerdem deutet das Ergebnis darauf hin, dass der Abstand zwischen den wahrgenommenen Unterschieden der je zweier Stimuli Paaren so gering ist, dass die Wahrnehmungsskala flach erscheint.

Wenn alle Stimuli im Experiment einen sehr niedrigen und unterschwelligen Kontrast haben, dann kann die Versuchsperson nichts sehen und daher auch keinen Kontrastunterschied

wahrnehmen. In diesem Fall würde die MLDS Skala also ebenfalls als flache Gerade dargestellt werden, wie in Abbildung 8(a).

Die Ergebnisskala aus dem MLDS Experiment wird unter der Bedingung von niedrigem physischem Kontrast in Abbildung 8(b) vorgestellt. Das Ergebnis vom Georgeson und Sullivan zeigt, dass der Wahrnehmungsunterschied vom niedrigen Kontrast im Bereich der niedrigen Ortsfrequenzen oder hohen Ortsfrequenzen deutlich zu betrachten ist, aber im mittleren Bereich wird die Stimuli mit variierten Ortsfrequenzen aber unentscheidbaren Kontrast wahrgenommen. Die umgekehrte U-förmige Funktion von dem Ergebnis ist mit der Kontrastempfindlichkeitskurve ähnlich. Daraus stelle ich die Ergebnisskala vor: Im Bereich der niedrigen Ortsfrequenzen und hohen Ortsfrequenzen steigen die Wahrnehmungsgrade tendenziell an, somit ist der Wahrnehmungsunterschied der verschiedenen Stimuli zu sehen; Bei mittleren Ortsfrequenzen ist die Kurve horizontal flach entwickelt, weil keine Wahrnehmungsunterschiede in dem Bereich zu erwarten sind.

Als Gegenhypothese stelle ich vor: Wenn die Kontrastkonstanz im Experiment nicht erscheint, nimmt die Versuchsperson die Stimuli mit einem hohen Kontrast ähnlich wahr wie bei einem Experiment mit niedriger Kontrastbedingung. Die Art der Ergebnisse entsprechen dann den Kontrastschwellendaten (Kontrastempfindlichkeitsfunktion). Somit sieht die MLDS Experiment Skala wie die Abbildung 8(b) aus.

## 2. Methode

Ziel des MLDS-Experiments ist es, zu beobachten, ob die Versuchspersonen bei Stimuli mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen den gleichen Kontrast wahrnehmen, so dass die Ergebnisse mit denen des Matchingexperiments verglichen und ausgewertet werden können.

### 2.1 Versuchspersonen

Zwei Versuchspersonen ZWW und AG nahmen an diesem MLDS Experiment teil. Nachdem sie ihre Sehkraft korrigiert hatten, führten sie das Experiment durch.

Beide Teilnehmer hatten Erfahrung mit visuellen Kontrastexperimenten und hatten vor dem Experiment Kenntnis von den experimentellen Daten und von dem experimentellen Zielen. Beziehungsweise, beide sind Versuchspersonen mit Expertise in diesem Experiment.

Wegen der COVID-19 Situation ist es nicht einfach, naive Experimentatoren dazu zu bringen, lange Experimente in einem geschlossenen Raum durchzuführen. Im Vergleich mit dem Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan (1975), nahmen bei diesem Experiment keine naive Versuchsperson, sondern zwei Experten (Autoren) teil.

### 2.2 Gerät

Die Stimuli wurden auf einem 400 x 300 mm Siemens SMM2106LS Bildschirm mit einer Bildwiederholfrequenz von 130 Hz und mit der Auflösung von 1024 x 768 Pixels angezeigt. Die Versuchsperson saß vor dem Display mit dem Betrachtungsabstand von 1435 mm und sah 64 Pixels in einem Sehgrad. Jeder Stimulus war ein Sinusgitter in 4,0 x 4,0 Sehgrads mit Hanning Window. Die Hintergrund Luminanz des Monitors wurde auf 51 cd/m<sup>2</sup> eingestellt und der Raum war während des Experiments abgedunkelt. Die Versuchsperson wurde vor dem Experiment aufgefordert, die Bedeutung des Kontrasts zu verstehen. Außerdem sollte die Versuchsperson verstehen, dass die Entscheidung auf dem wahrgenommenen Kontrastunterschied und nicht auf dem wahrgenommenen Unterschied in der Ortsfrequenz beruhte.

## 2.3 Stimuli

### 2.3.1 Erzeugen von Stimuli

Um eine möglichst große Übereinstimmung mit den Stimuli von Georgeson und Sullivan zu erreichen und Redundanz zu vermeiden, wählte ich die Michelson Kontraste von 0,04, 0,08 und 0,6 als drei Versuchsbedingungen. Der Kontrast 0,04 und der Kontrast 0,08 werden als niedriger Kontrast und der Kontrast 0,6 wird als hoher Kontrast betrachtet.

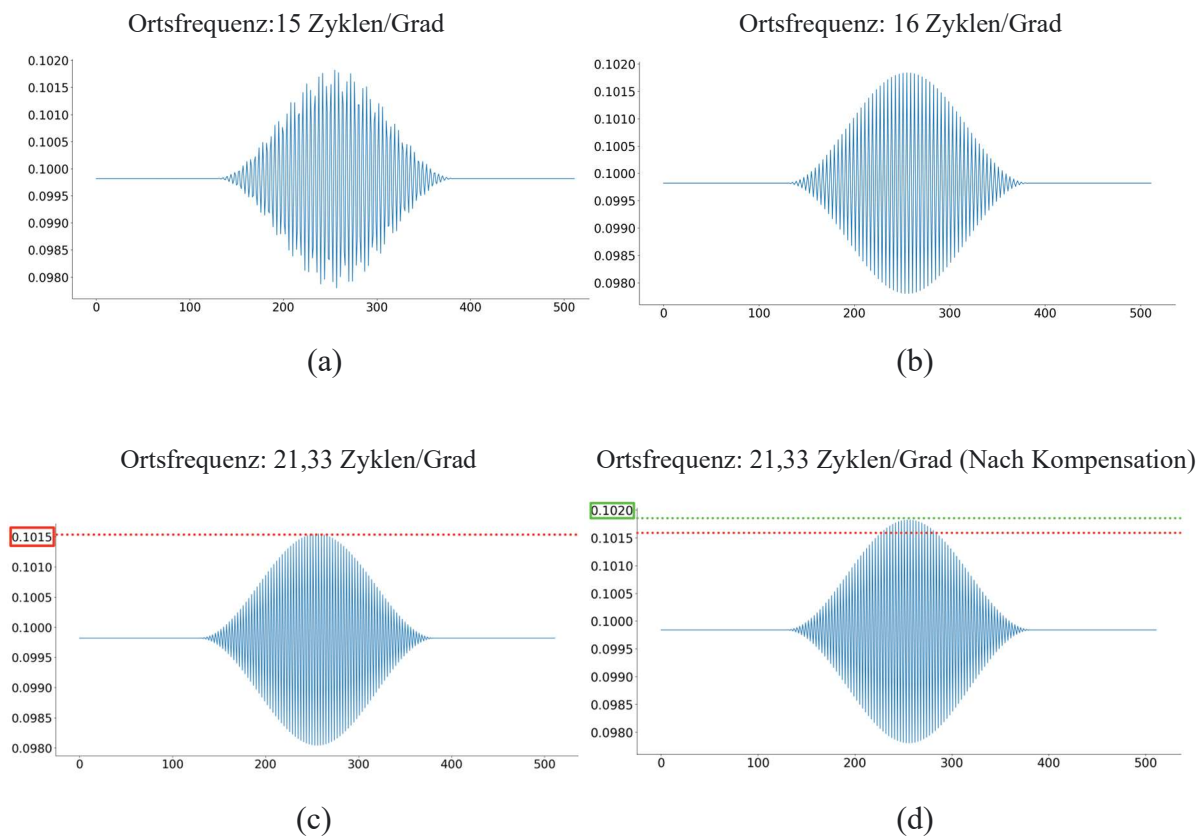


Abbildung 9(a): Visualisierung des Luminanzprofils des Sinusgitters mit der Ortsfrequenz 15 Zyklen/Grad, Aliasing tritt auf. Abbildung 9(b): Visualisierung des Luminanzprofils des Sinusgitters mit der Ortsfrequenz 16 Zyklen/Grad ohne Aliasing. 9(c): Visualisierung des Luminanzprofils eines Sinusgitters mit einer Ortsfrequenz von 21,33 Zyklen/Grad. Das Sinusgitter weist einen geringeren Kontrast als den Eingabekontrast (gewünschten Kontrast) wegen Aliasing auf. 9(d): Visualisierung des Luminanzprofils des Sinusgitters mit Ortsfrequenz 21,33 Zyklen/Grad, nach der Kompensation (Vergrößerter Eingang Kontrast) ist das Sinusgitter mit gewünschtem Kontrast korrigiert. Die x-Achse stellt die Texturgrößen dar und die y-Achse stellt die Luminanz dar.

Die 10 Ortsfrequenzparameter, die bei Georgeson und Sullivan (1975) verwendet wurden, waren 0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 20 und 25 Zyklen/Grad. Als die Ortsfrequenz von Stimuli



größer wurde, mussten die 64 Pixels zu jeder schwarze und weiße Streife (pro Sinusperiode) ganzzahlig aufgeteilt werden, das heißt die Ortsfrequenz der Stimuli in der Form von  $2^x$  sein musste, da sonst das Aliasing-Phänomen aufgetreten wäre. Das Aliasing tritt auf, wenn die Auflösung des Bildschirms zu niedrig und die Ortsfrequenz des angezeigten Stimulus zu hoch ist. Die originale Ortsfrequenz oder der Kontrast der angezeigten Stimuli nach der Neuabtastung wird dadurch verändert. In Abbildung 9(a) wird die Aliasing-Visualisierung der Stimuli mit der Ortsfrequenz 15 Zyklen/Grad gezeigt, vergleichsweise wird die Stimuli ohne Aliasing mit der Ortsfrequenz 16 Zyklen/Grad in der Abbildung 9(b) gegeben. Das Sinusgitter mit der Ortsfrequenz 32 Zyklen/Grad ( $2^5$ ) ist nicht sichtbar. Daher verringerte ich durch manuelles Überblenden die Ortsfrequenz und evaluierte die Ortsfrequenz mit Hilfe einer Visualisierung der Sinusgitterkontraste. Bei einer Erhöhung des Eingangskontrasts auf das 1,43-fache des ursprünglichen Kontrasts (Abbildung 9(c)), hatte der Stimulus kein Aliasing bei einer Ortsfrequenz von 21,33 Zyklen/Grad (Abbildung 9(d)). Nach der Aliasingvermeidung ergaben sich Stimuli mit 0,25, 0,33, 0,5, 0,66, 1, 2, 4, 8, 16 und 21,33 Zyklen/Grad.

### 2.3.2 Das Prinzip der Kontrastdarstellung von Stimuli auf dem Bildschirm

Die Luminanz des Monitors wird entsprechend der vorgegebenen Intensität gesteuert: Die niedrigste bis höchste Luminanz wird in Intensitäten von 0% bis 100% umgewandelt. Die den verschiedenen Intensitäten entsprechende Luminanzen werden gemessen und in der Lookup-Tabelle gespeichert. Mittels der Interpolationsfunktion kann man die Luminanz bei der gegebenen Intensität oder die der gegebenen Luminanz entsprechende Intensität berechnen. Die Hintergrund Luminanz  $bg$  ist auf konstante  $51 \text{ cd/m}^2$  gesetzt. Der gewünschte Michelson Kontrast ist als  $mc$  gegeben, dann wird die Luminanzdifferenz  $d \text{ cd/m}^2$  wie folgt ermittelt:

Maximale Luminanz:	$L_{max} = bg + d$
Minimale Luminanz:	$L_{min} = bg - d$
Michelson-Kontrast:	$mc = (L_{max} - L_{min}) / (L_{max} + L_{min})$ $= (bg + d - bg + d) / (bg + d + bg - d)$ $= 2d / 2bg$ $= d / bg$
Luminanz Differenz:	$d = mc * bg$

Gemäß der Funktion *Lookup\_Luminance\_to\_Intensity(d)* wird der Intensitätsunterschied berechnet.



## 2.4 Design



Abbildung 10: Beispiel von einem Durchgang des MLDS Experiment. Stimuli S1, S2, S3 sind mit gleichem Kontrast aber aufsteigender Ortsfrequenzen von links nach rechts gezeigt. Die Versuchsperson entscheidet, welche von den Stimuli Paaren ((S1, S2) oder (S2, S3)) einen größere Wahrnehmungsunterschied hat.

Das Experiment verwendete das MLDS-Triaden-Verfahren. In jedem Durchgang beobachtete die Versuchsperson eine Kombination aus drei Stimuli mit verschiedene Ortsfrequenzen:  $Triad(x_1, x_2, x_3)$ , zum Beispiel wie in Abbildung 10 gezeigt, wobei die Stimuli sich durch drei unterschiedlichen Ortsfrequenzen  $x_1$ ,  $x_2$  und  $x_3$  unterscheiden und die Reihenfolge  $x_1 > x_2 > x_3$  oder  $x_1 < x_2 < x_3$  entspricht. Die Versuchsperson trifft dann eine Auswahl zwischen dem  $Paar(x_1, x_2)$  oder dem  $Paar(x_2, x_3)$  mit größerem wahrgenommenen Kontrastunterschied. Alle möglichen nicht-überlappenden Triaden erscheinen jeweils einmal in einem Versuch Block,  $Triad(x_1, x_2, x_3)$  und  $Triad(x_3, x_2, x_1)$  werden als identisches Triad angesehen. Um das Rauschen im Experiment zu reduzieren, wurde das Experiment für jede Bedingung 10-mal wiederholt. Ein Experiment besteht aus insgesamt 30 Blöcken, dabei wurden in jedem Block 120 Versuche durchgeführt, mittels der Rechnung  $p!/(p-3)! \times 3! = 10!/(7! \times 3!) = 120$  Insgesamt, beinhaltet das gesamte Experiment  $30 \times 120 = 3600$  Durchgangs. Der Versuchspersonen waren während des Experiments kurze Pausen gestattet. Gemäß allen Antworten der Versuchspersonen, wird die Skala der Kontrastwahrnehmung bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen des gleichen physikalischen Kontrasts erzeugt.



# 3. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zuerst die simulierten Ergebnisse gemäß verarbeiteten Ergebnissen vom Matchingexperiment von Georgeson und Sullivan (1975) in 3.1 dargestellt. Dann werden die experimentellen Ergebnisse vom MLDS-Experiment in 3.2 beschrieben.

## 3.1 Simulation

In der Simulation nehmen Georgeson und Sullivan als Versuchspersonen an diesem MLDS Experiment teil. Mit den simulierten Ergebnissen wird die Hypothese aus 1.4 getestet. In 4.1 werden die simulierten Ergebnisse mit den experimentellen Ergebnissen aus 3.2 verglichen.

### 3.1.1 Daten Ablesung

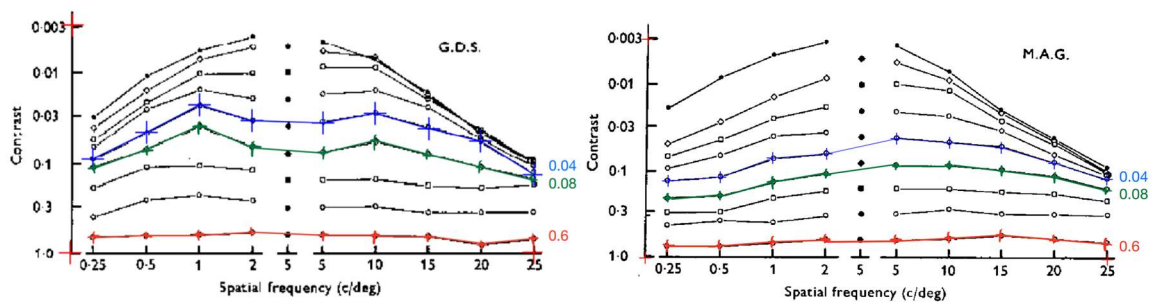


Abbildung 11: Matchingexperiment Ergebnisse von Georgeson und Sullivan (1975). Das Koordinatensystem ist identisch mit dem von Abbildung 4. Für die MLDS Simulation werden nur die blauen, grünen und roten Kurven verwendet, sie haben jeweils einen Kontrast von 0,04, 0,08 und 0,6.

Da in dem Experiment keine Daten, sondern lediglich das in Abbildung 11 dargestellte Diagramm angegeben wurde, verwendete ich die Software Engauge Digitizer um Zahlenwerte aus dem Diagramm zu extrahieren. So konnte jeweils ein Standardstimulikontrast von 0,04, 0,08 und 0,6 ermittelt werden. Für das MLDS Experiment werden diese Kontrastwerte verwendet. Um die Fehlergrenze zu reduzieren, wurde jedes Ergebnisdiagramm dreimal für jede der drei Bedingungen positioniert und abgelesen, der Durchschnitt wurde dann als Ergebnis der Ablesungen genommen.

Um den Vergleichsprozess zu vereinfachen, habe die ich die Endergebnisse beider Experimentatoren gemittelt und zu einer einzigen Versuchsperson zusammengesetzt, dies ist in Abbildung 12(a) gezeigt.

Das Ergebnis wird normalisiert (Abbildung 12(b)), so dass die y-Achse mit dem normalisierten Kontrast als Kontrast-Wahrnehmungsgrad sich bezeichnet. Der Differenz von den y-Werten kann als den Wahrnehmungsunterschiede der Kontrast von Versuchsperson zwischen zweien Stimuli mit gleichem Kontrast mit denen zwei Ortsfrequenzen ermittelt. Der Versuchsperson (gemittelte Ergebnisse vom Georgeson und Sullivan (1975)) wird als G&S bezeichnet.

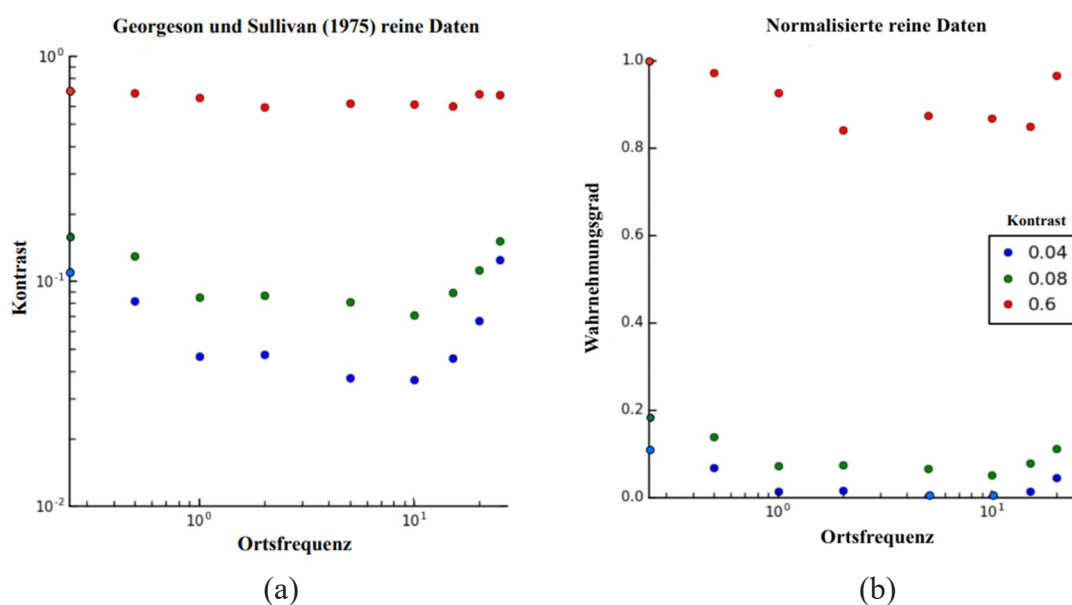
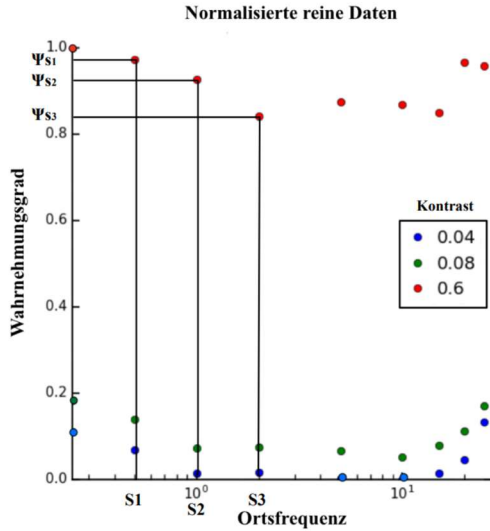


Abbildung 12(a): Gemittelte Ergebnisse von Versuchspersonen Georgeson und Sullivan nach Datenablesung. Die x-Achse stellt die logarithmisch aufsteigenden Ortsfrequenzen dar, die y-Achse stellt den logarithmischen aufsteigenden Kontrast dar (Umgekehrt von dem Originalen Ergebnis Graph). 12(b): Normalisierte Ergebnisse der Abbildung 12(a). Die x-Achse stellt die logarithmisch aufsteigende Ortsfrequenzen dar und die y-Achse stellt den normalisierten Kontrast beziehungsweise das Wahrnehmungsgrad vom Kontrast dar.

### 3.1.2 Simulationsverfahren

Die Differenz des Wahrnehmungsgrades zweier Punkte wird als Wahrnehmungsdifferenz bezeichnet. Der Abstand von zwei Wahrnehmungsdifferenzen aus allen möglichen Triaden wird mit dem Rauchwert  $\varepsilon$  summiert. Diese Summe bildet dann die Entscheidungsvariable.

Je nach Vorzeichen der Entscheidungsvariable  $\Delta$ , wird die simulierte Antwort des MLDS Experiments der Versuchsperson G&S entweder mit 1 oder mit 0 angegeben.



(a)

Durchgang	Antwort
$Triad(S0, S1, S2)$	1
$Triad(S1, S2, S3)$	0
$Triad(S2, S3, S4)$	1
$Triad(S3, S4, S5)$	0
...	...

(b)

Abbildung 13(a): Die Wahrnehmungsgrade  $\psi_{S1}$ ,  $\psi_{S2}$  und  $\psi_{S3}$  von einem  $Triad(S1, S2, S3)$  aus dem normalisierten Matchingexperimentergebnis (Abbildung 12(b)). 13(b): Simulierte Ergebnistabelle der Versuchsperson des MLDS Experiment von der Versuchsperson G&S gemäß normalisierten Matchingexperimentergebnissen.

$Triad(S1, S2, S3)$  repräsentiert drei Stimuli desselben Kontrasts bei unterschiedlichen Ortsfrequenzen  $S1, S2, S3$  und erfüllt entweder  $S1 < S2 < S3$  oder  $S1 > S2 > S3$  ( $Triad(S1, S2, S3)$  und  $Triad(S3, S2, S1)$  werden als das dieselbe Triad betrachtet). Als Beispiel ist ein  $Triad(S1, S2, S3)$  in der Abbildung 13(a) gekennzeichnet.  $\psi_{S1}$ ,  $\psi_{S2}$ , und  $\psi_{S3}$  sind die jeweilige Wahrnehmungsgrade, die von Ortsfrequenzen  $S1, S2$  und  $S3$  abgebildet werden. Für alle nicht überlappenden Triaden wird das folgende Verfahren durchgeführt, mit dem Beispiel vom  $Triad(S1, S2, S3)$ : Der Unterschied der Kontrastwahrnehmung zwischen den Stimuli an  $S1$  und  $S2$  ist  $|\psi_{S2} - \psi_{S1}|$  und den Unterschied der Kontrastwahrnehmung zwischen den Stimuli an  $S2$  und  $S3$  ist  $|\psi_{S3} - \psi_{S2}|$  gemäß den normalisierten Ergebnissen vom Versuchsperson G&S berechnet. Schließlich wird dann den Abstand der zwei Wahrnehmungsunterschieden (Entscheidungsvariable) ermittelt:

$$\Delta = |\psi_{S3} - \psi_{S2}| - |\psi_{S2} - \psi_{S1}| + \varepsilon \text{ mit Rauschen } \varepsilon \sim N(0, \sigma^2).$$

Ich simulierte die Ergebnisse des MLDS Experiments nach der Größe der Entscheidungsvariable: Wenn  $\Delta \geq 0$  ist, entscheidet die Versuchsperson G&S für das  $Paar(S3, S2)$ , und es wird mit 1 gespeichert. Wenn  $\Delta < 0$ , entscheidet die Versuchsperson G&S für das  $Paar(S2, S1)$ , und es wird mit 0 gespeichert.

Die Ergebnisse aller Triaden werden in einer Tabelle gespeichert (Abbildung 13 (b)), um mit Hilfe des R-Package MLDS-Algorithmus (Knoblauch & Maloney, 2008) die Skala für Stimuli mit den im Matchingexperiment angegebenen Ortsfrequenzen (0,25, 0,5, 1, 2, 5, 10, 15, 20, 25 Zyklen/Grad) von Versuchsperson G&S einzuschätzen. Das gesamte oben beschriebene Simulationsverfahren wird für jede Kontrastbedingung 20-mal mit einem konstanten Rauschen  $\epsilon$  von 0,06 wiederholt. Das bedeutet, dass die Simulation so eingerichtet wird, dass die Versuchsperson G&S das MLDS Experiment 20-mal wiederholt durchführt.

### 3.1.3 Ergebnisse der Simulation

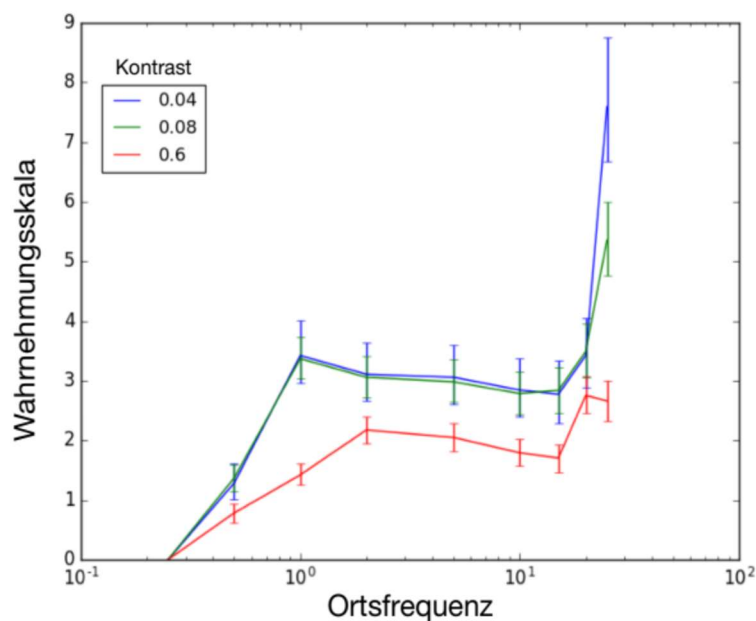


Abbildung 14: Die drei simulierten Wahrnehmungsskalen mit Fehlerbalken der Versuchsperson G&S mit den Stimuli an Ortsfrequenzen vom Matchingexperiment. Die x-Achse stellt die ansteigende logarithmische Ortsfrequenzen (von 0,25 bis 25 Zyklen/Grad) dar. Die y-Achse stellt die simulierte Wahrnehmungsskala dar. Die blaue Skala stellt die Stimuli mit niedrigstem physischem Kontrast von 0,04 dar, die grüne Skala stellt die Stimuli mit einem Kontrast von 0,08 und die rote Skala stellt Stimuli mit einem hohen Kontrast von 0,6 dar.

Abbildung 14 stellt die drei Wahrnehmungsskalen der simulierten Versuchsperson G&S basierend auf den Matchingexperimentergebnissen dar. Aus der Abbildung geht hervor, dass alle drei Skalen zunächst von niedrigen bis mittleren Ortsfrequenzen ansteigen, dann bei mittleren Ortsfrequenzen abflachen und schließlich von mittleren zu hohen Ortsfrequenzen wieder ansteigen.



Der Wertebereich der roten Skala mit einem hohen Kontrast von 0,6 reicht nur von 0 bis 3, was bedeutet, dass der wahrgenommene Kontrastunterschied zwischen Sinusgittern verschiedener Ortsfrequenzen sehr gering ist. Allerdings ist der Unterschied nicht völlig verschwunden. Meine Hypothese ist, dass das Phänomen des konstanten Kontrasts zu einer linearen Form dieser Wahrnehmungsskala führt, was allerdings nicht ganz mit dem Simulationsergebnis übereinstimmt.

Die grüne Skala mit einem Kontrast von 0,08 hat einen Wertebereich von 0 bis 6, und die blaue Skala mit dem niedrigsten Kontrast von 0,04 hat einen Wertebereich von 0 bis 8. Die grüne Skala mit einem Kontrast von 0,08 hat einen Wertebereich von 0 bis 6, und die blaue Skala mit dem niedrigsten Kontrast von 0,04 hat einen Wertebereich von 0 bis 8. Es ist zu beobachten, dass die beiden Skalen bei Ortsfrequenzen von 0,25 bis 20 Zyklen/Grad sehr ähnlich sind und dass die beiden Skalen bei Ortsfrequenzen von 20 und 25 Zyklen/Grad jeweils einen unterschiedlichen Grad an schnellem Wachstum aufweisen. Der Verlauf dieser beiden Skalen stimmt mit der Hypothesenskizze aus Abbildung 8(b) überein, die zeigt, dass die Versuchspersonen zwischen den wahrgenommenen Kontrastunterschieden bei jeweils zwei Stimulus-Paaren im Bereich niedriger oder hoher Ortsfrequenzen differenzieren können, während der Kontrast von Stimuli mittlerer Ortsfrequenzen nicht unterschieden werden kann.

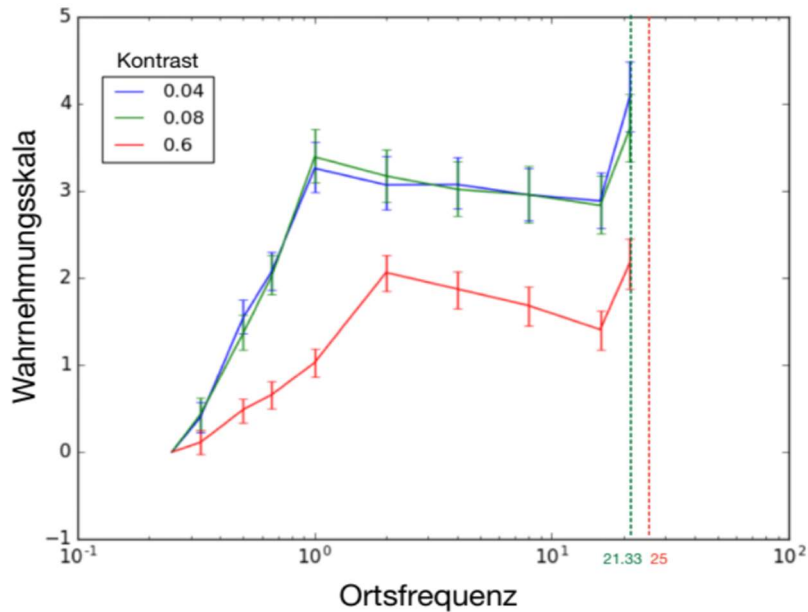


Abbildung 15: Die drei simulierten Wahrnehmungsskalen mit Fehlerbalken der Versuchsperson G&S mit den Stimuli vom MLDS Experiment, mit Hilfe der Interpolationsfunktion aus der Skala der Abbildung 14. Die x-Achse stellt die ansteigende logarithmische Ortsfrequenz (von 0,25 bis 21,33 Zyklen/Grad) dar. Die y-Achse stellt die simulierte Wahrnehmungsskala dar. Die blaue Skala stellt die Stimuli mit niedrigstem physischem Kontrast von 0,04 dar, die grüne Skala stellt die Stimuli mit einem Kontrast von 0,08 und die rote Skala stellt Stimuli mit einem hohen Kontrast von 0,6 dar. Die grün gestrichelte Linie zeigt die maximale Ortsfrequenz der aktuellen Skala und die rot gestrichelte Linie die maximale Ortsfrequenz der Skala in Abbildung 13.

Die Ortsfrequenzen der Stimuli wurden dann auf 0,25, 0,33, 0,5, 0,66, 1, 2, 4, 8, 16 und 21,33 Zyklen/Grad, entsprechend den Stimuli für das ML-DS Experiment, eingestellt. Die endgültigen Wahrnehmungsskalen der simulierten Versuchsperson G&S in dem MLDS-Experiment können nun durch Interpolation der vorherigen Wahrnehmungsskalen (Abbildung 14) ermittelt werden, welche in Abbildung 15 dargestellt sind. Erkennbar ist, dass die drei Skalen der Grundform von Abbildung 14 entsprechen, nur das maximale Wahrnehmungsgrad von zuvor 8 mit Ortsfrequenz 25 Zyklen/Grad wurde auf 5 mit Ortsfrequenz 21,33 Zyklen/Grad gesenkt. Die Wahrnehmungsskalen von Kontrast 0,04 und Kontrast 0,08 waren im Wesentlichen gleich, was mit der Hypothese des niedrigen Kontrasts weitgehend übereinstimmt. Es ist immer noch zu beobachten, dass die rote Skala des hohen Kontrasts von 0,6 zwar keine flache Funktion ist, aber ein sehr kleines Intervall von 0 bis 2 aufweist.

## 3.2 Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die experimentellen Ergebnisse für die Versuchspersonen ZWW und AG im MLDS-Experiment beschrieben.

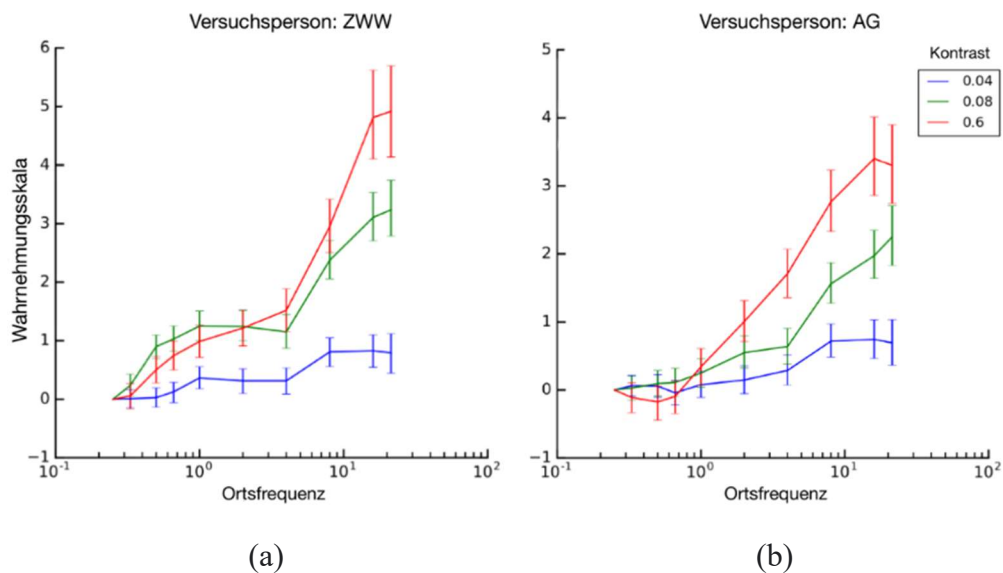


Abbildung 16(a): Skalen mit Fehlerbalken nach Ergebnissen des MLDS Experiments für Versuchsperson ZWW. 16(b): Skalen mit Fehlerbalken nach Ergebnissen des MLDS Experiments für Versuchsperson AG. Die blauen, grünen und roten Kurven entsprechen den Kontrastwahrnehmungsskalen der Versuchspersonen für Stimuli mit physikalischen Kontrasten von 0,04, 0,08 und 0,6. Die x-Achse beschreibt die logarithmische inkrementelle Ortsfrequenz und die y-Achse die inkrementelle Wahrnehmungsskala.

Die Abbildungen 16(a) und 16(b) zeigen die experimentellen Ergebnisse für zwei Versuchspersonen ZWW und AG separat. Der Vergleich von Abbildung 16(a) und Abbildung 16(b) zeigt, dass der Wahrnehmungsbereich und der Trend der Wahrnehmungsskalen für denselben Kontrast (dieselbe Farbe) nahe beieinander liegen. Die Skalen mit hohem Kontrast 0,6 (rot) haben den größten Wahrnehmungsbereich, mit einer steigenden Tendenz von niedrigen zu hohen Ortsfrequenzen. Die Skalen mit 0,08 Kontrast (grün) haben den zweitgrößten Wahrnehmungsbereich, wobei die Skalen mit zunehmender Ortsfrequenz ansteigen, außer im mittleren Ortsfrequenzbereich, wo sie flach verlaufen (unter Berücksichtigung von Fehlerbalken). Die Skalen mit niedrigem Kontrast 0,04 (blau) haben beide den kleinsten Wahrnehmungsbereich [0, 1]. Die Wachstumstendenz der Skalen ist sehr gering, so dass die Form der beiden Skalen annähernd flach ist (unter Berücksichtigung von Fehlerbalken).



## 4. Diskussion

Im vorherigen 3. Kapitel habe ich die Ergebnisse der simulierten Versuchsperson G&S und die Ergebnisse des MLDS Experiments von den Versuchspersonen ZWW und AG beschrieben. In diesem Kapitel werde ich zunächst die Ergebnisse des MLDS Experiments interpretieren und sie mit der Hypothese und den Simulationsergebnissen vergleichen. Anschließend werden weitere Kritik, offene Fragen und Fazit angeführt.

### 4.1 Interpretation der Ergebnisse

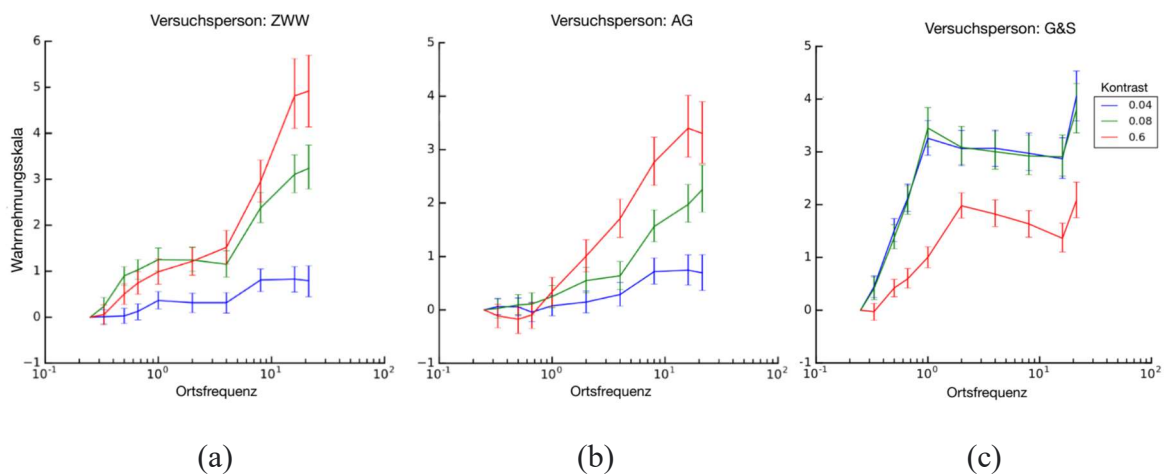


Abbildung 17(a), 17(b): Ergebnisse des MLDS Experiments aus Abbildung 16(a) und 16(b). 17(c): die Ergebnisse der Simulation aus Abbildung 15. Die x-Achse stellt die logarithmische inkrementelle Ortsfrequenzen dar und die y-Achse stellt die inkrementelle Wahrnehmungsskala vom Kontrast dar.

Im MLDS-Experiment mit hohem physikalischem Kontrast bei 0,6 nahmen die Wahrnehmungsskalen für beide Versuchspersonen (17(a) und 17(b) für die rote Ergebnisskala) von niedrigen zu hohen Ortsfrequenzen kontinuierlich zu. Die Skalen mit hohem Kontrast wiesen die größte Wertebereich von Wahrnehmungsunterschieden auf. Diese experimentellen Ergebnisse stimmen weitgehend mit der Gegenhypothese (Abbildung 8(a)) überein, mit der Ausnahme, dass die experimentellen Ergebnisse bei mittleren Ortsfrequenzen nicht so flach sind wie bei der Gegenhypothese (Abbildung 8(a)), was jedoch auf die großen Standardabweichungen zurückzuführen könnte, die sich aus der geringen Stichprobengröße ergeben, da nicht genügend experimentelle Wiederholungen durchgeführt wurden; beispielsweise weist die rote Skala in Abbildung 17(a) bei Ortsfrequenzen von 1 bis 4 c/d einen

Kontrastwahrnehmungsunterschied von weniger als 1 auf und bleibt innerhalb des Konfidenzbereichs, wenn diese Skala flach umgeformt wird.

Im Gegensatz zu den experimentellen Ergebnissen wiesen die simulierten Skalen vom G&S (rote Skalen in 17(c)) nur einen geringen Wertebereich an Wahrnehmungsunterschieden auf, was darauf hindeutet, dass die Versuchspersonen Stimuli unterschiedlicher Ortsfrequenzen bei hohen Kontrasten im Wesentlichen ununterscheidbar wahrnahmen. Ich schließe daraus, dass das Phänomen der Kontrastkonstanz im MLDS-Experiment nicht auftritt. Das Wahrnehmungsfeedback der Versuchspersonen zum MLDS-Experiment ergab ebenfalls, dass der Wahrnehmungskontrast signifikant schwächer war, wenn Stimuli mit höheren Ortsfrequenzen wahrgenommen wurden.

Die experimentellen MLDS-Skalen für beide Versuchspersonen mit dem Kontrast von 0,08 (grüne Skalen in 17(a) und 17(b)) nahmen im Bereich der niedrigen und hohen Ortsfrequenzen kontinuierlich zu aber flachten bei mittleren Ortsfrequenzen ab. Das Muster entspricht nahezu der Abbildung 8(b) aus der Hypothese. Dies spricht dafür, dass das visuelle System für Unterschiede in der Kontrastwahrnehmung bei Stimuli mit niedrigen oder hohen Ortsfrequenzen empfindlicher ist als bei Stimuli im mittleren Ortsfrequenzbereich. Die simulierte Wahrnehmungsskala mit 0,08-Kontrast von G&S (grüne Skala in 17(c)) ähnelt ebenfalls diesen experimentellen Skalen. Bei niedrigen Ortsfrequenzen (von 0 bis 1 Zyklus/Grad) nehmen sowohl die experimentellen Skalen als auch die simulierte Skala stetig zu. Dies bedeutet, dass der Unterschied in der Kontrastwahrnehmung zwischen zwei Stimuli mit niedriger Raumfrequenz zunimmt, wenn der Unterschied in der Raumfrequenz zwischen den beiden Stimuli zunimmt. Bei mittleren Ortsfrequenzen war die experimentelle Wahrnehmungsskala von 1 bis 4 Zyklen/Grad flach. Die simulierte Wahrnehmungsskala von 1 bis 16 Zyklen/Grad war ebenso flach. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass es keine Unterschiede in der Kontrastwahrnehmung zwischen den Stimuli der Versuchspersonen in diesem Ortsfrequenzbereich gab. Im hohen Ortsfrequenzbereich schließlich nahmen die Skalen sowohl im Experiment als auch in der Simulation weiter zu.

Die blau eingefärbten Wahrnehmungsskalen in den Abbildungen 17(a) und 17(b) mit niedrigem Kontrast von 0,04 zeigen, dass das Intervall der Wahrnehmungsskala nur  $[0, 1]$  beträgt. Beide Versuchspersonen gaben nach dem Experiment eine Rückmeldung zur Kontrastwahrnehmung, und alle Stimuli waren im Wesentlichen unsichtbar, also unterhalb der Kontrastschwelle. Dieses Ergebnis stimmt mit der Hypothese (Abbildung 8(a)) überein. Im Gegensatz dazu zeigte die Wahrnehmungsskala der simulierten Versuchsperson G&S beim niedrigsten Kontrast von 0,04 (blaue Skala von 16c) einen zunehmenden Trend vom niedrigen

oder hohen Ortsfrequenzintervall und einen flachen Trend im mittleren Ortsfrequenzintervall. Sie hat den größten Wertebereich von Wahrnehmungsunterschieden im Vergleich zu den anderen zwei simulierten Skalen, was bedeutet, dass die simulierte Versuchsperson G&S den größten Kontrastunterschied zwischen den Stimuli im MLDS Experiment wahrgenommen hätte. Ich behaupte, dass Georgeson und Sullivan als Experten mehr Erfahrung mit visuellen Kontrastwahrnehmungsexperimenten hatten und dass sie ihr visuelles System auf eine höhere Kontrastempfindlichkeit trainiert hatten, so dass sie in der Lage waren, den Kontrast für Stimuli mit einem geringen Kontrast von 0,04 bei verschiedenen Ortsfrequenzen wahrzunehmen.

Das Auffälligste an den Ergebnissen dieses MLDS-Experiments ist, dass das Kontrastkonstanzphänomen nicht auftritt. Ebenso fand Smith (2015) das Kontrastkonstanzphänomen bereits in seinem überschwelligem Matchingexperiment mit der 2-Alternative-Forced-Choice Methode nicht. In diesem Experiment glichen die Versuchspersonen die Kontrastwahrnehmungspaare von überschwelligem Sinusgittern für ähnliche, aber signifikant unterschiedliche Ortsfrequenzen zwischen 0,25 und 16 Zyklen/Grad ab. Diese Ergebnisse stimmen mit der Kontrastempfindlichkeitsfunktion an der Schwelle überein, wobei die Versuchspersonen für mittlere Ortsfrequenzen empfindlicher sind als für höhere oder niedrigere Ortsfrequenzen. Im Gegensatz zu meinem MLDS-Experiment verglichen die Versuchspersonen nicht die Kontrastunterschiede zwischen zwei Stimulus-Paaren, sondern verglichen direkt den Kontrast zweier Stimuli mit nahe beieinander liegenden Ortsfrequenzen und wählten den Stimulus mit dem höheren Kontrast, was zu einer Darstellung der überschwelligem Kontrastfunktion in Form der Ergebnisse des Experiments von Georgeson und Sullivan führte. Meine MLDS-Experimente hingegen ergaben eine geschätzte Skala für die Kontrastwahrnehmung.

## **4.2 Kritik**

Meine Analyse der Gründe für die fehlende Kontrastkonstanz im MLDS-Experiment lautet wie folgt: Erstens hatten Georgeson und Sullivan, wie bereits erwähnt, als Experten mehr Erfahrung mit Kontrastexperimenten, so dass ihr visuelles System auf eine höhere Kontrastempfindlichkeit trainiert war als das der MLDS-Versuchspersonen. Dies könnte zu ihrer höheren Kontrastwahrnehmung bei Stimulus-Paaren mit hohen Ortsfrequenzen geführt haben. Zweitens wurde die Studie von Georgeson und Sullivan im Jahr 1975 veröffentlicht, als die versuchstechnischen Bedingungen, z. B. die Geräte, noch nicht so fortschrittlich waren wie heute, was ebenfalls zu den Ergebnissen beigetragen haben könnte.

Das Design meines MLDS-Experiments ist ebenfalls zu kritisieren: Die Ortsfrequenzen der Stimuli unterschieden sich in jedem Durchgang des Experiments, aber das Entscheidungskriterium der Versuchspersonen war der wahrgenommene Kontrastunterschied, so dass eine falsche Wahrnehmung der Ortsfrequenzdimension der Stimuli statt der Kontrastdimension die endgültigen Ergebnisse beeinflussen haben könnte. Um diesen Effekt zu verringern, waren die Versuchspersonen Experten im korrekten Erkennen der Definition von Kontrast und verwechselten ihn während des Versuchs nicht mit der Ortsfrequenz. In dem von Georgeson und Sullivan untersuchten Matchingexperiment waren lediglich zwei der Autoren (Experten) auch Versuchspersonen, und die Stimuli wurden im Matchingexperiment auch mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen präsentiert. Um Aliasing zu vermeiden, waren die Ortsfrequenzen der Stimuli im MLDS-Experiment nicht identisch mit denen im Matchingexperiment. Die Rohdaten für das Matchingexperiment liegen nicht vor, so dass die Kontrastbedingungen für mein MLDS-Experiment zu Vergleichszwecken durch manuelles Ablesen ermittelt wurden, was zu Fehlerquoten geführt haben könnte. Kritisch anzumerken ist auch, dass jede Bedingung im MLDS-Experiment nur zehnmal wiederholt wurde, was zu einer unzureichenden Stichprobe geführt haben könnte.

All das könnten Faktoren gewesen sein, die dazu geführt haben, dass Kontrastkonstanz nicht im MLDS-Experiment auftaucht.

### **4.3 Offene Frage**

Um die Untersuchung dieses Themas weiterzuentwickeln oder zu verbessern, können folgende Strategien verfolgt werden: Der erste Punkt ist, auch naive Versuchspersonen in die MLDS-Experimente einzubeziehen, um die Ergebnisse besser verallgemeinern zu können. Der zweite Punkt ist, die Versuchspersonen das Experiment mehrmals als 10 wiederholen zu lassen, um das Rauschen der erzeugten Skalen zu reduzieren. Der dritte Punkt ist, innovativere Methoden zu verwenden, um Aliasing zu vermeiden, so dass die Ortsfrequenzen der MLDS-experimentellen Stimuli genau denen der Matchingexperimente entsprechen. Abschließend schlage ich vor, dass Experimente unter Verwendung der Skalierungsmethode Maximum Likelihood Conjunction Measure (MLCM) anstelle von MLDS konzipiert werden könnten, um das Phänomen der Kontrastkonstanz weiter zu untersuchen. Das Maximum Likelihood Conjoint Measure (MLCM) wurde von Knoblauch und Maloney (2012) als eine Erweiterung der MLDS-Methode entwickelt, die die Modellierung der Auswirkungen von mehr als einer Stimulusdimension ermöglicht (Aguilar & Maertens, 2020). Die Aufgabe der Versuchsperson



bestand darin, zu vergleichen, welcher der beiden Stimuli einen höheren Kontrast aufweist. Durch die Antworten werden die Wahrnehmungsskalen der Versuchsperson in den verschiedenen Dimensionen geschätzt. Die Verwendung dieser Methode zur Planung von Experimenten zur überschwelligen Kontrastempfindlichkeit verhindert daher, dass die Versuchspersonen ihre Wahrnehmung der Kontrastdimension durch Variablen in der Ortsfrequenzdimension in MLDS-Experimenten beeinflussen.

#### **4.4 Fazit**

Die experimentellen Ergebnisse stimmen mit meiner Gegenhypothese überein. Bei Stimuli mit hohem Kontrast nahmen die Versuchspersonen den Kontrast für Sinusgitter mit unterschiedlichen Ortsfrequenzen, aber gleichem physikalischem Kontrast unterschiedlich wahr. Die Skala zeigt, dass das visuelle System für überschwellige Kontrastwahrnehmung bei mittleren Ortsfrequenzen empfindlicher ist. Dieses Ergebnis stimmt in gewisser Weise mit der Vorhersage der Schwellenwerte für Kontrastempfindlichkeitsfunktionen überein. Das Phänomen der Kontrastkonstanz, das in dem von Georgeson und Sullivan 1975 entwickelten Matchingexperiment auftrat, trat in diesem MLDS-Experiment nicht auf.



## 5. Literaturverzeichnis

Aguilar, G., Wichmann, F. A., & Maertens, M. (2017). Comparing sensitivity estimates from MLDS and forced-choice methods in a slant-from-texture experiment. *Journal of Vision*, 17(1). <https://doi.org/10.1167/17.1.37>

Campbell, F. W. & Green, D. G. (1965). Optical and retinal factors affecting visual resolution. *J. Physiol.* 181, 576-593.

Campbell, F. W. & Robson, J. G. (1964). Application of Fourier analysis to the modulation response of the eye. *J. Opt. Soc. Am.* 54:581.

Cornsweet, T. (1970). *Visual Perception*. New York and London: Academic Press.

Daitch, J. M. & GREEN, D. G. (1969). Contrast sensitivity of the human peripheral retina. *Vision Res.* 9, 947-952.

Estévez, O. & Cavonius, C. R. (1975). Low-frequency attenuation in the detection of gratings: sorting out the artifacts. *Vision Res.* (in the Press).

Georgeson, M. A., & Sullivan, G. D. (1975). Contrast constancy: deblurring in human vision by spatial frequency channels. *The Journal of Physiology*, 252(3), 627–656. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1975.sp011162>

Hilz, R., & Cavonius, C. R. (1974). Functional organization of the peripheral retina: Sensitivity to periodic stimuli. *Vision Research*, 14(12), 1333–1337. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(74\)90006-6](https://doi.org/10.1016/0042-6989(74)90006-6)

Knoblauch, K., & Maloney, L. T. (2008). MLDS: Maximum Likelihood Difference Scaling in R. *Journal of Statistical Software*, 25(2), 1–26. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i02>

Maloney L. T., & Yang J. N. (2003). Maximum likelihood difference scaling. *Journal of Vision*, 3 (8): 5, 573–585, doi:10:1167/3.8.5.

Smith, W. S. (2015). Contrast constancy revisited: The perceived contrast of sinusoidal gratings above threshold. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(2), 363–380. <https://doi.org/10.1080/17470218.2014.944919>

Wooten, B. R., Renzi, L. M., Moore, R., & Hammond, B. R. (2010). *A practical method of measuring the human temporal contrast sensitivity function*. *Biomed. Opt. Express*, 2010, 1(1): 47—58. <https://doi.org/10.1364/BOE.1.000047>

# Liste der Abkürzungen

<b>MLDS</b>	Maximum Likelihood Difference Scaling
<b>MLCM</b>	Maximum Likelihood Conjoint Measurement
<b>G&amp;S</b>	Die simulierte Versuchsperson Georgeson und Sullivan (1975)

