

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Mensch-Maschine-Kommunikation
AG Technische Akustik

Zum Einfluss von Farben auf das Lautheitsurteil

Daniel Menzel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. A. W. Koch

Prüfer der Dissertation:

1. apl. Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. H. Fastl

2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Hemmert

Die Dissertation wurde am 08.11.2010 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am
21.03.2011 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	5
2.1. Verwendete Methoden zur Lautheitsbeurteilung	5
2.1.1. Freie Größenschätzung	5
2.1.2. Kategorienskalisierung	6
2.1.3. Methode nach dem Prinzip der Linienlänge	6
2.1.4. Einregeln	6
2.2. Farbmimetrik und Farbdarstellung	7
2.2.1. Verwendete farbmimetrische Konzepte	7
2.2.2. Darstellung der untersuchten Farben	8
2.3. Durchführung und Auswertung der Hörversuche	9
2.3.1. Versuchsumgebungen und Stimulusdarbietung	9
2.3.2. Anzahl und Eignung der Versuchspersonen	10
2.3.3. Darstellung der Ergebnisse	11
2.3.4. Berechnung der Verschiebung der Lautheitsurteile als globales Maß des Farbeinflusses	11
2.3.5. Statistische Auswertung	13
2.3.6. Gruppierung von Versuchspersonen	13
3. Einfluss farbmimetrischer Stimulusparameter	15
3.1. Berücksichtigung von Farbeinflüssen bei Messungen der Ruhehörschwelle .	15
3.2. Darbietung einfarbiger Flächen gleicher Leuchtdichte	16
3.2.1. Farbeinfluss auf die Lautheitsbeurteilung von Breitbandrauschen .	16
3.2.2. Farbeinfluss auf die Lautheitsbeurteilung von Sinustönen	19
3.3. Verwendung schreiender Farben	22
3.3.1. Schreiende und nicht schreiende Farben	22
3.3.2. Einfluss schreiender Farben auf das Lautheitsurteil	25
3.3.3. Berechnung des schreienden Farbeindrucks	27
3.4. Variation des Helligkeitskontrastes durch Darbietung visueller Objekte vor verschiedenen Hintergründen	28
3.4.1. Einfluss des Helligkeitskontrastes auf Reaktionszeitmessungen . . .	29
3.4.2. Einfluss des Helligkeitskontrastes auf Lautheitsbeurteilungen . . .	33
3.5. Diskussion	34

4. Einfluss der Darbietungsweise audio-visueller Stimuli	37
4.1. Verwendung bewegter Bilder	37
4.1.1. Lautheitsbeurteilung von Fahrzeugen bei Präsentation verschiedenfarbiger Standbilder	37
4.1.2. Lautheitsbeurteilung von Fahrzeugen bei Präsentation verschiedenfarbiger Bewegtbilder	40
4.1.3. Vergleich	43
4.2. Vergrößerung der optischen Darbietung	43
4.2.1. Präsentation von Bewegtbildern auf einem Bildschirm	44
4.2.2. Präsentation von Bewegtbildern auf einer Leinwand	45
4.2.3. Vergleich	47
4.3. Verwendung akustischer und optischer virtueller Realitäten in einer CAVE	47
4.3.1. Kombination optischer virtueller Realitäten mit diotischer Schalldarbietung	48
4.3.2. Kombination optischer virtueller Realitäten mit Schalldarbietung mittels Binauraler Raumsynthese	50
4.3.3. Diskussion	51
4.4. Lautheit natürlicher Stimuli mit unnatürlicher Farbgebung	51
4.5. Kognitive Effekte	54
4.6. Diskussion	55
5. Einfluss visueller und auditiver Präferenzen	57
5.1. Farbpräferenzen	57
5.1.1. Bestimmung individueller Farbpräferenzen	57
5.1.2. Korrelation von Lautheitsbeurteilungen mit individuellen Farbpräferenzen	59
5.1.3. Diskussion	61
5.2. Lautheitspräferenzen	62
5.2.1. Der Pegel von als angenehm laut empfundener Sprache bei verschiedenen Beleuchtungsstärken	62
5.2.2. Der Pegel von als angenehm laut empfundener Sprache und Musik bei Darbietung verschiedenfarbiger Objekte	66
5.3. Diskussion	69
6. Modellierung des Farbeinflusses auf die Beurteilung der Lautheit	71
6.1. Verwendete Referenzdaten	71
6.2. Nachzubildende farbspezifische Effekte	72
6.3. Aufbau des Modells	73
6.3.1. Funktionsweise	73
6.3.2. Vergleich mit Referenzdaten	75
6.4. Vergleich von Modellprognosen mit Ergebnissen früherer Hörversuche . .	78

7. Anwendungen und Modellverifikation	81
7.1. Lautheit von Druckern und Kopierern	81
7.1.1. Experimentelle Daten	81
7.1.2. Vergleich mit Modellprognosen	83
7.2. Lautheit von Küchenmixern	84
7.2.1. Experimentelle Daten	84
7.2.2. Vergleich mit Modellprognosen	86
8. Aspekte der Gruppenbildung	89
8.1. Einfluss des Geschlechts	89
8.2. Einfluss des Vorwissens	92
9. Hirnaktivierungsstudien	93
9.1. Schalldarbietung	93
9.2. Versuchsablauf	94
9.3. Ergebnisse	95
9.4. Diskussion	102
10. Zusammenfassung	105
A. Liste verwendeter Farben	109
B. Abkürzungen und Formelzeichen	111
Literaturverzeichnis	113

1. Einleitung

Die Lautheit stellt als Empfindungsgröße der Lautstärkewahrnehmung seit vielen Jahrzehnten einen zentralen Gegenstand psychoakustischer Forschung dar. Neben der Intensität konnten weitere für die Lautheit maßgebliche Eigenschaften des akustischen Reizes, etwa spektrale Zusammensetzung oder Dauer, identifiziert und in Modellen der Lautheit berücksichtigt werden (siehe z. B. Fastl und Zwicker 2007, DIN 45 631/A1 2010). In Anwendungsbereichen wie Lärmbekämpfung oder sound-quality engineering treten akustische Reize jedoch selten isoliert auf. Vielmehr werden sie gemeinsam mit anderen Sinnesindrücken, beispielsweise dem Aussehen oder der Haptik eines Produktes, wahrgenommen. Dadurch ergeben sich potentiell weitere, nicht-akustische Einflussfaktoren, die unter Umständen bei der experimentellen bzw. instrumentellen Bestimmung der Lautheit (oder anderer psychoakustischer Empfindungsgrößen) zu berücksichtigen sind (Marks 1978, Blauert und Jekosch 1997, Haverkamp 2009).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind vor allem jene Effekte von Bedeutung, die bei gleichzeitiger Wahrnehmung akustischer und optischer Reize auftreten. Hier zeigen verschiedene Studien, dass sich die Geräusch- und im Speziellen die Lautheitsbeurteilung in Abhängigkeit der visuellen Sinneswahrnehmung ändern kann (für eine Übersicht siehe Fastl 2004). Umweltgeräusche, etwa Vogelgezwitscher, werden auf der Skala „unpleasant/stressful“ – „pleasant/relaxing“ positiver beurteilt, wenn gleichzeitig das Bild eines Waldes zu sehen ist, und negativer, wenn das Bild eines Wohnblocks präsentiert wird (Viollon et al. 1998, Viollon und Lavandier 1999, Viollon et al. 2002). Daten von Pheasant et al. (2008, 2009) deuten ebenfalls darauf hin, dass sich optische Darstellungen von ländlichen und urbanen Szenarien auf die Beurteilung von für diese Umgebungen typischen Geräuschen auswirken können. Patsouras et al. (2003a) und Böhm et al. (2003) fanden, dass Lautheitsbeurteilungen von Zugvorbeifahrten sowohl durch schallfremde, stehende Bilder (Bäume, Straße, Wohngegend) als auch durch die Darbietung von Bewegungsbildern einer Zugvorbeifahrt gesenkt werden können. Weiterhin ließ sich die subjektive Qualität von Fahrzeuginnengeräuschen durch gleichzeitig präsentierte Bilder stehender Automobile in gewissen Grenzen positiv beeinflussen (Patsouras und Böhm 2002). Bei audio-visueller Darbietung verschiedener Fahrsituationen (z. B. Landstraße, Stadt, Autobahn) in einem Fahrsimulator wurde zudem die Lautheit gegenüber rein akustischer Darbietung unterschätzt (Patsouras et al. 2003b).

Durch Kombination von Bildern unterschiedlich eingefärbter Züge mit passenden Zugvorbeifahrtgeräuschen wurde von Patsouras et al. (2002) erstmals ein möglicher Einfluss der Farbe auf das Lautheitsurteil untersucht. Es zeigte sich, dass rote Züge bei gleichem Schalldruckpegel als lauter im Vergleich zu grünen Zügen beurteilt wurden. Eine Wiederholung des Experiments mit japanischen Probanden erbrachte vergleichbare Ergebnisse (Rader et al. 2004). Auch Versuchspersonen in den USA beurteilten die Zugvorbeifahrt als lauter, wenn gleichzeitig ein roter Zug zu sehen war (Fastl et al. 2010).

Die vorliegende Arbeit knüpft an diese Untersuchungen an mit dem Ziel, durch systematische psychoakustische Experimente den Farbeinfluss auf das Lautheitsurteil für Kombinationen aus verschiedenen akustischen und optischen Reizen quantitativ zu bestimmen sowie Parameter zu identifizieren, die die dabei auftretende Interaktion zwischen auditorischer und visueller Sinneswahrnehmung beeinflussen. Näher betrachtet werden hierbei Einflüsse, die auf Farbeigenschaften des optischen Stimulus zurückzuführen sind, Einflüsse der optischen Darbietungsweise, sowie Einflüsse individueller Farb- und Lautheitsvorlieben. Die so gewonnenen Erkenntnisse sollen im weiteren Verlauf in einem mathematischen Modell, das die Vorhersage typischer Farbeinflüsse auf die Lautheitsbeurteilung ermöglicht, implementiert und am Beispiel praktischer Anwendungen demonstriert werden. Mittels funktioneller Bildgebung werden anschließend Vorgänge im Gehirn während der Wahrnehmung audio-visueller Reize untersucht. Die Arbeit gliedert sich daher in die folgenden Kapitel:

Grundlagen

Das Kapitel stellt die verwendeten psychoakustischen und farbmtrischen Methoden vor. Typische experimentelle Aufbauten und Versuchsumgebungen werden definiert sowie die Vorgehensweise bei der Datenauswertung erläutert.

Einfluss farbmtrischer Stimulusparameter

In diesem Kapitel wird untersucht, welche messtechnisch erfassbaren Eigenschaften der dargebotenen Farben für eine Beeinflussung des Lautheitsurteils ausschlaggebend sind und ob schallabhängige Effekte zu berücksichtigen sind. Hierfür werden zunächst synthetische Stimuli wie abstrakte Farbflächen kombiniert mit Rauschen oder Sinustönen betrachtet und eine Vielzahl unterschiedlicher Farben, die einen großen Bereich an Helligkeiten, Buntheiten und Bunttönen (siehe Abschnitt 2.2) umfassen, mit einbezogen. Darauf basierend werden „schreiende Farben“ definiert und deren Wirkung auf Beurteilungen der Lautheit diskutiert. Zusätzlich wird die Sichtbarkeit optischer Stimuli anhand von Reaktionszeitmessungen quantifiziert und mit Lautheitsbewertungen korreliert.

Einfluss der Darbietungsweise audio-visueller Stimuli

Durch Verwendung bewegter Bilder, Vergrößerung der optischen Darstellung und Einsatz stereoskopischer Projektion wird untersucht, ob die Art der optischen Darbietungen verschiedenfarbiger Reize einen Einfluss auf audio-visuelle Interaktionen hat. Es werden dabei bedeutungsbehaftete technische und natürliche Stimuli eingesetzt. Abschließend werden die Auswirkungen unrealistisch eingefärbter Stimuli unter Berücksichtigung kognitiver Effekte diskutiert.

Einfluss visueller und auditiver Präferenzen

Zusätzlich zu den stimulusbezogenen Einflussfaktoren der vorigen Kapitel werden hier Effekte betrachtet, die mit individuellen Präferenzen zusammenhängen. Es wird den Fragen nachgegangen, ob besonders beliebte oder unbeliebte Farben mit besonders hohen oder auch niedrigen Lautheitsurteilen assoziiert sind und ob die individuell als angenehm empfundene Lautheit durch optische Reize beeinflusst werden kann.

Modellierung des Farbeinflusses auf die Beurteilung der Lautheit

Es wird ein Modell basierend auf gängigen Farbmaßzahlen vorgeschlagen, das typische experimentell beobachtete Farbeinflüsse auf Lautheitsurteile prognostiziert. Modellprognosen werden mit experimentellen Daten verglichen und Voraussetzungen für die praktische Einsetzbarkeit des Modells diskutiert.

Anwendungen und Modellverifikation

Das Zusammenwirken von optischem Produktdesign und Lautheitsbewertung wird beispielhaft anhand von Büro- und Haushaltsgeräten erläutert. Experimentell ermittelte Ergebnisse werden Modellberechnungen gegenübergestellt.

Aspekte der Gruppenbildung

Es wird im Rückblick auf die bisher vorgestellten experimentellen Daten die Zusammensetzung der beobachteten Probandengruppen hinsichtlich Geschlecht und Vorwissen erörtert.

Hirnaktivierungsstudien

Dieses Kapitel stellt Ergebnisse von Hirnaktivierungsstudien mittels funktioneller Magnetresonanztomographie vor, die Hinweise auf bei der Wahrnehmung audio-visueller Stimuli beteiligte Gebiete des Gehirns geben.

2. Grundlagen

2.1. Verwendete Methoden zur Lautheitsbeurteilung

Es existieren verschiedenste psychophysikalische Methoden, um die Empfindungsgröße „Lautheit“ quantitativ messbar zu machen. Im folgenden Abschnitt werden die in dieser Arbeit verwendeten Vorgehensweisen kurz dargestellt, wobei auf eventuelle Besonderheiten bei der Anwendung der Methoden eingegangen wird.

Bei allen vorgestellten Verfahren wurde von der Verwendung von Ankerschallen, die als akustische Referenz für die Beurteilung dienen, abgesehen. In Vorversuchen, in denen Versuchspersonen die Lautheit eines Testschalles bei Betrachtung einer Testfarbe an die Lautheit eines Ankerschalles bei Betrachtung einer Ankerfarbe angleichen sollten (siehe Menzel et al. 2008a,b), konnten keine Anzeichen auf Farbeinflüsse gefunden werden. Diese Ergebnisse standen im Widerspruch zu den in früheren Versuchen beobachteten deutlichen Farbeinflüssen auf Lautheitsurteile (Patsouras et al. 2002, Rader et al. 2004). Es lag daher die Vermutung nahe, dass durch die Darbietung eines akustischen Ankers die Aufmerksamkeit der Probanden zu stark auf die auditive Modalität gelenkt wurde, was wiederum für das Zustandekommen audio-visueller Interaktionen hinderlich sein könnte. Methoden mit direktem Urteil ohne von außen vorgegebenen akustischen Anker erschienen daher für die vorliegende Arbeit als geeigneter.

Es wurde darüber hinaus bei allen Versuchen darauf geachtet, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Gedächtniseffekten zu minimieren. Erinnert sich eine Versuchsperson, einen Schall schon einmal gehört zu haben, könnte sie das zuvor abgegebene Urteil aus dem Gedächtnis wiederholen, anstatt die aktuell wahrgenommene Lautheit zu beurteilen. Um die Erinnerung an vorangegangene Stimuli zu erschweren, wurden daher stets verschiedene Schalle, üblicherweise mehr als fünf (siehe Miller 1956), in pseudozufälliger Reihenfolge dargeboten.

2.1.1. Freie Größenschätzung

In den meisten Experimenten wurde die Methode der Freien Größenschätzung angewendet (siehe Stevens 1956, neuere Anwendungen z. B. bei Fastl und Zwicker 2007). Die Versuchspersonen haben hierbei die Aufgabe, empfundenen Lautheiten Zahlenwerte zuzuordnen, wobei die Zahlenverhältnisse den empfundenen Lautheitsverhältnissen entsprechen sollen. Die Zahlen dürfen beliebige positive Werte annehmen, es besteht keine Beschränkung. Da die Probanden ihre Zahlenskala individuell wählen, ist eine anschließende Normierung der Daten nötig (siehe Abschnitt 2.3.3). Die Abgabe der Urteile erfolgte in den meisten Fällen mündlich, sodass der Blick der Versuchspersonen auf den visuellen Stimulus gerichtet bleiben konnte. Auf abweichende Methoden der Urteilsabgabe wird an entsprechender Stelle hingewiesen.

2.1.2. Kategorienskalisierung

Die Kategorienskalisierung ist eine Methode, bei der die Versuchsperson ihre Lautheitsempfindung in eine von mehreren auf einer vorgegebenen Skala angeordneten Kategorien einordnet. Die Kategorien sind üblicherweise mit Adjektiven gekennzeichnet (siehe z. B. Hellbrück und Ellermeier 2004). In dieser Arbeit wurde eine Variante nach dem Prinzip der Kategorienunterteilung (Heller 1985) verwendet. Dabei waren fünf Adjektive („sehr leise“, „leise“, „mittellaut“, „laut“, „sehr laut“) gleichabständig neben einer vertikalen berührungsempfindlichen Skala auf einem elektronischen Skaliertablett angeordnet. Die Skala hatte eine interne, für die Versuchspersonen nicht sichtbare Feineinteilung von insgesamt 250 Einheiten und eine Länge von 27 cm. Eine Urteilsabgabe konnte entlang der gesamten Skala erfolgen.

2.1.3. Methode nach dem Prinzip der Linienlänge

Als weitere Methode zur Abgabe von Lautheitsurteilen wurde ein auf der Methode der Linienlänge (siehe z. B. Fastl et al. 1989) basierendes Verfahren verwendet, bei dem, ähnlich der Kategorienskalisierung, eine Skala fester Länge in Form einer Linie vorgegeben wird. Im Unterschied zur Kategorienskalisierung sind nur die beiden Enden der Linie mit Adjektiven markiert, eine anderweitige Unterteilung ist nicht vorhanden. In vorliegender Arbeit war die Linie auf einem separaten berührungsempfindlichen Bildschirm horizontal dargestellt. Die Linie hatte eine Länge von 24 cm und war an den Enden mit „extrem leise“ (links) bzw. „extrem laut“ (rechts) beschriftet. Versuchspersonen hatten die Aufgabe, einen Ort auf der Linie zu wählen, der, auf der gegebenen Strecke zwischen den gezeigten Extremwerten, ihrer Lautheitsempfindung entspricht. Der Bildschirm hatte entlang der Linie eine Auflösung von 800 Pixeln, weshalb von einer nahezu kontinuierlichen Urteils- erfassung ausgegangen werden kann. Ergebnisse dieser Methode werden als Position auf der Linie angegeben (Entfernung vom linken Ende).

2.1.4. Einregeln

Bei einem Einregelverfahren sollen Versuchspersonen einen Schall durch Veränderung eines Schallparameters bezüglich einer interessierenden Empfindungsgröße auf einen vorgegebenen Zielwert einstellen. In den für diese Arbeit durchgeführten Experimenten konnten Versuchspersonen dementsprechend den Pegel von Schallen selbst so lange verändern, bis die empfundene Lautheit der geregelten Schalle einer Referenzlautheit entsprach. Die Pegeländerungen wurden dabei in ± 0.2 dB-Schritten über das Scrollrad einer Computermouse vorgenommen, wobei der Testschall durch Drücken der linken oder rechten Maustaste jederzeit beliebig oft angehört werden konnte, um die Lautheit zu überprüfen. Da, wie eingangs erwähnt, die Verwendung akustischer Referenzstimuli bei der Messung audio-visueller Interaktionen problematisch sein könnte, wurde auf einen von außen vorgegebenen Referenzwert verzichtet. Stattdessen wurde als Referenzlautheit individuell die Lautheit definiert, die der jeweiligen Versuchsperson als am angenehmsten (Abschnitt 5.2) bzw. realistischsten (Abschnitt 7.2) erscheint. Der Proband hört so nur den zu regelnden Testschall, während die Ziellautheit durch Introspektion zugänglich ist. Ergebnis dieser Metho-

de ist der RMS-Pegel, auf den die Versuchspersonen den Schall eingeregelt haben, also der über die gesamte Schalldauer ermittelte Effektivpegel bei angenehmer bzw. realistischer Lautheit.

2.2. Farbmimetrik und Farbdarstellung

2.2.1. Verwendete farbmimetrische Konzepte

Die im Folgenden verwendeten Begriffe zur Darstellung farbmimetrischer Sachverhalte orientieren sich an DIN 5033-1 (2009) bzw. Hauske (2003).

Normfarbwerte (XYZ)

Die Beschreibung der in den Experimenten verwendeten Farben erfolgt unabhängig von der Darbietungsmethode mittels der messtechnisch bestimmten Normfarbwerte X, Y und Z (Annahme: 2°-Normalbeobachter, siehe DIN 5033-2 1992, Wyszecki und Stiles 1982). Die Normfarbwerte stellen Integrale über das mit genormten Gewichtsfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ multiplizierte Spektrum des Farbzeiges dar. $\bar{y}(\lambda)$ entspricht der spektralen Helligkeitsempfindlichkeit (mit einem Maximum bei grünen Farben), sodass der Wert von Y die Leuchtdichte eines Farbzeiges in cd/m^2 (siehe Hauske 2003) angibt. $\bar{x}(\lambda)$ bzw. $\bar{z}(\lambda)$ haben ihre Maxima bei Wellenlängen, die einen roten bzw. blauen Farbeindruck hervorrufen, X bzw. Z können also näherungsweise als Anhaltspunkte für den Rot- bzw. Blauanteil einer Farbe angesehen werden. Über die Normfarbwerte ist ein Farbzeig genau bestimmt und unter identischen Umgebungsbedingungen (Hintergrundbeleuchtung, benachbarte Farben, etc.) rufen zwei Farbzeige mit denselben Normfarbwerten auch die gleiche Farbeempfindung hervor (DIN 5033-1 2009). In Bezug auf die durchgeführten psychophysikalischen Experimente bedeutet dies, dass die präsentierten Farbzeige – bei gleichen Umgebungsbedingungen – durch ihre Normfarbwerte definiert sind. Aus den Normfarbwerten können weitere Farbmaßzahlen und Farbenräume abgeleitet werden:

Helligkeit (L^*)

Im Unterschied zu der aus der Psychoakustik bekannten Bedeutung der Abkürzung L^* (Pegel eines Dauerschalls, aus dem kürzere Schalle ausgeschnitten werden) wird in dieser Arbeit, aus Gründen der Kompatibilität zu vorhandener farbmimetrischer Literatur, L^* als Symbol für die subjektiv empfundene Helligkeit (engl. *lightness*) einer Farbe verwendet (DIN 5033-1 2009). L^* folgt im Wesentlichen einer Potenzfunktion der normierten Leuchtdichte (Y/Y_n) mit dem Exponenten $1/3$, wobei die Normierung praktisch so vorgenommen wird, dass L^* Werte zwischen 0 und 100 annimmt. Eine Helligkeit von 100 bedeutet also, dass die maximal in der betrachteten Situation mögliche Leuchtdichte vorliegt.

CIELAB-Farbenraum

Der „CIE 1976 ($L^*a^*b^*$)“-Farbenraum (kurz CIELAB, siehe Wyszecki und Stiles 1982) hat zum Ziel, eine zahlenmäßige Beschreibung von Farbeempfindungen zu ermöglichen, die gleichen subjektiv empfundenen Farbunterschieden auch gleiche euklidische Abstände zweier Punkte im CIELAB-Farbenraum zuordnet (siehe DIN 6174 2007, auch DIN 5033-3 1992). Der CIELAB-Farbenraum beinhaltet außer der Helligkeit L^* die Farbmaßzahlen a^*

und b^* . a^* stellt dabei eine Grün-Rot Achse und b^* eine Blau-Gelb Achse dar, die zusammen mit L^* ein rechtwinkliges Koordinatensystem ($L^*a^*b^*$) bilden (siehe Abbildung 2.1). Für ($a^*=0$, $b^*=0$) ergeben sich die sogenannten unbunten Farben, die, abhängig von L^* , als verschieden helles neutrales Grau wahrgenommen werden. Die Umrechnung zwischen XYZ und CIELAB wird nach DIN 6174 (2007) vorgenommen.

Buntheit (C_{ab}^*)

Die Buntheit (engl. *chroma*) einer Farbe gibt die Entfernung dieser Farbe von der als gleich hell empfundenen unbunten Farbe an (DIN 5033-1 2009), also die Unterschiedlichkeit einer Farbe von einem als gleich hell empfundenen Grau. Wird die Buntheit aus CIELAB-Werten berechnet, wird sie mit C_{ab}^* abgekürzt und entspricht der Länge eines Vektors (a^*b^*) bei gegebenem L^* (siehe Abbildung 2.1 und DIN 6174 2007).

Bunton, Buntonwinkel (h_{ab})

Der Bunton (engl. *hue*) beschreibt die Art der Buntheit einer Farbe und wird umgangssprachlich als Farbton bezeichnet (DIN 5033-1 2009). Er kann als Buntonwinkel h_{ab} aus CIELAB-Werten berechnet werden und entspricht dem Winkel zwischen der a^* -Achse und einem Vektor (a^*b^*) bei gegebenem L^* (siehe Abbildung 2.1 und DIN 6174 2007).

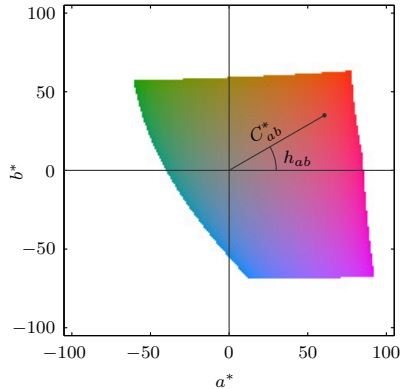


Abbildung 2.1.: Schnitt durch den CIELAB-Farbenraum bei einer Helligkeit $L^*=55$. Als Beispiel sind hier die bei dieser Helligkeit auf einem typischen LCD Bildschirm in abgedunkelter Umgebung darstellbaren Farben gezeigt. Die Interpretation der Buntheit C_{ab}^* und des Buntonwinkels h_{ab} als Polarkoordinaten eines Punktes in der (a^*b^*)-Ebene ist zusätzlich eingezeichnet

2.2.2. Darstellung der untersuchten Farben

Um sich bei der Farbdefinition und -darstellung nicht allein auf oft ungenaue oder subjektiv geprägte Farbnamen („Hellrot“, „Dunkelgrün“, „mittleres Grau“ etc.) zu verlassen,

werden die in dieser Arbeit untersuchten Farben fortlaufend nummeriert und im Text sowie in Abbildungen mit c_1 , c_2 , c_3 usw. gekennzeichnet. Eine entsprechende tabellarische Auflistung aller verwendeten Farben befindet sich in Anhang A. Dort ist neben der jeweiligen Farbnummer c_i die zugehörige Farbdefinition in Form der Normfarbwerte XYZ_i angegeben. Aus Gründen der Anschaulichkeit sind zudem Farbbeispiele und Farbbeschreibungen gezeigt. Die Farbbeispiele sollen dem Leser einen (in Abhängigkeit des beim Lesen verwendeten Darstellungsmediums) mehr oder weniger genauen Eindruck der während der Experimente dargebotenen Farbreize vermitteln, während die Farbbeschreibungen eine grobe Vorstellung der intendierten Farbwirkung geben sollen.

Die Farbbeispiele aus Anhang A werden, ebenfalls zur Erhöhung der Anschaulichkeit, in grafischen Darstellungen von Versuchsergebnissen zusätzlich zu den Farbnummern c_i verwendet. Auch hier ist zu beachten, dass die Farbbeispiele nur einen Anhaltspunkt für die tatsächlich bei der Durchführung der Experimente aufgetretenen Farbreize darstellen können.

2.3. Durchführung und Auswertung der Hörversuche

In den durchgeführten Experimenten wurden Versuchspersonen akustische und/oder optische Stimuli dargeboten, die diese dann hinsichtlich der Lautheit oder anderer interessierender Parameter beurteilen sollten. Im Vorfeld der Versuche erfolgte dazu eine schriftliche Instruktion der Probanden. Die Stimuli wurden in einer pseudozufälligen Reihenfolge mehrfach präsentiert. Die Anzahl der Wiederholungen lag abhängig vom Versuch zwischen zwei und vier. Unter der Annahme, dass eine wiederholte Beurteilung desselben physikalischen Reizes zu ähnlichen Antworten führen sollte, können durch Betrachtung der intraindividuellen Streuungen Versuchspersonen mit zu stark schwankenden Urteilen erkannt werden (siehe Abschnitt 2.3.2). Für alle weiterführenden Auswertungen werden die wiederholt bei gleichem Stimulus abgegebenen Antworten jedoch durch Medianbildung zusammengefasst, so dass man pro Versuchsperson und Stimulus ein einziges Urteil erhält.

2.3.1. Versuchsumgebungen und Stimulusdarbietung

Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht über alle verwendeten Versuchsumgebungen. Mit Versuchsumgebung ist hierbei sowohl der Raum gemeint, in dem der Versuch stattgefunden hat, als auch die eingesetzten Methoden zur Darbietung der akustischen und/oder optischen Reize. Zusätzlich ist angegeben, ob der Versuchsraum verdunkelt war. Wenn ja, war der präsentierte optische Stimulus die einzige sichtbare Lichtquelle im Raum, zusätzlich waren alle sichtbaren Oberflächen (z. B. die Innenwände von Hörkabinen) mit schwarzem Stoff ausgekleidet.

Soweit möglich fanden die Versuche in verdunkelten, schallisolierten Hörkabinen statt, um eine kontrollierte und ungestörte Präsentation der Stimuli zu ermöglichen. Die Schalldarbietung erfolgte diotisch über elektrodynamische Kopfhörer (Beyerdynamic DT48A) mit Freifeldentzerrung nach Fastl und Zwicker (2007, S. 7). Die bei der Beschreibung akustischer Stimuli verwendeten Pegelangaben sind daher als freifeldäquivalente Schalldruck-

Tabelle 2.1.: Übersicht über die in dieser Arbeit verwendeten Versuchsumgebungen

	Raum	akustische Darbietungsweise	optische Darbietungsweise	Verdunkelung
1a	Hörkabine	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	kalibrierter LCD Bildschirm	ja
1b	Hörkabine	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	unkalibrierter CRT Bildschirm	nein
1c	Hörkabine	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	verschiedenfarbige Oberflächen	nein
2	Laborraum	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	kalibrierter Videoprojektor, Leinwand	ja
3a	CAVE *	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	stereoskopisch, unkalibrierte Videoprojektion	nein
3b	CAVE	dynamische binaurale Raumsynthese	stereoskopisch, unkalibrierte Videoprojektion	nein
4a	Hörkabine	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	komplette Verdunkelung	-
4b	Hörkabine	diotisch, freifeldentz. Kopfhörer	Beleuchtung der Kabine mittels Glühlampe	-

* CAVE Automatic Virtual Environment, siehe Abschnitt 4.3

pegel zu verstehen. Alle Schalle wurden zur Vermeidung von Knacken mit gaußförmigen Flanken mit 5 ms Anstiegs- bzw. Abfallzeit versehen.

Die Präsentation optischer Stimuli wurde größtenteils über einen kalibrierten 21 Zoll LCD Bildschirm (Eizo CG211, Farbtemperatur 6500 K, Maximalleuchtdichte 100 cd/m², $\gamma = 2.2$) realisiert, um zu gewährleisten, dass die Farbreize für alle Versuchspersonen identisch waren. Der Betrachtungsabstand betrug 70 cm. Relevante Details alternativer Versuchsumgebungen werden an entsprechender Stelle im Verlauf der Arbeit angegeben.

2.3.2. Anzahl und Eignung der Versuchspersonen

An den in dieser Arbeit geschilderten Experimenten nahmen jeweils mindestens elf Versuchspersonen teil. Mit Hilfe eines Békésy-Audiometers (siehe Seeber et al. 2003) wurde sichergestellt, dass die Ruhehörsschwellen (RHS) der Probanden an keiner Stelle um mehr als 20 dB über der Bezugsruhörsschwelle nach Terhardt (1979) liegen und die Versuchspersonen somit als normalhörend gelten können. Auch waren keine Anzeichen auf Farbsehschwächen bekannt, was durch einen Farbsehtest nach Ishihara (1990), der bei der Mehrzahl der Versuchsteilnehmer durchgeführt wurde, bestätigt werden konnte.

Versuchspersonen, die große intraindividuelle Streuungen aufweisen, könnten die Gesamtergebnisse verfälschen und müssen daher von der Datenauswertung ausgeschlossen werden. Die Antworten aller Teilnehmer eines Versuchs werden dazu zunächst intraindividuell auf den Median der jeweiligen Stimuluskombination bezogen, sodass als einzige Varianzquelle die wiederholten Urteile bei gleichem physikalischem Stimulus bleiben. Der Unterschied zwischen 90% und 10% Perzentil der Gesamtheit der so vorverarbeiteten Daten bildet das Kriterium, mit dem die intraindividuellen Streuungen verglichen

werden. Versuchspersonen, die für mehr als 50 % der untersuchten Stimuli einen Interquartilbereich aufweisen, der größer ist als das beschriebene Kriterium, sind demnach nicht in den Gesamtauswertungen berücksichtigt. Über alle Experimente gemittelt liegen die in dieser Arbeit beobachteten intraindividuellen Interquartilbereiche bei 12.4 % für Größenschätzung, 2.7 cm (11.3 % der Gesamtlinielänge) für Methoden der Linielänge, 28.5 Skaliertabletteinheiten (11.4 % der Skalenlänge) für Kategorienskalisierung und 2.5 dB für Einregelmethode. Ebenfalls wurden die Daten von jenen Probanden verworfen, die die per Versuchsanleitung von ihnen geforderte Aufgabe offensichtlich nicht erfüllten, also z. B. die Tonhöhe statt der Lautheit beurteilten. Nach Anwendung aller genannten Kriterien standen pro Experiment Daten von 10 bis 26 Probanden für eine Auswertung zur Verfügung.

Nähere Informationen zur Zusammensetzung der Probandengruppen hinsichtlich Geschlecht und Vorwissen finden sich in Kapitel 8.

2.3.3. Darstellung der Ergebnisse

Für die grafische Darstellung und zur Interpretation der Hörversuchsergebnisse werden die Mediane und Interquartilbereiche der eingangs erwähnten intraindividuellen Mediane verwendet. Da die Interquartilbereiche somit als Maß für die interindividuelle Streuung dienen, kann mit ihrer Hilfe festgestellt werden, wie „einig“ sich die Versuchspersonen hinsichtlich der beurteilten Empfindungsgröße sind und ob eine Interpretation des interindividuellen Medians als repräsentatives Urteil einer „mittleren Versuchsperson“ gerechtfertigt ist (siehe auch Zwicker und Feldtkeller 1967).

Da mittels Freier Größenschätzung erhobene Lautheitsurteile keine einheitliche Skala aufweisen, werden sie für die Darstellung und weitere Auswertung zunächst intraindividuell normiert. Hierfür wird pro Experiment der Median aller Antworten einer Versuchsperson bei Darbietung eines bestimmten Schalls zu 100 % gesetzt und alle Datenpunkte dieser Person auf diesen Wert bezogen. Der für diese Normierung verwendete Schall wird bei jedem Experiment so gewählt, dass er bezüglich aller beobachteten Lautheitsurteile eine mittlere Position einnimmt.

2.3.4. Berechnung der Verschiebung der Lautheitsurteile als globales Maß des Farbeinflusses

Um eventuell vorhandene Farbeinflüsse auf die von den Versuchsteilnehmern abgegebenen Lautheitsurteile von anderen Einflussfaktoren, etwa dem Pegel der dargebotenen Schalle, zu trennen und gegebenenfalls zu quantifizieren, wird im Folgenden eine Methode zur Berechnung der *Verschiebung der Lautheitsurteile* definiert (Abbildung 2.2). Die vorgestellte Methode wird individuell auf die nicht normierten Datenpunkte einer Versuchsperson angewendet, eine interindividuelle Darstellung bzw. Auswertung erfolgt erst im Anschluss über alle auf diese Weise vorverarbeiteten Daten.

Ausgehend von den absoluten Urteilen des Probanden wird in einem ersten Schritt pro Schallstimulus der Median über alle Urteile (also auch über alle Farben) bei diesem Schall gebildet (horizontale Linien in Abbildung 2.2 a). Dieses Vorgehen wurde gewählt,

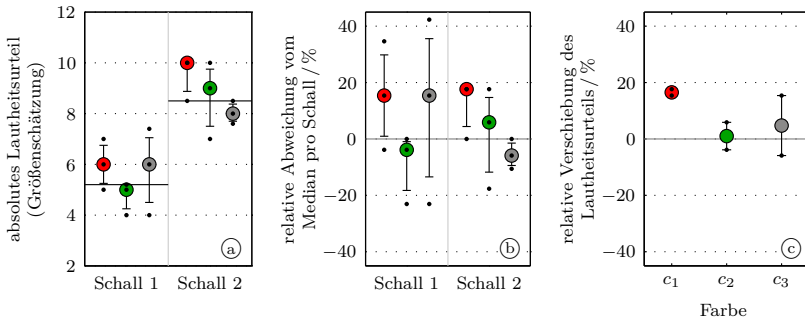


Abbildung 2.2.: Vorgehen zur Bestimmung der relativen Verschiebung der Lautheitsurteile eines einzelnen Probanden. Teilbild (a) zeigt beispielhaft absolute Lautheitsurteile des Probanden (schwarze Punkte), daraus resultierende intraindividuelle Mediane (farbige Kreise) und Interquartilbereiche sowie die über alle Urteile pro Schall gebildeten Mediane (horizontale Linien). Die pro Schall auf den jeweiligen Median bezogenen Urteile sind in (b) dargestellt. Werden anschließend die relativen Abweichungen einer Farbe über alle Schalle gemittelt, ergeben sich die in (c) gezeigten Verschiebungen der Lautheitsurteile.

da die so berechneten schallbezogenen Mediane als gute Näherung für die mittleren Lautheitsurteile gelten können, die man erhalten hätte, wenn das Experiment ohne Berücksichtigung optischer Stimuli durchgeführt worden wäre. Alle Urteile der Versuchsperson werden dann, wiederum getrennt für jeden Schall, auf die so berechneten Mediane bezogen. Je nach Versuchsmethode wird dazu pro Schall der Median subtrahiert (z. B. bei Einregelmethode oder Kategorienskalierung) oder aber die Urteile werden pro Schall durch den entsprechenden Median dividiert (z. B. bei Größenschätzung). Im Fall einer Division wird anschließend 1 subtrahiert und mit 100 multipliziert, um eine relative Abweichung in Prozent zu erhalten (Abbildung 2.2b). Das auf diese Weise berechnete Zwischenergebnis gibt somit, getrennt für alle untersuchten Schalle, an, wie stark die Lautheitsurteile des betrachteten Probanden bei einem einzelnen Schall in Abhängigkeit der präsentierten Farbe vom Median aller Urteile bei diesem Schall (also dem „farbunabhängigen“ Urteil) abweichen. Farbeinflüsse sowie eventuelle Schallabhängigkeiten dieser Einflüsse treten so deutlich hervor.

Unter Berücksichtigung möglicher Schallabhängigkeiten kann nun noch durch Bildung des intraindividuellen Medians pro Farbe über alle bei dieser Farbe beobachteten Verschiebungen eine globale Größe berechnet werden, die den individuellen Farbeinfluss schallunabhängig als eine Verschiebung der abgegebenen Lautheitsurteile quantifiziert (Abbildung 2.2c). Sind die Lautheitsurteile aller Versuchsteilnehmer auf diese Weise in Verschiebungen der individuellen Lautheitsurteile umgerechnet worden, kann eine grafische Darstellung wie oben beschrieben mittels interindividueller Mediane und Interquartilbereiche der individuellen Verschiebungen erfolgen.

2.3.5. Statistische Auswertung

Für alle durchgeführten Experimente wurden ein- bzw. mehrfaktorielle Varianzanalysen mit kompletter Messwiederholung nach Bortz (1993) berechnet, um Hinweise auf statistisch signifikante Effekte zu erhalten. Die Ergebnisse dieser Analysen sind am unteren Rand der jeweiligen Abbildung dargestellt (siehe z.B. Abbildung 3.2 links), wobei für jeden untersuchten Faktor (z.B. Pegel, Frequenz, Farbe etc.) sowie für mögliche Faktorinteraktionen (durch $\times$ gekennzeichnet) die beobachteten F- und p-Werte angegeben sind. Das Signifikanzniveau wird auf 5 % festgelegt.

Mittels Einzelvergleichen (Scheffé-Methode nach Bortz 1993) wurden zusätzlich die Unterschiede zwischen der Verschiebung der Lautheitsurteile bei Betrachtung verschiedener Farben auf Signifikanz untersucht. Auf dem 5%-Niveau signifikante Unterschiede sind durch * kenntlich gemacht, hochsignifikante Unterschiede (1%-Niveau) durch ** (siehe z.B. Abbildung 3.3).

2.3.6. Gruppierung von Versuchspersonen

Die Identifizierung einer „mittleren Versuchsperson“ anhand der Ergebnisse eines Experiments kann durch Gruppenbildung innerhalb der Versuchsteilnehmer erschwert werden. Sollten sich Versuchspersonen anhand charakteristischer Gemeinsamkeiten ihrer Versuchsergebnisse in zwei oder mehr Gruppen unterteilen lassen, könnte dies als Hinweis gewertet werden, dass es mehr als eine „typische Versuchsperson“ gibt und dass eine differenziertere Auswertung der Daten von Vorteil ist.

Um Anhaltspunkte auf mögliche Gruppenbildungen in den Versuchsergebnissen zu finden, wird, auf Basis der individuellen farbabhängigen Verschiebung der Lautheitsurteile, eine hierarchische Clusteranalyse nach dem Ward-Verfahren durchgeführt (siehe Bortz 1993). Dieses Verfahren fasst die Versuchspersonen schrittweise so zu Gruppen zusammen, dass die quadrierten euklidischen Distanzen zwischen den mittleren Ergebnissen der zu fusionierenden Gruppen minimiert werden. Sollten sich auf diese Weise deutliche Gruppierungen zeigen, so werden die Ergebnisse der Gruppen sowie die Anzahl der Versuchspersonen n in der jeweiligen Gruppe einzeln aufgeführt. Bei Gruppen aus nur zwei Probanden entfällt die zuvor beschriebene Varianzanalyse aus Mangel an Daten.

Eine genauere Betrachtung der Zusammensetzung gefundener Probandengruppierungen hinsichtlich Geschlecht und Vorwissen erfolgt in Kapitel 8.

3. Einfluss farbmetrischer Stimulusparameter

In diesem Kapitel werden Untersuchungen vorgestellt, die die Beschreibung des Einflusses messtechnisch erfassbarer Farbeigenschaften auf die Lautheitsbeurteilung zum Ziel haben. Von besonderem Interesse ist hierbei, motiviert durch die Arbeiten von Patsouras et al. (2002), Rader et al. (2004), Fastl et al. (2008) und Fastl et al. (2010), die Fragestellung, ob es bestimmte, beispielsweise durch ihren Buntton (rot, grün, etc.) oder andere Farbmaßzahlen charakterisierte Farben gibt, die, im Vergleich zu anderen Farben, als besonders laut bzw. leise beurteilt werden.

Zunächst wird geprüft, ob Farben den Verlauf der Ruhehörschwelle beeinflussen können. Anschließend werden audio-visuelle Interaktionen bei Verwendung synthetischer Stimuli unter Berücksichtigung von Pegel- bzw. Frequenzabhängigkeiten untersucht. Es wird die Größe des schreienden Farbeindrucks vorgestellt und eine Berechnungsvorschrift auf Basis der Bunttheit, der Helligkeit und des Bunttons beschrieben. Abschließend wird die Sichtbarkeit audio-visueller Objekte als ein möglicher weiterer Einflussfaktor diskutiert.

3.1. Berücksichtigung von Farbeinflüssen bei Messungen der Ruhehörschwelle

Untersuchungen z. B. von Özbaydar (1961) sowie Bothe und Marks (1970) deuten darauf hin, dass ein Einfluss der Beleuchtung auf die Ruhehörschwelle (RHS) bestehen könnte. Es wurden unter anderem Verringerungen der Ruhehörschwelle bei Messung in beleuchteter Umgebung im Vergleich zu Messung in Dunkelheit festgestellt. Es ist daher nicht auszuschließen, dass sich die Ruhehörschwelle auch von während der Messung dargebotenen Farben beeinflussen lässt, was wiederum einen Beitrag zu Änderungen in der Lautheitswahrnehmung liefern könnte. Um diese Möglichkeit zu prüfen wurden Messungen der Ruhehörschwelle von Probanden durchgeführt, während sie verschiedene Farbflächen betrachteten (siehe auch Menzel et al. 2008a).

In einer nicht verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1c, siehe Tabelle 2.1) wurden mittels eines Békésy-Audiometers (Seeber et al. 2003) diotisch Ruhehörschwellen von 0.2 Bark bis 24 Bark mit einer Schrittweite von 0.05 Bark gemessen. Die optische Stimulation erfolgte über farbige, an der Wand der Hörkabine befestigte Papierflächen (68 cm × 50 cm), die über eine Glühlampe (Farbtemperatur ca. 2700K, Beleuchtungsstärke ca. 50 lx in Blickrichtung) beleuchtet wurden. Es wurden zwei solche Papierflächen verwendet, die nach Beleuchtung die Farben c_{41} („Rot“) und c_{42} („Lindgrün“) erzeugten. Durch den geringen Betrachtungsabstand von ca. 50 cm füllten die Farbflächen einen großen Teil des Gesichtsfelds aus.

Abbildung 3.1 zeigt den über der Tonheit aufgetragenen Verlauf des Medians der intraindividuell berechneten Differenz zwischen der bei Betrachtung von c_{41} („Rot“) und c_{42} („Lindgrün“) ermittelten Ruhehörschwellen $L_{RHS, c_{41}}$ bzw. $L_{RHS, c_{42}}$ in dB. Die mitt-

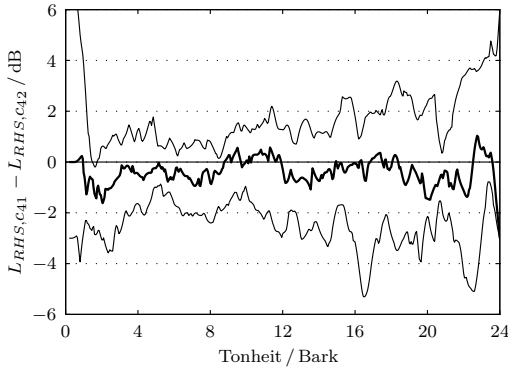


Abbildung 3.1.: Differenz der Ruheshörschwellen L_{RHS,c_i} bei Betrachtung von Flächen mit den Farben c_{41} („Rot“) bzw. c_{42} („Lindgrün“). Die mittlere Kurve zeigt den Median, die untere bzw. obere Kurve den Verlauf des 25 % bzw. 75 % Perzentils.

lere Differenz zeigt dabei tonheitsunabhängig nur geringe Abweichungen in der Größenordnung von ± 2 dB. Bei keinem Probanden trat eine systematische Verschiebung der Hörschwelle bei einer der Farben auf. Für die folgenden Betrachtungen wird daher davon ausgegangen, dass Farbeinflüsse auf die Ruheshörschwelle, sofern vorhanden, eine untergeordnete Rolle spielen.

3.2. Darbietung einfarbiger Flächen gleicher Leuchtdichte

Um audio-visuelle Interaktionen unter möglichst kontrollierten Bedingungen untersuchen zu können bietet es sich an, zunächst synthetische akustische und optische Stimuli zu verwenden. In diesem Abschnitt werden daher Einflüsse von Farbflächen gleicher Leuchtdichte auf die Lautheitsbeurteilung von breitbandigem Rauschen sowie Sinustönen betrachtet. Als Breitbandrauschen wurde Gleichmäßig Anregendes Rauschen (GAR) nach Fastl und Zwicker (2007) gewählt, da so dem Gehör alle wahrnehmbaren Frequenzen mit dem gleichen perceptiven Gewicht zur Verfügung stehen und eventuelle Frequenzabhängigkeiten audio-visueller Interaktionen minimiert werden. Anhand dieses Schalls können so Pegelabhängigkeiten untersucht werden. Durch weitere Experimente mit Sinustönen werden Effekte der Frequenz zusätzlich getrennt betrachtet.

3.2.1. Farbeinfluss auf die Lautheitsbeurteilung von Breitbandrauschen

Um zu untersuchen, ob bzw. in welchem Ausmaß audio-visuelle Interaktionen auch bei synthetischen Stimuli auftreten, wurde ein Versuch mit den Farben c_1 („Hellrot“) und c_2 („Grün“) in einer verdunkelten Hörkabine durchgeführt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1). Die Farben wurden so gewählt, dass sie eine Leuchtdichte von 23 cd/m^2

aufwiesen. Sie wurden als Vollfläche auf dem gesamten Bildschirm präsentiert. Als akustischer Stimulus diente Gleichmäßig Anregendes Rauschen mit Pegeln zwischen 40 und 80 dB und einer Dauer von 2.5 s. Die Lautheitsbeurteilung erfolgte per Kategorienskaliierung über das in Abschnitt 2.1.2 beschriebene elektronische Skaliertablett.

Wie aus der oberen Hälfte von Abbildung 3.2 ersichtlich ist, ergibt sich für praktisch alle Pegel bei Betrachtung von c_1 („Hellrot“) ein größeres Urteil im Vergleich zu c_2 („Grün“). Die Berechnung der Verschiebung der Lautheitsurteile zeigt, dass eine signifikante An-

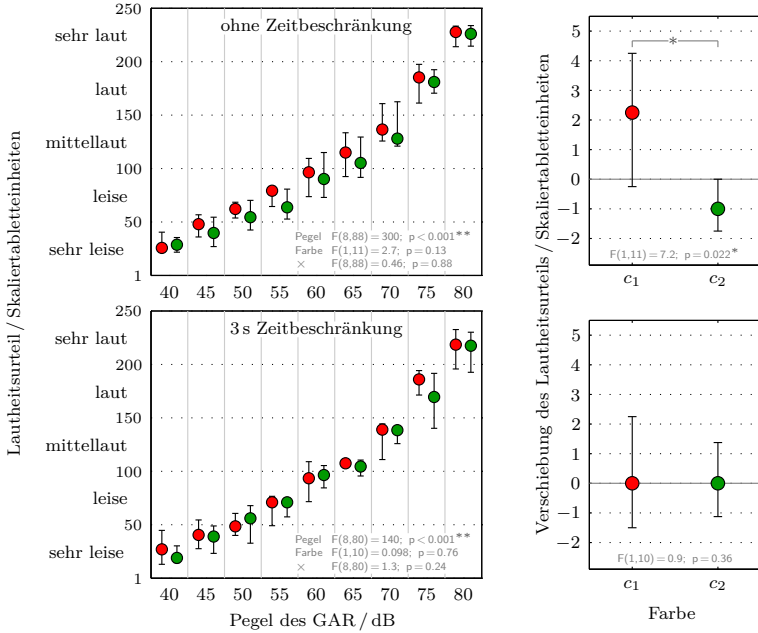


Abbildung 3.2.: Lautheitsbeurteilung von Gleichmäßig Anregendem Rauschen per Kategorienskaliierung mit fünf Grob- und 250 Feinstufen (links) und entsprechende Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts) bei Betrachtung der Farben c_1 („Hellrot“) bzw. c_2 („Grün“). Gegenübergestellt sind Daten, die ohne Antwortzeitbeschränkung (oben) bzw. mit 3 s Zeitbeschränkung (unten) erhoben wurden

derung der Urteile in der Größenordnung von drei Einheiten des Skaliertabletts (also etwa 1.2% der insgesamt 250 Stufen) vorliegt. Dies entspricht qualitativ den Ergebnissen von Patsouras et al. (2002) und Rader et al. (2004), da c_1 („Hellrot“) im Vergleich zu c_2 („Grün“) höhere Lautheitsurteile hervorruft. Allerdings scheint der Effekt hier, vermutlich aufgrund der Verwendung synthetischer Stimuli mit gleicher Leuchtdichte, geringer ausgeprägt zu sein.

3. Einfluss farbmeterischer Stimulusparameter

Die Clusteranalyse (siehe Abschnitt 2.3.6) lieferte Hinweise auf das Vorhandensein von zwei Gruppen, deren getrennte Ergebnisse in Abbildung 3.3 (oben) dargestellt sind. Die Gruppen bestehen jeweils aus sechs Personen. Die erste Gruppe zeigt einen hochsignifikanten Unterschied von 6 Skalieretabletteinheiten (2.4% der Skalenlänge) zwischen c_1 („Hellrot“) und c_2 („Grün“), während die zweite Gruppe keine Farbeinflüsse erkennen lässt. Die in Abbildung 3.2 (oben) beobachtete Verschiebung der Lautheitsurteile tritt also nur bei der Hälfte der Probanden auf (eine nähere Diskussion der Gruppenzusammensetzungen folgt in Kapitel 8).

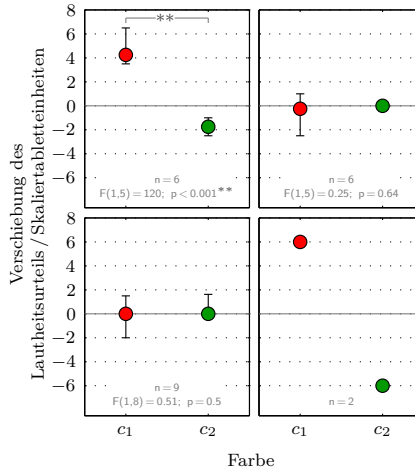


Abbildung 3.3.: Gruppenbildung bei Lautheitsbeurteilung von Gleichmäßig Anregendem Rauschen mittels Kategorienskalierung. Oben: keine Zeitbeschränkung, unten: 3 s Zeitbeschränkung

Eine weitere im Rahmen dieses Experiments untersuchte Einflussgröße ist die Zeit, die Versuchspersonen für die Eingabe ihrer Antwort zur Verfügung haben. Unter der Arbeitshypothese, dass ein zu langes Nachdenken über die Lautheitsempfindung die Aufmerksamkeit von den visuellen auf die akustischen Empfindungen lenken könnte, wurde eine Antwortzeitbeschränkung auf 3 s eingeführt. Dadurch sollten spontane Antworten und ein verstärktes Auftreten audio-visueller Interaktionen begünstigt werden. „Verpasste“ Urteile wurden zu einem späteren Zeitpunkt innerhalb des Versuchsdurchgangs wiederholt.

Die untere Hälfte von Abbildung 3.2 zeigt jedoch, dass diese Arbeitshypothese im Mittel über alle Versuchspersonen nicht zutreffen scheint. Eine Antwortzeitbeschränkung lässt die Verschiebung der Lautheitsurteile im Median zu Null werden. Dies könnte darauf hindeuten, dass eine erhöhte Belastung durch die zusätzliche Bedingung, die Zeitbeschränkung einzuhalten, den Einfluss optischer Stimuli reduziert. Die Probanden konzentrieren sich eventuell, um schneller antworten zu können, auf die zur Erfüllung der Aufgabe wich-

tigste Modalität (bei der Lautheitsbeurteilung also auf den Schall) und schenken zusätzlich dargebotenen Stimuli (hier also den Farbreizen) weniger Aufmerksamkeit.

Auch in diesem Versuchsteil zeigt sich jedoch eine gewisse Gruppenbildung. Betrachtet man die per Clusteranalyse ermittelten Gruppierungen der Probanden (Abbildung 3.3 unten) erkennt man erneut zwei Gruppen. Gruppe 1 enthält neun Personen und zeigt keinen Farbeinfluss auf das Lautheitsurteil. Die zweite Gruppe aber, bestehend aus zwei Personen, zeigt einen sehr deutlichen Farbeinfluss (eine varianzanalytische Betrachtung entfällt für diese Gruppe wie erwähnt aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten). Diese beiden Probanden befanden sich zuvor (ohne Zeitbeschränkung) in jener Gruppe, die keinen Farbeinfluss aufwies. Während also für die Mehrheit der Probanden eine Antwortzeitbeschränkung dazu führte, dass die Verschiebungen der Lautheitsurteile zu Null wurden, führte sie bei zwei Personen zu einem relativ starken Farbeinfluss, entsprechend der oben aufgestellten Arbeitshypothese.

Für die Untersuchung audio-visueller Interaktionen beim Lautheitsurteil sind die Versuchsbedingungen also von entscheidender Bedeutung. Es sollten möglichst störungsfreie Umgebungen und intuitive Beurteilungsmethoden ohne zusätzliche Aufgaben verwendet werden, um Ablenkungen der Probanden zu vermeiden. Zusätzlich sollte die Möglichkeit der Gruppenbildung nicht außer Acht gelassen werden.

3.2.2. Farbeinfluss auf die Lautheitsbeurteilung von Sinustönen

Um mögliche Frequenzabhängigkeiten von Farbeinflüssen auf die Lautheitsbeurteilung zu untersuchen wurde ein Experiment mit Sinustönen unterschiedlichen Pegels und unterschiedlicher Frequenz in Kombination mit den Farben c_1 („Hellrot“), c_2 („Grün“) und c_3 („Dunkelgrau“) in einer verdunkelten Hörkabine durchgeführt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1). Die Leuchtdichten der Farben waren wie im vorangegangenen Abschnitt aneinander angeglichen. Die Farben wurden bildschirmfüllend dargeboten. Die verwendeten Töne hatten Pegel zwischen 55 und 80 dB, Frequenzen von 100, 200, 500, 1000, 4000 und 8000 Hz sowie eine Dauer von 1.5 s. Die Lautheitsbeurteilung erfolgte nach dem Prinzip der Linienlänge (siehe Abschnitt 2.1.3).

Abbildung 3.4 zeigt die Ergebnisse zunächst in Abhängigkeit des Pegels. Links sind die Lautheitsurteile (in cm als Position des Urteils auf der Linie), rechts die Verschiebungen der Urteile (ebenfalls in cm) zu sehen. Die Daten wurden hierbei über die untersuchten Frequenzen gemittelt. Es fällt auf, dass für alle Pegel unterhalb von 80 dB c_1 („Hellrot“) im Median ein größeres Lautheitsurteil im Vergleich zu c_2 („Grün“) zur Folge hat. Die pro Pegel berechneten Verschiebungen der Urteile zeigen jedoch, dass diese Änderung in den meisten Fällen recht gering ausfällt. Nur für 70 dB bei c_1 („Hellrot“) und c_2 („Grün“) bzw. 80 dB bei c_3 („Dunkelgrau“) sind nennenswerte Verschiebungen in der Größenordnung von +0.2 bis -0.4 cm erkennbar, die aber keine statistische Signifikanz aufweisen.

Betrachtet man die pro Frequenz über die untersuchten Pegel gemittelten Lautheitsurteile (Abbildung 3.5 links), sind keine auffälligen Farbeinflüsse zu erkennen. Die Verschiebungen der Lautheitsurteile pro Frequenz, also die bei Betrachtung einer bestimmten Farbe aufgetretene Änderung des Lautheitsurteils gegenüber dem mittleren Urteil bei dieser Frequenz (Abbildung 3.5 rechts), zeigen einen signifikanten Farbeinfluss, der sich

3. Einfluss farbmeterischer Stimulusparameter

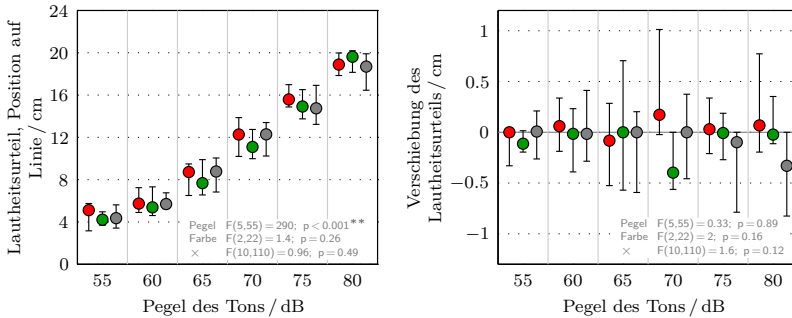


Abbildung 3.4.: Pegelabhängigkeit des Farbeinflusses auf die Lautheitsbeurteilung von Sinustönen per Linienlänge (gemittelt über sechs Frequenzen). Links: Lautheitsurteile als Position auf der Linie. Rechts: pro Pegel berechnete Verschiebung der Lautheitsurteile. Untersuchte Farben: c1 („Hellrot“), c2 („Grün“), c3 („Dunkelgrau“)

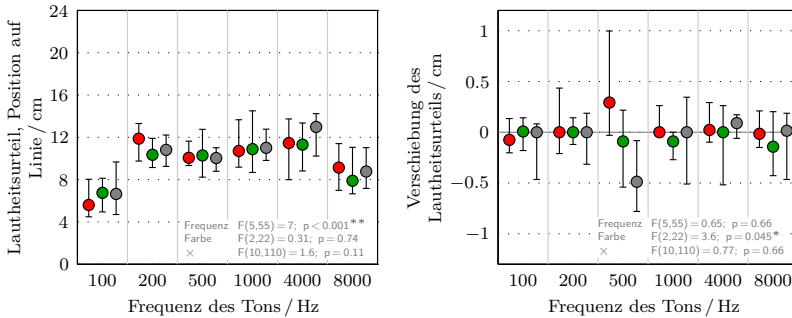


Abbildung 3.5.: Frequenzabhängigkeit des Farbeinflusses auf die Lautheitsbeurteilung von Sinustönen per Linienlänge (gemittelt über sechs Pegel). Links: Lautheitsurteile als Position auf der Linie. Rechts: pro Frequenz berechnete Verschiebung der Lautheitsurteile. Untersuchte Farben: c1 („Hellrot“), c2 („Grün“), c3 („Dunkelgrau“)

jedoch nur bei 500 Hz mit Unterschieden von ca. 0.8 cm zwischen c_1 („Hellrot“) und c_3 („Dunkelgrau“) auswirkt. Auch hier scheint c_1 („Hellrot“) eher zu einer Erhöhung des Lautheitsurteils gegenüber c_2 („Grün“) bzw. c_3 („Dunkelgrau“) zu führen.

Wird schließlich der Farbeinfluss sowohl über den Pegel als auch über die Frequenz gemittelt berechnet, ergibt sich das in Abbildung 3.6 gezeigte Gesamtergebnis. Die zuvor identifizierten Farbeinflüsse zeigen sich hier als Tendenzen. Die Interquartilbereiche deuten an, dass c_1 („Hellrot“) öfter zu einer Erhöhung, c_2 („Grün“) und c_3 („Dunkelgrau“) öfter zu einer Verminderung des Lautheitsurteils geführt haben. Diese Tendenzen sind allerdings sehr schwach ausgeprägt und nicht signifikant.

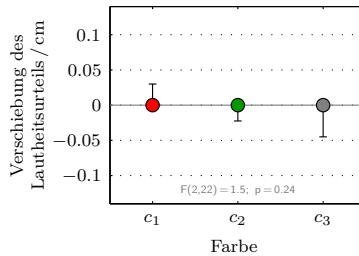


Abbildung 3.6.: Farbeinfluss auf die Lautheitsbeurteilung von Sinustönen per Linienlänge, gemittelt über sechs Pegel und sechs Frequenzen

Bei näherer Betrachtung des Gesamtergebnisses zeigen sich zwei Gruppen (siehe Abbildung 3.7) bestehend aus zwei bzw. zehn Probanden. Die erste Gruppe lässt eine geringfügige Verminderung des Lautheitsurteils bei Darbietung der Farbe c_3 („Dunkelgrau“) erkennen, während die zweite Gruppe keinerlei Anzeichen eines Farbeinflusses aufweist.

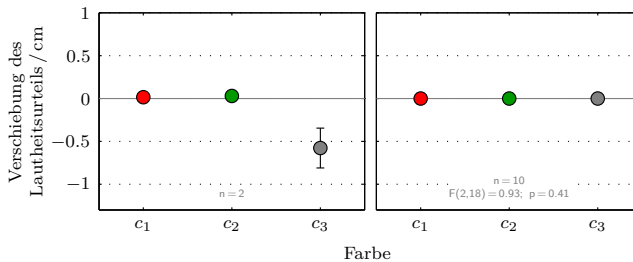


Abbildung 3.7.: Gruppenbildung bei Lautheitsbeurteilung von Sinustönen per Linienlänge. Gezeigt sind die Verschiebungen der Lautheitsurteile gemittelt über sechs Pegel und sechs Frequenzen für die zwei beobachteten Probandengruppierungen

In beiden beschriebenen Experimenten konnten im Mittel über alle Versuchspersonen keine Anzeichen für deutliche systematische Pegel- oder Frequenzabhängigkeiten nachge-

wiesen werden. Die gefundenen Effekte sind nur schwach ausgeprägt, was wiederum durch die Verwendung von synthetischen Stimuli gleicher Leuchtdichte begründet sein könnte.

3.3. Verwendung schreiender Farben

Der Begriff „schreiende Farbe“ bezeichnet umgangssprachlich üblicherweise eine grelle, bunte, auffällige Farbe. Es bietet sich an, diesen Typ von Farben bei der Untersuchung des Farbeinflusses auf die Lautheit zu berücksichtigen, da durch die Bezeichnung „schreiend“ schon sprachlich eine Beziehung zur auditiven Wahrnehmung nahe gelegt wird. Als Arbeitshypothese wird daher davon ausgegangen, dass schreiende Farben zu einer Erhöhung des Lautheitsurteils führen könnten (siehe auch Menzel et al. 2009). Im Folgenden werden schreiende und nicht schreiende Farben definiert, bewertet und hinsichtlich ihrer Wirkung auf Lautheitsurteile untersucht. Auf Basis der Farbmaßzahlen Buntheit, Helligkeit und Buntton wird anschließend eine Berechnungsvorschrift für den schreienden Farbeindruck vorgestellt.

3.3.1. Schreiende und nicht schreiende Farben

Auswahl der Farben

In einem ersten Schritt sollte zunächst festgestellt werden, ob verschiedene Personen eine einheitliche Vorstellung des Begriffs der schreienden Farbe haben. Zu diesem Zweck sollten Versuchspersonen über eine Einregelmethode eine auf einem Bildschirm dargestellte Farbe so lange verändern, bis der Eindruck einer schreienden Farbe erreicht war.

Das Experiment fand (wie alle in diesem Abschnitt geschilderten Experimente) in einer verdunkelten Hörkabine statt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1). Die zu verändernde Farbe war als 29 cm × 19 cm große Fläche auf dem Bildschirm vor einem grauen Hintergrund ($L^* = 50$) dargestellt. Oberhalb der Farbfläche waren als grafische Benutzungsoberfläche Regler zur Änderung der Farbe entlang der Dimensionen L^* , a^* und b^* zu sehen. Die Versuchsteilnehmer konnten beliebig viele schreiende Farben einstellen. Im Mittel lieferte jeder Proband sieben Farben.

Viele der so erhaltenen 105 Farben waren sich sehr ähnlich, weshalb die Farben per Augenschein in sieben Gruppen unterteilt wurden, die knapp 75 % aller produzierten Farben enthalten. Für jede Gruppe wurde eine repräsentative Farbe festgelegt: c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_8 („leuchtendes Gelb“), c_{10} („Cyan“), c_{12} („Dunkelblau“) und c_9 („Orange“). Abbildung 3.8 zeigt, wie häufig Farben der jeweiligen Gruppen von den Probanden eingestellt wurden. Daten weiblicher und männlicher Versuchspersonen sind zusätzlich getrennt eingezeichnet.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass sich die Versuchspersonen im Allgemeinen in ihrer Vorstellung von schreienden Farben recht einig waren. Nur bei c_8 („leuchtendes Gelb“) und c_{12} („Dunkelblau“) finden sich größere Unterschiede zwischen den weiblichen und den männlichen Probanden. Männliche Probanden stellten c_8 („leuchtendes Gelb“) häufiger als schreiende Farbe ein, während sie c_{12} („Dunkelblau“) nie wählten.

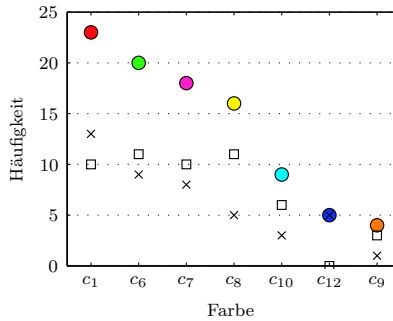


Abbildung 3.8.: Häufigkeiten eingeregelter schreiender Farben aller (○), weiblicher (×) sowie männlicher (□) Versuchspersonen

Als Gegenstücke zu den sieben von den Versuchsteilnehmern eingestellten schreienden Farben wurden die folgenden acht Farben in der Erwartung ausgewählt, dass sie als nicht schreiend empfunden werden: c_{11} („Violett“), c_{13} („Rosa“), c_{14} („Pastellblau“), c_{15} („Dunkelgrün“), c_{16} („Braun“), c_{17} („Grau“), c_3 („Dunkelgrau“) und c_{35} („Schwarz“). Für die weiteren Untersuchungen standen also insgesamt 15 Farben zur Verfügung.

Bewertung der Farben

Um die Farbauswahl zu verifizieren wurde eine Bewertung der Farben hinsichtlich ihres schreienden Farbeindrucks auf einer Skala mit den fünf Stufen „nicht schreiend“, „wenig schreiend“, „mittel“, „schreiend“ und „sehr schreiend“ durchgeführt (siehe Abbildung 3.9). Farben, die im zuvor beschriebenen Versuch von den Probanden eingestellt wurden, erhielten erwartungsgemäß hohe Bewertungen. Insgesamt zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Versuchspersonen. Größere Abweichungen sind nur bei den Farben c_{10} („Cyan“), c_{13} („Rosa“) und c_{14} („Pastellblau“) zu sehen, die von den weiblichen Versuchspersonen als weniger schreiend empfunden wurden als von den männlichen.

Eigenschaften der Farben

Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht über einige farbmimetrische Eigenschaften der hier untersuchten 15 Farben. Man sieht, dass die Farben einen großen Helligkeits-, Buntheits- und Bunttonbereich abdecken, sodass eine große Anzahl unterschiedlicher Farbreize für die folgenden Untersuchungen zur Verfügung steht. Eine erste Betrachtung möglicher Zusammenhänge zwischen schreiendem Farbeindruck und Farbmaßzahlen zeigt, dass anscheinend weniger die Helligkeit eine Rolle spielt – c_{17} („Grau“) hat z. B. eine größere Helligkeit als c_1 („Hellrot“), ist aber wesentlich weniger schreiend – als vielmehr die Buntheit C_{ab}^* . Farben am Anfang der Liste, also als schreiend empfundene Farben, weisen im Allgemeinen eine größere Buntheit auf als Farben am Ende der Liste. Auch der Buntton

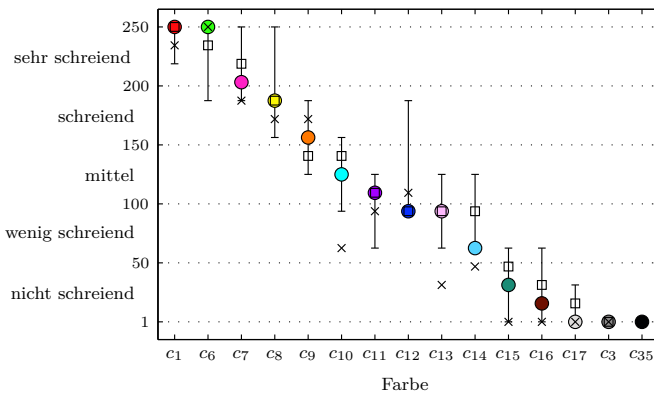


Abbildung 3.9.: Bewertung des schreienden Farbeindrucks auf einer fünfstufigen Skala. Gezeigt sind Daten aller (○), weiblicher (×) sowie männlicher (◻) Versuchspersonen

Tabelle 3.1.: Übersicht über die 15 in diesem Abschnitt verwendeten schreienden und nicht schreienden Farben. Die Farben sind nach ihrem schreienden Farbeindruck geordnet (siehe Abbildung 3.9). Der Bunttonwinkel h_{ab} ist für unbunte Farben wenig aussagekräftig und wird deshalb nur in Klammern angegeben.

Farbe	L^*	a^*	b^*	C_{ab}^*	$h_{ab} / ^\circ$
■ c_1	55	83	62	104	37
■ c_6	88	-86	83	120	136
■ c_7	59	90	-31	96	341
■ c_8	95	-17	92	94	100
■ c_9	67	50	72	88	55
■ c_{10}	91	-52	-14	54	195
■ c_{11}	46	86	-85	121	315
■ c_{12}	36	64	-102	120	302
■ c_{13}	84	36	-23	43	327
■ c_{14}	79	-25	-32	40	232
■ c_{15}	52	-38	3	38	175
■ c_{16}	23	40	28	49	35
■ c_{17}	89	1	1	2	(31)
■ c_3	58	0	1	1	(70)
■ c_{35}	4	0	0	0	(322)

scheint kein einheitliches Merkmal schreiender Farben zu sein, da sowohl z. B. rötliche wie auch grünliche und gelbliche Farben unter den schreienden Farben zu finden sind. Bläuliche Farben finden sich jedoch vermehrt im mittleren Bereich. Eine genauere Berechnungsvorschrift für den schreienden Farbeindruck wird in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt.

3.3.2. Einfluss schreiender Farben auf das Lautheitsurteil

Darbietung als einfarbige Flächen

Aus Gründen der Vergleichbarkeit zu vorherigen Experimenten wurde zunächst die Farbdarbietung in Form von bildschirmfüllenden Farbflächen gewählt. Der akustische Stimulus war Gleichmäßig Anregendes Rauschen mit Pegeln zwischen 50 und 80 dB in 5 dB Schritten und einer Dauer von 1.5 s. Die Ergebnisse der Beurteilung nach dem Prinzip der Linienlänge (siehe Abschnitt 2.1.3) sind in Form der sich ergebenden Verschiebungen der Lautheitsurteile in Abbildung 3.10 dargestellt.

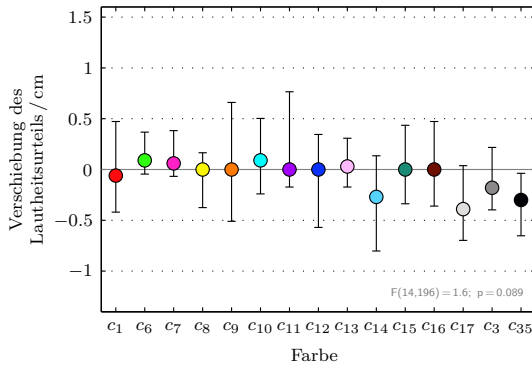


Abbildung 3.10.: Verschiebung der Lautheitsurteile für Gleichmäßig Anregendes Rauschen und 15 schreiende und nicht schreiende Farben, dargeboten als Farbflächen

Nicht schreiende Farben scheinen (bei Betrachtung der interindividuellen Mediane) zu einem etwas niedrigeren Lautheitsurteil zu führen. Während Farben wie z. B. c_1 („Hellrot“) oder c_9 („Orange“), erkennbar an den Interquartilbereichen, sowohl zu Erhöhungen als auch Verringerungen des Lautheitsurteils führen können, scheinen vor allem die unbunten Farben c_{17} („Grau“), c_3 („Dunkelgrau“) und c_{35} („Schwarz“) öfter verminderte Lautheitsurteile zur Folge zu haben. Der nicht signifikante Trend ist jedoch mit 0.4 cm, also etwa 1.7 % der gesamten Linienlänge, recht gering. Es konnte keine deutliche Gruppenbildung der Probanden beobachtet werden, was eventuell auch durch die große Zahl untersuchter Farben bedingt sein könnte.

Darbietung als eingefärbte bedeutungsbehaftete Objekte

Um zu untersuchen, ob die Darbietung eingefärbter Objekte gegenüber abstrakten Farbflächen Vorteile hinsichtlich des Auftretens audio-visueller Interaktionen bietet, wurde der zuvor beschriebene Versuch mit Bildern von Radios wiederholt. Radios stellen eine bekannte und plausible Schallquelle (auch für Rauschen) dar, und eignen sich deshalb zur Kombination mit dem akustischen Stimulus Gleichmäßig Anregendes Rauschen. Die Breite der Radios auf dem Bildschirm betrug ca. 10 cm (siehe Abbildung 3.11).

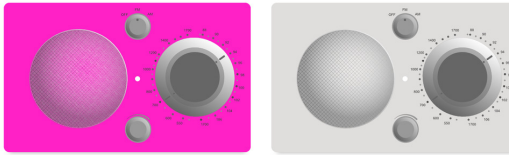


Abbildung 3.11.: Beispiele für eingefärbte Bilder von Radios. Farben: links c_7 („leuchtendes Magenta“), rechts c_{17} („Grau“)

Die unterschiedliche Wirkung schreiender und nicht schreiender Farben zeigt sich in der Verschiebung der Lautheitsurteile (Abbildung 3.12). Es fällt vor allem die erhöhte Wirkung von c_7 („leuchtendes Magenta“) und c_8 („leuchtendes Gelb“) auf.

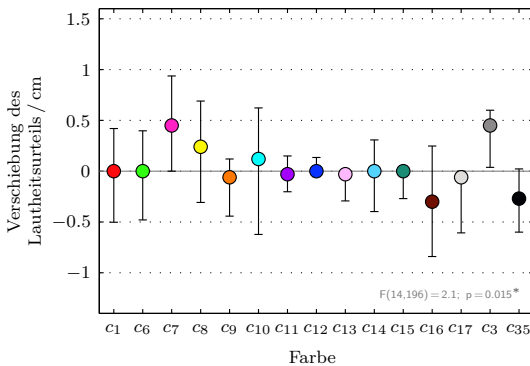


Abbildung 3.12.: Verschiebung der Lautheitsurteile für Gleichmäßig Anregendes Rauschen und 15 schreiende und nicht schreiende Farben, dargeboten als Bilder eingefärbter Radios

Die Varianzanalyse deutet auf signifikante Einflüsse der Farbe hin. Jedoch gibt es auch nicht schreiende Farben wie c_3 („Dunkelgrau“), die zu deutlichen Erhöhungen des Lautheitsurteils geführt haben. Die beobachteten Effekte fallen mit einer Gesamtspanne von

ca. 0.8 cm bzw. 3.3 % der gesamten Linienlänge größer aus verglichen mit den Ergebnissen aus Abbildung 3.10 für Farbflächen. Auch bei den Bildern eingefärbter Radios wurde keine eindeutige Gruppierung von Versuchspersonen beobachtet.

Die Verwendung bedeutungsbehafteter Bilder im direkten Vergleich zu abstrakten Farbflächen hatte also das Auftreten signifikanter Farbeffekte zur Folge. Dies könnte als vorläufiger Hinweis gedeutet werden, dass die Verwendung von Darstellungen bekannter, eingefärbter Objekte zu erhöhten audio-visuellen Interaktionen führen könnte.

3.3.3. Berechnung des schreienden Farbeindrucks

In diesem Abschnitt wird eine Berechnungsvorschrift vorgestellt, die zum Ziel hat, die in Abbildung 3.9 gezeigte Bewertung des schreienden Farbeindrucks nachzubilden. Wie schon bei Betrachtung von Tabelle 3.1 ersichtlich wurde, scheint der schreiende Farbeindruck zu einem großen Teil von der Buntheit abzuhängen. Das bedeutet, dass Farben, die messtechnisch weit von einem gleichhellen Grau entfernt sind, offensichtlich überwiegend als schreiend empfunden werden. Deshalb wird zunächst die Hilfsgröße $g_{C_{ab}^*}$ als die auf den maximal beobachteten Wert normierte Buntheit definiert:

$$g_{C_{ab}^*} = \frac{C_{ab}^*}{121} \quad (3.1)$$

Ein Vergleich mit Tabelle 3.1 zeigt jedoch auch, dass c_{11} („Violett“) und c_{12} („Dunkelblau“) zwar messtechnisch eine große Buntheit aufweisen ($C_{ab}^* = 121$ bzw. 120), aber anscheinend zu dunkel sind ($L^* = 46$ bzw. 36), um von den Versuchspersonen als schreiend bewertet zu werden (beide Farben erreichen Bewertungen im mittleren Bereich). Deshalb wird ein zusätzlicher Faktor g_{L^*} eingeführt, der dunkle Farben schwächer gewichtet:

$$g_{L^*} = \frac{0.5}{1 + \exp(-2(L^* - 52))} + 0.5 \quad (3.2)$$

Es handelt sich um eine Sigmoidfunktion, die für Helligkeiten $L^* < 52$ den Wert 0.5 annimmt und darüber gegen eins geht. Abbildung 3.13 (links) zeigt den Verlauf von g_{L^*} über der Helligkeit.

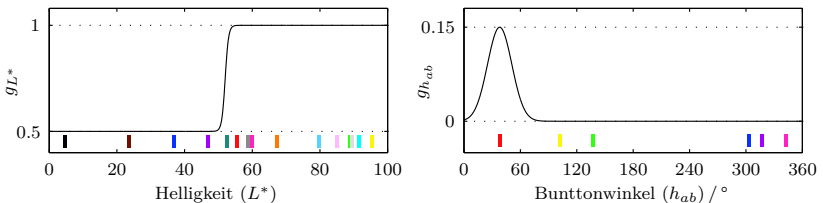


Abbildung 3.13.: Verlauf der Hilfsgrößen g_{L^*} (links) bzw. $g_{h_{ab}}$ (rechts, für Farben mit $C_{ab}^* \geq 90$) in Abhängigkeit der Helligkeit bzw. des Bunttonwinkels. Die untersuchten Farben sind an entsprechender Stelle am unteren Rand der Abbildungen eingezeichnet.

Als letzter Schritt wird der anscheinend besonderen Stellung roter Farben Rechnung getragen, indem für entsprechende Bunttöne ein Korrekturwert $g_{h_{ab}}$ addiert wird, jedoch nur für Farben großer Buntheit, da ansonsten z. B. Brauntöne überbewertet würden (siehe Abbildung 3.13 rechts, für Farben mit $C_{ab}^* \geq 90$):

$$g_{h_{ab}} = \begin{cases} 0.15 \cdot \exp(-0.001 (\frac{h_{ab}}{1^\circ} - 40)^2) & \text{für } C_{ab}^* \geq 90 \\ 0 & \text{für } C_{ab}^* < 90 \end{cases} \quad (3.3)$$

Der *schreiende Farbeindruck* SF wird anschließend wie folgt berechnet:

$$SF = g_{C_{ab}^*} \cdot g_{L^*} + g_{h_{ab}} \quad (3.4)$$

Die Werte, die sich aus dieser Gleichung ergeben, sind in Abbildung 3.14 den experimentell ermittelten Bewertungen gegenübergestellt. Man erkennt, dass die berechneten Werte (Rauten) sehr gut mit den experimentellen Daten (Kreise) übereinstimmen. Basierend auf den Farbmaßzahlen C_{ab}^* , L^* und h_{ab} ist demnach eine Nachbildung des experimentell ermittelten schreienden Farbeindrucks der betrachteten 15 Farben innerhalb der aufgetretenen wahrscheinlichen Schwankungen möglich.

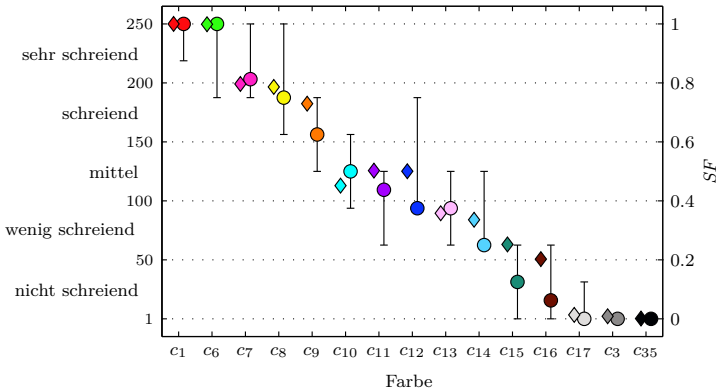


Abbildung 3.14.: Berechnete Werte des schreienden Farbeindrucks SF nach Gleichung 3.4 (Rauten) im Vergleich mit subjektiven Urteilen (Kreise, siehe auch Abbildung 3.9)

3.4. Variation des Helligkeitskontrastes durch Darbietung visueller Objekte vor verschiedenen Hintergründen

Bisher wurden die zur Untersuchung audio-visueller Interaktionen präsentierten Farben isoliert und unabhängig von ihrer Umgebung, z. B. der Hintergrundfarbe, betrachtet. Wer-

den Farben jedoch nicht als bildschirmfüllende Farbfächen dargeboten, könnte der jeweilige Hintergrund, vor dem die Farben erscheinen, eine zusätzliche Einflussgröße darstellen. Im Folgenden wird daher die Sichtbarkeit dargebotener Objekte durch Änderung der Helligkeitsdifferenz zum Hintergrund variiert und zunächst mittels Reaktionszeitmessungen quantifiziert. Anschließend werden Lautheitsbeurteilungen bei gleichzeitiger Darbietung unterschiedlich gut sichtbarer visueller Reize besprochen.

3.4.1. Einfluss des Helligkeitskontrastes auf Reaktionszeitmessungen

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen Versuchsreihe war es, Reaktionszeiten auf kombinierte audio-visuelle Stimuli bei variierender Sichtbarkeit zu messen und mit Reaktionszeiten auf rein akustische und rein optische Stimuli zu vergleichen.

Reaktion auf akustische Stimuli

Es ist bekannt, dass Reaktionszeiten auf akustische Reize wie etwa Sinustöne stark mit der Lautheit korrelieren (siehe z. B. Arieu und Marks 2003). Dies konnte in einem eigenen Vorversuch nachvollzogen werden. In einer verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1) wurden Versuchspersonen Sinustöne mit Pegeln von 30, 40, 50, 60, 70 und 80 dB sowie Frequenzen von 100, 200, 500, 1000, 2000 und 4000 Hz dargeboten. Die Töne hatten eine Dauer von 0.75 s, die Pausen zwischen den Tönen wurden zufällig zwischen 3 und 5 s gewählt. Die Probanden waren angewiesen, schnellstmöglich einen Taster zu betätigen, sobald sie einen Ton hören. Die Zeit zwischen Beginn des Tons und Drücken des Tasters wurde als Reaktionszeit erfasst.

Abbildung 3.15 zeigt die so ermittelten Reaktionszeiten. Bei gegebener Frequenz nimmt

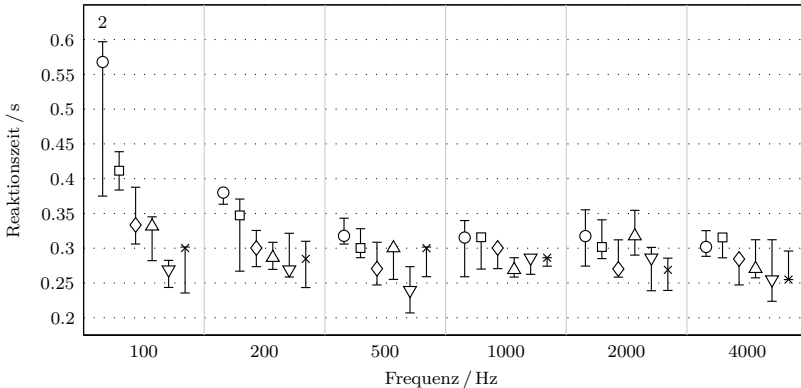


Abbildung 3.15.: Reaktionszeit auf Sinustöne verschiedener Frequenzen und verschiedener Pegel (30 dB ○, 40 dB □, 50 dB ◇, 60 dB △, 70 dB ▽ und 80 dB ×). Zahlen geben an, wie oft auf diesen Stimulus gar nicht reagiert wurde.

die Lautheit mit steigendem Pegel zu, weshalb sich wie erwartet die gemessenen Reaktionszeiten entsprechend verringern. Bei gegebenem Pegel steigt die Lautheit mit zunehmender Annäherung der Frequenz an 4 kHz, was ebenfalls eine Abnahme der Reaktionszeiten zur Folge hat. Bei 100 Hz und niedrigen Pegeln ist die Lautheit am geringsten und somit die Reaktionszeit am größten. Zahlen am oberen Rand der Abbildung geben dabei an, wie oft auf den betreffenden Stimulus gar nicht reagiert wurde (d. h. länger als 2 s keine Reaktion erfolgte). Dies war hier nur für den Ton mit einer Frequenz von 100 Hz und einem Pegel von 30 dB zweimal der Fall. Aus der Literatur ist bekannt, dass bei Annäherung an die Ruhehörschwelle, wie bei dem 100 Hz -Ton mit 30 dB der Fall, die Reaktionszeiten stark ansteigen (siehe z. B. Kohfeld et al. 1981, Abb. 4).

Reaktion auf optische Stimuli vor verschiedenen Hintergründen

Für dieses Experiment wurden Kreise mit schreienden und nicht schreienden Farben (gemäß Abbildung 3.9) auf einem Bildschirm (Versuchsumgebung 1a) gezeigt. Die Kreise hatten einen Durchmesser von ca. 1 cm und wurden an zufälligen Positionen auf dem Bildschirm dargestellt, mit zufälligen Pausen zwischen 3 und 5 s zwischen den Darbietungen. Es wurden drei verschiedene Hintergründe in den Farben c_{43} („Hellblau“), c_{44} („Gelb“) und c_{45} („Rosa“) verwendet. Die Hintergrundfarben wurden durch geringfügige Veränderung der Vordergrundfarben c_{17} („Grau“), c_8 („leuchtendes Gelb“) bzw. c_{13} („Rosa“) erzeugt. Die Probanden hatte die Aufgabe, den Blick auf den Bildschirm gerichtet zu lassen und sofort nach Wahrnehmung eines Kreises einen Taster zu betätigen. Die Zeit zwischen Erscheinen eines Kreises und dem darauf folgenden Tastendruck wurde als Reaktionszeit registriert.

Wie Abbildung 3.16 zeigt, liegen die Reaktionszeiten meistens bei etwa 350 ms. Einige Stimuli verursachen erhöhte Reaktionszeiten von über 500 ms, bzw. werden überhaupt nicht mehr wahrgenommen (vgl. Zahlen am oberen Rand der Darstellung). Bei jeder der drei Hintergrundfarben scheinen jene Vordergrundfarben eine längere Reaktionszeit zur Folge zu haben, die eine ähnliche Helligkeit wie die Hintergrundfarbe aufweisen.

Dieser Sachverhalt ist aus der Literatur bekannt (Watts 1980, O'Donnell und Colombo 2008) und wird in Abbildung 3.17 verdeutlicht. Auf der Abszisse ist pro Hintergrundfarbe die Helligkeitsdifferenz zu jeder Vordergrundfarbe (Differenz der jeweiligen L^* -Werte) aufgetragen, die Ordinate zeigt die mittlere aufgetretene Reaktionszeit, wie sie auch in Abbildung 3.16 zu sehen ist. Man erkennt einen deutlichen Zusammenhang: je ähnlicher sich die Vorder- und Hintergrundhelligkeiten sind, desto größer ist die Reaktionszeit. Sobald die präsentierten Kreise heller (negative Differenz) oder dunkler (positive Differenz) werden als der Hintergrund und damit gut sichtbar sind, sinkt die Reaktionszeit. Eine besondere Korrelation mit anderen Farbeigenschaften wie dem Buntton, der Buntheit oder dem schreienden Farbeindruck ist nicht zu erkennen.

Die Sichtbarkeit, ausgedrückt durch niedrige Reaktionszeiten, scheint also im Besonderen vom Betrag der Helligkeitsdifferenz zwischen Hinter- und Vordergrund abzuhängen

3.4. Variation des Helligkeitskontrastes durch Darbietung visueller Objekte vor verschiedenen Hintergründen

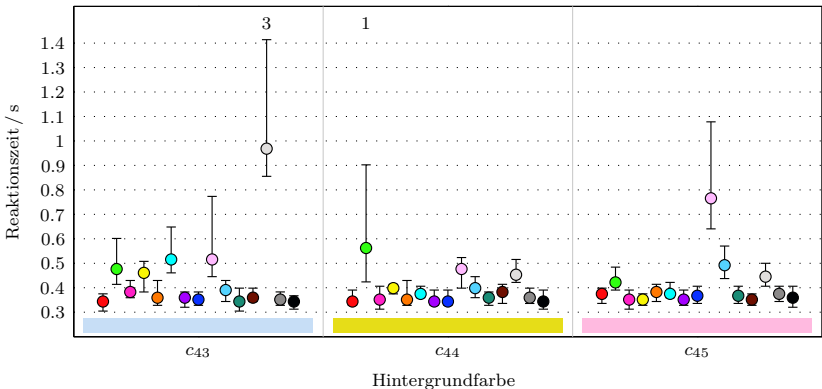


Abbildung 3.16.: Reaktionszeit auf plötzlich erscheinende farbige Kreise vor drei verschiedenen Hintergrundfarben (Farbbalken am unteren Rand der Abbildung). Kreisfarben siehe Abbildung 3.9. Zahlen geben an, wie oft auf den jeweiligen Stimulus gar nicht reagiert wurde.

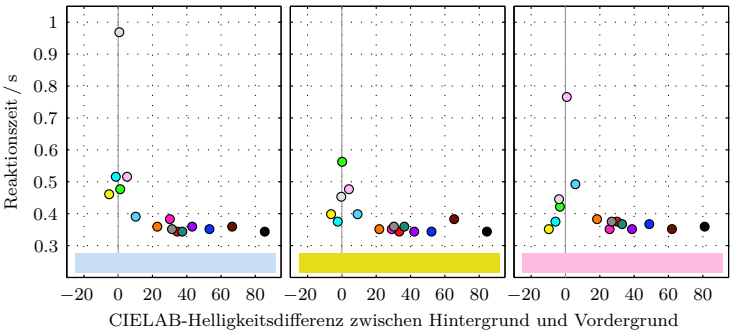


Abbildung 3.17.: Zusammenhang des Helligkeitskontrastes zwischen Hintergrundfarbe (Farbbalken am unteren Rand der Abbildung) und Vordergrundfarbe (Kreise) mit der mittleren Reaktionszeit

Reaktion auf kombinierte audio-visuelle Stimuli

In diesem Experiment wurden Probanden Kombinationen aus Stimuli der beiden vorherigen Versuche dargeboten, wobei die Aufgabe darin bestand, schnellstmöglich durch Tastendruck zu reagieren, sobald man einen Kreis auf dem Bildschirm sah *oder* einen Ton hörte. Ziel war es, Aussagen darüber zu ermöglichen, ob eine der beiden Modalitäten den Reaktionsvorgang dominiert, oder ob es zu Interaktionen kommt und sich die audio-visuellen Reaktionszeiten von den unimodalen, rein auditiven bzw. rein visuellen Reaktionszeiten unterscheiden.

Vor den drei Hintergrundfarben c_{43} („Hellblau“), c_{44} („Gelb“) und c_{45} („Rosa“) wurden Kombinationen aus sieben verschiedenen Kreisen und zwei Sinustönen präsentiert. Zum einen wurde ein 1000 Hz-Ton mit 60 dB verwendet, da bei diesem Stimulus in den Vorversuchen die Reaktionszeit deutlich kleiner ausfiel als bei visuellen Stimuli. Zum anderen wurde ein 200 Hz-Ton mit 30 dB verwendet, da dieser Ton ähnliche Reaktionszeiten wie visuelle Stimuli aufwies.

In Abbildung 3.18 sind für alle sechs Kombinationen aus Hintergrundfarbe und Schall die Reaktionszeiten auf die audio-visuellen Stimuli pro Vordergrundfarbe als Kreise aufgetragen, die nach zunehmendem Betrag des Helligkeitskontrastes sortiert sind. Zusätzlich sind als horizontale Linien die jeweiligen Reaktionszeiten (Quartile) für die Schalle S1 (200 Hz 30 dB) und S2 (1000 Hz 60 dB) eingezeichnet (siehe Abbildung 3.15) sowie als durchgezogene Kurven die zuvor ermittelten rein visuellen Reaktionszeiten.

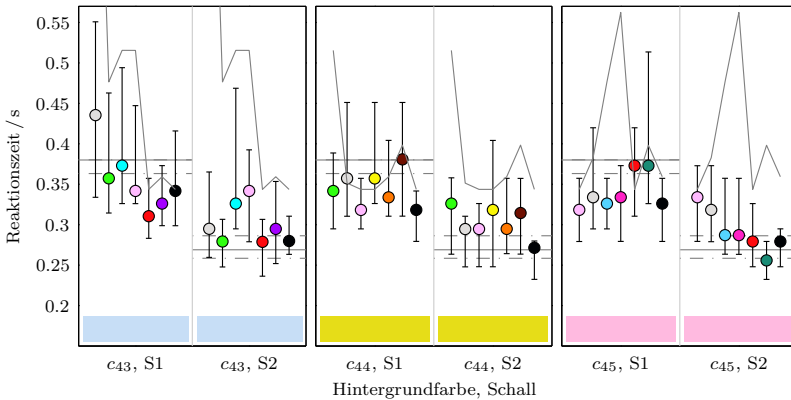


Abbildung 3.18.: Reaktionszeit auf kombinierte audio-visuelle Stimuli (Kreise) vor verschiedenen Hintergrundfarben (Balken am unteren Rand) mit Schallen S1 (Sinus 200Hz 30dB) und S2 (Sinus 1000Hz 60dB). Die Farben sind nach zunehmendem Betrag des Helligkeitskontrastes zum jeweiligen Hintergrund sortiert. Horizontale Linien: unimodale Reaktionszeiten auf S1 bzw. S2 (durchgezogen: Median, strichpunktiert: 25 % bzw. 75 % Perzentile). Durchgezogene Kurven: unimodale Reaktionszeiten auf visuelle Stimuli

In Kombination mit dem lauterem Schall S2 zeigt sich, dass die Reaktionszeit gegenüber der rein optischen Darbietung verringert wird. Dies war zu erwarten, da die Probanden auf beide Modalitäten reagieren konnten und die Reaktion sich somit an der schnelleren auditiven Wahrnehmung orientieren kann. Die Werte der rein auditiven Reaktionszeit werden jedoch oft nicht erreicht, die gemessenen audio-visuellen Reaktionszeiten liegen also tendenziell zwischen den unimodalen Werten. Die zusätzlich zu den Sinustönen dargebotenen Farbkreise verlangsamten demnach die Reaktion um bis zu 30 %. Bei den Hintergrundfarben c_{43} („Hellblau“) und c_{44} („Gelb“) ist dabei zu beobachten, dass der Verlauf der audio-visuellen Reaktionszeit in gewissem Maß dem Verlauf der visuellen Reaktionszeit folgt, bei c_{45} („Rosa“) und S2 ist eine deutliche Korrelation der audio-visuellen Reaktionszeit mit dem Betrag des Helligkeitskontrastes zu erkennen.

Auch für den leiseren Schall S1 zeigen sich klare Interaktionen. Gegenüber dem lauterem Schall S2 fallen die Reaktionszeiten hier höher aus und die Reaktion orientiert sich nun teilweise am visuellen Kanal. Daher ist es verständlich, dass auch in diesem Fall die Farben der präsentierten Kreise bzw. deren Helligkeitskontraste einen Einfluss auf die Reaktionszeiten aufweisen.

Diskussion

Kombiniert man also einen „schnellen“ akustischen Reiz mit „langsamen“ optischen Stimuli, so erhöht sich tendenziell die Reaktionszeit, obwohl die dem Probanden für eine Reaktion zur Verfügung stehende akustische Information identisch ist. Trotz der Tatsache, dass es sich nicht um eine Wahlreaktion handelt, da auf jeglichen auftretenden Stimulus reagiert werden konnte, scheint das Vorhandensein zusätzlicher optischer Stimuli die Reaktion zu erschweren (zu Reaktionen auf mehrfache Stimuli siehe z. B. Hick 1952). Schlecht sichtbare Stimuli, also solche mit niedrigem Helligkeitskontrast, führen dabei oft zu größeren Reaktionszeiten als gut sichtbare Stimuli, obwohl sich der gleichzeitig dargebotene akustische Reiz nicht ändert und alleine zu einer wesentlich geringeren Reaktionszeit geführt hätte.

3.4.2. Einfluss des Helligkeitskontrastes auf Lautheitsbeurteilungen

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt ein Einfluss der Sichtbarkeit audio-visueller Stimuli auf Reaktionszeitmessungen ermittelt werden konnte, soll nun die Lautheit solcher Stimuli bewertet werden. Basierend auf der Beobachtung, dass Reaktionszeiten mit zunehmender Sichtbarkeit abnehmen, wird die Arbeitshypothese aufgestellt, dass Stimuli mit größerer Helligkeitsdifferenz zum Hintergrund als lauter beurteilt werden könnten.

Um eine definierte Abstufung der Sichtbarkeit zu erreichen, wurden ausgefüllte, randlose Kreisflächen an zufälligen Positionen auf einem Bildschirm vor weißem Hintergrund (Helligkeit $L^* = 100$) präsentiert. Die Kreisflächen hatten einen Durchmesser von 8 cm und wurden in verschiedenen Graustufen mit Helligkeiten von $L^* = 0, 30, 60, 75, 90$ und 98 (Farben $c_{35}, c_{36}, c_{37}, c_{38}, c_{39}, c_{40}$) eingefärbt. Es ergeben sich somit Helligkeitsdifferenzen zwischen Hinter- und Vordergrund von 100, 70, 40, 25, 10 sowie 2. Gleichzeitig zum Erscheinen der Kreisflächen wurden Sinustöne (1000 Hz, 1.5 s Dauer) mit Pegeln von

61, 63, 65, 67 oder 69 dB dargeboten. Das Experiment fand in einer verdunkelten Hörkabine statt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1), Beurteilungsmethode war Freie Größenschätzung.

Die sich abhängig vom Pegel und von der Helligkeitsdifferenz ergebenden Lautheitsurteile sind in Abbildung 3.19 gezeigt. Es sind dabei keine systematischen Zusammenhänge der Urteile mit den visuellen Stimuli zu erkennen. Auch die Mediane der relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile lassen keine signifikanten Effekte erkennen, jedoch fallen die teilweise recht großen Interquartilsbereiche auf.

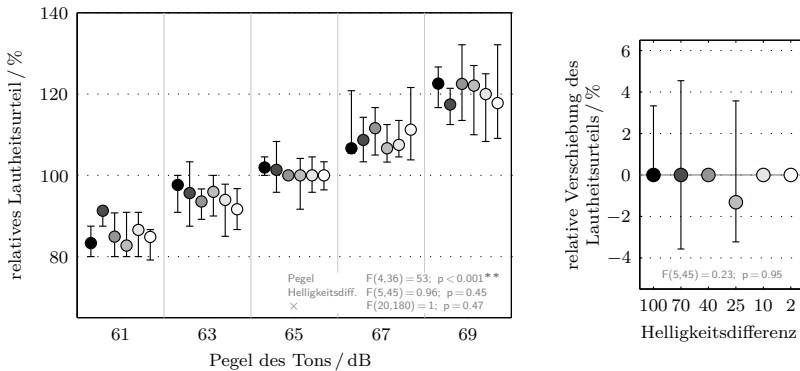


Abbildung 3.19.: Lautheitsbeurteilung von Sinustönen kombiniert mit unterschiedlich gut sichtbaren Kreisen auf weißem Hintergrund (links) sowie entsprechende relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

Weitere Auswertungen ergaben Hinweise auf zwei Gruppen innerhalb der Versuchsteilnehmer. Eine erste, relativ inhomogene Gruppe mit sechs Personen (Abbildung 3.20 links) bewertete dunklere Kreise teilweise als leiser, und den hellsten Kreis tendenziell als lauter, wobei laut Varianzanalyse signifikante Einflüsse bestehen. Die zweite Gruppe mit vier Probanden (Abbildung 3.20 rechts) zeigt das aufgrund der Arbeitshypothese erwartete Verhalten, dass besser sichtbare Stimuli, also solche mit großer Helligkeitsdifferenz zum Hintergrund, als lauter beurteilt werden, während der am schlechtesten sichtbare Stimulus als etwas leiser eingestuft wurde.

3.5. Diskussion

Die in diesem Kapitel vorgestellten, auf synthetischen Stimuli basierenden experimentellen Befunde haben gezeigt, dass die Beeinflussbarkeit der Lautheitsurteile durch dargebotene Farben individuell sehr unterschiedlich ausfallen kann. Zur Beantwortung der eingangs gestellten Frage, ob bestimmte „laute“ oder „leise“ Farben existieren, ist deshalb die Berücksichtigung eventueller Gruppenbildungen der Versuchsteilnehmer nötig. Viele

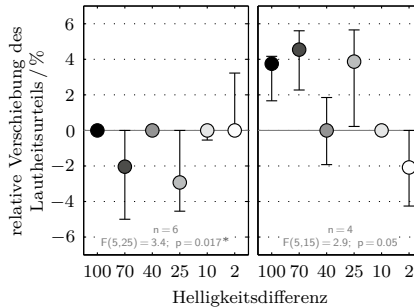


Abbildung 3.20.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Sinustönen in Kombination mit unterschiedlich gut sichtbaren Kreisen vor weißem Hintergrund.

Probanden weisen keine deutlichen systematischen Farbeinflüsse auf die Lautheitsbeurteilung auf, während bei anderen Probanden solche Effekte beobachtet werden konnten. Basierend auf den Ergebnissen jener Probandengruppen mit farbabhängigen Effekten (bzw. den entsprechenden Gesamtergebnissen, falls keine Gruppenbildung vorlag) können gewisse Tendenzen abgeleitet werden: unbunte Farben wie c_{17} („Grau“), c_3 („Dunkelgrau“) oder c_{35} („Schwarz“) waren bei diesen Personen häufig mit niedrigeren Lautheitsurteilen verbunden. Mit c_2 („Grün“) kombinierte Schalle wurden ebenfalls als leiser bewertet, während vor allem rötliche Farben wie c_1 („Hellrot“) oder c_7 („leuchtendes Magenta“) zu erhöhten Lautheitsurteilen führten. Die Größenordnung der Effekte scheint jedoch mit etwa 2% bis 3% der jeweiligen Skalenlänge recht gering auszufallen. Systematische Schallabhängigkeiten konnten nicht festgestellt werden. Die beschriebenen Farbeinflüsse und Gruppenbildungen traten in ähnlicher Weise sowohl bei der Verwendung von Gleichmäßig Anregendem Rauschen als auch bei Sinustönen auf, wobei keine Anzeichen auf systematische Pegel- oder Frequenzabhängigkeiten beobachtet werden konnten.

Als hilfreich bei der Vorhersage der Richtung des Farbeinflusses auf Lautheitsurteile hat sich der *schreiende Farbeindruck* (SF) erwiesen. Dieser wurde für verschiedene schreiende und nicht schreiende Farben experimentell ermittelt und kann mit Hilfe einer vor allem auf der Buntheit basierenden Berechnungsvorschrift nachgebildet werden. Die gegensätzliche Wirkung roter bzw. grauer Farben bei Lautheitsbewertungen stimmt mit dem hohen bzw. niedrigen schreienden Farbeindruck dieser Farben qualitativ überein.

Als weitere messtechnisch bestimmbare Eigenschaft audio-visueller Stimuli wurde deren Sichtbarkeit vor einem einfarbigen Hintergrund untersucht und mittels Reaktionszeitmessungen quantifiziert. Es zeigte sich, dass die Reaktion auf kombinierte audio-visuelle Stimuli überwiegend langsamer erfolgt als auf rein akustische Reize und zudem (bei gleichem akustischem Reiz) vom Betrag der Helligkeitsdifferenz zwischen Vorder- und Hintergrund des optischen Reizes abzuhängen scheint. Trotz der bekannten Korrelation zwischen Reaktionszeit und Lautheit konnten in nachfolgenden Versuchen jedoch nur bei wenigen Probanden systematische Einflüsse der Sichtbarkeit auf Lautheitsbeurteilungen gefunden

werden, wonach gut sichtbare audio-visuelle Stimuli zu höheren Lautheitsurteilen führen als schlecht sichtbare Stimuli. Bei Vorhandensein bunter Stimuli scheinen zudem die oben genannten Farbeffekte gegenüber Effekten der Sichtbarkeit zu dominieren, da (z. B. in Abbildung 3.12) auch Farben mit großer Helligkeitsdifferenz zum Hintergrund wie etwa Schwarz als leiser beurteilt wurden.

Eine Ablenkung der Versuchspersonen durch zusätzliche, während der Lautheitsbeurteilung durchzuführende Aufgaben ließ die Zahl der Probanden, die sich durch die präsentierten Farben beeinflussen ließen, stark zurückgehen. Die Darbietung von eingefärbten Objekten im Gegensatz zu abstrakten Farbflächen hingegen schien das Auftreten audio-visueller Interaktionen zu begünstigen.

4. Einfluss der Darbietungsweise audio-visueller Stimuli

In diesem Kapitel wird untersucht, ob die Art und Weise der Stimulusdarbietung einen Einfluss auf audio-visuelle Interaktionen ausübt. Es wird dabei der Hypothese nachgegangen, dass Darbietungsmethoden, die eine erhöhte Realitätsnähe versprechen, das Auftreten audio-visueller Interaktionen begünstigen. Hierbei berücksichtigte Methoden zur Erhöhung der Realitätsnähe beinhalten die Präsentation technischer Stimuli unter Verwendung von Bewegtbildern, die Vergrößerung der optischen Darbietung mittels Videoprojektion sowie den Einsatz virtueller Realitäten mit stereoskopischer Bilddarstellung in einer CAVE. Abschließend werden im Gegensatz dazu gezielt unrealistische Farbgebungen natürlicher Stimuli betrachtet.

4.1. Verwendung bewegter Bilder

Eine naheliegende Methode zur Erhöhung der Realitätsnähe eines präsentierten optischen Stimulus ist die Verwendung bewegter Bilder. Verschiedene Autoren haben den Einfluss bewegter Bilder auf die Geräuschbeurteilung untersucht. Wie z. B. Namba et al. (1997) berichten, bewerten Versuchspersonen Fahrzeugginnengeräusche weniger extrem, wenn gleichzeitig die bewegte Szenerie außerhalb des Fahrzeugs per Video dargeboten wird. Besonders laute Geräusche wurden also als leiser, besonders leise als lauter eingestuft. Auch Beurteilungen per Semantischem Differential können von gleichzeitig dargebotenen Videos beeinflusst werden (Suzuki et al. 2000). Verschiedene Alltagsgeräusche wurden hierbei mit und ohne Video bewertet. Es zeigte sich, dass der „Volume“-Faktor („powerful“, „loud“, „noisy“) in Kombination mit Bewegtbildern geringer ausfiel. Ein direkter Vergleich von Stand- und Bewegtbildern im Zusammenhang mit Lautheitsbeurteilungen wurde von Böhm et al. (2003) durchgeführt. Bewegtbilder scheinen im Vergleich zu Standbildern einen deutlicheren Einfluss aufzuweisen und zu geringeren Lautheitsurteilen zu führen.

Im Folgenden soll daher am Beispiel von Stand- und Bewegtbildern von Fahrzeugen untersucht werden, ob audio-visuelle Interaktionen durch die Verwendung von bewegten Bildern begünstigt werden (siehe auch Menzel et al. 2010a).

4.1.1. Lautheitsbeurteilung von Fahrzeugen bei Präsentation verschiedenfarbiger Standbilder

In einem Experiment in einer nicht verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1b, siehe Tabelle 2.1) wurden Standbilder eines Sportwagens in vier verschiedenen Farben dargeboten (siehe Abbildung 4.1, Menzel 2007, Menzel et al. 2008c). Die Originalfarbe des Fahrzeugs war c_{21} („British Racing Green“), zusätzlich wurde mit c_{18} („Rot“) eine wei-



Abbildung 4.1.: Präsentierte Bilder von Sportwagen in den Farben c_{18} („Rot“), c_{19} („Hellgrün“), c_{20} („Hellblau“), c_{21} („British Racing Green“)

tere typische Sportwagenfarbe gewählt. c_{19} („Hellgrün“) und c_{20} („Hellblau“) stellten im Vergleich dazu eher untypische Farben für das gezeigte Fahrzeug dar.

Eine komplette Einfärbung der gesamten Karosserie in einer einzigen Farbe würde zu einem sehr künstlichen Eindruck des abgebildeten Fahrzeugs führen. Daher wurde die Einfärbung so vorgenommen, dass Schatten und Reflexionen des Originalbildes weitestgehend erhalten bleiben. Dies hat notwendigerweise zur Folge, dass die farbmetrischen Eigenschaften der dargebotenen Farben nicht mehr über das gesamte Fahrzeug hinweg identisch sind. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass perceptiv ein einheitlicher Farbeindruck entsteht. Zur Definition der Farben und als Repräsentant für die Farbübersicht in Anhang A wurde der XYZ-Wert aus der Mitte der Fahrzeugtür gewählt.

Als akustischer Stimulus wurde die beschleunigte Vorbeifahrt eines Sportwagens verwendet. Der Schall hatte eine Dauer von 4 s und wurde mit vier verschiedenen Pegeln dargeboten. In Tabelle 4.1 sind die jeweiligen maximalen A-bewerteten Schalldruckpegel sowie die Perzentillautheiten N_5 , also jene Werte der Lautheit, die in 5 % der Zeit erreicht oder überschritten werden, dargestellt.

Tabelle 4.1.: Eigenschaften der verwendeten Sportwagenvorbeifahrtgeräusche

	$L_{AF,max} / \text{dB(A)}$	N_5 / sone
Variante 1	78	31.2
Variante 2	82	39.2
Variante 3	86	49.1
Variante 4	90	61.4

Die Lautheitsbeurteilung erfolgte per Freier Größenschätzung, die Urteile wurden über eine Tastatur eingegeben. Das Experiment wurde in einem zweiten Durchgang zur Verifizierung mit denselben Versuchspersonen wiederholt. Die Ergebnisse beider Durchgänge sind in Abbildung 4.2 gezeigt. Im ersten Durchgang ist zu erkennen, dass die unterschiedlichen Farben im Mittel über alle Versuchspersonen eine signifikante Beeinflussung des Lautheitsurteils zur Folge haben. Vor allem c_{19} („Hellgrün“) führt gegenüber dem mittleren Lautheitsurteil zu niedrigeren Bewertungen. Betrachtet man die Interquartilbereiche der relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile, ist auch für c_{18} („Rot“) und c_{21} („British Racing Green“) eine Tendenz zu höheren Urteilen zu sehen. Die Größenordnung des Farbeinflusses liegt im Bereich von 3%. In der Gesamtauswertung des zweiten Durch-

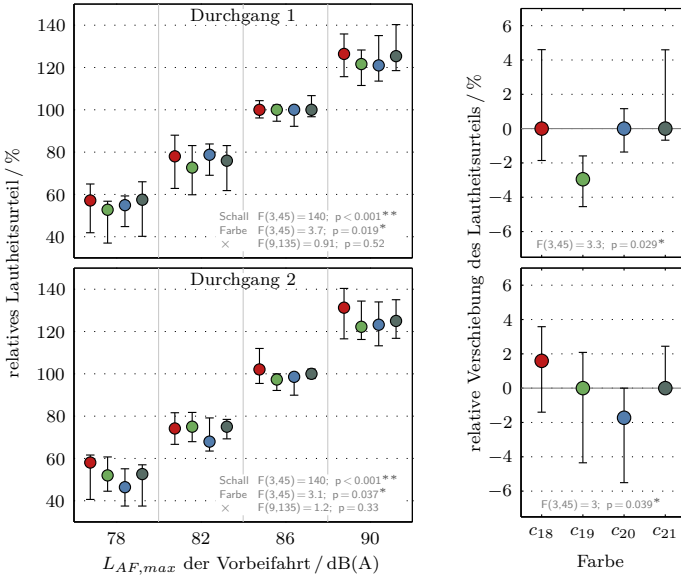


Abbildung 4.2.: Ergebnisse der Lautheitsbeurteilung von Sportwagenvorbeifahrten bei Präsentation eingefärbter Standbilder eines Sportwagens (links), sowie sich ergebende farbabhängige relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

gangs ergibt sich ein ähnliches Bild. Vor allem c_{18} („Rot“) scheint eine Erhöhung der Lautheitsurteile zur Folge zu haben, während c_{20} („Hellblau“) zu geringeren Urteilen führt. Die Spanne des relativen Farbeinflusses liegt bei 3.3 %.

In beiden Durchgängen fallen jedoch die recht großen Interquartilbereiche der Verschiebungen der Lautheitsurteile auf. Eine Betrachtung hinsichtlich möglicher Gruppenbildungen zeigt, dass die Ursache hierfür in einer deutlichen Gruppierung der Probanden zu finden ist (siehe Abbildung 4.3). Im ersten Durchgang zeigen sich zwei Probanden mit besonders ausgeprägten farbabhängigen Beeinflussungen ihrer Lautheitsurteile mit relativen Verschiebungen von -10 % bis 18 %, also einem Unterschied zwischen „leisester“ und „lautester“ Farbe von etwa 28 %. Die zweite Gruppe mit 14 Probanden entspricht dem schon in Abbildung 4.2 (oben) dargestellten Gesamtergebnis.

Auch im zweiten Durchgang ergaben sich zwei Gruppen von Versuchspersonen (Abbildung 4.3 unten). Die erste Gruppe mit zehn Probanden scheint durch die unterschiedlichen Farben praktisch nicht beeinflusst. Die zweite Gruppe mit sechs Probanden hingegen beurteilte die Lautheit der Sportwagenvorbeifahrt mit deutlicher Abhängigkeit von den präsentierten Bildern. Für diese Gruppe ergeben sich (hoch)signifikante Unterschiede in der Beurteilung bei c_{18} („Rot“) im Vergleich zu c_{19} („Hellgrün“) und c_{20} („Hellblau“)

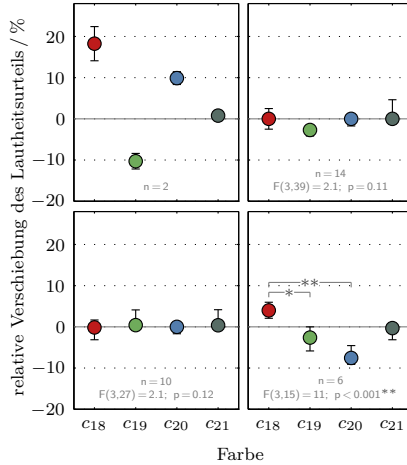


Abbildung 4.3.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Sportwagen in Kombination mit Standbildern, getrennt für Durchgang 1 (oben) und Durchgang 2 (unten)

mit einer Spanne der relativen Beeinflussungen von 11.6 %. Eine der beiden Personen aus Gruppe 1 des ersten Durchgangs befindet sich auch in dieser Gruppe, die andere hat im zweiten Durchgang keine deutlichen Effekte mehr gezeigt.

Auch wenn die Ergebnisse der beiden Durchgänge nicht exakt übereinstimmen, so deuten sie doch auf gewisse gemeinsame Effekte hin: im Vergleich mit untypischen Farben scheinen typische Sportwagenfarben oft höhere Lautheitsurteile zu bewirken. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass ein Fahrzeug schneller als Sportwagen identifiziert wird, wenn es eine bekannte und für sportliche Fahrzeuge gängige Farbe wie z. B. c_{18} („Rot“) hat. Fahrzeugen mit typischem Erscheinungsbild werden dann eventuell auch andere Eigenschaften wie ein besonders starker und damit lauter Motor zugeschrieben, was in Folge zu einer Beeinflussung des Lautheitsurteils führen könnte. Eine nähere Betrachtung solcher kognitiver Effekte erfolgt in Abschnitt 4.5.

Im Vergleich zu früheren Ergebnissen wie z. B. aus Patsouras et al. (2002) zeigen sich qualitativ – und zumindest für einige Versuchsteilnehmer auch quantitativ – ähnliche Farbeinflüsse, da die rote Farbe c_{18} („Rot“) mit höheren und die hellgrüne Farbe c_{19} („Hellgrün“) mit niedrigeren Lautheitsurteilen assoziiert ist.

4.1.2. Lautheitsbeurteilung von Fahrzeugen bei Präsentation verschiedenfarbiger Bewegtbilder

Für diesen und alle weiteren Versuche mit bewegten Bildern wurden Videosequenzen aufgenommen, bei denen der Beobachter von einem festen Standpunkt aus ein bewegtes

Objekt betrachtet (im Gegensatz z. B. zu Patsouras et al. 2003b mit bewegtem Beobachter). Die hier gezeigte Szene beinhaltet eine Landstraße mit einem vorbeifahrenden Kleintransporter (siehe Abbildung 4.4). Die Kamera war in einem festen Winkel auf die Straße



Abbildung 4.4.: Standbilder aus Videos präsentierter Fahrzeugvorbeifahrten in den Farben (von links oben nach rechts unten) c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{24} („Lindgrün“), c_{17} („Grau“).

gerichtet und wurde nicht mit dem Fahrzeug mitbewegt. Das Fahrzeug wurde in den Farben c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{17} („Grau“) eingefärbt. c_1 ($SF = 1$), c_6 ($SF = 1$) und c_7 ($SF = 0.8$) stellen hierbei schreiende, c_{17} ($SF = 0.01$) eine nicht schreiende Farbe mit entsprechender Erwartung erhöhter bzw. verringerter Lautheitsurteile dar. c_{24} ist aus Patsouras et al. (2002) entnommen und hat dort (als Lindgrün eingefärbter ICE mit einem geringen schreienden Farbeindruck von $SF = 0.3$) ebenfalls zu einem vergleichsweise niedrigen Lautheitsurteil geführt. Die fünf unterschiedlich eingefärbten Videos wurden mit den Geräuschen sechs verschiedener PKW-Vorbeifahrten kombiniert, die an gleicher Stelle aufgenommen wurden (siehe Tabelle 4.2). Der resultierende audio-visuelle Stimulus hatte eine Dauer von etwa 5 s.

Tabelle 4.2.: Eigenschaften der verwendeten PKW-Vorbeifahrtgeräusche

	$L_{AF,max} / \text{dB(A)}$	N_5 / sone
PKW1	77.3	25.3
PKW2	76.7	23.4
PKW3	74.7	21.5
PKW4	74.9	21.1
PKW5	74.7	20.5
PKW6	72.8	17.7

Das Experiment fand in einer verdunkelten Hörkabine statt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1), es wurde Freie Größenschätzung zur Abgabe der Lautheitsurteile verwendet, die in Abbildung 4.5 dargestellt sind. Betrachtet man die relativen Lautheitsurteile,

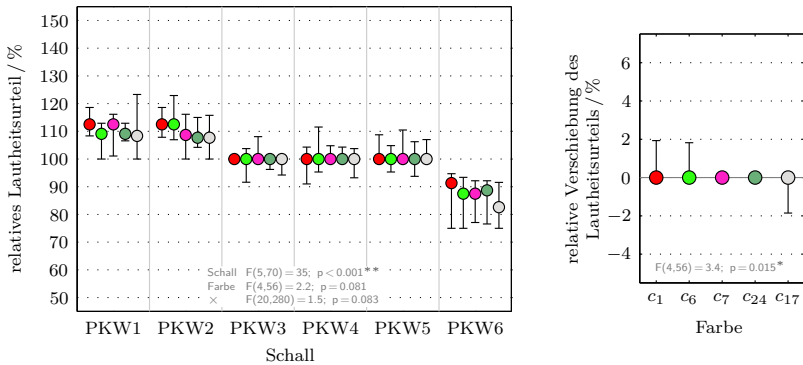


Abbildung 4.5.: Ergebnisse der Lautheitsbeurteilung von PKW-Vorbeifahrten bei Präsentation eingefärbter Videos eines Kleintransporters (links), sowie sich ergebende farbabhängige relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

so zeigen sich nur bei der Hälfte der Schalle farbabhängige Unterschiede im Median der Antworten. Sind allerdings Unterschiede vorhanden, weisen diese die zuvor schon beobachtete Tendenz schreiender Farben auf, ein erhöhtes Lautheitsurteil zur Folge zu haben. Dies sieht man auch in den über alle Schalle gemittelten relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile. Da die Berechnung der statistischen Signifikanz auf arithmetischen Mittelwerten beruht, ergibt sich in diesem speziellen Fall ein signifikanter Einfluss der Farbe, obwohl sich die Mediane nicht unterscheiden.

Auch die Ergebnisse dieses Experiments weisen Anzeichen einer Gruppenbildung auf (Abbildung 4.6). Ähnlich wie bei Standbildern von Sportwagen (siehe Abbildung 4.3)

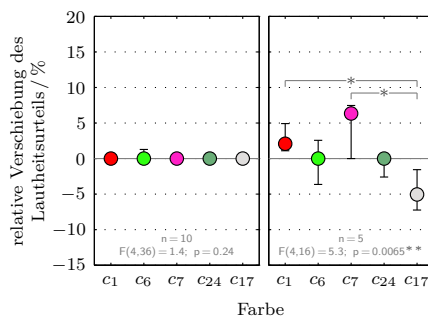


Abbildung 4.6.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von PKW in Kombination mit Bewegtbildern

ergeben sich zwei Gruppierungen von Probanden, wobei die Mehrzahl (Gruppe 1 mit zehn Personen) im Median keinen Farbeinfluss zeigt. Die zweite Gruppe mit fünf Personen weist deutlichere farbabhängige Verschiebungen in ihren Lautheitsurteilen auf, die die Erwartungen aus den Untersuchungen zu schreienden Farben (Abschnitt 3.3) bestätigen: c_1 („Hellrot“) und c_7 („leuchtendes Magenta“) führen zu Erhöhungen der Urteile um bis zu 6.3 %, c_{17} („Grau“) führt zu 5 % niedrigeren Urteilen, sodass sich eine Gesamtspanne von 11.3 % ergibt.

4.1.3. Vergleich

Verglichen mit den Daten aus Untersuchungen mit Standbildern ergeben sich also bei Verwendung von Bewegungsbildern keine wesentlich verstärkten audio-visuellen Interaktionen. Für beide Darbietungsvarianten weist etwa ein Drittel der Probanden deutliche Farbeinflüsse auf mit (hoch)signifikanten Unterschieden der relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile von etwa 11 % bis 12 %. Unter den hier beschriebenen Bedingungen konnten also keine Änderungen in der Ausprägung des Farbeinflusses auf die Lautheitsbeurteilung abhängig von der Bewegung des optischen Stimulus festgestellt werden.

4.2. Vergrößerung der optischen Darbietung

Durch die Verwendung eines Bildschirms für die Präsentation der optischen Stimuli ergeben sich Farbreize mit vergleichsweise kleinen Abmessungen. Eine Vergrößerung des Darbietungsmediums und damit der Gesamtfläche des Farbreizes könnte, eventuell abhängig vom Bildinhalt, zu einer erhöhten Realitätsnähe und verstärkten audio-visuellen Interaktionen führen. In diesem Abschnitt wird daher die üblicherweise verwendete Bildschirmdarbietung mit einer vergrößerten Darstellung mittels Videoprojektion verglichen (siehe auch Menzel et al. 2010a).

Es wurden Videosequenzen eines vorbeifahrenden Zuges verwendet (Abbildung 4.7). Die Züge waren, wie die Fahrzeuge in Abschnitt 4.1.2, in den Farben c_1 („Hellrot“),

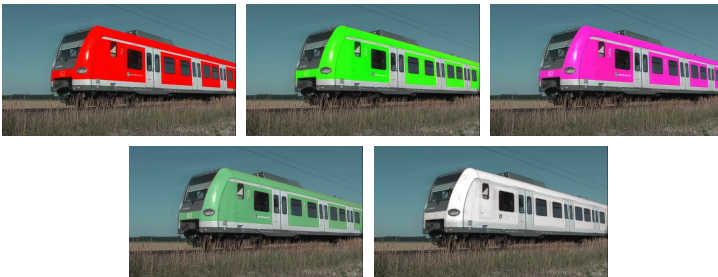


Abbildung 4.7.: Standbilder aus Videos präsentierter Zugvorbeifahrten in den Farben (von links oben nach rechts unten) c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{24} („Lindgrün“), c_{17} („Grau“).

c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{17} („Grau“) eingefärbt. Die Kamera wurde bei der Aufnahme nicht mit dem vorbeifahrenden Zug mitbewegt. Sechs verschiedene Zugvorbeifahrten dienten als akustische Stimuli (siehe Tabelle 4.3). Sie hatten eine Dauer von etwa 5 s. Die Lautheitsbeurteilung erfolgte mittels Freier Größenschätzung.

Tabelle 4.3.: Eigenschaften der verwendeten Zugvorbeifahrtgeräusche

	$L_{AF,max} / \text{dB(A)}$	N_5 / sones
Zug1	85.3	31.2
Zug2	76.6	31.1
Zug3	78.5	28.6
Zug4	76.5	24.9
Zug5	72.9	21.8
Zug6	71.3	20.4

4.2.1. Präsentation von Bewegungsbildern auf einem Bildschirm

Im ersten Experiment wurden die Videosequenzen in einer verdunkelten Hörkabine mittels kalibriertem Bildschirm dargeboten (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1). Abbildung 4.8 zeigt die Ergebnisse der Lautheitsbeurteilungen aller Versuchspersonen. Für

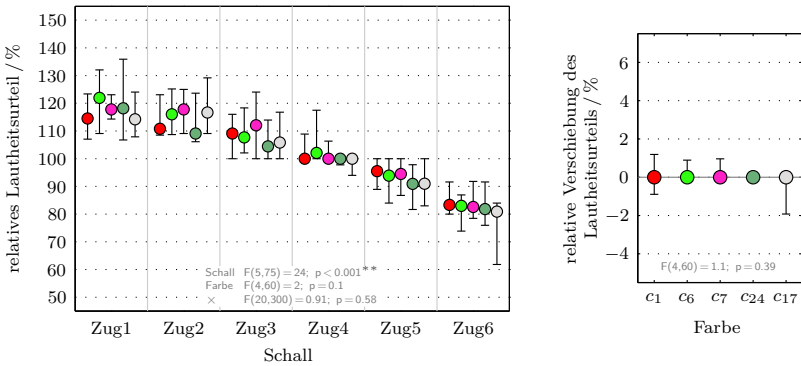


Abbildung 4.8.: Ergebnisse der Lautheitsbeurteilung von Zugvorbeifahrten bei Präsentation eingefärbter Videosequenzen auf einem Bildschirm (links), sowie sich ergebende farbabhängige relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

die beiden leisesten Züge ergeben sich im Median die bekannten Farbeinflüsse, bei den lauterer Schallen ist jedoch kein einheitliches farbabhängiges Verhalten erkennbar. Im

Mittel über alle Schalle resultieren die rechts dargestellten relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile, die keinen Farbeinfluss erkennen lassen.

Ähnlich wie auch schon im vorherigen Abschnitt lassen sich die Probanden in mehrere Gruppen mit jeweils einheitlichen farbabhängigen Lautheitsurteilen trennen. Es ergeben sich drei Gruppen mit neun, vier und drei Personen (Abbildung 4.9). Die erste Gruppe weist im Mittel keine Farbeinflüsse auf. Die zweite Gruppe ist vergleichbar mit Gruppe 2 aus Abbildung 4.6. Versuchspersonen dieser Gruppe beurteilten Züge der Farben c_1 („Hellrot“) und c_7 („leuchtendes Magenta“) als lauter im Vergleich zu Zügen der Farbe c_{17} („Grau“) mit einem Unterschied der Verschiebung der Lautheitsurteile von 13 %. In der dritten Gruppe finden sich Versuchsteilnehmer, die Züge der Farbe c_6 („leuchtendes Grün“) als lauter beurteilt haben.

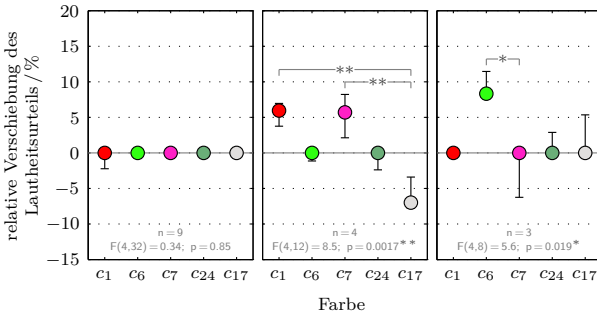


Abbildung 4.9.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Zügen in Kombination mit Bildschirmarbeitsdarbietung von Bewegtbildern

4.2.2. Präsentation von Bewegtbildern auf einer Leinwand

Die fünf Videosequenzen aus dem vorherigen Abschnitt (Abbildung 4.7) wurden nun in einem verdunkelten Laborraum über einen Videoprojektor (Epson EMP-TW700) auf eine Leinwand mit 2.6 m Bildhöhe projiziert (Versuchsumgebung 2, siehe Tabelle 2.1). Der Projektor war auf die gleichen Werte wie der zuvor verwendete Bildschirm kalibriert (siehe Abschnitt 2.3.1). Der Betrachtungsabstand betrug 2.4 m. Die Darbietung der sechs Zugvorbeifahrtgeräusche (Tabelle 4.3) erfolgte weiterhin diotisch über freifeldentzerrte Kopfhörer.

Wie in Abbildung 4.10 zu sehen ist, zeigt sich kein systematischer Einfluss der Farbe der auf der Leinwand dargebotenen Zugvorbeifahrten auf die gleichzeitig abgegebenen Lautheitsurteile. Lediglich die Interquartilbereiche der relativen Verschiebungen der Urteile deuten die schon in vorherigen Abschnitten beobachteten Tendenzen an. Diese vergleichsweise großen Streuungen stammen von einer deutlichen Gruppenbildung, die in Abbildung 4.11 dargestellt ist. Zehn Personen weisen dabei im Median keine Farbeinflüsse auf, während sechs Probanden Zugvorbeifahrten in Kombination mit Zügen der

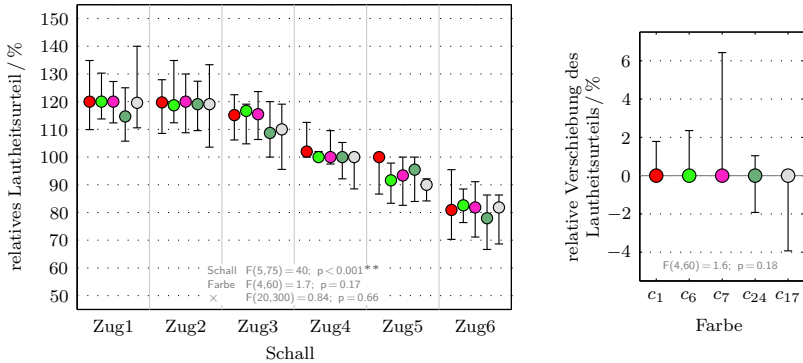


Abbildung 4.10.: Ergebnisse der Lautheitsbeurteilung von Zugvorbeifahrten bei Präsentation eingefärbter Videosequenzen auf einer Leinwand (links), sowie sich ergebende farbabhängige relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

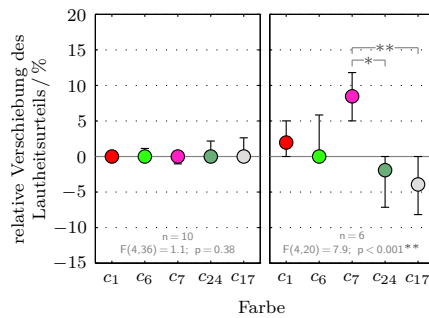


Abbildung 4.11.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Zügen in Kombination mit Leinwanddarbietung von Bewegtbildern

Farbe c_7 („leuchtendes Magenta“) im Mittel als lauter im Vergleich zu Zügen der Farbe c_{17} („Grau“) bewerten mit einem Unterschied der Lautheitsurteile von 12.4 %.

4.2.3. Vergleich

Im direkten Vergleich der Lautheitsbeurteilung von Zugvorbeifahrten mit identischer Schalldarbietung, aber variierender Größe der optischen Präsentation zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich der Beeinflussung der Lautheitsurteile. In beiden Fällen waren ca. 60 % der Probanden unbeeinflusst von den wechselnden optischen Stimuli. Probanden, die einen Farbeinfluss aufweisen, zeigen hochsignifikante Unterschiede der relativen Verschiebungen ihrer Lautheitsurteile von etwa 12 % bis 13 %, wobei die in Abschnitt 3.3 beobachteten Tendenzen bestätigt wurden, dass schreiende Farben, hier c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“) und c_7 („leuchtendes Magenta“), eher zu erhöhten Lautheitsurteilen führen, während nicht schreiende Farben, hier c_{17} („Grau“), zu einer Verringerung führen. Über c_{24} („Lindgrün“) lassen die Ergebnisse keine eindeutige Aussage zu.

Die individuelle Beeinflussbarkeit scheint dabei relativ stabil zu sein. Eine detailliertere Analyse der Gruppenzugehörigkeiten zeigt einerseits, dass bis auf eine Person alle von der Bildschirmdarbietung unbeeinflussten Probanden auch von der Leinwanddarbietung nicht beeinflusst waren. Andererseits sind alle Personen aus Gruppe 2 bei Bildschirmdarbietung (Abbildung 4.9 Mitte) auch in Gruppe 2 bei Leinwanddarbietung (Abbildung 4.11 rechts) vertreten. Auf die spezielle Zusammensetzung der Gruppen, etwa hinsichtlich Geschlecht, wird in Kapitel 8 näher eingegangen.

4.3. Verwendung akustischer und optischer virtueller Realitäten in einer CAVE

Als weitere Variante der optischen Stimuluspräsentation wurde die Darbietung innerhalb einer CAVE (CAVE Automatic Virtual Environment) untersucht. Hierbei ist das Ziel, mittels stereoskopischer Projektion auf mehrere Leinwände eine optische virtuelle Realität zu schaffen. Der in dieser Arbeit eingesetzte Versuchsaufbau besteht aus drei Leinwänden (jeweils $2.90\text{ m} \times 1.90\text{ m}$), die vor bzw. neben der Versuchsperson positioniert sind (siehe Abbildung 4.12). Um die stereoskopischen Bilder zu erzeugen, werden pro Leinwand zwei Videoprojektoren eingesetzt, die über spektrale Verschiebung Bilder mit leicht unterschiedlicher Farbe für das rechte bzw. linke Auge erzeugen. Über eine Brille wird diese spektrale Verschiebung wieder rückgängig gemacht, sodass die Augen des Betrachters das jeweils korrekte Bild sehen. Diese Methode bedingt, dass die Projektoren eine fest vorgegebene Farbkalibrierung verwenden müssen, und somit die an anderen Stellen in dieser Arbeit eingesetzte Farbkalibrierung nicht angewendet werden kann. Die optische Darstellung wird zusätzlich über ein Trackingsystem dynamisch an die Position und Blickrichtung des Benutzers angepasst.

Im Folgenden wird die optische virtuelle Realität mit zwei unterschiedlichen akustischen Darbietungsweisen kombiniert. Zum einen wird, wie in den vorherigen Experimenten, dio-

tische Schalldarbietung verwendet, zum anderen wird eine dynamische binaurale Technik eingesetzt.

4.3.1. Kombination optischer virtueller Realitäten mit diotischer Schalldarbietung

Als optischer Stimulus wurde das 3D-Modell eines Fahrzeugs verwendet (Abbildung 4.12). Da wie erwähnt die Farbkalibrierung des Projektionssystems nicht verändert werden konnte, wurde die Farbgebung der Fahrzeuge per Augenschein an die Farben c_1 („Hellrot“), c_6 („leuchtendes Grün“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{17} („Grau“) aus vorherigen Versuchen zu Bewegtbildern angepasst. Es resultieren daraus die neuen Farben c_{26} , c_{27} , c_{28} , c_{29} und c_{30} . Da bei der Projektion das Farbspektrum verschoben wird, ist die Angabe von messtechnisch bestimmten XYZ-Werte für diese Farben nicht sinnvoll. Das Fahrzeug bewegte sich von rechts nach links durch das Blickfeld der Versuchsperson, der wahrgenommene Abstand lag bei etwa 2 bis 3 m. Die optische Darbietung wurde mit diotischer Wiedergabe der Schalle PKW2 bis PKW6 aus Tabelle 4.2 kombiniert (Versuchsumgebung 3a, siehe Tabelle 2.1).

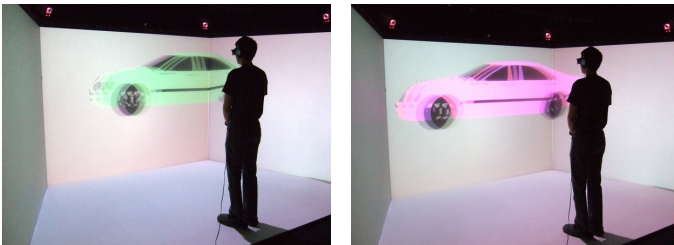


Abbildung 4.12.: Beispiele für in einer CAVE dargebotene optische Stimuli (in der Bewegung fotografiert)

Die Versuchspersonen standen innerhalb der CAVE und beurteilten die Lautheit der Fahrzeugschalle per Freier Größenschätzung mit mündlicher Urteilsabgabe. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten war eine Abdunkelung und Schallisolierung der Versuchsumgebung nicht vollständig möglich.

Wie Abbildung 4.13 (links) zeigt, ergeben sich relative Lautheitsurteile für die Schalle PKW2 bis PKW6, die gut mit den Urteilen bei Bildschirmdarbietung übereinstimmen (vgl. Abbildung 4.5). Dies war zu erwarten, da sich die akustische Darbietungsweise nicht geändert hat. Bezüglich des Farbeinflusses erkennt man in der rechten Hälfte von Abbildung 4.13, dass im Mittel über alle Probanden keine Effekte auftraten. Eine Analyse der Gruppenbildung lässt Hinweise auf zwei Hauptgruppen und einen Ausreißer erkennen (Abbildung 4.14). Die erste Gruppe mit sieben Probanden weist keine Beeinflussbarkeit durch die präsentierten Farben auf. Drei Personen bilden eine zweite Gruppe, die bei c_{26} („Hellrot“) und c_{28} („leuchtendes Magenta“) entgegen der bisher beobachteten

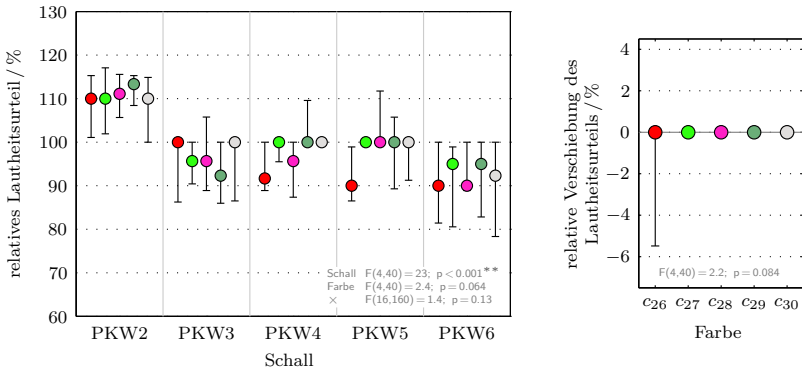


Abbildung 4.13.: Lautheitsbeurteilung von diotisch dargebotenen Fahrzeugschall bei stereoskopischer Betrachtung eingefärbter Fahrzeuge in einer CAVE (links) sowie resultierende relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts).

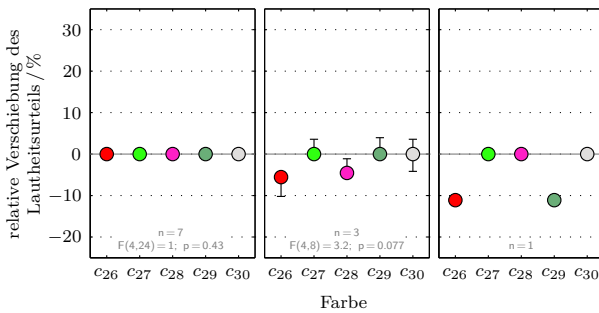


Abbildung 4.14.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von diotisch dargebotenen Fahrzeugschall bei stereoskopischer Betrachtung eingefärbter Fahrzeuge in einer CAVE

Tendenzen niedrigere Lautheitsurteile abgab. Die Clusteranalyse identifizierte zusätzlich eine Versuchsperson, die relativ große Effekte bei c_{26} („Hellrot“) sowie c_{29} („Lindgrün“) aufwies.

4.3.2. Kombination optischer virtueller Realitäten mit Schalldarbietung mittels Binauraler Raumsynthese

Im zweiten Teil dieser Versuchsreihe wurde die optische Darbietung der CAVE mit Schallwiedergabe über ein kopfhörerbasiertes System zur Binauralen Raumsynthese (BRS) nach Völk et al. (2007) kombiniert (Versuchsumgebung 3b). Mittels BRS ist es möglich, über dynamisch wechselbare binaurale Raumimpulsantworten virtuelle Schallquellen zu erzeugen und im Raum zu positionieren. Im vorliegenden Fall wurde diese Technik dazu eingesetzt, den Hörereignisort der zu beurteilenden Schalle an den visuell wahrgenommenen Ort der Fahrzeuge dynamisch anzupassen. Dabei wurden über ein Trackingsystem auch eventuelle Kopfdrehungen der Probanden berücksichtigt. Der Wiedergabepegel wurde per Lautheitsabgleich mit freifeldentzerrten Kopfhörern eingestellt.

Ein Vergleich der sich daraus ergebenden relativen Lautheitsurteile (Abbildung 4.15 links) mit den Ergebnissen bei diotischer Darbietung (Abbildung 4.13 links) lässt eine gute Übereinstimmung erkennen. Es fällt jedoch auf, dass vor allem bei PKW4 wesentlich geringere Streuungen auftreten. Globale Farbeffekte sind nicht zu beobachten (Abbildung 4.15 rechts).

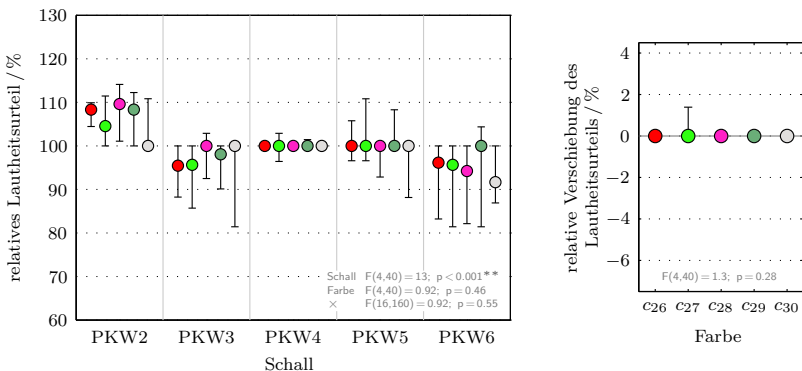


Abbildung 4.15.: Lautheitsbeurteilung von per Binauraler Raumsynthese dargebotenen Fahrzeugschallen bei stereoskopischer Betrachtung eingefärbter Fahrzeuge in einer CAVE (links) sowie resultierende relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts).

Wie im zuvor beschriebenen Versuch sind auch hier drei Gruppen zu erkennen (Abbildung 4.16): sieben Probanden, die im Median keine farbabhängigen Unterschiede ihrer Lautheitsbewertungen erkennen lassen, zwei Probanden, die Schalle kombiniert mit c_{27} („leuchtendes Grün“) als lauter und kombiniert mit c_{30} („Grau“) als leiser beurteilten

sowie eine Person, die einen starken Effekt nur bei c_{27} („leuchtendes Grün“) zeigte (es handelt sich hierbei nicht um dieselbe Versuchsperson wie in Abbildung 4.14 rechts).

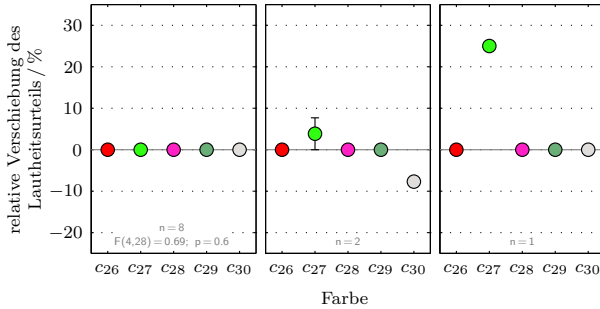


Abbildung 4.16.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von per Binauraler Raumsynthese dargebotenen Fahrzeugschallen bei stereoskopischer Betrachtung eingefärbter Fahrzeuge in einer CAVE

4.3.3. Diskussion

Die hier vorgestellten Untersuchungen mit stereoskopischer Präsentation eingefärbter Fahrzeugmodelle in Kombination mit diotischer und dynamischer binauraler Schallwiedergabe lassen keine Rückschlüsse auf verstärkte audio-visuelle Interaktionen bei Verwendung einer CAVE zu. Trotz des dreidimensionalen Erscheinungsbildes der dargebotenen Stimuli könnte die Tatsache, dass es sich um computergenerierte Grafiken handelte, gegenüber der Verwendung von Videoaufnahmen echter Szenarien zu einer Verringerung der Realitätsnähe gekommen sein. Auch bestand aufgrund der technischen Gegebenheiten nicht die Möglichkeit, eine zur Bildschirmdarbietung vergleichbare Farbproduktion sicherzustellen. Bedingt durch die fehlende Möglichkeit zur Abdunklung und Schallisolierung des Versuchsraums kann zudem das Vorhandensein störender Licht- und Schallquellen nicht ausgeschlossen werden.

4.4. Lautheit natürlicher Stimuli mit unnatürlicher Farbgebung

Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich optische Stimuli mit Darstellungen besonders unrealistischer Szenen in spezieller Weise auf audio-visuelle Interaktionen auswirken (siehe auch Menzel et al. 2010a). Es bieten sich hierfür Darstellungen natürlicher Szenen an, die zusätzlich in weiteren, unnatürlichen Farben präsentiert werden. Als natürlich vorkommende Szene wurde ein Wasserfall gewählt. Um einen zunehmend unrealistischeren Eindruck zu erwecken wurde eine kurze Videosequenz eines Wasserfalls in der eventuell noch als plausibel einzustufenden Farbe c_{24} („Lindgrün“) eingefärbt (Abbildung 4.17). Als unrealistisch können hingegen die Einfärbungen in c_1 („Hellrot“), c_7 („leuchtendes



Abbildung 4.17.: Standbilder aus Videos präsentierter Wasserfälle in den Farben (von links oben nach rechts unten) c_1 („Hellrot“), c_7 („leuchtendes Magenta“), c_{20} („Hellblau“), c_{24} („Lindgrün“), Original.

Magenta“ und c_{20} („Hellblau“) gelten. Zusammen mit dem originalen Erscheinungsbild des Wasserfalls ergeben sich so fünf Videosequenzen. Tonaufnahmen des im Video gezeigten sowie von fünf weiteren Wasserfällen wurden als akustische Stimuli verwendet (siehe Tabelle 4.4). Die Schalle hatten eine Dauer von etwa 5 s. Die Lautheitsbeurteilung erfolgte mittels Freier Größenschätzung in einer verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1).

Tabelle 4.4.: Eigenschaften der verwendeten Geräusche von Wasserfällen

	$L_{A,eq} / \text{dB(A)}$	N_5 / sone
WF1	72.7	29.5
WF2	69.4	24.0
WF3	68.2	22.1
WF4	66.2	19.0
WF5	64.9	18.0
WF6	62.1	14.5

Eine systematische Beeinflussung der abgegebenen Lautheitsurteile durch die unterschiedlich eingefärbten Wasserfälle konnte im Mittel über alle Versuchspersonen nicht festgestellt werden (Abbildung 4.18). Bei näherer Betrachtung individueller Effekte zeigten sich wiederum zwei Gruppierungen von Versuchspersonen (Abbildung 4.19). Neun Probanden ließen sich im Mittel über alle dargebotenen Wasserfallgeräusche von den Farben nicht beeinflussen, während fünf Personen Verschiebungen in ihren Lautheitsurteilen aufwiesen. Hierbei fiel auf, dass drei dieser fünf Probanden in zuvor durchgeführten Versuchen (siehe z. B. Abbildung 4.11) keine Farbeffekte zeigten. Eventuell könnte hier die ungewöhnliche Farbgebung die Aufmerksamkeit stärker auf den optischen Stimulus gelenkt haben.

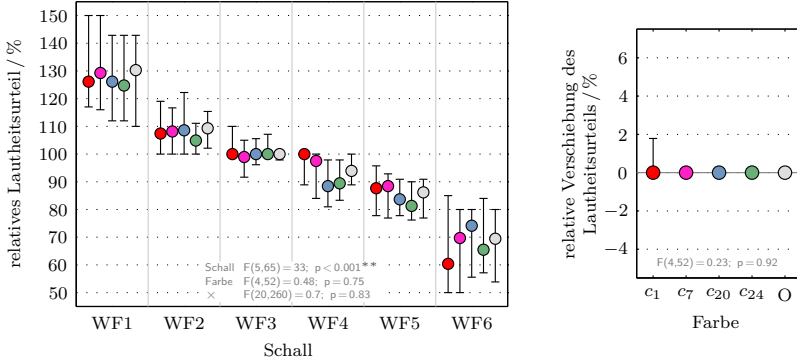


Abbildung 4.18.: Ergebnisse der Lautheitsbeurteilung von Wasserfällen bei Präsentation von realistisch und unrealistisch eingefärbter Videosequenzen (links), sowie sich ergebende farbabhängige relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

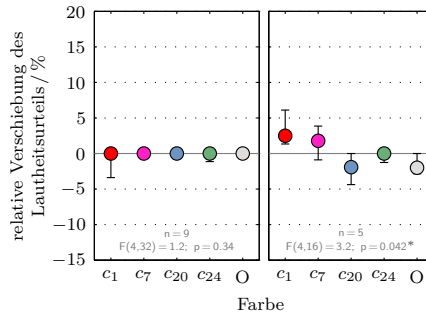


Abbildung 4.19.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Wasserfällen in Kombination mit Videosequenzen mit realistischer und unrealistischer Farbgebung

4.5. Kognitive Effekte

Kognitive Effekte könnten bei der Lautheitsbeurteilung audio-visueller Stimuli von Bedeutung sein, wenn untypische bzw. unrealistische Farbgebungen verwendet werden. Bestimmte Einfärbungen könnten das Erkennen eines Objekts erleichtern und eine Erwartungshaltung bezüglich akustischer Eigenschaften hervorrufen (siehe Abschnitt 4.1.1, auch Yanagisawa et al. 2010). Unrealistische Farben könnten zudem die Aufmerksamkeit auf das Objekt lenken (siehe Abschnitt 4.4). Im Folgenden wird versuchsübergreifend diskutiert, ob Anzeichen für einen Zusammenhang zwischen Plausibilität der Einfärbung audio-visueller Stimuli und der Lautheitsbewertung bestehen.

In Tabelle 4.5 sind für Versuche mit Darstellungen realer Szenarien die Ergebnisse von Probandengruppen mit signifikanten Farbeinflüssen aufgeteilt nach realistischen (bzw. typischen) und unrealistischen (bzw. untypischen) Farben gezeigt. Pro Bildinhalt sind

Tabelle 4.5.: Übersicht über Farbeffekte bei Experimenten mit Darstellungen realer Szenarien. Für den jeweils gezeigten Bildinhalt werden realistische bzw. typische Farbgebungen mit unrealistischen bzw. untypischen Farbgebungen verglichen. Ergebnisse von Probandengruppen mit signifikanten Verschiebungen ihrer Lautheitsurteile sind unterhalb der Farbbeispiele in Form von Symbolen gezeigt (↑: positive Verschiebung, ↓: negative Verschiebung, o: keine Verschiebung).

Bildinhalt	realistisch	unrealistisch	Abb.
Sportwagen	c_{18} c_{21}  ↑ 0	c_{19} c_{20}  ↓ ↓	4.3
Kleintransporter	c_1 c_{24} c_{17}  ↑ 0 ↓	c_6 c_7  0 ↑	4.6
S-Bahn	c_1  ↑↑0	c_6 c_7 c_{24} c_{17}  ↑00 ↑↑0 00↓ 0↓↓	4.9, 4.11
Wasserfall	c_{24} O  0 ↓	c_1 c_7 c_{20}  ↑ ↑ ↓	4.19

unterhalb der jeweiligen Farben die bei Gruppen mit varianzanalytisch signifikanten Farbeffekten beobachteten Verschiebungen der Lautheitsurteile als Tendenz angegeben (↑: positive Verschiebung, ↓: negative Verschiebung, o: keine Verschiebung). Bei Darstellungen einer S-Bahn wurden mehrere Gruppen mit signifikanten Ergebnissen ermittelt, daher sind in diesen Fällen mehrere Tendenzen pro Farbe zu sehen. Man erkennt, dass sowohl in Fällen mit realistischer als auch mit unrealistischer Farbgebung Beeinflussungen der Lautheitsbewertung mit verschiedenen Tendenzen auftreten. Realistisch eingefärbte Objekte scheinen jedoch seltener mit einer Verringerung des Lautheitsurteils verbunden zu

sein. In Tabelle 4.6 sind die absoluten Häufigkeiten (Anzahl der Versuchspersonen in den jeweiligen Gruppen) der Kombinationen aus Tendenz der Verschiebung und Plausibilität der Einfärbung gezeigt.

Tabelle 4.6.: Zusammenhang zwischen relativer Verschiebung des Lautheitsurteils und Plausibilität der Einfärbung. Gezeigt sind die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Kombinationen sowie die Zeilen- und Spaltensummen [$\chi^2 = 4.4$; $p = 0.11$]

	realistisch	unrealistisch	
positive Verschiebung	21	37	58
keine Verschiebung	25	31	56
negative Verschiebung	10	39	49
	56	107	163

Über einen $k \cdot l \cdot \chi^2$ -Test nach Bortz (1993) kann bestimmt werden, ob die beobachteten Häufigkeiten signifikant von den aufgrund der Zeilen- und Spaltensummen erwarteten Häufigkeiten abweichen. Die zuvor festgestellte Tendenz, dass realistische Einfärbungen seltener zu Verringerungen des Lautheitsurteils führen, findet sich auch hier: nur bei zehn Probanden zeigte sich bei Betrachtung einer realistischen Einfärbung eine negative Verschiebung der Lautheitsurteile. Diese Tendenz ist jedoch nicht signifikant [$\chi^2 = 4.4$; $p = 0.11$]. Bei unrealistischen Farben treten alle Verschiebungen praktisch gleich häufig auf.

Eine allgemeine Aussage, dass eine realistische Farbgebung zu einer bestimmten Lautheitsbeeinflussung führt, kann anhand der hier vorgestellten Daten also nicht getroffen werden. Vielmehr scheint eine passende oder unpassende Farbgebung, je nach dargestelltem Bildinhalt, sowohl zu Erhöhungen als auch zu Verringerungen der Lautheitsbewertung führen zu können.

4.6. Diskussion

Eine Veränderung der Darbietungsweise der audio-visuellen Stimuli hinsichtlich Verwendung bewegter Bilder oder Vergrößerung des optischen Stimulus ergab keine Anzeichen auf vermehrtes Auftreten oder vergrößerte Effekte audio-visueller Interaktionen. In allen untersuchten Fällen ergaben sich (wie auch schon in Kapitel 3) zwei oder mehr Gruppierungen von Versuchsteilnehmern, die jeweils unterschiedlich auf die dargebotenen Farben reagierten. Üblicherweise zeigten dabei etwa 60 % der Probanden im Mittel keine Farbeinflüsse in den zugehörigen Verschiebungen der Lautheitsurteile. Jene Versuchspersonen, die sich von Farben (hoch)signifikant beeinflussen ließen, wiesen relative Verschiebungen der Lautheitsurteile mit einer Gesamtspanne des Farbeinflusses von durchschnittlich 12 % auf. Die Farben c_1 („Hellrot“) und c_7 („leuchtendes Magenta“) verursachten dabei vermehrt Erhöhungen des Lautheitsurteils, c_{17} („Grau“) und c_{19} („Hellgrün“) waren hauptsächlich mit niedrigeren Bewertungen verknüpft, wie es auch schon bei der Verwendung von synthetischen Stimuli beobachtet wurde. Teils konnten stabile Gruppenzusammensetzungen

gefunden werden, also Probanden, die in mehreren Versuchen vergleichbare Farbeinflüsse aufwiesen. Zusätzlich waren optische Stimuli mit unrealistischer Farbgebung in Einzelfällen in der Lage, Farbeinflüsse bei zuvor unbeeinflussten Versuchspersonen hervorzurufen. Eine allgemeingültige Aussage über die Wirkung realistischer bzw. unrealistischer Einfärbungen lässt sich jedoch nicht treffen, da hierbei der im Einzelfall dargestellte Bildinhalt berücksichtigt werden muss.

5. Einfluss visueller und auditiver Präferenzen

Die bisher untersuchten Einflüsse auf audio-visuelle Interaktionen zwischen Farbe und Lautheitsurteil, etwa farbmimetrische Eigenschaften oder Art der Stimulusdarbietung, basieren auf physikalisch messbaren Größen, die allen Probanden in identischer Weise dargeboten werden. Das wiederholt beobachtete Auftreten von Gruppenbildung zeigt jedoch, dass Versuchspersonen individuell unterschiedlich auf kombinierte audio-visuelle Reize reagieren. Deshalb sollen in diesem Kapitel verstärkt individuelle Eigenschaften der Probanden berücksichtigt werden, die die Lautheitsbeurteilung bei Farbbetrachtung beeinflussen könnten. Im ersten Abschnitt werden individuelle Farbpräferenzen ermittelt und mit Lautheitsbeurteilungen korreliert. Der zweite Abschnitt stellt Untersuchungen der individuell als angenehm empfundenen Lautheit in Abhängigkeit der Umgebungshelligkeit sowie der Farbe vor.

5.1. Farbpräferenzen

In den Kapiteln 3 und 4 wurde dargestellt, dass bestimmte Untergruppen der untersuchten Probanden von dargebotenen Farben in ihren Lautheitsurteilen beeinflusst werden konnten. Trotz Berücksichtigung von Gruppenbildungen waren jedoch mehr oder weniger deutliche interindividuelle Schwankungen auch innerhalb der Gruppierungen sichtbar. Als eine mögliche Ursache für diese interindividuellen Unterschiede wird im Folgenden die individuelle Farbpräferenz untersucht. Es wird also der Frage nachgegangen, ob besonders beliebte oder besonders unbeliebte Farben einen speziellen Einfluss auf die Verschiebung des Lautheitsurteils ausüben (siehe auch Menzel et al. 2010b).

5.1.1. Bestimmung individueller Farbpräferenzen

Für diese Experimente wurden zehn Farben ausgewählt, darunter (laut Heller 1998) besonders beliebte und unbeliebte Farben: c_{35} („Schwarz“), c_{31} („Dunkelblau“), c_2 („Grün“), c_{32} („Braun“), c_{33} („Violett“), c_1 („Hellrot“), c_9 („Orange“), c_{13} („Rosa“), c_8 („leuchtendes Gelb“) und c_{34} („Weiß“). Als Kontext wurden hierbei reine Farbflächen, Bilder eingefärbter Objekte (iPods) sowie zwei verschiedene Innenräume (belebte Einkaufspassage und leerer Gang, Abbildung 5.1) verwendet. Jeweils zwei verschiedenfarbige Repräsentanten einer Kategorie wurden in einer verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1) paarweise nebeneinander vor einem grauen Hintergrund präsentiert. Aufgabe der Versuchspersonen war, das Bild zu wählen, das ihnen besser gefällt. Jedes Farbpaar wurde in pseudozufälliger Reihenfolge sechsmal präsentiert, wobei jede Farbe dreimal auf der linken bzw. rechten Seite erschien.

Es ergeben sich die in Abbildung 5.2 gezeigten Präferenzen, individuell normiert auf die



Abbildung 5.1.: Beispiele für die verwendeten optischen Stimuli: eingefärbte Bilder eines iPods (hier c_1 , „Hellrot“), einer Einkaufspassage (hier c_{13} , „Rosa“) und eines leeren Gangs (hier c_2 , „Grün“).

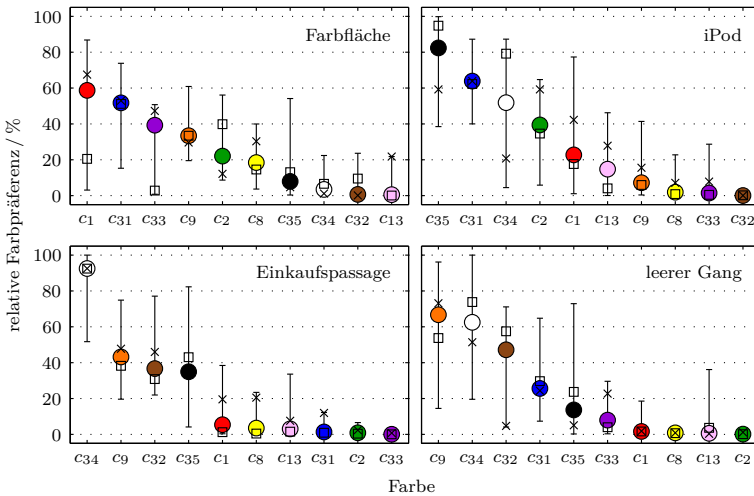


Abbildung 5.2.: Ergebnisse des paarweisen Vergleichs verschiedenfarbiger optischer Stimuli. Kreise und Linien zeigen Mediane und Interquartilbereiche der relativen Präferenz aller Probanden, Mediane weiblicher (x) bzw. männlicher (□) Versuchspersonen sind zusätzlich eingezeichnet.

beliebteste Farbe. Die Auswertung des paarweisen Vergleichs erfolgte mit Hilfe der Bradley-Terry-Luce Methode (Implementierung nach Wickelmaier und Schmid 2004). Kreise zeigen die Ergebnisse aller Versuchspersonen, die Mediane weiblicher (×) und männlicher (□) Probanden sind getrennt angegeben. Man erkennt eine global gute Übereinstimmung zwischen den Urteilen der am Experiment beteiligten weiblichen und männlichen Versuchspersonen (insbesondere bei den beiden Innenräumen), jedoch mit deutlichen Abweichungen bei einigen Farben (Farbflächen: c_1 , c_{33} , c_2 , c_{13} ; iPod: c_{35} , c_{34} , c_2 , c_1 , c_{13}). Bestimmte Farben wie c_{35} („Schwarz“) und c_{31} („Dunkelblau“) zeigen auch Anzeichen starker individueller Präferenzunterschiede unabhängig vom Geschlecht. Darüber hinaus sind deutliche Unterschiede in der Beliebtheit einzelner Farben in Abhängigkeit des Kontextes zu erkennen: c_{32} („Braun“) steigt in der Beliebtheit deutlich an, wenn Innenräume als Kontext verwendet werden. Aus dem Alltag bekannte und daher wahrscheinlich als passend empfundene Farben, z. B. Weiß und Schwarz für den iPod oder Weiß für Innenräume, werden offensichtlich besonders häufig gewählt.

5.1.2. Korrelation von Lautheitsbeurteilungen mit individuellen Farbpräferenzen

Zur Ermittlung der Beeinflussung von Lautheitsurteilen wurden die Farben c_2 („Grün“), c_1 („Hellrot“), c_{31} („Dunkelblau“), c_{34} („Weiß“), c_{32} („Braun“) und c_{13} („Rosa“) ausgewählt, die in den vier zuvor genannten Kontexten mit passenden Schallen (siehe Tabelle 5.1) kombiniert wurden. Die Experimente fanden in einer verdunkelten Hörkabine statt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1), die Lautheitsbeurteilung wurde mittels Freier Größenschätzung durchgeführt.

Tabelle 5.1.: In den Hörversuchen zum Einfluss von Farbpräferenzen verwendete Schalle

Farbfläche & Ton	iPod & Musik	Einkaufspassage & passende Geräusche	leerer Gang & passende Geräusche
60 dB, 1.5 s	55 bis 75 dB, 5 s	68 bis 83 dB(A), 2 s	44 bis 76 dB(A), 2 s
100 Hz	Pop 1	Staubsauger	Flüstern
200 Hz	Pop 2	Stimmengewirr	Telefon
500 Hz	Klassik 1	Bahnhofsdurchsage	Unterhaltung
1000 Hz	Klassik 2	Einfahrende S-Bahn	Radio
4000 Hz	Rock	Fußgängerzone	Staubsauger
8000 Hz	Heavy Metal	Spielplatz	Stöckelschuhe

Neun Personen hatten bei der Beurteilung der Sinustöne jedoch Schwierigkeiten und schätzten offensichtlich die Tonhöhe statt der Lautheit. Sie wurden daher von der Auswertung dieses Teilversuchs ausgeschlossen. Da in den normierten Lautheitsurteilen keine Schallabhängigkeiten des Farbeinflusses gefunden werden konnten, sind im Folgenden direkt die über alle Schalle gemittelten relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile in Abhängigkeit der sechs untersuchten Farben gezeigt (Abbildung 5.3).

Es sind im Median über alle Versuchspersonen bei keinem der verwendeten Farbkontexte Einflüsse auf die Lautheitsurteile zu sehen. Lediglich bei Darbietung eingefärbter

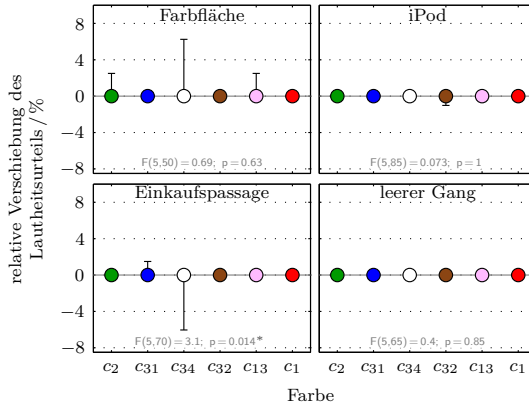


Abbildung 5.3.: Relative Verschiebungen der Lautheitsurteile bei Präsentation von Farben in verschiedenen Kontexten. Die verwendeten Schalle sind in Tabelle 5.1 aufgeführt.

Bilder von Einkaufspassagen konnten drei Probanden gruppiert werden, die eine ähnliche Farbbeeinflussung aufwiesen (Abbildung 5.4 rechts). Es sind hierbei relativ große Verschiebungen der Lautheitsurteile zu sehen, die einen im Vergleich zu bisher beobachteten Ergebnissen gegenteiligen Effekt zeigen, da c_1 („Hellrot“) zu wesentlich geringeren Lautheitsurteilen führte.

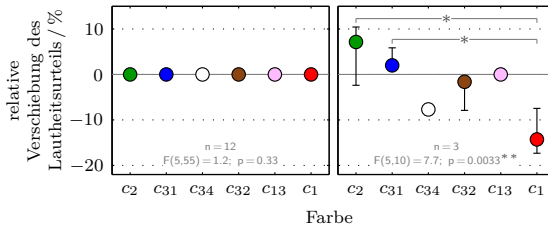


Abbildung 5.4.: Gruppenbildung bei Präsentation eingefärbter Bilder von Einkaufspassagen

Werden die Verschiebungen der Lautheitsurteile pro Schall individuell gegen die jeweilige relative Farbpräferenz in den einzelnen Kontexten aufgetragen, ergeben sich die in Abbildung 5.5 zunächst für die gesamte Versuchspersonengruppe dargestellten Zusammenhänge. Es sind die jeweiligen Korrelationskoeffizienten angegeben sowie entsprechende Regressionsgeraden eingezeichnet. Nur für den Farbkontext der Einkaufspassage ergibt sich ein kleiner negativer Zusammenhang zwischen Farbpräferenz und Verschiebung der

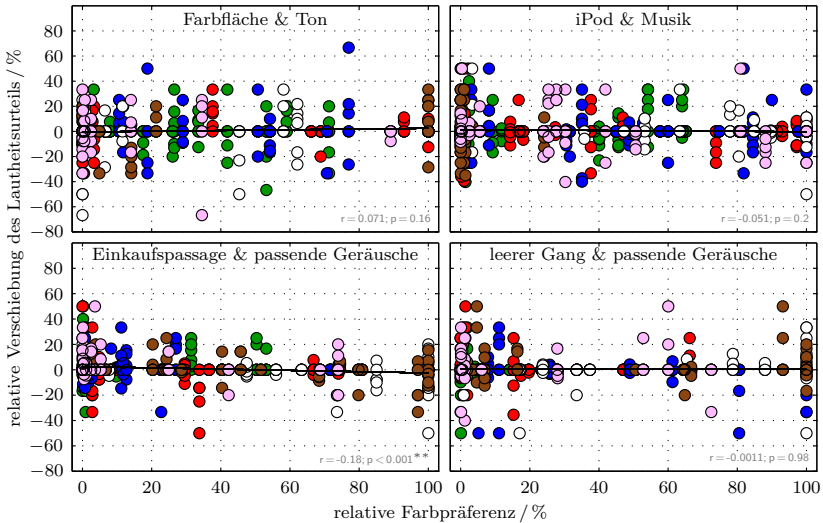


Abbildung 5.5.: Zusammenhang zwischen individueller Farbpräferenz und individueller Verschiebung des Lautheitsurteils pro Schall.

Lautheitsurteile. Beliebtere Farben führten demnach im Mittel zu etwas geringeren Lautheitsurteilen. Stellt man den Zusammenhang zwischen Lautheitsurteil und Farbpräferenz für jene drei Personen auf, die einen starken Farbeinfluss zeigten (Abbildung 5.4 rechts), ergibt sich ebenfalls eine deutlichere Korrelation (siehe Abbildung 5.6). Basierend auf der Regressionsgeraden lassen sich für diese Personengruppe Effekte im Bereich von +5 % bis etwa -10 % in der relativen Verschiebung der Lautheitsurteile beobachten.

5.1.3. Diskussion

Obwohl deutliche Unterschiede hinsichtlich der Farbpräferenz für verschiedene Kategorien optischer Stimuli auftraten und bekannte bzw. typische Farben, wie z. B. ein iPod in Weiß oder Schwarz oder ein weißer Innenraum, bevorzugt werden, konnte nur bei wenigen Personen ein gewisser systematischer Zusammenhang mit individuellen Lautheitsurteilen nachgewiesen werden. Beliebte Farben wurden von diesen Probanden tendenziell als leiser bewertet. Die nach wie vor auftretenden interindividuellen Schwankungen in der Beeinflussung der Lautheitsurteile der übrigen Versuchspersonen sind also vermutlich auf andere Ursachen zurückzuführen. Denkbar wären hier beispielsweise Effekte der zufälligen akustischen Stimulusreihenfolge, welche dann als im Versuchsdesign inhärente Störfaktoren anzusehen wären (siehe z. B. Gescheider und Hughson 1991, Cross 1973, Schneider und Parker 1990).

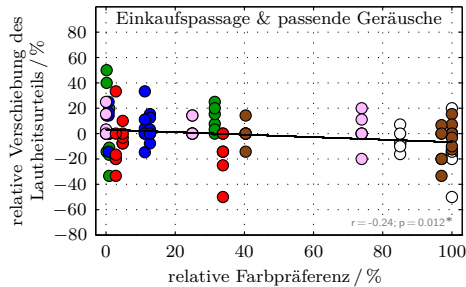


Abbildung 5.6.: Zusammenhang zwischen individueller Farbpräferenz und individueller Verschiebung des Lautheitsurteils pro Schall für die Probanden aus der zweiten Gruppe aus Abbildung 5.4.

5.2. Lautheitspräferenzen

Neben einer direkten Beeinflussung der Lautheitswahrnehmung und/oder Lautheitsbeurteilung könnte die Verknüpfung von Schallen mit Farben auch die für eine gegebene Stimuluskombination als passend oder angenehm empfundene Lautheit verändern. Durch Einregeln verschiedener audio-visueller Stimuli auf eine individuell als angenehm empfundene Lautheit soll in den folgenden Abschnitten untersucht werden, ob eine solche Verbindung zwischen Lautheitspräferenz und dargebotenem optischen Reiz besteht. Als Beispiel kann ein von Haverkamp (2009, S. 212) beschriebenes Szenario genannt werden: Eine Stereoanlage wird bei normaler Beleuchtung auf eine angenehme Lautstärke eingestellt. Nachdem das Licht gelöscht wurde, klingt die Stereoanlage jedoch bei gleicher Einstellung zu laut.

5.2.1. Der Pegel von als angenehm laut empfundener Sprache bei verschiedenen Beleuchtungsstärken

Um in einem ersten Schritt die Validität der Hypothese zu prüfen, dass die angenehme Lautheit durch optische Stimuli beeinflussbar ist, wurden in Anlehnung an das oben geschilderte Szenario zwei gegensätzliche visuelle Konditionen gewählt: völlige Dunkelheit und normale Beleuchtung. Völlige Dunkelheit wurde durch komplette Verdunkelung einer Hörkabine erreicht, was (Versuchsumgebung 4a, siehe Tabelle 2.1) entspricht. Die zweite Kondition „normale Beleuchtung“ (Versuchsumgebung 4b) wurde durch Verwendung einer Glühlampe hergestellt, die gegen die Rückwand der Hörkabine strahlte (um eine Blendung der Versuchsteilnehmer zu vermeiden) und die in Blickrichtung eine Beleuchtungsstärke von ca. 100 lx produzierte.

Untersuchung mit einem Einregelverfahren

Unter beiden optischen Bedingungen regelten Versuchspersonen zunächst verschiedene Sprachschalle auf eine Lautheit ein, die ihnen als angenehm erschien (siehe auch Menzel 2009b). Die verwendeten Sprachsignale sind der EBU SQAM CD (EBU Tech 3253 2008) entnommen und bestehen aus je einem von einer Sprecherin und einem Sprecher gesprochenen Satz in englischer und deutscher Sprache (im Folgenden mit ENf, ENm, DEf und DEm bezeichnet). Wie in Abschnitt 2.1.4 erläutert konnten sich die Probanden die Sätze jeweils beliebig oft anhören, während sie sie durch Pegelveränderungen in 0.2 dB-Schritten auf eine angenehme Lautheit einregelten. Der Startpegel der Schalle lag dabei entweder zwischen 40 und 45 dB oder zwischen 75 und 80 dB (der Pegel wird in diesem Zusammenhang als RMS-Pegel über die gesamte Signaldauer gemessen). Dadurch sollte erreicht werden, dass die Sprachsignale zu Beginn immer entweder zu leise oder zu laut klingen (siehe auch Fastl 1976) und dass daher immer ein Regelvorgang von Seiten der Versuchspersonen notwendig ist, um das Ziel der angenehmen Lautstärke zu erreichen. Die beiden Beleuchtungssituationen wurden auf zwei Versuchsdurchgänge aufgeteilt, die Reihenfolge der Durchgänge wurde für jede Versuchsperson gewechselt. Pro Startpegel wurde jeder Schall dreimal wiederholt, für die folgenden Auswertungen wurden die Daten über den Startpegel gemittelt.

Abbildung 5.7 zeigt die für angenehme Lautstärke nötigen Pegel der vier Sprachschalle für die beiden Beleuchtungssituationen. Die großen Interquartilbereiche von über 10 dB

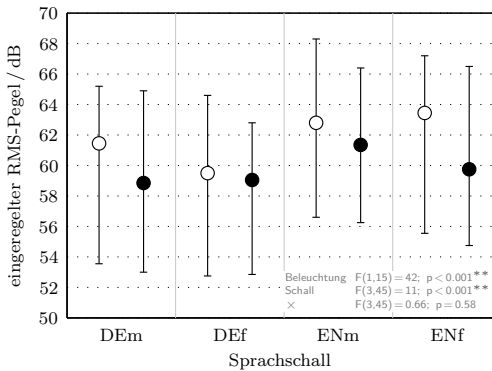


Abbildung 5.7.: RMS-Pegel von auf angenehme Lautheit eingeregelter Sprachschallen bei unterschiedlicher Beleuchtung (weiße Symbole: mit Licht, schwarze Symbole: in Dunkelheit).

deuten darauf hin, dass es starke interindividuelle Unterschiede hinsichtlich des Sprachpegels gibt, der als angenehm laut empfunden wird. Wie eine Clusteranalyse zeigte, sind diese Unterschiede auf Gruppenbildung zurückzuführen: 6 Probanden stellten im Median über alle Einregelvorgänge einen Pegel von 52.4 dB ein, während sich bei den anderen

10 Probanden ein Wert von 65.1 dB ergab. Erfahrene Versuchsteilnehmer, die schon an einer großen Anzahl von Hörversuchen teilgenommen hatten, fanden sich vorwiegend in der zweiten Gruppe und bevorzugten demnach einen höheren Pegel der Sprachschalle. Die mittleren intraindividuellen Interquartilbereiche aller Probanden liegen in der Größenordnung von 1 bis 4 dB. Die Versuchspersonen konnten also mit hoher Genauigkeit wiederholt einen Pegel einstellen, bei dem sie die Sprache als angenehm laut empfanden.

Bezüglich der untersuchten Faktoren erkennt man einen hochsignifikanten Unterschied des Medians der interindividuellen Mediane für deutsche Sprache (59.3 dB) und englische Sprache (62.1 dB). Dies könnte auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass alle Probanden Deutsch als Muttersprache sprechen und daher die Fremdsprache Englisch eventuell aus Gründen der Sprachverständlichkeit auf einen etwas höheren Pegel einregeln. Auch die Beleuchtung zeigt sich als ein hochsignifikanter Haupteffekt. In Dunkelheit wird, abhängig vom Sprachsignal, 1 bis 4 dB weniger Pegel benötigt, um eine angenehme Lautheit zu erreichen, als bei normaler Beleuchtung. Ein Histogramm der individuell berechneten Differenzen zwischen mittlerem eingeregelter Pegel bei Licht und bei Dunkelheit ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Das Maximum der Verteilung liegt bei einer Differenz von 1 dB,

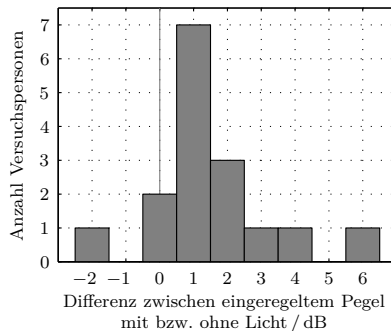


Abbildung 5.8.: Häufigkeiten der intraindividuell beobachteten Pegeldifferenzen zwischen Einregelvorgängen bei normaler Beleuchtung und Dunkelheit

es treten jedoch Unterschiede der eingeregelter Pegel bis zu 6 dB auf. Zwei Probanden zeigten keinen deutlichen Einfluss der Beleuchtung, ein Proband wies einen umgekehrten Effekt auf und regelte bei Dunkelheit einen höheren Pegel ein.

Untersuchung mittels Ja-Nein-Prozedur

Die vier Sprachschalle wurden für diesen Versuchsteil mit RMS-Pegeln von 50 bis 70 dB in 1 dB Schritten in Dunkelheit bzw. bei normaler Beleuchtung randomisiert dargeboten. Nach jedem Schall sollten die Probanden angeben, ob der soeben gehörte Schall zu laut war. Die visuellen Konditionen wurden wiederum auf zwei in abwechselnder Reihenfolge durchgeführte Versuchsdurchgänge aufgeteilt. Die sich nach Zusammenfassung der

Antworten für alle Schalle ergebenden psychometrischen Funktionen zeigt Abbildung 5.9. Man erkennt, dass sich vor allem für Pegel unterhalb von 63 dB eine Verschiebung zwi-

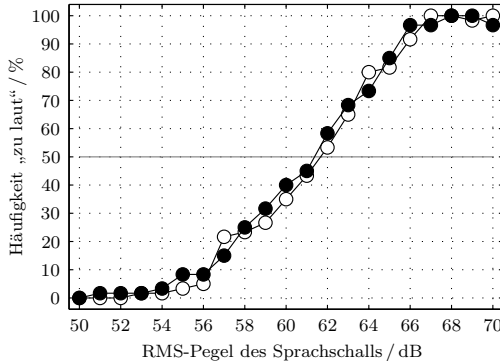


Abbildung 5.9.: Häufigkeit der Antwort „Ja“ bei der Frage, ob dargebotene Sprachschalle als zu laut empfunden werden. Die Darbietung erfolgte entweder bei normaler Beleuchtung (weiße Symbole) oder in völliger Dunkelheit (schwarze Symbole). Die 50%-Punkte liegen bei 61.2 dB (Dunkelheit) bzw. 61.7 dB (Beleuchtung).

sehen den Kurven in Dunkelheit (schwarze Symbole) und bei normaler Beleuchtung (weiße Symbole) ergibt. Die Kurve verläuft in Dunkelheit etwas höher, was bedeutet, dass dort Schalle bei gleichem Pegel etwas häufiger als „zu laut“ bewertet werden. Die 50%-Punkte der Kurven liegen bei 61.2 dB (Dunkelheit) bzw. 61.7 dB (Beleuchtung), was qualitativ den Ergebnissen des Einregelvorgangs aus dem vorherigen Abschnitt entspricht.

Diskussion

Die geschilderten Experimente weisen darauf hin, dass die Beleuchtung der Umgebung einen Einfluss darauf hat, bei welchem Pegel eines Sprachschalls Versuchspersonen diesen als angenehm laut empfinden. Dies könnte einerseits darin begründet sein, dass sich die wahrgenommene Lautstärke der Sprachschalle mit der Beleuchtung ändert, andererseits könnte sich aber auch der individuelle Referenzwert für die angenehme Lautstärke ändern (oder beides).

Im ersten Fall wäre denkbar, dass in Dunkelheit aufgrund der nicht vorhandenen äußeren optischen Stimuli die auditorische Wahrnehmung an Bedeutung gewinnt und sich Versuchspersonen vermehrt auf die Informationen konzentrieren, die ihnen ihr Gehör liefert. Diese Aufmerksamkeitsverschiebung hin zur Hörwahrnehmung könnte bewirken, dass den akustischen Stimuli eine größere Wichtigkeit und somit eventuell eine höhere Lautheit zugeordnet wird. Dies würde im Rahmen eines Einregelvorgangs bedeuten, dass weniger Pegel nötig ist, um eine Ziellautheit zu erreichen.

Im zweiten Fall würde eine Pegelreduktion bei Dunkelheit darauf hinweisen, dass sich der individuelle, interne Referenzwert für eine angenehme Lautstärke verringert hat. Eine Erklärung hierfür könnte sein, dass eine dunkle Umgebung mit einer nächtlichen Situation assoziiert wird. Da es nachts üblicherweise ruhiger ist, wird somit Dunkelheit unter Umständen auch mit Ruhe assoziiert, sodass man seinen Referenzwert für angenehme Lautstärke entsprechend nach unten anpasst.

5.2.2. Der Pegel von als angenehm laut empfundener Sprache und Musik bei Darbietung verschiedenfarbiger Objekte

Als Fortsetzung der zuvor geschilderten Versuchsreihe zu Einflüssen der Beleuchtung sollte nun untersucht werden, ob auch die Präsentation verschiedenfarbiger Objekte zu einer Änderung des Pegels für angenehme Lauttheit führen kann (siehe auch Menzel 2009a). Es wurden hierfür, wie schon in Abschnitt 3.3.2, eingefärbte Bilder von Radios als plausible, bekannte, und in der Lautstärke variable Schallquellen verwendet (siehe Abbildung 3.11). Als Farben wurden c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“), c_4 („Blau“) und c_3 („Dunkelgrau“) eingesetzt.

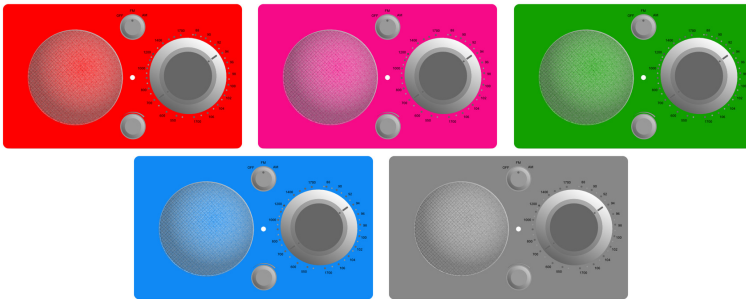


Abbildung 5.10.: Präsentierte Bilder eingefärbter Radios (von links oben nach rechts unten): c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“), c_4 („Blau“), c_3 („Dunkelgrau“)

Die Bilder der Radios wurden mit Sprachschallen eines männlichen Sprechers (EBU SQAM CD, EBU Tech 3253 2008) sowie Ausschnitten aus klassischer Musik (Dvorak Cello Concerto in B-Moll Op. 104) und Rockmusik (Marilyn Manson, New Model No. 15) kombiniert. Die Schalle hatten Dauern zwischen 5 und 6 s. Die audio-visuellen Stimuli wurden in einer verdunkelten Hörkabine dargeboten (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1), der Startpegel der Schalle lag dabei entweder zwischen 40 und 45 dB oder zwischen 75 und 80 dB, sodass in den meisten Fällen ein Regelvorgang der Versuchspersonen nötig war, um eine angenehme Lauttheit zu erreichen. Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben konnten die Probanden den Pegel der Schalle in 0.2 dB-Schritten ändern, wobei sie den Schall beliebig oft anhören konnten.

Es zeigten sich erneut große interindividuelle Unterschiede mit Interquartilbereichen bis zu 10 dB (Abbildung 5.11 links). Wie auch in Abschnitt 5.2.1 ließen sich zwei Gruppierungen von Probanden ermitteln: Die erste Gruppe mit 6 Personen stellte im Median über alle Schalle einen Pegel von 57.9 dB ein, für die zweite Gruppe mit 20 Personen ergab sich ein Wert von 66.3 dB. Eine eindeutige Gruppeneinteilung der Probanden hinsichtlich ihrer Hörversuchserfahrung war in diesem Fall jedoch nicht möglich. In beiden Gruppen fanden sich sowohl erfahrene als auch unerfahrene Versuchsteilnehmer. Da die mittleren intraindividuellen Interquartilbereiche aber mit 2 bis 5 dB dennoch recht klein ausfielen, kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden zuverlässig und wiederholbar den Pegel eingestellt haben, bei dem ihnen die Schalle als angenehm laut erschienen. Sprache wurde, wie schon im vorherigen Abschnitt, auf einen RMS-Pegel von ca. 61 dB eingestellt. Der verwendete Ausschnitt aus klassischer Musik musste einen Pegel von etwa 65 dB und der Ausschnitt aus Rockmusik etwa 69 dB aufweisen, um als angenehm laut empfunden zu werden.

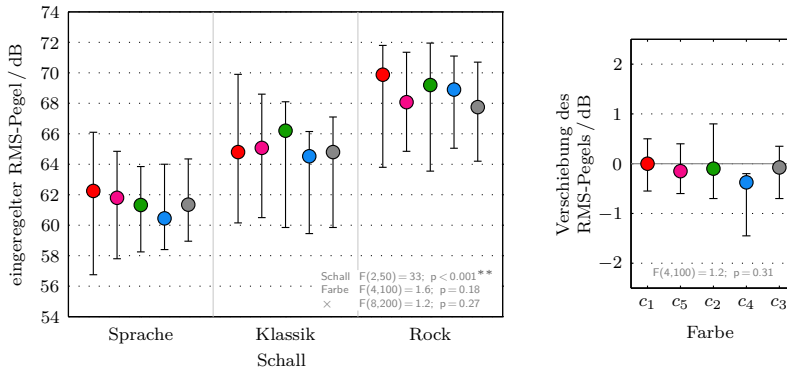


Abbildung 5.11.: RMS-Pegel von auf angenehme Lautheit eingeregelter Sprach- und Musikschallen (links) und entsprechende pro Farbe gemittelte Verschiebungen des eingeregelter Pegels (rechts)

Berechnet man aus den eingestellten Pegeln individuell pro Farbe die entsprechenden Verschiebungen gegenüber den mittleren Pegeln pro Schall (wie in Abschnitt 2.3.4 beschrieben), ergeben sich nur sehr geringe Unterschiede mit Werten, die im Median über alle Versuchspersonen unter 0.5 dB Abweichung liegen (Abbildung 5.11 rechts). Die Probanden lassen sich aber in zwei Gruppen aufteilen, deren jeweilige farbabhängige Verschiebungen der eingeregelter Pegel in Abbildung 5.12 gezeigt sind. Während die erste Gruppe mit acht Personen Radios der Farbe c_1 („Hellrot“) etwa 1 dB höher und Radios der Farbe c_3 („Dunkelgrau“) etwa 1 dB niedriger einregelten, zeigte sich bei der zweiten Gruppe mit 18 Teilnehmern ein hochsignifikanter, aber sehr kleiner Unterschied zwischen einem Radio mit Farbe c_4 („Blau“), das ca. 0.5 dB niedriger eingestellt wurde, und c_3 („Dunkelgrau“).

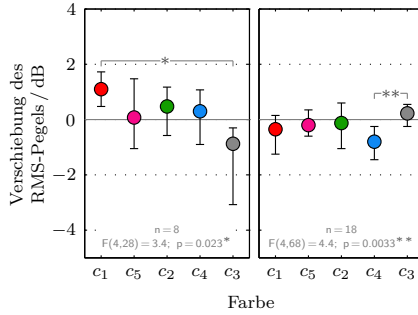


Abbildung 5.12.: Gruppenbildung bei Einregelung einer angenehmen Lautheit von Sprach- und Musikschallen bei Betrachtung eingefärbter Radios

Für die erste Gruppe könnte dies einerseits bedeuten, dass Radios der Farbe c_1 („Hellrot“) leiser wirken, weshalb ein höherer Pegel nötig ist, um das Ziel einer angenehmen Lautheit zu erreichen. Angesichts der zuvor in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse von Lautheitsbeurteilungen, die zeigten, dass c_1 („Hellrot“) oft zu einem größeren Lautheitsurteil führt und c_3 („Dunkelgrau“) zu einem niedrigeren, bietet sich jedoch ein alternativer Erklärungsansatz an: die Betrachtung des Radios mit Farbe c_1 („Hellrot“) lässt eine höhere Lautheit als angenehm (bzw. angemessen) erscheinen, als dies bei einem Radio der Farbe c_3 („Dunkelgrau“) der Fall ist. Entsprechend den so veränderten Zielwerten für die angenehme Lautheit stellten die acht Versuchspersonen der ersten Gruppe dann höhere oder niedrigere Pegel ein.

Zur Abschätzung der Größenordnung der relativen Veränderung der angenehmen Lautheit, die zu den beobachteten Pegelunterschieden führen würde, kann man, da es sich um breitbandige Schalle handelt, auf die mittels Potenzfunktion angenäherte Lautheitsfunktion für Gleichmäßig Anregendes Rauschen (GAR) zurückgreifen (siehe Fastl und Zwicker 2007, S. 207):

$$\frac{N_{GAR}}{\text{sone}} = \frac{2}{3} \left(\frac{I_{GAR}}{I_0} \right)^{0.23} \quad (\text{für } L_{GAR} > \text{ca. } 55 \text{ dB}) \quad (5.1)$$

Für Pegel größer als ca. 55 dB kann damit aus einem Pegelunterschied ein entsprechendes Lautheitsverhältnis abgeschätzt werden:

$$\frac{N_{GAR_1}}{N_{GAR_2}} = 10^{0.023 (L_{GAR_1} - L_{GAR_2})} \quad (\text{für } L_{GAR} > \text{ca. } 55 \text{ dB}) \quad (5.2)$$

Für eine Pegeldifferenz von 1 dB (z. B. bei c_1) ergibt sich daraus eine relative Lautheitsänderung von 5.4 %, was gut mit den in vorherigen Kapiteln ermittelten relativen Verschiebungen der beurteilten Lautheit übereinstimmt (siehe z. B. c_1 in Abbildung 4.9 Mitte).

5.3. Diskussion

Neben stimulusgebundenen Einflüssen auf audio-visuelle Interaktionen, wie sie in den Kapiteln 3 und 4 beschrieben wurden, konnten nun auch Auswirkungen individueller Farb- und Lautheitspräferenzen bestimmt werden. Die Beliebtheit oder Unbeliebtheit von Farben zeigte, nach individueller Korrelation mit den entsprechenden relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile, nur bei drei Personen einmalig einen kleinen Effekt, wonach beliebtere Farben tendenziell als leiser bewertet wurden. Da in den meisten Fällen ein solcher Effekt jedoch nicht beobachtet werden konnte, wird der Einfluss von Farbpräferenzen im Rahmen dieser Arbeit als gering eingestuft und nicht getrennt berücksichtigt.

Demgegenüber konnten Einflüsse sowohl der Beleuchtung als auch der Farbe auf den Pegel bei angenehmer Lautheit gefunden werden. Die Einflüsse liegen in der Größenordnung von 1 bis 2 dB und lassen den Schluss zu, dass sich der individuell empfundene Wert für „angenehme Lautheit“ bei vielen Versuchspersonen z. B. durch Darbietung eingefärbter Radios oder Variation der Beleuchtungsstärke ändert. Dies würde bedeuten, dass die angenehme Lautheit nicht nur vom akustischen Stimulus, sondern vom kombinierten dargebotenen audio-visuellen Reiz bestimmt wird. Bei Beurteilungen der Lautheit audio-visueller Stimuli könnten auf diese Weise zusätzliche interindividuelle Schwankungen entstehen, da zu einem bestimmten Farbreiz eine bestimmte, eventuell individuell unterschiedliche Lautheit als „passend“ empfunden wird bzw. eine gewisse Lautheit erwartet wird. Stimmt die dann gehörte, tatsächliche Lautheit nicht mit der aufgrund der Farbgebung erwarteten überein, könnte diese Differenz ähnlich anderer aus der Psychophysik bekannter Kontexteffekte (siehe z. B. Schneider und Parker 1990, Cross 1973, Gescheider und Hughson 1991) das Urteil beeinflussen.

6. Modellierung des Farbeinflusses auf die Beurteilung der Lautheit

Wie anhand verschiedener experimenteller Daten gezeigt wurde, ist sowohl bei synthetischen als auch bei technischen oder natürlichen audio-visuellen Stimuli nur selten ein Farbeinfluss auf das mittlere Lautheitsurteil aller an einem Hörversuch teilnehmenden Probanden zu sehen. Eine Modellierung kann demnach sinnvollerweise nur auf Basis der Ergebnisse jener Versuchspersonen erfolgen, die nach Anwendung der in Abschnitt 2.3.6 beschriebenen Clusteranalyse farbabhängige Effekte gezeigt haben. Resultierende modellbasierte Vorhersagen haben daher die Nachbildung des typischen Verhaltens ebendieser Personengruppen, ausgedrückt durch die relative Verschiebung der Lautheitsurteile, zum Ziel.

Nach der Definition von Referenzdaten, die die Grundlage der Modellierung bilden, werden die in den vorangegangenen Kapiteln beobachteten Farbeffekte zusammengefasst. Anschließend wird die Entwicklung und Parametrierung eines entsprechenden Modells auf Basis des schreienden Farbeindrucks erläutert und durch Vergleich mit weiteren Versuchsergebnissen eine Validierung vorgenommen.

6.1. Verwendete Referenzdaten

Für die experimentelle Untersuchung des Farbeinflusses wurden verschiedene Methoden zur Lautheitsschätzung eingesetzt. Daher müssen, um eine einheitliche Modellierung der Daten zu ermöglichen, die entsprechenden Ergebnisse zunächst in eine gemeinsame Beschreibungsform gebracht werden. Daten, die per Kategorienskalierung (siehe Abschnitt 2.1.2) oder nach dem Prinzip der Linienlänge (siehe Abschnitt 2.1.3) erhoben wurden, werden dazu in Prozent umgerechnet, um miteinander vergleichbar zu sein. Die Umrechnung erfolgt durch Normierung der in Zentimeter oder Skaliertabletteinheiten angegebenen Verschiebungen der Lautheitsurteile auf die jeweils insgesamt zur Verfügung stehende Linien- bzw. Skalenlänge. Dieses Vorgehen erscheint gerechtfertigt, da sich (wie schon in Abschnitt 2.3.2 erwähnt) bei Betrachtung der über alle Experimente gemittelten intraindividuellen Interquartilbereiche nach Anwendung der beschriebenen Umrechnung sehr ähnliche Werte von 11.3 % für Methoden der Linienlänge und 11.4 % für Kategorienskalierung ergeben. Aufgrund der unterschiedlichen verwendeten psychoakustischen Methoden (Kategorienskalierung/Linienlänge für synthetische Stimuli bzw. Größenschätzung für technische und natürliche Stimuli) werden die Ergebnisse aus Kapitel 3 und Kapitel 4 getrennt berücksichtigt.

Als Grundlage für den Aufbau und die Parametrierung des Modells werden Ergebnisse von Probandengruppen herangezogen, die laut Varianzanalyse signifikante Farbeffekte ($p < 0.05$) aufweisen:

- Als Referenzdaten für synthetische audio-visuelle Stimuli dienen die Ergebnisse aus Experimenten zur Beeinflussung von Gleichmäßig Anregendem Rauschen sowie zur Wirkung schreiender Farben (vgl. Abbildungen 3.3 sowie 3.12).
- Als Referenzdaten für technische und natürliche audio-visuelle Reize dienen die Ergebnisse aus Experimenten zum Einfluss der Darbietungsweise (vgl. Abbildungen 4.2, 4.3, 4.6, 4.9, 4.11, 4.19).

Existieren für eine gegebene Gruppe von Farben Ergebnisse von mehreren Experimenten, werden diese Resultate zusammengefasst um eine größere Anzahl von Datenpunkten zu erhalten.

6.2. Nachzubildende farbspezifische Effekte

Im Folgenden werden die in den vorangegangenen Kapiteln beobachteten Farbeinflüsse, die durch das hier vorgestellte Modell erfasst werden sollen, versuchsübergreifend diskutiert. Hierbei werden Farben berücksichtigt, die in mindestens einem Fall zu signifikanten Beeinflussungen von Lautheitsurteilen (laut Scheffé-Test, siehe Abschnitt 2.3.5) geführt haben, also in Ergebnisdarstellungen mit * oder ** gekennzeichnet sind. Die statistische Signifikanz der Wirkung einer Farbe kann dabei immer nur im Vergleich zu einer anderen Farbe angegeben werden. Farbpaare, die nach diesen Kriterien zu unterschiedlichen Lautheitsbewertungen geführt haben, sind in Tabelle 6.1 aufgelistet.

Die Tabelle ist nach der Anzahl der Probanden in den Gruppen geordnet, die den jeweiligen Farbeinfluss aufweisen. Zusätzlich sind die zugrundeliegenden Abbildungen angegeben. Man erkennt, dass der größte Teil signifikanter Farbeffekte darauf zurückzuführen ist, dass schreiende Farben mit hohem Rotanteil gegenüber grünen oder unbunten Farben zu höheren Lautheitsurteilen geführt haben. Nur bei wenigen Versuchspersonen zeigt sich eine gegenteilige Farbwirkung.

Die Mehrheit der Probanden mit signifikanten Farbeinflüssen zeigt also farbabhängige Effekte, die qualitativ mit früheren Untersuchungen übereinstimmen. Insbesondere bestehen Parallelen zu reinen Farbbewertungen ohne akustische Komponente, die von Fastl et al. (2008) vorgestellt wurden. Japanische und deutsche Probanden sollten dabei Farben, die ihnen entweder in Form von Farbkarten gezeigt wurden oder die sie sich gedanklich vorstellen sollten, mittels semantischem Differential beurteilen. Unter anderem tendierten Rot, Orange und Lila zu den Bewertungen „loud“ und „unpleasant“, Grün, Blau und Weiß zu „soft“ und „pleasant“. Die den Farben zugeordneten Eigenschaften scheinen sich also bei tatsächlich mit diesen Farben durchgeführten Lautheitsbeurteilungen auf die Antworten der Versuchspersonen auszuwirken.

Tabelle 6.1.: Farbpaaare, die signifikant unterschiedliche Lautheitsbewertungen hervorgerufen haben. Farbe 1 war jeweils gegenüber Farbe 2 mit einer größeren (relativen) Verschiebung der Lautheitsurteile verbunden. Die Anzahl n der Versuchspersonen in den Gruppen, die die jeweilige Beeinflussung zeigen, ist proportional zur Fläche der in der entsprechenden Tabellenzeile dargestellten Farbbeispiele. Details sind in den angegebenen Abbildungen zu finden.

Farbe 1		>	Farbe 2	n	Abb.
	c_7	c_{17}		15	4.6, 4.9, 4.11
	c_1	c_{17}		9	4.6, 4.9
	c_1	c_2		6	3.3
	c_7	c_{24}		6	4.11
	c_{18}	c_{19}		6	4.3
	c_{18}	c_{20}		6	4.3
	c_2	c_1		3	5.4
	c_6	c_7		3	4.9
	c_{31}	c_1		3	5.4

6.3. Aufbau des Modells

6.3.1. Funktionsweise

Das hier vorgestellte Modell für farbabhängige Verschiebungen von Lautheitsurteilen verwendet die CIELAB-Werte einer Anzahl von Farben als Eingangswerte und berechnet daraus für jede dieser Farben eine zugehörige relative Verschiebung der Lautheitsurteile. Die berechneten Werte prognostizieren, wie eingangs erwähnt, das Verhalten von Probandengruppierungen, die sich durch Farben in ihrer Lautheitsbewertung beeinflussen lassen. Da in allen durchgeführten Experimenten immer die Effekte verschiedener Farben untereinander verglichen werden sollten, war eine Referenz nötig, die man, wie in Abschnitt 2.3.4 erläutert, durch Medianbildung über die Effekte aller Farben erhält. Das Modell muss daher ebenfalls alle zu vergleichenden Farben berücksichtigen, um Vorhersagen der relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile liefern zu können.

Nachdem in Abschnitt 3.3 der schreiende Farbeindruck als eine Größe vorgestellt wurde, die sowohl häufig mit Verschiebungen des Lautheitsurteils verknüpft ist als auch anhand gängiger Farbmaßzahlen berechnet werden kann, wird er im Folgenden als maßgebliche Basisgröße für die Modellierung verwendet. Sollen für eine Anzahl n_c Farben mit den CIELAB-Werten L_i^* , a_i^* und b_i^* ($i = 1 \dots n_c$) die zu erwartenden Verschiebungen der Lautheitsurteile berechnet werden, müssen daher zunächst die entsprechenden Bunthei-

ten $C_{ab,i}^*$ und Bunttonwinkel $h_{ab,i}$ ermittelt werden (siehe Abschnitt 2.2). Im Anschluss können die schreienden Farbeindrücke SF_i über Gleichung 3.4 ermittelt werden.

Betrachtet man die nach ihrem schreienden Farbeindruck sortierten Farben in den Abbildungen 3.10 und 3.12 fällt auf, dass hauptsächlich sehr schreiende Farben sowie nicht schreiende Farben einen Einfluss auf die Verschiebung des Lautheitsurteils ausüben. Farben im mittleren Bereich zeigen kaum Beeinflussungen. Es scheint also kein direkter linearer Zusammenhang zwischen dem schreienden Farbeindruck und der tatsächlichen Lautheitsbeeinflussung vorzuliegen. Aus diesem Grund werden die nach Gleichung 3.4 berechneten Werte für SF über eine Kennlinie in die Hilfsgröße SF' umgerechnet:

$$SF' = \frac{8(SF - 0.5)^3 + 1}{2} \quad (6.1)$$

Der Verlauf von SF' ist in Abbildung 6.1 (oben) zu sehen. Durch den kubischen Anteil wird erreicht, dass Werte von SF nahe 0 und nahe 1 einen größeren Einfluss ausüben als Werte im mittleren Bereich.

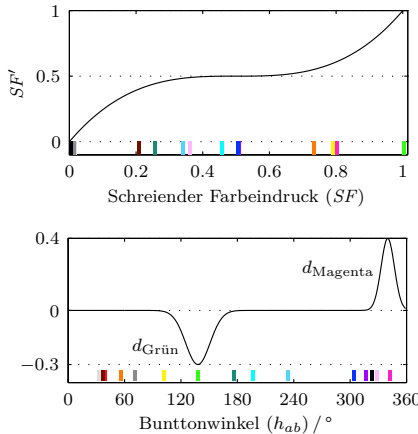


Abbildung 6.1.: Verlauf der Hilfsgrößen SF' (oben) und d_{Magenta} bzw. $d_{\text{Grün}}$ (unten). Die untersuchten Farben sind an entsprechender Stelle am unteren Rand der Abbildungen eingezeichnet.

Anhand der in Abschnitt 6.2 genannten Referenzdaten kann zudem abgelesen werden, dass die Farbe c_6 („leuchtendes Grün“), obwohl sie den maximalen schreienden Farbeindruck von $SF = 1$ aufweist, nur selten zu einer Erhöhung des Lautheitsurteils führt, während c_7 („leuchtendes Magenta“) trotz eines geringeren Wertes von $SF = 0.8$ oft mit

erhöhten Lautheitsbewertungen verknüpft ist. Zur weiteren Anpassung an die Referenzdaten werden daher die beiden Größen d_{Magenta} und $d_{\text{Grün}}$ eingeführt:

$$d_{\text{Magenta}} = \begin{cases} 0.4 \cdot \exp(-0.01 (\frac{h_{ab}}{1^\circ} - 340)^2) & \text{für } C_{ab}^* \geq 90 \\ 0 & \text{für } C_{ab}^* < 90 \end{cases} \quad (6.2)$$

$$d_{\text{Grün}} = \begin{cases} -0.3 \cdot \exp(-0.003 (\frac{h_{ab}}{1^\circ} - 138)^2) & \text{für } L^* \geq 50 \\ 0 & \text{für } L^* < 50 \end{cases} \quad (6.3)$$

Der Verlauf von d_{Magenta} (für $C_{ab}^* \geq 90$) und $d_{\text{Grün}}$ (für $L^* \geq 50$) ist in Abbildung 6.1 (unten) über dem Bunttonwinkel aufgetragen. Man erkennt, dass d_{Magenta} für Farben im Bereich von c_7 („leuchtendes Magenta“) eine Anhebung und $d_{\text{Grün}}$ für Farben im Bereich von c_6 („leuchtendes Grün“) eine Absenkung bewirkt. Die Fallunterscheidungen schränken den Wirkungsbereich der Anhebung bzw. Absenkung auf Farben ein, für die diese Anpassung laut der Referenzdaten nötig ist.

Nachdem für alle n_c zu berücksichtigenden Farben die entsprechenden Werte SF'_i , $d_{\text{Magenta},i}$ und $d_{\text{Grün},i}$ berechnet wurden, werden diese, um die weitere Darstellung zu vereinfachen, zur Zwischengröße FE' zusammengefasst:

$$FE'_i = SF'_i + d_{\text{Magenta},i} + d_{\text{Grün},i}, \quad i = 1 \dots n_c \quad (6.4)$$

Der Farbeinfluss FE der i -ten Farbe in Prozent wird daraus schließlich wie folgt berechnet:

$$FE_i = s \left(FE'_i - \overline{FE'} \right) \%, \quad i = 1 \dots n_c \quad (6.5)$$

$\overline{FE'}$ bezeichnet den arithmetischen Mittelwert über alle FE'_i . Die Subtraktion des Mittelwerts stellt eine gemeinsame Referenz her, um die Wirkung der i -ten Farben relativ zu den anderen Farben ausdrücken zu können. Der Parameter s wirkt als Skalierungsfaktor: für $s = 3.8$ repräsentiert FE die bei Kategorienskalierung und Methoden nach dem Prinzip der Linienlänge auftretenden Urteilsverschiebungen relativ zu einer vorgegebenen Skalenlänge. Für $s = 8$ kann FE direkt als relative Verschiebung des Lautheitsurteils interpretiert werden, etwa für den Vergleich mit Ergebnissen aus Freier Größenschätzung. Diese Werte für s haben sich nach Vergleichen mit den Referenzdaten für synthetische bzw. technische und natürliche Stimuli als geeignet erwiesen. Abbildung 6.2 fasst die Funktionsweise des Modells schematisch zusammen.

6.3.2. Vergleich mit Referenzdaten

Nachdem der Aufbau des Modells vorgestellt wurde, soll nun die prinzipielle Anwendbarkeit anhand eines Vergleichs mit den Referenzdaten demonstriert werden. Abbildung 6.3 zeigt eine Gegenüberstellung von Modellberechnungen nach dem beschriebenen Verfahren (Skalierungsparameter $s = 3.8$) mit den Referenzdaten für synthetische Stimuli aus Experimenten, die Beurteilungsmethoden mit vorgegebener Skala verwendeten. Die Ex-

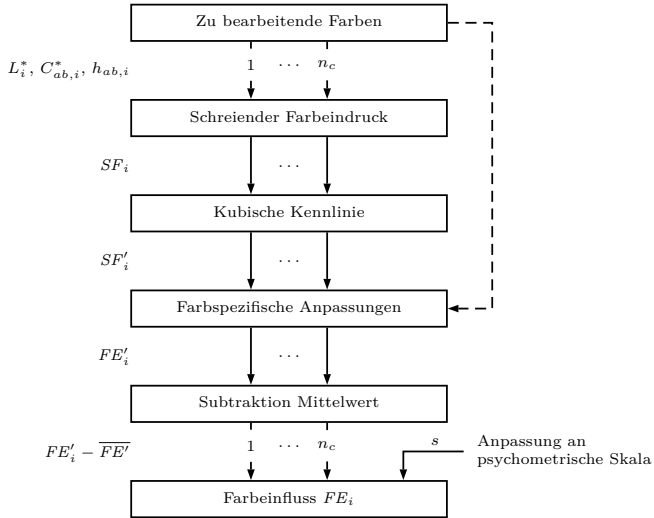


Abbildung 6.2.: Funktionsschema des Modells zur Berechnung des Farbeinflusses auf die Lautheitsbeurteilung

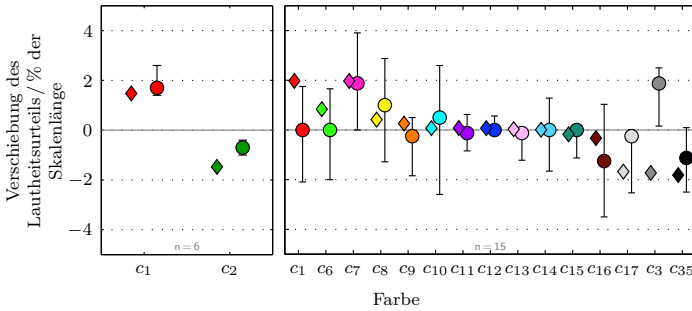


Abbildung 6.3.: Referenzdaten bei Darbietung synthetischer Stimuli (Kreise) im Vergleich mit Modellberechnungen (Rauten). Links: Daten für Gleichmäßig Anregendes Rauschen aus Abbildung 3.3. Rechts: Daten für Gleichmäßig Anregendes Rauschen mit Bildern von Radios aus Abbildung 3.12

perimentaldaten sind jeweils als Kreise dargestellt, die Daten des Modells als Rauten. Im linken Teilbild sind Ergebnisse aus Experimenten mit Gleichmäßig Anregendem Rauschen (Abschnitt 3.2.1) zu sehen. Die Modellberechnung stimmt gut mit den Versuchsdaten überein, wobei die Wirkung von c_2 („Grün“) leicht überschätzt wird. Ergebnisse aus den Versuchen zu schreienden Farben mit Gleichmäßig Anregendem Rauschen als akustischem Stimulus (Abschnitt 3.3.2) sind in der rechten Grafik abgebildet. Das Modell kann mit zwei Ausnahmen die Experimentaldaten innerhalb der Interquartilbereiche nachvollziehen. Der Farbeinfluss von c_1 („Hellrot“) wird in diesem Fall überschätzt, während er bei c_3 („Dunkelgrau“) erheblich unterschätzt wird.

Eine Gegenüberstellung von Hörversuchsdaten mit technischen und natürlichen Stimuli aus Experimenten mit Freier Größenschätzung und Modellberechnungen (Skalierungsparameter $s = 8$) ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Links sind zusammengefasste

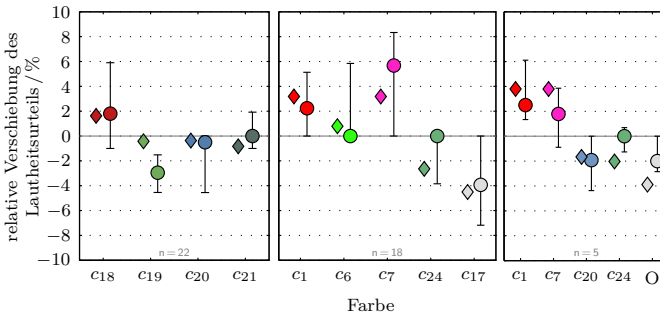


Abbildung 6.4.: Referenzdaten bei Darbietung technischer bzw. natürlicher Stimuli (Kreise) im Vergleich mit Modellberechnungen (Rauten). Links: Zusammengefasste Daten für Standbilder von Sportwagen aus Abbildung 4.3. Mitte: Zusammengefasste Daten für Bewegtbilder von PKW und Zügen aus den Abbildungen 4.6, 4.9 und 4.11. Rechts: Daten aus Versuchen zu unrealistischen Stimuli (siehe Abbildung 4.19)

Ergebnisse aus Experimenten zur Lautheitsbewertung von Sportwagen dargestellt (siehe Abschnitt 4.1.1). Bis auf c_{19} („Hellgrün“) stimmen die Modellberechnungen gut mit den Daten überein. Hier könnten eventuell vom Modell nicht erfasste kognitive Effekte eine Rolle spielen, also die Tatsache, dass c_{19} („Hellgrün“) eine für Sportwagen ungewöhnliche Farbe ist. Das mittlere Teilbild zeigt zusammengefasste Daten aus Experimenten zu Bewegtbildern (siehe Abschnitte 4.1.2, 4.2.1 und 4.2.2). In diesem Fall können die Effekte aller Farben innerhalb der Interquartilbereiche nachgebildet werden, wobei die Wirkung von c_7 („leuchtendes Magenta“) im Vergleich zum Median der Experimentaldaten unterschätzt wird. Für c_{24} („Lindgrün“) wird eine Verringerung des Lautheitsurteils berechnet, obwohl im Median in den Versuchen kein Einfluss festzustellen war. Das rechte Teilbild stellt die Ergebnisse aus Versuchen zu unrealistischen optischen Stimuli dar (siehe Abschnitt 4.4). Die durch das Modell berechneten Farbeinflüsse können auch hier

die experimentellen Daten gut nachvollziehen, wobei für c_{24} („Lindgrün“) wiederum eine Verringerung der Lautheitsbewertung berechnet wird.

6.4. Vergleich von Modellprognosen mit Ergebnissen früherer Hörversuche

Nachdem die Entwicklung und Parametrierung des Modells des Farbeinflusses auf Lautheitsurteile anhand von Referenzdaten erläutert wurde, soll in diesem Abschnitt ein Vergleich mit Daten aus früheren Studien durchgeführt werden.

Zunächst werden Daten aus Patsouras et al. (2002) zur Wirkung eingefärbter ICE-Züge betrachtet. Um die Ergebnisse mit Modellvorhersagen vergleichen zu können, wurden die Antworten der Versuchspersonen in Verschiebungen der Lautheitsurteile umgerechnet. Da aufgrund fehlender Informationen über die eingesetzten Anzeigergeräte die XYZ-Werte der damals verwendeten Farben nicht bekannt sind, wurden sie auf dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten LCD-Bildschirm (siehe Abschnitt 2.3.1) nachgemessen und diese Werte (und daraus berechnete CIELAB-Werte) für die Modellberechnung verwendet.

Wie Abbildung 6.5 zeigt, kann nach Anwendung des zuvor beschriebenen Algorithmus (mit $s = 8$) das Modell die Farbeinflüsse von c_{23} („Graublau“) und c_{24} („Lindgrün“) grob nachvollziehen, jedoch wird die relative Erhöhung des Lautheitsurteils bei c_{22} („Rot“) deutlich unterschätzt, auch wenn die Vorhersage noch innerhalb des Interquartilbereichs liegt. Die experimentell beobachtete Verschiebung der Lautheitsurteile bei Präsentation des originalen Bildes eines weißen ICE (Farbe c_{25}) von +2% wird durch das Modell nicht korrekt erfasst. Dies könnte dadurch begründet sein, dass die originale Lackierung des ICE einen roten Streifen beinhaltet, der das Urteil beeinflussen haben könnte. Für die im Hörversuch vorhandene Situation „kein Bild“ (k.B.) kann aufgrund des fehlenden optischen Stimulus keine Modellvorhersage angegeben werden.

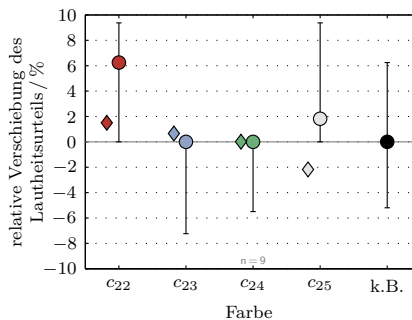


Abbildung 6.5.: Vergleich von Modellprognosen (Rauten) mit experimentellen Daten nach Patsouras et al. (2002) (Kreise, k.B. = kein Bild).

Experimente mit Abbildungen von ICE-Zügen wurden auch von Rader et al. (2004) in Japan durchgeführt. Entsprechende Ergebnisse sind in Abbildung 6.6 zu sehen. In diesem

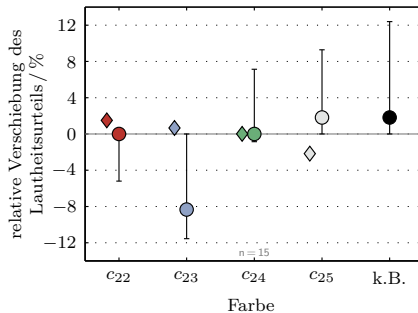


Abbildung 6.6.: Vergleich von Modellprognosen (Rauten) mit experimentellen Daten nach Rader et al. (2004) (Kreise, k.B. = kein Bild)

Fall führte c22 („Rot“) nicht zu einer Anhebung der Lautheitsurteile. Auch die deutliche Verringerung bei c23 („Graublau“) kann nicht korrekt erfasst werden. Für c25 („ICE Weiß“) wird erneut eine Erhöhung der Urteile festgestellt, die Modellberechnung sagt jedoch wie zuvor negative relative Verschiebungen der Urteile vorher.

Ebenfalls mit Abbildungen von ICE-Zügen sind die in Fastl et al. (2010) dargestellten Ergebnisse erhoben worden. Abbildung 6.7 zeigt die Modellprognosen (Rauten) im Vergleich mit den experimentellen Daten (Kreise). Da es sich dabei um Fernexperimen-

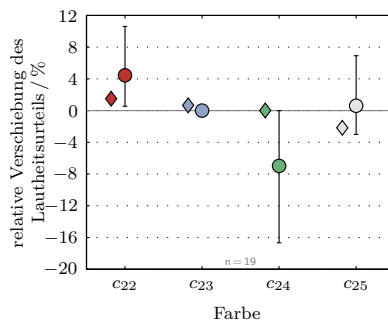


Abbildung 6.7.: Vergleich von Modellprognosen (Rauten) mit experimentellen Daten nach Fastl et al. (2010) (Kreise)

te handelte ist anzunehmen, dass eine große Variationsbreite bei den eingesetzten Bildschirmen und damit auch bei den tatsächlich von den Probanden gesehenen Farbstimuli

vorlag. Für die Modellberechnung wurden daher wieder die wie oben beschrieben gemessenen XYZ-Werte angenommen. Die Wirkung von c_{22} („Rot“) und c_{24} („Lindgrün“) wird unterschätzt, die Vorhersagen liegen aber innerhalb der wahrscheinlichen Schwankungen. Erneut wird für c_{25} („ICE Weiß“) eine Verringerung des Lautheitsurteils berechnet, obwohl im Median eher eine leichte Erhöhung vorlag.

Bei allen in diesem Abschnitt besprochenen Vergleichen mit Literaturdaten muss bedacht werden, dass die Modellprognosen auf Versuchsergebnissen jener Probanden beruhen, die sich in Gruppen mit signifikanten Farbeinflüssen befanden. Die in der Literatur berichteten Daten sind jedoch nicht auf mögliche Gruppenbildungen hin untersucht worden und enthalten demnach möglicherweise auch Ergebnisse von Probanden, die keine Farbeinflüsse aufwiesen. Die nicht genau bekannten XYZ-Werten der Farben und die daraus resultierenden Ungewissheiten über die tatsächlich während des Versuchs dargebotenen optischen Stimuli könnten eine weitere Ursache für die Abweichungen zwischen Modellberechnungen und experimentellen Daten darstellen. Ein zu hell eingestellter Bildschirm etwa könnte bewirken, dass c_{22} („Rot“) als schreiender empfunden wird, als hier für die Modellberechnung angenommen, was zu größeren Farbeinflüssen führen könnte. Ähnlich wie bei Bildern von Sportwagen (Abschnitt 4.1.1) könnten auch kognitive Effekte eine Rolle spielen. Rote Farben sowie die Originalfarbe scheinen eine relative Erhöhung der Lautheitsbewertung zu bewirken, während unübliche Farben, hier c_{24} („Lindgrün“) und c_{23} („Graublau“), oft eine Verringerung zur Folge haben. Die Information, ob eine Farbe typisch für ein gezeigtes Objekt ist, könnte so die Urteile der Probanden beeinflussen, ist jedoch in der Modellberechnung nicht berücksichtigt.

7. Anwendungen und Modellverifikation

7.1. Lautheit von Druckern und Kopierern

7.1.1. Experimentelle Daten

Drucker bzw. Kopiergeräte stellen eine vor allem in Büroumgebungen oft gesehene und gehörte Gerätekategorie dar. Einflüsse verschiedener akustischer Parameter auf die Geräuschqualität von Druckern oder auch Kopierern werden daher von Herstellern im Rahmen psychoakustischer Experimente untersucht (siehe z. B. Furukawa et al. 2008). Eine mögliche zusätzliche Wirkung der Gerätefarbe auf die Lautheitsbeurteilung soll im Folgenden näher betrachtet werden.

In einem Experiment wurden vier eingefärbte Bilder eines Druckers (Abbildung 7.1) mit fünf unterschiedlichen Drucker- und Kopierergeräuschen kombiniert. Es wurden jene



Abbildung 7.1.: Verwendete Abbildungen eingefärbter Drucker in den Farben: c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“) und c_3 („Dunkelgrau“)

Farben gewählt, die in vorherigen Versuchen oft einen Einfluss auf die Lautheitsbeurteilung gezeigt hatten: c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“) und c_3 („Dunkelgrau“). Passend dazu wurden Geräusche von zwei Druckern (in zwei Abständen) und einem Kopiergerät aufgenommen (siehe Tabelle 7.1). Es handelte sich um reflexionsbehaftete

Tabelle 7.1.: Eigenschaften der verwendeten Geräusche von Druckern bzw. Kopierern

Schall	Gerät	Abstand / cm	$L_{A,eq}$ / dB(A)	N_5 / sone
K	Kopierer	30	58.4	14.5
D1a	Drucker 1	25	64.6	18.0
D1b	Drucker 1	50	58.2	11.9
D2a	Drucker 2	25	62.7	17.1
D2b	Drucker 2	50	58.0	13.2

Aufnahmen, die in einem Büroraum durchgeführt wurden. Die Schalle hatten eine Dauer von 9 s und beinhalteten jeweils einen Ausdruckvorgang. Die Darbietung erfolgte in einer verdunkelten Hörkabine (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1) mit Freier Größenschätzung als Beurteilungsmethode.

Die resultierenden Lautheitsurteile sind in Abbildung 7.2 links dargestellt. Vor allem für die Schalle D1a, D1b sowie D2a zeigen sich starke interindividuelle Schwankungen, der Schall K wurde wesentlich einheitlicher bewertet. Eine wahrscheinliche Ursache hierfür ist,

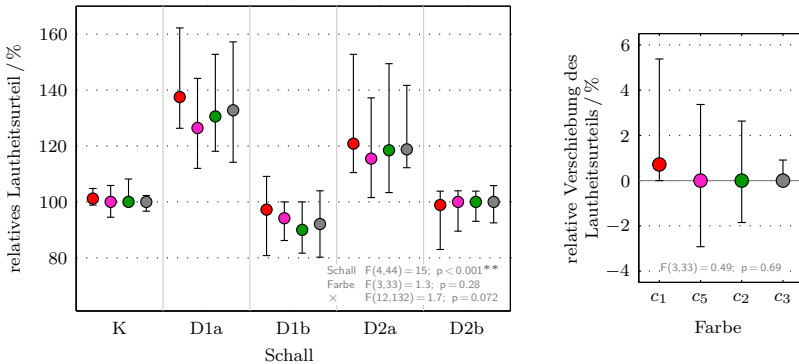


Abbildung 7.2.: Lautheitsbeurteilung von Drucker- und Kopierergeräuschen bei verschiedenen präsentierten Farben (links) sowie entsprechende relative Verschiebungen der Lautheitsurteile (rechts)

dass in Schall K zu Beginn und gegen Ende des Ausdruckvorgangs ein charakteristischer Signalton des Kopiergeräts zu hören ist, der eine Wiedererkennung erleichtert, während die drei Schalle mit starken Schwankungen recht ähnlich klingen und daher nur schlecht wiedererkannt werden können.

Bezüglich der Farbeinflüsse zeigen sich die Probanden in den relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile ebenfalls uneinig. Dies kann durch die in Abbildung 7.3 gezeigte Gruppenbildung der Probanden beschrieben werden. Wie schon in anderen Experimenten beobachtet, zeigen viele Versuchsteilnehmer (erste Gruppe, sechs Personen) keine Farbeinflüsse. Eine zweite Gruppe mit drei Personen zeigt Farbeffekte, die einen gegenteiligen Trend zu den meisten bisher beobachteten Farbeinflüssen aufweisen. Personen dieser Gruppe schätzten die Lautheit von Druckern der Farbe c_2 („Grün“) im Vergleich zur Farbe c_5 („Magenta“) höher ein mit einem Unterschied der Beurteilungen von 14.3 %. Die dritte Gruppe mit ebenfalls drei Probanden zeigt das aufgrund vorheriger Experimente erwartete Ergebnis, dass Drucker in den Farben c_1 („Hellrot“) und c_5 („Magenta“) als lauter und Drucker in der Farbe c_2 („Grün“) als leiser eingestuft werden. Die Spanne des Farbeinflusses liegt in dieser Gruppe bei 16.2 %.

Allgemeine Aussagen über einen Zusammenhang zwischen farblicher Produktgestaltung und Lautheitsbeurteilung von Druckern bzw. Kopieren können basierend auf den hier vorgestellten Daten aufgrund der deutlichen und teilweise gegensätzlichen Gruppenbildung nicht getroffen werden. Es fällt jedoch auf, dass hauptsächlich Farben, die für die dargestellten Geräte nicht typisch sind, zu Beeinflussungen der Lautheitsurteile geführt haben.

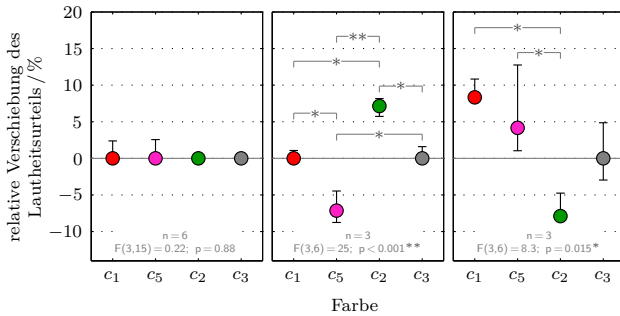


Abbildung 7.3.: Gruppenbildung bei der Lautheitsbeurteilung von Druckern bzw. Kopierern in Kombination mit unterschiedlich eingefärbten Bildern von Druckern.

7.1.2. Vergleich mit Modellprognosen

Eine Gegenüberstellung der eben präsentierten Lautheitsbewertungen von Druckern und Kopierern mit entsprechenden Modellberechnungen soll zeigen, inwieweit sich die in Kapitel 6 vorgeschlagene algorithmische Vorhersage des Farbeinflusses auch auf praktische Fragestellungen des sound-quality engineering anwenden lässt.

Aus den CIELAB-Werten der vier im Versuch betrachteten Farben ergeben sich (für $s = 8$, da Größenschätzung verwendet wurde) die in Abbildung 7.4 gezeigten Vorhersagen. Links sind die Ergebnisse der zweiten Gruppe aus Abbildung 7.3 dargestellt. Man erkennt,

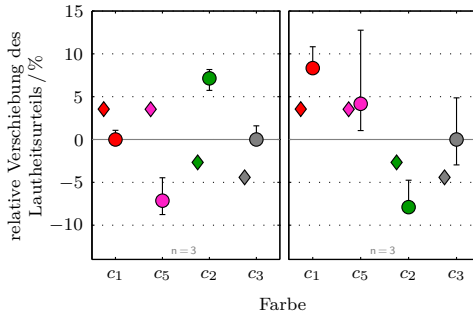


Abbildung 7.4.: Lautheitsbeurteilung von Druckern bzw. Kopierern (Kreise, zweite und dritte Gruppe aus Abbildung 7.3) im Vergleich mit Modellberechnungen (Rauten).

dass das Modell nicht in der Lage ist, die hier auftretenden relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile nachzubilden. Der Grund hierfür ist, dass für die Modellbildung keine Referenzdaten vorlagen, die den vorliegenden Farbeinflüssen – negative relative Verschie-

bungen bei c_5 („Magenta“), positive bei c_2 („Grün“) – entsprachen. Im rechten Teilbild von Abbildung 7.4 hingegen ist zu sehen, dass die Ergebnisse der dritten Gruppe aus Abbildung 7.3 besser durch das Modell wiedergegeben werden können. Hier können die Tendenzen qualitativ korrekt beschrieben werden, quantitativ sagen die Berechnungen jedoch eher zu geringe Farbwirkungen vorher.

7.2. Lautheit von Küchenmixern

7.2.1. Experimentelle Daten

Auch im Bereich der Haushaltsgeräte wird die optische Erscheinung von Produkten bei der Gestaltung erwünschter Klangbilder berücksichtigt, wie man z. B. bei Yanagisawa et al. (2010) nachlesen kann. Im Folgenden werden Untersuchungen zur Erwartungshaltung hinsichtlich der Lautheit von Küchenmixern in Abhängigkeit der Farbgebung vorgestellt.

Versuchspersonen sollten hierbei verschiedene Geräusche eines Küchenmixers auf eine subjektiv als realistisch empfundene Lautheit einregeln. Als akustische Stimuli wurden Aufnahmen eines Mixers in drei verschiedenen Betriebszuständen (von Stufe 1 mit der geringsten Drehzahl bis Stufe 3 mit maximaler Drehzahl) verwendet. Die Aufnahmen wurden in reflexionsbehalteter Umgebung in einem Abstand von 70 cm durchgeführt. Die Eigenschaften der resultierenden Schalle sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

Tabelle 7.2.: Originalpegel und Lautheiten der verwendeten Geräusche eines Küchenmixers

Schall	$L_{A,eq}$ / dB(A)	N_5 / sone
Mixer Stufe 1	63.5	14.5
Mixer Stufe 2	67.5	18.7
Mixer Stufe 3	70.7	22.4

Gleichzeitig sahen die Probanden eine Videosequenz eines mit konstanter Drehzahl betriebenen Küchenmixers, der in den Farben c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“), c_4 („Blau“) und c_3 („Dunkelgrau“) eingefärbt war (Abbildung 7.5). Die Videosequenz wurde bis zum Ende des Einregelvorgangs in einer Schleife abgespielt. Das Experiment fand in einer verdunkelten Hörkabine statt (Versuchsumgebung 1a, siehe Tabelle 2.1). Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben konnten die Probanden den Pegel der Schalle in 0.2 dB-Schritten anpassen, bis das Ziel einer realistischen Lautheit erreicht war. Der Startpegel der Schalle lag entweder zwischen 55 und 62 dB oder zwischen 77 und 84 dB. Der Wiedergabepiegel war auf maximal 85 dB begrenzt.

Die sich ergebenden eingeregelten Pegel sind in Abbildung 7.6 (links) zu sehen. Im Median stellten die Versuchsteilnehmer die Schalle auf Pegel zwischen 70 und 72 dB ein. Die Pegel liegen damit für die Betriebszustände Stufe 1 und Stufe 2 deutlich über den am Produkt gemessenen Pegeln. Auch unterschieden die Probanden nicht zwischen den drei Schallen. Alle wurden auf vergleichbare Werte eingeregelt, wobei sich große interindividuelle Interquartilbereiche von bis zu 10 dB ergeben. Die Varianzanalyse zeigt Hinweise

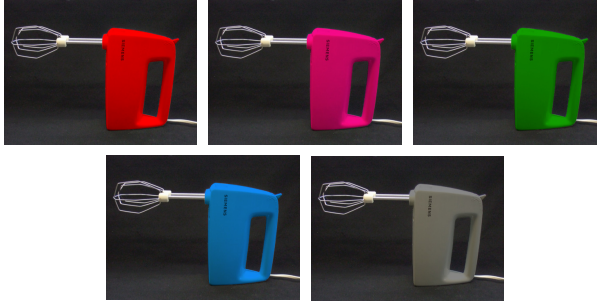


Abbildung 7.5.: Standbilder aus Videosequenzen eingefärbter Küchenmixer. Farben (von links oben nach rechts unten): c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_2 („Grün“), c_4 („Blau“) und c_3 („Dunkelgrau“)

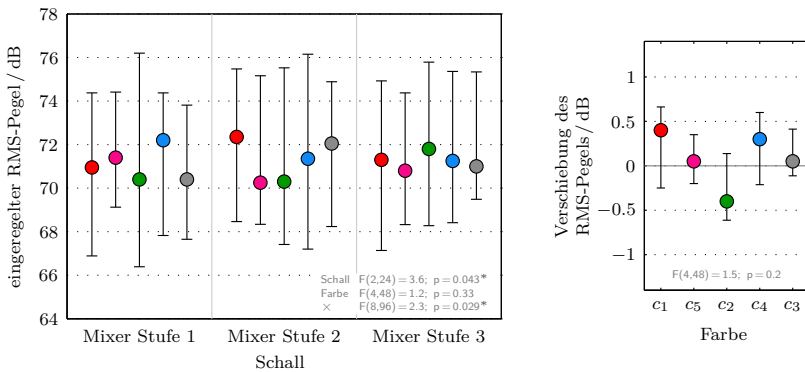


Abbildung 7.6.: Eingeregelte Pegel von animierten Küchenmixern bei verschiedenen präsentierten Farben (links) sowie entsprechende farbabhängige Pegelverschiebungen (rechts)

auf eine Interaktion zwischen den Faktoren „Schall“ und „Farbe“. Bei einer getrennten Betrachtung der einzelnen Schalle bestätigte sich dies jedoch nicht, bei keinem Schall traten bei getrennter Analyse signifikante Farbeffekte auf.

Eine globale Betrachtung der Farbeinflüsse anhand der farbabhängigen Pegeldifferenzen (Abbildung 7.6 rechts) zeigt leichte Tendenzen im Bereich von 0.5 dB, jedoch keine signifikanten Einflüsse. Die auftretenden Schwankungen bei c_1 („Hellrot“), c_2 („Grün“) und c_4 („Blau“) lassen sich durch eine Aufteilung der Probanden in zwei Gruppen erklären (Abbildung 7.7). In der links gezeigten ersten Gruppe mit sieben Probanden finden sich

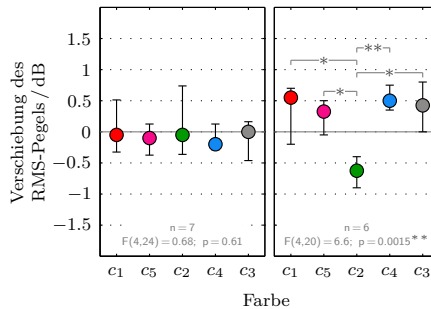


Abbildung 7.7.: Gruppenbildung bei Einregelung einer realistischen Lautheit von Küchenmixern.

praktisch keine Veränderungen des eingeregelten Pegels in Abhängigkeit der Farbe des Küchenmixers. Hochsignifikante Einflüsse sind hingegen bei der zweiten Gruppe, bestehend aus sechs Personen, zu erkennen. Um eine realistische Lautheit zu erzielen wurden Mixer der Farben c_1 („Hellrot“), c_5 („Magenta“), c_4 („Blau“) und c_3 („Dunkelgrau“) hier etwa 1 dB höher eingeregelt als Geräte, die mit c_2 („Grün“) eingefärbt waren. Der Interpretation aus Abschnitt 5.2.2 folgend bedeutet dies also, dass für c_2 („Grün“) eine um ca. 5.4 % geringere Lautheit als realistisch empfunden wird als für andere Farben. Diese Tendenz stimmt mit den Ergebnissen vorheriger Lautheitsbeurteilungen überein. Anderen Farben wie c_3 („Dunkelgrau“), die zuvor als leiser bewertet wurde, wird hier eine höhere Lautheit zugeordnet.

Es zeigt sich also, dass für knapp die Hälfte der Versuchspersonen die als realistisch empfundene Lautheit von Küchenmixern von der Farbgebung abhängt. Bis auf die Farben c_4 („Blau“) und c_3 („Dunkelgrau“) stimmen die Einflüsse qualitativ mit den Ergebnissen aus Lautheitsschätzungen überein.

7.2.2. Vergleich mit Modellprognosen

Da das Modell des Farbeinflusses relative Änderungen von Lautheitsurteilen prognostiziert, müssen für einen Vergleich mit den hier vorliegenden Pegeländerungen die Modellvorhersagen zunächst umgerechnet werden. Da es sich bei den Mixergeräuschen um

breitbandige Schalle handelt, kann man, wie in Abschnitt 5.2.2 (Gleichung 5.1), hierfür die Näherung der Lautheitsfunktion für GAR (siehe Fastl und Zwicker 2007, S. 207) verwenden. Es ergibt sich der Pegelunterschied zweier Gleichmäßig Anregender Rauschen (GAR), der einem gegebenen Lautheitsverhältnis entspricht:

$$L_{GAR_1} - L_{GAR_2} = \frac{1}{0.023} \lg \frac{N_{GAR_1}}{N_{GAR_2}} \text{ dB} \quad (\text{für } L_{GAR} > \text{ca. } 55 \text{ dB}) \quad (7.1)$$

Abbildung 7.8 zeigt den Vergleich der Ergebnisse des Einregelvorgangs für eingefärbte Küchenmixer (Kreise, Gruppe 2 aus Abbildung 7.7) mit in Pegeldifferenzen umgerechneten Modellprognosen (Rauten, $s = 8$). Bis auf c_3 („Dunkelgrau“) und c_4 („Blau“) erkennt

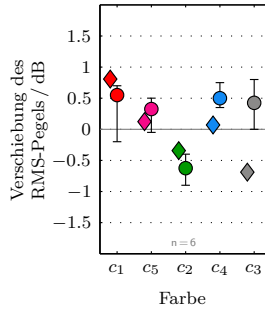


Abbildung 7.8.: Einregelung einer realistischen Lautheit von Küchenmixern im Vergleich mit Modellprognosen.

man eine recht gute Übereinstimmung der berechneten und der im Experiment ermittelten Werte. Die Abweichung bei c_3 („Dunkelgrau“) könnte darauf zurückzuführen sein, dass diese Farbe am ehesten einer plausiblen Originalfarbe eines Küchenmixers ähnelt, und somit zu einer erhöhten Erwartung an eine realistische Lautheit führen könnte. Es handelt sich also eventuell um einen ähnlichen kognitiven Effekt, wie er schon für die Farbe c_{21} („British Racing Green“) von Sportwagen in Abschnitt 4.1.1 vermutet wurde.

8. Aspekte der Gruppenbildung

Die oft beobachteten Gruppenbildungen in Experimenten zur Farbwirkung bei audio-visuellen Interaktionen haben gezeigt, dass ein Teil der Versuchspersonen anscheinend nicht von Farben in ihrem Lautheitsurteil beeinflusst wird, während dies bei anderen der Fall ist. Im Folgenden soll dieser Sachverhalt anhand von Korrelationen mit verschiedenen personenspezifischen Merkmalen näher untersucht werden. Betrachtet werden Unterschiede hinsichtlich des Geschlechts und des Vorwissens.

8.1. Einfluss des Geschlechts

Greift man aus den in den Kapiteln 3 und 4 vorgestellten Experimenten jene heraus, die eine deutliche Gruppenbildung zeigen und für die Ergebnisse von mindestens zwei weiblichen Versuchspersonen vorliegen (vgl. Abbildungen 3.3, 4.3 unten, 4.6, 4.9, 4.11 und 4.19), kann man bestimmen, wie häufig männliche bzw. weibliche Versuchspersonen in eine Gruppe mit bzw. ohne Farbeinfluss fallen. Es ergibt sich die in Tabelle 8.1 dargestellte 4-Felder-Tafel.

Tabelle 8.1.: 4-Felder-Tafel für den Zusammenhang zwischen Farbeinfluss und Geschlecht. Gezeigt sind die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Kombinationen sowie die Zeilen- und Spaltensummen. Es liegt ein hochsignifikanter Einfluss des Geschlechts vor [$\chi^2 = 6.8$; $p = 0.0093^{**}$].

	männlich	weiblich	
kein Farbeinfluss	51	12	63
Farbeeinfluss	21	16	37
	72	28	100

Man erkennt einen klaren Einfluss des Geschlechts auf die Häufigkeit, mit der Farbeinflüsse beobachtet wurden. Von 28 weiblichen Versuchspersonen fanden sich zwölf in Gruppen ohne Farbeinfluss auf die Lautheitsbewertung, während 16 eine Beeinflussung zeigten. Männliche Probanden hingegen waren weniger als halb so häufig in Gruppen mit Farbeinflüssen zu finden als in Gruppen ohne Farbeffekte. Ein χ^2 -Test (Bortz 1993) zeigt, dass sich die Anteile weiblicher Versuchspersonen in Gruppen mit Farbeinfluss (43 %) und ohne Farbeinfluss (19 %) hochsignifikant vom Anteil in der Gesamtprobandengruppe (28 %) unterscheiden [$\chi^2 = 6.8$; $p = 0.0093^{**}$]. Die Stärke der Korrelation zwischen den beiden zweistufigen Merkmalen „Geschlecht“ und „Beeinflussbarkeit durch Farben“ wird durch den Φ -Koeffizienten angegeben (Bortz 1993): Es ergibt sich eine positive Korrelation von $\Phi = 0.26$. Die Lautheitsurteile der weiblichen Versuchspersonen wurden also im

Vergleich zu den Urteilen der männlichen Probanden bei den geschilderten Experimenten überproportional häufig durch die präsentierten Farben beeinflusst.

Auch die Stärke des Farbeinflusses scheint teilweise vom Geschlecht abzuhängen. Vergleicht man die Ergebnisse weiblicher und männlicher Probanden mit Farbeinflüssen bei Betrachtung synthetischer Stimuli (Abbildung 8.1) bzw. technischer und natürlicher Stimuli (Abbildung 8.2) fällt auf, dass die resultierenden Verschiebungen der Lautheitsurteile bei weiblichen Versuchspersonen im Median öfter etwas größer ausfallen.

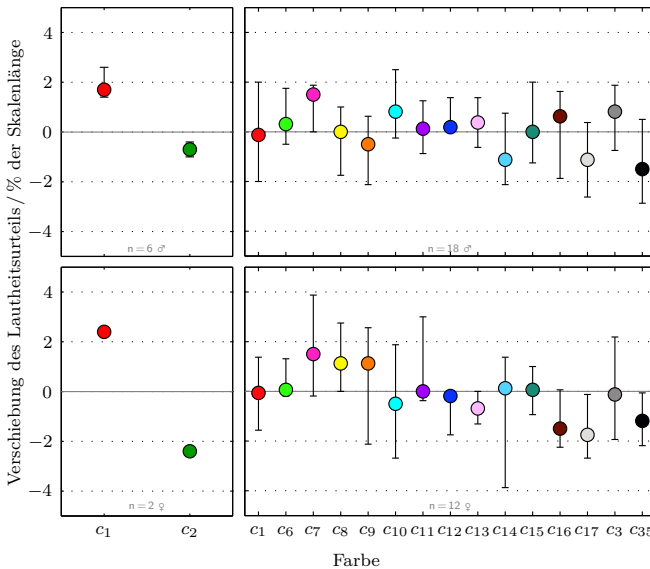


Abbildung 8.1.: Ergebnisse männlicher (oben) und weiblicher (unten) Versuchspersonen mit Farbeinflüssen bei Betrachtung synthetischer Stimuli. Links: Zusammengefasste Daten für Gleichmäßig Anregendes Rauschen aus Abbildung 3.3. Rechts: Zusammengefasste Daten für Gleichmäßig Anregendes Rauschen mit Farbflächen bzw. Bilder von Radios aus Abbildungen 3.10 bzw. 3.12

In Abbildung 8.1 (links) ist zu sehen, dass bei Lautheitsbewertung von Gleichmäßig Anregendem Rauschen in Kombination mit Farbflächen (Abschnitt 3.2.1) die weiblichen Versuchspersonen größere Verschiebungen der Lautheitsurteile von über 2% relativ zur Skalenlänge aufweisen. Im rechten Teil der Abbildung (vgl. Abschnitt 3.3) erkennt man zudem die Tendenz, dass bei den männlichen Probanden der Unterschied zwischen schreienden Farben wie c_7 („leuchtendes Magenta“) bis c_9 („Orange“) und nicht schreienden Farben wie c_{16} („Braun“), c_{17} („Grau“) und c_3 („Dunkelgrau“) schwächer ausgeprägt zu

sein scheint. Bei Versuchen mit Sinustönen (Abschnitt 3.2.2) zeigten nur zwei männliche Probanden Farbeinflüsse, deshalb sind diese Ergebnisse hier nicht gezeigt.

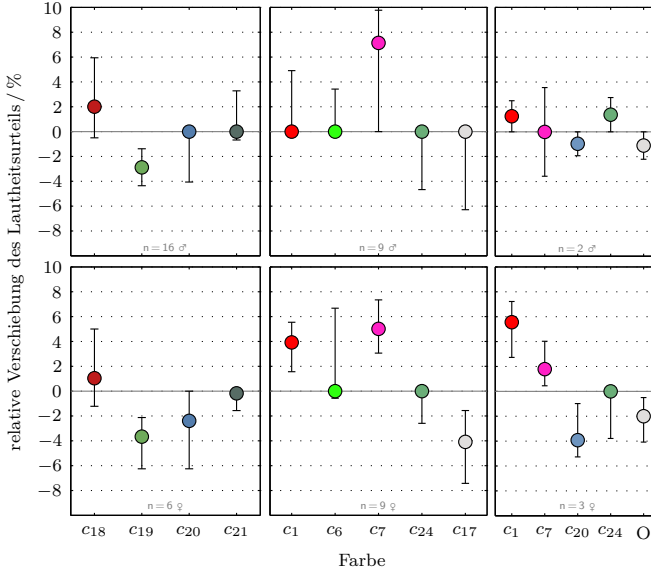


Abbildung 8.2.: Ergebnisse männlicher (oben) und weiblicher (unten) Versuchspersonen mit Farbeinflüssen bei Betrachtung realistischer Stimuli. Links: Zusammengefasste Daten für Standbilder von Sportwagen aus Abbildung 4.3. Mitte: Zusammengefasste Daten für Bewegtbilder von PKW und Zügen aus Abbildungen 4.6, 4.9 und 4.11. Rechts: Daten für Wasserfälle aus Abbildung 4.19

Bei Darbietungen eingefärbter Sportwagen (Abbildung 8.2 links, vgl. Abschnitt 4.1.1) sind keine deutlichen geschlechtsspezifischen Unterschiede zu erkennen. Bei Verwendung von Bewegtbildern hingegen sind klare Abhängigkeiten der Effektstärke vom Geschlecht der Probanden zu sehen (Abbildung 8.2 Mitte, vgl. Abschnitte 4.1.2, 4.2). Während männliche Probanden nur bei c_7 („leuchtendes Magenta“) im Median eine deutliche Verschiebung ihrer Lautheitsbewertung zeigten und ansonsten Farbeinflüsse anhand der Interquartilbereiche nur tendenziell zu erkennen sind, weisen die weiblichen Versuchspersonen bei drei von fünf Farben im Median Einflüsse auf. Bei Präsentation realistisch und unrealistisch eingefärbter Wasserfälle (Abbildung 8.2 rechts, vgl. Abschnitt 4.4) fallen die relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile bei den männlichen Probanden mit 1 % bis 2 % relativ gering aus. Die weiblichen Versuchspersonen ließen sich durch die dargebotenen Farben offenbar wesentlich stärker beeinflussen, was sich in einer Spanne der relativen Verschiebungen der Lautheitsurteile von 9.5 % äußert. Die Zusammensetzung der Proban-

engruppe hinsichtlich des Geschlechts kann demnach bei Versuchen zu audio-visuellen Interaktionen zwischen Farbe und Lautheitsurteil unter Umständen das Ergebnis beeinflussen und sollte daher bei der Interpretation der Resultate berücksichtigt werden.

8.2. Einfluss des Vorwissens

Eine weitere Größe, die auf mögliche Zusammenhänge mit der beobachteten Gruppenbildung untersucht wurde, ist das Vorwissen der Probanden. Vorwissen bedeutet hierbei, dass Versuchspersonen zum Zeitpunkt des Experiments schon über Phänomene des Farbeinflusses auf Lautheitsurteile informiert waren. Dieses Wissen könnte während der Versuchsdurchführung bewusst oder unbewusst zu einer Beeinflussung der abgegebenen Lautheitsurteile führen, die sich dann potentiell von Urteilen von Probanden ohne Vorwissen unterscheiden könnten. Die Versuchspersonen wurden dazu im Vorfeld der Experimente befragt, ob entsprechende Kenntnisse über Ergebnisse früherer Studien zu audio-visuellen Interaktionen bestehen.

Analog zum Vorgehen im vorherigen Abschnitt kann man eine 4-Felder-Tafel aufstellen, die die verschiedenen Häufigkeiten darstellt (Tabelle 8.2). Es wurden hierfür Daten aus den Abbildungen 3.3, 3.7, 4.6, 4.9, 4.11 und 4.19 verwendet. Der relative Anteil von Personen mit Vorwissen in Gruppen mit bzw. ohne Farbeffekte unterscheidet sich nicht signifikant [$\chi^2 = 0.11$; $p = 0.74$]. Ob ein Versuchsteilnehmer schon über Ergebnisse früherer Experimente zu Farbeffekten informiert war, scheint also nachfolgende Lautheitsbeurteilungen nicht beeinflusst zu haben.

Tabelle 8.2.: 4-Felder-Tafel für den Zusammenhang zwischen Farbeinfluss und Vorwissen. Gezeigt sind die absoluten Häufigkeiten der jeweiligen Kombinationen sowie die Zeilen- und Spaltensummen. Es liegt kein signifikanter Einfluss vor [$\chi^2 = 0.11$; $p = 0.74$].

	kein Vorwissen	Vorwissen	
kein Farbeinfluss	27	36	63
Farbeeinfluss	13	20	33
	40	56	96

9. Hirnaktivierungsstudien

Um Hinweise auf die Wirkung der Verknüpfung auditiver und visueller Sinneswahrnehmungen im Gehirn zu erhalten wurde in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe für funktionelle, strukturelle und molekulare Bildgebung des Zentrums für Sensomotorik am Klinikum Großhadern der Universität München eine Studie mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) durchgeführt. Ein Magnetresonanztomograph (MRT) bestimmt dabei über den Sauerstoffgehalt im Blut („Blood Oxygenation Level Dependent“ Effekt, BOLD-Effekt) die neuronale Aktivität in den einzelnen Bereichen des Gehirns (Stöcker und Shah 2007). Über Differenzbildung können die Aktivierungen bzw. Deaktivierungen einzelner Hirnregionen bei unterschiedlichen Reizkonditionen verglichen werden um so Rückschlüsse ziehen zu können, welche Areale bei der Verarbeitung der Stimuli beteiligt sind.

Im vorliegenden Experiment wurden Hirnaktivierungen von Probanden erfasst, während ihnen Kombinationen aus verschiedenen akustischen und optischen Reizen präsentiert wurden. Es wurden hierbei einerseits verschiedenfarbige optische Stimuli verwendet, die inhaltlich zu den akustischen Reizen passen, andererseits Stimuluskombinationen, die keine bedeutungsmäßige Verknüpfung aufweisen. Gleichzeitig wurden mittels eines Forced-Choice Verfahrens Daten zur Beeinflussbarkeit der Versuchsteilnehmer durch die dargebotenen verschiedenfarbigen Stimuli erhoben. Hierfür musste zunächst die Schalldarbietung an den Tomographen angepasst werden.

9.1. Schalldarbietung

Für die Schalldarbietung im MRT mussten spezielle elektrostatische Kopfhörer verwendet werden, die nicht mit den starken Magnetfeldern des Tomographen wechselwirken und zusätzlich eine hohe Dämmung gegenüber unerwünschten Störschallen bieten. Um dennoch die für psychoakustische Versuche notwendigen definierten Versuchsbedingungen sicherzustellen, wurde für das im MRT installierte Kopfhörermodell (NordicNeuroLab AudioSystem) das Freifeldübertragungsmaß bestimmt und eine entsprechende Entzerrung entworfen.

Über Lautheitsvergleiche mit Referenzkopfhörern (Beyerdynamic DT48A mit Freifeldentzerrung nach Fastl und Zwicker 2007, S. 7) wurde dazu mit Hilfe des in DIN 45 619-2 (1975) beschriebenen Verfahrens bei Frequenzen zwischen 63 Hz und 10 kHz in Terzabständen der freifeldäquivalente Schalldruckpegel der MRT-Kopfhörer bestimmt. Im linken Teilbild von Abbildung 9.1 sind die Pegel (in dB relativ zum Wert bei 1 kHz) dargestellt, die sich bei konstanter Spannung am Eingang des Kopfhörerverstärkers ergeben (Kreise). Man erkennt deutliche Frequenzabhängigkeiten mit Unterschieden von etwa 10 dB zwischen tiefen und mittleren Frequenzen und einem Einbruch von ca. 8 dB bei 3 bis 4 kHz.

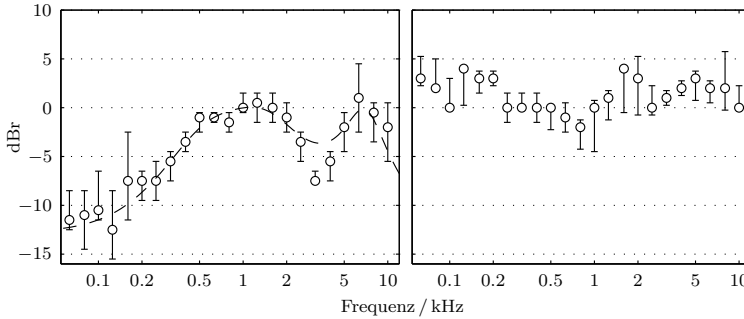


Abbildung 9.1.: Links: Freifeldübertragungsmaß der im MRT verwendeten Kopfhörer bei konstanter Eingangsspannung am Verstärker (Kreise) sowie Dämpfungsverlauf des entwickelten Entzerrers (gestrichelte Kurve). Rechts: Freifeldübertragungsmaß mit vorgeschaltetem Entzerrer bei konstanter Spannung am Entzerrereingang. Alle Pegelanlagen sind auf den Wert bei 1 kHz bezogen.

Durch Modifikation der in Fastl und Zwicker (2007, Fig. 1.5e) vorgeschlagenen aktiven Schaltung konnte ein Entzerrernetzwerk entwickelt werden, das die frequenzabhängigen Schwankungen des MRT-Kopfhörers weitgehend ausgleicht. Der Verlauf der Dämpfung des Entzerrers ist als gestrichelte Kurve in Abbildung 9.1 (links) eingezeichnet. Dieser Verlauf wurde zusätzlich in Form eines FIR-Filters realisiert, um einzelne Schalle auch unabhängig von der Hardware-Implementierung des Entzerrers auf digitaler Ebene bearbeiten zu können. Das resultierende Freifeldübertragungsmaß mit vorgeschaltetem Entzerrer ist im rechten Teilbild von Abbildung 9.1 zu sehen. Bis auf ± 3 dB ist ein frequenzunabhängiger Verlauf erzielbar. Zusätzlich wird durch den nun bekannten Zusammenhang zwischen Spannung am Entzerrer und hervorgerufenem Schalldruckpegel eine kalibrierte Wiedergabe ermöglicht.

9.2. Versuchsablauf

Stimuli

Die dargebotenen Stimuli orientierten sich an Patsouras et al. (2002). Es wurden Standardbilder von ICEs in den Farben c_{22} („Rot“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{25} („ICE Weiß“) verwendet (Abbildung 9.2). Diese wurden über einen unkalibrierten Projektor auf eine Leinwand abgebildet und den im MRT liegenden Probanden über ein Spiegelsystem präsentiert. Als vierte optische Kondition diente „kein Bild“, was durch Projektion einer schwarzen Fläche realisiert wurde. Als passender akustischer Reiz wurde ein 5 s dauerndes Zugvorbeifahrtgeräusch gewählt, das in drei verschiedenen Pegeln ($L_{F,max} = 83$ dB, 85 dB und 87 dB) unter Verwendung der beschriebenen Freifeldentzerrung dargeboten wurde. Als vierte akustische Kondition wurde der Fall betrachtet, dass kein Zugschall über die Kopfhörer



Abbildung 9.2.: Während der fMRT-Studie dargebotene Bilder eingefärbter Züge in den Farben c_{22} („Rot“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{25} („ICE Weiß“).

wiedergegeben wurde. Die 16 möglichen Stimuluskombinationen wurden in zufälliger Reihenfolge fünfmal wiederholt dargeboten. Zur Verringerung des Störschallpegels durch die Arbeitsgeräusche des MRT wurde Sparse Imaging eingesetzt. Bei dieser Methode erfolgt die mit hochpegeligen Störgeräuschen verbundene Bildaufnahme durch den Tomographen erst kurz (im vorliegenden Experiment 790 ms) nach Ende der Stimuluspräsentation (siehe z. B. Amaro Jr et al. 2002, Schneider und Fink 2007). Da die Hirnaktivierung, gemessen über den Sauerstoffgehalt im Blut, gegenüber der eigentlichen neuronalen Aktivität um ca. 4 s verzögert ist und einige Sekunden anhält (Stöcker und Shah 2007), können somit auch nach der Reizdarbietung noch Daten erhoben werden.

Die Kombinationen aus Zugschall und Zugbild stellen die „passenden“ audio-visuellen Reize dar, die Kombinationen aus Zugbild und Hintergrundschall bzw. Zugschall und schwarzem Bild die „unpassenden“ Stimuli.

Forced-Choice Aufgabe

Um die Beeinflussbarkeit der Lautheitsurteile der Probanden während des fMRT-Experiments zu ermitteln, wurde den Versuchspersonen eine zusätzliche Aufgabe gestellt. Aufgrund der technischen Gegebenheiten konnte hierfür die Versuchsmethode der Größenschätzung nicht eingesetzt werden. Stattdessen wurde auf ein Forced-Choice Verfahren zurückgegriffen: die Versuchsteilnehmer wurden angewiesen, durch Tastendruck zu entscheiden, ob der gerade über die Kopfhörer gehörte Schall lauter oder leiser als der Vorgängerschall war. Die Kondition „kein Zugschall“ sollte hierbei als leiser als alle anderen Schalle beurteilt werden. Um die Dauer des Experiments zu beschränken wurden nicht alle möglichen Kombinationen aus Schall- und Bildabfolge berücksichtigt.

9.3. Ergebnisse

Forced-Choice Aufgabe

Die relativen Häufigkeiten der Urteile „lauter als der Vorgänger“ bzw. „leiser als der Vorgänger“ sind in Abbildung 9.3 in Abhängigkeit der jeweiligen Pegeldifferenz zum Vorgängerschall getrennt nach den visuellen Stimuli zu sehen. Fälle, in denen kein Zug zu hören war, sind hierbei nicht berücksichtigt. Fehlende Balken im Diagramm zeigen an, dass diese Kombination aus Pegeldifferenz und optischem Stimulus im Versuchsablauf nicht vorkam.

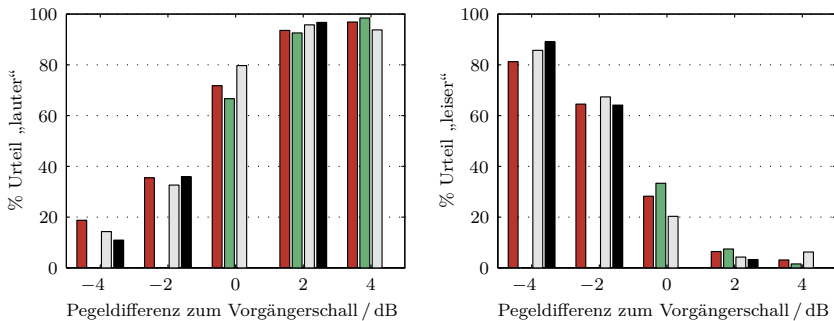


Abbildung 9.3.: Ergebnisse der Forced-Choice Aufgabe während des fMRT-Experiments. Für die Zugbilder in den Farben c_{22} („Rot“), c_{24} („Lindgrün“) und c_{25} („ICE Weiß“) sowie für den Fall ohne Bild (Schwarz) sind die relativen Häufigkeiten der Urteile „lauter als der Vorgänger“ (links) und „leiser als der Vorgänger“ (rechts) über der Pegeldifferenz zum Vorgängerschall aufgetragen. Fehlende Balken zeigen an, dass für diese Stimuluskombination keine Daten vorhanden sind.

Man erkennt eine generell gute Übereinstimmung mit den aufgrund der Pegeldifferenzen (ohne Berücksichtigung möglicher Farbeinflüsse) erwarteten Urteilen. Wie im linken Teilbild zu sehen ist treten aber auch Fälle ein, in denen zwar der aktuell gehörte Zug einen um 4 bzw. 2dB geringeren Pegel aufweist als der zuvor gehörte, Probanden den Schall jedoch in bis zu 36 % der Fälle als lauter beurteilten. Bei einer Pegeldifferenz von -4 dB ist dies vor allem in Kombination mit einem Zugbild der Farbe c_{22} („Rot“) der Fall. Insgesamt tendieren die Probanden dazu, öfter „lauter“ zu antworten, also den zuletzt gehörten Schall als lauter zu beurteilen, was vor allem bei einer Pegeldifferenz von 0 dB deutlich wird. Diese Tendenz ist als Recency Effekt aus Untersuchungen zur Gesamtlautheit zeitvarianter Schalle bekannt (z. B. Susini et al. 2002, Pedersen und Ellermeier 2008). Im rechten Teilbild ist zusätzlich zu sehen, dass trotz positiver Pegeldifferenzen in einigen Fällen Probanden den aktuell gehörten Schall als leiser beurteilten.

Ein systematischer Einfluss der Farbe, wie er in den vorangegangenen Kapiteln teilweise festgestellt werden konnte, ist in diesem Experiment nicht zu erkennen, eventuell aufgrund der ungewohnten bzw. ungünstigen Bedingungen innerhalb des Tomographen hinsichtlich Bilddarbietung und Störschallpegel.

Hirnaktivierungen

Im Folgenden werden signifikante Erhöhungen im BOLD-Signal bei Vergleich verschiedener Reizbedingungen horizontalen Schnittbildern des Gehirns überlagert. Die statistische Auswertung (korrigiert für Mehrfachvergleiche, siehe Bortz 1993, Wohlschläger et al. 2007) liefert t-Werte, die in den Abbildungen farbig kodiert sind. Die Abbildungen stellen gemittelte Daten von allen 16 Probanden dar, die an diesem Versuch teilnahmen. Es werden dazu die BOLD-Signale, die bei Darbietung zweier definierter Stimulusbedingungen vom

Tomographen ermittelt wurden, miteinander verglichen. Größere t-Werte signalisieren signifikantere Erhöhungen der BOLD-Signale, und damit eine Zunahme der Hirnaktivierung, in den jeweiligen Hirnarealen bei Vergleich der betrachteten Stimuluskonditionen.

Abbildung 9.4 zeigt signifikante Erhöhungen der Aktivierung bei Vergleich der Reizbedingungen „Stimulus mit Zugbild“ und „Stimulus ohne Zugbild“. Die Abbildung stellt also Gebiete im Gehirn dar, die signifikant stärker aktiviert waren, wenn ein Zugbild zu sehen war, im Gegensatz zu Fällen, in denen eine schwarze Fläche zu sehen war (unabhängig von der Farbe des Zuges oder dem gleichzeitig gehörten Schall). Wie erwartet liegen die Aktivierungen hierbei hauptsächlich im visuellen Cortex, der sich im mittleren hinteren Bereich des Gehirns befindet (siehe z. B. $z = -9$ mm bis $z = 11$ mm) und für die Wahrnehmung optischer Reize zuständig ist (Zilles und Rehkämper 1994).

In Abbildung 9.5 sind analog dazu signifikante Erhöhungen der Aktivierung bei Darbietung von Stimuli mit Zugschall im Vergleich zu Stimuli ohne Zugschall (unabhängig von gleichzeitig präsentierten Bildern oder dem Pegel des Schalls) dargestellt. Auch hier entspricht die beobachtete Verteilung der Aktivierungen der Erwartung: es sind hauptsächlich Gebiete des für die Wahrnehmung akustischer Reize verantwortlichen auditorischen Cortex in mittleren seitlichen Arealen des Gehirns (siehe z. B. $z = -4$ mm bis $z = 21$ mm) stärker aktiviert (Zilles und Rehkämper 1994).

Vergleicht man nun Hirnaktivierungen, die während der Darbietung zueinander passender audio-visueller Stimuli (Zugbilder mit Zugschallen) auftraten mit Aktivierungen, die während der Darbietung unpassender Stimuli (Zugbilder ohne Zugschall oder Zugschalle ohne Zugbild) festgestellt wurden, zeigt sich, dass passende audio-visuelle Stimuli eine Zunahme der Aktivierung sowohl des visuellen als auch des auditorischen Cortex hervorgerufen haben. Gebiete mit signifikanter Zunahme sind in Abbildung 9.6 farblich markiert. Jene Gebiete, die für die Wahrnehmung optischer und akustischer Sinneseindrücke zuständig sind (siehe Abbildungen 9.4 und 9.5), reagierten also stärker, wenn sie einen Reiz verarbeiteten, bei dem eine inhaltliche Verknüpfung zwischen den optischen und akustischen Anteilen bestand.

Vergleicht man hingegen die Aktivierungen bei Darbietung unpassender Stimuli (Zugbilder ohne Zugschall oder Zugschalle ohne Zugbild) und bei Darbietung passender Stimuli (Zugbilder mit Zugschallen), findet man erhöhte Aktivierung in den in Abbildung 9.7 dargestellten Arealen. Diese liegen vor allem im superioren temporalen Cortex (siehe seitliche Gebiete z. B. bei $z = 6$ mm, Zilles und Rehkämper 1994) und wurden, im Vergleich zur Wahrnehmung passender audio-visueller Stimuli, bei Darbietung nicht zusammenpassender Reize zusätzlich aktiv.

Unterschiede hinsichtlich der Farbgebung der dargebotenen Zugbilder konnten, wie schon bei der parallel durchgeführten Forced-Choice Aufgabe, nicht festgestellt werden.

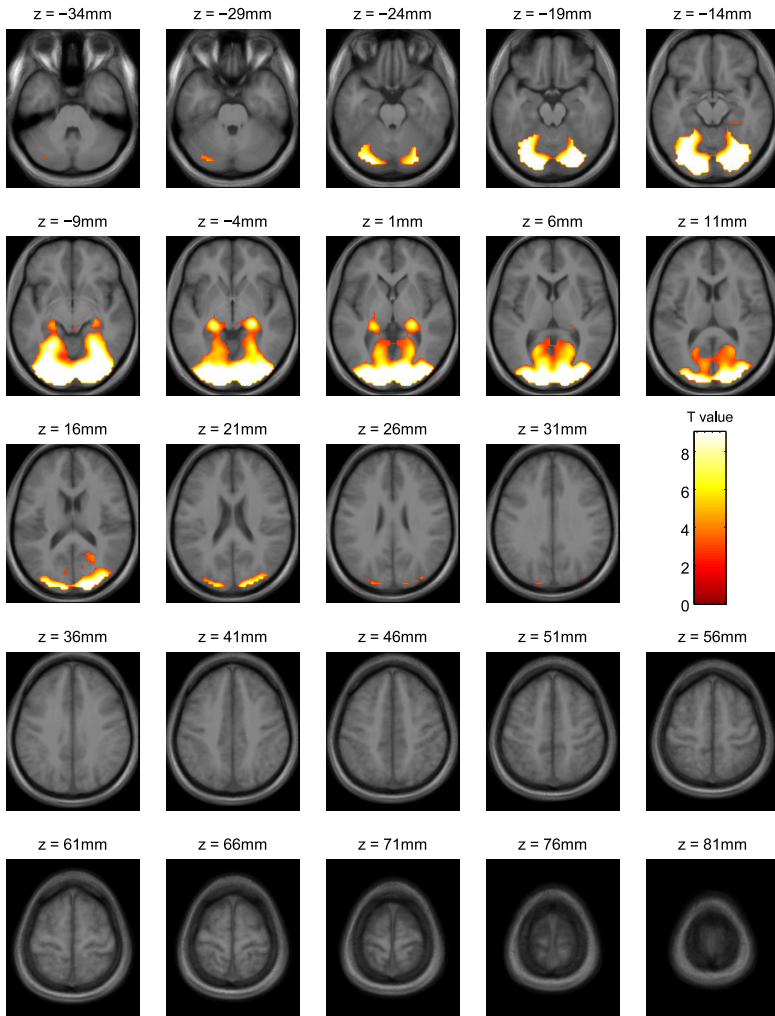


Abbildung 9.4.: Horizontale Hirnschnitte mit signifikanten Erhöhungen der Aktivierung bei Darbietung von Stimuli, die ein Zugbild enthalten, im Vergleich zu Stimuli, die kein Zugbild enthalten ($n = 16$, $t > 2.56$, $p < 0.05$)

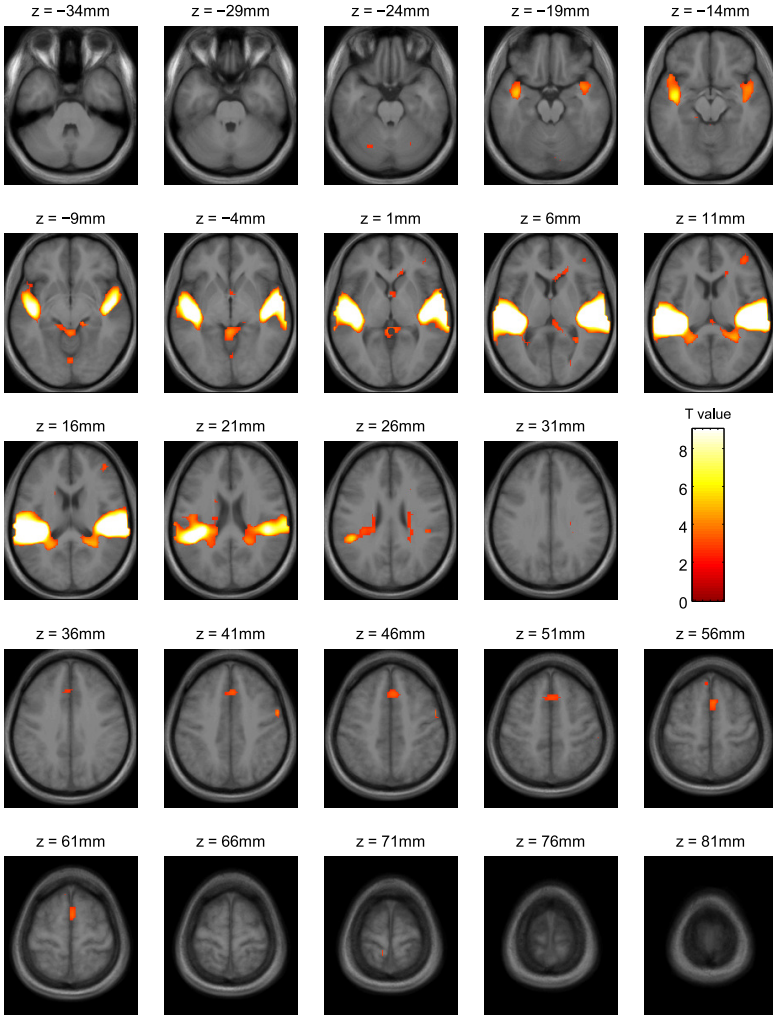


Abbildung 9.5.: Horizontale Hirnschnitte mit signifikanten Erhöhungen der Aktivierung bei Darbietung von Stimuli, die einen Zugschall enthalten, im Vergleich zu Stimuli, die keinen Zugschall enthalten ($n = 16$, $t > 2.60$, $p < 0.05$)

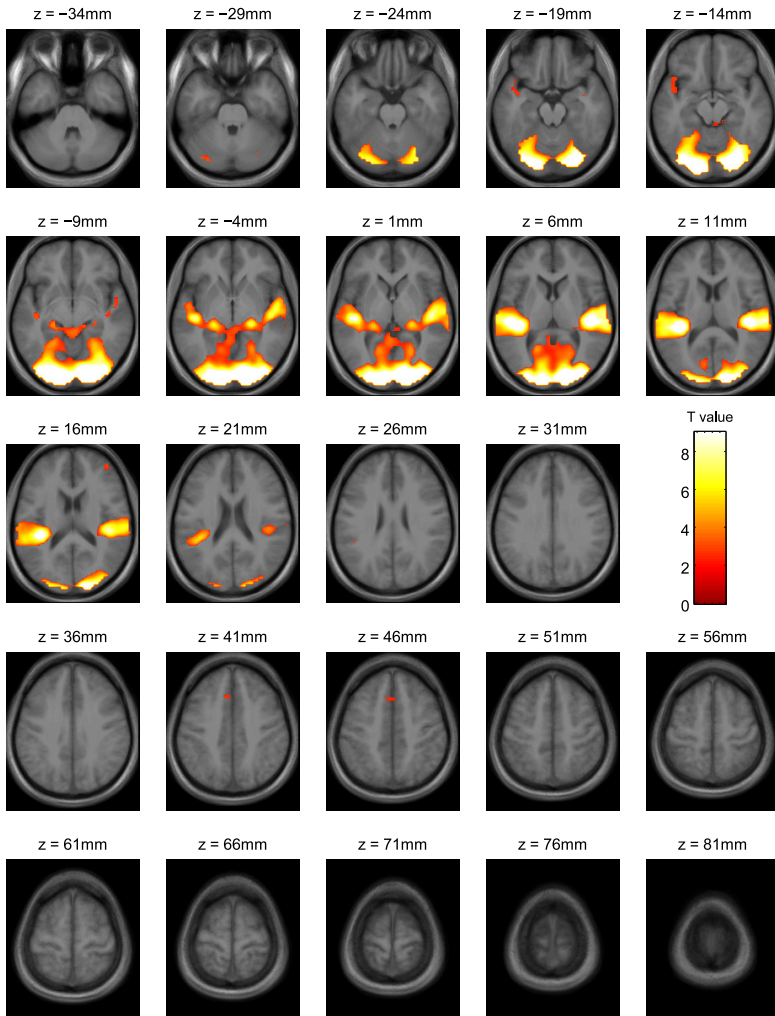


Abbildung 9.6.: Horizontale Hirnschnitte mit signifikanten Erhöhungen der Aktivierung bei Darbietung passender im Vergleich zu unpassenden audio-visuellen Reizen ($n = 16$, $t > 2.47$, $p < 0.05$)

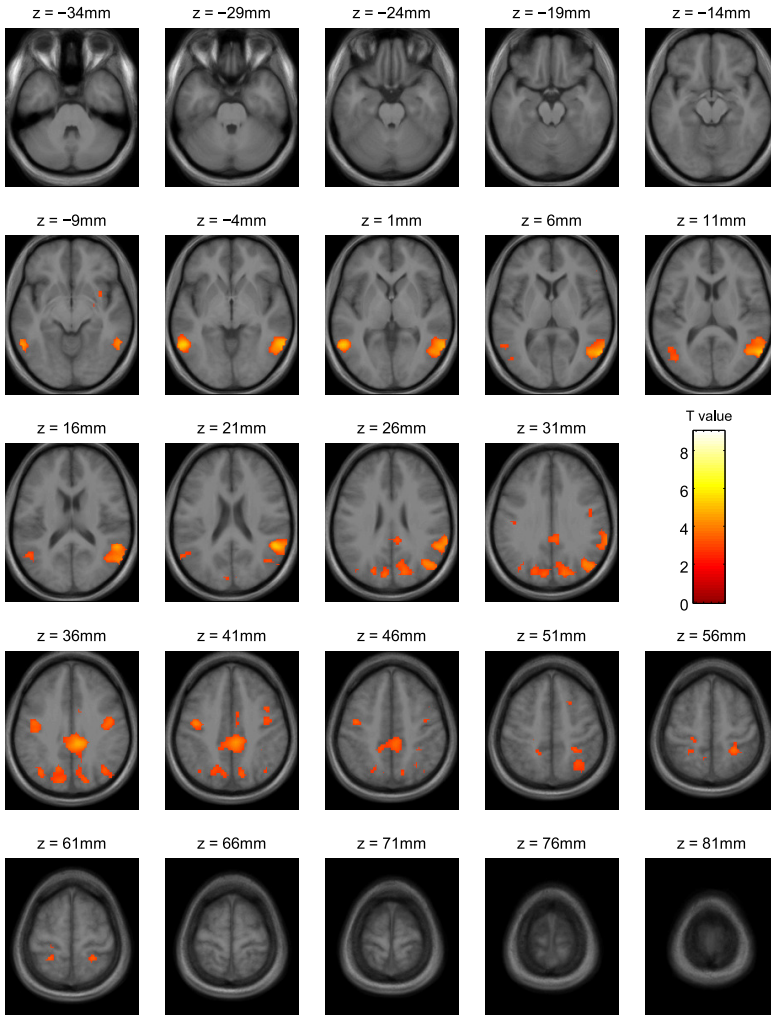


Abbildung 9.7.: Horizontale Hirnschnitte mit signifikanten Erhöhungen der Aktivierung bei unpassender im Vergleich zu passender audio-visueller Reizung ($n = 16$, $t > 2.81$, $p < 0.05$)

9.4. Diskussion

In Abbildung 9.8 sind zusammenfassend Hirnschnitte bei $z = 6$ mm aus den vorangegangenen Abbildungen 9.4 bis 9.7 für die verschiedenen untersuchten Reizbedingungen gegenübergestellt. Man erkennt in Teilbild (a) Aktivierungen im visuellen Cortex und in Teilbild (b) Aktivierungen im auditorischen Cortex.

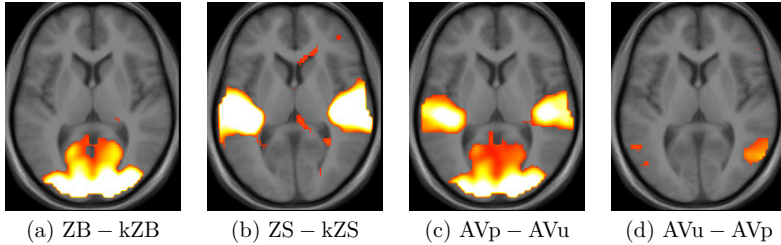


Abbildung 9.8.: Horizontale Hirnschnitte bei $z = 6$ mm mit signifikanten Erhöhungen der Aktivierung für vier Paare von Stimulusbedingungen. (a) Zugsbild *vs.* kein Zugsbild; (b) Zugschall *vs.* kein Zugschall; (c) passender audio-visueller Reiz *vs.* unpassender audio-visueller Reiz; (d) unpassender audio-visueller Reiz *vs.* passender audio-visueller Reiz

Teilbild (c) zeigt die zusätzlich aufgetretenen Aktivierungen in beiden Cortices bei Darbietung zueinander passender audio-visueller Stimuli. Es fand also keine gegenseitige Hemmung der Verarbeitungszentren akustischer und optischer Stimuli statt, vielmehr führten in ihrem Bedeutungsgehalt zusammenpassende Reizanteile zu einer Verstärkung der schon in diesen Arealen vorhandenen neuronalen Aktivität.

In Teilbild (d) sind die zuvor erwähnten Aktivierungen im superioren temporalen Cortex zu sehen, die nur bei Darbietung unpassender audio-visueller Reize auftraten. Diese Gebiete sind aus der Literatur bekannt und wurden in verschiedenen Studien im Zusammenhang mit multimodaler Verarbeitung diskutiert. Calvert (2001) etwa stellt in einer Übersicht Ergebnisse bildgebender Verfahren zur Verarbeitung audio-visueller und anderer multimodaler Reize im Gehirn vor. Vor allem bei der Wahrnehmung nicht zusammenpassender audio-visueller Sprachstimuli zeigen sich demnach Aktivierungen im superioren temporalen Cortex ähnlich den hier vorgestellten. Beauchamp (2005) weist darauf hin, dass Strukturen im superioren temporalen Cortex aufgrund ihrer Lage zwischen dem auditorischen und dem visuellen Cortex gut dazu geeignet sind, Informationen aus diesen beiden Gebieten zu integrieren. Diese Hypothese kann im vorliegenden Fall durch Vergleich der Teilbilder aus Abbildung 9.8 nachvollzogen werden: die in Teilbild (d) markierten Areale liegen zwischen den beiden primären Cortices, die in den anderen Teilbildern zu sehen sind.

Während also in diesem Experiment keine messbaren Unterschiede hinsichtlich der Farbgebung auftraten, eventuell aufgrund der schwierigen akustischen und optischen Bedingungen innerhalb des Tomographen, konnten Hinweise darauf gefunden werden, dass

passende und unpassende audio-visuelle Reize im Gehirn eine getrennte Verarbeitung erfahren. Ein Vergleich mit früheren Untersuchungen deutet jedoch darauf hin, dass diese Unterscheidung die Lautheitsbeurteilung passender gegenüber unpassender audio-visueller Stimuli nicht maßgeblich beeinflusst: In Fastl (2004) wird berichtet, dass sich Lautheitsbewertungen von Zugschallen kombiniert mit Zugbilder im Mittel nicht von Lautheitsbewertungen von Zugschallen kombiniert mit Bildern anderer Szenarien unterscheiden.

10. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde die Beeinflussung von Lautheitsurteilen durch gleichzeitig dargebotene Farbreize untersucht. Im Hinblick auf Anwendungsbereiche wie Lärmbekämpfung oder sound-quality engineering sollten Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Farben Erhöhungen oder Verminderungen der Lautheitsbewertung bewirken, und welche Faktoren die dabei auftretenden audio-visuellen Interaktionen beeinflussen.

In psychoakustischen Experimenten beurteilten Probanden hierfür die Lautheit synthetischer, technischer und natürlicher Schalle, während ihnen verschiedenfarbige optische Stimuli in Form von Farbflächen, Standbildern oder Bewegtbildern dargeboten wurden. Die Ergebnisse der meisten Experimente wiesen dabei eine deutliche Gruppenbildung auf: etwa 40 % der Probanden ließen sich in ihren Lautheitsurteilen von den gezeigten Farben beeinflussen, die übrigen Versuchsteilnehmer zeigten keine Farbabhängigkeiten des Lautheitsurteils. Die beobachteten signifikanten Effekte bei Probanden mit Farbeinflüssen deuten darauf hin, dass umgangssprachlich als „schreiend“ bezeichnete Farben mit hohem Rotanteil wie c_1 („Hellrot“) und c_7 („leuchtendes Magenta“) im Vergleich zu wenig oder nicht schreienden Farben wie c_2 („Grün“) und c_{17} („Grau“) in den meisten Fällen zu einer Erhöhung der Lautheitsbewertung um etwa 12 % führen. Es konnten keine Hinweise auf Pegel- oder Frequenzabhängigkeiten des Farbeinflusses gefunden werden. Bezüglich der Gruppenbildung lässt sich feststellen, dass die weiblichen Versuchspersonen im Vergleich zu den männlichen Versuchspersonen in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimenten überproportional häufig Farbeinflüsse aufweisen und diese im Mittel größer ausfallen.

Die experimentellen Ergebnisse von Probanden mit Farbeinflüssen auf das Lautheitsurteils konnten auf Basis des schreienden Farbeindrucks, der hauptsächlich durch die Buntheit einer Farbe bestimmt ist, mit einem mathematischen Modell für synthetische, technische und natürliche Stimuli in guter Näherung nachgebildet werden. Als mögliche Ursache für Abweichungen zwischen Experimentaldaten und Modellvorhersagen wurden unter anderem kognitive Effekte diskutiert. Probanden bewerteten beispielsweise Sportwagen, die in typischen Farben gezeigt wurden, als lauter im Vergleich zu Fahrzeugen mit ungewöhnlicher Farbgebung.

Als weitere potentielle Einflussfaktoren auf die Interaktion zwischen auditorischer und visueller Sinneswahrnehmung wurden die Art der optischen Darbietung sowie die Wirkung von Farb- und Lautheitspräferenzen untersucht. Hinsichtlich Änderungen der optischen Stimuluspräsentation mit dem Ziel einer erhöhten Realitätsnähe konnten keine Unterschiede zwischen Stand- und Bewegtbildern festgestellt werden. Auch eine Vergrößerung der optischen Darstellung und die Verwendung optischer virtueller Realitäten zeigte keine Begünstigung audio-visueller Interaktionen. Die Sichtbarkeit eines Objekts vor einem Hintergrund konnte zwar die Reaktionszeit auf audio-visuelle Stimuli modulieren, hatte jedoch keinen signifikanten systematischen Einfluss auf Lautheitsschätzungen.

Nur drei von fünfzehn Versuchsteilnehmern zeigten eine Korrelation zwischen Farbpräferenz und Lautheitsbeurteilung. Bei diesen Probanden führten beliebtere Farben zu geringfügig kleineren Lautheitsbewertungen. Lautheitspräferenzen, gemessen als Pegel bei angenehmer Lautstärke, konnten hingegen sowohl durch unterschiedliche Umgebungsbeleuchtung als auch durch verschiedene Farben beeinflusst werden. In Dunkelheit regelten Probanden Sprachschalle etwa 1 dB niedriger ein als bei normaler Beleuchtung. Der Farbeinfluss auf eingeregelter Werte angenehmer Lautheit ist mit den Effekten bei Lautheitsschätzung qualitativ und quantitativ vergleichbar.

Zusätzlich zu den beschriebenen psychoakustischen Untersuchungen wurden Hirnaktivierungsstudien mittels funktioneller Magnetresonanztomographie durchgeführt, um Hinweise auf Hirnregionen zu erhalten, die bei der Wahrnehmung verschiedener audio-visueller Stimuli beteiligt sind. Während hinsichtlich verschiedener Farben keine Unterschiede in der Hirnaktivierung feststellbar waren, wurden bei der Verarbeitung zueinander passender audio-visueller Reize sowohl der auditorische als auch der visuelle Cortex stärker aktiviert als dies bei unpassenden Stimuli der Fall ist. Areale im superioren temporalen Cortex zeigten hingegen, wie auch aus der Literatur bekannt, stärkere Aktivierung bei nicht zusammenpassenden Stimuli. Passende und unpassende audio-visuelle Reize scheinen also im Gehirn auf unterschiedliche Weise verarbeitet zu werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass audio-visuelle Interaktionen zwischen Farbe und Lautheitsurteil nicht bei allen Personen auftreten und im Vergleich zu typischen psychoakustischen Phänomenen eine eher geringe Effektstärke aufweisen. Für das Anwendungsgebiet der Lärmbekämpfung scheint daher die Kenntnis von Farbwirkungen als nicht zwingend. Vor dem Hintergrund steigender Anforderungen an den Klang von Produkten kann jedoch die Berücksichtigung von Farbeinflüssen auf das Lautheitsurteil im Rahmen des sound-quality engineering von Vorteil sein und zur Erreichung eines erwünschten zielgruppenspezifischen Klangbilds beitragen.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Hugo Fastl für die Initiierung dieser Arbeit und die Möglichkeit, sie als Mitarbeiter seiner Arbeitsgruppe für Technische Akustik durchführen zu können. Als Doktorvater stand er mir dabei stets mit wertvollen Ratschlägen und Anregungen zur Seite.

Weiterhin möchte ich mich insbesondere bei Dipl.-Ing. Florian Völk bedanken, der mich als langjähriger Zimmerkollege in vielen Diskussionen mit Ideen und Anregungen wesentlich unterstützt hat. Darüber hinaus danke ich ihm für die gründliche Durchsicht des Manuskripts. Ich danke meinen Kollegen Dr.-Ing. Markus Fruhmann, Dr.-Ing. Stefan Kerber, Dipl.-Ing. Jakob Putner und Dr.-Ing. Dejan Arsić für die angenehme und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Den Teilnehmern des „Münchener Akustik-Stammtisch“, allen voran Dr.-Ing. Markus Mummert und Dipl.-Ing. Tilman Horn, danke ich für interessante Gespräche nicht nur zu akustischen Themen.

Ich danke Dipl.-Ing. Josef Konradl, Dipl.-Ing. Norman Haufe, Dipl.-Ing. Thomas Dauenhauer, Dipl.-Ing. Tanja Schulze, Dipl.-Ing. Armas Gottschalk, Dipl.-Ing. Christian Mikesch, Dipl.-Ing. Elias Faccinelli, Dipl.-Ing. Martin Stingl und Dipl.-Ing. Wolfgang Staudacher für wichtige Beiträge im Rahmen ihrer Bachelor-, Studien- und Diplomarbeiten bzw. wissenschaftlichen Hilfstätigkeit.

Dr. Thomas Stephan danke ich vielmals für die Durchführung der fMRT-Studien im Klinikum Großhadern sowie für die Unterstützung bei der Auswertung und Interpretation der dabei erhobenen Daten.

Ich danke auch all jenen, die sich als Probanden für die durchgeführten Experimente teilweise wiederholt zur Verfügung gestellt haben und damit einen unverzichtbaren Teil zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Abschließend danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft, die Teile der Arbeit im Rahmen des Projekts FA140/5 gefördert hat.

A. Liste verwendeter Farben

Farbe	XYZ / $\frac{cd}{m^2}$	Beisp.	Beschreibung	Bemerkung
c_1	(44, 23, 3)		Hellrot	
c_2	(11, 23, 4)		Grün	ähnliche Leuchtdichte wie c_1
c_3	(23, 24, 26)		Dunkelgrau	ähnliche Leuchtdichte wie c_1
c_4	(24, 24, 86)		Blau	ähnliche Leuchtdichte wie c_1
c_5	(45, 23, 25)		Magenta	ähnliche Leuchtdichte wie c_1
c_6	(36, 73, 12)		leuchtendes Grün	
c_7	(54, 28, 55)		leuchtendes Magenta	
c_8	(74, 87, 13)		leuchtendes Gelb	
c_9	(51, 36, 5)		Orange	
c_{10}	(52, 78, 102)		Cyan	
c_{11}	(34, 16, 93)		Violett	
c_{12}	(18, 9, 93)		Dunkelblau	
c_{13}	(78, 65, 99)		Rosa	
c_{14}	(44, 56, 99)		Pastellblau	
c_{15}	(13, 20, 20)		Dunkelgrün	
c_{16}	(7, 4, 1)		Braun	
c_{17}	(71, 74, 76)		Grau	
c_{18}	(19, 10, 3)		Rot	
c_{19}	(16, 23, 12)		Hellgrün	
c_{20}	(14, 15, 36)		Hellblau	
c_{21}	(9, 11, 12)		British Racing Green	
c_{22}	(25, 15, 4)		Rot	ICE-Farbe nach Patsouras et al. (2002)
c_{23}	(36, 38, 58)		Graublau	ICE-Farbe nach Patsouras et al. (2002)
c_{24}	(22, 32, 21)		Lindgrün	ICE-Farbe nach Patsouras et al. (2002)
c_{25}	(78, 83, 85)		ICE Weiß	ICE-Farbe nach Patsouras et al. (2002)
c_{26}	(-, -, -)		Hellrot	Darbietung in CAVE, ähnlich c_1
c_{27}	(-, -, -)		leuchtendes Grün	Darbietung in CAVE, ähnlich c_6
c_{28}	(-, -, -)		leuchtendes Magenta	Darbietung in CAVE, ähnlich c_7
c_{29}	(-, -, -)		Lindgrün	Darbietung in CAVE, ähnlich c_{24}
c_{30}	(-, -, -)		Grau	Darbietung in CAVE, ähnlich c_{17}
c_{31}	(16, 7, 88)		Dunkelblau	
c_{32}	(13, 10, 2)		Braun	
c_{33}	(23, 11, 58)		Violett	
c_{34}	(94, 100, 101)		Weiß	
c_{35}	(0, 1, 1)		Schwarz	
c_{36}	(6, 6, 7)		Grau, $L^*=30$	
c_{37}	(27, 28, 29)		Grau, $L^*=60$	
c_{38}	(46, 48, 50)		Grau, $L^*=75$	
c_{39}	(72, 76, 80)		Grau, $L^*=90$	

A. Liste verwendeter Farben

Farbe	XYZ / $\frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$	Beisp.	Beschreibung	Bemerkung
c_{40}	(90, 95, 99)		Grau, $L^*=98$	
c_{41}	(26, 16, 4)		Rot	beleuchtete Papierfläche bei RHS-Messung
c_{42}	(20, 25, 12)		Lindgrün	beleuchtete Papierfläche bei RHS-Messung
c_{43}	(70, 75, 98)		Hellblau	Hintergrund für Reaktionszeitmessung
c_{44}	(64, 73, 11)		Gelb	Hintergrund für Reaktionszeitmessung
c_{45}	(78, 66, 80)		Rosa	Hintergrund für Reaktionszeitmessung

B. Abkürzungen und Formelzeichen

BOLD	Blood Oxygenation Level Dependent
BRS	Binaurale Raumsynthese
CAVE	CAVE Automatic Virtual Environment
CIELAB	CIE 1976 ($L^*a^*b^*$)-Farbenraum
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
GAR	Gleichmäßig Anregendes Rauschen
MRT	Magnetresonanztomograph
RHS	Ruhehörschwelle
XYZ	Normfarbwerte
a^*	CIELAB Grün-Rot Achse
b^*	CIELAB Blau-Gelb Achse
C_{ab}^*	Buntheit (<i>chroma</i>)
$d_{\text{Grün}}$	Hilfsgröße zur Anpassung von Grün bei der Modellierung des Farbeinflusses
d_{Magenta}	Hilfsgröße zur Anpassung von Magenta bei der Modellierung des Farbeinflusses
FE	Farbeeinfluss
FE'	Zwischengröße bei der Berechnung des Farbeinflusses
gC_{ab}^*	Hilfsgröße zur Berücksichtigung der Buntheit bei Berechnung des schreienden Farbeindrucks
gh_{ab}	Hilfsgröße zur Berücksichtigung des Bunttons bei Berechnung des schreienden Farbeindrucks
gL^*	Hilfsgröße zur Berücksichtigung der Helligkeit bei Berechnung des schreienden Farbeindrucks

h_{ab}	Bunttonwinkel (<i>hue angle</i>)
I_0	Bezugsintensität (10^{-12} W/m^2)
I_{GAR}	Intensität eines Gleichmäßig Anregenden Rauschens
λ	Lichtwellenlänge
$L_{A,eq}$	Äquivalenter A-bewerteter Dauerschallpegel
$L_{AF,max}$	Maximalwert des Verlaufs des A-bewerteten Schalldruckpegels (Zeitkonstante <i>Fast</i>)
$L_{F,max}$	Maximalwert des Verlaufs des Schalldruckpegels (Zeitkonstante <i>Fast</i>)
L_{GAR}	Schalldruckpegel eines Gleichmäßig Anregenden Rauschens
L_{RHS,c_i}	Ruhehörschwelle bei Betrachtung einer Fläche mit Farbe c_i
L^*	Helligkeit (<i>lightness</i>)
n	Anzahl der Versuchspersonen in einer Gruppe
n_c	Anzahl zu bearbeitender Farben
N_5	Wert der Lautheit, der in 5 % der Zeit erreicht oder überschritten wird
N_{GAR}	Lautheit eines Gleichmäßig Anregenden Rauschens
s	Skalierungsfaktor bei der Modellierung des Farbeinflusses
SF	Schreiender Farbeindruck
SF'	Zwischengröße zur Berücksichtigung des schreienden Farbeindrucks bei der Modellierung des Farbeinflusses
$\bar{x}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion für Normfarbwert X
$\bar{y}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion für Normfarbwert Y
$\bar{z}(\lambda)$	Normspektralwertfunktion für Normfarbwert Z

Literaturverzeichnis

- Amaro Jr E., S. C. Williams, S. S. Shergill, C. H. Fu, M. MacSweeney, M. M. Picchioni, M. J. Brammer, P. K. McGuire: Acoustic Noise and Functional Magnetic Resonance Imaging: Current Strategies and Future Prospects. *J. Magn. Reson. Imaging* **16**, 497–510 (2002)
- Arieh Y., L. E. Marks: Recalibrating the Auditory System: A Speed-Accuracy Analysis of Intensity Perception. *J. Exp. Psychol. Human* **29**, 523–536 (2003)
- Beauchamp M. S.: See me, hear me, touch me: multisensory integration in lateral occipital-temporal cortex. *Current Opinion in Neurobiology* **15**, 145–153 (2005)
- Blauert J., U. Jekosch: Sound-Quality Evaluation – A Multi-Layered Problem. *ACUSTICA/acta acustica* **83**, 747–753 (1997)
- Böhm M., C. Patsouras, H. Fastl: Beeinflussung des Lautheitsurteils durch Stand- oder Bewegtbilder. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '03*, 612–613 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg 2003)
- Bortz J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. 4. Auflage (Springer, Berlin, Heidelberg 1993)
- Bothe G. G., L. E. Marks: Absolute sensitivity to white noise under auxiliary visual stimulation. *Perception & Psychophysics* **8**, 176–177 (1970)
- Calvert G. A.: Crossmodal processing in the human brain: insights from functional neuroimaging studies. *Cerebral Cortex* **11**, 1110–1123 (2001)
- Cross D. C.: Sequential dependencies and regression in psychophysical judgments. *Perception & Psychophysics* **14**, 547–552 (1973)
- DIN 45 619-2: *Kopfhörer – Bestimmung des Freifeld-Übertragungsmaßes durch Lautstärkevergleich mit einem Bezugs-Kopfhörer* (Beuth, Berlin 1975)
- DIN 45 631/A1: *Berechnung der Lautstärke und des Lautstärkepegels aus dem Geräuschspektrum. Verfahren nach E. Zwicker – Änderung 1: Berechnung der Lautheit zeitvarianter Geräusche* (Beuth, Berlin 2010)
- DIN 5033-1: *Farbmessung – Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung* (Beuth, Berlin 2009)
- DIN 5033-2: *Farbmessung – Normvalenz-Systeme* (Beuth, Berlin 1992)
- DIN 5033-3: *Farbmessung – Farbmaßzahlen* (Beuth, Berlin 1992)

- DIN 6174: *Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum* (Beuth, Berlin 2007)
- EBU Tech 3253: *Sound Quality Assessment Material recordings for subjective tests – Users’ handbook for the EBU SQAM CD* (European Broadcasting Union, Genf 2008)
- Fastl H.: Schallpegel und Lautstärke von Sprache. *Acustica* **35**, 341–345 (1976)
- Fastl H.: Audio-visual interactions in loudness evaluation. In *Proc. 18th ICA Kyoto*, 1161–1166 (2004)
- Fastl H., E. Zwicker: *Psychoacoustics. Facts and Models*. 3rd Edition (Springer, Berlin, Heidelberg 2007)
- Fastl H., T. Fleischer, J. Stelkens: Remote psychoacoustic experiments on audio-visual interactions. In *Proc. 20th ICA Sydney*, CD-ROM (2010)
- Fastl H., E. Zwicker, S. Kuwano, S. Namba: Beschreibung von Lärmimmissionen anhand der Lautheit. In *Fortschritte der Akustik, DAGA ’89*, 751–754 (DPG, Bad Honnef 1989)
- Fastl H., T. Rader, G. van d. Boogart, S. Kuwano, S. Namba: Crosscultural comparison of colour evaluation using semantic differential. In *Fortschritte der Akustik, DAGA ’08*, 385–386 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2008)
- Furukawa T., O. Takehira, M. Nagamiya, S. Kuwano, S. Namba, H. Fastl: Comparison of subjective impression of copy machine noise between Japanese, American and German participants. In *Proc. Acoustics’08 Paris*, 1175–1180 (2008)
- Gescheider G. A., B. A. Hughson: Stimulus context and absolute magnitude estimation: A study of individual differences. *Perception & Psychophysics* **50**, 45–57 (1991)
- Hauske G.: *Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung* (Shaker, Aachen 2003)
- Haverkamp M.: *Synästhetisches Design – Kreative Produktentwicklung für alle Sinne* (Hanser, München, Wien 2009)
- Hellbrück J., W. Ellermeier: *Hören – Physiologie, Psychologie und Pathologie*. 2. Auflage (Hogrefe, Göttingen 2004)
- Heller E.: *Wie Farben wirken – Farbpsychologie, Farbsymbolik, Kreative Farbgestaltung* (Rowohlt, Reinbek 1998)
- Heller O.: Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). *Psychologische Beiträge* **27**, 478–493 (1985)
- Hick W. E.: On the rate of gain of information. *Quarterly Journal of Experimental Psychology* **4**, 11–26 (1952)
- Ishihara S.: *The series of plates designed as a test for colour blindness: 24 plates edition* (Kanehara, Tokyo 1990)

- Kohfeld D. L., J. L. Santee, N. D. Wallace: Loudness and reaction time: I. Perception & Psychophysics **29**, 535–549 (1981)
- Marks L. E.: *The Unity of the Senses* (Academic Press, London, San Francisco 1978)
- Menzel D.: Psychoakustische Untersuchungen zum Einfluss der Farbe auf die Lautheit von Sportwagen. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '07*, 855–856 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2007)
- Menzel D.: Can different colours influence most comfortable level of speech and music? In *Proc. 3rd International Tonmeister Symposium*, <http://www.tonmeister.de> (2009a)
- Menzel D.: Most comfortable level of speech under different illuminations. In *Proc. Euro Noise 2009, Edinburgh*, CD-ROM (2009b)
- Menzel D., E. Faccinelli, H. Fastl: Are absolute thresholds and loudness judgements influenced by different colours? In *Proc. Acoustics'08 Paris*, 1203–1208 (2008a)
- Menzel D., E. Faccinelli, H. Fastl: Untersuchung von Farbeinflüssen auf die Lautheit mit einem Einregelverfahren. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '08*, 383–384 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2008b)
- Menzel D., T. Dauenhauer, H. Fastl: Crying Colours and their influence on loudness judgments. In *NAG/DAGA 2009*, 1528–1531 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2009)
- Menzel D., N. Haufe, H. Fastl: Colour-influences on loudness judgements. In *Proc. 20th ICA Sydney*, CD-ROM (2010a)
- Menzel D., T. Schulze, H. Fastl: Zum Einfluss der Farbpräferenz auf die Lautheitsbeurteilung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '10*, 873–874 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2010b)
- Menzel D., H. Fastl, R. Graf, J. Hellbrück: Influence of vehicle color on loudness judgments. *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 2477–2479 (2008c)
- Miller G. A.: The Magical Number Seven, Plus or Minus Two: Some Limits on Our Capacity for Processing Information. *The Psychological Review* **63**, 81–97 (1956)
- Namba S., S. Kuwano, A. Kinoshita, Y. Hayakawa: Psychological Evaluation Of Noise In Passenger Cars – The Effect Of Visual Monitoring And The Measurement Of Habituation. *J. Sound Vib.* **205**, 427–433 (1997)
- O'Donnell B. M., E. M. Colombo: Simple reaction times to chromatic stimuli: Luminance and chromatic contrast. *Lighting Research and Technology* **40**, 359–371 (2008)
- Özbaydar S.: The effect of darkness and light on auditory sensitivity. *Brit. J. Psychol.* **52**, 285–291 (1961)

- Patsouras C., M. Böhm: Visueller Kanal oder Ablenkung? Einfluß einer optischen Komponente auf die Beurteilung der Geräuschqualität von Fahrzeug-Innengeräuschen. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '02*, 210–211 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg 2002)
- Patsouras C., T. Filipou, H. Fastl: Influences of color on the loudness judgement. In *Proc. Forum Acusticum Sevilla 2002*, PSY-05-002-IP, CD-ROM (2002)
- Patsouras C., M. Böhm, H. Fastl: Beeinflussung des Lautheitsurteils durch schallfremde, stehende Bilder. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '03*, 616–617 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg 2003a)
- Patsouras C., M. Böhm, T. Filippou, H. Fastl, D. Patsouras: Einfluß einer optischen Komponente auf die Beurteilung der Lautheit von Fahrzeuginnengeräuschen bei Fahrt. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '03*, 608–609 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg 2003b)
- Pedersen B., W. Ellermeier: Temporal weights in the level discrimination of time-varying sounds. *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 963–972 (2008)
- Pheasant R., G. Watts, K. Horoshenkov: The role of audio-visual interaction on the perception of tranquillity. In *Proc. Euro Noise 2009, Edinburgh*, CD-ROM (2009)
- Pheasant R., K. Horoshenkov, G. Watts, B. Barrett: The acoustic and visual factors influencing the construction of tranquil space in urban and rural environments – tranquil spaces-quiet places? *J. Acoust. Soc. Am.* **123**, 1446–1457 (2008)
- Rader T., M. Morinaga, T. Matsui, H. Fastl, S. Kuwano, S. Namba: Crosscultural Effects in Audio-Visual Interactions. In *Transactions of the Technical Committee Noise and Vibration of the Acoustical Society of Japan*, N-2004-31 (2004)
- Schneider B., S. Parker: Does stimulus context affect loudness or only loudness judgments? *Perception & Psychophysics* **48**, 409–418 (1990)
- Schneider F., G. R. Fink: *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie* (Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2007)
- Seeber B., H. Fastl, V. Koci: Ein PC-basiertes Békésy-Audiometer mit Bark-Skalierung. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '03*, 614–615 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Oldenburg 2003)
- Stevens S. S.: The Direct Estimation of Sensory Magnitudes – Loudness. *Am. J. Psychol.* **69**, 1–25 (1956)
- Stöcker T., N. J. Shah: Grundlagen der MR-Bildgebung. In *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*, Hrsg. F. Schneider, G. R. Fink, 62–78 (Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2007)

- Susini P., S. McAdams, B. K. Smith: Global and Continuous Loudness Estimation of Time-Varying Levels. *ACUSTICA/acta acustica* **88**, 536–548 (2002)
- Suzuki Y., K. Abe, K. Ozawa, T. Sone: Factors for perceiving sound environments and the effects of visual and verbal information on these factors. In *Contributions to Psychological Acoustics VIII*, Hrsg. A. Schick, M. Meis, C. Reckhardt, 209–232 (BIS Univ. Oldenburg, 2000)
- Terhardt E.: Calculating virtual pitch. *Hearing Research* **1**, 155–182 (1979)
- Viollon S., C. Lavandier: A Sound Judgment Depending On The Urban Visual Setting? *J. Acoust. Soc. Am.* **105**, 981–984 (1999)
- Viollon S., C. Lavandier, C. Drake: Sound perception of the urban environment through an audio-visual approach. *J. Acoust. Soc. Am.* **103**, 2877 (1998)
- Viollon S., C. Lavandier, C. Drake: Influence of visual setting on sound ratings in an urban environment. *Appl. Acoust.* **63**, 493–511 (2002)
- Völk F., S. Kerber, H. Fastl, S. Reifinger: Design und Realisierung von virtueller Akustik für ein Augmented-Reality-Labor. In *Fortschritte der Akustik, DAGA '07*, 673–674 (Dt. Gesell. für Akustik e. V., Berlin 2007)
- Watts G.: The Evaluation Of Conspicuity Aids For Cyclists And Motor Cyclists. *Human Factors In Transport Research* **1&2**, 203–211 (1980)
- Wickelmaier F., C. Schmid: A Matlab function to estimate choice model parameters from paired-comparison data. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers* **36**, 29–40 (2004)
- Wohlschläger A., T. Kellermann, U. Habel: Datenanalyse: Vorverarbeitung, Statistik und Auswertung. In *Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie*, Hrsg. F. Schneider, G. R. Fink, 134–148 (Springer Medizin Verlag, Heidelberg 2007)
- Wyszecki G., W. S. Stiles: *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. 2nd Edition (John Wiley & Sons, New York 1982)
- Yanagisawa H., R. Yoshinaga, T. Murakami, K. Ohtomi, R. Hosaka: Sense of Harmony between Product Sound Quality and Color Sensation: A Case Study of Vacuum Cleaner. In *Proc. inter-noise 2010, Lisbon*, CD-ROM (2010)
- Zilles K., G. Rehkämper: *Funktionelle Neuroanatomie*. 2. Auflage (Springer, Berlin, Heidelberg, New York 1994)
- Zwicker E., R. Feldtkeller: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. 2. Auflage (S. Hirzel Verlag, Stuttgart 1967)