

**LICHT
SEHEN
VERSTEHEN**

Untersuchungen der Kommunikationseigenschaft von
Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum



Inaugural-Dissertation zur Erlangung der Doktorwürde der
Fakultät für Sprach-, Literatur- und Kulturwissenschaften der
Universität Regensburg

vorgelegt von
Franziska Hertlein
aus
Schwanfeld
2023

Erstgutachter: Prof. Dr. Christian Wolff

Zweitgutachter: Prof. Dr. Karlheinz Blankenbach

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation zur Mensch-Maschinen-Kommunikation im Fahrzeug umfasst mehrere nutzerzentrierte Untersuchungen, die detaillierte Erkenntnisse zur Wirkungsweise von Lichteffekten liefern. Im ersten Teil wurde der Kontext analysiert und mittels eines Cardsortings wurden Kategorien wie Komfort, Information und Sicherheit für die Lichteffekte definiert. Im zweiten Teil wurden die Gestaltungsfreiheiten der Lichteffekte untersucht und Parameter wie Farbe, Anzeigeort, Richtung, Impulslänge, Aufstartverhalten und Geschwindigkeit identifiziert. In einer umfangreichen Usability-Studie im dritten Teil wurden die Wirkungen der Parameter quantitativ analysiert und die Reaktionszeit, visuelle Beeinflussung, Kategorisierung und subjektive Bewertung erfasst. Die Ergebnisse zeigen, dass nicht alle Parameter gleichen Einfluss auf alle abhängigen Variablen haben und dass es Unterschiede zwischen subjektiver Wahrnehmung und objektiver Messung gibt. Eine weitere Studie verifizierte die Ergebnisse und gibt einen Ausblick, welchen Einfluss die Kombination von Licht- und Audioeffekten auf die Kategorisierung sowie die User Experience nimmt. Als technische Aufbau für die Untersuchungen diente eine umlaufende Konturbeleuchtung aus LED-Streifen, die in den Türen und im Übergang der Windschutzscheibe zur Instrumententafel montiert wurde.

Insgesamt liefert die Arbeit einen umfassenden Überblick über die Wirkungsweise von Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum und eine Datengrundlage, die eine zielgerichtete Konzeption von Lichteffekten für verschiedene Einsatzzwecke ermöglicht.

Abstract

This dissertation on human-machine communication in the vehicle includes several user-centered investigations that provide detailed insights into the impact of lighting effects. In the first part, the context was analyzed and categories such as comfort, information, and safety for the lighting effects were defined using card-sorting as clustering method. In the second part, the design possibilities of the lighting effects were examined, and parameters such as color, display location, direction, pulse length, startup behavior, and speed were identified. In an extensive usability study in the third part, the effects of the parameters were quantitatively analyzed, and reaction time, visual influence, categorization, and subjective evaluation were recorded. The results show that not all parameters have the same influence on all dependent variables and that there are differences between subjective perception and objective measurement. A final study verified the results and provides an outlook on the influence of the combination of light and audio effects on the categorization and user experience. LED strips mounted in the doors and in the transition from the windshield to the instrument panel, served as the technical concept for the investigations.

Overall, the work provides a comprehensive overview of the effects of lighting effects in the vehicle interior and a database that enables targeted design of lighting effects for various applications.

INHALTSVERZEICHNIS

TEIL I Einleitung der Forschungsarbeit	9
1 Veränderter Einsatz von Licht in Fahrzeuginnenräumen	10
2 Inhalt	12
3 Aufbau	14
TEIL II Grundlagen.....	15
4 Licht sehen: die visuelle Wahrnehmung	16
4.1 Aufbau des menschlichen Auges	16
4.2 Sichtfeld	17
4.3 Blickbewegung	19
4.4 Farben sehen.....	19
4.5 Farbfehlsichtigkeit	21
4.6 Helligkeit & Kontraste	22
4.7 Scheinbewegungen.....	23
4.8 Beeinflussung der visuellen Aufmerksamkeit	24
5 Licht spüren: Die Wirkungsweise von Licht auf den Menschen.....	26
5.1 Psychologischer & physiologischer Einfluss	26
5.2 Biologischer Einfluss	27
5.3 Farbempfinden.....	30
6 Einsatz von Licht im Fahrzeuginnen-raum	33
6.1 Ambientes Licht	33
6.2 Einsatz von Licht zur visuellen Kommunikation	37
6.3 Bewertung der bisherigen Forschung.....	47
6.4 Möglichkeiten der visuellen Einflussnahme.....	49
TEIL III Untersuchungen der Kommunikationseigenschaften von Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum	52
7 Zusammenspiel der Untersuchungen	53

8 Erarbeitung von funktionellen Anwendungsgebieten mit Hilfe der Methode Cardsorting	55
8.1 Motivation & Ziel.....	55
8.2 Methodik	56
8.3 Vorbereitung.....	58
8.4 Durchführung.....	59
8.5 Auswertung – Clusteranalyse.....	61
8.6 Ergebnisse	63
8.7 Fazit.....	67
9 Ausarbeitung eines Baukastens für Lichteffekte durch Berücksichtigung von in Interviews gesammelten Assoziationen.....	69
9.1 Motivation & Ziel.....	69
9.2 Methodik	71
9.3 Vorbereitung.....	73
9.4 Durchführung.....	74
9.5 Auswertung	76
9.5.1 Vorbereitung der Extraktion	78
9.5.2 Extraktion.....	79
9.5.3 Aufbereitung der Daten.....	81
9.5.4 Auswertung	82
9.6 Ergebnisse	82
9.6.1 Farben	82
9.6.2 Helligkeit/Intensität.....	83
9.6.3 Art	84
9.6.4 Impulsgröße.....	85
9.6.5 Bereich	85
9.6.6 Richtung	87
9.6.7 Geschwindigkeit	88
9.6.8 Dauer, Wiederholungen und Anzahl Wiederholungen	90
9.6.9 Aufstartverhalten.....	91
9.6.10 Zusammenfassung.....	92
9.7 Fazit.....	93
10 Erhebung der Einflussnahme von Variablen im Rahmen einer Nutzerstudie	95
10.1 Motivation & Ziel.....	95

10.2 Methodik	96
10.2.1 Unabhängige Variablen	97
10.2.2 Studiendesign	99
10.2.3 Abhängige Variablen.....	102
10.2.4 Laborstudie	105
10.3 Vorbereitung.....	105
10.3.1 Hardwareaufbau.....	105
10.3.2 Ansteuerung der LEDs.....	108
10.3.3 Speicherung der Daten.....	110
10.3.4 Integration des Critical Tracking Tasks zur Messung der visuellen Beeinflussung	111
10.3.5 Zusammenspiel der Software	112
10.3.6 Helligkeitsabstimmung.....	114
10.4 Durchführung.....	118
11 Ergebnisse der Nutzerstudie	121
11.1 Erläuterungen zur Auswertung	121
11.1.1 Allgemeines zur Datenauswertung	121
11.1.2 Bereinigung der Daten	122
11.2 Demographische Daten.....	123
11.3 Kategorisierung.....	124
11.4 Reaktionszeit	132
11.5 Visuelle Beeinflussung	153
11.6 Fragebogen zum subjektiven Empfinden	165
11.7 Betrachtung der Helligkeit	181
11.8 Fazit.....	184
12 Validierung der Nutzerwahrnehmung	187
12.1 Motivation & Ziel.....	187
12.2 Methodik	188
12.2.1 Unabhängige Variablen	188
12.2.2 Abhängige Variablen.....	189
12.2.3 Laborstudie	189
12.3 Vorbereitung.....	190
12.3.1 Auswahl geeigneter Use Cases	190
12.3.2 Ausarbeitung Effekte.....	191

12.3.3 Versuchsaufbau.....	192
12.4 Durchführung.....	194
12.5 Auswertung.....	194
12.6 Ergebnisse.....	195
12.6.1 Auswertung Information (Eingehender Anruf).....	195
12.6.2 Auswertung Warnung (Auffahrwarnung).....	198
12.7 Fazit.....	201
TEIL IV Bewertung und Zusammenfassung.....	202
13 Beantwortung der Forschungsfragen.....	203
14 Möglichkeiten der Weiterführung.....	205
15 Zusammenfassung.....	208
Abbildungsverzeichnis.....	211
Tabellenverzeichnis.....	215
Literaturverzeichnis.....	217
Anhang.....	226

TEIL I

Einleitung der Forschungsarbeit

1 Veränderter Einsatz von Licht in Fahrzeuginnenräumen

Durch die sinkenden Preise und der einhergehenden Verbreitung der LED-Technologie, kommt es in den letzten Jahren vermehrt zum Einsatz von Licht als zusätzliches Designelement bei der Gestaltung des Fahrzeuginnenraums (Arizton, 2019, S. 30). Im Gegensatz zu einer Zierleiste aus beispielsweise Galvanik, ermöglicht ein leuchtendes Element dem Kunden, sich sein Fahrzeug auch nach der initialen Kaufkonfiguration zu individualisieren, indem er sich die Farbe der Innenraumbeleuchtung hinsichtlich seiner persönlichen Präferenzen anpassen kann. Während man mit einzelnen LEDs lediglich Effekte erzielen kann, welche bei dunklen Umgebungshelligkeiten (z.B. nachts) zu sehen sind, ergeben sich aus dem Einzug vieler verschiedener Lichtelemente, welche an unterschiedlichen Orten im Fahrzeuginnenraum positioniert werden, sowie einer Verdichtung der einzelnen LEDs, neue Einsatzmöglichkeiten. Zum einen führt das gleichmäßige Verteilen der Lichtkomponenten im Fahrzeug zu einer erhöhten Wahrscheinlichkeit, dass sich zu jedem Zeitpunkt während des Fahrens ein leuchtendes Objekt im Sichtfeld des Fahrers befindet. Zum anderen kann durch das dichte Aneinanderreihen von LEDs, wie es beispielsweise mit flexiblen Leiterplatten möglich ist, eine Steigerung der Sichtbarkeit erzielt werden, die bis zur Tagsichtbarkeit bei Sonneneinstrahlung reichen kann. Darüber hinaus bietet die gemeinsame Anordnung und Ansteuerung von LEDs die Grundlage für animierte, bewegte Lichteffekte. Die Möglichkeiten einer herkömmlichen ein- und ausschaltbaren Leuchtquelle werden damit weit überschritten. Stattdessen liegt bei linearer Anordnung der LEDs die Assoziation eines einzeiligen Displays nahe, da beliebige Inhalte dargestellt werden können. Beispielsweise könnte man Anzeigen, welche heute auf dem zentralen Informationsdisplay im Fahrzeug verortet sind, auf die LEDs übertragen. Echtzeitanzeigen wie Informationen zu wirkenden G-Kräften oder Drehzahlveränderungen bei Beschleunigungen können über alle LEDs im Fahrzeug verteilt werden. Aber es ließen sich auch sicherheitsrelevante Anzeigen wie der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug oder einer Seitenspurbegrenzung abbilden.

Es gibt vielfältige Ideen für die Nutzung von Lichteffekten im Fahrzeug als Anzeige. Einige davon werden auch im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt. Jedoch muss bei allen Möglichkeiten grundsätzlich bedacht werden, dass der Kunde heute überwiegend nur die Funktion der ambienten Raumbelichtung kennt. Man muss sich daher fragen, wie man ihm darüber hinaus vermitteln kann, dass Lichteffekte im Fahrzeuginnenraum nun nicht länger ein Beitrag zum „Schöner Wohnen“ sind, sondern eine kommunizierende Anzeige darstellen. Dies ist vor allem dann relevant, wenn Lichtelemente nicht nur einen Zweck erfüllen, sondern künftig verschiedene Inhalte kommunizieren soll. Für das Abbilden unterschiedlicher Inhalte braucht es zudem genügend Ausdrucksmöglichkeiten: Lichteffekte müssen sich über verschiedene Parameter verändern können und so eine ausreichende Differenzierung zur Unterscheidung einzelner Inhalte schaffen. Dabei darf aber gleichzeitig nie die Wirkung einzelner Effekte verfehlt werden.

Um dies gewährleisten zu können, beschäftigt sich die vorliegende Forschungsarbeit mit der Frage, wie Lichteffekte im Fahrzeuginnenraum kommunizieren können. Dabei wurde sowohl berücksichtigt wie die Effekte visuell beeinflussen („Licht sehen“) als auch welches inhaltliche Verständnis sie bei einem Nutzer auslösen können („Licht verstehen“).

2 Inhalt

Die vorliegende Forschungsarbeit nimmt es sich zur Aufgabe, die Kommunikationsmöglichkeiten von Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum auszuarbeiten. Dies soll geschehen, ohne sich dabei auf konkrete Use Cases beschränken zu muss. Auf Basis von Ergebnissen aus Probandenstudien zur Wahrnehmung von Lichteffekten, soll deren inhaltliche Aussagekraft abstrahiert und auf einzelne Merkmale der Effekte zurückgeführt werden. Um die Lücke zwischen der Vielzahl einzelner Use Cases und möglichen Gestaltungsempfehlungen zu schließen, werden Kategorien eingeführt, die die Kommunikationsmöglichkeiten inhaltlich zusammenfassen. Für jede der Kategorien werden Regeln abgeleitet, die bei der Gestaltung von zugehörigen Use Cases berücksichtigt werden müssen. So kann gewährleistet werden, dass ein Kunde Lichteffekte aus einzelnen Kategorien als inhaltlich ähnlich empfindet und gleichzeitig zwischen Use Cases unterschiedlicher Kategorien differenzieren kann.

Mit der Einführung der Kategorien entsteht eine Unabhängigkeit von Use Cases und es kann selbst für heute noch nicht bekannte Anwendungsfälle von Lichteffekten eine konsistente Gestaltung garantiert werden. Ohne dieses Vorgehen müsste jeder Use Case einzeln betrachtet und gestaltet werden. Dabei ist es sehr wahrscheinlich, dass Lichteffekte zeitlich versetzt eingeführt werden und eine Inkonsistenz in der Gestaltung der Erscheinungsmerkmale entsteht. Wurde beispielsweise ein Merkmal zur optischen Aufwertung eines Lichteffekts für einen Use Case bereits verwendet und würde es nun an anderer Stelle für die inhaltliche Kommunikation gebraucht werden, ist es bereits belegt und kann nicht erneut herangezogen werden. Falls doch, liegt es nahe, dass beim Kunden eine falsche Interpretation des Use Cases entsteht. Dieser Umstand hat zur Folge, dass die inhaltliche Ausgestaltung einzelner Use Cases nicht im Forschungsziel der Dissertation enthalten ist. Das bedeutet, dass konkrete Untersuchungen, wie zum Beispiel Licht im Rahmen eines Use Cases „Müdigkeitsassistent“ zur Bekämpfung von Ermüdungserscheinungen beim Fahrer eingesetzt werden könnte, nicht getätigt werden. Diese Arbeit widmet sich hingegen der Grundlagenarbeit, um

einen Gestaltungsrahmen zu schaffen, dessen Einhaltung eine konsistente als auch wirkungsvolle Inszenierung von Lichteffekten ermöglicht.

Der Inhalt der Arbeit setzt sich aus folgenden Forschungsfragen zusammen:

- Gibt es Kategorien für den Einsatz von Lichteffekten?
- Welche Eigenschaften zeichnen Lichteffekte aus?
- Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der Lichteffekte auf die Zuordnung der Effekte zu den erhobenen Kategorien?
- Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der Lichteffekte auf die Schnelligkeit der Wahrnehmbarkeit der Effekte?
- Welchen Einfluss haben die Eigenschaften von Lichteffekten auf die visuelle Aufmerksamkeit von Probanden?
- Welchen Einfluss haben die Eigenschaften von Lichteffekten auf die subjektiven Bewertungen der Effekte (gemessen durch die Kriterien schön, angenehm, ablenkend und hektisch)?

3 Aufbau

An den ersten Abschnitt der Arbeit, in dem die Forschungsfragen aufgeworfen werden, schließen sich drei weitere Abschnitte an, deren Inhalt wie folgt zusammengefasst werden kann:

TEIL II: Grundlagen

Im ersten Abschnitt wird die für die nachfolgenden Studien relevante Grundlagenliteratur zusammengefasst. Dabei wird zum einen auf den visuellen Wahrnehmungsapparat eingegangen, zum anderen wird die nicht-visuelle Einflussnahme von Licht auf den Menschen vorgestellt. Der spezielle Einsatz von Licht im Fahrzeuginnenraum wird anhand von veröffentlichten Studien und Forschungsarbeiten thematisiert.

TEIL III: Untersuchungen der Kommunikationseigenschaften von Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum

Der Hauptteil der Dissertationsschrift setzt sich aus der Beschreibung von vier, aufeinander aufbauenden Studien zusammen. Im ersten Schritt wird das Anwendungsgebiet für Lichteffekte in Kategorien eingeteilt, die eine wichtige Grundlage für die weiteren Untersuchungen darstellen. Daran schließen sich Experteninterviews an, die geführt wurden, um aus der Beschreibungssprache von Lichteffekten die für die inhaltliche Interpretation relevanten Bausteine abzuleiten. Eine ausgewählte Anzahl dieser Bausteine wird in der nachfolgenden Probandenstudie ausführlich hinsichtlich ihrer Einflussnahme untersucht, wobei vier verschiedene abhängige Variablen unterschiedliche Aspekte der Wirkungsweise aufdecken. In einer abschließenden Studie wird das erlangte Wissen validiert und in Zusammenhang mit auditiven Kommunikationsmöglichkeiten gesetzt.

TEIL IV: Bewertung und Zusammenfassung

Im letzten Abschnitt werden die Forschungsergebnisse zusammengefasst und der Rückbezug zu den eingangs postulierten Forschungsfragen hergestellt. Darüber hinaus wird die Anwendbarkeit der Ergebnisse bewertet und Möglichkeiten zur Erweiterung der Forschungsinhalte diskutiert.

TEIL II
Grundlagen

4 Licht sehen: die visuelle Wahrnehmung

In der Mensch-Maschinen-Interaktion ist die menschlichen Fähigkeit des Sehens derjenige Sinn, der am häufigsten genutzt wird (Butz & Krüger, 2014) und er ist gerade für die erfolgreiche Kommunikation mittels Lichteffekten essentiell. Daher werden im Folgenden Abschnitt die Grundlagen der visuellen Wahrnehmung zusammengefasst, wobei vor allem diejenigen Eigenschaften betrachtet werden, welche für die vorliegende Forschung von Relevanz sind.

4.1 Aufbau des menschlichen Auges

Verantwortlich für einen Seheindruck ist ein in das Auge einfallendes Lichtbild, welches auf der Netzhaut auftritt und dort in elektrische Aktivität des Nervensystems umgewandelt wird. Die dabei beteiligten Elemente sind in einer vereinfachten Darstellung links in Abbildung 1 zu sehen. Auf der Netzhaut befinden sich mehrere Rezeptoren. Die wichtigsten dieser sind die Zapfen, welche das Farbsehen ermöglichen und die Stäbchen, verantwortlich für das Schwarz-Weiß-Sehen (Goldstein & Ritter, 1997, S. 40f).

Die Anordnung der Rezeptoren auf der Netzhaut (zu sehen in Abbildung 1 rechts) ist entscheidend für die Qualität des Sehens: Liegt der Fokus direkt auf einem Objekt und fällt dessen Abbild somit auf den Bereich um die 0° auf der optischen Achse, wird vom fovealen Sehen gesprochen. Dann ist die Dichte der Zapfen am höchsten und daher die Fähigkeit zur Wahrnehmung von Farben am größten. In den angrenzenden Winkelbereichen sind hingegen sehr wenige Farbrezeptoren zu finden, hier vorherrschen die Stäbchen. Dementsprechend werden im nicht fokussierten Umgebungsbereich hauptsächlich Helligkeitsunterscheidungen wahrgenommen und es ist nur ein unscharfer Seheindruck vorhanden (Butz & Krüger, 2014, S. 15–17).

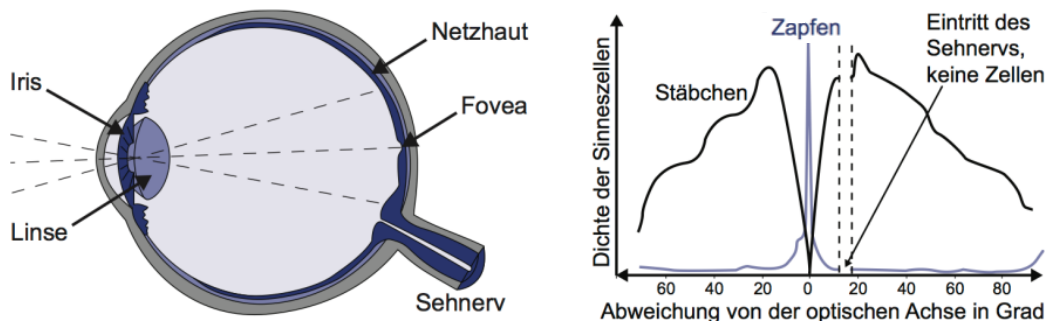


Abbildung 1: Links: Vereinfachtes Schnittbild des menschlichen Auges, Rechts: Verteilung der Sinneszellen in der Netzhaut in Abhängigkeit vom Winkel zur optischen Achse (Butz & Krüger, 2014, S. 16)

4.2 Sichtfeld

Der gesamte Seheindruck, welcher unter Nutzung beider Augen entsteht, wird als binokulares Gesichtsfeld bezeichnet. Betrachtet man lediglich das linke oder rechte Auge, so spricht man von einem monokularem Gesichtsfeld (Boyce, 2014, S. 43). Die Überschneidung der beiden monokularen Gesichtsfelder sowie der Winkelbereich des binokularen Gesichtsfelds, welches aus dem Zusammenführen der Netzhautbilder beider Augen entsteht, ist in Abbildung 2 dargestellt.

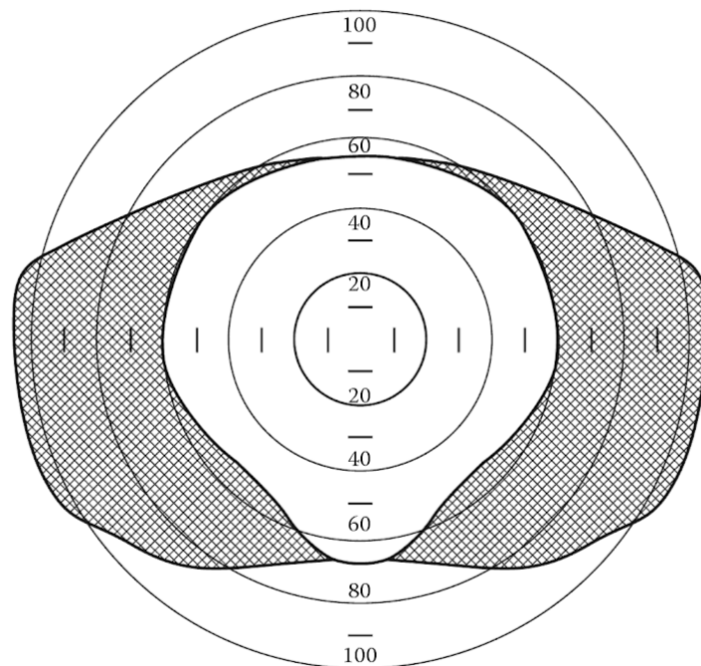


Abbildung 2: Das binokulare Gesichtsfeld mit den beiden monokularen Bereichen (rechts und links schraffiert) sowie deren Überschneidung (mittiger, weißer Bereich) (Boyce, 2014, S. 44)

Der stets unscharf bleibende Bereich rund um die Fovea wird als Peripherie bezeichnet. Es gilt zu beachten, dass es im Rahmen von Tätigkeiten wie beispielsweise einer Fahraufgabe zur Verschlechterung des Sehens in der Peripherie bzw. einer Verkleinerung des Gesichtsfelds kommen kann, falls die Fahrsituation starke Konzentration erfordert oder der Fahrer über wenig Fahrpraxis verfügt (Crundall, Underwood, & Chapman, 2002). Weitere Einflussfaktoren während einer Fahraufgabe sind das Alter eines Fahrers sowie die Geschwindigkeit des Fahrzeugs (Rogé et al., 2004).

Einen Eindruck, welche Bereiche im Fahrzeuginnenraum im Sichtfeld eines Fahrers liegen, gibt die Abbildung 3. Der Ausschnitt einer Virtual Reality Darstellung eines 7er BMWs zeigt beispielhaft ein 45°-Sichtfeld eines 50-Perzentil-Manns aus einem RASMIS-Ergonomiemodell auf dem Fahrersitz. Die Darstellung links in der Abbildung zeigt die Verortung des Augpunkts (für Erklärungen zu RAMSIS siehe Seidl, 1997).



Abbildung 3: links: Verortung der Blickposition eines 50-Perzentil-Manns aus der Vogelperspektive. Rechts: 45°-Sichtfeld des 50-P-Manns (basierend auf internem Arbeitsmaterial der BMW AG)

Eine Vergrößerung des Sichtfelds findet durch Rotation des Kopfes statt. Die aus einer veränderten Perspektive entstehenden neuen Sichtbereiche sind in Abbildung 4 zu sehen: Durch die vertikale Rotation rücken beispielsweise die orange leuchtenden Elemente in der Beifahrertür in das Sichtfeld.



Abbildung 4: verändertes Sichtfeld durch vertikale Rotation des Kopfes um 30°, 55° und 90° (basierend auf internem Arbeitsmaterial der BMW AG).

4.3 Blickbewegung

Die Generierung eines detaillierter Seheindrucks der Umgebung wird über ständige Bewegung der Augen ermöglicht. Dabei wird das Gesichtsfeld u.a. durch eine Reihe von sogenannten Fixierungen und Sakkaden durchsucht. Unter einer Fixierung versteht man den Versuch, ein Objekt von Interesse stabil in der Fovea zu fixieren, die Bewegung zwischen einzelnen Fixierungen wird hingegen als Sakkaden bezeichnet. Für die Bewegungen gilt eine Latenzzeit von ca. 200ms. Unter Berücksichtigung dieser Zeitangabe können ungefähr fünf Sakkaden pro Sekunden stattfinden, wobei die visuelle Funktion während der Bewegungen stark eingeschränkt ist (Boyce, 2014, S. 45).

Die dauerhafte Fokussierung eines bewegten Objekts auf der Fovea durch kontinuierliche Blickbewegung wird als glatte Augenbewegung bezeichnet. Dabei treten kaum Sakkaden auf und es werden dauerhaft detaillierte Informationen über das Objekt gesammelt. Die glatten Augenbewegungen sind bei Geschwindigkeiten bis zu 40 Grad/Sekunde möglich, wobei das fokussierte Objekt sich gleichmäßig bewegen muss. Bewegt sich ein Objekt unberechenbar oder mit hoher Geschwindigkeit, kann es nicht dauerhaft in der Fovea fokussiert werden (Wördenweber, Wallaschek, Boyce, & Hoffman, 2007, S. 63).

4.4 Farben sehen

Die für das Farbsehen verantwortlichen Zapfen teilen sich auf verschiedene Kategorien auf, welche nach ihrer Empfindlichkeit bestimmter Wellenlängen be-

nannt sind. In Abbildung 5 sind die Empfindlichkeitskurven der drei verschiedenen Zapfen eingezeichnet, welche von links nach rechts für kurze (S = „short“), mittlere (M = „middle“) und lange (L = „long“) Wellenlängen sensibel sind. Die drei Zapfen werden im deutschen Sprachgebrauch für gewöhnlich als RGB-Zapfen bezeichnet, wobei sich diese Bezeichnung an der dominanten Farbe der jeweiligen Wellenlängenempfindlichkeit orientiert: R = „Rot“, G = „Grün“, B = „Blau“ (Welsch & Liebmann, 2012, S. 240f).

Aus dem Verhältnis, in welchem die einzelnen Zapfen Licht empfangen, ergibt sich der jeweilige Farbeindruck eines Elements. So entsteht beispielsweise der Farbeindruck Gelb durch das gemeinsame Ansprechen der R- und G-Zapfen, während die gleiche Reizung aller drei Rezeptoren die Wahrnehmung von Weiß erzeugt (Müller, Frings, & Möhrlein, 2019, S. 593f).

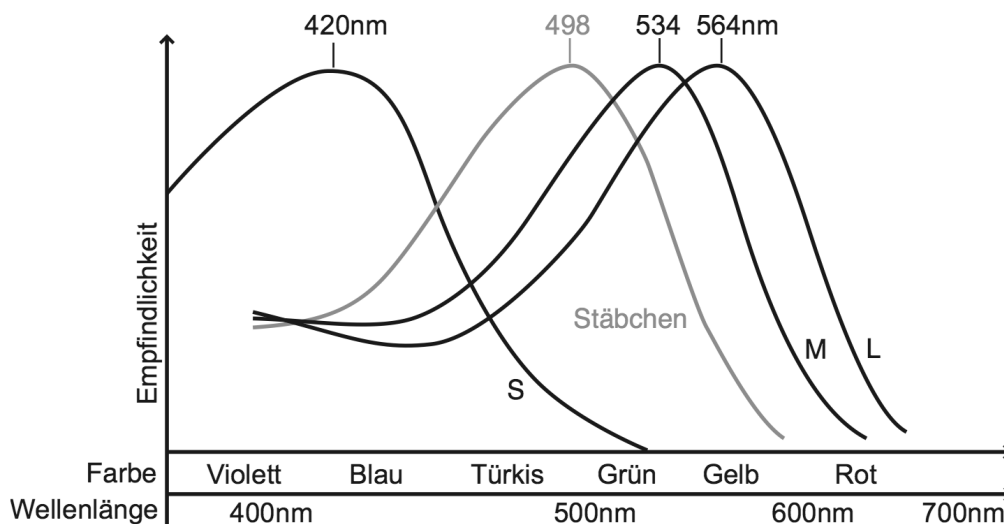


Abbildung 5: schematische Darstellung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges auf verschiedene Wellenlängen (Butz & Krüger, 2014, S. 15)

Der Bereich, in welchem Farben gesehen werden können, reicht nicht bis zum Rand des Gesichtsfelds und ist zudem nicht für alle Farben gleich groß. Wie Abbildung 6 aufzeigt, ist der Ausschnitt für Grün am kleinsten, während aufsteigend für Rot, Blau und Gelb die Grenzen der Erkennbarkeit in der Peripherie immer größer werden. Generell geht am Rand des Gesichtsfelds die Fähigkeit der Wahrnehmung von Farbe verloren, weswegen beispielsweise ein Signal wie Blinken zuerst durch die Bewegung und nicht durch die Farbe auffällt (Bartenbach & Witting, 2009, S. 98f).

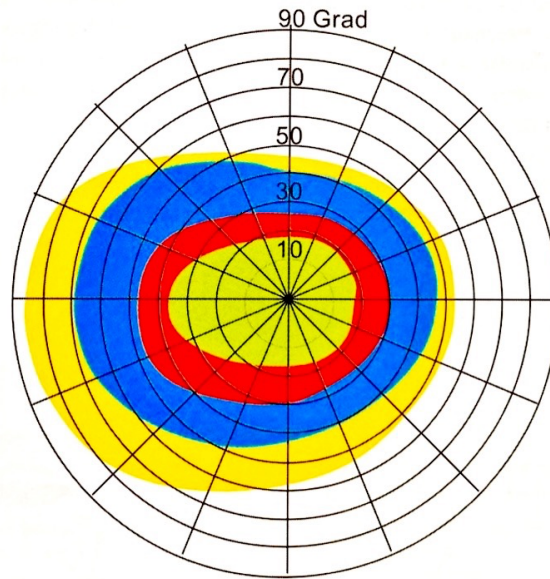


Abbildung 6: Gesichtsfeld des linken Auge mit eingezeichneten Erkennungsgrenzen von Grün, Rot, Blau und Gelb (Bartenbach & Witting, 2009, S. 99)

Insgesamt kann der Mensch nach einer Hochrechnung von Goldstein und Ritter (1997, S. 125) ca. 2 Mio. Farben voneinander unterscheiden. Eine passivere, auf Studienergebnissen basierende Schätzung von Welsch und Liebmann (2012, S. 13) hingegen nennt eine Fähigkeit zur Unterscheidung zwischen 100000 und 1 Millionen Farben.

4.5 Farbfehlsichtigkeit

Bei der visuellen Gestaltung mit Farben gilt es darauf zu achten, dass bei durchschnittlich ca. 8% der Männer und 0,5% der Frauen eine Farbfehlsichtigkeit vorliegt. Die verbreitetste ist die Rot-Grün-Schwäche, bei welcher Probleme in der Unterscheidbarkeit der Farben Rot und Grün auftreten. Bei der Verwendung dieser Farben – gerade in der Kombination – muss überlegt werden, wie Personen mit Farbfehlsichtigkeit die Gestaltung wahrnehmen und ob die Wirkung der Funktion trotz der Verwechslungsgefahr der Farben weiterhin gegeben ist (Kortum, 2008).

Das Thema Farbfehlsichtigkeit wurde bei der Auswahl der Stichproben für die Durchführung der Studien der vorliegenden Forschungsarbeit berücksichtigt.

4.6 Helligkeit & Kontraste

Um einen Seheindruck zu erzeugen, ist zwangsweise Licht von Nöten, wobei je nach Sichtbereich die benötigte minimale Menge des Lichts unterschiedlich ist. Je nach vorherrschender Umgebungshelligkeit werden drei Arten des Sehens unterschieden (zusammengefasst aus Boyce, 2014, S. 57,61).

- **Skotopisches Sehen:** Bei Umgebungshelligkeiten unter $0,005 \text{ cd/m}^2$ werden nur die Stäbchen-Rezeptoren angesprochen, da die für das Farbsehen zuständige Zapfen-Rezeptoren nicht ausreichend empfindlich sind. Dementsprechend können nur verschiedene Schattierungen von Grau unterschieden werden. Der Bereich der Fovea bleibt blind und man spricht von skotopischem Sehen. Die untere Helligkeitsschwelle, welche grundsätzlich als Voraussetzung für das menschliche Sehen erfüllt sein muss, liegt bei ca. $0,0001 \text{ cd/m}^2$.
- **Photopisches Sehen:** Der Begriff wird verwendet, wenn die vorherrschende Umgebungshelligkeit 5 cd/m^2 übersteigt. Bei diesen Leuchtdichten dominiert die Wahrnehmung über die Zapfen-Rezeptoren, allerdings werden auch die Stäbchen-Rezeptoren angesprochen. Das bedeutet, dass sowohl Farbsehen als auch feinauflösendes Detailsehen verfügbar ist.
- **Mesopisches Sehen:** Der Sehbereich zwischen skotopischem und photopischem Sehen, also zwischen $0,005 \text{ cd/m}^2$ und 5 cd/m^2 , in welchem Stäbchen- und Zapfen-Rezeptoren aktiv sind.

Das menschliche Auge besitzt die Fähigkeit, sich über verschiedene Mechanismen an veränderte Lichtintensitäten anzupassen. Eine Möglichkeit ist das Weiten bzw. Verengen der Pupille zur Regulierung der Menge des einfallenden Lichts, eine andere die Anpassung der Lichtempfindlichkeit der Netzhaut. Diese als Adaption bezeichneten Vorgänge ermöglichen es, Gesichtsfeldleuchtdichten von ca. $0,00001$ bis 100000 cd/m^2 zu sehen (Bartenbach & Witting, 2009, S. 78–80).

Trotz dieser Anpassmöglichkeiten, kann durch ungünstige Leuchtdichte-Verteilung oder zu hohe Kontraste ein unangenehmer Sehzustand entstehen, welchen

man als Blendung bezeichnet (DIN EN 12665:2018-08, 2018). Dabei werden wichtige Sehfunktionen wie z.B. Scharfsehen, Farbsehen oder Bewegungssehen beeinträchtigt (Bartenbach & Witting, 2009, S. 90), weswegen man auf die Vermeidung von Blendung bei der Gestaltung von Lichtsystemen Rücksicht nehmen muss.

4.7 Scheinbewegungen

Die im folgenden untersuchten Lichteffekte erzeugen den Eindruck einer Bewegung nicht über eine einzelne Lichtquelle, welche bewegt wird, sondern über nacheinander aufleuchtende Lichtpunkte. Bei diesem Vorgehen wird vom Erzeugen einer Scheinbewegung gesprochen, wobei die Wahrnehmung einer flüssigen Bewegung von den Zeitintervallen zwischen den einzelnen Lichtpunkten abhängig ist. Zudem gilt, dass man bei größer werdender Entfernung zwischen zwei Lichtpunkten entweder das Zeitintervall oder die Intensität der Lichtpunkte steigern muss, um die Wahrnehmung der gleichen Scheinbewegung zu erhalten (Goldstein & Ritter, 1997, S. 272).

Welche Geschwindigkeiten zu welchem Wahrnehmungseindruck führen, ist in Abbildung 7 dargestellt.

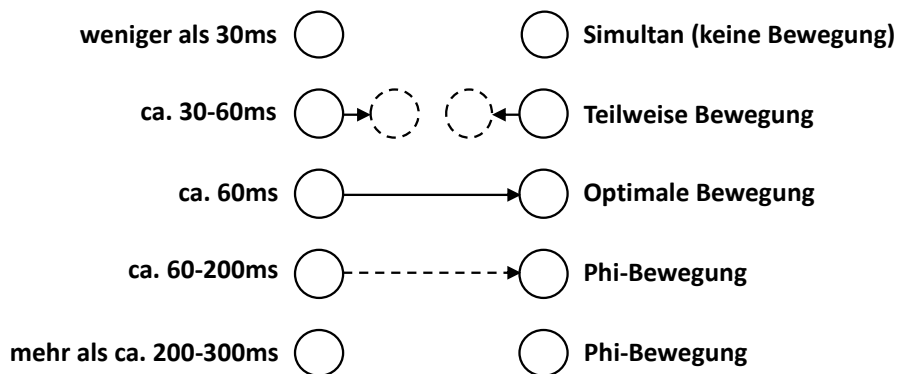


Abbildung 7: Angaben zur zeitlichen Verzögerung beim An- und Ausgehen mehrerer Lichtpunkte und den daraus resultierenden Bewegungseindrücken (nach Goldstein & Ritter, 1997, S. 272)

Bei der Durchführung der Probandenstudien wurde auf eine ausreichende Geschwindigkeit der animierten Lichtpunkte geachtet und dadurch die homogene Wahrnehmung der Bewegung sichergestellt.

4.8 Beeinflussung der visuellen Aufmerksamkeit

Nicht alles, was sich zur gleichen Zeit im Gesichtsfeld befindet, kann auf einmal vom visuellen System verarbeitet werden. Daher benötigt es Mechanismen, welche dafür sorgen, dass relevante Informationen ausgewählt, während irrelevante herausgefiltert werden. Diese Mechanismen werden unter dem Begriff „visuelle Aufmerksamkeit“ zusammengefasst (McMains & Kastner, 2009).

Visuelle Aufmerksamkeit darf man sich nicht als „räumlichen Lichtkegel“ vorstellen, welcher durch das Gesichtsfeld gesteuert wird und einzelne Spots absucht (Ansorge & Leder, 2017, S. 82), zumal die Blickrichtung nachweislich nicht das gleiche ist wie die Richtung der Aufmerksamkeit (Posner, 1980).

Wodurch die Lenkung der visuellen Aufmerksamkeit herbeigeführt wird, wird versucht mit unterschiedlichen Theorien zu erklären. Dazu wird von verschiedenen Autoren im Wesentlichen nach räumlicher, merkmalsbasierter und objektbasierter Selektivität unterschieden (Ansorge & Leder, 2017, S. 81). Desimone und Duncan (1995) hingegen vertreten den Ansatz, dass nicht ein Vorgehen als Erklärung ausreicht, sondern dass sich die visuelle Aufmerksamkeit aus unterschiedlichen Mechanismen zusammensetzt, die nicht isoliert erklärt werden können. Laut ihrem „Modell des beeinflussten Wettbewerbs (...) ist Selektivität das gemeinsame Kennzeichen einer Vielzahl unterschiedlicher verhaltens- und hirenseitiger Bedingungen, denn an verschiedenen Stellen der Verarbeitung zwischen Input und Verhalten stehen visuelle Objekte miteinander im Wettstreit um begrenzte Verarbeitungskapazitäten und um die Verhaltenssteuerung“ (Ansorge & Leder, 2017, S. 82).

Unabhängig von den Ansätzen zur Erklärung der Abläufe von visueller Aufmerksamkeit, gibt es ein breites Forschungsfeld, welches sich mit der Einflussnahme verschiedener Eigenschaften von Objekten auf die visuelle Aufmerksamkeit beschäftigt.

Dabei dient häufig eine manuelle Reaktion (sowohl das Vorhandensein einer Reaktion, also auch die zwischen Event und Reaktion vergangene Zeit) als quanti-

tatives Maß, um den Einfluss von Faktoren nachzuweisen oder verschiedene Faktoren miteinander zu vergleichen. Untersuchungsgegenstände solcher Studien sind beispielsweise Stimuli in verschiedenen Farben (Haines, Dawson, Galvan, & Reid, 1975) Größen (Osaka, 1976) oder Geschwindigkeiten (McKee & Nakayama, 1984; Träschütz, Zinke, & Wegener, 2012).

Während in diesen Forschungsarbeiten Grundlagen in der Wahrnehmung einzelner Eigenschaften betrachtet werden, gibt es viele Studien, in denen die Wirkung von zusammengeführten visuellen Stimuli zu einem komplexen Erscheinungsbild bewertet werden. Eine Auswahl an Untersuchungen, die im Kontext eines Fahrzeuginnenraums durchgeführt wurden, findet sich in Kapitel 6.2

Die visuelle Aufmerksamkeit kann im gesamten Gesichtsfeld gelenkt werden, wobei die Größe des Gesichtsfelds durch auffällige Reize in der Peripherie vergrößert werden kann. Dies geschieht „durch die höhere Durchschnittsleuchtdichte des Gesichtsfeldes sowie durch größere Leuchtdichten und Ausdehnung der peripheren Reize.“ (Bartenbach & Witting, 2009, S. 97f).

Treten im allgemeinen Objekte im Gesichtsfeld, die bereits als uninteressant bewertet wurden und dennoch weiter kontinuierlich auf sich aufmerksam machen, so kann es zu einer als unangenehm empfundenen Ablenkung kommen (engl. *distraction*) (Boyce, 2014, S. 165). Bartenbach & Witting definieren den Begriff Ablenkung wörtlich als „eine durch externe Reizbedingung verursachte, unerwünschte Fremdenkung der Bewusstheitsrichtung“ (2009, S. 175), wobei die Einschätzung was „unerwünscht“ ist, sowohl von der vorherrschenden Situation als auch subjektiven Faktoren abhängig ist und nicht generalisiert werden kann.

5 Licht spüren: Die Wirkungsweise von Licht auf den Menschen

Einen menschlichen Alltag kann man sich nicht ohne Licht vorstellen. Allerdings spielt Licht eine weit größere Rolle, als nur das Sehen zu ermöglichen. Es wirkt auf vielfältige Art und Weise auf den Menschen und ist damit zum Gegenstand einer breitgefächerten Wissenschaft geworden. Im folgenden Abschnitt zeigen ausgewählte Beispiele die umfassenden Wirkungsmöglichkeiten von Licht auf.

5.1 Psychologischer & physiologischer Einfluss

Eine Veränderung der Intensität oder der Farbtemperatur einer Beleuchtung wirkt auf den Zustand des menschlichen Körpers. Viele Beispiele hierfür zeigt die Arbeit von Werth Steidle, Hubschneider, de Boer und Sedlbauer (2013) auf. Die Autoren haben zusammengefasst, wie verschiedene Lichtsettings die Arbeitsleistung oder das Verhalten im Konsumbereich beeinflussen können. Sie erarbeiteten aber auch Ergebnisse zum Thema Gesundheit und Wohlbefinden sowie Interaktionen mit anderen Personen auf, so dass die Ergebnisse nicht trennscharf zwischen den Bereichen psychologischer und physiologischer Einfluss aufzuteilen sind. Eine verallgemeinerbare Erkenntnis, die sie beispielsweise beschreiben ist, dass „[g]roßer visueller Komfort und eine angenehme Raumgestaltung durch das Licht (...) zu einer positiven Stimmung führen und die Motivation steigern“ können. Generell appellieren die Autoren bei der Gestaltung von Räumlichkeiten die wichtige Wirkung von Licht zu kennen und entsprechend zu berücksichtigen, da es sich um eine grundlegende Einflussnahme handelt.

Die psychologische Wirkung von Licht war auch Forschungsgegenstand der Doktorarbeit von Susanne Fleischer (2001). Sie zeigte anhand einer einjährigen Feldstudie sowie an einem zusätzlichen Laborversuch, dass das Befinden und der emotionale Zustand des Menschen im Büro durch das künstliche Licht beeinflusst wird. Bei der Manipulation der Parameter Beleuchtungsstärke, Helligkeits-

verteilung und Lichtfarbe gibt es jedoch keine durchgängig gültige Regel, sondern das genaue Gegenteil: Die Lichtsituation muss kontinuierlich an unterschiedliche Gegebenheiten wie Arbeitsumfeld, Wetter/Jahreszeit oder Tätigkeit adaptiert werden. Diese Erkenntnis dient der Autorin als Grundlage zur Empfehlung, verschiedene Lichtszenarien zu gestalten, die die einzelnen Bedürfnisse erfüllen.

Ein anderes Beispiel, welches sich mit einem sehr konkreten Thema beschäftigt, ist die Arbeit von Forstner (2012). Er untersucht in seiner Arbeit, ob Bright Light genutzt werden kann, um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu beeinflussen. Dazu stellte er die Bright Light-Kondition mit ca. 4420 lx der Dim Light-Kondition mit ca. 265 lx gegenüber. In seiner dreigeteilten medizinisch strengstens kontrollierten Untersuchung musste jeder Proband einen Belastungstest (Fahrt auf einem Ergometer) ohne Einfluss von Licht als Baseline absolvieren. In den zwei darauffolgenden Wochen wurde der gleiche Test je einmal mit der einen bzw. der anderen Beleuchtungskondition durchgeführt, wozu auch jeweils vorab eine zweistündige Bestrahlung mit der jeweiligen Beleuchtungsstärke gehörte. Es wurden sowohl objektiven Kriterien wie Blutdruck, Körpertemperatur etc. als auch subjektive Messgrößen (z.B. Stimmungslage, Schläfrigkeit) ausgewertet, wobei nicht bei allen Parametern ein signifikanter Unterschied zugunsten der Bright Light-Kondition nachgewiesen werden konnte. Da allerdings stets die Tendenz sichtbar war, kommt Forstner zu dem Entschluss, dass Bright Light das physische Merkmal Ausdauerleistungsfähigkeit steigern kann.

5.2 Biologischer Einfluss

Ein besonders wichtiges Beispiel für den Einfluss von Licht, ist die Auswirkung auf das biologische System des Menschen. Die Gestaltung seines im 24-Stunden-Zyklus wiederkehrendem Tagesverlaufs, ist geprägt durch den Schlaf-Wach-Rhythmus. Das, was umgangssprachlich als innere Uhr bezeichnet wird, sorgt dafür, dass der Mensch abends müde sowie morgens wach werden und steuert

damit die Abschnitte des Schlafens und des Wachseins. Um 1930 wurde herausgefunden, dass dieser sogenannte *circadiane Rhythmus* durch die äußeren Umstände von Helligkeit und Dunkelheit gesteuert wird. (Boyce, 2014, S. 93)

Seit 2000 weiß man darüber hinaus, dass dafür spezielle Neuronen verantwortlich sind: die Ganglienzellen, welche neben den Stäbchen und Zapfen auf der Retina zu finden sind und unter Lichteinfluss die Produktion von Melatonin beeinflussen (Müller et al., 2015, S. 726f). Nimmt die Lichtmenge ab, so steigt der Melatonin-Spiegel und die Schlafphase wird eingeläutet; Bei zunehmender Umgebungshelligkeit sinkt entsprechend die Melatonin-Produktion und die Aufwach-/Wach-Phase beginnt (vgl. Abbildung 8). Eine besonders starke Beeinflussung der Ganglienzellen ist bei kurzwelligem Licht um die 480nm (im blauem Farbspektrum) gemessen worden (Boyce, 2014, S. 101).

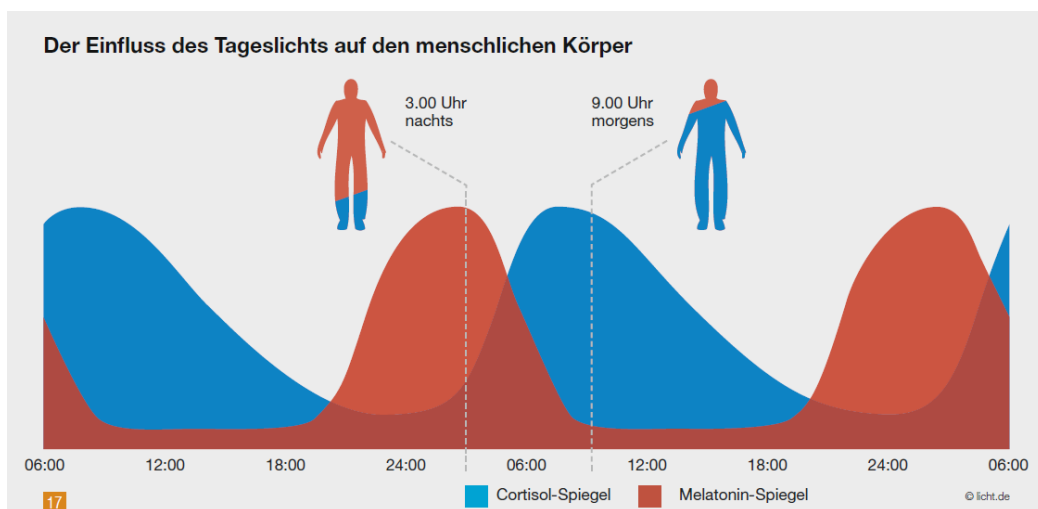


Abbildung 8: Zeitliche Übersicht der Beeinflussung des Cortisol- und Melatonin-Spiegels durch Tageslicht (Licht.de, 2014, S. 16)

Es gibt verschiedene Forschungen und Projekte, welche sich mit den Auswirkungen und Beeinflussungsmöglichkeiten des circadianen Rhythmus beschäftigen. Beispielsweise hat Popp (2005) in seiner Dissertation kurzwelliges Licht als Gegenmaßnahme bei Schläfrigkeit untersucht. Aber auch die bereits im vorherigen Kapitel 5.1 aufgeführten Beispiele zur psychologischen Beeinflussung sind verknüpft mit der biologischen Wirkung des Lichts.

Eine kommerzielle Nutzung der Melatonin-Beeinflussung findet bei Produkte wie dem *Philips Wake-up Light* statt, einem „Lichtwecker“, der eine Stimulation

von Licht am Morgen zum sanften Aufwachen nutzt (Koninklijke Philips N.V., 2020). Produkte wie *Ayo* hingegen greifen zur Vermeidung von Jetlag auf den circadianen Rhythmus ein (NOVALOGY, 2019).

Auch im Automobilbereich gibt es Funktionen, welche sich, u.a. mit Hilfe von Licht, bemühen, positiv auf den Zustand des Fahrers einzuwirken. Zwei Beispiele hierfür sind die Funktionen „Fit Driver“ von Audi (Audi AG, 2020) sowie „Caring Car“ von BMW (BMW AG, 2020).

Für alle genannten Projekte gilt, dass Licht nur in bestimmten Einstrahlwinkeln biologisch wirksam ist. Eine Übersicht der zu berücksichtigenden Empfindlichkeit der Fotorezeptoren ist in Abbildung 9 zu sehen.

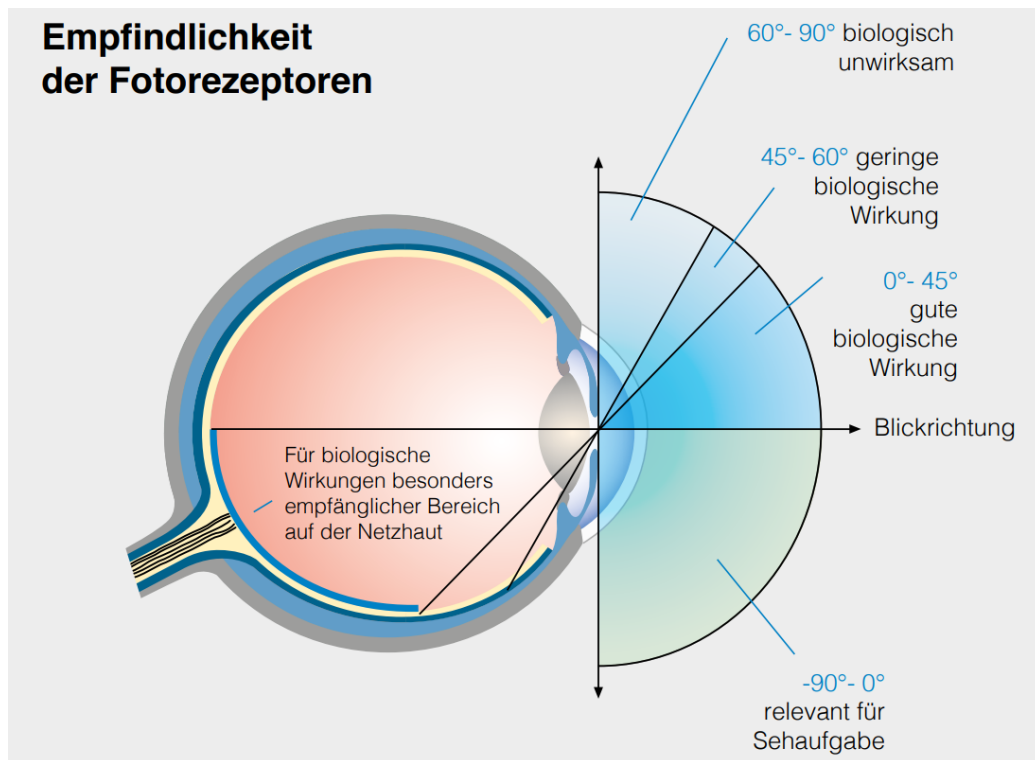


Abbildung 9: Übersicht der Winkelabschnitte für biologische Wirkung von Licht (Licht.de, 2018, S. 19)

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wird Licht nicht zur Beeinflussung des Melatonin-Haushalts untersucht, dennoch ist es wichtig, die vielfältigen Wirkungsmöglichkeiten von Licht bei der Gestaltung im Hinterkopf zu behalten, um mögliche Nebeneffekte eines gestaltenden Lichteffekts beurteilen zu können.

Für weitere Informationen zum Thema sei auf ein Paper von Cajochen (2007) verwiesen, welche die Forschung zur biologischen Lichtwirkung der letzten 20 Jahre zusammengefasst hat.

5.3 Farbempfinden

Mit der Frage „Sind wir farbabhängig und farbsüchtig?“ wird von den Autoren Welsch und Liebmann (2012, S. 53) die These aufgeworfen, dass sich niemand, der in der Lage ist Farben zu sehen, der Wirkung dieser entziehen kann. Farben – und damit deren Wirkung - sind nicht von Licht zu trennen und damit in der Tat allgegenwärtig, wobei die grundlegende Definition, wobei es sich um Farben handelt, zunächst nicht einfach zu beantworten ist (Künzer, 2016, S. 2016). Denn während die Fähigkeit des Menschen zur Farbwahrnehmung sinnesphysiologisch bestimmt ist, ist die Fähigkeit zur Benennung von Farben abhängig von Kultur, Sprache und Erfahrung (Gross, 2006). Welche Farbbegriffe für die individuellen Farben in der deutschen Sprache vorliegen, wurde von Heller (2006) für ihr Buch *Wie Farben wirken* zusammengetragen. Beim Vergleich ihrer Farbbegriffssammlungen für beispielsweise Blau (S. 21) und Rosa (S. 113) wird aber deutlich, dass sich die Anzahl der differenzierten Begriffe pro Farbe stark unterscheiden kann. Einen globalen Eindruck, für die in verschiedenen Kulturen vorherrschenden Benennungen von Farben gibt die „World Color Survey“, für welche 110 ungeschriebene Sprachen untersucht wurden (Kay, Berlin, Maffi, Merrifield, & Cook, 2010).

Generell gilt, dass es kulturübergreifend stets eine begriffliche Unterscheidung für Hell/Dunkel bzw. Schwarz/Weiß gibt. Darüber hinaus gelten Rot, Gelb, Grün und Blau als die vier Hauptfarben (Welsch & Liebmann, 2012, S. 15). Diesen Farben werden beispielhaft im deutschen Kulturraum folgende Bedeutung zugeschrieben (wörtlich entnommen aus Dahm, 2006, S. 52):

Rot: Blut, Feuer, Gefahr, Liebe, Hitze, Energie, Weiblich, Luxus, Leidenschaft, Stopp

Gelb: Sonne, Lebendig, Wärme, Gold, Reif, Neid, Fernwirkung, Warnung (mit

Schwarz)

Grün: Natur, Neid, Hoffnung, Beruhigung, Gift, Frische, Gesund, Leben, Herb, OK

Blau: Kühle, Neutral, Dynamisch, Jeans, Männlich, Adel, Cool, Kompetenz, Ferne

Einen speziellen Bereich der Farbempfindung untersuchte Künzer (2016) in ihrer Doktorarbeit: Sie betrachtete die Farben der Ampelalogie (Grün, Gelb, Orange und Rot) plus zusätzlich die Farben Weiß, Blau, Lila und erarbeitete für diese eine Farbhierarchie im Kontext von Gefahr und Sicherheit. Ihre Ergebnisse zeigen auf, dass es innerhalb der Farben eine Rangordnung in Bezug auf Sicherheit gibt (von sicher bis nicht sicher): Rot, Orange, Gelb, Lila, Blau, Grün/ Weiß (alle Ergebnisse außer für Grün und Weiß eindeutig). Insgesamt gelten Rot und Orange als Vermittler von Gefahr und nicht sicher; Gelb, Lila und Blau stehen überwiegend für mittlere Gefahr bzw. mittlere Sicherheit; Grün und Weiß gelten in den meisten Fällen für keine Gefahr und daher Sicherheit.

Um für einige der bisher aufgeworfenen Farbbezeichnungen den Versuch einer einheitlichen Definition zu unternehmen, kann man auf die von Judd im Jahr 1940 erstellte Normfarbtafel blicken (siehe Abbildung 10). Auf Basis des CIE-Farbsystems (CIE, 1932) wurden zusammengehörige Empfindungsqualitäten eingezeichnet, die in Untersuchungen mit unterschiedlichen Oberflächen unter je fünf verschiedenen Beleuchtungsszenarien erhoben wurden (Judd, 1940). Bei der Betrachtung der Normfarbtafel gilt zu beachten, dass Judd aus Amerika stammt und somit eine durch seine westliche Kultur bedingte Beeinflussung der Verzeichnung der Farben in der Farbtafel nicht auszuschließen ist.

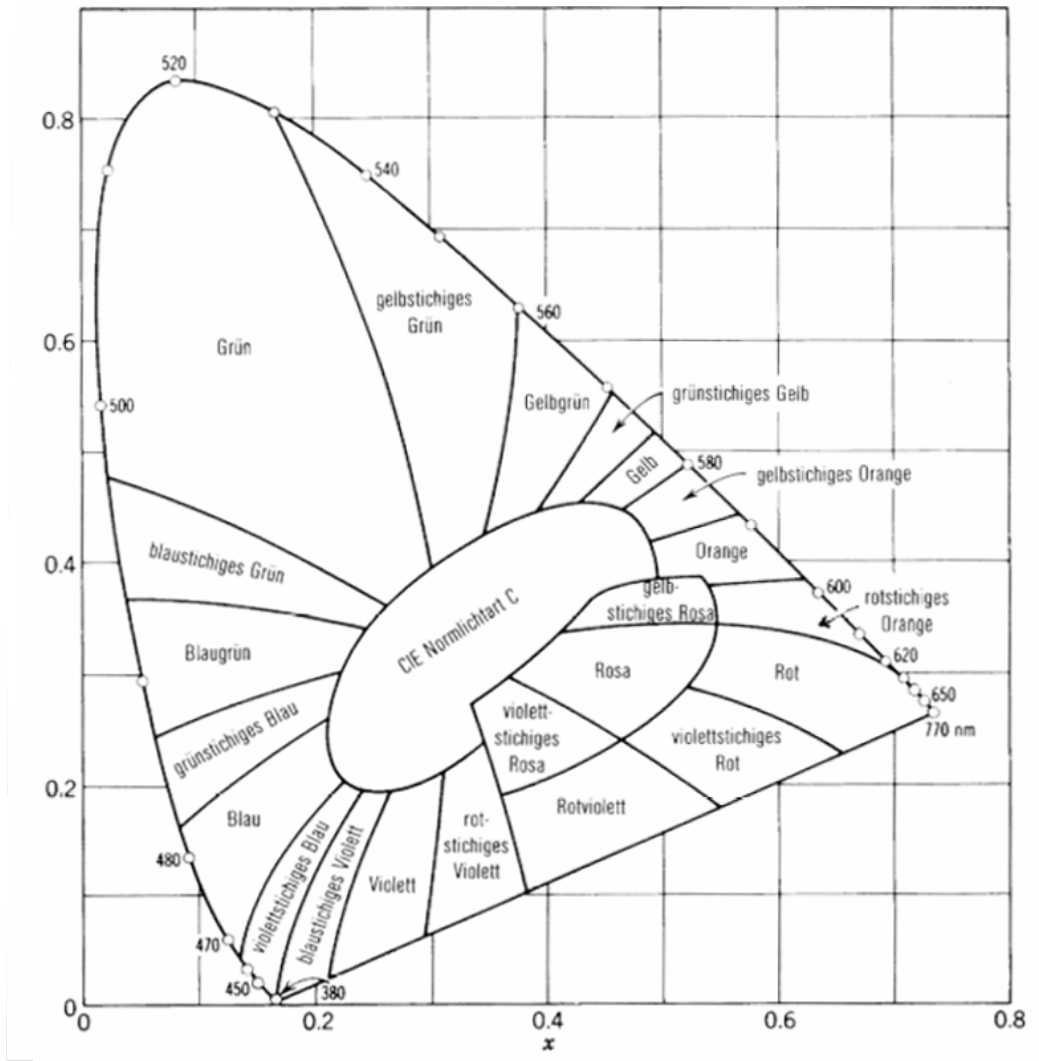


Abbildung 10: Übersicht der Empfindungsqualitäten in der Normfarbtafel nach Judd (Lübbe, 2013, S. 89)

6 Einsatz von Licht im Fahrzeuginnenraum

Im nachfolgenden Abschnitt werden Beispiele für die Anwendung von künstlichem Licht vorgestellt. Diese lassen sich in jedem Lebensbereich finden, allerdings wurde bei der Zusammenstellung der Beispiele der Fokus dieser Forschungsarbeit berücksichtigt und entsprechend nur solche aus dem Fahrzeuginnenraum ausgewählt.

6.1 Ambientes Licht

Es gibt verschiedene Elemente im Fahrzeuginnenraum, die der sogenannten ambienten Beleuchtung zuzuordnen sind, z.B. die ambiente Fußraumbeleuchtung oder Türspiegelbeleuchtung. Grundsätzlich wird jedes farbige Lichtelement im Innenraum als ambiente Beleuchtung bezeichnet, wobei zwischen direkt sichtbaren Elementen wie der Konturbeleuchtung und den indirekten Elementen, welchen auf eine Fläche leuchten, unterschieden wird (Beispiele in Abbildung 11 markiert). Davon abzugrenzen sind die weiß leuchtenden Innen- und Leselichter, welche den Innenraum situativ hell ausleuchten.

Eine erste Übersicht an ambienten Komponenten ist bei Wördenweber et al. (2007, S. 189) zu finden, wobei davon auszugehen ist, dass die Zahl seitdem stetig gestiegen ist. In einem Fahrzeug aus dem Jahr 2013 von BMW waren beispielsweise nur 3 Lichtelemente verbaut, wohingegen der BMW x7 von 2018, dessen erste Sitzreihe in Abbildung 11 zu sehen ist, in Vollausrüstung 44 Elemente hat, die der ambienten Beleuchtung zuzuordnen sind (Isele & Hertlein, 2019).



Abbildung 11: Ambiente Beleuchtung im Interieur der ersten Sitzreihe des BMW x7 aus 2018 (PressClub Deutschland BMW Group, 2018)

Die heute in Fahrzeuginnenräumen verbauten Lichtelemente erreichen in der Regel Helligkeiten, welche sie lediglich bei dunklen Umgebungsbedingungen sichtbar sein lassen (eine indirekte Fußraumbeleuchtung erreicht beispielsweise nur Helligkeiten von $< 4 \text{ cd/m}^2$). Dementsprechend zeigt sich die Lichtgestaltung überwiegend bei Abend- bzw. Nachtfahrten und bietet dann einem Kunden die Möglichkeit, sich den Innenraum individuell nach subjektivem Belieben anzupassen.

Eine der ersten wissenschaftlichen Forschungsarbeiten, die die Einflüsse von ambienter Beleuchtung untersuchte, stammt von Martin Grimm aus dem Jahr 2003. Er ermittelt in seiner Arbeit Ansprüche an Leuchtdichte, Größe und Verortung von ambienter Beleuchtung und untersucht die Messgrößen **Störung, Veränderung der Sehleistung und Adaptionniveau**. Seine erarbeiteten Ergebnisse münden in einen Bewertungssystem für ambiente Beleuchtung (Grimm, 2003).

An die Arbeit von Grimm schließen sich viele weitere Arbeiten an, die sich auf die Vorteile der Verwendung einer ambienten Beleuchtung auf das **Kontrastsehen** des Fahrers konzentrieren (Caberletti, Kümmel, Elfmann, & Schierz, 2009; Klinger & Lemmer, 2008; Michenfelder, 2010; Schellinger, Franzke, Klinger, & Lemmer, 2006). Beispielsweise haben die Untersuchungen von Franzke (2006) an 32 Personen unterschiedlichen Alters (22 bis 71 Jahre) ergeben, dass das Kontrast-

sehvermögen jüngerer Probanden bei bestimmten ambienten Beleuchtungen positiv beeinflusst wird. Bei älteren Personen hingegen wirkt sich die Beleuchtung besonders bei mittel- und kurzwelliger Strahlung eher negativ aus. Zu ähnlichen Ergebnissen kam zuvor bereits Grimm (2003), der Grün bis Blau ebenfalls eine höhere negative Beeinflussung zusprach, während Rot bis Orange als positiv bewertet wurden. Franzke kommt auf Basis seiner Ergebnisse dem Schluss, dass es zwingend nötig ist, dass die ambiente Beleuchtung im Fahrzeug hinsichtlich der Farbe konfigurierbar, die Helligkeit dimmbar und nach subjektiven Vorlieben abschaltbar sein muss – Forderungen, denen die meisten Fahrzeuge mit ambienter Beleuchtung heute gerecht werden.

Einen anderen Fokus bei der Untersuchung ambienter Beleuchtung legt die Arbeit von Elfmann (2009). In seiner Studie wurde der Einfluss einer ambienten Fahrzeugbeleuchtung in Abhängigkeit der Leuchtdichte, der Farbe und der Position im Fahrzeuginnenraum auf die **subjektive Wahrnehmung** des Fahrers untersucht. Dazu bewerteten 31 Probanden im statischen Fahrsimulator bei mesopischen Lichtbedingungen 12 unterschiedlichen Helligkeitssettings. Jedes Lichtszenario wurde für drei Minuten angezeigt und die Testpersonen mussten neben der normalen Fahraufgabe jeweils zwei Nebenaufgaben pro Testabschnitt absolvieren (z.B. Lüftungsdüsen in der Mittelkonsole auf den Fahrer richten oder die Sitzheizung des Fahrers aktivieren), welche ihren Blick in den Fahrzeuginnenraum lenkten und damit eine Wahrnehmung der ambienten Beleuchtung garantierten.

Als Ergebnis ermittelte Elfmann Wahrnehmungshäufigkeiten der einzelnen Leuchtenpositionen. Die ambiente Beleuchtung der Instrumententafel wurde mit nahezu 100% am häufigsten wahrgenommen, während die Wahrnehmungshäufigkeit der Elemente Türöffner, Türzuziehgriff, Auflicht, Kartenfach, Fußraum und Türspiegel in aufgezählter Reihenfolge abnahm und lediglich zwischen 70% und 50% lag. Für alle Leuchtelemente kann pauschalisiert gesagt werden, dass je höher die Helligkeit, desto besser die Wahrnehmungsrate. Interessant ist, dass die Instrumententafel am besten wahrgenommen wurde, da es sich hier um die

einzigste Konturbeleuchtung handelt. Allerdings wird die hohe Wahrnehmungsquote nicht durch das andersartige Beleuchtungselement erklärt, sondern durch die größte Nähe zur Fovea.

Eine weitere Arbeit zur subjektiven Wahrnehmung der ambienten Beleuchtung stammt von Huber (2009). Ihre Arbeit erweitert die Ergebnisse von Elfmann und legt einen Fokus auf **subjektiv präferierte Farbtöne und zugehörige Leuchtdichten**. Es wurde erneut eine Fahrsimulatorstudie (Fahrzeug = Mini Clubman; Stichprobe = 30 Testpersonen) durchgeführt. Den Probanden wurde während der normalen Fahraufgabe und Nebenaufgaben (z.B. Bonbon aus dem Cupholder holen) jeweils für zwei Minuten eine bestimmte Beleuchtungsszene angezeigt.

Insgesamt gab es neun verschiedene Beleuchtungseinstellungen, die im Test evaluiert wurden. Die Leuchtdichten der einzelnen Komponenten lagen zwischen 0,002 und 0,16 cd/m²; die Helligkeitsumgebung entsprach mesopischen Sichtbedingungen.

- Nr. 1 - 3: Seriennahe Kombination aus Leuchtelementen in den Farben Rot, Grün und Blau.
- Nr. 4 – 8: Im Umfang erweiterte, Kombination aus helleren Leuchtelementen in den Farben Rot, Grün, Blau, Weiß, Türkis
- Nr. 9: Ohne Beleuchtung

Mit Hilfe von Fragebögen wurde die subjektive Wirkung der Beleuchtungssettings sowie der Einfluss auf die Emotionen der Probanden erfasst.

Betrachtet man zunächst die Ergebnisse der seriennahen, dunkleren Beleuchtungssettings, so wurde die Farbe Blau hinsichtlich der Fragen zur Raumwahrnehmung und Orientierung sowie Attraktivität gegen über Rot und Grün bevorzugt. Für die Fragen zur Aufmerksamkeit und Sicherheitsgefühl konnte keine verallgemeinernde Aussage getroffen werden.

Für die Testsettings mit größeren Leuchtdichten ergaben sich über alle Farben hinweg insgesamt bessere Ergebnisse des im Vergleich zu den dunkleren Beleuchtungsszenarien. Es fällt besonders das gute Abschneiden der Farbe Weiß in der Kategorie Raumwahrnehmung und Orientierung sowie das schlechte Ab-

schneiden der Farbe Grün bezüglich der Fragen nach der Attraktivität auf. Abgesehen davon lagen die restlichen Farben in der Bewertung häufig nah beieinander. Insgesamt wurde angegeben, dass ambientes Licht im Innenraum nicht zu mehr Ablenkung führt, als wenn kein Licht vorhanden ist. Zudem wurden alle Testsettings mit ambierter Beleuchtung subjektiv besser bewertet als dasjenige ohne Beleuchtung.

Die zusammengefassten Studien zeigen auf, dass ambiente Beleuchtung den Fahrzeuginnenraum qualitativ aufwerten und das nicht nur unter den Aspekten verbesserten Sehens und geringerer Ermüdung der Augen. Es legitimieren auch insbesondere die hedonischen Aspekte der subjektiven Empfindung das Vorhandensein von ambierter Beleuchtung. Zudem lässt sich bei gesamthafter Betrachtung aller Ergebnisse feststellen, dass sich aus den Daten zu objektiven Metriken wie Kontrastsehen und subjektiven Präferenzen zur Raumwirkung ein Widerspruch in der Empfehlung ergibt: Während die Farbe Blau objektiv hinsichtlich der genannten Eigenschaften weniger geeignet ist, wird sie dennoch von Probanden sehr geschätzt.

6.2 Einsatz von Licht zur visuellen Kommunikation

Während im vorherigen Abschnitt lediglich auf die Verwendung von Licht im Sinne der ambienten Beleuchtung eingegangen wird, werden in diesem Kapitel Projekte und Umsetzungen vorgestellt, in welchen Licht eine funktionale Aufgabe zu Teil wurde. Die nachfolgend zusammengefassten Projekte und Studienergebnisse wurden nach der Verortung der leuchtenden Elemente sowie der umgesetzten Use Cases ausgewählt und bilden einen Teilausschnitt der umfangreichen Forschung, der in Bezug auf die anschließenden eigenen Studien besondere Relevanz besitzt.

Die erste interessante Studie stammt von Laquai, Chowanetz & Rigoll (2011) und beinhaltet Konzepte, basierend auf LED-Arrays, zur vorrausschauenden Anzeige

einer Situation, für welche eine Reduzierung der Geschwindigkeit notwendig ist. Beispielhafte Situationen hierfür wären eine nahende Geschwindigkeitsbegrenzung oder das Ende eines Staus. Insgesamt werden in dem Paper drei verschiedene Konzepte vorgestellt, wobei vor allem das in Abbildung 12 eingezeichnete Konzept 1 „Static Guiding Points“ interessant ist. Im Gegensatz zum ebenfalls im Paper vorgestellten Vorgänger-Prototyp wurde die Länge des LED-Arrays für eine bessere Sichtbarkeit auf 1,6 Meter erweitert. Das Warnkonzept besteht darin, dass sich die das LED-Band aus der Mitte heraus füllt, je näher der Fahrer der Gefahrensituation kommt (minimale Anzeige bei 1000 m, flächig komplett gefülltes LED-Band bei 0 m). Zusätzlich wird ein dreistufiges Farbkonzept von Gelb („Ausrollen bis Hindernis ausreichend“ über Orange („Leichtes Bremsen notwendig“) nach Rot („starkes Bremsen notwendig“) verwendet. Ein vorheriges Konzept, welches Grün als unterste Warnstufe beinhaltete, wurde aufgrund der positiven Assoziation mit der Farbe und des mangelnden Appelcharakters verworfen. Dem Konzept 1 gegenübergestellt wurden die sogenannten „Dynamic Guiding Points“ (Konzept 2, siehe Beschriftung in Abbildung 12), welche über Bewegung der LED-Punkte und Verwendung der vorgestellten Farbcodes die optimale Geschwindigkeit vorgaben.

Der Vergleich der beiden Konzepte in einer Fahrstudie ergab, dass das Konzept 1 in subjektiven Befragungen zur Verständlichkeit und Attraktivität besser abschnitt als Konzept 2, dieses jedoch in der Auswertung der Fahrstudie Daten zur Geschwindigkeitsregelung und Bremsreaktion bessere Ergebnisse erzielte.

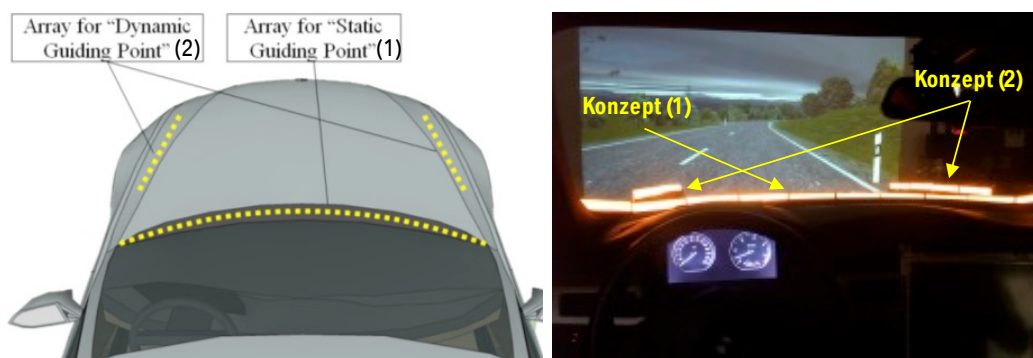


Abbildung 12: Studienkonzepte „Static Guiding Point“ (1) und „Dynamic Guiding Points“ (2) (auf Basis von Laquai et al., 2011)

Insgesamt weisen beide der vorgestellten Konzepte zur Verwendung von LED-Arrays eine deutliche frühere und konstantere Verzögerung der Geschwindigkeit auf, als dies in der Baseline-Gruppe der Fall war. Zusätzlich erhielten beide Konzepte positive subjektive Bewertungen der Probanden, weswegen man insgesamt von einem durchweg positiven Einfluss der vorgestellten Konzepte sprechen kann.

Ein weiteres Projekt, welches sich mit der Beeinflussung von Fahrgeschwindigkeiten durch eine LED-Anzeige beschäftigt hat, ist *ChaseLight* von Meschtscherjakov, Döttlinger, Rödel & Tscheligi (2015). Im Gegensatz zu dem eben vorgestellten Projekt von Laquai und Kollegen, wird der LED-Streifen zur Anzeige der Lichteffekte in die A-Säule integriert (siehe Abbildung 13), die untersuchte Situation entspricht der des eben beschriebenen Konzepts 2: Über Lauflichter wird dem Fahrer eine Umgebungsrückmeldung über die Geschwindigkeit angezeigt. In einer Nutzerstudie werden drei verschiedene Rückmeldungen hinsichtlich ihrer Eignung untersucht: (1) Lauflichter mit konstanter Geschwindigkeit, (2) mit zur Fahrzeuggeschwindigkeit proportionaler Geschwindigkeit und (3) mit zur Zielgeschwindigkeit adaptiver Geschwindigkeit (entspricht dem Use Case aus der Studie von Laquai et al.).



Abbildung 13: Verortung der LED-Streifen zur Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeiten im Projekt ChaseLight (Meschtscherjakov et al., 2015)

Die Studienergebnisse zeigen, dass die adaptive Bedingung (3) am besten dazu geeignet ist, einen Fahrer bei der Steuerung der Fahrgeschwindigkeit zu unterstützen. Die proportionale Geschwindigkeitsbedingung führte zu einer signifikant langsameren mittleren Geschwindigkeit als die der Kontrollgruppe (keine

Lauflichter). Damit ist erneut die Effektivität der Lichteffekte für diese Fahrerassistenzfunktion bewiesen.

Ein Projekt, welches sich nach eigenen Aussagen nicht mit den Möglichkeiten von ambientem Licht als Warnsystem, sondern als Unterstützung bei Entscheidungen beschäftigt, **stammt von Löcken, Müller, Heuten & Boll (2015)**. Sie untersuchen die Anzeige von sicherheitsrelevanten Informationen für den Fahrspurwechsel auf einem LED-Streifen, welcher in der Türbrüstung verortet ist (siehe Abbildung 14). Lichteffekte visualisieren die erwartete *time to collision* (= verbleibende Zeit bis zu einer Kollision) und visualisieren dabei die Position eines Fahrzeugs auf der linken Spur. In der ersten, der beiden vorgestellten Lichtanimationen, wandert ein Lichtpunkt in Abhängigkeit der Fahrzeugposition von der B-Säule zur A-Säule, während im zweiten Szenario sich zusätzlich je nach Dringlichkeit die Helligkeit des Lichtpunkts verändert. Entgegen ersten Bestrebens wurde als neutral Lichtfarbe Lila ausgewählt, da die ursprüngliche Wahl, Weiß, zu sehr an die vorbeiziehenden Fahrspurbegrenzungsmarkierungen erinnerte.



Abbildung 14: Lichteffekt zur Unterstützung bei der Entscheidung über einen Fahrspurwechsel (Löcken et al., 2015)

Zum Beweis der Wirksamkeit der Lichteffekte wurden vier Hypothesen bezüglich der Sicherheitsabstände zu anderen Verkehrsteilnehmern, der Entscheidungsfreudigkeit und des subjektiven Empfindens der Lichteffekte untersucht.

Die Daten hierzu wurden in einer Probandenstudie mit 30 Nutzern erhoben, wobei jeder Nutzer mehrfach beide Konzepte sowie eine Baseline-Kondition ohne Lichteffekt erlebte.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Lichteffekt, bei welchem die Helligkeit konstant bleibt, den Fahrer nicht mehr unterstützt als kein Lichteffekt. Der adaptive Lichteffekt hingegen führte zu weniger Verletzung der Sicherheitsabstände sowie zu schnelleren Entscheidungen in der Fahrzeugführung. In der subjektiven Bewertung ergaben sich keine Unterschiede, wobei bei allen Ergebnissen im Hinterkopf zu behalten ist, dass sieben der 30 Probanden nach eigener Aussage keinen Unterschied in der Darstellung des konstanten und des adaptiven Lichteffekts ausmachen konnten.

Insgesamt zeigt die Studie die Wirksamkeit von Lichteffekten zur Kommunikation mit dem Fahrer, wobei sich für eine gesteigerte Effizienz der inhaltlichen Aussage deutlichere Lichteffekte eignen, welche sich nicht nur im Ort, sondern auch in der Helligkeit verändern.

Ein weiteres Forschungsfeld, welches die Vielfältigkeit des Einsatzes von ambienten Licht verdeutlicht, ist ambientes Licht im Kontext des Hochautonomen Fahrens. Hiermit haben sich unter anderem Borojeni, Chuang, Heuten & Boll (2016) beschäftigt. Sie führten eine Fahrsimulationsstudie durch, um die Eignung ambienter Displays, wie sie die LED-Streifen nennen, als Take-Over-Request (TOR) zu untersuchen und darüber hinaus, ob sich Kontextinformationen durch ambiente TORs übermitteln lassen. Wie bereits in vorherigen zusammengefassten Studien stellten sie einem statischen Lichteffekten einen bewegten gegenüber und postulieren auf Basis der Untersuchungen von Neville & Lawson (1987), dass der bewegte Lichteffekt einen größeren Einfluss auf die periphere Aufmerksamkeit haben wird. Wie in Abbildung 15 zu sehen, wurde der LED-Streifen in unmittelbarer Nähe zum Lenkrad, einem wichtigen Bestandteil im Übernahmeszenario, verortet. Jeder, der an der Studie teilnehmenden 20 Probanden, durchlief und bewertete alle drei unterschiedlichen Lichtdarstellungen: (1) alle LEDs gehen gleichzeitig an als Übernahmeaufforderung; (2) Nur die rechte oder linke Hälfte

der LEDs geht an, um zusätzlich zum TOR die empfohlene Lenkrichtung aufgrund eines auftauchenden Hindernisses anzuzeigen; (3) die Lenkrichtungsempfehlung wird über ein Lauflicht abgebildet, welches sich ab der Mitte je nach Hindernisort nach rechts oder links bewegt.

In allen Szenarien wurden die Reaktionszeit der Probanden, die *time to collision*, der mentale Workload (repräsentiert durch den Fragebogen *RTLX* der *NASA*) und die Blickführung mit Hilfe von Eye-Tracking erhoben.



Abbildung 15: Vermittlung von Kontextinformationen im Rahmen von Take-Over-Requests durch Lichteffekte (Borojeni et al., 2016)

Die Ergebnisse der Studie zeigen auf, dass die Anzeige von Kontextinformationen durch das ambiante Display, im Vergleich zur Kontrollgruppe ohne Lichtanzeige, zu kürzeren Reaktionszeiten und einer längeren *time to collision* führte, ohne dabei die mentale Belastung zu erhöhen. Die Daten reichten nicht aus, um eine signifikante Verringerung des Workloads nachzuweisen, deuten aber auf eine solche hin. Ähnlich verhält es sich mit den Eye-Tracking Daten, welche ebenfalls keine signifikanten Aussagen zuließen. Auf Basis der Ergebnisse wird allerdings deutlich, dass entgegen der Erwartungshaltung die Gestaltung des Lichteffekts (ob statisch oder bewegt) keinen Einfluss auf die Übernahmeleistung nahm. Im subjektiven Feedback hingegen, wurde von 71% der Probanden der bewegte Lichteffekt präferiert. Dies würde erneut die These stützen, dass deutlichere Lichteffekte (Veränderung in Ort und Zeit) für inhaltliche Kommunikation zu bevorzugen sind.

Viele der angesprochenen Paper können als Erweiterung der Bestandsfunktionen um den zusätzlichen Ausgabekanal ambientes Licht betrachtet werden. Im Gegensatz dazu steht die Forschung von Kelsch & Dziennus (2015) (siehe auch Dziennus, Kelsch, & Schieben, 2016), welche sich um ambientes Licht zur Reduzierung anderer Inhaltsanzeigen bemüht. Die Arbeit entstand aus der Motivation heraus, dass es mit steigender Tendenz bereits viele verschiedene Fahrerassistenzsysteme gibt, welche ihre Inhalte an vielen unterschiedlichen Stellen (z.B. Head-up Display oder im Kombiinstrument) und über unterschiedliche Möglichkeiten (Text, Symbolik, Akustische Signale) transportieren. Diese Vielzahl soll in den Augen der Autoren reduziert werden, weswegen sie ein einheitliches Konzept zur Anzeige von Informationen von Fahrerassistenzsysteme im Fahrzeug vorschlagen: ein „Ambient light Display“, ein um 360° im Fahrzeug umlaufender LED-Stripe (siehe Abbildung 16). Auf Basis dieses Interaktionskonzepts führten sie Untersuchungen durch.

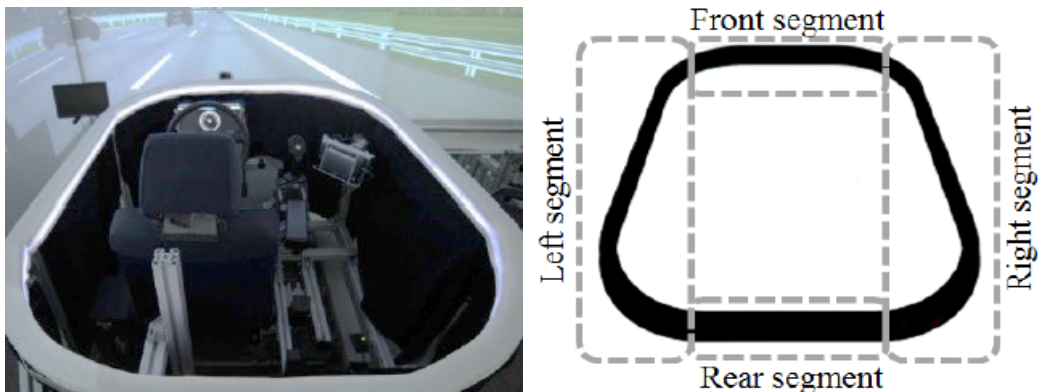


Abbildung 16: Ambient light Display mit umlaufendem 360° LED-Streifen sowie dessen Einteilung in die vier Richtungssequenzen (Dziennus et al., 2016)

In einer Nutzerstudie wurden Fahrerassistenzfunktionen aus dem Bereich der Längs- als auch der Querführung auf dem Ambient Light Display dargestellt. Dabei wurde nach warnenden und empfehlenden Effekten unterschieden: Warnungen, wie beispielsweise eine Gefährdung bei Verlassung der Fahrspur, wurden mit roten LEDs an der betreffenden Seite des Fahrzeugs dargestellt. Für Empfehlungen, wie der Wechsel der Spur, weil der linke Fahrstreifen frei ist, wurde Grün verwendet. Die statische rote Anzeige veränderte sich mit zunehmender Dringlichkeit der Situation zunächst in ein rotes Pulsen und die kritischste Stufe

wurde durch rotes Blinken visualisiert. Für die grüne Anzeige existierte nur eine weitere Steigerungsform, nämlich grünes Blinken.

Die Probanden durchliefen im Fahrsimulator verschiedene Situationen, welche Längs- und Querführungsanpassungen benötigten, die durch äußere Umstände wie Geschwindigkeitsaufhebungen oder blockierte Fahrspuren bedingt waren. Der Stichprobe wurde in den Situationen entsprechend unterstützende Lichteffekte angezeigt, während die Kontrollgruppe keine weiteren Hinweise erhielt. Neben der richtigen Reaktion der Probanden in den einzelnen Fahrsituationen wurde darüber hinaus nach jeder Situation und nach Abschluss der Studie ein Fragebogen zur Bewertung der Verständlichkeit, des Sinns und der Benutzerfreundlichkeit des Systems ausgefüllt.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Anzeigen des warnenden Lichteffekts eine signifikante Verbesserung der Fahrerreaktion bei der Querführung im Vergleich zu der Kontrollgruppe erzeugt hat: Mehr als 84% der Probanden, die Warnlichteffekt erfahren haben, haben den Spurwechsel abgebrochen und eine Kollision mit einem herannahenden Fahrzeug vermieden. In der Kontrollgruppe haben weniger als die Hälfte die Situation richtig erkannt. Für die Längsführung betreffenden Situationen und für alle Empfehlungen gab es keine signifikanten Ergebnisse. Hier wird vermutet, dass die Fahrsituation an sich bereits verständlich genug war, und daher kein möglicher Mehrwert der Lichteffekte erhoben werden konnte. Das Studiendesign hätte an dieser Stelle für aussagekräftige Ergebnisse optimiert werden müssen.

Die erhobenen Daten des Fragebogens zeigen, dass die Teilnehmer deutlich zwischen den Warnungen und den Empfehlungen unterschieden. Jedoch liegt eine spannende Auffälligkeit vor: Die Nutzer differenzierten bei der Bewertung der warnenden und empfehlenden Effekte im semantischen Differenzial nicht zwischen den Eigenschaften *activating* und *preventing*. Die Autoren kommen daher zu dem Schluss, dass ein Lichteffekt vom Nutzer stets als Aufforderung wahrgenommen wird, etwas zu tun, und nicht als Signal, mit einer Tätigkeit aufzuhören. Dies würde bezogen auf eine beispielhafte Fahrsituationen in der Längsführung

bedeuten, dass ein Nutzer einen Lichteffekt stets als Aufforderung zum Bremsen interpretieren würde und nicht als Unterlassung einer Beschleunigung.

Eine sehr grundlegende Untersuchung zur Verwendung von Licht als Kommunikationsmöglichkeit bietet die Arbeit von Utesch (2014). Die Doktorarbeit mit dem Titel „Unscharfe Warnungen im Kraftfahrzeug“ entstand in Kooperation mit der *Volkswagen AG* und befasst sich mit den Möglichkeiten einer LED-Anzeige in der Scheibenwurzel, wie sie in Abbildung 17 dargestellt ist. Während die zuvor aufgeführten Autoren in ihren Arbeiten davon ausgehen, dass sich LED-Streifen grundlegend für die Anzeige von FAS eignen, konzentriert sich Utesch in seiner Forschung auf genau diese Fragestellung: in sieben Hauptfragen untersucht er die Legitimation der unscharfen Warnung (seine Bezeichnung für die Verwendung eines LED-Streifens) als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme.



Abbildung 17: Darstellung der als „unscharfe Warnung“ bezeichneten LED-Anzeige in der Scheibenwurzel (Utesch, 2014, S. 17)

Zu Beginn seiner Forschung beschäftigt sich Utesch mit Fragen zur generellen Wahrnehmung der Anzeige. So bestätigt er zunächst, dass die Verortung peripherer Lichtsignale unter der Frontscheibe geeignet ist und eine periphere Wahrnehmung ermöglicht, wodurch es zu einer geringeren Blickabwendung von der Straße kommt als bei herkömmlichen Kombianzeigen. Zudem zeigen seine ersten Ergebnisse, dass die generische Anzeige auch ohne konkrete Inhalte, wie sie durch Symbolik oder Schrift transportiert werden können, in Use Cases intuitiv verstanden wurde. In einer weiteren Gegenüberstellung der beiden Anzeigeorte LED-Streifen und Kombidisplays lautet die Hypothese, dass auf eine unscharfe

Warnung schneller reagiert wird als auf eine symbolhafte Warnung im Kombi-display. Für die Studie gestaltete er drei verschiedene unscharfe Warnungen (*rote LED-Anzeige groß, rote LED-Anzeige klein, rote Anzeige im Kombi*), welche jeweils mit und ohne Ton einer Kombiwarnung mit Ton gegenübergestellt werden. Utesch zeigt, dass die unscharfe Warnung bei gleicher Voraussetzung (=mit Ton) der Anzeige im Kombi überlegen ist und die Reaktion schneller erfolgt. Selbst in der schlechteren Bedingung ohne Ton konnte im Durchschnitt ein ähnlich gutes Ergebnis wie bei der bimodalen Kombiwarnung erzielt werden. Allerdings äußert sich Utesch kritisch über seine Studienergebnis: „Eine abschließende Aussage kann (...) aufgrund der Konfundierung der verschiedenen Faktoren in dieser Studie nicht getroffen werden. Es wäre interessant, in zukünftigen Untersuchungen genau zu klären, welche Faktoren hier wirken und wie stark ihr jeweiliger Einfluss ist.“ Die anschließende Studie zur Beantwortung seiner Frage, ob beispielsweise ein Faktor wie „Richtung“ Einfluss auf die Wirkung des Lichteffekts hat, liefert kein eindeutiges Ergebnis, was allerdings durch den Aufbau des Studiendesigns begründet wurde und nicht durch den Faktor selbst. In der gleichen Studie wurde eine weitere Fragestellung untersucht: Kann die unscharfe Warnung zusätzlich zur Anzeige einer Information genutzt werden? Um dies zu beantworten, wurde den Probanden, nachdem sie die Warnung erlebt hatten, eine Nebelinformation angezeigt. Diese unterschied sich einmal deutlich in Farbe, Blinkfrequenz und Größe von der Warnung, für die andere Hälfte der Stichprobe wurde lediglich die Farbe (Gelb statt Rot) verändert. Die zweite, nur leicht veränderte Kondition zeigte in der Auswertung auf, dass ein ähnlicher Lichteffekt bei unterschiedlichen Situationen zum gleichen, initial erlernten Verhalten führt. Im Falle der Studie wurde mit Erscheinen der Nebelinformation eine starke Bremsreaktion ausgelöst, wie diese zuvor bereits nach Anzeige der Warnung nötig war. Inwiefern die einzelnen, variierten Merkmale der Lichteffekte für das ausgelöste Verhalten verantwortlich waren, wurde nicht konsequent untersucht. In der Beantwortung seiner letzten Frage - Was warnt besser, ein weicher oder ein harter Warnübergang? – manipuliert Utesch erneut einzelne Aspekte des Lichteffekts und stellt zum einen ein softes Aufstarten der LED-Leiste

einem abrupten Aufleuchten gegenüber, zum anderen untersucht er zwei verschiedene Animationsrichtungen. Als Ergebnis hält er fest, dass ein weicher Übergang zwischen einer Vor- und einer Hauptwarnung den Fahrer auf eine notwendige Bremsreaktion vorbereiten kann, während das abrupte Anzeigen des Effekts zu einer im Vergleich langsameren Reaktion geführt. Ein überraschend negatives Bremsergebnis wurde durch das Anzeigen des Lichteffekts in der Animationsrichtung von der Gefahr zum Fahrer erzielt, während im Allgemeinen keine gezielte Blickausrichtung erreicht wurde. Über alle gesammelten Erkenntnisse hinweg kommt Utesch zu dem fundierten Schluss, dass sich die unscharfe Warnung als Anzeige eine für verschiedene Fahrerassistenzfunktionen eignet.

Die bisherigen Beispiele beschreiben Projekte aus der Forschung, jedoch sollen zum Ende dieses Kapitels zwei Funktionen aus der industriellen Serienproduktion die fortschreitende Realisierung der Nutzung von LED-Anzeige zur Kommunikation von Inhalten verdeutlichen:

Seit 2015 ist in einem Serienfahrzeug von *Audi* die sogenannte Ausstiegswarnung zu erleben (Audi AG, 2015a, 2015b). Öffnet ein Insasse in einer Gefahrensituation die Tür seines Audis von innen, so wird er durch ein rotes Pulsen einer in der Tür verbauten LED-Beleuchtung vor dem Aussteigen und der drohenden Kollision gewarnt.

Neben einer ähnlichen Warnung findet sich bei BMW zusätzlich eine Visualisierung einer Telekommunikations-Funktion: In Fahrzeugen der Generation 2018 wird ein eingehender Anruf ergänzend zum Klingelton durch eine Animation der Lichtelemente in der Instrumententafel visualisiert.

6.3 Bewertung der bisherigen Forschung

Die hier vorgestellten Projekte stellen einen Auszug der bereits durchgeführten Forschung zum Einsatz von Lichteffekten zur Kommunikation verschiedener Inhalte dar. Der Großteil der Arbeiten gestaltete für konkrete Situationen unter-

schiedliche Lichteffekte, und verglich deren Wirksamkeit hinsichtlich festgelegter Parameter miteinander, um so einen bestgeeigneten Effekt zu identifizieren. Meistens entstammten die Situationen dem Bereich der Fahrerassistenzfunktionen, weswegen sich die Messungen der Wirkungen häufig auf sicherheitsrelevante Aspekte wie *time to collision*, richtig ausgeführte Fahrmanöver etc. beziehen. Zwar lässt sich mit dieser Vorgehensweise das Einflussvermögen ganzer Lichteffekte erheben, aber die Ursache des Einflusses kann dabei nicht auf die einzelnen Faktoren des Lichteffekts zurückgeführt werden. Dies wird auch bei den umfangreichen Untersuchungen von Utesch deutlich, dessen Studiendesigns keine eindeutigen Rückschlüsse auf den Auslöser einer Reaktion ermöglichen. In Summe betrachten die koexistierenden Arbeiten verschiedene Möglichkeiten zum Einsatz von Lichteffekten, jedoch ist zum jetzigen Stand unklar, ob sie ihre einzelne Wirkung behalten würden, wenn der Kunde alle Lichteffekte zusammen während einer Fahrt erlebt. Hierfür fehlt eine vorausschauende, gemeinsame Betrachtung verschiedener Situationen, in welche auch Fahrerassistenz-fremde Use Cases wie beispielsweise aus dem Bereich des Infotainments eingeschlossen werden müssen. Zudem darf man nicht vergessen, dass sich der heutige Schwerpunkt von farbigem Licht in Fahrzeuginnenräumen auf die Erzeugung eines nach subjektivem Belieben konfigurierbaren Lichtambientes fokussiert. Sobald man sich also von der Nutzung von Lichteffekten für eine erhöhte Sicherheit entfernt, werden weitere Bewertungsmerkmale, wie z.B. Gefälligkeit, interessant. Bei keiner der genannten Forschungen lässt sich jedoch eine Untersuchung finden, die Lichteffekte unter verschiedenen objektiven und subjektiven Messgrößen gemeinsam betrachtet. Diese Lücke muss für den erfolgreichen Einsatz von Lichteffekten für verschiedene Anwendungszwecke geschlossen werden.

In Summe betrachten die genannten Arbeiten zwar einzelne, interessante Aspekte, aber eine Ergänzung dieser um eigene Erkenntnisse ist bei der Erforschung von visueller Wahrnehmung generell schwierig. Das komplexe Themenfeld wird von vielen Faktoren beeinflusst, was eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen schwierig macht. Außerdem sind häufig nicht alle Bedingungen eines Versuchs angegeben, so dass eine Nachstellung von Konditionen, wie z.B. Raumhelligkeit,

nicht möglich ist, aber Abweichungen einen großen Einfluss auf die Ergebnisse nehmen können.

Deswegen sind insgesamt für die Beantwortung der für diese Doktorarbeit aufgeworfenen Forschungsfragen umfassende eigene Untersuchungen notwendig. Die Wirkungsweise von Lichteffekten wird dafür aus verschiedenen Perspektiven betrachtet. Weshalb dabei allerdings kann nur ein Teilaspekt der möglichen visuellen Einflussnahme untersucht werden, wird im Folgenden erklärt.

6.4 Möglichkeiten der visuellen Einflussnahme

Bei den zusammengefassten Forschungsarbeiten galt bei der Gestaltung der Effekte die Prämisse, dass diese im Rahmen der Studien von den Probanden gesehen wurden. Wäre ein Lichteffekt nicht sichtbar gewesen, hätte seine Wirksamkeit nicht beurteilt werden können. All diesen Untersuchungen liegt dementsprechend zu Grunde, dass die Lichteffekte eine Untergrenze der Wahrnehmbarkeit erfüllt haben.

Vorherige Untersuchungen (z.B. von Theeuwes, 1992 bzw. siehe auch Kapitel 2.1.8) haben zudem ergeben, dass Lichteffekte unterschiedlich auffällig gestaltet werden können, und dass die Zunahme der Auffälligkeit einen erhöhten visuellen Einfluss auf einen Probanden mit sich bringt (z.B. Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit der Erkennung).

In Abbildung 18 ist die visuelle Beeinflussung eines Lichteffekts im Zusammenhang mit der bereits angesprochenen Untergrenze (Schwelle der Erkennbarkeit) als auch einer weiteren Grenze, der Schwelle zur Störung, dargestellt. Ab der oberen Grenze wird davon ausgegangen, dass eine zu starke visuelle Beeinflussung durch den Lichteffekt vorliegt, so dass negative Auswirkungen (z.B. kritische Verschlechterung der Fahraufgabe) nachgewiesen werden können.

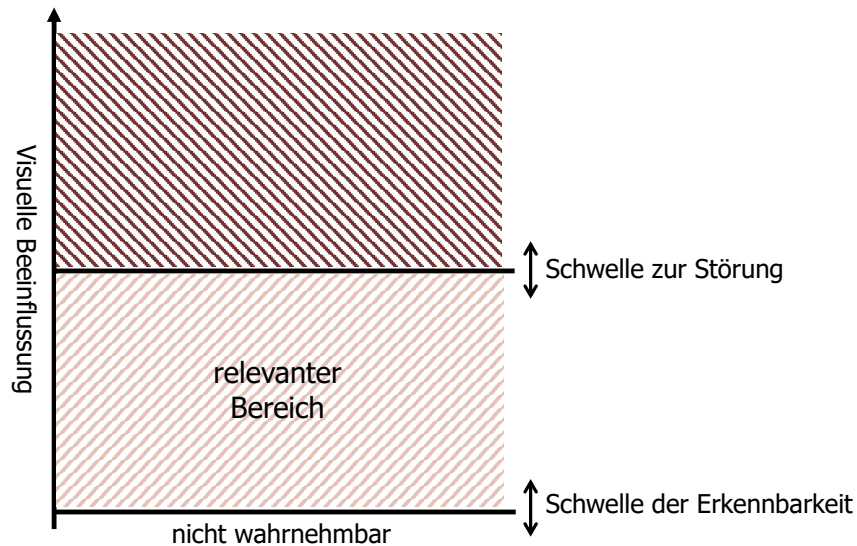


Abbildung 18: schematische Darstellung der möglichen Wirkung von Lichteffekten

Diese beiden Schwellen spannen einen Raum auf, in welchen die Anzeige eines Lichteffekts sinnvoll erscheint – sichtbar, aber nicht störend. Allerdings lassen sich diese Grenzen nicht mit absoluten Werten definieren. Wie gut ein Lichteffekt erkannt wird oder ab wann er stört, hängt von der jeweilig vorherrschenden Situation ab, in welcher er angezeigt wird. Ein Faktor dabei ist beispielsweise die Umgebungshelligkeit in Abhängigkeit zur Intensität des Lichteffekts (Blankenbach, Hertlein, & Hoffmann, 2020). Die Wahrnehmbarkeit eines Lichteffekts von gleichbleibender Lichtstärke nimmt bei zunehmender Umgebungshelligkeit ab und ab einer Grenze X ist der Lichteffekt nicht mehr erkennbar. Ein anderer einflussnehmender Faktor ist die mentale und kognitive Beanspruchung des Wahrnehmenden. Beispielsweise kann es bei starker Fokussierung auf eine Aufgabe zu einer reduzierten Wahrnehmung der peripheren Umgebung kommen (Crundall et al., 2002; umgangssprachlich als „Tunnelblick“ bezeichnet), weswegen ein Lichteffekt, welcher üblicherweise deutlich wahrgenommen wird, in den Hintergrund treten kann. Gerade im Kontext des autonomen Fahrens, bei welchem ab Level 4 dem Nutzer die Freiheit zusteht, sich visuell und kognitiv mit Nebenaufgaben zu beschäftigen, können Lichteffekte anders wahrgenommen werden, als wenn sie als Unterstützung bei der manuellen Fahraufgabe im Sichtfeld des Fahrers angezeigt werden (van Veen, Karjanto, & Terken, 2017).

Es erscheint nicht möglich, alle Konditionen, in welchen Lichteffekte angezeigt werden können, vorherzusagen und daraus abgeleitete, fixe Definition der Schwellen visueller Beeinflussung festzulegen. Daher soll in dieser Forschungsarbeit der Schwerpunkt daraufgelegt werden, die Möglichkeiten, welche den Lichteffekten selbst zur visuellen Beeinflussung zur Verfügung stehen, zu untersuchen. Welche Eigenschaften eines Lichteffekts sind in der subjektiven Wahrnehmung eines Nutzers relevant? Welchen Einfluss können sie nehmen? Welche sorgen für mehr Aufmerksamkeit als andere?

Wenn die Einflussnahme einzelner Merkmale von Lichteffekten bekannt ist, können diese gezielt manipuliert werden, um in Abhängigkeit der Situation die gewünschte Wirkung eines Lichteffekts zu erzielen. So könnte beispielsweise darauf Rücksicht genommen werden, dass Lichteffekte, welche einen hohen Grad an Auffälligkeit besitzen und in einer „ruhigen“ Umgebung oberhalb der Grenze zur Störung liegen, in einer anspruchsvollen Situation die richtige Wirksamkeit besitzen würden. Hingegen können Lichteffekte, welche in solchen Situationen nicht einmal erkannt werden würden, an anderer Stelle einen deutlichen visuellen Einfluss nehmen.

Um diese bewusste Gestaltung zu ermöglichen, gilt es eine möglichst unabhängige Untersuchung der Wirkungsweise der Lichteffekte anzustreben, welche sich auf viele verschiedene Anwendungen übertragen lässt.

TEIL III

Untersuchungen der Kommunikationseigen-
schaften von Lichteffekten im Fahrzeuginnen-
raum

7 Zusammenspiel der Untersuchungen

Die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit werden in vier, aufeinander aufbauenden Untersuchungen erhoben. Jedes der vier nachfolgenden Kapitel beschreibt eine Untersuchung in folgender Weise: Zunächst wird die Motivation für den Schritt sowie dessen Zielstellung erläutert. Nach der Erklärung der notwendigen Methodik zur Erreichung des Ziels, wird die Vorbereitung sowie Durchführung der Erarbeitung der Ergebnisse besprochen. Es folgen Erläuterungen zur methodischen Auswertung, die ausführliche Darstellung der Ergebnisse sowie ein zusammenfassendes Fazit.

Die ersten beiden Kapitel widmen sich der Erarbeitung von qualitativen Erkenntnissen zur Annäherung der Thematik. Zu Beginn wird ein Cardsorting durchgeführt, um die Anwendungsgebiete von Lichteffekten in eine aus Nutzersicht logische Gruppierung zu unterteilen (siehe Kapitel 8). Aus dem Ergebnis, der Kategorisierung potenzieller Use Cases, dienen im zweiten Schritt zwölf ausgewählte Anwendungssituationen als Grundlage für die Experteninterviews (Kapitel 9). In Gesprächen verbalisieren Spezialisten vielfältige Ideen für Lichteffekte. Aus der Wiederkehr einzelner Merkmale werden Bausteine abgeleitet, welche für die Gestaltung von Inhalten relevant sind und diese als Sprache von Lichteffekten manifestiert.

Eine Auswahl dieser Bausteine dient als Untersuchungsgegenstand in der anschließenden Probandenstudie (Kapitel 10). In einem Studiendesign mit mehreren abhängigen Variablen werden Ergebnisse zu 90 individuellen Lichteffekten erhoben. Die quantitativen Ergebnisse zur Reaktionszeit, der visuellen Beeinflussung, der Zuordnung zu Kategorien sowie eine subjektive Bewertung auf einer Rating-Skala, werden auf individueller Effektebene untersucht sowie auf Basis der zugrundeliegenden Bausteine. Aus der Kombination der Ergebnisse können geeignete Lichteffekte für vorgegebene Situationen ausgewählt werden. Die Anwendbarkeit der Ergebnisse wird in einer abschließenden summativen Studie validiert (Kapitel 0). Die Wirkung der erarbeiteten Lichteffekte werden quantitativ

betrachtet und dem Wirkungsgrad von Audioeffekten bzw. der Kombination mit diesen gegenübergestellt.

Wie bereits in Kapitel 5.3 aufgezeigt wurde, ist das Empfinden von Farben kulturabhängig. Daher sei für die Untersuchungen vorab eine Fokussierung auf den europäischen Kulturraum festgelegt. Dies spiegelt sich in der Rekrutierung der Stichproben für die Probandenstudien wider. Es wird kein Anspruch auf globale Gültigkeit der Ergebnisse erhoben.

8 Erarbeitung von funktionellen Anwendungsgebieten mit Hilfe der Methode Cardsorting

Für die Erarbeitung der ersten grundlegenden Erkenntnisse über das Verhältnis von Nutzern zu möglichen Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum, wurde eine nutzerzentrierte Methode gewählt, die im Folgenden vorgestellt wird.

8.1 Motivation & Ziel

Durch die Möglichkeiten, die dynamisches Licht bietet, lässt sich rein gestalterische eine unbegrenzte Anzahl an Lichteffekten schaffen. Damit einhergehend könnte theoretisch auch eine unbegrenzte Anzahl an Use Cases und Situationen mit Lichteffekten angereichert werden, welche alle unterschiedlich gestaltet und damit theoretisch unterscheidbar wären. Allerdings lässt sich schnell absehen, dass es einem Nutzer nicht möglich wäre, eine unbegrenzte Vielzahl an Lichteffekten voneinander unterscheiden, noch sich diese zu merken oder inhaltlich zu interpretieren. Für das angestrebte Endergebnis des Gestaltungskatalogs eignet sich dementsprechend kein Konzept zur Kennzeichnung und Unterscheidung einzelner Use Cases, stattdessen muss eine logische, für den Nutzer erlernbare Struktur geschaffen werden.

Aus dieser Überlegung heraus entstand der Ansatz, Kategorien zu finden, in welche sich Use Cases einteilen lassen und diese sozusagen als zwischengeschaltete, erlernbare Ebene über die Use Cases zu legen. Innerhalb einer Kategorie wären dementsprechend Use Cases mit ähnlichen Merkmalen und die Zugehörigkeit zu einer Kategorie kann über ein entsprechendes Lichtdesign zur Kennzeichnung der Kategorie kommuniziert werden.

Es wurden mehrere Möglichkeiten durchdacht Use Cases zu Kategorien zu kombinieren. Zum einen gibt es bereits im Unternehmen aus Markt- und Produktperspektive ausgerufene Kategorien: Erlebnis, Gestaltung, Sicherheit.

Zum anderen lassen die Use Cases nach objektiven und Aspekten einteilen: Werden mit den Lichteffekten auf Textanzeigen in den Displays hingewiesen? Kommt ein Lichteffekt immer als Konsequenz einer Bedienhandlung durch den Fahrer? Hängen mehrere Effekte direkt mit einer Verbesserung der eigentlichen Fahraufgabe zusammen?

Darüber hinaus wurde eine Einteilung aus Nutzerperspektive in Erwägung gezogen. Hierbei wurde davon ausgegangen, dass es für den Nutzer eine logische Gruppierung von Use Cases gibt, welche zwar auf Basis zuvor beschriebenen objektiven Aspekten bestehen, allerdings auch von anderen Kriterien abhängig sein kann.

Da als Ergebnis der Forschungsarbeit die Gestaltung einer für den Nutzer verständlichen Mensch-Maschinen-Schnittstelle angestrebt wird, wurde entschieden, die Kategorien zur Einteilung der Use Cases auf Basis von Nutzermeinungen zu generieren. Nach Erstellung der Kategorien aus Nutzerperspektive wird jedoch ein Abgleich mit objektiven Einteilungskriterien durchgeführt, um zu verstehen, wieso die Use Cases von den Probanden so sortiert wurden. Wird die Vorgehensweise nachvollziehbar offengelegt, können auch künftig ausgearbeitete Use Cases richtig den Kategorien zugeordnet werden.

Zusammengefasst ist das Ziel der Studie, die Generierung von Kategorien aus Nutzerperspektive für die Einteilung von Use Cases sowie deren Zuordnung. Dem zugrunde liegt die Hypothese, dass aus Perspektive der Nutzer Kategorien existieren, in welche sich die Use Cases für die Anzeige von Lichteffekten einteilen lassen.

8.2 Methodik

Um diese Hypothese zu überprüfen und entsprechende Kategorien auf Basis von Nutzermeinungen zu erstellen, wurde die aus dem Usability Engineering bekannte Methode „Cardsorting“ ausgewählt.

Cardsorting wird normalerweise für die Erstellung nutzerfreundlicher Menüstrukturen für Webseiten verwendet (Tullis & Albert, 2011, S. 217). Dafür sortieren Nutzer alle Inhalte und Unterseiten einer Webseite, wie sie aus ihrer Perspektive zusammengehören. Die zusammengefassten Inhalte werden von den Nutzern mit einem verständlichen Obergriff versehen. Die Oberbegriffe der Kategorien bilden die oberste Menüstruktur und welche sich hierarchisch die Subseiten und Subinhalte nach Einteilung der Nutzer finden lassen. Auf diese Art und Weise wird eine für die Nutzer logische Menüstruktur erarbeitet. Dementsprechend wird davon ausgegangen, dass ein Nutzer auf der fertigen Webseite Inhalte leichter und schneller findet, da sie an der Stelle stehen, wo er sie erwartet hätte.

Das Vorhaben zur Erstellung einer logischen Menüstruktur lässt sich mit dem Anwendungsfall der vorliegenden Arbeit vergleichen, bei welcher aus den Use Cases Kategorien – vergleichbar mit der ersten Menüebene - gebildet werden, innerhalb welcher die einzelnen Use Cases – Subseiten - anschließend zu finden sind.

Wie der Name erschließen lässt, arbeitet die Methode Cardsorting mit Karten, auf welchen die Inhalte beschrieben sind, die sortiert und gruppiert werden sollen. Die Karten können in physischer Form vorliegen (Papierkärtchen) oder digital innerhalb einer Software abgebildet werden, wie es beispielsweise Optimal Workshop (Optimal Workshop (o.D.)) anbietet. Allerdings kommen (Schüßler, Mandl, & Womser-Hacker, 2010) zum Entschluss, dass bisher noch „kein virtuelles System mit seinem Funktionsumfang an die Vielseitigkeit der manuellen Methode“ heranreicht. Da für die Studie die Probanden physisch verfügbar waren, wurde entschieden, ein manuelles Cardsorting durchzuführen.

Grundsätzlich werden bei der Methode zwei verschiedene Ansätze unterschieden (Spencer, 2009; Tullis & Albert, 2011, S. 217):

Freies Cardsorting: Dem Nutzer werden die Karten zum freien Sortieren übergeben, ohne dass Kategorien vorgegeben werden.

Geschlossenes Cardsorting: Es gibt vorgegebene Kategorien, denen der Nutzer die Karten zuordnen muss.

Bei beiden Varianten muss vor der Durchführung die Entscheidung getroffen werden, ob der Nutzer die Karten nur in eine Hierarchie-Ebene einsortieren darf oder ob er auch Untergruppen definieren kann. Da die Studie das Ziel verfolgt, Kategorien zu erarbeiten, wurde das explorative Vorgehen mit einem freien Cardsorting und einer Hierarchie-Ebene gewählt.

8.3 Vorbereitung

Für die Vorbereitung des Cardsortings wurden das in (Moser, 2012, S. 114) vorgeschlagene Vorgehen bei der Wahl der Begriffe berücksichtigt. Es wurden 30 Use Cases ausgewählt, welche eine breite Bandbreite an Möglichkeiten aufzeigten und deren Ideen in naher Zukunft realisierbar schienen. Die Anzahl der zu sortierenden Karten liegt somit in der von Moser als geeignet beschriebene Anzahl von 20-50 Karten. Die Use Cases wurden auf Papierkarten für den Test vorbereitet. Es wurde darauf geachtet, dass auf jeder Karte ein prägnanter und verständlicher Titel stand. Zusätzlich wurde ein kurzer Beschreibungstext sowie ein Bild hinzugefügt, welche einen besseren Eindruck des Use Cases bzw. der Situation, in welcher dieser auftritt, vermitteln sollte und für alle Use Cases eine ähnliche Beschreibungstiefe aufwies (vgl. Abbildung 19, vollständige Auflistung aller Karten im Anhang 1). Zusätzlich wurden Karten zur Beschriftung der gruppierten Fahrzeugfunktionen vorbereitet.



Abbildung 19: Beispielkarte aus dem Cardsorting

8.4 Durchführung

Nach (Tullis & Wood, 2004) sind 20-30 Probanden eine gute Anzahl um verlässliche Ergebnisse im Rahmen eines Cardsortings zu sammeln. Stichproben, die größer sind, würden sich im Verhältnis Aufwand und Nutzen nicht mehr lohnen. Das Cardsorting für diese Studie wurde mit 36 Probanden (davon 11 weiblich) durchgeführt. Das Alter wurde lediglich in Schritten von 10 Jahren abgefragt, die Aufteilung sowie die Erfahrungen der einzelnen Altersgruppen mit dem Konzept dynamischen Innenlicht auf einer Skala von 0-4 wird in Abbildung 20 dargestellt. Der Gesamtdurchschnitt der Erfahrung lag bei 1,95. Insgesamt nahmen 33 Personen mit deutscher, zwei mit chinesischer, eine mit amerikanischer und eine Person mit russischer Staatsangehörigkeit teil.

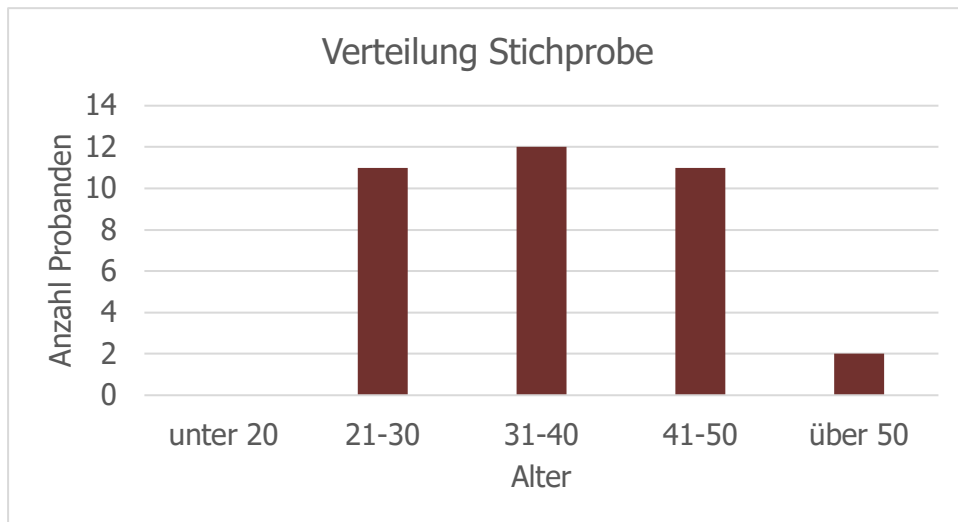


Abbildung 20: Altersverteilung der 36 Probanden

Zu Beginn des Tests wurde die Rahmenbedingungen erläutert und betont, dass es in dem Test um das Finden von Kategorien aus Nutzerperspektive geht und es daher keine falsche Einteilung gibt. Die Nutzer wurden aufgefordert, mindestens zwei Karten zu einer Gruppe zusammenzulegen und keine Untergruppen zu bilden. Eine (Maximal-) Anzahl an Gruppen wurde nicht vorgegeben.

Die Probanden durften selbst auswählen, ob sie zunächst alle Karten in Gruppen legen wollten und diese anschließend erst Benennen oder ob mit der Vergabe der Kategoriennamen bereits während des Sortierens begonnen wird. Abbildung 21 zeigt Bilder vom Sortiervorgang und vom Ergebnis eines fertig durchgeführten Cardsortings.



Abbildung 21: Durchführung des Cardsortings (links) und Dokumentation einer fertigen Sortierung inkl. Benennung der Kategorien (rechts)

Die Durchführung des Tests inklusive Vor- und Nachgespräch dauerte in der Regel nicht länger als 30 Minuten. Der Großteil der Tests wurde mit jeweils nur einem Probanden durchgeführt, nur in Ausnahmefällen haben zwei Nutzer gemeinsam die Karten sortiert. In der Praxis finden sich Beispiele, wo die Methodik als Single- oder Paarvariante durchgeführt wurde und es finden sich dabei keine quantitativen Hinweise darauf, ob die Anzahl der gleichzeitig sortierenden Probanden eine Auswirkung auf die Qualität der Ergebnisse hat bzw. welche der beiden Varianten die bessere ist (usability.de, 2016; usability.gov, 2016). In Spencer (2009) werden zwar Vor- und Nachteile von Single- und ganzen Team-Cardsortings diskutiert, jedoch wird auch hier kein klares Fazit gezogen. Es wird betont, dass man zwischen den beiden Varianten wählen kann und diese Entscheidung durchaus von organisatorischen Gründen beeinflusst werden kann. Für dieses Cardsorting bestanden keine Bedenken, zwischen Single- und Paar-Cardsorting zu wechseln, denn letztendlich werden alle Einzelergebnisse gemittelt und der Dialog zwischen zwei Probanden im Paar-Cardsorting stellt hierfür einen ersten Schritt dar. Dennoch wurde angestrebt möglichst viele Single-Cardsortings durchzuführen, um die Anzahl der Einzelergebnisse, die in die Clusteranalyse einfließen zu erhöhen und somit die Datengrundlage für die statistischen Tests zu vergrößern.

8.5 Auswertung – Clusteranalyse

Die gesammelten Ergebnisse des Cardsorting wurden mit einer Clusteranalyse durchgeführt. (Bortz & Schuster, 2010) schreiben über diese Auswertungsmethode: „Auf der Basis von Ähnlichkeiten (oder Distanzen) gruppieren clusteranalytische Verfahren die Objekte so, dass die Unterschiede der Objekte eines Clusters möglichst klein und die Unterschiede zwischen den Clustern möglichst groß sind.“ (S. 458). Die einzelnen Cluster, mit den möglichst ähnlichen Inhalten, bilden die im Rahmen dieser Studie zu entwickelnden Kategorien.

Um eine digitale Auswertung zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse des Cardsortings als binärkodierte Daten in einer Tabelle gespeichert. Auf der y-Achse

wurden die Use Cases aufgeführt, auf der x-Achse alle Kategorien eingetragen, welche im Test von den Probanden aufgeführt wurden. Gleichgenannte Kategorien wurden in einer Spalte zusammengefasst und nicht in mehreren nebeneinander geführt. Für jeden Use Case wurde in der entsprechenden Zelle eingetragen, wie häufig dieser in der Kategorie einsortiert wurde. Es wurde darauf verzichtet, begrifflich ähnliche Kategorien zusammenzufassen, da ein genauere Blick auf die Daten häufig zeigte, dass zwar ähnlich klingende Kategorienbezeichnungen aus Nutzerperspektive nicht dieselben Use Cases beinhalten und damit bei einer Zusammenfassung die Datengrundlage für die Clusteranalyse verfälschen würden (vgl. Auszug in Abbildung 22, vollständige Übersicht im Anhang). Es wurden daher lediglich Plural-Singular Formen zusammengefasst.

Use Cases	Bedienrückmeldung	Aktion-Reaktion	Feedback (Statusinformation)	Interaktion mit dem Fahrzeug	HMI	Bedienung/Anwendung (Interaktion zwischen Mensch & MMI)
Assistent "Blind Spot"						
Aufenthalt						1
Aufmerksamkeitsblitz			1			
Automatisches Einparken		1				
Check Control				1		1
Connectivity		1		1		1
Crash Spotlight						
Diebstahlwarnung			1		1	1
Einsteigen					1	1
Fahrdynamisches Licht				1		
Fahrerlebnis-Schalter		1		1		
Goodbye-Szenario						1
Hochautomatisiertes Fahren (HAF)		1		1		
Incoming Call		1		1		1
Kind schnallt sich ab				1		
Kinofeeling						
Licht Moods						
Motorstart		1		1	1	1
Müdigkeitsassistent						
Navigation						1
Park Distance Control						
Psychologisches Licht						
Seitenlinien Gefühl (Side Distance						
Spurassistent						
Tanken				1	1	1
Taschenlampe			1		1	1
Türverriegelung		1	1	1		1
Umweltadaptives Licht						
Welcome-Szenario						1
Witterungsassistent						

Abbildung 22: Ausschnitt der Auswertung des Cardsortings

Die Daten wurden zunächst mit der hierarchischen Clusteranalyse ausgewertet. Diese fasst -im Gegensatz zu der auch weit verbreiteten K-Means-Clusteranalyse - alle auszuwertenden Objekte paarweise aufgrund von Ähnlichkeiten immer weiter zusammen, „bis schließlich im letzten Schritt alle Objekte in einem Cluster zusammengefasst sind“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 459). Bei der K-Means-Clusteranalyse dagegen, welche zu den partitionierenden Analysen zählt, kann zuvor angegeben werden, wie viele Cluster ausgegeben werden sollen und der Algorithmus berechnet die beste Zuordnung (Backhaus, Erichson, Plinke, & Weiber, 2016, S. 477f). Daher wird sie „häufig zur Verbesserung einer Gruppierung eingesetzt, die mit einer hierarchischen Methode (...) gefunden wurde“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 465). In der vorliegenden Arbeit jedoch soll neben der Zuordnung der Use Cases zu Kategorien auch eine geeignete Anzahl an Kategorien ermittelt werden, daher wurde im ersten Schritt die hierarchische Clusteranalyse verwendet. Eine entsprechende Toolunterstützung bietet hier die Statistik-Software SPSS, welche auf Basis der mit Excel erstellten .csv-Datei eigenständig die Auswertung durchführen kann (Schendera, 2011).

8.6 Ergebnisse

Den einfachsten Zugang zu den Ergebnissen der Clusteranalyse bieten graphische Visualisierungen. Mit Hilfe von zum Beispiel SPSS können die Daten als Eiszapfendiagramm oder Dendrogramm dargestellt werden. Das Dendrogramm zeigt für die vorliegenden Daten das übersichtlichste Ergebnis und wurde daher an dieser Stelle zur Erläuterung ausgewählt. Es fasst, wie in Abbildung 23 ersichtlich, in jedem Schritt zwei Use Cases bzw. Äste zusammen, welche sich am ähnlichsten sind (Tullis & Albert, 2011, S. 220–222) und visualisiert so das rechnerische Verfahren, das der hierarchischen Clusteranalyse zu Grunde liegt. So entsteht eine Baumstruktur, welche von der größtmöglichen Verästelung startet und so lange zusammengefasst wird, bis die letzten zwei Äste aufeinandertreffen. Das Dendrogramm stellt „eines der wichtigsten Hilfsmittel dar, eine geeignet erscheinende Clusterzahl festzulegen“ (Bortz & Schuster, 2010, S. 459), denn anhand der Struktur lässt sich ablesen, ab welchem Punkt eine sinnvolle Zusammenfassung

von sich nahen Use Cases stattgefunden hat. Der horizontale Abstand zwischen den Fusionen der Use Cases beschreibt, wie sinnvoll die nächste Clusterebene ist (Schwarz & Bruderer Enzler, 2018). Anhand der Stelle, an welcher diese Strecke im Dendrogramm am längsten ist (in Abbildung 23 dick markiert), ist abzulesen, wie viele Kategorien laut der Clusteranalyse sinnvoll wären. Im vorliegenden Fall sind dies zwei Cluster.

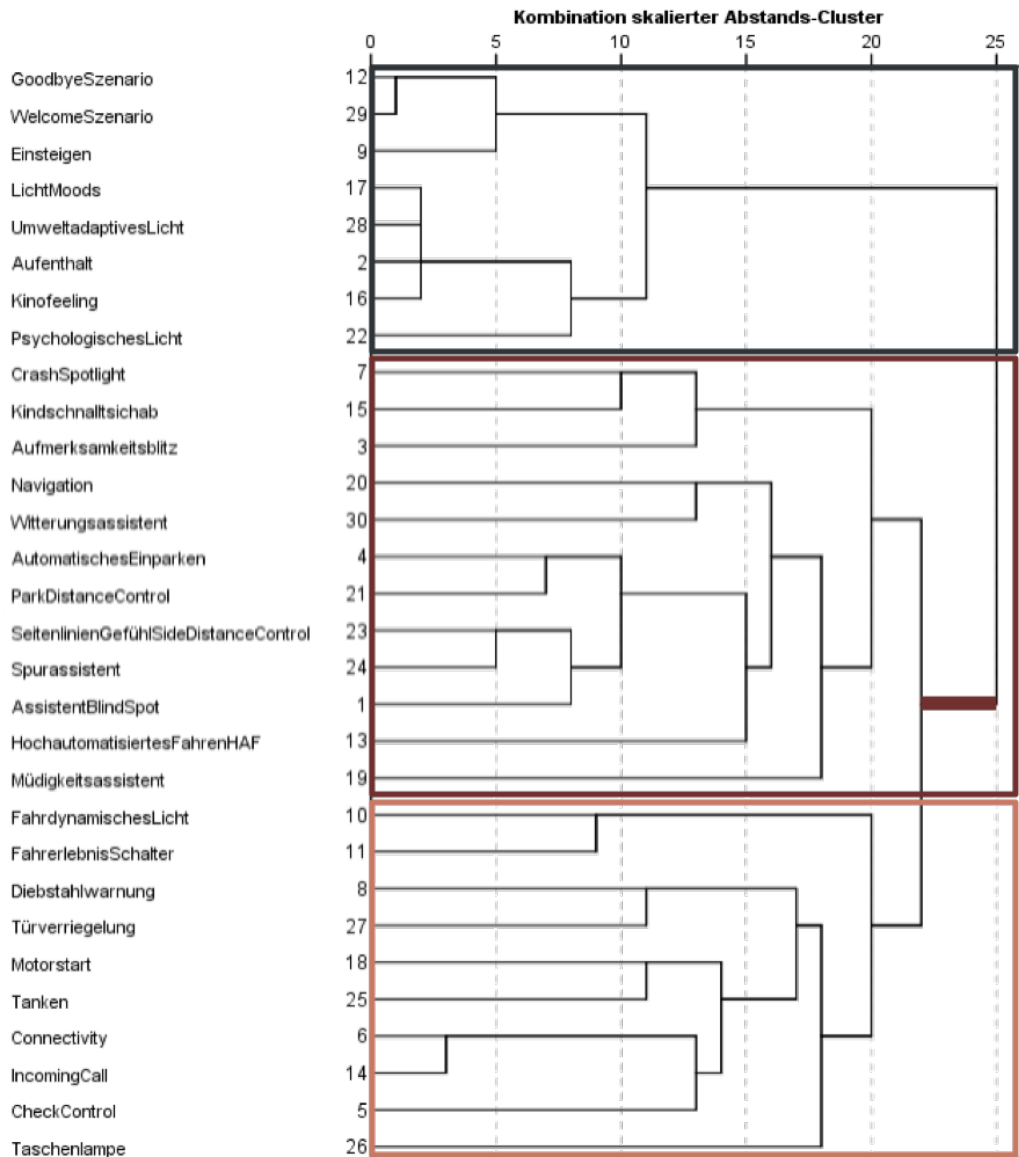


Abbildung 23: Dendrogramm als Ergebnis der hierarchischen Clusteranalyse

Allerdings sind die beiden empfohlenen Cluster sehr ungleich: sie stehen sich in einem Größenverhältnis von 2/3 (linke Seite) zu 1/3 (rechte Seite) gegenüber.

Blickt man tiefer ins Dendrogramm, so sieht man jedoch, dass man bei einer Teilung eine Ebene tiefer in etwas drei gleichgroße Cluster erhalten würde (in Abbildung 23 mit farbigen Rahmen markiert). Die inhaltliche Betrachtung zeigt zusätzlich, dass diese Unterteilung eine sinnbringende dritte Kategorie ergeben könnte.

Da der Entschluss, drei Kategorien statt nur zwei Kategorien gegen die rein mathematische Auswertung des Dendrogramms gefällt wurde, wurde zusätzlich eine K-Means-Clusteranalyse mit drei vorgegebenen Kategorien durchgeführt. Dies sollte den Entschluss statistisch untermauern und eine mögliche rechnerische Abweichung feststellen. In Abbildung 24 sind die drei Kategorien aus der Hierarchen Clusteranalyse und der neuen K-Means-Clusteranalyse zusammengefasst. Die Zuordnung der Funktionen, die in der K-Means-Clusteranalyse im Vergleich zu den hierarchischen Clustern abweichen, wurden farblich markiert.

Welcome Goodbye Einsteigen Licht Moods Umweltadaptives Licht Aufenthalt Kinofeeling Psychologisches Licht	Fahrdynamisches Licht ¹ Fahrerlebnis-Schalter Diebstahlwarnung Türverriegelung Motorstart Tanken Connectivity Incoming Call Check Control Taschenlampe	Crash Spotlight Kind schnallt sich ab ¹ Aufmerksamkeitsblitz Navigation ² Witterungsassistent ² Automatisches Einparken ¹ Park Distance Control Side Distance Control Spurassistent Assistent Blind Spot HAF ² Müdigkeitsassistent
--	--	--

¹ Keine eindeutige Zuordnung

² Unterschiedliche Zuordnung durch zwei Clustermethoden

Abbildung 24: Zuordnungen Use Cases aus hierarchischer und K-Means Clusteranalyse

Der Vergleich der beiden Clusteranalysemethoden zeigt, dass 80% der Funktionen gleich und 20% unterschiedlich zugeordnet wurden. Bei 10% Funktionen zeigte die K-Means-Clusteranalyse keine eindeutige Zuordnung und die Funktionen hätten mit gleicher Berechtigung in die Kategorie jeweils links von der aktuellen Kategorie zugordnet werden können. Dies stellt kein Problem dar, sondern kann so interpretiert werden, dass die Funktionen aus Nutzerperspektive in

zwei Kategorien passen. Die Zuordnung kann also entweder aus der hierarchischen Clusteranalyse übernommen werden, oder durch die Legitimation der Ergebnisse der K-Means-Analyse verschoben werden.

Bei den restlichen 10% der Funktionen zeigten die zwei Analysemethoden deutlich abweichende Ergebnisse. Drei Funktionen wurden in die dritte und die zweite Gruppe eingeteilt, die Analyse der Cardsorting Ergebnisse ergab also kein eindeutiges Resultat. Bei näherer Betrachtung der Use Cases und unter Einbeziehung von mündlichem Feedback der Probanden während der Studie, zeigte sich, dass diese drei Use Cases womöglich in der Beschreibung zu vage waren, um ein eindeutiges Verständnis herbeizuführen. Dies gilt insbesondere für die beiden Use Cases *HAF* (*Hochautomatisiertes Fahren*) und *Navigation*. Letztendlich handelt es sich hierbei nicht um einzelne konkreten Use Cases, sondern um Sammelgriffe für mehrere Funktionen. Deutlich wurde dies in vermehrten Nachfragen, ob es sich bei dem Use Case *Navigation* um beispielsweise einen Abbiegehinweis oder eine Meldung über eine Verzögerung auf der Strecke handelt. Bei der Einsortierung von *HAF* ergab sich darüber hinaus das Problem, dass Erfahrungen fehlten, welche konkrete Situationen im Kontext des Hochautomatisierten Fahrens auftreten können und eine Einordnung des Use Cases damit noch schwieriger wurde. Insgesamt werden diese Gründe für die gescheiterte Kategorisierung der drei Use Cases verantwortlich gemacht.

Im Anschluss an die Kategorienbildung durch die Clusteranalyse wurden geeignete Begriffe für die drei Kategorien ausgewählt. Dabei wurde auf die Benennung der Gruppen im Cardsorting zurückgegriffen, wobei Formulierungen in Form von Sätzen oder Phrasen (z.B. „funktionaler Mehrwert für den Kunden“, „Licht mit sonstigen Funktionen“) als Kategoriennamen ausgeschlossen wurden. In den übrig gebliebenen Begriffen fanden sich unter vielen Synonymen drei Bezeichnungen mit der notwendigen Generik, um sich für die gebildeten Kategorien zu eignen. Die Bezeichnungen für die Kategorien – *Komfort*, *Information* und *Sicherheit* - werden ab nun in dieser Arbeit stellvertretend für die drei finalen Cluster aus Abbildung 25 verwendet.

Komfort	Information	Sicherheit
Welcome	Fahrdynamisches Licht	Crash Spotlight
Goodbye	Fahrerlebnis-Schalter	Kind schnallt sich ab
Einsteigen	Diebstahlwarnung	Aufmerksamkeitsblitz
Licht Moods	Türverriegelung	Automatisches Einparken
Umweltadaptives Licht	Motorstart	Park Distance Control
Aufenthalt	Tanken	Side Distance Control
Kinofeeling	Connectivity	Spurhalteassistent
Psychologisches Licht	Incoming Call	Assistent Blind Spot
	Check Control	Müdigkeitsassistent
	Taschenlampe	

Abbildung 25: Übersicht der drei Kategorien *Komfort*, *Information* und *Sicherheit*

8.7 Fazit

Die Anwendung der Methode Cardsorting führte zu einer erfolgreichen Erarbeitung von drei Kategorien, in welche 90% der Use Cases eingeteilt wurden. Die gescheiterte Einteilung der drei übrigen Use Cases wurde auf die ungenügend ausgearbeitete Beschreibung zurückgeführt und lässt dementsprechend auf keine Schwäche des Einsatzes der Methode schließen.

Es lassen sich bereits in anderen Forschungsarbeiten verschiedene Ansätze zur Einteilung von Lichteffekten finden. So haben beispielsweise Rauschenberg et al. (2015) nach Betrachtung von 33 unterschiedlichen (nicht dem Kontext Automobil entstammenden) Lichtsystemen vier Kategorien aufgestellt und eine Einteilung vorgenommen. Allerdings beschränken sich die Autoren in ihrer Analyse auf Lichteffekte zur Übermittlung von Information und damit einer Untermenge der durch Cardsorting erarbeiteten Kategorisierung, so dass die inhaltliche Einteilung in „Progress“, „Status“, „Spatial“ und „Notification“ zu eng gefasst ist, um alle im automobilen Kontext denkbaren Lichteffekte abzubilden. Für die Erstellung der Kategorien wurde auf die Expertise der Autoren und damit auf einen großen Erfahrungsschatz im Umgang mit Lichteffekten zurückgegriffen. Eine

ähnliche Arbeitsweise lässt sich beispielsweise zwar auch bei Pousman & Stasko (2006) finden, welche „Ambient Information Displays“ nach dem transportierten Inhalt der Systeme kategorisierten, aber bei diesem expertenbasierten Vorgehen ist unabhängig von der Qualität der Kategorien unklar, ob Nutzer eine ähnliche Einteilung vorgenommen hätten. Deswegen wurde für diese Forschungsarbeit Cardsorting als nutzerzentrierte Methode zur Erarbeitung der Kategorien gewählt.

Werden in Zukunft weitere Use Cases erarbeitet, die zum Zeitpunkt der Durchführung des Cardsortings noch nicht vorlagen, so wird empfohlen, diese mit Hilfe einer geschlossenen Sortierung den bestehenden Kategorien zuzuordnen zu lassen. So kann auch künftig eine konsistente Einteilung und Weiterführung der Kategorien gewährleistet werden.

9 Ausarbeitung eines Baukastens für Lichteffekte durch Berücksichtigung von in Interviews gesammelten Assoziationen

Häufig wird in Gesprächen über die Gestaltung von Lichteffekten schnell deutlich, dass Meinungen verankert sind, welche sich auf Erfahrungen mit Licht aus dem Alltag stützen. Besonders interessant daran ist, mit welchen mündlichen Äußerungen das Gesehene beschrieben wird. Folgendes Vorgehen dient zur Berücksichtigung der Vorerfahrung von Nutzern mit Lichteffekten und deren Ausdrucksmöglichkeiten.

9.1 Motivation & Ziel

Ob an Kaffeemaschinen, Parkticketautomaten oder Handtrockner – bei aufmerksamer Beobachtung lassen sich im täglichen Leben viele Lichteffekte finden. Je nach Aussehen dienen sie beispielsweise als Aufforderung oder geben einen Hinweis. Die Ausprägung wird dabei variiert, so dass ein Nutzer in dem Gesehenen Unterschiedliches interpretiert. Ein Beispiel ist in Abbildung 26 zu sehen. Die Bilderfolge zeigt von links nach rechts eine Personenschranke in verschiedenen Zuständen: Wartender Zustand – die Schranke kommuniziert in Weiß, dass sie aktiv ist. Grün signalisiert die Erlaubnis durch die Schranke zu treten, während auf der anderen Seite mit Rot gekennzeichnet ist, dass von dieser Seite aktuell kein Zugang möglich ist. Hat die Person das Gebäude verlassen, wechselt eine Hälfte der Anzeige bereits zurück auf weiß, die zweite Hälfte folgt, sobald die Schranke sich schließt und sich im Ausgangszustand befindet.



Abbildung 26: Personenschranke mit Lichtsignal

Bevor jedoch mögliche Interpretationen eines Effekts im Fahrzeuginnenraum untersucht werden, soll zunächst betrachtet werden, welche Möglichkeiten zur Variation eines Lichteffekts zur Verfügung stehen. Um dies strukturiert aufzuarbeiten, sollen im folgenden Abschnitt mündliche Beschreibungen von Lichteffekten gesammelt und hinsichtlich wiederkehrender Gestaltungsmuster ausgewertet werden. Ziel ist es zu identifizieren, welche Möglichkeiten für die Kommunikation zur Verfügung stehen und darüber hinaus, welche in den Augen eines Nutzers besonders geeignet sind, Inhalt zu transportieren (unabhängig von der Art des Inhalts). Dazu sollen die Äußerungen über Lichteffekte hinsichtlich der Art und Häufigkeit der Nennung von einzelnen Merkmalen ausgewertet werden. Das dadurch entstehende Verständnis über die relevanten Bausteine eines Lichteffekts soll im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit um deren Wirkungsweise ergänzt werden.

Wie bereits in Abschnitt 5.3 erläutert, sind Farben etwas, womit Menschen bestimmte Assoziationen und Erwartungen verbinden. Dementsprechend kann fest davon ausgegangen werden, dass es sich hierbei um einen wichtigen Baustein für die Gestaltung inhaltlicher Aussagekraft handelt. Jedoch stellt sich darüber hinaus die Frage, welche weiteren Eigenschaften von Lichteffekten in den Augen eines Betrachters eine Rolle spielen. Und gibt es Variablen, die einen besonderen Status einnehmen?

Dass Merkmale zur Kommunikation existieren, wurde bereits in der DIN über die „Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle“ dargelegt (DIN EN 60073:2003-05; VDE 0199:2003-05, 2003). Die Norm unterscheidet die in Tabelle 1 festgehaltenen Arten und Merkmale für sogenannte „sichtbare Codes“.

Tabelle 1: Übersicht der Arten und Merkmale für sichtbare Codes (DIN EN 60073:2003-05; VDE 0199:2003-05, 2003)

Art	Merkmale
Farbe	<ul style="list-style-type: none">– Buntton– Sättigung– Helligkeit– Kontrast
Gestalt	<ul style="list-style-type: none">– Figur (alphanummerisch, Piktogramme, graphische Symbole, Linien)– Form (Zeichenansatz, Größe, Linienbreite)– Textur (Linienart, Schattierung, Schraffur)
Position	<ul style="list-style-type: none">– Lage (absolut, relativ)– Orientierung (mit oder ohne Bezugssystem)
Zeit	Zeitliche Veränderung (Blinken): <ul style="list-style-type: none">– der Helligkeit– der Farbe– der Gestalt– der Position

Während es sich bei dieser Beschreibung um eine Zusammenfassung aller „Codierungsgrundsätze für Anzeigengeräte und Bedienteile“ handelt, legt dieser Forschungsabschnitt explizit seinen Schwerpunkt auf die Wahrnehmung von Lichteffekteigenschaften aus Perspektive eines Betrachters und stützt sich dazu auf subjektive Äußerungen. Ein Vergleich der beiden Übersichten findet am Ende des Abschnitts 9 statt.

9.2 Methodik

Zur Generierung der mündlichen Beschreibungen von Lichteffekten wurde auf eine qualitative Methode zurückgegriffen, welche im Bereich der Sozialforschung Anwendung findet. Mit Hilfe eines sogenannten Leitfadeninterviews sollten Probanden in einem Gespräch durch verschiedene Situationen geleitet werden, zu welchen sie sich Lichteffekte erdenken und beschreiben sollten. Dabei ist der Leitfaden als „eine vorab vereinbarte und systematisch angewandte Vorgabe zur Gestaltung des Interviewablaufs“ definiert (Helfferrich, 2019, S. 669). Er wurde für diese Studie zur Einbettung und Organisation der Use Cases genutzt (siehe auch

Kapitel 9.3) und stellte sicher, dass jedes Interview in einer ähnlichen Struktur durchgeführt wurde. Das Einhalten des strengeren Vorgehens im Vergleich zu einem Interview ohne Leitfaden sollte gewährleisten, dass für jeden Interviewten die gleichen Rahmenbedingungen gelten. Zudem diente der Leitfaden als Steuerung, um den Schwerpunkt der Interviews – die Erarbeitung unterschiedlicher mündlicher Beschreibungen von Lichteffekten – sicherzustellen.

Die Dialogsituation, die während eines Interviews vorherrscht, erlaubt es grundsätzlich, dem Interviewten für Rückfragen zur Verfügung zu stehen oder selbst gezielte Nachfragen zu stellen. Hierbei zeigt sich der Mehrwert der Methode im Vergleich zu beispielsweise einer Umfrage mittels eines Fragebogens: Werden Ideen in einem Interview nur stockend berichtet, so kann der Interviewleiter mit offenen Fragen eingreifen und versuchen, die Assoziationen eines Probanden voranzutreiben, bis eine vollständige Idee entwickelt wurde.

Um jedoch bereits vorab sicherzustellen, dass die Teilnehmenden in der Lage sind, verschiedene Ideen zu entwickeln, wurde die Auswahl der Stichprobe durchdacht. Von den Probanden wird im Test verlangt, sich Lichteffekte für spezifische Situationen auszudenken, ohne dass diese zum Zeitpunkt des Tests live visualisiert werden können. Diese Aufgabe könnte nach Einschätzung des Versuchsleiters für Laien auf dem Gebiet der Lichtgestaltung sehr herausfordernd sein. Aufgrund mangelnden Wissens um die Möglichkeiten der Technik würde womöglich nur ein Teilaspekt des Gestaltungsspielraums ausgereizt werden. Um dies zu vermeiden, sollten die befragten Personen Erfahrung im Umgang von Licht im Fahrzeuginnenraum nachweisen können, weshalb die Stichprobe auf eine Expertengruppe nach folgender Definition eingeschränkt wurde:

Als Experte gilt, wer über die technischen Möglichkeiten bei der Nutzung von LED-Streifen informiert ist und in einer mindestens über mindestens sechs Monate anhaltenden Tätigkeit Kenntnisse über die geplante Anwendung von LED-Streifen im Fahrzeuginnenraum erworben hat.

Die allgemeinen Anforderungen an einen Experten werden zum Beispiel von Bogner, Littig & Menz (2002) wie folgt beschrieben: Experten sind Personen, "die sich – ausgehend von spezifischem Praxis- oder Erfahrungswissen, das sich auf

einen klar begrenzbaren Problemkreis bezieht – die Möglichkeit geschaffen haben, mit ihren Deutungen das konkrete Handlungsfeld sinnhaft und handlungsleitend zu strukturieren" (S. 25). Mit der Definition des Experten für Lichteffekte werden diese Anforderungen erfüllt und die Ergebnisse des Interviews können als Basis für die Gestaltung der Lichteffekte für die Grundgesamtheit gelten. Durch die Einschränkung der Stichprobe auf eine Expertengruppe werden die durchgeführten Leitfadeninterviews zu sogenannten Experteninterviews.

Um besonders die Schwierigkeit der Abgrenzung zweier Lichteffekte zu berücksichtigen, wie es beispielsweise bei vorheriger Anzeige einer ambienten Beleuchtung der Fall sein kann, wurde jeder Use Case im Interview in drei Komplexitätsstufen behandelt. In der ersten Stufe wurde der Nutzer gebeten, sich vorzustellen, der Lichteffekt erscheint auf einem zuvor dunklen Lichtband. In der zweiten Stufe sollte der Nutzer sich vorstellen, wie der eben von ihm beschriebene Lichteffekt auf einem bereits farbigem Lichtband angezeigt werden kann und wie dabei der Übergang von der ambienten Beleuchtung in den Effekt aussehen könnte. Bei dieser Überlegungsstufe wurde vorgegeben, dass es sich bei der Basisfarbe um eine andere Farbe als die Effektfarbe handelt. Im letzten Schritt sollte der Nutzer sich vorstellen, dass die zuvor eingestellte Basisfarbe seiner beschriebenen Effektfarbe entspricht. Dieser schwierige Fall schränkt die Unterscheidungsmöglichkeiten des Lichteffekts ein und sollte auf diesem Wege den Probanden zu weiteren Gestaltungsansätzen motivieren.

9.3 Vorbereitung

Vor Durchführung der Studie musste festgelegt werden, welche Use Cases in den Experteninterviews durchgearbeitet werden sollten. Um möglichst vielfältige Beschreibungen zu erhalten, sollten Use Cases verschiedener Kategorien repräsentiert sein. Hierfür schienen besonders die Kategorien Information und Sicherheit geeignet, während die Eignung der Erlebnis-Kategorie angezweifelt wurde. Es wurde befürchtet, dass Beschreibungen von Use Cases wie „Licht Moods“ zu

sehr auf persönlichen Präferenzen basieren und deswegen weniger Gestaltungs-
ausprägungen liefern könnten wie es möglicherweise Use Cases aus den beiden
anderen Kategorien täten. In der Überzeugung, dass die anderen beiden Katego-
rien mit ihrem funktionalen Charakter vielfältigere Beschreibungen lieferten,
wurde daher die Erlebnis-Kategorie für diese Studie außer Acht gelassen.

Wie die Auswertung des Cardsortings zeigte, gab es einige Use Cases, bei denen
sich die Nutzer in der Einteilung der Kategorien schwertaten, was mit der Kom-
plexität einzelner Use Cases erklärt werden konnte. Für die Experteninterviews
sollte verhindert werden, dass unklare Use Cases verwendet werden sowie sol-
che, deren Kategorienzugehörigkeit nicht eindeutig geklärt ist. Daher wurden für
die Studie jeweils die sechs Use Cases aus den Kategorien *Information* und *Sicher-
heit* ausgewählt, die laut der Clusteranalyse am eindeutigsten zugeordnet wur-
den.

Die ausgewählten Use Cases lauten wie folgt:

Kategorie *Information*: Motorstart, Türverriegelung, Connectivity, Incoming
Call, Check Control, Tanken

Kategorie *Sicherheit*: Spurassistent, Rückholaufforderung, Kind schnallt sich ab,
Park Distance Control, Aufmerksamkeitsblitz, Blind Spot-Warnung

Pro Probanden wurden je zwei aus den beiden Kategorien, also insgesamt vier
Use Cases ausgewählt. Durch die Teilnahme von 27 Probanden ergeben sich
dementsprechend insgesamt 108 unterschiedliche Beschreibungen von Lichtef-
fekten als Grundlage für die Auswertung.

Die Reihenfolge der Use Cases wurde vor Beginn der Studie permutiert und alle
Versuchsleitfäden entsprechend vorbereitet (siehe Anhang 2).

9.4 Durchführung

Für die Interviews wurde als Gesprächsumgebung ein BMW der Baureihe G11
(als „7er BMW“ bekannt, Baujahr 2015) mit ambienter Lichtausstattung gewählt.

Diese real erfahrbare Umgebung sollte als Absprungbasis für die Assoziationen dienen und Unterstützung bei der Vorstellung von Licht-Anzeigeorten im Fahrzeug und dem Nachstellen von Fahrerverhalten liefern. Die Ausgangszustände unterschiedlicher Komplexität – ambiente Beleuchtung aus, ambiente Beleuchtung in anderer Farbe als Effektbeleuchtung, ambiente Beleuchtung in gleicher Farbe wie Effektbeleuchtung – wurden live im Fahrzeug von der Versuchsleiterin eingestellt. Für eine bessere Wahrnehmung der Beleuchtung und eine ruhige Versuchsumgebung wurde das Fahrzeug in einer Tiefgarage positioniert und von außen abgedunkelt.

Die Interviews wurden weitestgehend nur mit einer Testperson auf einmal durchgeführt. In zwei Ausnahmefällen befanden sich zwei Probanden gleichzeitig im Fahrzeug und es wurden zwei Interview-Mitschriften parallel angefertigt. Die vorab angefertigten Papierfragebögen erleichterten sowohl das Protokollieren als auch das strukturierte Erfassen der Aussagen. Trotzdem reichte die Zeit in den Interviews meist nicht zur vollständigen Mitschrift des Gesagten aus, daher fand zusätzlich eine Audioaufzeichnung statt. Die Probanden gaben hierzu im Vorfeld ihr Einverständnis. Die Aufnahmen wurden bei der Transkription der handschriftlichen Mitschrift zur Überprüfung und Ergänzung der Notizen genutzt.

Während des Interviews wurde den Teilnehmenden nacheinander mehrere Szenarien vorgestellt, in welche sie sich hineinversetzen sollten. Für den Use Case Connectivity lautete das Szenario beispielsweise:

„Du hast dir für eine lange Dienstreise ein Auto gemietet und möchtest während der Fahrt auf die Freisprechfunktion zugreifen können. Deswegen verbindest du dein Handy vor Fahrtbeginn mit dem Fahrzeug. Das Licht visualisiert den Vorgang. Wie?“

Nach Vorlesen eines Szenarios wurde ihnen die Frage gestellt, wie ein Lichteffekt zur Unterstützung der beschriebenen Situation aussehen könnte und gebeten zu erzählen, was sie vor ihrem inneren Auge sehen. Die Probanden wurden ange-

halten alles zu schildern, was ihnen einfällt, unabhängig von ihrer eigenen Überzeugung der Qualität des Lichteffekts. Es wurde betont, dass jede Form der Beschreibung wichtig ist und es kein Falsch gibt.

9.5 Auswertung

Am Ende dieses Kapitels sollen aus den mündlichen Beschreibungen von Experten Merkmale zur Kennzeichnung von Lichteffekten extrahiert sein. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Interviewprotokolle mit Hilfe einer qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet. Im Gegensatz zu einer Methodik wie der Grounded Theory, bei welcher man mit möglichst offenem Ansatz Strukturen in Daten entdecken möchte, eignet sich die qualitative Inhaltsanalyse dann, wenn zu Beginn der Auswertung bereits ein konkretes Ziel formuliert werden kann (Kühlmeyer, Muckel, & Breuer, 2020). Liegt dieses vor, schafft die Methode laut Gläser und Laudel (2010) „eine von den Ursprungstexten verschiedene Informationsbasis, die nur noch die Informationen enthalten soll, die für die Beantwortung der Forschungsfrage relevant ist“ (S. 200). Die qualitative Datenbasis wird also zu einer handhabbaren und zu gebrauchenden Grundlage für die weitere Analyse reduziert.

Das Phasenmodell von Mayring (2015, S. 21) in Abbildung 27 fasst das Vorgehen der qualitativen Inhaltsanalyse zusammen und zeigt die Nutzung verschiedener Ansätze auf, deren Kombination den Mehrwert für die Auswertung im Rahmen dieser Dissertation lieferten.

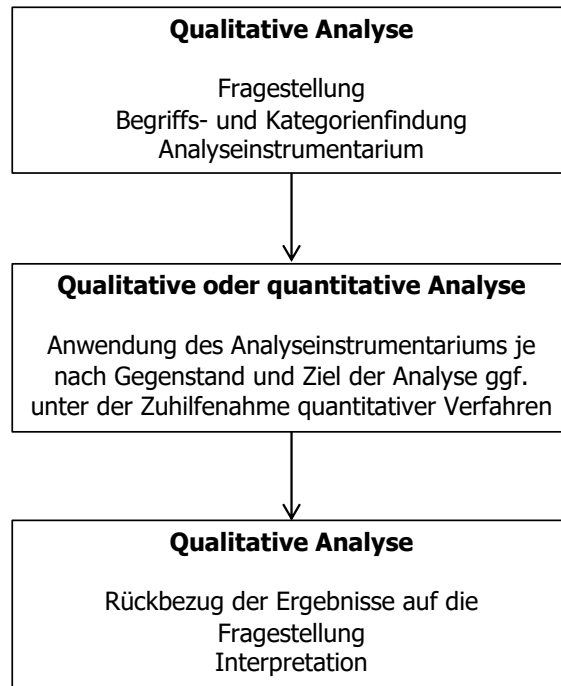


Abbildung 27: Phasenmodell zum Verhältnis qualitativer und quantitativer Analyse (nach Mayring, 2015, S. 21)

Für die Analyse, inwiefern gleiche Gestaltungsmerkmale in den Experteninterviews aufgetreten sind, hätte sich auf den ersten Blick auch eine simple Frequenzanalyse geeignet. Der Fokus wäre stark auf die quantitative Analyse gelegt worden. Allerdings zeigt diese Methodik schnell ihre Grenzen in Bezug auf den hiesigen Anwendungsfall. Zu Beginn der Frequenzanalyse hätte ein starres Kategoriensystem entwickelt werden müssen, welches dann konsequent und unveränderlich auf die Datengrundlage angewendet wird (Mayring, 2015, S. 15). Zu diesem Zeitpunkt war jedoch nicht klar, welche Kategorien es final geben wird. Es wurde zwar bereits überlegt, welche Aspekte des Lichts von vielen Experten beschrieben wurden (z.B. Farbe und Helligkeit, „deduktives“ Vorgehen), dennoch war unbekannt, ob auch Kategorien wie Geschwindigkeit oder Frequenzen, in denen etwas aufleuchtet, aus Nutzerperspektive Relevanz besitzen. Es musste dementsprechend im ausgewählten Vorgehen erlaubt sein, die Kategorien noch während der Anwendung zu verändern und neuen Gegebenheiten anzupassen („induktives Vorgehen“) (Mayring, 2015, S. 85).

Nach Mayring kann man „drei Grundformen des Interpretierens“ unterscheiden: Die *Zusammenfassung*, bei der eine Reduktion der Daten bis hin zu einem übersichtlichen Abstraktionsniveau im Fokus steht; die *Explikation*, die sich auf die Interpretation von einzelnen Aspekten durch Anreicherung des Kontexts mit Zusatzmaterial konzentriert; und die *Strukturierung*, deren Ziel es ist „bestimmte Aspekte aus dem Material herauszufiltern, unter vorher festgelegten Ordnungskriterien einen Querschnitt durch das Material zu legen oder das Material auf Grund bestimmter Kriterien einzuschätzen“ (2015, S. 67).

Für diese Arbeit ist die Zusammenfassung von Interesse, da diese offen ist für das Vorgehen der induktiven Kategorienbildung, sprich einer sich während der Analyse anpassbaren Kategorieneinteilung. Allerdings üben hier Gläser & Lauder (2010) Kritik an der von Mayring beschriebenen Vorgehensweise, denn diese sieht lediglich eine einmalige Anpassung der Kategorien nach 10-50% des Materialdurchgangs vor (Mayring, 2015, S. 84). Sie schlagen hingegen eine Offenheit der Kategorienbildung vor, die jederzeit eine Anpassung der Kategorien erlaubt, wodurch die Effizienz der Methode durch den Entfall des bei Mayring zur Generierung der Kategorien benötigten Probedurchlaufs, gesteigert wird (Gläser & Laudel, 2010, S. 201).

Die beiden Autoren teilen die qualitative Inhaltsanalyse in vier Hauptschritte ein (S. 202), die im Folgenden zunächst auf Basis ihres Buches kurz erklärt werden und daran anschließend das Vorgehen in dieser Forschungsarbeit geschildert wird.

9.5.1 Vorbereitung der Extraktion

Die Extraktion wird durch Überlegungen vorbereitet, welche speziellen Daten (genannt Variablen) aus dem Datenmaterial extrahiert werden können, ob sich diese Variablen in ihrer Definition voneinander unterscheiden und ob Kausalbeziehungen zwischen ihnen bestehen (S. 206f). Für diesen Schritt wurde auf die von der DIN EN 60073:2003-05 festgelegten Arten von sichtbaren Codes zurückgegriffen (vgl. Tabelle 1): *Farbe*, *Gestalt*, *Position* und *Zeit* sollten als Variablen zur

Extraktion dienen, da sie sich voneinander unterscheiden und als unabhängig gesehen werden können.

Darüber hinaus wird in Vorbereitung der Extraktion vermutet, dass man bereits im Anschluss an die Erhebung der Daten einige Merkmalsausprägungen von Variablen identifizieren kann (vgl. S. 208). Das hat sich vor allem für einige Ausprägungen der Variablen Farbe, Gestalt und Position bewahrheitet, welche bereits vor Beginn der eigentlichen Extraktion zusammengeschrieben und während der Extraktion zugeordnet werden konnten.

Die Vorbereitung der Extraktion aus methodischer Perspektive beinhaltet laut den beiden Autoren „die Fixierung des auszuwertenden Materials, die Festlegung der Analyseeinheit und methodische Überlegungen zum Vorgehen bei der Aufteilung der Extraktion auf mehrere Personen“ (S. 209). Konkret heißt dies, dass entschieden werden soll, welche Daten ausgewertet werden, was in diesem Fall alle Transkripte der Experteninterviews bedeutet. Als Analyseeinheit wurden jeweils die einzelnen Use Cases auf Probandenebene ausgewählt, das bedeutet pro Probanden gab es vier Analyseeinheiten. Ausgewertet wurde lediglich durch die Verfasserin dieser Arbeit.

Zuletzt zählen Gläser und Lauder noch die technische Vorbereitung zum Schritt der Extraktionsvorbereitung (S. 211). Allerdings werden in der vorliegenden Forschungsarbeit keine der angesprochenen Tools und Makros, sondern eine Excel-Tabelle als Grundlage verwendet. Die zu extrahierenden Variablen bilden dabei jeweils eine eigene Spalte; pro Analyseeinheit wird eine neue Zeile angelegt. Die Tabelle, welche die Inhaltsanalyse beinhaltet, findet sich auf dem digitalen Datenträger im Anhang.

9.5.2 Extraktion

Für die Extraktion der Informationen, wurde zunächst die Transkription eines Use Case betrachtet und die relevanten Daten in die Excel-Tabelle eingetragen.

Um die extrahierten Daten eindeutig dem Ursprungsmaterial zuordnen zu können, werden pro Zeileneintrag der Use Case sowie die Probanden ID in der Tabelle erfasst.

Während der Extraktion wurden aus dem Text alle Informationen in die Tabelle übertragen, welche zu den vordefinierten Variablen passten. Allerdings war das Ziel der Extraktion, alle Eigenschaften, die aus Nutzerperspektive für die Gestaltung von Lichteffekten relevant sind, zu extrahieren. Daher wurden im Laufe der Extraktion immer wieder neue Infos gefunden, die sich nicht den bestehen Variablen zuordnen ließen oder welche die Definition bestehender Variablen als problematisch darstellten. An dieser Stelle wurde die Offenheit des Vorgehens von Gläser und Laudel im Vergleich zum ursprünglichen Entwickler (Mayring) der qualitativen Inhaltsanalyse relevant: Während der kompletten Analyse wurden die Variablen angepasst und um neue erweitert. Immer dann, wenn eine neue Analyseeinheit eine Information enthielt, welche nicht zugeordnet werden konnte, wurden die Variablen neu durchdacht. Vor allem die am Ende final als „*Art*“ und „*Impulsgröße*“ definierten Variablen bereiteten während der Extraktion Probleme, da zu Beginn nicht klar war, inwiefern sich die beiden unterscheiden bzw. unterschieden werden müssen. Letztendlich beschreibt *Art* nun das gesamt-hafte Verhalten des Lichteffekts (u.a. ob etwas pulst, ein Lauflicht durch den Lichtleiter geschickt wird, oder sich der Lichtleiter mit einer neuen Farbe füllt), während *Impulsgröße* sich tatsächlich auf die Größe des Lichteffekts bezieht, in welcher das in der Variable *Art* festgelegte Verhalten ausgeführt wird.

Das Ergebnis der Extraktion ist definiert als „ein umfangreiches Rohmaterial, das sämtliche im empirischen Material enthaltenen Informationen über die Ausprägungen von Variablen und die im Material berichteten Kausalbeziehungen zwischen Variablen enthält“ (S. 2018). Auf Basis der in diesem Fall entstandenen Excel-Tabelle wurde im Folgenden weiter ausgewertet, das Ursprungsmaterial wurde nur noch herangezogen, wenn es bei der im Anschluss beschriebenen Aufbereitung der Daten zu Verständnisproblemen kam.

9.5.3 Aufbereitung der Daten

Wie von Gläser und Laudel beschrieben, soll „[d]ie Aufbereitung der Daten (...) vor allem deren Qualität verbessern, indem verstreute Informationen zusammengefasst, Redundanzen beseitigt und Fehler korrigiert werden“ (S. 229). Dieser Schritt wird von beiden als ein sehr wichtiger und nur schwer von der Auswertung zu unterscheidender bezeichnet. Die beiden Autoren geben vor, dass für diesen Schritt eine neue Tabelle zum Arbeiten angelegt werden muss, damit die für sie besonders wichtigen Zwischenschritte erhalten bleiben (S. 229). Dementsprechend ist für den nachfolgenden Abschnitt eine zweite Tabelle (vereinheitlichte Auswertung) auf dem digitalen Datenträger hinterlegt. Es werden vier konkrete Anweisungen für die Datenaufbereitung vorgegeben: „Vertraute Informationen werden zusammengefasst“, „Bedeutungsgleiche Informationen werden zusammengefasst“, „Offensichtliche Fehler werden korrigiert“, „Verschiedenartige Informationen werden beibehalten“ (S. 230). Die Aufbereitung der in dieser Forschungsarbeit vorliegenden Daten konzentrierte sich vor allem auf die Zusammenfassung bedeutungsgleicher Informationen, da im nächsten Schritt der Auswertung eine Quantifizierung der Daten vorgenommen werden sollte. Dabei sollten die sich wörtlich unterscheidenden, aber inhaltlich gleichen Merkmalsausprägungen einer Variable zusammengefasst und vereinheitlicht werden. Dazu wurde pro Spalte/Variable alle aus den Transkripten extrahierten Aussagen betrachtet und nach gemeinsamen Aussagen gesucht. Für die auf diese Weise gebildeten Cluster wurde eine Bezeichnung gesucht, die den Inhalt beschreibt. Alle Benennungen der Cluster zusammengenommen stellten dann wiederum pro Variable die möglichen Antworten (= Ausprägungen) dar. Dieses Vorgehen wurde für alle Variablen-Spalten der Excel-Tabelle wiederholt. Im Anschluss an dieses Vorgehen wurde die komplette Tabelle erneut Zeile für Zeile überarbeitet. Dabei wurde für jede Zelle aus der zuvor generierten endlichen Antwortliste pro Variable der entsprechende Wert ausgewählt, der zu der bisher eingetragenen Aussage passt. Als Endergebnis dieses Vorgehens stand eine vereinheitlichte Tabelle, deren inhaltlich gleichen Aussagen gleich benannt wurden, und damit quantifizierbar gemacht wurden.

9.5.4 Auswertung

Die Auswertung der Daten setzte direkt an der vereinheitlichten Tabelle an und es wurde pro Variable die Ausprägungen sowie deren Häufigkeiten, unterschieden nach den Kategorien *Information* und *Sicherheit*, aufgezeigt. Dazu wurde die Tabelle nach den unterschiedlichen Variablen gefiltert und das Auftreten der einzelnen Merkmale in Pivot-Tabellen erhoben. Der Fokus lag auf der These, dass es bestimmte Eigenschaften von Lichteffekten gibt, die von vielen Leuten gemeinsam assoziiert werden und damit auf eine allgemein gültige Sprache hinweisen.

9.6 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Auswertung sowohl graphisch als auch textuell beschrieben. Dabei wird sowohl auf die einzelnen Variablen als auch deren Ausprägungen sowie der zugehörigen Häufigkeit der Nennungen eingegangen. Die Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ interpretiert und abschließend auf ein Set an sinnvollen Variablen reduziert.

9.6.1 Farben

Bei allen Überlegungen, wie ein Lichteffekt in unterschiedlichen Situationen gestaltet sein könnte, wurde in den häufigsten Fällen zuerst die Farbe beschrieben. Insgesamt wurden die Nennungen in 8 verschiedenen Ausprägungen zusammengefasst, welche inklusive der unterschiedlichen Häufigkeiten in Abbildung 28 dargestellt sind. Neben sechs spezifischen Farbausprägungen wurde das Beibehalten der vorherrschenden ambienten Farbe für den Use Case, als auch eine Kontextabhängigkeit beschrieben. Letzteres deutet an, dass auch eine Veränderung der Farbe innerhalb eines Use Cases möglich ist. Wie oft eine Farbe genannt wurde, schwankt über die einzelnen Ausprägungen sehr stark. Rot dominiert mit 30 Nennung, während Gelb und Grün selten aufgeführt wurden. Gleiches gilt für Orange, von welchem insgesamt nur viermal gesprochen wurde. Zumal bei genauerer Betrachtung der inhaltlichen Aussagen die Verwendung von Orange

vermutlich beeinflusst ist von der Tatsache, dass Orange zum Zeitpunkt der Erhebung bei BMW als Standardfarbe der ambienten Beleuchtung gilt.

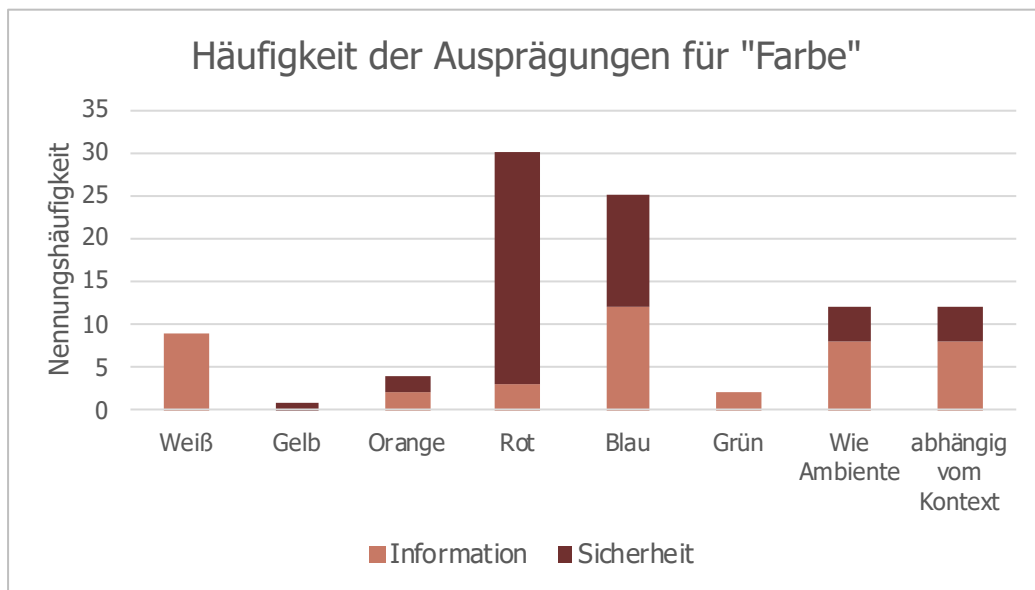


Abbildung 28: Ausprägungen der Variable „Farbe“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.2 Helligkeit/Intensität

Nimmt man alle Beschreibung zusammen, die mit der Helligkeit oder der Intensität von Lichteffekten in Verbindung stehen, so findet man sie dennoch nur bei ca. 1/3 aller beschriebener Lichteffekte. Sie wurde selten explizit vom Interviewten angesprochen und auf Nachfrage kristallisierte sich eine gewisse Selbstverständlichkeit heraus, dass der beschriebene Lichteffekt ebenso hell sein muss, dass er gut sichtbar ist. Weitere Assoziationen, die zu Helligkeit erfasst wurden, waren „maximale Helligkeit“, „abhängig zur Situation“ oder sinngemäß „heller als die normale Beleuchtung“.

Da wie bereits zuvor erläutert, das Festlegen von Helligkeiten kompliziert ist und von vielen Faktoren beeinflusst wird, wird diese zwar als Eigenschaft von Lichteffekten anerkannt, aber im Folgenden ausgeklammert.

9.6.3 Art

In der Variable „Art“ sind verschiedene Verhaltensmuster der Lichteffekte zusammengefasst. Entgegen der ursprünglichen Erwartungshaltung ließen sich hier nur wenige Ausprägungen unterscheiden. In den Kategorien Information und Sicherheit gab es nur vier gleiche Beschreibungen, wie sich die Lichteffekte bewegen. „Blinken“ und „Pulsen“ beschreiben unterschiedliches Aufleuchten von ganzen LED-Abschnitten über die Zeit, während sich der Fülleffekt und das Lauflicht dadurch definieren, dass sie jeweils eine Strecke zurücklegen. Unter „Lauflicht“ sind diejenigen Beschreibungen zusammengefasst, bei welchen ein Lichteffekt durch einen LED-Streifen „gelaufen“ ist, d.h. eine Gruppe leuchtender LEDs hat sich schrittweise durch die Gesamtheit aller LEDs bewegt, wobei die LEDs, die vor bzw. nach der Gruppe lagen, nicht geleuchtet haben. Alle Effekte, bei denen sich ebenfalls ein Effekt schrittweise fortbewegt hat, aber alle LEDs, die passiert wurden, in der gleichen Art und Weise angefangen haben zu leuchten, wird mit „Fülleffekt“ bezeichnet. Die wenigen verschiedenen Bewegungsarten wurden über alle Use Cases hinweg in beiden Kategorien genannt und scheinen daher mit vielen verschiedenen Assoziationen verbunden zu sein.

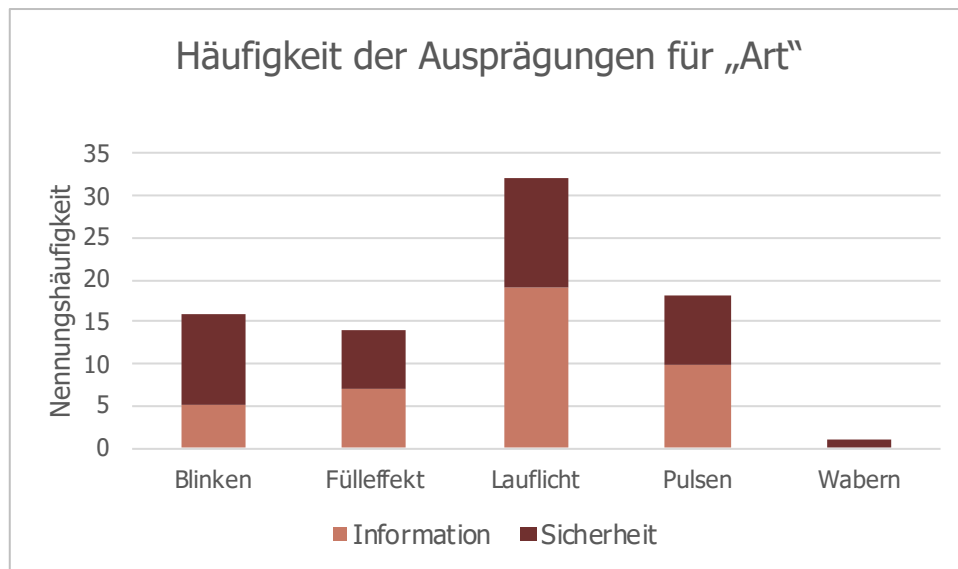


Abbildung 29: Ausprägungen der Variable „Art“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.4 Impulsgröße

Die Größen, die ein Lichteffekt einnehmen kann, konnten trotz vieler einzelner Ausführungen sehr gut auf nur wenige Ausprägungen reduziert werden. In Abbildung 30 sind diese von links nach rechts, in der Größe zunehmend, dargestellt. Während die Fläche universal verwendet wurde, scheint es bei punkt- und strichförmigen Lichteffekten unterschiedliche Einsatzvorlieben zu geben.

Auch wenn vielzählige verbale Beschreibungen vorliegen, so lassen sich aus diesen dennoch nicht die exakte Soll-Größe der Ausprägungen in z.B. Zentimeter ableiten, was jedoch vom jetzigen Zeitpunkt wenig Belang hat. Als besonders wichtig ging aus den Ergebnissen hervor, dass es eine klare unterscheidbare Hierarchie geben muss, von nur wenigen beteiligten LEDs, über einen Teil bis hin zu allen.

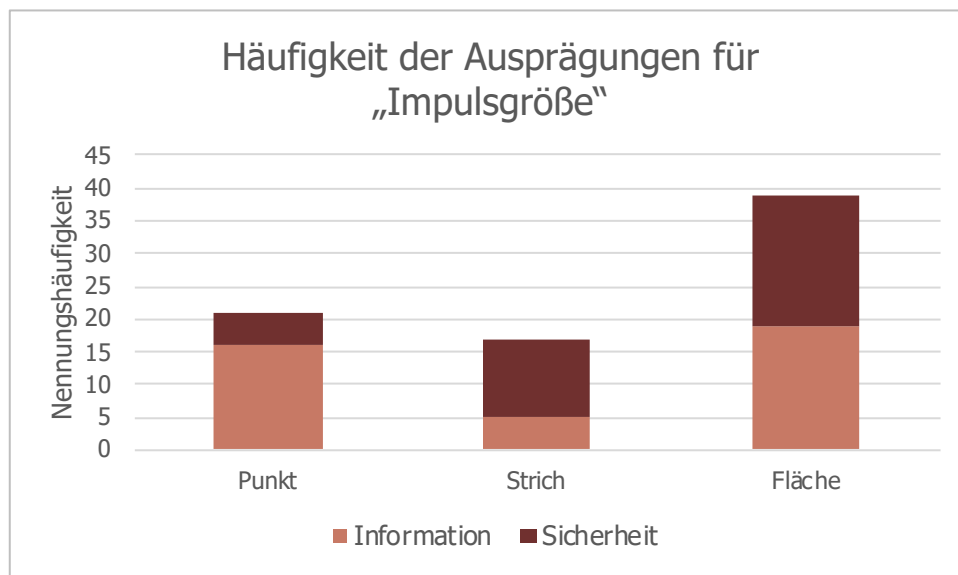


Abbildung 30: Ausprägungen der Variable „Impulsgröße“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.5 Bereich

Betrachtet man die in Abbildung 31 dargestellten Bereiche, so fällt zunächst die große Anzahl an Ausprägungen auf. Im Gegensatz zu vielen anderen Variablen, fiel das Zusammenfassen der Bereiche schwierig, da eine Vielzahl verschiedener, exakter Fahrzeuggeometrien beschrieben wurden. Diese feingliederte Beschreibung lässt sich womöglich durch die Durchführung der Studie in einem

Fahrzeug sowie das Expertenwissen der Interviewten erklären, welche durch die Arbeit in der Automobilindustrie tendenziell ein stärker ausgeprägtes Vokabular erlernt haben dürften als die Gesamtpopulation. Stellt man den Sprachgebrauch von Laien in den Fokus, so könnte man die Ausprägungen durch Abstraktion weiter zusammenfassen und sich auf die Relationen im Fahrzeug beziehen. Die Orte „Lenkrad“ bis „A-Säule“ liegen alle im vorderen Bereich des Fahrzeugs und könnten daher unter dem zur Fahrerperspektive relativem Begriff „vorne“ zusammengefasst werden, während „B-Säule“ und die beiden Nennungen zu den Türen „Seitlich“ vom Fahrer liegen. Unter „Front“ werden üblicherweise alle Komponenten der ersten Sitzreihe zusammengefasst und „Gesamtfahrzeug“ inkludiert darüber hinaus noch die zweite bzw. dritte Sitzreihe.

Zusätzlich zu den konkreten Ausprägungen wurde in zehn Fällen beschrieben, dass der Bereich „relativ zum Ort des Ereignisses“ liegt. Darunter wurden alle Beschreibungen zusammengefasst, bei denen innerhalb eines Use Cases verschiedene Orte denkbar sind, welche abhängig vom Ort des Auslösers des Use Cases sind. Ist beispielsweise ein Wildtier für eine Auffahrwarnung verantwortlich, so muss der Lichteffekt relativ zu diesem Tier angezeigt werden. Eine vorherbestimmte Position z.B. immer „vorne“, wäre nicht ausreichend. Die detaillierten Nennungen von Bereichen bilden jedoch dennoch die Vollständigkeit aller möglichen Orte, welche situativ in Relation zum Ereignis stehen können. Die kontextbezogene Ausprägung „relativ zum Ort des Ereignisses“ wird somit von den konkreten Ausführungen abgedeckt.

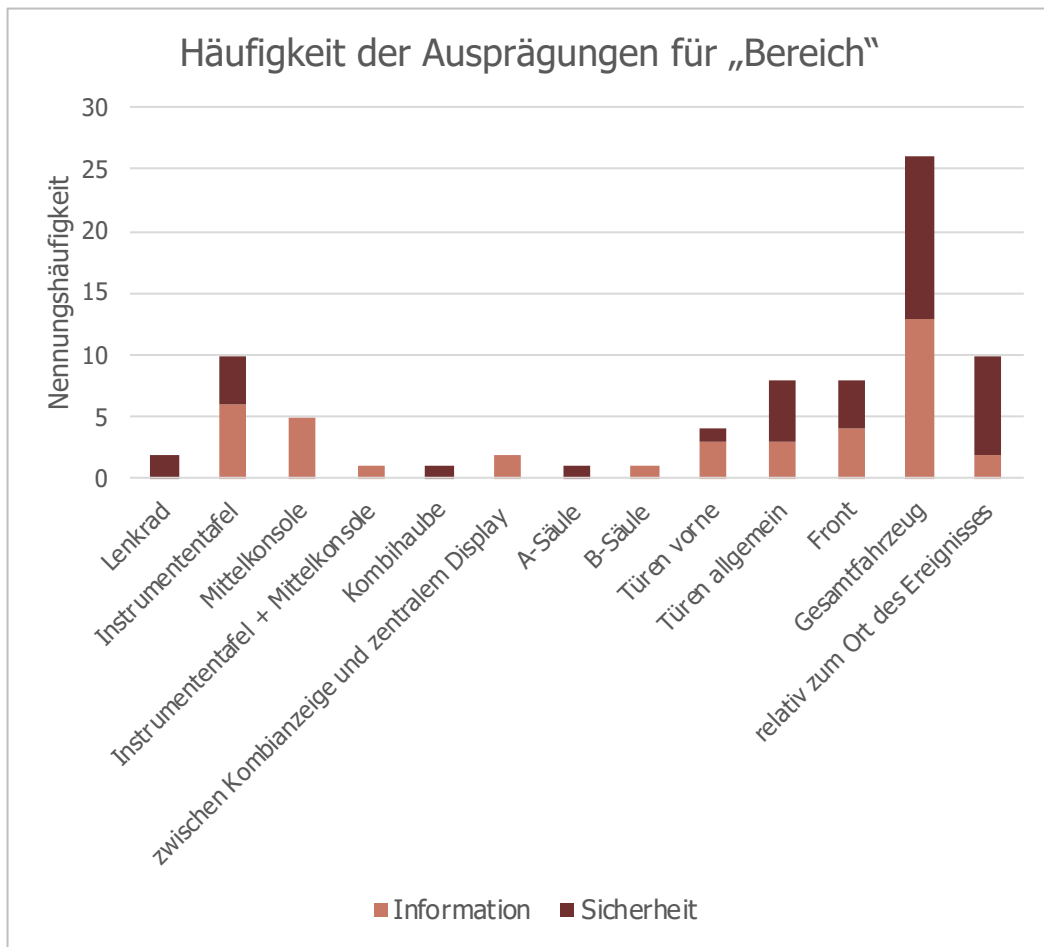


Abbildung 31: Ausprägungen der Variable „Bereich“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.6 Richtung

Betrachtet man die Aufschlüsselung in Abbildung 32, welche Ausprägungen für verschiedene Richtungen identifiziert werden konnten, so fallen zwei Ausschläge auf. Zum einen wurde häufig von Lichteffekten gesprochen, die sich nicht durch den Raum bewegen und daher keine Richtung haben. Falls andererseits jedoch eine Richtung genannt wurde, so bewegten sich die Lichteffekte dabei meist „nach vorne“.

Aus den Beobachtungen während der Durchführung der Interviews in Kombination mit der Extraktion gewonnenen Begriffe lässt sich eine spannende Erkenntnis gewinnen: Während der Befragung im Fahrzeug wurden häufig Richtungen für die Lichteffekte durch Handbewegungen gezeigt bzw. nachgestellt. In diesen Momenten waren diese als dreidimensional zu erkennen (X = nach

vorne/hinten; Y = nach oben/unten; Z = nach links/rechts), allerdings findet sich in den mündlichen Beschreibungen bis auf wenige Ausnahmen nur eine Zweidimensionalität (Z-Achse entfällt). Formulierungen wie „Wandernde Lichtpunkte von C-Säule Richtung Lenkrad“ beinhalten unter der Annahme eines rundum verlaufenden LED-Streifens genaugenommen einen Weg auf der X-Achse (die Türen entlang) und würden sich dann ab der A-Säule über die Z-Achse parallel zur Windschutzscheibe in Richtung Lenkrad bewegen. Die Interviewten fassten dies aber in ihren mündlichen Äußerungen mit dem Begriff „nach vorne“ zusammen, und beschrieben damit nur eine Ebene, in der z.B. Lenkrad bzw. der Fahrer den Mittelpunkt bildet.

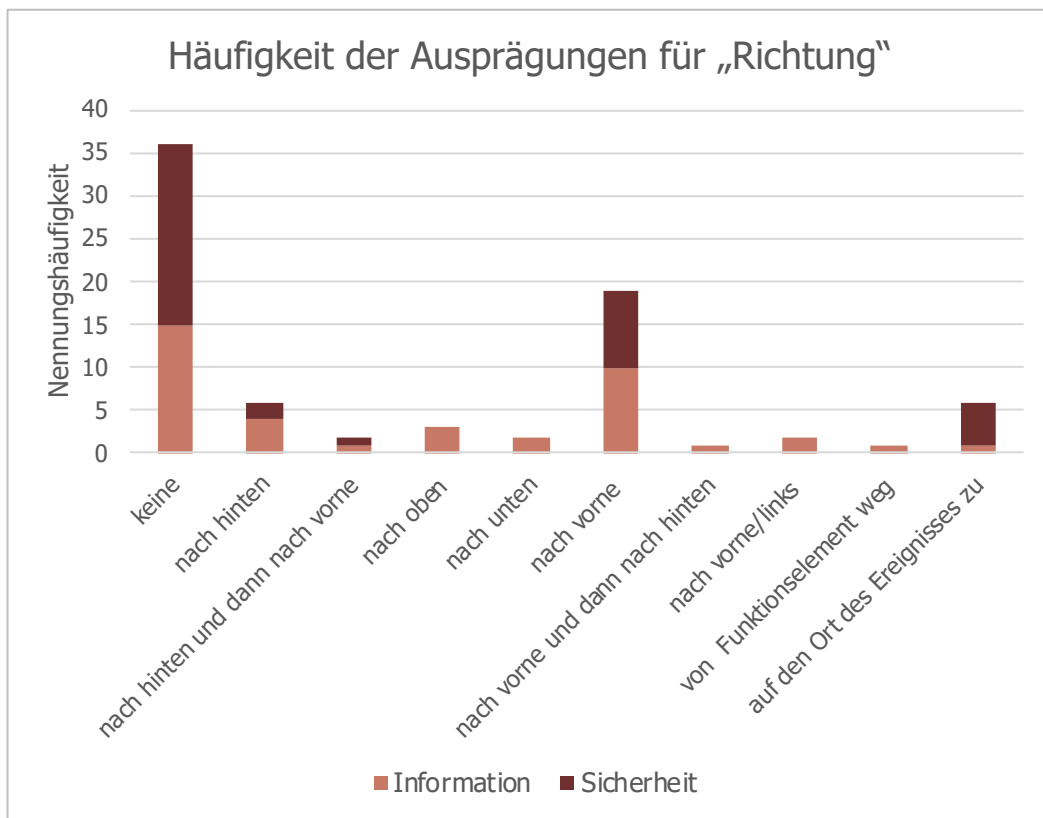


Abbildung 32: Ausprägungen der Variable „Richtung“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.7 Geschwindigkeit

Da während der Durchführung der Experteninterviews keine echte Visualisierung der Lichteffekte stattfand, sind die Angaben über Geschwindigkeiten von Lichteffekten stets als relativ zu betrachten. Beschreibungen fanden dabei nicht

in Form von Angaben wie „50 cm pro Sekunde“ statt, sondern wurden beispielsweise durch Bewegungen, häufig in Kombination mit der eben genannten Richtungsangabe oder den Bewegungen, vermittelt. Dabei ist zu beachten, dass sich das Merkmal *Geschwindigkeit* aus unterschiedlichen Beschreibungen zusammengefügt hat. Je nachdem, welche der in Abbildung 29 beschriebenen Arten einer Bewegung man auswählt, ist die Geschwindigkeit auf eine Strecke bezogen, die ein Lichteffekt in einer bestimmten Zeit zurücklegt (*Fülleffekt, Lauflicht*), oder auf die Häufigkeit, wie oft bzw. wie schnell er in einer bestimmten Zeit wiederkehrt. Für letzteres wäre eigentlich der korrekte physikalische Begriff *Frequenz* zu verwenden. Da aber die Auswertung auf mündlichen Beschreibungen beruht, die diese Separierung nicht aufweisen und der Begriff *Geschwindigkeit* mit den genannten Ausprägungen die inhaltlichen Aussagen der Probanden sinnvoll abdeckt, wurde entschieden, dass dieser eine Begriff als Zusammenfassung ausreicht.

Aus den Beschreibungen und Bewegungen der Probanden während der Interviews ergaben sich durch den Vergleich von Aussagen in verschiedenen Situationen sowie gezieltes Nachfragen drei sich steigernde Gruppen an Geschwindigkeiten, die mit *langsam, mittel* und *schnell* zusammengefasst wurden. Es schien dabei insgesamt nicht auf die exakte Ausprägung anzukommen (da der Mensch selbst Geschwindigkeiten nicht metrisch wahrnimmt, sondern diese Fähigkeit nur unter Zuhilfenahme von Messinstrumenten erlangt), sondern vielmehr, dass sich Lichteffekte deutlich wahrnehmbar in der Geschwindigkeit voneinander unterscheiden können müssen und auf diesem Weg unterschiedliche Inhalte transportieren können. Betrachtet man die Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 33, so zeigen sich Tendenzen, dass langsame Geschwindigkeiten zu Use Cases aus der Kategorie *Information* assoziiert werden, während bei Situationen aus dem Bereich *Sicherheit* eher an hohe Geschwindigkeiten gedacht wurde.

Zusätzlich zu den genannten Ausprägungen wurde von einigen Experten auch die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von einer Situation beschrieben, wobei dies vor allem für Sicherheits-Effekte gilt. Dabei wurde entweder die kontinuierliche Adaption der Geschwindigkeit an das Geschehen gemeint (zum Beispiel

eine Steigerung der Geschwindigkeit mit zunehmender Dringlichkeit) oder dass womöglich ein einzelnes Ereignis selbst eine gewisse Geschwindigkeit vorgibt (zum Beispiel Aufgreifen der Blinkfrequenzen einer Straßensperre).

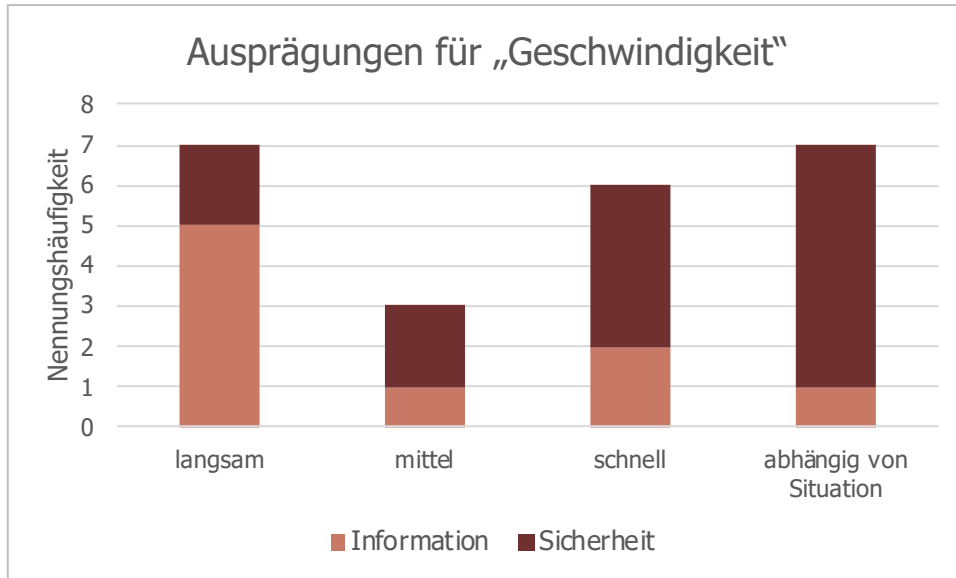


Abbildung 33: Ausprägungen der Variable „Geschwindigkeit“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.8 Dauer, Wiederholungen und Anzahl Wiederholungen

In Ergänzung zur Beschreibung der Geschwindigkeit eines Effekts wurden häufig Aussagen über dessen Dauer getroffen. Dies geschah indirekt, wenn dem Lichteffekt eine bestimmte Anzahl an Wiederholungen zu geschrieben wurde oder aber indem er für die Dauer einer vorherrschenden Situation sichtbar beschrieben wurde. In keinem der Interviews wurde einem Lichteffekt eine feste Dauer (zum Beispiel in Sekunden) zugeschrieben, obwohl insgesamt 68 Äußerungen dazu auftraten. Die Nennungen wurden 43-mal als die Ausprägung *abhängig von Situation* (14-mal bei Use Cases von *Information* vorgekommen, 29-mal bei *Sicherheit*.) und 25-mal als *abhängig von Wiederholung* (22-mal bei *Information*, 3-mal bei *Sicherheit*) extrahiert.

Trotz der großen Anzahl an Nennungen und als wichtige Eigenschaft, die beim Einsatz eines Lichteffekts festgelegt werden muss, nimmt *Dauer* im Gegensatz zu den anderen erarbeiteten Merkmalen eine Sonderrolle ein. Zum einen sind die genannten Ausprägungen nur Kontextbezogen und geben einzeln betrachtet

keine eindeutige Aussage, zum anderen beschreibt *Dauer* keinen Baustein zur Gestaltung des Aussehens eines Lichteffekts, sondern eben die Länge der Sichtbarkeit. Diese steht indirekt immer im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit eines Effekts (aus einer festen Anzahl an Wiederholungen eines Lichteffekts in Kombination mit dessen Geschwindigkeit errechnet sich die Dauer), allerdings wird *Geschwindigkeit* selbst als wichtiges Merkmal gesehen, zu dessen Gunsten *Dauer* als Baustein außer Acht gelassen wird.

9.6.9 Aufstartverhalten

Auch wenn es sich nicht in allen Formulierungen hat wiederfinden lassen, so wurde doch bei ca. jeder dritten Beschreibung das Aufstartverhalten eines Lichteffekts erwähnt. Damit wurde das initiale Erscheinen des Effekts beschrieben, wofür häufig von Experten der Begriff „Rampe“ verwendet wurde. Ähnlich wie bei den Variablen und Frequenz können die erarbeiteten Ausprägungen nicht mit absoluten Werten hinterlegt werden, sondern es ist vielmehr die Relation zueinander, die entscheidend ist. Dementsprechend sind die Ergebnisse in Abbildung 34 in einer Reihenfolge dargestellt: von einem sehr langsamen, weichen Erscheinen (links) hin zu einem abrupten Auftreten ohne Verzögerung (rechts). Es zeichnet sich eine leichte Tendenz ab, dass für Sicherheitseffekte schnelle Aufstarts bevorzugt sind, während bei den Use Cases der Kategorie *Information* deutlich mehr langsame Rampen beschrieben wurden.

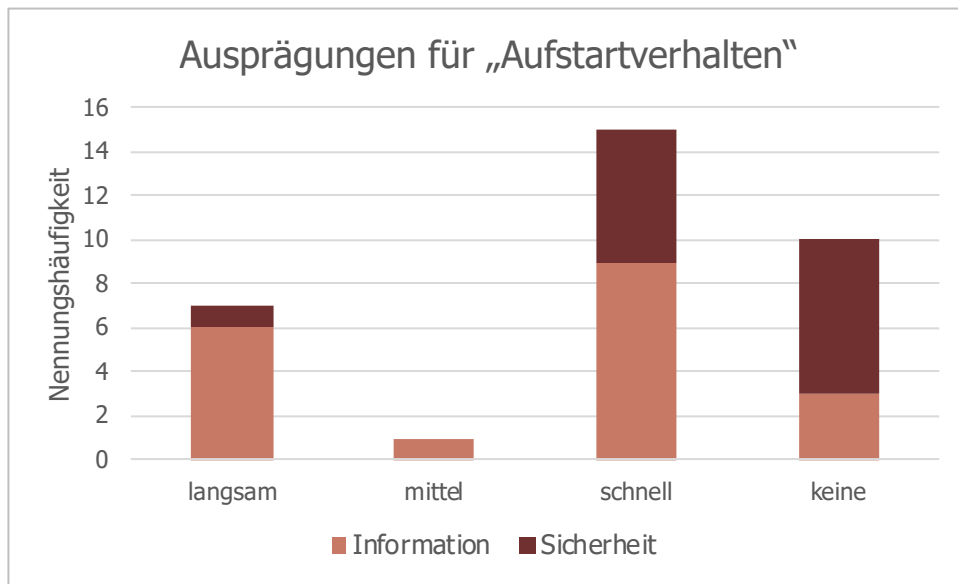


Abbildung 34: Ausprägungen der Variable „Aufstartverhalten“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien

9.6.10 Zusammenfassung

In den vorangehenden Abschnitten werden die Ergebnisse der qualitativen Inhaltsanalyse dargestellt. Die einzelnen Variablen und deren Ausprägungen repräsentieren die detaillierten Vorstellungen von Experten, wodurch Lichteffekte in verschiedenen Situationen gestaltet werden können. Allerdings sind dabei, wie bereits im Einzelnen erläutert, häufig auch Kontextabhängigkeiten in den Ausprägungen enthalten (z.B. „abhängig von ...“), die selbst kein tatsächliches Aussehen beschreiben, sondern in einem Kontext auf die restlichen Ausprägungen referenzieren. Reduziert man die Gesamtheit der Ausprägungen um diejenigen mit Kontextabhängigkeit und berücksichtigt man mögliche sinnvolle, bereits erläuterte Zusammenfassungen, so ergibt sich die in Tabelle 2 dargestellte Übersicht. Die aufgeführten Bausteine zur Beschreibung des Aussehens eines Lichteffekts im Fahrzeuginnenraum spannen mit deren Ausprägungen den Gestaltungsspielraum auf, in welchen sich die Aussagen der Experten repräsentativ für die Grundgesamtheit einfügen lassen. Je nach Kombinatorik der Ausprägungen ergeben sich verschiedene Lichteffekte, die die im Interview erhobenen Assoziationen erfüllen können und zusätzlich Raum für freie Gestaltung wie es beispielsweise für die nicht betrachteten Lichteffekte aus dem Bereich *Komfort* notwendig ist.

Tabelle 2: Übersicht der im Fahrzeuginnenraum relevanten Bausteine von Lichteffekten inkl. deren Ausprägungen

Baustein	Ausprägungen
Farbe	Weiß, Gelb, Orange, Rot, Grün, Blau
Art	Blinken, Pulsen, Lauflicht, Fülleffekt
Größe	Punkt, Strich, Flächig
Bereich	Vorne, Seiten, Gesamtraum
Richtung	Nach vorne, Nach hinten, Keine (=auf der Stelle verweilend)
Geschwindigkeit	Langsam, Mittel, Schnell
Aufstartverhalten	Hart, Weich

9.7 Fazit

Das Leitfadeninterview mit Experten stellte sich im Rahmen dieser Forschungsarbeit als gute Methodik dar, um den benötigten qualitativen Input zu erzeugen, welcher mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse in eine knappe Struktur überführt werden konnte. Die Beschreibungen der Probanden spannten ein großes Feld an unterschiedlichen Lichteffekten auf, so dass die Gestaltungsvielfalt, die in den Augen von Nutzern möglich ist, deutlich aufgezeigt wurde. Die extrahierten Merkmale können im übertragenen Sinne als eine „Sprache der Lichteffekte“ gesehen werden, da sich aus der Zusammensetzung der einzelnen Bausteine ganze Effekte kreieren lassen. Dabei ist interessant, dass zwar nicht jedes Merkmal in jeder Beschreibung enthalten war, letztendlich aber jeder Lichteffekt jede der aufgeführten Eigenschaften aufweist. Sobald ein Lichteffekt zu sehen ist, besitzt er eine bestimmte Farbe, ist an einen Ort geknüpft, hat eine bestimmten Geschwindigkeit (auch wenn diese Null ist), etc. An die Existenz eines Lichteffekts ist also automatisch das Anzeigen seiner Eigenschaften verknüpft.

Vergleicht man die erhobenen Bausteine sowie deren Ausprägungen mit den initial angesprochenen „Arten und Merkmale für sichtbare Codes“ aus der DIN EN 60073:2003-05, so ergeben sich Unterschiede, die die Eigenheiten in der Gestaltung von Lichteffekten hervorheben. Vor allem die Tiefe der Ausprägung von

Details weicht stark voneinander ab: Bei den sichtbaren Codes stehen beispielsweise Eigenschaften wie *Schattierung* und *Schraffur* zur Differenzierung zur Verfügung. Im Kontext von Effekten, welche im Fahrzeuginnenraum angezeigt werden, lässt sich zum einen eine solch kleinteilige Ausprägungen schwer umsetzen, zum anderen ließen sich diese mit hoher Wahrscheinlichkeit neben der Primäraufgabe, dem Fahren, nicht wahrnehmen. Hingegen benötigt es hier klare, große Bewegungen und Darstellungen, um den transportierten Inhalt zu erkennen. Deshalb gibt es viele Bausteine, die konkreter das ausformulieren, was bei den sichtbaren Codes unter der *zeitlichen Veränderung* zusammengefasst ist. Darüber hinaus haben sich in den Assoziationen der Probanden zu Lichteffekten die einzelnen Bestandteile des Merkmals *Farbe* (*Bunnton, Sättigung, Helligkeit, Kontrast*) nicht deutlich voneinander unterschieden lassen, was jedoch vor allem mit der mangelnden Visualisierung während den Interviews begründet werden kann. Unbewusst wurde vorwiegend der Bunnton eines Effekts beschrieben, da dabei aber stets von *Farbe* gesprochen wurde, ist dies auch die Bezeichnung des entsprechenden Bausteins.

Da die Lichteffekte in den Interviews vor dem inneren Auge der Probanden entwickelt und die mündlichen Äußerungen daraufhin vom Interviewer erfasst und protokolliert wurden, ist eine gewisse Verzerrung durch unterschiedliches, subjektives Verständnis nicht auszuschließen. So mag es vorgekommen sein, dass die visuellen Bilder, die sich in der Vorstellung der jeweiligen Beteiligten gebildet haben, nicht deckungsgleich waren. Das hat keine negativen Auswirkungen auf die Qualität der Erhebung der Merkmale, jedoch zeigt es ein Grundproblem in der Arbeit mit Lichteffekten auf. Die Vorstellungskraft kann keine übergreifend einheitlichen Darstellungen liefern, weswegen für den nächsten Schritt der Forschungsarbeit eine Visualisierung und Betrachtung möglichst vieler verschiedener Lichteffekte unerlässlich war.

10 Erhebung der Einflussnahme von unabhängigen Variablen im Rahmen einer Nutzerstudie

Um Aussagen über die Wirkungsweise von Lichteffekten sowie deren einzelne Bausteine treffen zu können, werden in der nachfolgenden Probandenstudie quantitative Daten erhoben und statistische Zusammenhänge betrachtet.

10.1 Motivation & Ziel

Nachdem aus den vorherigen Untersuchungen bereits bekannt ist, welche Möglichkeiten für die inhaltliche Gestaltung von Lichteffekten zur Verfügung stehen, hat die nachfolgende Studie das Ziel, Erkenntnisse über deren Wirkungsweise zu gewinnen. Dabei werden insgesamt vier abhängige Variablen untersucht: Zuordnung in Kategorien, Reaktionsgeschwindigkeit, visuelle Beeinflussung und subjektives Empfinden. Mit diesen Variablen werden verschiedene Aspekte der Wirkungsweise der Lichteffekte abgedeckt. Je nachdem, für welche Situation ein Lichteffekt gestaltet werden soll, können diese unterschiedliche Relevanz besitzen.

Die grundlegende Assoziation zwischen Lichteffekt und Situation wird mittels der Zuordnung zu den Kategorien aufgezeigt, welche in Kapitel 8 durch die Methode Cardsorting erarbeitet wurden. Durch diesen Abgleich wird sichtbar, welche Merkmale der Lichteffekte der Grund für die inhaltliche Interpretation sind. Zur Quantifizierung, welche Effekte wie schnell wahrnehmbar sind, dient die Erhebung der Reaktionsgeschwindigkeit, gemessen in Millisekunden. Diejenigen Darstellungen, auf die besonders schnell reagiert werden kann, können für zeitkritische Use Cases vorreserviert werden.

Zum dritten wird überprüft, wie stark die Lichtanzeigen den Blick eines Fahrers beeinflussen und welche Effekte trotz konstant verweilendem Blick gut wahrgenommen werden. Als gedankliche Grundlage dieser Untersuchung dient das Kapitel 6.4, in welchem die visuelle Einflussnahme von Lichteffekten angesprochen

wird. Wenn in neutraler Umgebung identifiziert wird, welche Effekte visuell beanspruchend sind, kann abgesehen werden, welche Anzeige sich kritisch auf die Fahraufgabe auswirken würde.

Die subjektive Bewertung der Lichteffekte stellt den vierten Teil des Forschungsabschnitts dar und soll Erkenntnisse liefern, wie Probanden unterschiedliche Lichteffekte empfinden. Insgesamt werden hier vier verschiedene Dimensionen abgefragt („Wie schön/angenehm/hektisch/ablenkend ist ein Effekt?“), die alle auf gleiche Art und Weise ausgewertet werden. Diese Datengrundlage ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Lichteffekte auf Empfindungsebene.

Es wird davon ausgegangen, dass das unterschiedliche Aussehen eines Lichteffekts, welches sich aus den einzelnen Bausteinen zusammensetzt, einen Einfluss auf alle abhängigen Variablen hat. Dieser Zusammenhang soll durch die Studie und die nachfolgende Auswertung aufgezeigt werden. Das bedeutet zum einen, dass die Ergebnisse auf Ebene der einzelnen Bestandteile der Lichteffekte analysiert werden, zum anderen findet auch eine Auswertung einzelner Lichteffekte statt.

10.2 Methodik

Bei der Bewertung von Lichteffekten gilt es zu berücksichtigen, dass die Merkmale eines Lichteffekts nicht einzeln betrachtet werden können. Möchte man z.B. eine Impulsbewegung bewerten lassen, so benötigt man um eine solche als Lichteffekt darstellen zu können, zwangsweise eine Lichtfarbe, einen Anzeigort, eine Geschwindigkeit, eine Impulslänge, eine Rampe sowie eine Orientierung des Lichteffekts. Das heißt, dass die Bewertung eines Lichteffekts stets auf Basis aller Parameter stattfindet und keiner der Parameter singular geprüft werden kann. Dies gilt es bei der Planung des Studiendesigns zu berücksichtigen.

10.2.1 Unabhängige Variablen

Um die Wirkungsweise der Lichteffekte zu bewerten, werden aus den Lichtbausteinen Variablen abgeleitet, deren Einflussnahme auf die abhängigen Variablen in dieser Studie statistisch untersucht werden sollen. Berücksichtigt man jedoch die Tatsache, dass es notwendig ist, stets einen Lichteffekt bewerten zu lassen, der sich aus allen Parametern zusammensetzt, so ergeben sich auf Basis der in Kapitel 9 erarbeiteten Ausprägungen 3888 Lichteffekte (*6 Farben x 4 Arten x 3 Anzeigorte x 3 Richtungen x 3 Geschwindigkeiten x 3 Größen x 2 Aufstartverhalten*). Eine solche Anzahl an Lichteffekten ist im Rahmen dieser Forschungsarbeit nicht untersuchbar. Daher wurde nach sinnvollen Reduzierungsmöglichkeiten gesucht, um ein vernünftiges Studiendesign planen zu können.

Möglichkeit A) Beschränkung auf wenige Hauptvariablen und Integration der restlichen Parameter als Konstanten: Die Bausteine eines Lichteffekts, die stets genannt wurden, sind die Farbe und der Anzeigort. Würde man lediglich diese beiden Bausteine variieren, während die restlichen Parameter auf einen fixen Wert definiert werden, hätte man den Studenumfang auf $6 \times 3 = 18$ Lichteffekte reduziert, könnte aber keine Aussagen über die restlichen Einflussgrößen treffen.

Möglichkeit B) Reduzierung der Anzahl der Ausprägungen der Variablen: Reduziert man die Ausprägungen pro Variable auf ein gleiches Minimum von jeweils zwei, erhält man ein Studiendesign mit $2^7 = 128$ Kombinationsmöglichkeiten. Es wäre aber auch eine unterschiedliche Reduzierung je nach Gewichtung der Variablen denkbar.

Möglichkeit C) Priorisierung von Ausprägungen und deren Kombinationen nach Betrachtung von Umsetzungen: Diejenigen Lichteffekte auswählen, welche bereits z.B. in Show Cars oder veröffentlichten Studien dargestellt wurden. Ausprägungen, welche bisher nie oder nur selten verwendet wurden, werden aus der Studie gestrichen. Dadurch könnten realistische Effekte herausgefiltert und die übrigen als irrelevant verworfen werden, jedoch ist fraglich, ob dieses aufwendige Vorgehen den richtigen Fokus setzt.

Möglichkeit D) Kombination der Parameter zu neuen unabhängigen Variablen:

Eine Zusammenfassung einzelner Parameter zu einer unabhängigen Variable könnte zu einer Reduktion der Gesamtanzahl an Lichteffekten im Studiendesigns führen. Gleichzeitig nimmt jedoch die Komplexität der Interpretation der Ergebnisse zu, da die Einflüsse nicht konsequent auf die einzelnen Bausteine eines Lichteffekts zurückgeführt werden können.

Die Reduzierung der unabhängigen Variablen ist sowohl für die Durchführung der Studie als auch für die anschließende Auswertung ein wichtiger Schritt. Die Einflussfaktoren müssen klar benannt und voneinander abgegrenzt werden, da sie die Grundlage für die statistischen Aussagen und Interpretationen der Ergebnisse sind.

Letztendlich führte eine Kombination aller Reduzierungsmöglichkeiten A) - D) zum finalen Setting von 90 verschiedenen Lichteffekten, welches in Tabelle 3 festgehalten ist. Der Fokus wurde auf die beiden Hauptparameter *Farbe* und *Anzeigort* gelegt (A), wobei die Ausprägung der Farben auf fünf reduziert wurde (B). Durch Kombination der übrigen Bausteine (D) zu einer neuen unabhängigen Variable *Bewegungsart*, deren Ausprägungen sich auf erprobtes Aussehen von Lichteffekten stützen (C), konnte das Studiendesign deutlich verkleinert werden. Rückschlüsse auf die ursprünglich erarbeiteten Bausteine, wie z.B. Richtung, sind dabei immer noch denkbar.

Durch dieses Vorgehen konnte die anfangs errechnete Anzahl an Lichteffekten um mehr als 90% gesenkt werden. Eine weitere Reduktion der ehemals 3888 Effekte erschien nicht sinnvoll, da mit jeder Streichung ein weiterer interessanter Aspekt von der Untersuchung der Einflussnahme ausgeschlossen wird. Mit diesen 90 Lichteffekten wurde ein Kompromiss zwischen Leistbarkeit und wissenschaftlichem Anspruch geschlossen.

Tabelle 3: Übersicht der unabhängigen Variablen sowie deren Ausprägungen

Farbe		Bewegungsart		Anzeigeort
Weiß	X	Erscheinen	X	I-Tafel (Sichtbereich Vorne)
Gelb		Pulsen		Türen (Sichtbereich Seiten)
Rot		Blinken		Beide Bereiche (I-Tafel + Türen)
Grün		Impulse nach Vorne		
Blau		Impulse nach Hinten		
		Auffüllen nach Vorne		

10.2.2 Studiendesign

Im Studiendesign wird zwischen einem within-subject und between-subject Design unterschieden: während ersteres den Vergleich mehrerer aufeinander folgender Messungen innerhalb einer Stichprobe beschreibt, werden beim between-subject Design die Messungen von zwei oder mehreren Stichproben miteinander verglichen (Budiu, 2018).

Bezogen auf den Untersuchungsgegenstand von 90 verschiedenen Lichteffekten, hätten bei der Umsetzung eines within-subject Design jeder Proband, aus einer Stichprobe vom Umfang N, alle 90 Lichteffekte testen müssen. Dies hätte jedoch für den Einzelnen bedeutet, dass die Versuchsdurchführung selbst sehr lange dauert, wodurch von vorneherein mit einer geringeren Bereitschaft zur Studienteilnahme sowie während der Durchführung von Qualitätsverlusten durch Ermüdung oder Anstrengung gerechnet hätte werden müssen.

Für die Realisierung der Studie als between-subject Design würden hingegen mehrere unabhängige Stichproben benötigt werden, die jeweils einen Lichteffekt mehrfach bewerten. Wie bereits beschrieben, liegt bei diesem Studiendesign der Schwerpunkt auf dem Vergleich der Stichproben, weswegen ein übliches Beispiel für ein solches Design die Betrachtung des Unterschieds der Reaktionszeit auf einen Lichteffekt von 20-Jährigen im Vergleich zu 80-Jährigen wäre. Da jedoch im vorliegenden Fall nicht die Eigenschaften der Stichprobe selbst von Interesse sind, sondern die Wirkung der Lichteffekte untersucht werden soll, müssten die

einzelnen Stichproben jeweils einen Lichteffect vertreten, so dass die Unterschiede bei der Auswertung der Stichproben, die Unterschiede zwischen den Lichteffecten repräsentieren. Dieses Vorgehen jedoch entfernt sich zu weit vom eigentlichen Sinn des between-subject Designs und der Aufwand wäre zudem mit 90 Stichproben zu je N Probanden nicht vertretbar.

Mit den beiden einzelnen Designs lässt sich das Forschungsvorhaben nicht adäquat realisieren, deswegen wurde in einem nächsten Schritt überlegt, ob die Kombination der Vorgehensweisen zielführend sein könnte. Ein daraus resultierendes gemischtes („mixed“) Design würde beispielsweise vorliegen, wenn die 90 Lichteffecte anhand des Parameters Farbe in fünf Gruppen aufgeteilt werden und jede der Gruppen von einer unabhängigen Stichprobe je zweimal (beispielsweise morgens und abends) bewertet werden würde. Hierbei entstünde eine Kombination aus Messwiederholungen pro Stichprobe („Gibt es einen Unterschied in der Wahrnehmung der Lichteffect am Morgen im Vergleich zu am Abend?“) als auch miteinander vergleichbare Gruppen an Lichteffecten (z.B. „Gibt es einen Unterschied in der Wahrnehmung der Lichteffecte zwischen den Farben?“). Für die Forschungsarbeit ist zum jetzigen Moment lediglich die zweite Frage von Interesse, so dass die Vermischung des within-subject und des between-subject Designs eine zusätzliche Komplexität, aber keinen Mehrwert hinsichtlich der zu erarbeitenden Ergebnisse mit sich bringt. Zumal Messwiederholungen bedingen, dass die Stichprobe zweimal das gleiche Datenset bearbeitet. Statt der notwendigen Reduktion der Anzahl der Lichteffecte für den Einzelnen, wäre also eine zweimalige Studienteilnahme von Nöten und der Aufwand somit noch höher.

Deshalb wurde nach einem Studiendesign gesucht, welches die Verteilung der Effekte auf mehrere Probanden ermöglicht. Nach dem Austausch mit wissenschaftlichen KollegInnen, auch im Arbeitsumfeld, bot sich eine Orientierung am Vignettendesign, auch faktorielles Survey genannt, an. Mit der Methode, die der Sozialforschung zuzuordnen ist und die z.B. für Befragungen im Bereich der Marktforschung eingesetzt wird, „können mehrere theoretische Zusammen-

hänge auf einmal und dank des Befragungsdesigns mit einer hohen Fallzahl geprüft werden“ (Berger et al., 2009, S. 306). Der Begriff *Vignette* wird von Steiner und Atzmüller (2006) definiert als eine „aus einzelnen Vignettenbausteinen (Faktoren oder Merkmalen) bestehende Kurzgeschichte, Situations- oder Personenbeschreibung, deren Zusammenstellung in systematischer, faktorieller Art und Weise variiert wird“. Übertragen auf die Domäne der Studie stellt ein Lichteffect eine Vignette dar, die sich aus den Faktoren Farbe, Anzeigeort und Bewegungsart zusammensetzt. Die Vignetten werden Probanden zur Bewertung vorgelegt, wobei es im faktoriellen Survey üblich ist, „dass nicht alle Befragten alle Vignetten präsentiert bekommen. Vielmehr werden die Vignetten in so genannte Sets aufgeteilt und diese dann jeweils (...) vorgelegt“ (Berger et al., 2009, S. 307). Durch statistische Methoden wie der Varianzanalyse können anschließend die Bedeutung der einzelnen Faktoren errechnet werden (Steiner & Atzmüller, 2006).

Die Größe der Vignettensets ist davon abhängig, wie viele Vignetten ein Einzelner beantworten kann, wobei Berger et al. (2009) pauschal eine Anzahl von zwanzig Vignetten pro Probanden als sinnvoll erachtet. (Auspurg, 2009, S. 192) schreibt hierzu differenzierter: „Im Hinblick auf die Robustheit und Zuverlässigkeit von Schätzungen ist es einerseits günstig, möglichst viele unterschiedliche Vignetten beurteilen zu lassen. Andererseits steigt die Effizienz von Schätzungen aber ebenso mit der Menge an Urteilen pro einzelne Vignette.“ Um eine ausreichend große Datengrundlage für die spätere statistische Auswertung zu erhalten, wurde entschieden, jeden einzelnen Lichteffect (d.h. jede Vignette) mindestens 20-mal bewerten zu lassen. Daraus errechnen sich bei 90 Vignettensets 1800 benötigte Einzelbewertungen. In iterativen Pretests wurde eine geeignete Anzahl an Vignetten gesucht, die in einem angemessenen zeitlichen Rahmen ohne Qualitätsverluste durch zu hohe Anstrengung von einem Probanden bearbeitet werden konnte. Dabei konnte die von Berger et al. vorgeschlagene Anzahl von 20 Vignetten als geeignet bestätigt werden. Für gewöhnlich bearbeiten Gruppen von Probanden dasselbe Vignettenset (Steiner & Atzmüller, 2006), wobei sich die Anzahl der Sets aus „der Anzahl der zu verteilenden Vignetten, dividiert durch die Anzahl der Vignetten pro Befragten (d.h. der Größe der Sets)“ errechnet (Beck &

Opp, 2001, S. 292). Übertragen auf die vorliegenden Parameter ergibt sich folgende Rechnung:

$$\text{Anzahl der Sets} = \frac{\text{Gesamtanzahl Lichteffekte}}{\text{Lichteffekte pro Proband}} = \frac{90}{20} = 4,5$$

Allerdings wurde befürchtet, dass sich die Einteilung in starre Sets und die Verteilung eines einzelnen Sets an mehrere Probanden auf die erhobenen Daten auswirkt und zu einer strukturellen Verfälschung der statistischen Auswertung führen könnte. Um dies zu vermeiden, wurde bei der Auswahl der Vignetten auf das Prinzip der Zufallsziehung zurückgegriffen (Frodermann et al., 2013): Für jeden Probanden wurden 20 der insgesamt 90 Lichteffekte ausgewählt. Die Ziehung erfolgte ohne Zurücklegen (damit kein Proband einen Lichteffekt doppelt gezeigt bekommt) und die Reihenfolge der Ziehung wurde für den jeweiligen Studien-durchlauf übernommen.

Die randomisierte Reihenfolge innerhalb eines Durchgangs erschien von besonders großer Bedeutung, da der Einfluss der Dauer einer Fahraufgabe auf das periphere Sehen belegt ist (Rogé et al., 2004) und keiner der Lichteffekte von vornherein durch den Ablauf benachteiligt werden sollte.

Das Vorgehen der Zufallsziehung wird aufgrund des großen organisatorischen Aufwands häufig kritisch betrachtet (Beck & Opp, 2001, S. 283f; Berger et al., 2009, S. 305; Steiner & Atzmüller, 2006), aber die Kosten und der Verwaltungsaufwand konnten aufgrund der Umsetzung verschiedener Software-Komponenten und der dadurch entstehenden Automatisierung begrenzt werden, so dass die Methode organisatorisch gut umgesetzt werden konnte (für die Beschreibung des Vorgehens siehe Kapitel 10.3 und 10.4).

10.2.3 Abhängige Variablen

Die Einflussnahme der Faktoren wurde anhand von insgesamt vier abhängigen Variablen untersucht. Für die Erhebung der Daten bot sich ein Versuchsdesign an, in welchem die beiden metrischen Messgrößen - Reaktionszeit und visuelle

Beanspruchung - parallel erhoben wurden, denn die Erfassung der Reaktionsgeschwindigkeit auf die Lichteffekte bedingte eine Fokussierung des Blicks ähnlich wie bei einer Fahraufgabe. Diese Fokussierung stellte der Primärtask dar, der gleichzeitig zur Messung der visuellen Beanspruchung beim Auftreten eines Lichteffekts diente.

Als Methode zur Messung der **visuellen Beeinflussung** wurde der Critical Tracking Task (CTT) ausgewählt (Jex, McDonnell, & Phatak, 1966b), welcher gelegentlich bei BMW für die Durchführung von Studien ohne vollständige Fahrsimulation genutzt wird. Während der Bearbeitung der digitalen Aufgabe muss der Proband einen Balken auf einem Bildschirm stabilisieren, so dass er möglichst kaum von einer vordefinierten Zielposition abweicht und es zu keinem Kontrollverlust kommt. Entwickelt wurde der Test bei der NASA (Jex & McDonnell, 1967; Jex, McDonnell, & Phatak, 1966a), und er wurde seitdem unter anderem genutzt, um Experimente im Bereich der Psychomotorik-Tests für Piloten und Astronauten durchzuführen oder die Auswirkungen von Drogen sowie Schlafentzug zu erforschen (Elmenhorst et al., 2009; Klein & Jex, 1975; Ramaekers et al., 2006).

Die für diese Forschungsarbeit relevanteste Verwendung des CTTs stammt von Petzoldt und Kollegen, welche den CTT als Primäraufgabe zur Messung der „Driver Distraction“ ausgelöst durch IVIS validieren (Petzoldt, Bellem, & Krems, 2014). Sie führten mehrere Studien durch, um die Eignung der Methode zu untersuchen und konnten signifikante Änderungen in den Ergebnissen des CTTs bei Manipulation der Sekundäraufgabe feststellen. Darüber hinaus reflektierte der CTT-Unterschiede zwischen visueller und kognitiver Distraction sowie unterschiedliche visuelle Distaktionsgrade. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass der CTT nicht hinreichend geeignet ist, um kognitive Beeinflussung zu messen, aber sehr gut zur Messung visueller Beeinflussung geeignet ist.

Das Vorgehen von Petzoldt et al. orientierte sich an dem von Mattes & Hallen (2008), die zuvor den Lane Change Task (LCT) als Methode zur Messung von Driver Distraction etablierten (siehe auch Mattes, 2003). Die Aufgabe der Probanden beim LCT ist es, einer geraden Fahrbahn zu folgen und durch Verkehrsschil-

der angekündigte Spurwechsel durchzuführen. Überlegungen, den weiter verbreiteten und ISO-zertifizierten LCT als Primäraufgabe für die Probandenstudien im Rahmen dieser Doktorarbeit auszuwählen, wurden verworfen (ISO 26022:2010-09, 2010). Das Aussehen sowie die Steuerung des LCTs erinnern stark an eine reale Fahraufgabe, deshalb wurde befürchtet, dass bei der Bewertung der Lichteffekte mögliche Interpretationen zum aktuellen Fahrkontext hätten entstehen können. Ziel war es jedoch, eine von der Fahrsituation unabhängige Bewertung der Lichteffekte zu erheben, daher wurde der CTT als Methode zur Messung der visuellen Beeinflussung präferiert. Dieser liefert zudem kontinuierliche, feingranulare Daten, welche eine exakte Auswertung zu jedem möglichen Auftretenszeitpunkt eines Lichteffekts ermöglicht.

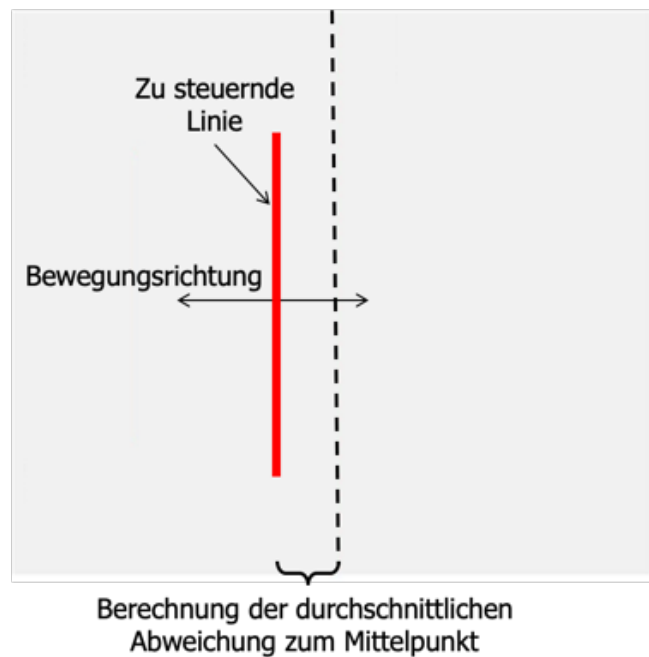


Abbildung 35: Schematische Darstellung des CTTs. Ziel ist es, die rote Linie möglichst mittig auf der schwarz-gestrichelten Linie auszupendeln.

Die zweite abhängige Variable ist die **Reaktionszeit**, die als Zeit zwischen dem Auftreten eines Lichteffekts und der ersten Wahrnehmung durch den Probanden definiert ist. Der Proband teilt seine Reaktion über einen manuellen Tastendruck mit, welcher zur automatischen Speicherung der vergangenen Zeit führt. Die Aufzeichnung der Reaktionszeit beginnt sobald die erste LED zu leuchten beginnt, dabei ist es egal, ob sich der Lichteffekt von einer Seite annähert oder eine Fläche gleichzeitig aufleuchtet.

Durch einen in Studiensetting integrierten, digitalen Fragebogen wurden die beiden Variablen **Kategorisierung** und **Rating** erhoben.

10.2.4 Laborstudie

Für die Versuchsdurchführung wurde eine Laborumgebung gewählt, welche die notwendigen Voraussetzungen erfüllte, um eine Kontrolle der Deckenbeleuchtung hinsichtlich Beleuchtungsstärke und Farbtemperatur zu gewährleisten. So konnte sichergestellt werden, dass die gezeigten Lichteffekte stets bei gleicher Umgebungsbedingung erlebt wurden. Bei konstanter Leuchtdichte der Lichteffekte sollte so Helligkeit als einflussnehmender Parameter ausgeschlossen werden. Zudem gewährleistete die Laborstudie im Vergleich zu einer Feldstudie das notwendige Maß an Sicherheit, um die Beeinflussung der Lichteffekte auf den Probanden und dessen (Fahr-)Verhalten zu untersuchen, ohne den Probanden selbst zu gefährden.

10.3 Vorbereitung

Im Folgenden werden die notwendigen Vorbereitungen für die Durchführung der Probandenstudie beschrieben, wobei die zusammengehörigen Tätigkeiten in einzelnen Abschnitten zusammengefasst sind. Inwiefern dabei die drei Gütekriterien von Evaluationsmethoden – Objektivität, Reliabilität, Validität – eingehalten werden, wird an den entsprechenden Stellen erläutert (Moser, 2012, S. 224).

Die Vorbereitung der Studie (technischer Aufbau und Programmierung) wurde mit Unterstützung von Bernd Pichon (zum damaligen Zeitpunkt Praktikant der BMW AG) durchgeführt.

10.3.1 Hardwareaufbau

Zentraler Bestandteil der Studie stellte der Hardwareprototyp dar, an welchem die Lichteffekte bewertet werden konnten. Diese Sitzkiste soll dem Probanden ein Erlebnis bieten, welches dem eines Realfahrzeugs möglichst nahekommt. In

Abbildung 36 ist der verwendete Teilaufbau zu sehen, welche auf dem 2015 erschienenen 7er BMW basiert und aus der ersten Sitzreihe ohne Dach, jedoch inklusive Türen, besteht. Der Aufbau steht auf Rollen, so dass er leicht zu verschiedenen Testumgebungen transportiert werden kann. Die Sitzkiste stellt aufgrund der realitätsnahen Abbildung sicher, dass die Ergebnisse auf Realfahrzeuge übertragen werden können (Einhaltung der Validität).



Abbildung 36: Sitzkiste mit LED-Streifen auf der Instrumententafel (1) sowie in beiden Türen (2)

Es wurde die Möglichkeit in Betracht gezogen, die Untersuchungen der Wahrnehmung von Lichteffekten mittels der kostengünstigeren und flexibleren VR-Darstellung zu realisieren. Allerdings ist nicht hinreichend belegt, ob sich die Bewertungen von Licht in VR auf die reale Welt übertragen lassen. Daher wurde im Sinne der Generalisierbarkeit der Studienergebnisse auf diese Option verzichtet.

Für die Darstellung der Lichteffekte wurde ein umlaufender LED-Streifen integriert. In Abbildung 36 ist dieser auf Brüstungshöhe als weiße Linie erkennbar. Um eine möglichst gute Sichtbarkeit zu garantieren, wird eine Verortung von Displays (in unserem Fall eines einzeiligen Displays) so nahe wie möglich am nach vorne gerichteten Blick des Fahrers empfohlen (National Highway Traffic Safety Administration, 2013). Die Sinnhaftigkeit dieser Verortung wird in Abbildung 37 anhand verschiedener Fahrerperspektiven verdeutlicht. Die Bilder zeigen den 45°-Blickwinkel von drei verschiedenen Personen basierend auf dem RAMSIS-Modell (van der Meulen & Seidl, 2007) in einem 7er BMW (Baugruppe

G11, Baujahr 2015). Ähnliche Positionierung von Lichtstreifen lassen sich auch in anderen Studie, z.B. bei Löcken et al. (2015) oder Borojeni et al. (2016) finden.



Abbildung 37: Blickperspektiven aus Sicht der RAMSIS-Modelle. 90° in der horizontalen, 50° in der vertikalen Achse. Oben links: 5%-Perzentil Frau; oben rechts: 95%-Perzentil Mann; groß Mitte: 50%-Perzentil Mann; (Quelle: internes Arbeitsmaterial der BMW AG)

Insgesamt wurden für den umlaufenden Beleuchtungsstreifen 432 SK6812 RGBW-LEDs mit einem Abstand von 7 mm integriert, davon jeweils 100 in jeder Tür. Angesteuert wurden die LEDs über einen PixelGrabber, der graphischen Input auf die LEDs übertragen kann, wobei jede LED einem Pixel entsprach. Diese Form der Steuerung wurde von der Firma Usaneers¹ möglich gemacht, die hierfür sogenannte ArtNet Controller aus der Veranstaltungstechnik nutzten.

¹ <https://www.usaneers.de/>

Am Erlebnismodell wurde neben der Integration der Beleuchtung noch eine Veränderung am Lenkrad durchgeführt. Dieses wurde zur Steuerung der Studien-GUI sowie zur Erfassung der Daten der abhängigen Variablen benötigt. Über einen Arduino Micro wurden die Lenkradtasten mit dem Versuchs-PC verbunden und fortan als simulierte Tastaturevents behandelt. Insgesamt wurden die vier in Abbildung 38 markierten Lenkradtasten ausgelesen: die rot-markierten Tasten wurden zur Navigation zwischen den einzelnen Screens sowie zur Steuerung des CTT verwendet; die blau markierten Tasten wurden zum Ausfüllen von Fragebogen und zur Erfassung der Reaktion bei Erkennen eines Lichteffekts benötigt. Für die Reaktionszeitmessung spielte es keine Rolle, ob die rechte oder linke Taste zuerst gedrückt wurde. Es wurde stets die erste Reaktion aufgezeichnet, um eine Beeinflussung durch Rechts- oder Linkshändigkeit ausschließen zu können (Einhaltung der Objektivität und der Validität).



Abbildung 38: Lenkradtastenbelegung: rot-markiert = Navigation zwischen den Screens, Steuerung CTT; blau-markiert = Ausfüllen von Fragebögen, Reaktionszeitmessung.

10.3.2 Ansteuerung der LEDs

Eine der Kernkomponenten im Studiensetting stellt die Java Applikation dar, welche den graphischen Inhalt zur Ansteuerung der LEDs bereitstellt. In dieser als *Effektanzeige* bezeichnete Anwendung lassen sich die einzelnen Bausteine eines Lichteffekts auswählen und der daraus entstehende Lichteffekt wird live auf eine Canvas gezeichnet. Der Screenshot in Abbildung 39 lässt die drei Abschnitte der Anzeige – Tür links, Instrumententafel und Tür rechts - optisch anhand der grünen Markierungen erkennen. Diese simulieren die Trennbereiche zwischen

den Türen und dem vorderen Bereich, der sogenannten „Königsfuge“, in welchen auf einigen Zentimeter keine LEDs verbaut sind. Um eine homogene Bewegung zu erzielen, wurden in der Software „Tunnel“ integriert, d.h. ein bewegter Lichteffekt springt nicht sofort von einem LED-Streifen auf den anderen, sondern wartet die Zeit die er bei gleichbleibender Geschwindigkeit in einem Tunnel bräuchte, so dass eine über die gesamte Strecke flüssige Bewegung entsteht.

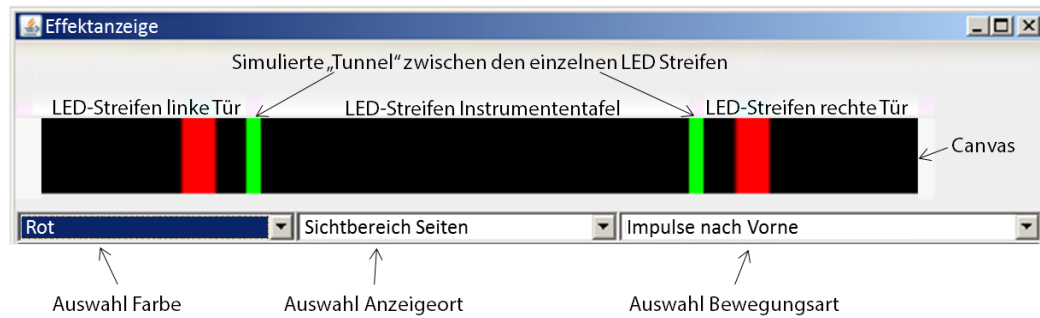


Abbildung 39: Java-Anwendung „Effektanzeige“, welche die graphischen Inhalte zur Ansteuerung der LEDs generiert

Ursprüngliche Bestrebungen, die Effektanzeige in JavaScript auf Basis des umfangreichen HTML5-Animationspakets umzusetzen, sind aufgrund von Performanz-Problemen gescheitert. Es kam zu ruckelnden Bewegungen und Sprüngen in der Anzeige, welche sich deutlich auf die LEDs übertragen haben. In Java konnten diese fehlerhaften Darstellungen behoben werden.

Allerdings blieb ein weiteres Problem bestehen, welches auf der unterschiedlichen Beschaffenheit der LEDs und des Monitors begründet ist. Stellt man ein sinusförmiges Auf- und Abpulsen einer Farbe dar, so wird das Erscheinen bzw. Verschwinden des Lichteffekts zwar auf dem Monitor korrekt dargestellt, allerdings kommt es zu Fehlern bei der Übertragung auf die LEDs. Die unteren Graustufen des Bildschirms werden auf den LEDs bereits als schwarz angezeigt, so dass es während der Sinusbewegung zu einer längeren „Aus“-Phase kommt. Die Amplitude der Pulsbewegung pro Farbe wurde auf dem Monitor entsprechend angepasst, so dass der Sinneseindruck einer Sinusförmigen Bewegung auf den LEDs entstand.

Die Frequenz der Pulsbewegung sowie die restlichen implementierten Geschwindigkeiten der Bewegungsabläufe sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Auflistung der Geschwindigkeiten der Lichtbewegungen

Bewegungsart	Geschwindigkeit
Pulsen (bewegter Sinus)	0,2 Hz
Blinken (Erscheinen + abdimmern gemäß bewegter Sinus)	1,0 Hz
Impulse nach vorne/hinten	50 cm/s
Auffüllen nach vorne	50 cm/s

Während *Pulsen* und *Blinken* über eine gesamte Fläche angezeigt werden, gilt es bei den richtungsorientierten Bewegungen *Impulse nach vorne/hinten* und *Auffüllen nach vorne* zu beachten, dass die Bewegung als flüssig wahrgenommen wird. Auf die Einhaltung der in Kapitel 4.7 beschriebene Untergrenze zur Wahrnehmung einer Scheinbewegung wurde geachtet.

10.3.3 Speicherung der Daten

Alle im Test erhobenen Daten zu den abhängigen Variablen wurden in einer gemeinsamen SQL-Datenbank gespeichert. Die gleiche Datenbank wurde jedoch auch benutzt, um das faktorielle Studiendesign und dementsprechend die Ansteuerung der Lichteffekte über die Java-Anwendung zu verwalten. Abbildung 40 zeigt das Entity-Relationship-Diagramm der aufgesetzten Datenbank. Zentraler Bestandteil ist die Tabelle *proband_to_effect*, in welcher die Testsets abgespeichert sind. Diese wurden zuvor mittels eines separaten Algorithmus ermittelt, der für jeden Probanden 20 zu bewertende Lichteffekte zufällig, ohne Zurücklegen zog. Die Zusammensetzung der Effekte aus den einzelnen Faktoren wird wiederum in der Tabelle *effects* verwaltet.

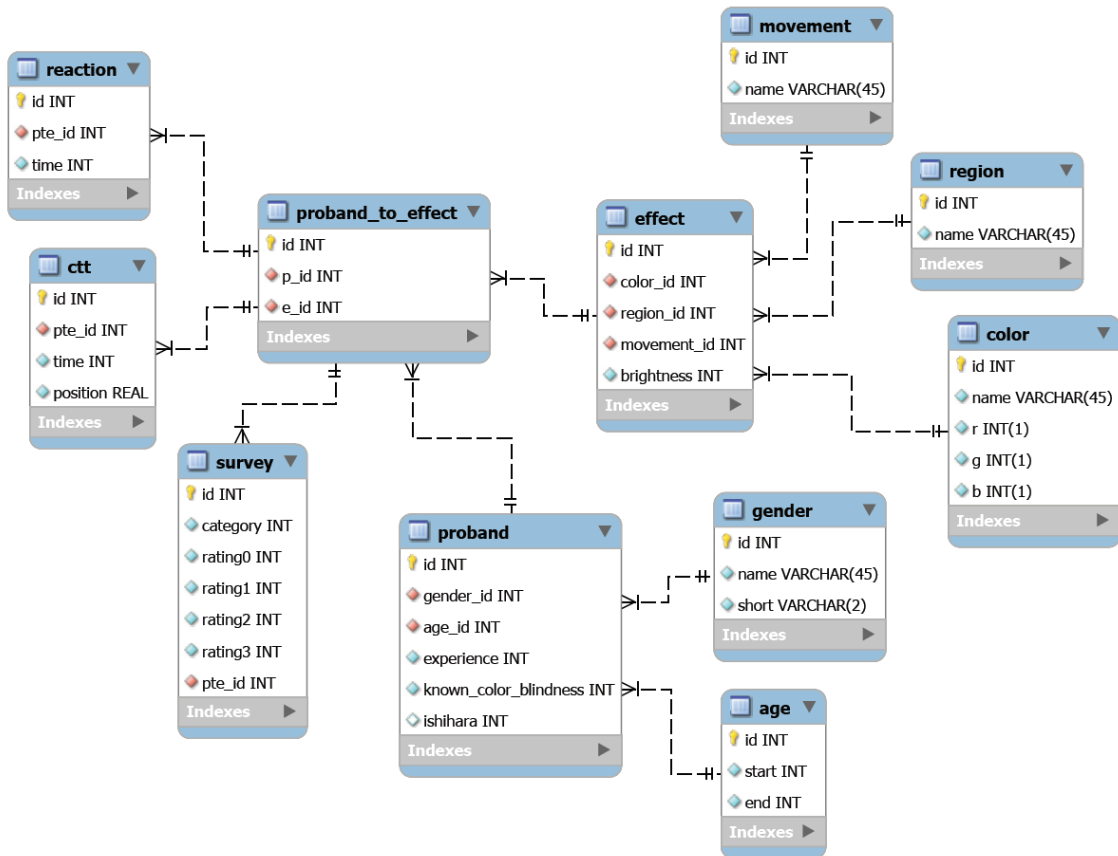


Abbildung 40: Struktur der verwendeten SQL-Datenbank, abgebildet in Form eines Entity-Relationship-Diagramms

Zu Beginn jedes Studiendurchgangs musste eine neue Probanden-ID vergeben werden, die zur entsprechenden Testkonfiguration führte und das richtige Abspeichern der Daten ermöglichte.

Das Speichern aller Daten in einer SQL-Datenbank legte den Grundstein zur quantitativen Auswertung: Die Daten konnten über SQL-Anfragen kombiniert und als .csv-Dateien zur weiteren Verarbeitung in Statistik-Softwares abgespeichert werden.

10.3.4 Integration des Critical Tracking Tasks zur Messung der visuellen Beeinflussung

Der CTT stand sowohl als Java-Programm als auch auf Codebasis zur Verfügung und es wurde zunächst überlegt, die fertige Software in das Studien-Setup zu integrieren. Allerdings hätten hierfür zum einen Änderungen am Java-Code vorgenommen werden müssen, um die Task-Ergebnisse in die Datenbank speichern

zu können und zum anderen hätte sich die Nutzer keine einheitliche GUI präsentiert, da zwischen dem Hauptstudiensetting basierend auf JavaScript und der Java-Anwendung gewechselt werden hätte müssen. Daher wurde der CTT inklusive der Anbindung an die SQL-Daten in JavaScript implementiert und so eine nahtlose Integration in das bestehende User Interface sichergestellt.

Die Schwierigkeit der Primäraufgabe lässt sich über den λ -Wert anpassen, welcher das Level der Instabilität repräsentiert (Jex et al., 1966a). Basierend auf der Empfehlung von Petzoldt et al. (2014) wurde $\lambda = 1,5$ verwendet und im Rahmen des eigenen Studiensettings in Pretests validiert. Der Lambda-Wert gestaltete den Task vor allem für Nutzer ohne Erfahrung im Bereich von Videospiele durchaus anspruchsvoll, aber nach einer Eingewöhnungsphase konnte die Spielaufgabe von allen ohne den Eindruck einer Überforderung erfüllt werden.

Für die Anzeige des CTTs sowie weiterer relevanter Inhalte wurde vor der Sitzkiste ein Monitor mit einer Bildschirmdiagonale von 70 Zoll und in einem Abstand von 170 cm positioniert.

10.3.5 Zusammenspiel der Software

Die bisher aufgeführten Teilaspekte der Software mussten für einen reibungslosen Ablauf der Studiendurchführung miteinander verknüpft werden. Dadurch konnte zum einen der Aufwand für die Betreuung der einzelnen Komponenten gesenkt und gleichzeitig das Fehlerrisiko durch vergessene oder fehlerhafte Bedienung minimiert werden. Das Zusammenspiel wird in Abbildung 41 visualisiert, wobei die Kreise die beteiligten Hardware-Elemente repräsentieren.

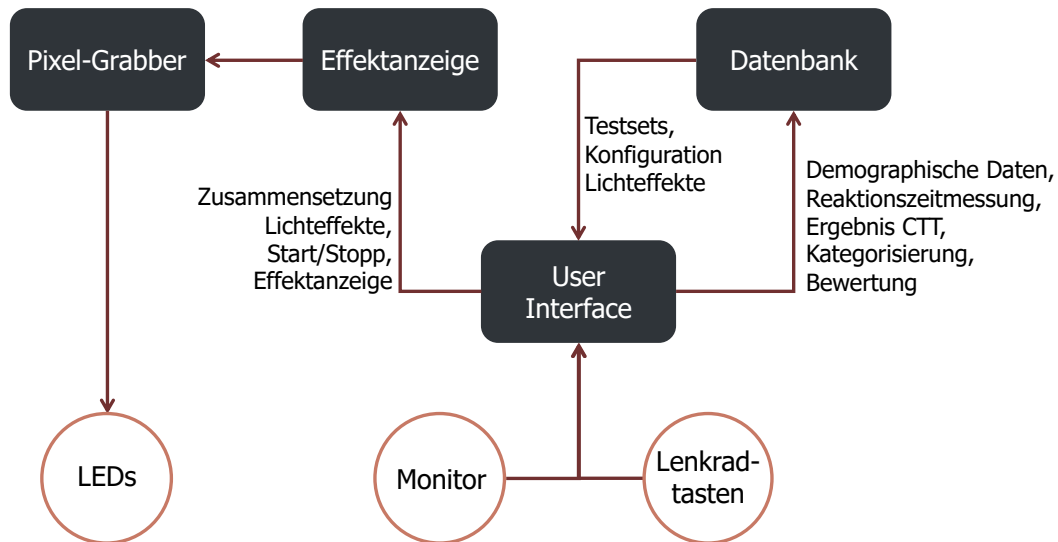


Abbildung 41: Darstellung des Zusammenspiels der beteiligten Software-Komponenten

Das Zentrum des Softwarezusammenspiels stellte das *User Interface* dar, welches zum einen die für die Teilnehmer relevanten HTML-Inhalte auf dem Monitor zeigte (z.B. demographischer Fragebogen, CTT), zum anderen über die zugehörige Konsole die Steuerung des Testablaufs ermöglichte. Zu Beginn jeden Testdurchgangs war die Eingabe einer neuen ID nötig, um mittels Python das zugehörige Testset inkl. der Konfiguration der Lichteffekte aus der Datenbank zu laden. Nach Freigabe der Nutzerschnittstelle mittels des Aufrufs einer `start()`-Methode, konnten sich die Probanden unter zu Hilfenahme der Lenkradtaste eigenständig durch das Interface navigieren und erhielten dort alle die gleiche Menge an relevanten Informationen und Instruktionen (Einhaltung der Objektivität). Das Interface triggerte ab Erreichung des iterativen Testteils eigenständig das Starten und Stoppen des jeweiligen Effekts, dessen Zusammensetzung aus der Datenbank über das Interface mitgeschickt wird. Der auf die Canvas der Effektanzeige gezeichnete Effekt wird live vom Pixel-Grabber erfasst und an die LEDs entsprechend angesteuert. Eingaben aus dem demographischen Fragebogen sowie die erfassten Bewertungen und Reaktionen zu jedem Lichteffekt wurden pro ID automatisiert in die Datenbank gespeichert. Genauere Beschreibungen zum Ablauf eines Testdurchgangs aus Perspektive eines Probanden sind im anschließenden Abschnitt 10.4 zu finden.

10.3.6 Helligkeitsabstimmung

Zwei wichtige Parameter, welche es in der Studie zu kontrolliert galt, sind die Helligkeit der Testumgebung und die der untersuchten Lichteffekte. Wie bereits im Kapitel 6.4 erläutert, ist die Wirkung von Lichteffekten abhängig von verschiedenen anderen Größen, wobei Helligkeit wohl einer der komplexesten darstellt. Da sich die vorliegende Forschungsarbeit auf die drei Parameter Farbe, Anzeigort und Bewegungsart fokussiert, gilt es, die Helligkeit als Konstante zu kontrollieren und so ein Einwirken auf die Testergebnisse auszuschließen (Einhaltung der Validität). Allerdings sollen die konstanten Werte für den Raum und die LEDs nicht zufällig gewählt werden, sondern einen realistischen Ausschnitt aller möglichen Helligkeitsbedingungen repräsentieren. Die Ergebnisse der Studie sind nur in Abhängigkeit dieses Helligkeitsverhältnisses interpretierbar.

Die Raumhelligkeit der Testumgebung sollte aus verschiedenen strategischen und pragmatischen Gründen einem Tageslichtsetting entsprechen. Der erste Grund ist, dass wenn Lichteffekte unerlässliche Informationen und Warnungen anzeigen sollen, diese zu jeder Tages- und Nachtzeit sichtbar sein müssen. Die Tagsichtbarkeit ist aufgrund der benötigten höheren Helligkeiten komplexer als eine Darstellung für Fahrten bei Dunkelheit, weswegen hierzu bisher weniger Daten vorliegen und die Studie einen ersten Einblick geben soll. Des Weiteren vermied die helle Raumbeleuchtung die Notwendigkeit einer Dunkeladaption und verhinderte eine Blendung durch den Monitor vor der Sitzkiste, welcher essenzielle Studieninhalte anzeigte. Zuletzt hätte bei geringerer Beleuchtungsstärke im Raum die Leuchtdichte der LEDs angepasst werden müssen, um ebenfalls eine Blendung zu vermeiden. Das Einschränken der LEDs auf ein Minimum ihrer Leistungsfähigkeit hätte die Qualität der Darstellung mancher Effekten beeinträchtigt, was auch durch die Verwendung eines Tageslichtsettings umgangen werden konnte.

Um die Helligkeit für das Umgebungslicht festzulegen, wurde zunächst betrachtet, welche Beleuchtungsstärken tagsüber bei verschiedenen Wetterbedingungen vorherrschen. Bei Boyce (2014, S. 9) lassen sich folgende Werte finden: für einen klaren Himmel im Sommer in gemäßigten Zonen (das schließt Deutschland ein)

werden etwa 100,000 lx angegeben; ist der Himmel bewölkt, reduziert sich der Wert auf 16,000 lx. Für die Untersuchung von Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum muss aber berücksichtigt werden, dass die Außenhülle des Fahrzeugs für Gewöhnlich für eine zusätzliche Verdunkelung sorgt. Da die in der Studie verwendete Sitzkiste kein Dach aufzuweisen hat, welches für eine realistische Einschränkung der Beleuchtung sorgen würde, muss die Reduzierung der Helligkeit bei der Festlegung der Beleuchtungsstärke berücksichtigt werden. Als Grundlage hierfür werden die Werte von Wichtrey (2017) verwendet, welche Messungen an verschiedenen Positionen im Fahrzeug-Interieur zu unterschiedlichen Tageszeiten und Wetterbedingungen in München durchgeführt hat. Ein Abgleich der Messergebnisse der Bereiche, an welche die LED-Streifen montiert wurden, mit den Möglichkeiten, die die Raumbeleuchtung auf der Fläche der Studiendurchführung boten, führte zu einer Helligkeitseinstellung, welche einem bewölkten Vormittag entsprach. Abbildung 42 zeigt schematisch die Vermessung der Lichtquelle im Versuchsraum. Es handelte sich dabei um einen Lichtteller mit einem Durchmesser von 4 m und einer Entfernung vom Boden von 2,65 m. Die Beleuchtungsstärke wurde senkrecht zur Decke, in etwa auf Augenhöhe einer in einem Fahrzeug sitzenden Person mit 170 cm Körpergröße gemessen. Die Sitzkiste wurde mittig unter dem Lichtteller positioniert, so dass eine konstante Beleuchtungsstärke von ungefähr 950 lx vorherrschte.

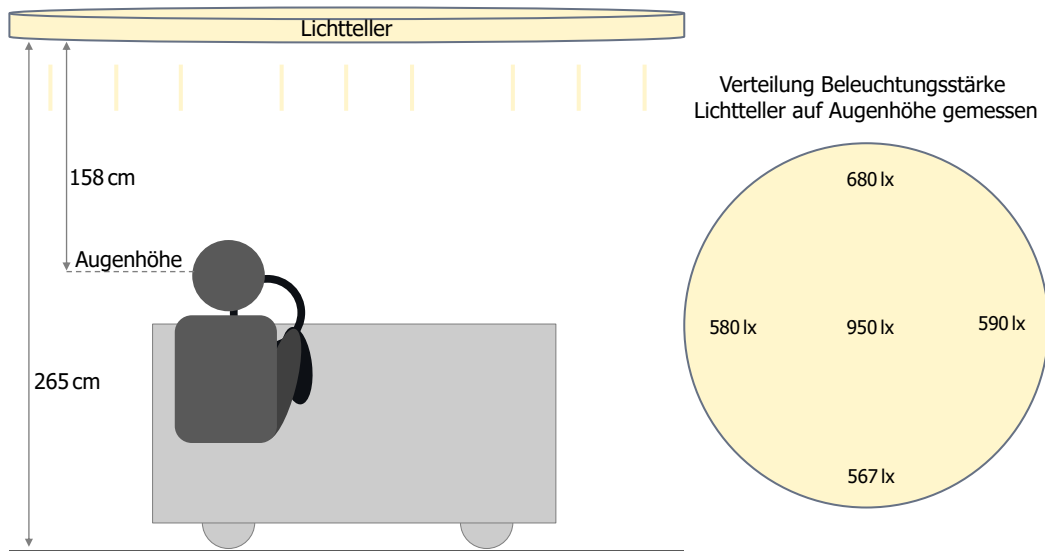


Abbildung 42: Schematische Darstellung der Lichtkondition im Versuchsraum für eine Person von 170 cm Körpergröße mit eingerichteten Fahrersitz.

Die zweite festzulegende Helligkeit ist die der LED-Streifen. Um eine Vergleichbarkeit der einzelnen Lichteffekte zu ermöglichen, sollten alle gezeigten Farben hinsichtlich der Helligkeit kalibriert sein (Einhaltung der Reliabilität). Hierfür wurde vom betreuenden Umfeld bei BMW ein Gleichsetzen der Leuchtdichte über alle Farben empfohlen. Als Richtwertwert dienten 1000 cd/m^2 , welche in einem BMW internen Group Standard als Beleuchtungsstärke für Tagablesbare Funktionsanzeigen empfohlen werden. Eine kritische Reflektion des gewählten Vorgehens nach Durchführung und Auswertung der Studie findet in Kapitel 11.7 statt).

Das erste Vermessen des LED-Streifens auf einem ca. 35 cm langem Messabschnitt aus dem Sehwinkel eines Fahrers (Abstand Messpunkt – Kamera ca. 85 cm), zeigt für die einzelnen Farben stark schwankende Messwerte, welche in Tabelle 5 zusammengefasst sind. Die Messung wurde mit dem voreingestellten Mischverhältnis der LED-Kanäle vorgenommen ($R = 70\%$, $G = 100\%$, $B = 30\%$), während für die Farbwerte jeweils das Maxima der einzelnen Ansteuerungskanäle (R, G, B) verwendet wurden. Gemessen wurde mit der Leuchtdichte- und Farbmesskamera *Technoteam LMK 98-4 color*.

Tabelle 5: Vermessung der Leuchtdichte der Sitzkiste
(Mischverhältnis der LEDs: R = 70%, G = 100%, B = 30%)

Farbe (Werte der RGB-Ansteuerung)	Gemessene Leuchtdichte
Weiß (255, 255, 255)	10800 cd/m ²
Gelb (255, 255, 0)	4500 cd/m ²
Rot (255, 0, 0)	1400 cd/m ²
Grün (0, 255, 0)	3100 cd/m ²
Blau (0, 0, 255)	400 cd/m ²

Die gemessenen Leuchtdichtewerte schwanken zwischen 400 cd/m² und 10800 cd/m², wobei Blau den geringsten Wert erzielte. Die Messungen der Farben Rot, Grün und Gelb zeigen anschaulich, dass sich die Werte der einzelnen Kanäle addieren: Die gemessene Leuchtdichte der roten LED (1400 cd/m²) ergibt addiert um den Wert der grünen LED (3100 cd/m²) den Wert der Farbe Gelb (4500 cd/m²). Dass diese Rechnung nicht für den Wert der Farbe Weiß fortgesetzt werden kann, liegt an der Verwendung der RGBW-LEDs und der daraus resultierenden Unstimmigkeit in der Ansteuerung. Der Pixelgrabber greift die R-, G- und B-Werte direkt vom Monitor ab, wobei hierbei kein Wert für W (=White/Weiß) enthalten ist. Das Ansteuerungsmodul der LEDs (der ArtNet-Controller) mischt jedoch automatisch Licht der weißen LED bei, sobald die drei übrigen RGB-LEDs durch gemeinsame Ansteuerung rechnerisch ebenfalls Weiß erzeugen. Dieses Vorgehen führt zu der deutlich höheren Leuchtdichte der Farbe Weiß (255, 255, 255) von 10800 cd/m².

Mit dem Ziel, alle Farben auf einen konstanten Helligkeitswert zu bringen, hätten die übrigen Werte auf das Niveau der Farbe Blau heruntergeregelt werden können. Jedoch lag dieses weit unter dem Ziel von 1000 cd/m² und aufgrund der geringen Helligkeitsrange wurde das bereits bei der Beschreibung der Ansteuerungssoftware aufgetretene Problem der längeren „Aus“-Phase während der Si-

nusbewegung des Pulsens verstärkt. Deswegen wurde daraufhin versucht, gezielt die Leuchtdichte für Blau zu erhöhen. Eine erste Möglichkeit war das Auflösen des Mischverhältnisses, wodurch alle Kanäle gleichmäßig angesteuert wurden und Blau nicht länger künstlich eingeschränkt wurde. Da die Messwerte jedoch immer noch unter dem Ziel zurückblieben, wurde zudem als weitere Maßnahme ein geringer Anteil an Rot und Grün beigemischt, um die Leuchtdichte durch Addition weiter zu erhöhen. Die finalen Messergebnisse sind in Tabelle 6 festgehalten. Es ist ersichtlich, dass die Leuchtdichtewerte sich nicht exakt gleichen, was unter anderem durch Einschränkungen bei der Feinheit der Ansteuerung (nur ganze Zahlen als RGB-Werte möglich) sowie leichte Schwankungen in den Messungen der Kamera zu erklären sind. Die geringfügigen Abweichungen wurden im Verhältnis zur Gesamthelligkeit als vernachlässigbar bewertet.

Tabelle 6: Vermessung Leuchtdichte der Sitzkiste (Mischverhältnis der LEDs: R= 100%, G = 100%, B= 100%)

Farbe mit RGB Mischverhältnis	Leuchtdichte
Weiß (33, 33, 33)	930 cd/m ²
Gelb (78, 78, 0)	970 cd/m ²
Rot (255, 0, 0)	915 cd/m ²
Grün (0, 100, 0)	945 cd/m ²
Blau (10, 10, 255)	920 cd/m ²

10.4 Durchführung

Die Probanden für die Studie wurden hausintern im Forschungs- und Entwicklungszentrum der BMW AG in München rekrutiert. Es wurde darauf geachtet, eine gleichverteilte Stichprobe von möglichst fachfremden Laien im Bereich Lichtentwicklung/-bewertung auszuwählen. Folgende Bedingungen mussten von den Probanden erfüllt sein (ähnlich zu finden bei Perz, 2010, S. 27):

- Normale oder zu normal korrigierte Sehkraft, keine Farbfehlsichtigkeit.
- Keine Vorkenntnisse zur Entwicklung von Interieur- oder Exterieur-Licht.
- Keine Neigung zu epileptischen Erscheinungen, die durch blinkende Lichter und Muster, beispielsweise beim Betrachten von Fernsehbildern oder beim Spielen von Videospiele, ausgelöst werden.

Die Farbfehlsichtigkeit der Probanden wurde vor Ort zu Beginn der Studie zusätzlich mittels einiger digitaler Ishihara-Tafeln überprüft (Hoffmann & Menozzi, 1999).

Insgesamt dauerte ein Testslot pro Person eine Stunde, wobei der eigentliche Teil der Datenerfassung ca. 40 Minuten beanspruchte. In dieser Zeit sieht und bewertet jeder Proband 20 einzelne Lichteffekte. Ursprünglich war geplant, jeden der 90 Lichteffekt 20-mal bewerten zu lassen, wozu 90 Probanden benötigt würden. Letztlich konnten aber aufgrund einer großen Teilnahmebereitschaft 108 erfolgreiche Studiendurchgänge durchgeführt werden. Für jeden Effekt liegen somit 24 Einzelbewertungen vor. Die zuvor nicht eingeplanten 18 Testsets, welche im Rahmen des Faktoriellen Designs benötigt wurden, konnten nachgeneriert werden.

Zu Beginn des Tests, stellte der Proband sich den Fahrersitz auf seine übliche Fahrposition ein. Auf eine über alle Probanden gleiche Verortung des Augpunkts wurde verzichtet, da dies nicht der realen Situationen im Straßenverkehr entsprechen hätte. Der Monitor zeigte anfangs einen Begrüßungsscreen sowie ein Erklärungsbild zur Belegung der Lenkradtasten. Nach einleitenden Worten durch den Studienleiter und zum ersten vertraut machen mit der Steuerung der Bedienelemente, musste der Proband einen digitalen Fragebogen zur Erfassung der demographischen Daten ausfüllen. Der Fragebogen beinhaltete zusätzlich eine Eigeneinschätzung zur Erfahrung mit dynamischen Innenlicht als auch die Frage nach der eigenen Lieblingsfarbe.

Demographische Daten

Geschlecht

Maennlich Weiblich Sonstiges

Alter

0 bis 20 21 bis 30 31 bis 40 41 bis 50 51 bis 99

Erfahrung mit sich bewegendem, also dynamischem Innenlicht


Keine Viel

Lieblingsfarbe

Weiss Gelb Rot Blau Gruen

Sind Farbfehlsichtigkeiten bekannt?

Nein Ja



Erklärung

1 Vorherige Frage 3 Eingabe ändern
2 Eingabe ändern 4 Nächste Frage

Abbildung 43: Digitaler Fragebogen zur Erfassung der demographischen Daten.

Es folgte eine Erklärung zum Ablauf der Studie, die Kalibrierung des Eye-Trackers und eine Probedurchlauf inklusive einer längeren Bearbeitung des CTTs zur Eingewöhnung.

Anschließend begann der eigentliche Datenerhebungsabschnitt mit 20 Schleifen, durch welchen sich die Probanden mit den Lenkradtasten autark und selbstbestimmt navigieren konnten. Bei Bedarf konnten Pausen eingelegt werden oder Rückfragen an den Studienleiter gestellt werden.

Eine Iteration der Datenerhebung startete stets mit der alleinigen Bearbeitung des CTTs. Nach einer zufällig variierenden Zeit zwischen 20s und 40s wird ein Lichteffect angezeigt und die Reaktion des Probanden erfasst. Die Teilnehmer spielen das Spiel für weitere 30 Sekunden und der Lichteffect wird in dieser Zeit kontinuierlich weiter angezeigt/wiederholt. Danach beenden sich Primäraufgabe und Lichteffect und es erscheint kurzer Fragebogen zur Bewertung des Effekts, einschließlich der Frage, welcher Kategorie der Proband den Lichteffect zuweisen würde.

11 Ergebnisse der Nutzerstudie

In den nachfolgenden Kapiteln sind die Ergebnisse der Studie zur Erhebung der Einflussnahme der getesteten Lichteffekte zusammengefasst. Die Kapitel teilen sich auf in die Erkenntnisse zur Kategorisierung (11.3), zu den Messungen der Reaktionszeit (11.4) sowie der visuellen Beeinflussung (11.5) und zuletzt zu den Ergebnissen der vier verschiedenen Kriterien des Fragebogens (11.6).

11.1 Erläuterungen zur Auswertung

Bevor ab Kapitel 11.3 die konkreten statistischen Auswertungen sowie die daraus resultierenden Ergebnisse zusammengefasst werden, wird im Folgenden ein kurzer Überblick über das Vorgehen der Datenauswertung sowie eine vorab durchgeführte, notwendige Bereinigung der Daten gegeben.

11.1.1 Allgemeines zur Datenauswertung

Durch die Organisation der Studie im Vignetten Design, ergibt sich, dass nicht jeder Proband alle Effekte bewertet hat, d.h. dass nicht zu jedem Effekt die gleiche Anzahl an Messungen der gleichen Personen vorliegen. In Abbildung 44 wird das Studiendesign beispielhaft für eine kleinere Anzahl an Probanden und Effekten visualisiert.

Proband	Effekt 1	Effekt 2	Effekt 3	Effekt 4	Effekt 5
1	x		x	x	
2	x	x			x
3		x	x	x	
4	x			x	x
5		x	x		x

Abbildung 44: Beispielhafte Darstellung des verkleinerten Vignetten Designs

Im dargestellten Fall hätte jeder der fünf Probanden drei der möglichen 5 Effekte getestet. Auf diesem Weg würde jeder Effekt dreimal von drei verschiedenen Personen eine Bewertung erhalten. Im tatsächlichen Studiendesign testeten 108 Personen je 20 von möglichen 90 Lichteffekten, woraus sich je 24 Einzelbewertungen pro Lichteffekt ergeben.

Wie in Kapitel 10.2 erläutert, wurde die Zuordnung der Lichteffekte zu den Probanden vollständig randomisiert. Darauf aufbauend wird im vorliegenden Fall davon ausgegangen, dass kein struktureller Einfluss des Probanden auf die Daten vorliegt und er deshalb als Faktor ausgeschlossen werden kann. Damit wurden die in Abbildung 44 markierten Erhebungen pro Lichteffekt jeweils als unabhängig voneinander betrachtet, wodurch die Komplexität der Datenauswertung reduziert wurde.

Für die Auswertung wurden abhängig vom Skalenniveau der abhängigen Variablen unterschiedliche statistische Tests gerechnet: Bei den erhobenen Daten zur Reaktionszeit sowie zur Visuellen Beeinflussung handelt es sich um verhältnisskalierte Daten, welche ursprünglich mit einer dreifaktoriellen Varianzanalyse untersucht werden sollten, aufgrund der Datenverteilung jedoch mit einem nicht-parametrischen Test (Kruskal-Wallis-Test) analysiert wurden. Das Ergebnis der Kategorisierung liegt in normalskalierten Daten vor, so dass ein Chi-Quadrat-Test zum Aufdecken signifikanter Zusammenhänge gewählt wurde und die ordinalskalierten Antworten des Fragebogens zum subjektiven Empfinden wurden ebenfalls überwiegend mit Hilfe des Kruskal-Wallis-Test ausgewertet.

Zu Beginn jeder Auswertung steht die qualitative Betrachtung der Daten sowie die Überprüfung der Voraussetzungen für den jeweiligen Test.

11.1.2 Bereinigung der Daten

Es kam vereinzelt vor, dass Lichteffekte übersehen wurden (insgesamt 48-mal) oder dass trotz der Wahrnehmung des Lichteffekts keine Reaktion ausgelöst wurde (viermal). Diese Fälle wurden aufgrund der fehlenden Reaktionszeitmes-

sung aus der Auswertung der metrischen Größen, Reaktionszeit und visuelle Beeinflussung, ausgeschlossen. In denjenigen Fällen, in denen die manuelle Reaktion auf den Lichteffekt lediglich vergessen wurde, fand dennoch eine subjektive Beurteilung des Lichteffekts statt. Dementsprechend wurden diese Fälle auch in der Auswertung der Kategorisierung und des Fragebogens berücksichtigt. Auf die Lichteffekte, die übersehen wurden, wird im Rahmen der Auswertung der Reaktionszeit näher eingegangen und eine Kausalität in Zusammenhang mit den unabhängigen Variablen untersucht. Notwendige Bereinigungen der Daten von Ausreißern sind in den jeweiligen Abschnitten der Auswertung erläutert.

11.2 Demographische Daten

An der Studie nahmen insgesamt 108 Probanden teil. 60% davon waren männlich, das Alter lag bei 80% aller Teilnehmenden zwischen 21 und 40 Jahren. Eine detaillierte Stichprobenverteilung ist in Abbildung 45 dargestellt.

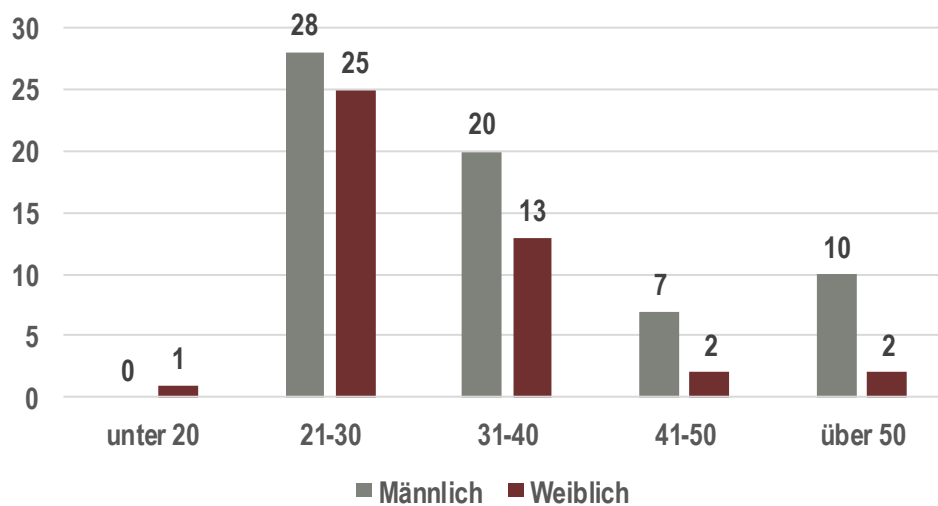


Abbildung 45: Absolute Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter

Eine Teilnahmebedingung für die Studie war es, keine Vorerfahrung in der Entwicklung von Exterieur- oder Interieurbeleuchtung zu besitzen. Zu Beginn der Studie wurde dennoch eine Eigeneinschätzung zur Erfahrung mit dynamischem Innenlicht abgefragt. Der Durchschnittswert der Erfahrung lag auf einer Skala von 0-4 bei 0,5. In Einzelfällen wurde eingeschätzt, Erfahrungsstufe 3 von 4 besitzen. Auf Nachfrage wurde diese Einschätzung mit Erfahrung im Bereich der

Heimbeleuchtung begründet. Insgesamt konnte man bei den Probanden von Laien im Bereich des dynamischen Innenlichts im Fahrzeuginnenraum sprechen. Der demographische Fragebogen enthielt eine Frage zur Lieblingsfarbe. Zur Auswahl standen die fünf Farben, welche im Laufe der Studie bei den Lichteffekten zu sehen waren. Abbildung 46 zeigt eine Übersicht der ausgewählten Lieblingsfarben über beide Geschlechter. Insgesamt wurden die Farben Rot und Blau häufiger von Männern ausgewählt, während Grün hingegen häufiger von Frauen genannt wurde. Eine Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den Merkmalen Geschlecht und Farbe Chi-Quadrat-Tests ergab jedoch, dass keine statistische Abhängigkeit vorliegt ($\chi^2(4) = 7,492$; $p = 0,112$). Die Reihenfolge der Nennung der Lieblingsfarbe deckt sich mit einer Umfrage von Heller mit 1888 Personen (2006, S. 20), wobei die Auswahl der Farben bei Ihrer Umfrage größer war und die individuelle Prozentverteilung daher geringer für die einzelnen Farben ausfiel.

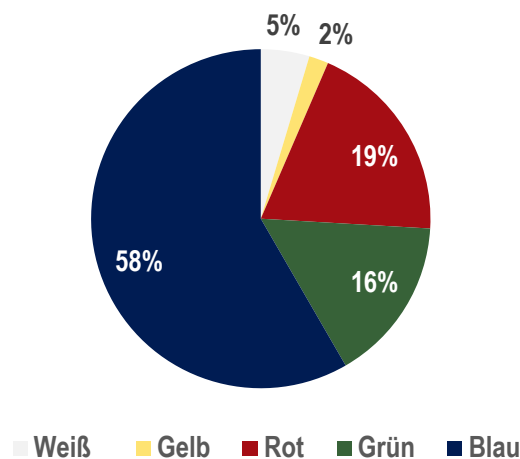


Abbildung 46: Verteilung Lieblingsfarbe in Prozent

11.3 Kategorisierung

Um Besonderheiten in der Kategorisierung zu identifizieren, wird zunächst eine kurze deskriptive Analyse über alle Lichteffekte durchgeführt: Die meisten der 2112 Effekte, die von den Teilnehmern beurteilt wurden, wurden als *Information* klassifiziert. Rund ein Drittel gehört zur Kategorie *Sicherheit* und die Nutzer bewerten weniger als 25% als *Komfort*. Die restlichen 9,4% konnten von den Teilnehmern nicht klassifiziert werden und fallen daher in eine vierte Kategorie mit

der Bezeichnung "Keine", welche neben den anderen Kategorien in Abbildung 47 dargestellt ist.

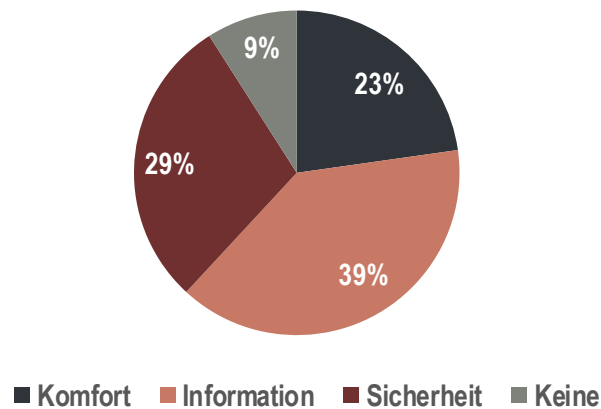


Abbildung 47: Prozentuelle Übersicht der Auswertung *Kategorien* über alle Effekte

Alle statistischen Berechnungen für die nachfolgenden Auswertungen, welche nicht als Abbildung eingefügt wurden, finden sich gesammelt im Anhang 3.

Auswertung des Faktors Farbe

Die Kategorisierung wird auch auf Faktorebene ausgewertet. Zunächst wird der Einfluss des Faktors Farbe untersucht. Tabelle 7 zeigt die absoluten Zahlen der Kategorisierung der farbigen Effekte.

Für die Berechnung, ob ein Zusammenhang zwischen dem Farbe und dem Ergebnis der Kategorisierung vorliegt, wird der Pearson Chi-Quadrat-Test angewandt (Field, 2011, S. 688). Der Test zeigt, dass ein signifikanter Zusammenhang besteht ($\text{Chi-Quadrat}(12) = 556,038; p = 0,000$). Für die Betrachtung der Stärke des Zusammenhangs, wurde der Cramer-Index verwendet, welcher eine bessere Vergleichbarkeit zwischen einzelnen Korrelationen ermöglicht (Bortz & Schuster, 2010, S. 180). Der Cramer-Index liegt bei 0,296. Ein maximaler Zusammenhang bestünde bei einem Index von 1, hier liegt also ein Zusammenhang mittlerer Stärke vor (Field, 2011, S. 698).

Tabelle 7: Absolute Kategorisierung der Ausprägungen von *Farbe*

Farbe	Komfort	Information	Sicherheit	Keine	Summe
Weiß	114	170	55	64	403
Gelb	95	183	106	43	427
Rot	35	58	317	19	429
Grün	106	202	78	40	427
Blau	129	203	62	33	426

Der Kategorie *Komfort* wurden am häufigsten blaue Lichteffekte zugeordnet (27%), gefolgt von Weiß (24%) und Grün (22%). Nur 7% aller als *Komfort* bewerteten Effekte bestehen aus der Farbe Rot.

Als *Information* wurden erneut die blauen Lichteffekte am häufigsten gewertet (25% aller Informationseffekte), diesmal trat Grün jedoch genauso häufig in der Kategorie auf. Rot liegt erneut bei 7%, während Weiß und Gelb sich die restlichen Anteile nahezu gleichmäßig teilen (21% und 22%).

Von allen vorkommenden roten Lichteffekten, wurden 74% der Kategorie Rot zugeteilt. Die Farbe macht somit 51% der gesamten mit Sicherheit assoziierten Effekte aus. Gelb bildet 17% der Kategorie, danach folgen Grün (13%), Blau (10%) und Weiß (9%).

Von den 9% der Fälle, in denen ein Effekt keiner Kategorie zugeordnet werden konnte, war er zu ca. ein Drittel Weiß. Rot konnte in den 439-mal, in denen es bewertet wurde, in 19 der Fälle nicht zugeordnet werden, dementsprechend gering ist der prozentuale Anteil in der Rubrik *keine Kategorie* (10%). Die Farbe Blau nimmt in dieser Kategorie 17% ein, Gelb und Grün liegen bei ca. 20%. Insgesamt fehlte bei 16% der weißen Lichteffekte eine Assoziation zu jeglicher Kategorie, daran schließen sich mit einigem Abstand Gelb (10%), Grün (9%), Blau (8%) und Rot (4%) an.

Bei der Interpretation der Ergebnisse ist darauf zu achten, dass die teilnehmenden Probanden zum Großteil aus dem deutschen, maximal aber aus dem euro-

päischen Kulturraum stammten. Daher muss speziell auf diese in diesem Kulturraum vorherrschende Farbsymbolik geachtet werden (siehe dazu Kapitel 5.3). Danach steht Rot vor allem für die Farbe Sicherheit, was sich deutlich in den Ergebnissen widerspiegelt. Die Fälle, in welchen Rot nicht der Kategorie Sicherheit zugeordnet wurde, werden am Ende der kategorialen Auswertung näher betrachtet. Ebenfalls als sicherheitsbezogen, jedoch als weniger dringlich, wird Gelb angesehen. Es wurde am zweithäufigsten der Kategorie Sicherheit zugeordnet. Bei gelben und roten Lichteffekten wurden häufig Assoziationen zu Warnhinweisen im Fahrzeug geäußert, welche mit roter und gelber Codierung im Kombi-Instrument angezeigt werden. Die übrigen drei Farben Weiß, Grün und Blau wurden ebenfalls analog dem Gesamtergebnis am häufigsten der Kategorie Information zugeordnet. Allerdings spiegelte das mündliche Feedback der Probanden hier Erkenntnisse wider, wie sie bereits in den Experteninterviews gesammelt wurden. Weiß wurde als neutrale Farbe bezeichnet, die sich für neutrale Informationen eignet. Grün hingegen ist positiv belegt und wird daher für positive Informationen, wie beispielsweise das Ende einer durch rot markierten Gefahrensituationen, verwendet. Blau wird häufig mit Elektrizität sowie Infotainment-Anwendungen verbunden. Die Assoziation zeigt, dass bei der Gestaltung der Lichteffekte Eindrücke aus dem Alltag einfließen, die über die gut verinnerlichte „Ampel-Metapher“ hinausgehen.

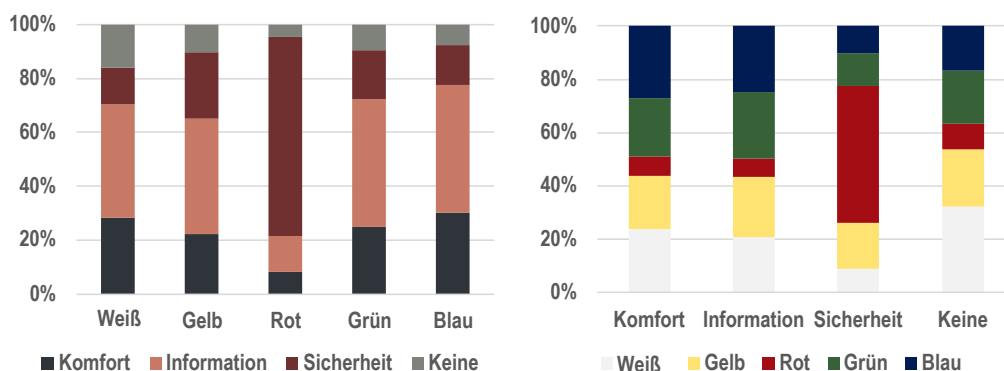


Abbildung 48: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors *Farbe*

Auswertung des Faktors Bewegungsart

Der nächste Faktor, dessen Einfluss auf die Kategorisierung betrachtet wird, ist die Bewegungsart. Der Pearson Chi-Quadrat-Test zeigt, dass erneut ein signifikanter Zusammenhang vorliegt (Chi-Quadrat(15) = 282,488; $p = 0,000$), dessen Maß laut dem Cramer-Index bei 0,211 liegt. Der Einfluss der Bewegungsart auf die Kategorisierung ist somit geringer als der des Faktors Farbe, er ist dennoch nachweislich vorhanden.

In der Kategorie **Komfort** sind besonders häufig die Bewegungsarten *Pulsen* (28%) und *Erscheinen* (27%) zu finden. *Blinken* wurde kaum mit Komfort assoziiert: von allen blinkenden Lichteffekten wurden nur 3% als Komfort bewertet. Die drei richtungsorientierten Effektbewegungen *Auffüllen nach vorne*, *Impulse nach vorne / hinten* nahmen je 11%, 15% und 17% der Kategorie Komfort in Anspruch. Dieses Ergebnis legt nach, dass die Impulse beliebter waren als die sich auffüllende Kontur, ebenso wie Effekte, die von vorne, also auch dem Sichtbereich, kommen und nach hinten verschwinden.

Bei den als **Information** bewerteten Lichteffekten machen die drei Richtungsorientierten Lichteffekte insgesamt 60% aus, wobei sich die Prozent gleichmäßig aufteilen und keine Tendenz erkennen lassen. *Blinken* nimmt 16% der Kategorie ein, *Pulsen* und *Erscheinen* hingen mit 12% den geringsten Anteil. Die Zahlen lassen darauf deuten, dass eine Veränderung im Lichteffekt nötig ist, um eine Information zu transportieren, am besten nicht nur eine (wahrnehmbare) zeitliche Veränderung, sondern auch eine örtliche. *Pulsen* enthält zwar auch eine zeitliche Veränderung, diese ist aber jedoch vermutlich zu langsam, als dass das Gefühl einer Informationsvermittlung auftreten kann.

Knapp ein Drittel der als **Sicherheit** bewerteten Effekte, besitzen die Bewegungsart *Blinken*. Auch hier nehmen *Pulsen* (10%) und *Erscheinen* (14%) geringe Prozentsätze ein. Während bei Komfort Effekte bevorzugt wurden, die sich von vorne nach hinten bewegen, überwiegen in der Kategorie Sicherheit die Effekte von hinten nach vorne, also auf die vor einem liegende Fahrbahn zu (*Impulse nach vorne*, *Auffüllen nach vorne* zusammen 33%, *Impulse nach hinten* 12%).

Von allen Effekten wurde keiner mehr als 12% des Vorkommens zu **keiner Kategorie** zugehörig bewertet. Auffallend häufig wurde hierbei die Bewegungsart *Pulsen* genannt (11%), der Effekt mit der langsamsten Veränderung über Zeit. Diese Bewegungsart wurde, wie im nächsten Abschnitt zur Reaktionszeit betrachtet, sehr spät gesehen und sogar am häufigsten übersehen. Das könnte einer der Gründe sein, weswegen diese Faktorausprägung am häufigsten als Eignung für eine der Kategorien ausgeschlossen wurde.

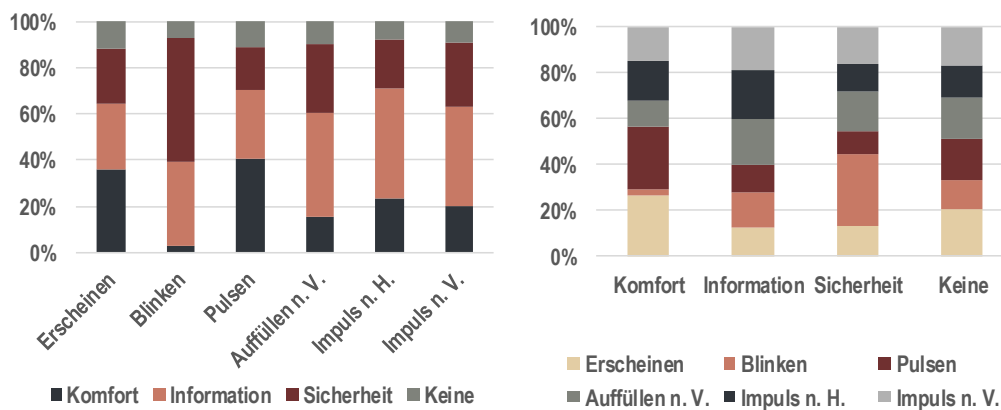


Abbildung 49: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors Bewegungsart

Auswertung des Faktors Anzeigeorte

Die unterschiedlichen Anzeigeorte wurden den einzelnen Kategorien nahezu gleichmäßig zugeordnet. Abbildung 50 zeigt die prozentuale Übersicht der Kategorisierung. Beide Betrachtungsweisen, die Verteilung innerhalb einer Kategorie oder innerhalb eines Faktormerkmals, lassen keine Trends erkennen. Die statistische Analyse zeigt, dass der Anzeigeort kaum einen Einfluss auf die Kategorisierung der Lichteffekte hat ($\text{Chi-Quadrat}(6) = 12,921$; $p = 0,044$; Cramer-Index = 0,055). Auch wenn bei $\alpha = 0,05$ noch von einem signifikanten Zusammenhang gesprochen werden muss, liegt der Einfluss nahe an Null.

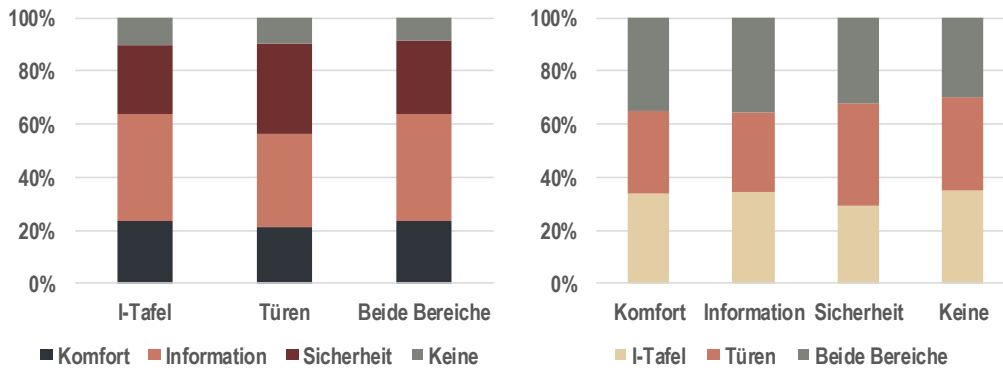


Abbildung 50: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors *Anzeigeort*

Gemeinsame Betrachtung der Faktoren

Betrachtet man alle Kategorisierungen auf Faktorebene, so ergeben sich in Summe ungewöhnliche Zuordnungen, wie z.B. das Auftreten der Farbe *Rot* in der Kategorie *Komfort* oder die Bewegungsart *Pulsen* für *Sicherheit*. Die Auffälligkeiten lassen sich durch einen detaillierten Blick auf die zugeordneten Lichteffekte erklären. So fällt beim ersten Beispiel auf, dass von allen roten *Komfort*-Lichteffekten nur einer als zweites Merkmal *Blinken* hatte, während sich die restlichen Lichteffekte auf die übrigen fünf Bewegungsarten aufteilten. Dieses Ergebnis entspricht in etwa der Verteilung der Bewegungsarten über alle *Komfort*-Lichteffekte. Anscheinend hat sich in diesem Fall die Assoziation zur Bewegungsart gegenüber der zur Farbe durchgesetzt. Beim zweiten Beispiel der pulsenden Sicherheitseffekte zeigt sich ein ähnliches Bild. 72% dieser Effekte tragen die Farbe *Rot*, nimmt man die Farbe *Gelb* hinzu, kommt man auf 82%. Dementsprechend zeichnet sich ab, dass hier die Farbe die entscheidende Rolle bei der Kategorisierung gespielt hat. Mit Zahlen hinterlegt wird dies durch den Vergleich des Cramer-Index: Für den Faktor Farbe ergibt sich wie bereits beschrieben ein Cramer-Index von 0,296, für den Faktor Bewegungsart liegt dieser nur bei 0,211. Da der Index das Maß des Zusammenhangs repräsentiert, muss davon ausgegangen werden, dass Farbe im Allgemeinen in einem etwas engeren Verhältnis zum Ergebnis der Kategorisierung steht als die Bewegungsart. Die Zuordnung wurde also häufiger auf Basis der Farbe vorgenommen als anhand der Bewegungsart, wodurch die oben genannten Auffälligkeiten erklärt werden können.

Aber auch wenn eine Erklärung der Ergebnisse möglich ist, sollte man nach Möglichkeit von der Kombination scheinbar widersprüchlicher Merkmale absehen. Nur so kann ausgeschlossen werden, dass die Lichteffekte aufgrund ihrer Beschaffenheit zu keiner eindeutigen Assoziation beim Nutzer führen. Vielmehr empfiehlt es sich auf Lichteffekte zu setzen, die deutliche Ergebnisse lieferten. So kann zum Beispiel durch Kombination von zwei eindeutigen Merkmalen aus der Kategorie *Sicherheit - Rot* und *Blinken - auf Einzeleffektebene* Zuordnungsquoten von bis zu 96% erreicht werden. Weitere „Topeffekte“ fasst der nächste Abschnitt zusammen.

Auswertung auf Effektebene

In der Studie wurden alle Effektkombinationen untersucht, welche sich aus den bereits einzeln analysierten Variablenausprägungen bilden lassen. Die drei am häufigsten / am seltensten zugeordnete Effekte pro Kategorie sind in Tabelle 8 zusammengefasst. Die Betrachtung der letzten Rubrik *keine Kategorie* hat bereits stattgefunden und wird daher an dieser Stelle ausgeklammert.

Tabelle 8: Auflistung der drei am häufigsten/am seltensten zugeordneten Effekte. Beschreibungsreihenfolge der Effekte entspricht *Farbe, Bewegungsart, Anzeigort*. (*Falls mehrere Effekte die gleiche prozentuale Zuordnung hatten, wurde eine Auswahl getroffen)

	Komfort	Information	Sicherheit
Am häufigsten zugeordnete Effekte (in %)	Blau, Pulsen, I-Tafel (65%)	Grün, Impulse nach hinten, Beide Bereiche (75%)	Rot, Blinken, Türen (96%)
	Blau, Pulsen, Türen (61%)	Grün, Impulse nach hinten, I-Tafel (71%)	Rot, Erscheinen, Beide Bereiche (96%)
	Blau, Erscheinen, Türen (54%)	Blau, Impulse nach vorne, I-Tafel (67%)	Rot, Blinken, Beide Bereiche (92%)
Am seltensten zugeordnete Effekte (in %)*	Weiß, Blinken, I-Tafel (0%)	Rot, Blinken, Türen (4%)	Weiß, Erscheinen, I-Tafel (0%)
	Rot, Auffüllen nach vorne, Beide Bereiche (0%)	Rot, Erscheinen, Beide Bereiche (4%)	Blau, Impulse nach Hinten, Beide Bereiche (0%)
	Rot, Erscheinen, Beide Bereiche (0%)	Rot, Erscheinen, I-Tafel (0%)	Blau, Erscheinen, Türen (0%)

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die am häufigsten zugeordnete Effekte der Kombination der Ergebnisse der Auswertung der einzelnen Faktoren entspricht.

Beispielsweise wurden die Farbe *Grün* am häufigsten mit der Kategorie *Information* assoziiert, gleiches gilt für Bewegungsart *Impulse nach hinten*. Die gemeinsame Verwendung der beiden Merkmale in Lichteffekten führte bei 75% bzw. 71% der Fälle von Probanden zu einer Interpretation als Information. Ähnliches lässt sich in der Kategorie *Sicherheit (Rot + Blinken / Erscheinen)* bzw. bei *Komfort (Blau + Pulsen)* beobachten.

Dieser Trend gilt jedoch nicht gleichermaßen für die am seltensten zugeordneten Effekte. Hier scheint sicher jeweils der Ausschluss aus den anderen Kategorien widerzuspiegeln. Vieles das beispielsweise eindeutig zu *Sicherheit* zugeordnet wurde, wurde entsprechend selten als *Komfort* oder *Information* interpretiert und vice versa. Lediglich in den „Flops“ der Kategorie *Komfort* lässt sich die Farbe *Weiß* wiederfinden, die einzeln betrachtet eine sehr hohe Zuordnung zu dieser Kategorie erfahren hat. Jedoch handelt es sich hierbei in der Kombination mit der Bewegungsart *Blinken* erneut um eine sehr widersprüchliche Zusammensetzung, wodurch die mangelnde Assoziation erklärt werden könnte.

11.4 Reaktionszeit

Wie bereits vorab in Kapitel 11.1.2 erwähnt, gab es entgegen den ursprünglichen Erwartungen einige Fälle in der Studie, in denen gezeigte Lichteffekte nicht wahrgenommen wurden (2,2%) und daher keine Reaktion aufgezeichnet wurde. Diese Fälle werden aus der Analyse der Reaktionszeit ausgeschlossen und vorab separat betrachtet, um mögliche Gründe für das Übersehen zu identifizieren. Anschließend werden die erfassten Reaktionszeiten der Probanden ausgewertet.

Wenn keine Reaktion stattfand und auch auf Nachfragen kein Lichteffekt gesehen wurde, könnte die Anzeige des Lichteffekts im Vergleich zum Zustand, in dem kein Effekt gezeigt, eine zu geringe Änderung darstellen, als dass sie vom Probanden erfasst werden kann. Die ausgewerteten Daten zeigen, dass *Weiß* die am meisten übersehene Farbe ist. Obwohl alle Farben ungefähr die gleiche Leuchtdichte aufweisen (siehe Abschnitt 10.3), sind 60% der nicht wahrgenommenen Lichteffekten weiß. Eine wahrscheinliche Erklärung dafür ist, dass das

Diffusor-Material, das die LEDs in der Studie bedeckt, ebenfalls weiß ist und daher der Kontrast zwischen einem weiß leuchtenden Lichteffect und einem nicht leuchtenden Diffusor geringer ist als bei anderen Farben (siehe auch Kapitel 11.7).

Die zweite Auffälligkeit ist, dass von allen Lichteffecten, *Pulsen* die am meisten übersehene Bewegungsart ist (anteilmäßig 73%), was dadurch zu erklären ist, dass es hierbei um die Bewegung mit der langsamsten Helligkeitsänderung (und damit Kontraständerung) über Zeit handelt.

Der insgesamt am meisten übersehene Effekt ergibt sich aus der Kombination der beiden genannten Merkmale: *Weiß + Pulsen* löste in 22 von 72 Fällen keine Reaktion aus und sollte damit unabhängig von der ausstehenden Auswertung der Kategorisierung für den Einsatz von Use Cases aus den Bereichen *Sicherheit* und *Information* ausgeschlossen werden.

Nach Ausschluss dieser Fälle bleiben 2108 Datenpunkte übrig, welche in Abbildung 51 als Histogramm dargestellt sind. Die durchschnittliche Reaktionszeit liegt bei einem Mittelwert von 1689 ms mit einer Standardabweichung von 2524 ms. Das Histogramm zeigt wie zu erwarten eine linkssteile Verteilung, da die Reaktionszeit so schnell wie möglich nach Erblicken des Lichteffects ausgelöst werden sollte. Das linke Ende der Daten ist durch die physikalischen Möglichkeiten der Erkennung begrenzt (man kann nur begrenzt schnell reagieren), während es keine Grenze auf der rechten Seite des Histogramms für langsames Reagieren gibt: Die x-Achse erstreckt sich bis 30000 ms, da der Datensatz zum gegenwertigen Zeitpunkt viele Ausreißer auch mit sehr hohen Werten enthält.

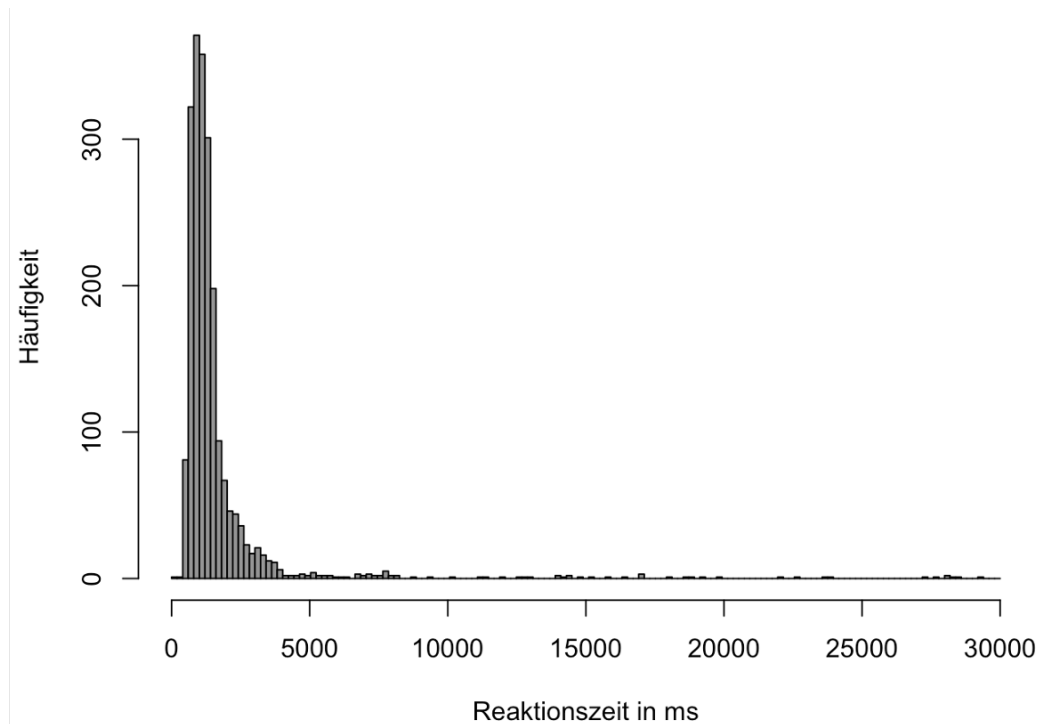


Abbildung 51: Histogramm der Reaktionszeiten; $\mu = 1689$ ms; $\sigma = 2524$ ms;
N = 2108

Festlegung der Statistischen Auswertungsmethodik

Da es sich bei den Daten zur Reaktionszeit um metrische Werte handelt, die in einem Versuchsdesign mit drei unabhängigen Variablen nominaler Art erhoben wurde, wird eine dreifaktorielle ANOVA zur Auswertung der Daten präferiert.

Eine Voraussetzung der Varianzanalyse ist die Normalverteilung der Daten innerhalb der einzelnen Gruppen. Daher wurden zunächst die Daten auf Faktorebene betrachtet und einen Shapiro-Wilk-Test zur Überprüfung der Normalverteilung betrachtet. Die Ergebnisse für die Faktoren Farbe, Bewegungsart und Anzeigeort sind in Tabelle 9 - Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 9: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor *Farbe*

Farbe	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Weiß	402	2146	3238	,416	402	,000
Gelb	426	1545	1820	,386	426	,000
Rot	429	1703	2796	,298	429	,000
Grün	424	1756	2634	,344	424	,000
Blau	427	1322	1799	,238	427	,000

Tabelle 10: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor *Bewegungsart*

Bewegungsart	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Erscheinen	353	1022	1066	,302	353	,000
Blinken	357	911	456	,621	357	,000
Pulsen	325	3962	5503	,541	325	,000
Impulse nach vorne	356	1479	1165	,392	356	,000
Impulse nach hinten	358	1513	1065	,573	358	,000
Auffüllen nach vorne	359	1444	647	,756	359	,000

Tabelle 11: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor *Anzeigeort*

Anzeigeort	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
I-Tafel	689	1917	3143	,340	689	,000
Türen	705	1723	2709	,335	705	,000
Beide Bereiche	714	1436	1389	,432	714	,000

Für alle Ausprägungen der Faktoren liegt $p < 0,5$, dementsprechend ist eine Normalverteilung der Daten auszuschließen (Field, 2011, S. 146).

Die Breite des Histogramms in Abbildung 51 zeigt, dass der Datensatz viele Ausreißer mit großen Werten enthält, die die Verteilung der Daten verzerren. Deswegen wurde entschieden, eine Bereinigung der Daten durchzuführen und im

Anschluss erneut auf Normalverteilung zu prüfen. Dazu wurden alle Werte entfernt, die mehr als drei Standardabweichungen vom Mittelwert abweichen (Pituch & Stevens, 2016, S. 16f). Insgesamt wurden durch dieses Vorgehen 35 Werte identifiziert und entfernt, so dass der übrigen Datensatz 2073 Werte enthält. Da die Ausreißer durchweg bei zu hohen Reaktionszeiten gefunden wurden, liegt der korrigierte Mittelwert bei nun 1403 ms, während die Standardabweichung auf unter 1000 ms sank. Das zugehörige Histogramm ist in Abbildung 52 zu sehen.

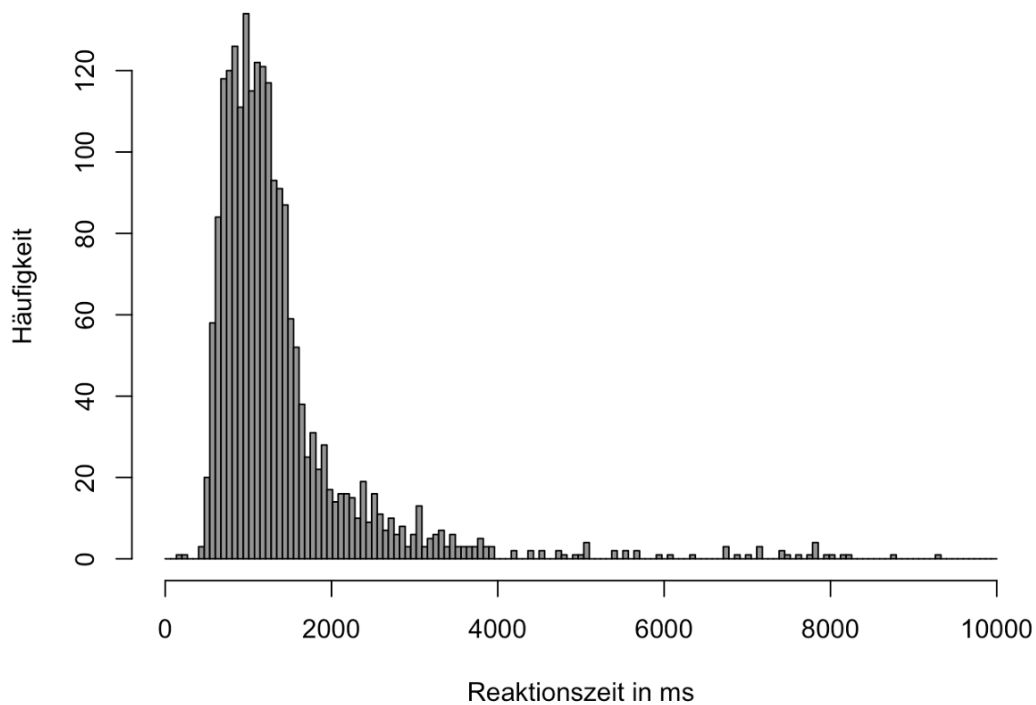


Abbildung 52: Histogramm nach Ausreißerkorrektur von $\mu \pm 3\sigma$; $\mu = 1403$ ms;
 $\sigma = 996$ ms; $N = 2073$;

Durch die bereinigten Werte ist zwar die Streuung der Daten deutlich gesunken (über alle Werte gerechnet um ca. den Faktor 2,5), aber die Überprüfung auf Normalverteilung der einzelnen Faktoren ist erneut nicht erfolgreich (Zusammenfassung in Tabelle 12 - Tabelle 14).

Tabelle 12: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor *Farbe* nach Ausreißerkorrektur

Farbe	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Weiß	391	1675	1362	,661	391	,000
Gelb	423	1420	1015	,655	423	,000
Rot	420	1341	814	,724	420	,000
Grün	416	1438	1032	,746	416	,000
Blau	423	1163	538	,646	423	,000

Tabelle 13: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor *Bewegungsart* nach Ausreißerkorrektur

Bewegungsart	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Erscheinen	351	958	623	,468	351	,000
Blinken	357	911	456	,621	357	,000
Pulsen	294	2351	1625	,723	294	,000
Impulse nach vorne	355	1431	731	,666	355	,000
Impulse nach hinten	357	1486	933	,637	357	,000
Auffüllen nach vorne	359	1444	647	,756	359	,000

Tabelle 14: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor *Anzeigeort* nach Ausreißerkorrektur

Anzeigeort	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
I-Tafel	673	1483	1047	,695	673	,000
Türen	690	1371	1041	,578	690	,000
Beide Bereiche	710	1359	894	,655	710	,000

Da die ANOVA als robust bei Verletzung von Voraussetzungen gilt, wurde sie weiterhin als Möglichkeit in Betracht gezogen und im nächsten Schritt wurde die

Varianzhomogenität als weitere Voraussetzung überprüft. Das Ergebnis des Levene-Tests in Abbildung 53 zeigt, dass die abhängige Variable Reaktionszeit über alle Gruppen der unabhängigen Variablen nicht die gleiche Fehlervarianz hat. Mit $p \leq 0,5$ ist die Nullhypothese, dass eine Varianzhomogenität vorliegt, abzulehnen. (Field, 2011, S. 150)

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^{a,b}

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
Reaktionszeit	Basiert auf dem Mittelwert	7,907	89	1983	,000
	Basiert auf dem Median	4,689	89	1983	,000
	Basierend auf dem Median und mit angepaßten df	4,689	89	627,440	,000
	Basiert auf dem getrimmten Mittel	6,381	89	1983	,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Abhängige Variable: Reaktionszeit

b. Design: Konstanter Term + Farbe + Bewegungsart + Anzeigeort + Farbe * Bewegungsart + Farbe * Anzeigeort + Bewegungsart * Anzeigeort + Farbe * Bewegungsart * Anzeigeort

Abbildung 53: Überprüfung der Varianzhomogenität als Voraussetzung einer ANOVA

Durch die Verletzung einer zweiten Prämissen für die Varianzanalyse, wurde diese als geeignete Methode ausgeschlossen. Für das weitere Vorgehen wurde ein nicht-parametrisches Verfahren gewählt, welches keine Normalverteilung der Daten voraussetzt: Im Folgenden wird der Kruskal-Wallis-Test genutzt (Field, 2011, S. 559), um Einflüsse der Faktorausprägungen innerhalb des von Ausreißern bereinigten Datensatzes auszuwerten. Alle zugehörigen Berechnungen finden sich im Anhang 4.

Auswertung Reaktionszeit & Faktor Farbe

Die Ergebnisse der fünf Ausprägungen des Faktors *Farbe* sind in Abbildung 54 dargestellt. Die Visualisierung der Daten in Boxplots zeigt die große Streuung der Werte, vor allem bei der Farbe *Weiß*, wo regelmäßig bis zu einer Zeit von 8000 ms Reaktionen aufgezeichnet wurden. Da *Weiß* diejenige Farbe ist, die am häufigsten übersehen wurde, ist es erwartungskonform, dass es hierbei auch um die Farbe mit den größten Reaktionszeiten handelt. Bei den übrigen Farben ist die Streuung

deutlich geringer, wobei sich *Blau* als die Ausprägung mit der niedrigsten Varianz darstellt. Da die Darstellung der Daten in Boxplots eine große y-Achse zur Abbildung aller Extremwerte benötigt, wurden die Mittelwerte zusätzlich in einem Balkendiagramm mit detaillierterer y-Achse visualisiert (Abbildung 54 unten). Nun lässt sich eindeutig die Rangordnung der Farben ablesen, welche die Grundlage für den anschließenden Kruskal-Wallis-Test bildet. Dieser überprüft die Nullhypothese, dass die Verteilung der Reaktionszeit über alle Ausprägungen der unabhängigen Variable *Farbe* gleich ist. Das Testergebnis ist signifikant, entsprechend muss die Nullhypothese abgelehnt werden ($H(4) = 35,957$; $p = 0,000$). Es ist also von Unterschieden auszugehen, die mit einem ergänzenden Post-hoc-Test aufgezeigt werden können.

Dazu wurden paarweise Vergleiche mittels des Mann-Whitney-Tests gerechnet. Um bei der Durchführung mehrerer Tests auszuschließen, dass die Nullhypothese fälschlicherweise abgelehnt wird (Alpha-Fehler), sind die mit der Bonferroni-Korrektur angepassten Signifikanzwerte als Entscheidungsgrundlage zu betrachten (Field, 2011, S. 565). Vier der zehn Vergleiche haben einen signifikanten Unterschied zwischen zwei Farben aufzeigen können, welche in Tabelle 15 zusammengefasst sind.

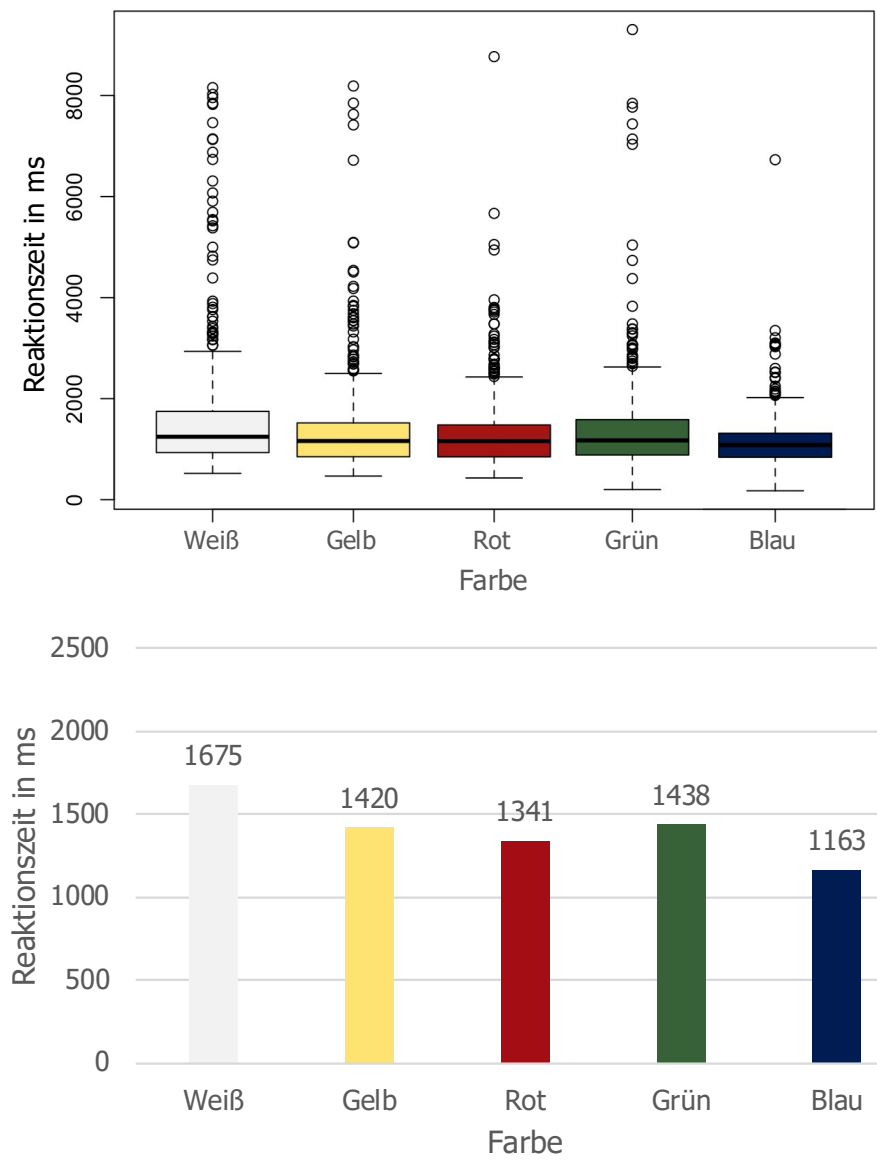


Abbildung 54: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Farbe als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Tabelle 15: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor Farbe

Rang	Mittelwert in ms	Farbe	Signifikant zu
1	1163	Blau	Weiß, Grün, Gelb
2	1341	Rot	Weiß
3	1420	Gelb	Blau
4	1438	Grün	Blau
5	1675	Weiß	Blau, Rot

Die Reaktionszeit für die Farbe *Blau*, mit dem niedrigsten Mittelwert auf dem ersten Rang, liegt signifikant unter denen der Farben *Gelb*, *Grün*, und *Weiß*, wobei die Signifikanz deutlicher wird, je geringer der Rang der Farbe ist (mit $p = 0,000$ für *Weiß*). Zwischen dem ersten und dem zweiten Rang (*Blau* und *Rot*) kann kein signifikanter Unterschied bei einem Unterschied in den Reaktionszeiten von 108 ms nachgewiesen werden. Jedoch ist der paarweise Vergleich zwischen *Rot* und *Weiß* das vierte eindeutige Testergebnis (Rang zwei und Rang fünf): Der Mittelwert von 1341 ms ist eine signifikant schnellere Reaktionszeit als die im Mittel errechnete Zeit von 1675 ms für *Weiß*.

Wie bereits erläutert, war *Weiß* aufgrund der Auffälligkeiten bereits während des Tests auf dem letzten Rang zu erwarten. Jedoch ist es nach dem Ergebnis der Kategorisierung, bei welcher vor allem rote und gelbe Effekte der Kategorie *Sicherheit* zugeordnet wurden, interessant, dass die Farbe *Blau* diejenigen ist, die am schnellsten wahrgenommen wurde. Objektiv würde sie sich damit am besten für Situationen eignen, in denen Zeit ein kritischer Faktor ist.

Eine mögliche Begründung für die aufgezeigte Rangreihenfolge der Farben hinsichtlich der Reaktionszeit ist die Anordnung der Zapfen im Gesichtsfeld und sowie der Erkennungsgrenzen im Gesichtsfeld (siehe Kapitel 4.4): Nach Bartenbach & Witting (2009) nehmen die Erkennungsgrenzen von *Grün* nach *Rot* zu *Blau* zu, was auch der Reihenfolge im vorliegenden Versuch entspricht. Wobei die Autoren *Gelb* die größte Erkennungsgrenze zuschreiben, was zunächst Abweichung zu der Reihenfolge der Testergebnisse darstellt. Allerdings wurde das Gelb im

Test von manchen Probanden als grünliches Gelb wahrgenommen (vermutlich auf die Gleichsetzung des Gains von Rot und Grün zurückzuführen. Zugehörige Erläuterung in Kapitel 10.3.6). Diese Verschiebung in der Farbwahrnehmung kann eine Begründung sein, wieso die Reaktionszeit von *Gelb* nahe der von *Grün* liegt und sie nicht der Reihenfolge der Erkennungsgrenzen der Farben im Gesichtsfeld von Bartenbach & Witting folgt.

Auswertung Reaktionszeit & Faktor Bewegungsart

Generell lassen sich bei den Bewegungsarten zwei Gruppen unterscheiden: Die Lichteffekte, bei denen sich jede LED einer Fläche zum gleichen Zeitpunkt gleich verhält (*Erscheinen, Blinken, Pulsen*) und die richtungsorientierten Effekte, die sich auf einer Fläche über die Zeit hinweg verändern (*Impulse nach vorne, Impulse nach hinten, Auffüllen nach vorne*). Es wurde erwartet, dass sich aufgrund der Fläche, welche die beiden Gruppen beim initialen Auftreten des Effekts einnehmen (alle LEDs vs. beginnend bei einer LED) Unterschiede in den Reaktionszeiten ablesen lassen. Blickt man auf die Visualisierung der Daten in Abhängigkeit der Bewegungsart in Abbildung 55, sind jedoch nicht nur zwei, sondern drei unterschiedliche Gruppen zu erkennen: Die richtungsorientierten Effekte haben auf den ersten Blick sehr ähnliche Reaktionszeiten, genauso wie sich die Bewegungsarten *Erscheinen* und *Blinken* sehr zu ähneln scheinen. Einen eindeutigen Unterschied stellen hingegen die Werte für die Effektarten *Pulsen* dar: Die Reaktionszeiten streuen stärker als die der anderen Bewegungsarten und es findet sich eine größere Dichte an Ausreißern bei sehr langsamen Reaktionswerten von 6000 bis 8000 ms (Abbildung 55 oben).

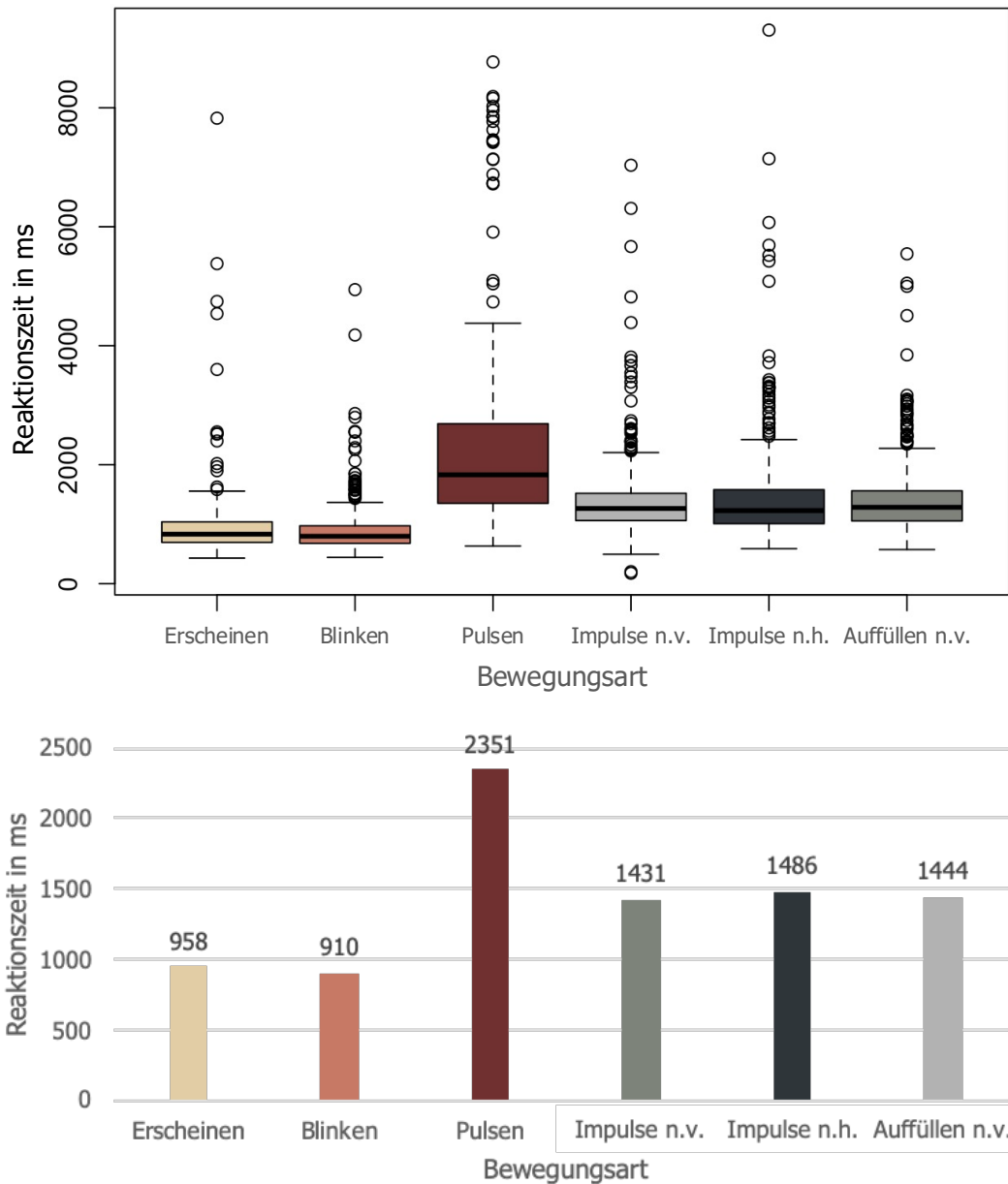


Abbildung 55: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Bewegungsart als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Betrachtet man die Darstellung der Daten in Abbildung 55 unten, so lassen sich auch zwischen dem ersten und dem zweiten Balken, als auch den letzten drei Balken leichte Unterschiede bezüglich Mittelwerte erkennen, wobei sich die Werte für *Impulse nach vorne* und *Auffüllen nach vorne* nur um 13 ms voneinander abweichen. Ob es trotz der ähnlichen Werte innerhalb der drei Gruppen oder nur zwischen diesen signifikante Unterschiede gibt, soll der Kruskal-Wallis-Test mit den anschließenden Post-hoc-Tests zeigen.

Der Test bestätigt, dass die Verteilung der Reaktionszeit für die Ausprägungen der Bewegungsart unterschiedlich sind ($H(5) = 815,124$; $p = 0,000$). Die anschließenden Mann-Whitney-Tests bestätigten signifikante Unterschiede in 11 von 15 paarweisen Vergleichen. Die vier Kombinationen, in denen kein Unterschied nachzuweisen ist, sind diejenigen, die bereits durch die deskriptive Betrachtung der Daten in Abbildung 55 identifiziert wurden. Alle signifikanten Unterschiede in den Rängen sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Tabelle 16: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor Bewegungsart

Rang	Mittelwert in ms	Bewegungsart	Signifikant zu
1	911	Blinken	Pulsen, Impulse n. v., Impulse n. h., Auffüllen n.v.
2	958	Erscheinen	Pulsen, Impulse n. v., Impulse n. h., Auffüllen n. v.
3	1431	Impulse nach vorne	Pulsen, Blinken, Erscheinen
4	1444	Auffüllen nach vorne	Pulsen, Blinken, Erscheinen
5	1486	Impulse nach hinten	Pulsen, Blinken, Erscheinen
6	2351	Pulsen	Allen anderen Bewegungsarten

Der Blick auf das exakte Aussehen der einzelnen Bewegungen hilft bei der Interpretation der Ergebnisse: *Blinken* und *Erscheinen* sind zwei Ausprägungen, deren Reaktionszeit sich rechnerisch nicht voneinander unterscheiden. Begründet werden kann dies damit, dass sich die Effekte in dem ersten Moment nach dem Auftreten sehr ähneln. Beide beginnen mit einem Erscheinen des Lichteffekts mit 100% Helligkeit, wobei beim *Blinken* die Helligkeit innerhalb der Dauer des Intervalls von 1,0 Hz (1000 ms) linear auf 0% abfällt und sich die Bewegung danach kontinuierlich wiederholt. Bei einer durchschnittlichen Reaktionszeit von 911 ms steht der Effekt *Blinken* kurz vor dem Erreichen des Intervallendes. Nach dem initialen Aufdimmen (von 0% zu 100%) wurde also eine fast eine komplette weitere Helligkeitsänderung (von 100% zu 0%) durchlaufen. Beim Effekt *Erscheinen* hingegen gibt es nach dem erstmaligen Aufleuchten keine weiteren Änderungen.

Die doppelte Helligkeitsänderung könnte die Ursache für die tendenziell schnellere Reaktionsgeschwindigkeiten auf *Blinken* sein, aber aufgrund der fehlenden Signifikanz sollten die beiden Effekte als gleich schnell wahrnehmbar bewertet werden. Ganz anders schaut es hingegen bei der Ausprägung *Pulsen* aus: Die Helligkeit der gezeigten Effekte ändert sich entsprechend einer Sinuskurve mit 0,2 Hz, das heißt das es nach 5 Sekunden zu einer Wiederholung der Helligkeitsänderung kommt. Dementsprechend ist bei einer mittleren Reaktionsgeschwindigkeit von 2351 ms knapp die Hälfte der ersten Schwingungsdauer abgeschlossen und der Lichteffect ist kurz vorm Erreichen der Amplitude der Schwingung, also dem Moment, in dem der Lichteffect am hellsten ist. Aus dem Vergleich der Effekte *Erscheinen/Blinken* und *Pulsen* lässt sich der Zusammenhang ableiten, dass eine schnellere Helligkeitsänderung zu einer schnelleren Reaktionszeit führt. Dieses Ergebnis deckt sich mit den bisherigen Erkenntnissen der Literatur (u.a. Becker, Vonthein, Volpe, & Schiefer, 2005). Der gefundene Unterschied zwischen *Erscheinen/Blinken* und *Pulsen* ist signifikant.

Ebenfalls ein signifikanter Unterschied von *Erscheinen*, *Blinken* und *Pulsen* besteht zu der Gruppe der drei richtungsorientierten Lichteffecte, bei denen es im Durchschnitt etwas weniger als 1,5 Sekunden gedauert hat, bis eine Reaktion verzeichnet wurde. In dieser Zeit haben die Effekte bei einer Geschwindigkeit von 50 cm/s bereits 75 cm zurückgelegt, wobei zu beachten ist, dass der Effekte stets parallel von rechts und von links startete. Dementsprechend wurde insgesamt eine Fläche von 150 cm durchlaufen. Übertragen auf die Instrumententafel mit 232 LEDs in einer Gesamtlänge von ca. 161 cm bedeutet das für den Effekt *Auffüllen nach vorne*, dass bereits 93% der Fläche leuchten, bevor eine Reaktion nach durchschnittlich 1444 ms ausgelöst wird (weitere Details zum Hardwareaufbau in Kapitel 10.3.1).

Aus dem Vergleich der beiden Bewegungsarten *Impulse nach vorne* und *Auffüllen nach vorne* zeigt sich, dass es nicht von Belang scheint, ob der Lichteffect dabei die ganze Fläche erhellt oder nur ein Teilstück, das heißt der bewegte Impuls, leuchtet. Der Post-hoc-Test kann bei dem geringen Unterschied in den Mittelwerten von 13 ms keinen signifikanten Unterschied feststellen. Gleiches gilt für die

Richtung des Effekts: Die Bewegung der *Impulse nach vorne* ($\mu = 1431$) führt zu einer sehr ähnlichen Reaktion wie die Bewegung der *Impulse nach hinten* ($\mu = 1486$). Ob dies auch für die unterschiedlichen Sichtbereiche gilt, zeigt der Blick auf die Daten in Abhängigkeit des weiteren Faktors Anzeigeort, welche in Tabelle 17 zu sehen sind. Neben dem Mittelwert sind die Startpositionen der Bewegungen angegeben (A, B, C), welche sich aus der Richtung (*nach vorne*, *nach hinten*) und dem jeweiligen Anzeigeort ergeben. Die zugehörigen Positionen sind in der graphischen Darstellung der Sitzkiste in Abbildung 56 visualisiert.

Mit der detaillierten Auflistung der Mittelwerte wird deutlich, dass die Werte pro Spalte oder Zeile schwanken, jedoch ähnliche Reaktionszeiten für gleiche Startpositionen bestehen. Zur schnellsten Reaktion führten im Durchschnitt die Effekte, die an Position B starten, das heißt auf Höhe der A-Säule ($\mu = 1416$ ms). Danach folgen mit $\mu = 1434$ ms die Effekte, die vom Ende der Türen aus der B-säule erscheinen (Position C) und die langsamsten Reaktionen löste die Position A aus, also Effekte, die in der Mitte der I-Tafel starteten ($\mu = 1552$ ms). Die Abbildung 56 zeigt auf, wo sich die Positionen im Verhältnis zum Sichtfeld des Fahrers ungefähr befinden.

Die gefundene Reihenfolge B, C, A stellt einen Widerspruch zu den Erkenntnissen der Literatur dar, wonach die Reaktionsgeschwindigkeit abnimmt, je weiter man sich von der Fovea entfernt (Haines et al., 1975; Knepel-Stoll, 2010). Demnach müsste die initiale Anzeige des Effekts an Position A zur schnellsten Reaktionszeit führen. Ein Grund für die Abweichung des Ergebnisses könnte die Geometrie des Cockpits darstellen, an dessen Scheibenwurzelkante der LED-Streifen auf der I-Tafel entlangläuft: Das verwendete Cockpit hat zur Einbettung der Instrumentenkombination eine Erhöhung hinter dem Lenkrad und zusätzlich ein freistehendes Zentraldisplay in der Mitte der I-Tafel. Je nach freigewählter Sitzposition des Probanden (Vorgabe war es, eine Sitzposition wie im privaten Fahrzeug einzunehmen), könnten die Elemente Teile des Lichteffekts auf der I-Tafel verdeckt haben, was eine verzögerte Wahrnehmbarkeit bedingt hätte.

Tabelle 17: Reaktionszeiten der drei richtungsorientierten Bewegungsarten in Abhängigkeit des Anzeigeorts

Anzeigeort	Bewegungsart		
	Impulse n. v.	Impulse n. h.	Auffüllen n. v.
I-Tafel	1389 ms Position B	1594 ms Position A	1501 ms Position B
Türen	1423 ms Position C	1358 ms Position B	1408 ms Position C
Beide Bereiche	1483 ms Position C	1510 ms Position A	1423 ms Position C

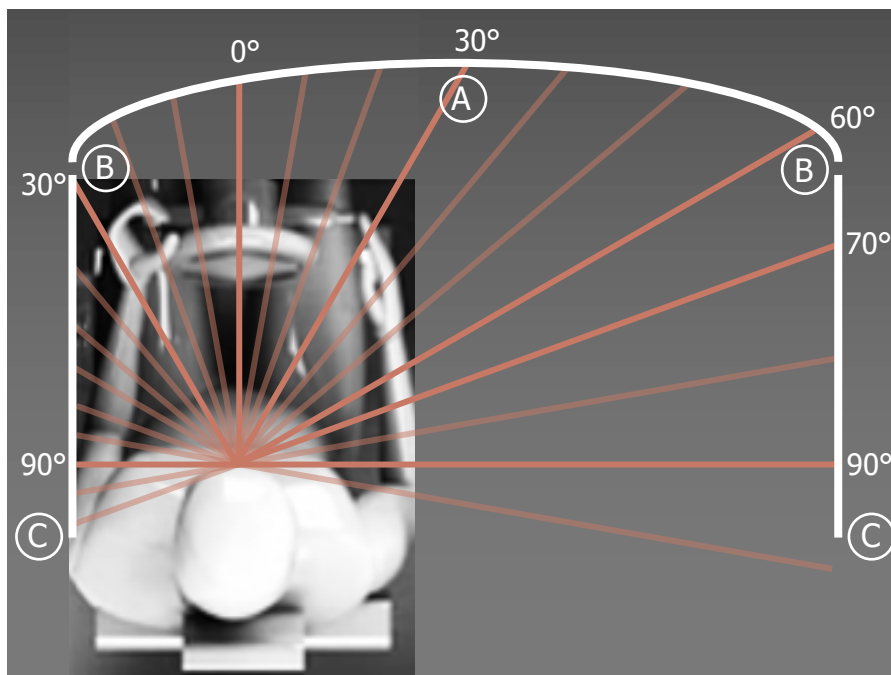


Abbildung 56: Anzeigeorte der Lichteffekte in Abhängigkeit des horizontalen Sichtfelds eines Fahrers

Auswertung Reaktionszeit & Faktor Anzeigeort

Zusätzlich zu den bereits betrachteten Mittelwerten für die Anzeigeorte in Abhängigkeit einiger Bewegungsarten, fehlt der Gesamtblick über alle Effekte, welcher in Abbildung 57 zusammengestellt ist. Die Visualisierung der Reaktionszeiten in Abhängigkeit des Faktors *Anzeigeort* als Boxplots in Abbildung 57 zeigt ein gleichmäßiges Bild für die einzelnen Ausprägungen. Für die Lichteffekte, welche in den Türen oder gleichzeitig in Türen und I-Tafel angezeigt wurden, wurden nahezu identische Werte aufzeichnet. Die Anzeige nur auf der I-Tafel hat jedoch zu etwas langsameren Reaktionen geführt: Zwar liegt der Mittelwert mit 1483 ms

nahe dem der anderen beiden Ausprägungen (vergleiche Tabelle 18), jedoch ist die Streuung in die oberen Werte stärker ausgeprägt (gilt sowohl für das dritte Quartil als auch die Extremwerte).

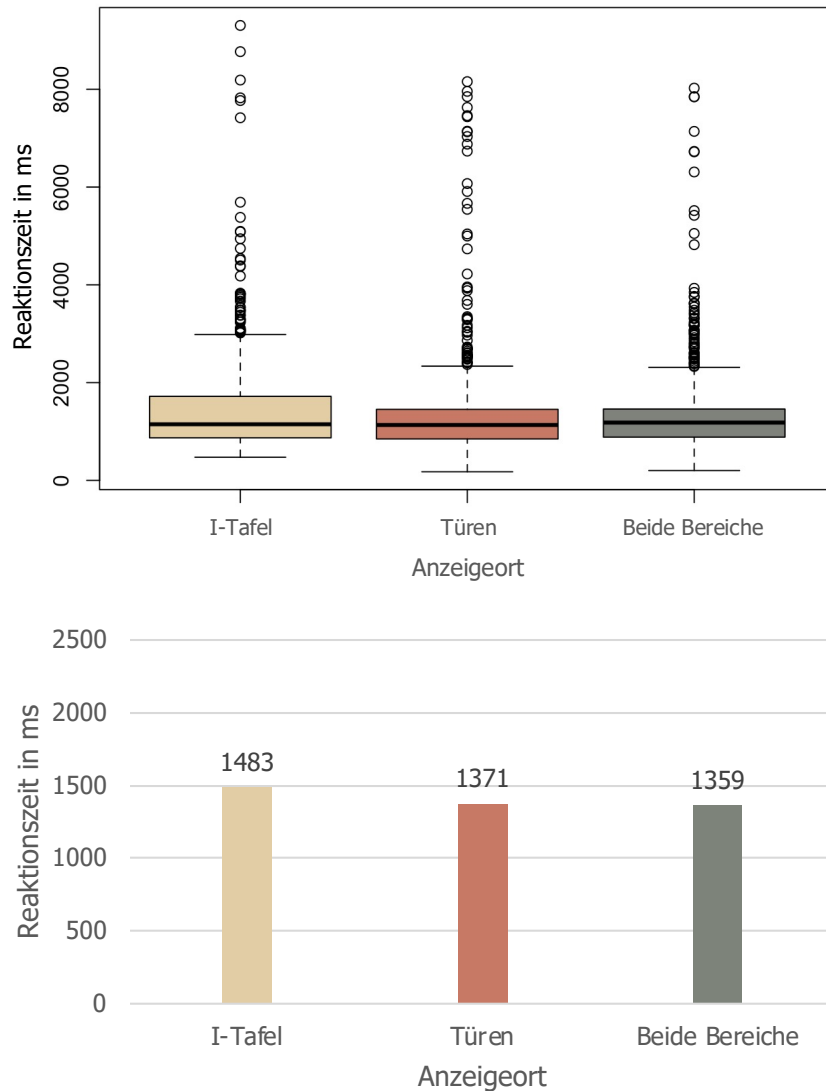


Abbildung 57: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Anzeigeort als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Die Durchführung des Kruskal-Wallis-Test zeigt, dass diese Abweichung nicht für ein signifikantes Ergebnis reicht ($H(2) = 4,914$; $p = 0,86$). Weder zwischen den Rängen 1 und 2, noch zwischen 1 und 3 konnte ein signifikanter Unterschied identifiziert werden, jedoch wird der Trend aus dem vorherigen Abschnitt fortgesetzt: Die I-Tafel schnitt am schlechtesten ab mit einer möglichen Ursache in Lage des zugehörigen LED-Streifens.

Tabelle 18: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor *Anzeigeort*

Rang	Mittelwert in ms	Anzeigeort	Signifikant zu
1	1359	Beide Bereiche	-
2	1371	Türen	-
3	1483	I-Tafel	-

Auswertung auf Effektebene

Bisher wurden die Daten auf Faktorebene untersucht und es ist bekannt, welche Faktorausprägungen die schnellsten Reaktionen auslösten. Da die Faktoren aufgrund des Versuchsdesigns aber nicht einzeln auftreten, sondern stets in gemeinsamer Konstellation, sind auch die Ergebnisse der einzelnen Effektkombinationen von Interesse. Dabei ist fraglich, ob sich in den Lichteffekten, auf die am schnellsten und am langsamsten reagiert wurde, die jeweiligen zugehörigen Ausprägungen auf Faktorebene wiederfinden lassen. Demzufolge müssten die Lichteffekte mit den schnellsten Reaktionszeiten die Farbe Blau beinhalten, eine der Bewegungsarten *Erscheinen* oder *Blinken* aufweisen und im besten Fall im gesamten Bereich (bestehend aus Türen und I-Tafel) sichtbar sein.

Um die Hypothese zu überprüfen, wurden in Tabelle 19 je die drei schnellsten und langsamsten Effekte mit Reaktionszeiten zusammengefasst. Dabei fand eine Unterscheidung zwischen vor und nach der Ausreißerkorrektur statt, da dabei die langsamsten Werte entfernt wurden, die für diese Betrachtung aber von Relevanz sind.

Tabelle 19: Übersicht der Effekte mit den schnellsten und langsamsten Reaktionszeiten

	Mit Ausreißerkorrektur			Ohne Ausreißerkorrektur		
	Lichteffect	N	Reaktionszeit in ms	Lichteffect	N	Reaktionszeit in ms
Schnellste Reaktion	Rot, Erscheinen, Beide Bereiche	23	785	Gelb, Blinken, Türen	24	790
	Gelb, Blinken, Türen	24	790	Blau, Erscheinen, Beide Bereiche	24	798
	Blau, Erscheinen, Beide Bereiche	24	798	Rot, Blinken, Beide Bereiche	24	799
Mittelwert	...		1403	...		1689
Langsamste Reaktion	Rot, Pulsen, I-Tafel	22	2926	Rot, Pulsen, Türen	24	5621
	Gelb, Pulsen, I-Tafel	22	2970	Weiß, Pulsen, Türen	18	6124
	Weiß, Pulsen, Türen	15	4450	Weiß, Pulsen, I-Tafel	10	15356

Die genannten Eigenschaften für eine schnelle Reaktion sind im drittschnellsten Effekt mit einer mittleren Reaktionszeit von 798 ms vereint. Doch auch der Effekt, auf den im Durchschnitt am schnellsten reagiert wurde, besteht aus Merkmalen, die bereits in der vorherigen Auswertung stets eine schnelle Reaktionszeit aufzeigten: Das rote Blinken, welches zur gleichen Zeit auf allen untersuchten Anzeigebereichen gezeigt wurde, wurde nach durchschnittlich 785 ms entdeckt. Damit eignet sich dieser Lichteffect besonders gut für Situationen, in denen Zeit ein kritischer Faktor ist. Dementsprechend ist es von großem Vorteil, dass Probanden diesen „schnellsten“ Lichteffect auch eindeutig der Kategorie *Sicherheit* zugeordnet haben: *Komfort* (0), *Information* (1), *Sicherheit* (23), *Keine Zuordnung* (0). Beim zweitschnellsten Effekt ist diese Zuordnung etwas weniger eindeutig, es ist jedoch wichtig, dass der Effekt zumindest kaum als *Komfort* zugehörig empfunden wird, denn für diese Kategorie ist eine schnelle Reaktionszeit nicht von Nutzen: *Komfort* (1), *Information* (8), *Sicherheit* (13), *Keine Zuordnung* (2). Genau dieser Widerspruch wird bei der Betrachtung des drittschnellsten Effekts (*Blau, Erscheinen, Beide Bereiche*) deutlich. Auf Basis der objektiven Eigenschaften zur Auslösung einer schnellen Reaktion wäre der Effekt gut für die Kategorie *Sicherheit* geeignet, doch dies wird dem Lichteffect inhaltlich nicht zugeschrieben: *Komfort* (9), *Information* (11), *Sicherheit* (1), *Keine Zuordnung* (3). Selbst wenn der Effekt also in einer zeitkritischen Situation schnell wahrgenommen würde, so besteht eine hohe

Wahrscheinlichkeit, dass er inhaltlich falsch interpretiert wird. Die Betrachtung der durchschnittlichen Reaktionszeit pro Kategorie zeigt, dass der Kategorie *Sicherheit* tendenziell die am schnellsten Wahrnehmbaren Lichteffekte zugeteilt wurden: $\mu_{\text{Komfort}} = 1615 \text{ ms}$, $\mu_{\text{Information}} = 1368 \text{ ms}$, $\mu_{\text{Sicherheit}} = 1242 \text{ ms}$, $\mu_{\text{KeineKategorie}} = 1558 \text{ ms}$. Eine statistische Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den beiden nominalen und metrischen Variablen wurde mittels des Eta-Koeffizienten η durchgeführt (Janssen & Laatz, 2017, S. 280). Die Berechnung des Eta-Koeffizienten ergibt einen Wert von $\eta = 0,143$, der einen geringen Zusammenhang zwischen der Kategorisierung und der Reaktionszeit widerspiegelt. Das quadrierte Maß η^2 beschreibt den Anteil der Varianz der abhängigen Variable Reaktionszeit, der durch die Ergebnisse der Kategorisierung, in diesem Fall die unabhängigen Variable, erklärt wird. Mit $\eta^2 = 0,021$ liegt der erklärbare Anteil bei lediglich 2%.

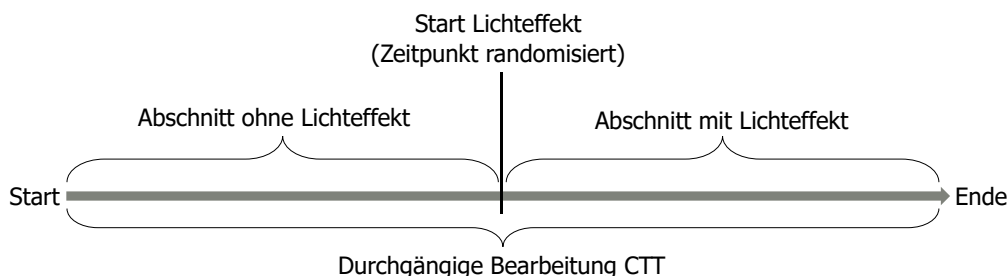
Insgesamt könnten also durch die Erkenntnisse der Kategorisierung nur geringe Rückschlüsse auf die gemessenen Reaktionszeiten getroffen werden. Umso wichtiger ist es bei der Auswahl eines Effekts mit Eignung für eine zeitkritische Situation auf dessen kategoriale Zuordnung zu achten.

Eine Einschätzung, ob es sich bei den drei niedrigsten Reaktionszeiten um Effekte handelt, die nur im Vergleich zu den anderen Effekten schnell wirken, oder ob eine Zeit unter 800 ms grundsätzlich als sehr kurze Reaktionszeit zu betrachten ist, gibt die Arbeit von Irwin, Colcombe, Kramer, & Hahn (2000). In ihrer Studie reagieren Probanden auf Farb- und Objektänderungen in einer Schnittstelle. Die erhobenen Reaktionszeiten variieren zwischen 745 ms und 901 ms und liegen zwar damit im Schnitt deutlich unter der mittleren Reaktionszeit der eigenen Studie (vgl. Tabelle 19), allerdings gehen die Probanden im Studiendesign von Irwin et al. keiner Nebenaufgabe nach. Mit diesen Vergleichswerten kann eine Reaktion von unter 800 ms, die trotz einer zusätzlichen visuell beanspruchenden Aufgabe wie dem CTT erreicht wurde, auch in der absoluten Betrachtung der Werte als eine sehr schnelle Reaktion eingestuft werden.

Für die Auswertung der langsamsten Reaktionszeiten lohnt sich der Blick auf die unkorrigierten Daten, da hier weiterhin die Ausreißer mit besonders großen Werten enthalten sind, wobei sich die Trends auch in den korrigierten Daten widerspiegeln. Auf den ersten Blick lassen sich in Tabelle 19 diejenigen Eigenschaften wiederfinden, die auch dazu führten, dass einige Effekte gänzlich übersehen wurden: *Weiß + Pulsen*. Die Kombination mit dem Anzeigort, der zur langsamsten Reaktion geführt hat, der I-Tafel, bildet den Effekt mit der langsamsten Reaktionszeit der Studie. Die Probanden, die diesen Effekt wahrnehmen konnten (10 von 24), benötigten hierfür im Durchschnitt etwas mehr als die Hälfte der gesamten Anzeigedauer eines Lichteffekts: Jeder Effekt wurde für 30 Sekunden angezeigt, die manuelle Reaktion erfolgte im Schnitt nach etwas mehr als 15 Sekunden. Dieser Wert ist vor allem im Vergleich zur Anzeige des gleichen Effekts in Kombination mit einem anderen Anzeigort auffallend schlecht. Wenn das weiße Pulsieren in den Türen gezeigt wurde, reagierten die Probanden im Vergleich mehr als doppelt so schnell darauf ($\mu = 6124$ ms). Durch die Anzeige des Effekts auf beiden Anzeigorten (Instrumententafel und Türen), fand die Reaktion im Verhältnis sogar bereits nach etwa einem Sechstel der Zeit statt ($\mu = 2587$ ms, berechnet auf Basis von 22 Reaktionen). Trotzdem ist zusammenfassend dringend davon abzuraten, für eine Situation, in denen eine schnelle Reaktion erforderlich ist, einen Effekt mit der Bewegungsart *Pulsen* auszuwählen. Selbst die Kombination mit einer schnell wahrnehmbaren Farbe wie Rot, wie beim Effekt mit der drittlangsamsten Reaktionszeit, führt zu keiner schnellen Reaktionszeit. Der Blick auf die Ergebnisse der Kategorisierung zeigt zusätzlich, dass *Pulsen* überwiegend als Effekt der Kategorie *Komfort* oder *Information* interpretiert wurde. In diesem Fall ergeben dementsprechend die subjektive Einschätzung der Probanden als auch die objektiven Werte der Reaktionszeitmessung ein konsistentes Bild, aus der sich eine klare Empfehlung ableiten lässt.

11.5 Visuelle Beeinflussung

Um die visuelle Beeinflussung der Probanden durch die verschiedenen Lichteffekte miteinander vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse des CTTs in einen relativen Änderungswert überführt. Dieser beschreibt, wie sich die Leistung eines Teilnehmers im CTT aufgrund des Lichteffekts ändert, indem die Leistung in den Zeitspannen vor und nach dem ersten Auftreten des Lichteffekts verglichen werden (Visualisierung in Abbildung 58). Das entsprechende Verhältnis wird in Prozent ausgedrückt und dient als Maß zum Vergleich der visuellen Einflussnahme der verschiedenen Effekte. Grundlage zur Berechnung der Leistung ist jeweils die Abweichung der gesteuerten Linie zur Grundlinie (vgl. Kapitel 10.2.3). Der Bezug auf die relativen Delta-Werte soll sicherstellen, dass die Leistung der einzelnen Probanden individuell berücksichtigt wird und keine besonders guten oder schlechten Leistungen im CTT einen absoluten Maßstab für die Bewertung vorgeben. Trotz dieses Vorgehens müssen von der Analyse Daten zu 60 Lichteffekten ausgeschlossen werden, da bei der Bedienung des CTTs durch drei Probanden während des Tests zu große Schwierigkeiten auftraten.



$$\text{Änderungswert CTT in Prozent} = \frac{\text{Ergebnis Abschnitt mit Lichteffekt}}{\text{Ergebnis Abschnitt ohne Lichteffekt}} - 1$$

Abbildung 58: Berechnung des Änderungswert des CTTs als Maß für visuelle Beeinflussung

Wenn die Berechnung des Änderungswerts eine positive Zahl liefert, beschreibt diese die prozentuale Verschlechterung des CTT-Ergebnisses durch die Anzeige des Lichteffekts. Beispiel: Ein Änderungswert von 34% bedeutet eine Verschlechterung der Leistung in dem Zeitraum, in welchem der Lichteffekt angezeigt wurde, im Vergleich zu der Zeit, in welcher kein Lichteffekt angezeigt wurde, um

34%. Ein negativer Änderungswert (z.B. -19%) beschreibt dementsprechend eine Verbesserung des CTT-Ergebnisses durch die Anzeige des Lichteffekts.

Insgesamt kam es in der Studie deutlich häufiger zu Verschlechterungen als zu Verbesserungen der Leistung im CTT. Alle Änderungswerte innerhalb der Ausreißergrenze von \pm drei Standardabweichungen um den Mittelwert sind in Abbildung 59 als Histogramm dargestellt. Der Mittelwert beläuft sich für die 2009 erhobenen Datenpunkte auf 47,95%.

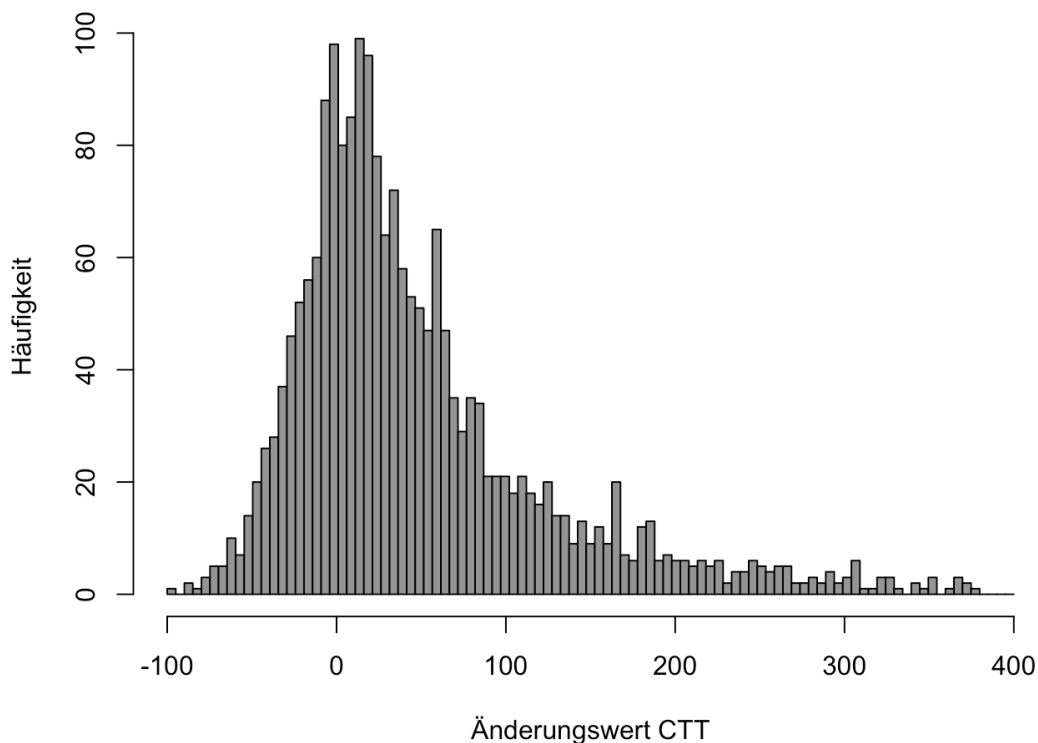


Abbildung 59: Histogramm des CTT Änderungswerts nach Ausreißerkorrektur von $\mu \pm 3\sigma$; $\mu = 47,95\%$; $\sigma = 76,79\%$; $N = 2009$

Festlegung der Statistischen Auswertungsmethodik

Bei der Auswertung der visuellen Beeinflussung wurde die gleiche Methodik wie zur Auswertung der ebenfalls metrischen Variable Reaktionszeit angewandt. Die zunächst durchgeführte Überprüfung auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test ergab für die einzelnen Gruppen eine signifikante Abweichung – auch für den um Ausreißer bereinigten Datensatz (Testergebnisse in Tabelle 20-Tabelle 22). Ebenfalls zeigte der Levene-Test beim Vergleich der Varianzen, dass keine Varianzhomogenität bezüglich der Mittelwerte vorliegt (siehe Abbildung 60), weswegen für die Auswertung der einzelnen Faktoren erneut auf den Kruskal-

Wallis-Test zurückgegriffen wurde. Die nicht im nachstehenden Fließtext als Abbildung hinterlegten Auswertungen finden sich im Anhang 5.

Tabelle 20: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor *Farbe* nach Ausreißerkorrektur

Farbe	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Weiß	373	60,84	89,68	,152	373	,000
Gelb	413	47,79	72,04	,119	413	,000
Rot	411	42,19	72,50	,129	411	,000
Grün	401	47,55	77,00	,140	401	,000
Blau	411	42,58	71,50	,134	411	,000

Tabelle 21: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor *Bewegungsart* nach Ausreißerkorrektur

Bewegungsart	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
Erscheinen	340	42,39	73,18	,852	340	,000
Blinken	345	39,06	71,73	,865	345	,000
Pulsen	305	54,26	80,34	,877	305	,000
Impulse nach vorne	336	53,56	81,88	,874	336	,000
Impulse nach hinten	342	46,12	73,68	,885	342	,000
Auffüllen nach vorne	341	53,18	80,87	,876	341	,000

Tabelle 22: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor *Anzeigeort* nach Ausreißerkorrektur

Anzeigeort	Deskriptive Statistik			Shapiro-Wilk-Test		
	N	Mittelwert	Std.-abw.	Statistik	df	Signifikanz
I-Tafel	673	42,08	74,74	,882	673	,000
Türen	656	49,26	74,82	,854	656	,000
Beide Bereiche	680	52,50	80,33	,876	680	,000

Levene-Test auf Gleichheit der Fehlervarianzen^{a,b}

		Levene-Statistik	df1	df2	Sig.
Änderungswert CTT	Basiert auf dem Mittelwert	2,133	89	1919	,000
	Basiert auf dem Median	1,218	89	1919	,085
	Basierend auf dem Median und mit angepaßten df	1,218	89	1418,980	,087
	Basiert auf dem getrimmten Mittel	1,854	89	1919	,000

Prüft die Nullhypothese, daß die Fehlervarianz der abhängigen Variablen über Gruppen hinweg gleich ist.

a. Abhängige Variable: Änderungswert CTT

b. Design: Konstanter Term + Farbe + Bewegungsart + Anzeigeort + Farbe * Bewegungsart + Farbe * Anzeigeort + Bewegungsart * Anzeigeort + Farbe * Bewegungsart * Anzeigeort

Abbildung 60: Ergebnis der Überprüfung der Varianzhomogenität des CTT Änderungswerts

Auswertung Änderungswert CTT & Faktor Farbe

Der erste zu betrachtende Faktor und dessen Beeinflussung des Ergebnisses des CTTs ist in Abbildung 61 visualisiert. Auf den ersten Blick zeigen die fünf Farben in der Boxplot-Darstellung eine recht ähnliche Darstellung: der eingezeichnete Median liegt ungefähr auf der gleichen Höhe und auch das 1. Quartil pendelt bei allen Ausprägungen um den gleichen Wert von 0%, was keiner Veränderung des CTT-Ergebnisses durch die Anzeige des Lichteffekts entspricht. Für die darunterliegenden Werte, die eine Verbesserung widerspiegeln, gibt es eine Untergrenze von -100%, den kein Durchgang in der Studie unterschritten hat, aber am meisten angenähert wurde sich durch die Farbe Gelb. Bei der Darstellung der

höheren Werte ab dem 3. Quartil zeigt sich hingegen vor allem Weiß besonders ausgeprägt, wobei die Menge an Ausreißern trotz Entfernen der Werte über $+3\sigma$ pro Farbe ungefähr gleich zu sein scheint.

Das durchschnittliche Abschneiden der einzelnen Farben wird in der Darstellung der Mittelwerte in Abbildung 61 unten sichtbar. Jeweils die Farben Rot und Blau, sowie Gelb und Grün scheinen einen gleichen Einfluss auf den CTT zu haben, während der Durchschnittswert für Weiß deutlich schlechter ist. Die Überprüfung mit dem Kruskal-Wallis-Test zeigt, dass es zwar signifikante Unterschiede in der Verteilung gibt ($H(4) = 9,926$; $p = 0,042$), aber die anschließenden Post-hoc-Tests können diese im paarweisen Vergleich nicht identifizieren. Die Tendenzen, die in der deskriptiven Beschreibung gefunden wurden, spiegeln sich zwar vor allem in den unkorrigierten Signifikanzwerten wider, aber die Anpassung durch die Bonferroni-Korrektur hebt die Werte auf $p > 0,05$ an, so dass keine Signifikanz mehr abgelesen werden kann. So lässt sich insgesamt für den Einfluss der Farbausprägungen zwar folgende einflussnehmende Reihenfolge festhalten, aber es gilt zu beachten, dass die Abstände zwischen den Rängen teils sehr knapp sind: Rot (42,19%), Blau (42,58%), Grün (47,55%), Gelb (47,79%), Weiß (60,84%).

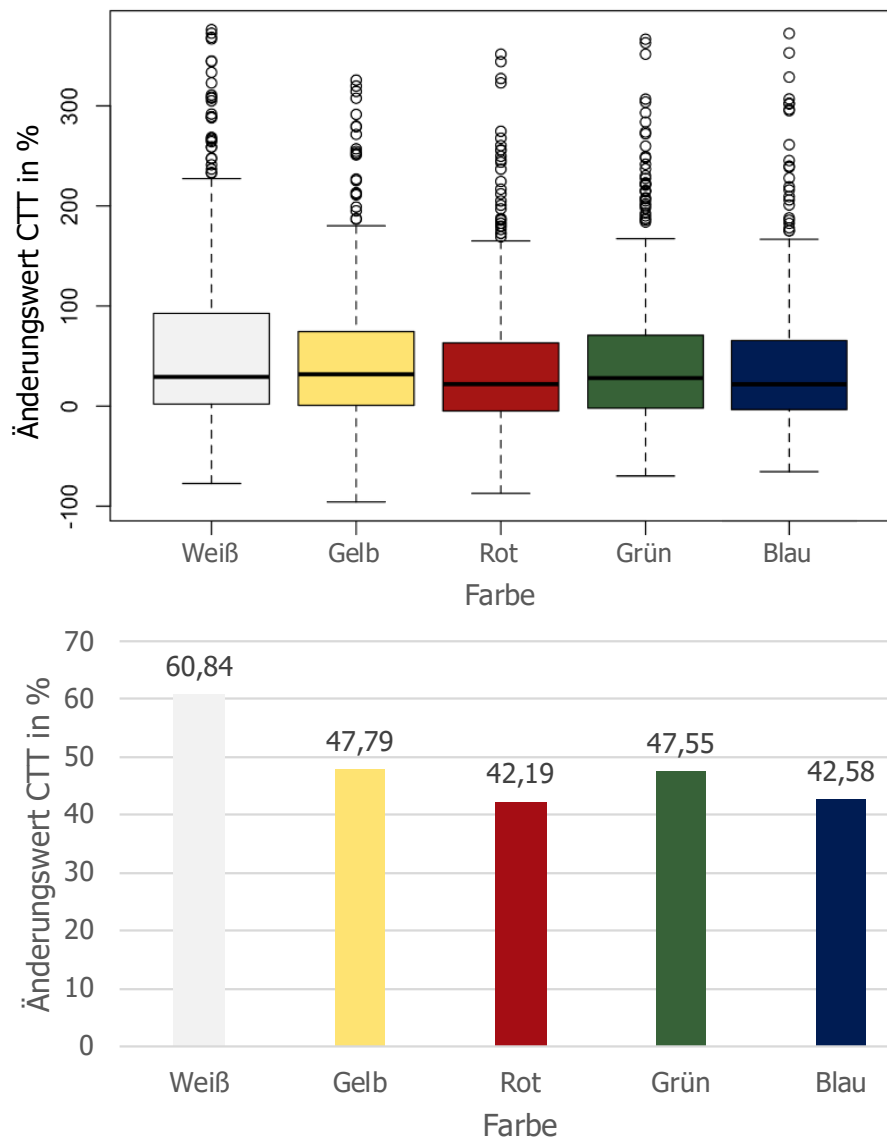


Abbildung 61: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Farbe als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Auswertung Änderungswert CTT & Faktor Bewegungsart

In Abbildung 62 oben ist der CTT-Änderungswert in Abhängigkeit des zweiten Faktors, der Bewegungsart, visualisiert. Die Boxplots ähneln im ersten Eindruck aufgrund der sehr gleichförmigen Verteilung denen der Auswertung von Farbe im vorherigen Abschnitt. Die drei sich ähnelnden Gruppen von Bewegungsarten, die sich bei der Auswertung der Reaktionszeit herauskristallisiert haben (*Blinken & Erscheinen* | *Pulsen* | *Impulse & Auffüllen*) lassen sich hier nur angedeutet wiederfinden. Zwar scheinen *Blinken* und *Erscheinen* zur geringsten visuellen Beeinflussung geführt zu haben, aber die Unterschiede zu den anderen Ausprägungen fallen in der optischen Überprüfung der Daten deutlich geringer aus.

Die Darstellung der Mittelwerte in Abbildung 62 unten bringt mehr Klarheit und zeigt, dass vor allem die drei Bewegungsarten mit der den höchsten Änderungswerten (*Pulsen*, *Impulsen nach vorne*, *Auffüllen nach vorne*) deutlich näher beieinander liegen, als es bei der Auswertung der Reaktionszeit der Fall war. Die Nähe spiegelt sich auch in den statistischen Tests wieder: Zwar findet der Post-hoc-Test ebenfalls eine vorhandene, wenn auch schwache signifikante Abweichung in der Verteilung der Werte der einzelnen Bewegungsarten ($H(5) = 11,384$; $p = 0,044$), aber die Post-hoc-Tests mit angewandter Bonferroni-Korrektur zeigen keine signifikanten Unterschiede in den paarweisen Vergleichen. Wie bereits im Abschnitt zuvor, sind zwar vor der Anwendung der Korrektur Signifikanzen vorhanden, doch durch die Anpassung spiegeln die p-Werte nur die Trends der visualisierten Daten wider, deren Verteilung nicht für eine signifikante Aussage reicht.

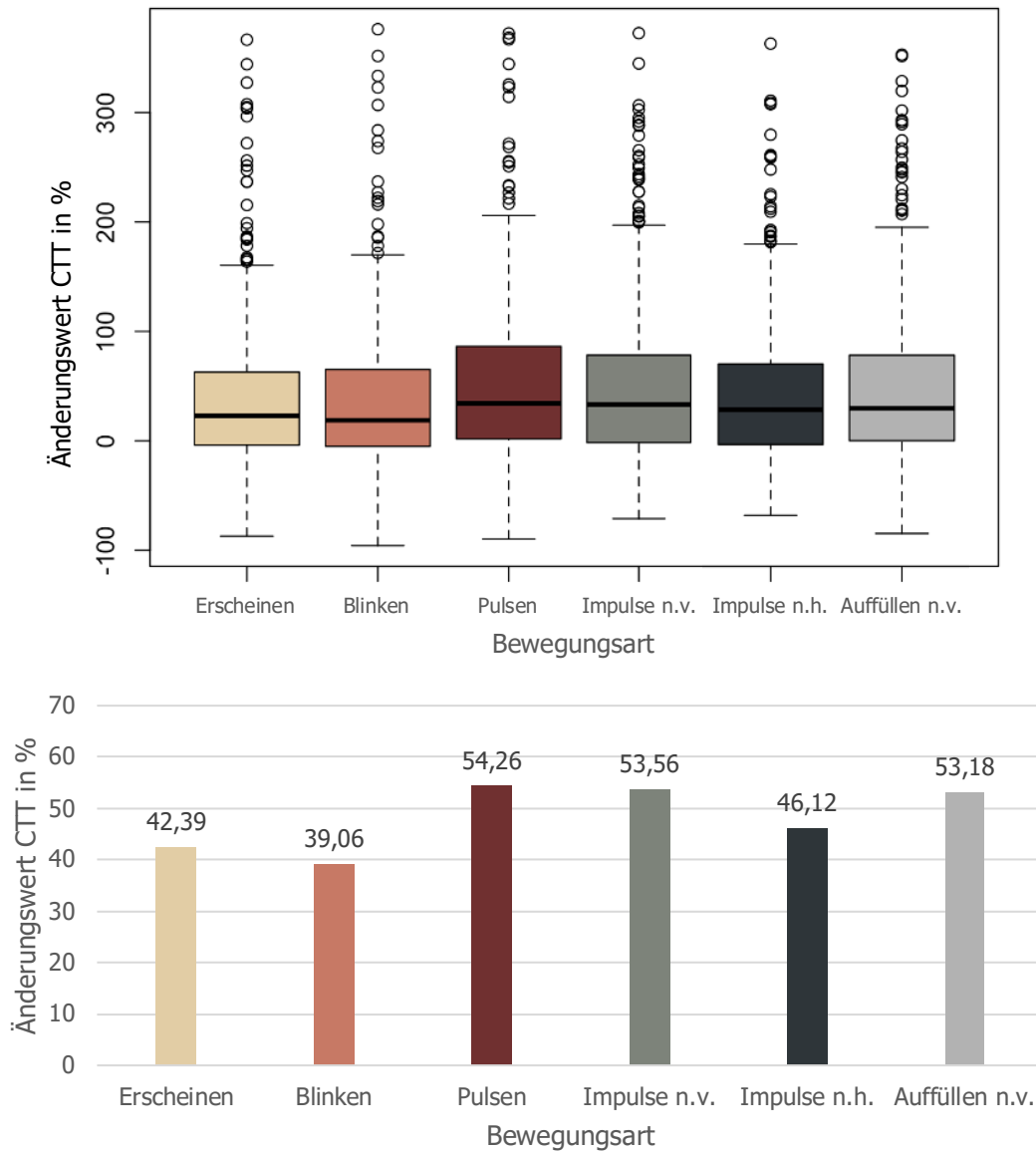


Abbildung 62: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Bewegungsart als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Die Rangordnung der Bewegungsarten hinsichtlich der Mittelwerte des CTT-Änderungswerts lautet wie folgt: *Blinken* (39,06%), *Erscheinen* (42,39%), *Impulse nach hinten* (46,12%), *Auffüllen nach vorne* (53,18%), *Impulse nach vorne* (53,56%), *Pulsen* (54,26%).

Diese Reihenfolge verwundert, wenn man sich die Bewegungsabläufe einzelner Effekte vor Augen führt: *Blinken* ist diejenige Bewegungsart mit der meisten optischen Veränderung über Zeit (Blinkfrequenz mit 1,0 Hz), bei *Erscheinen* wiederum findet nur eine einmalige Änderung statt (das initiale Aufleuchten). Unter der Annahme, dass sich die Komplexität eines Lichteffekts auf die visuelle Beeinflussung auswirkt, müsste die Rangordnung der Effekte eine andere sein und die

Bewegungsart *Erscheinen* mit Abstand den geringsten Einfluss aufweisen. Daraus abgeleitet kann die Häufigkeit der Veränderungen innerhalb eines Lichteffekts nicht der Grund für die Reihenfolge der CTT-Änderungswerte sein.

Ein alternativer Erklärungsversuch, der sich auf Äußerungen von Probanden während der Studie stützt, ist, dass sie stets bemüht waren, das Verhalten eines Lichteffekts vollständig zu erfassen. Mit Fragen wie „Was ist da?“ oder „Was macht der Lichteffekt?“ äußerten die Teilnehmenden den Drang, das Aussehen der gezeigten Effekte zu verstehen. Dafür kehrten die Blicke immer wieder zum LED-Band zurück, bis sich ein grobes Verständnis des Bewegungsmusters eingestellt hat und beispielsweise klar war, dass sich der Effekte kontinuierlich wiederkehrend von vorne nach hinten bewegt oder er bei *Pulsen* nach einer Aus-Phase erneut mit einer gleichen Frequenz erscheint. Dies würde erklären, wieso *Pulsen*, also der Effekt mit der langsamsten Veränderung und damit der größten Dauer bis zu einem wiederkehrenden Intervall, die meiste Zeit zur vollständigen Erfassung benötigt. *Blinken* wiederum ist das Gegenteil: Mit dem sich jede Sekunde wiederholenden Bewegungsmuster, ist es der Effekt, dessen Verhalten am schnellsten erfasst werden kann.

Nun bestehen Effekte der Art *Erscheinen* nur aus der initialen Helligkeitsänderung, aber aufgrund des CTT-Änderungswerts kann man vermuten, dass die Probanden eine weitere Änderung der Darstellung erwartet haben. Das Achtgeben auf eine solche erwartete Änderung, wie sie sie bei den anderen Effekten erlebt haben, könnte der Grund für das Resultat des CTT-Änderungswert sein. Weitere Belege für diese These finden sich bei der nachfolgenden Auswertung des Anzeigeorts.

Auswertung Änderungswert CTT & Faktor Anzeigeort

Die letzte zu analysierende Einflussnahme ist die des Faktors Anzeigeort mit den drei Ausprägungen *Türen*, *I-Tafel* und der *Anzeige auf beiden Bereichen*. Die zugehörigen Änderungswerte sind in Abbildung 63 oben in der Boxplot-Darstellung zusammengefasst. Die beiden äußeren Verteilungen mit den Werten der I-Tafel

und beider Anzeigebereiche scheinen sich sehr zu ähneln, wohingegen die Anzeige in den Türen der Lage der Box nach urteilen einen geringeren Einfluss auf die Änderung des CTTs genommen hat. Der Vergleich der Mittelwerte bestätigt dies und zeigt zwischen dem Bereich Türen und beiden Bereichen einen Abstand von über 10% (vgl. Abbildung 63 unten).

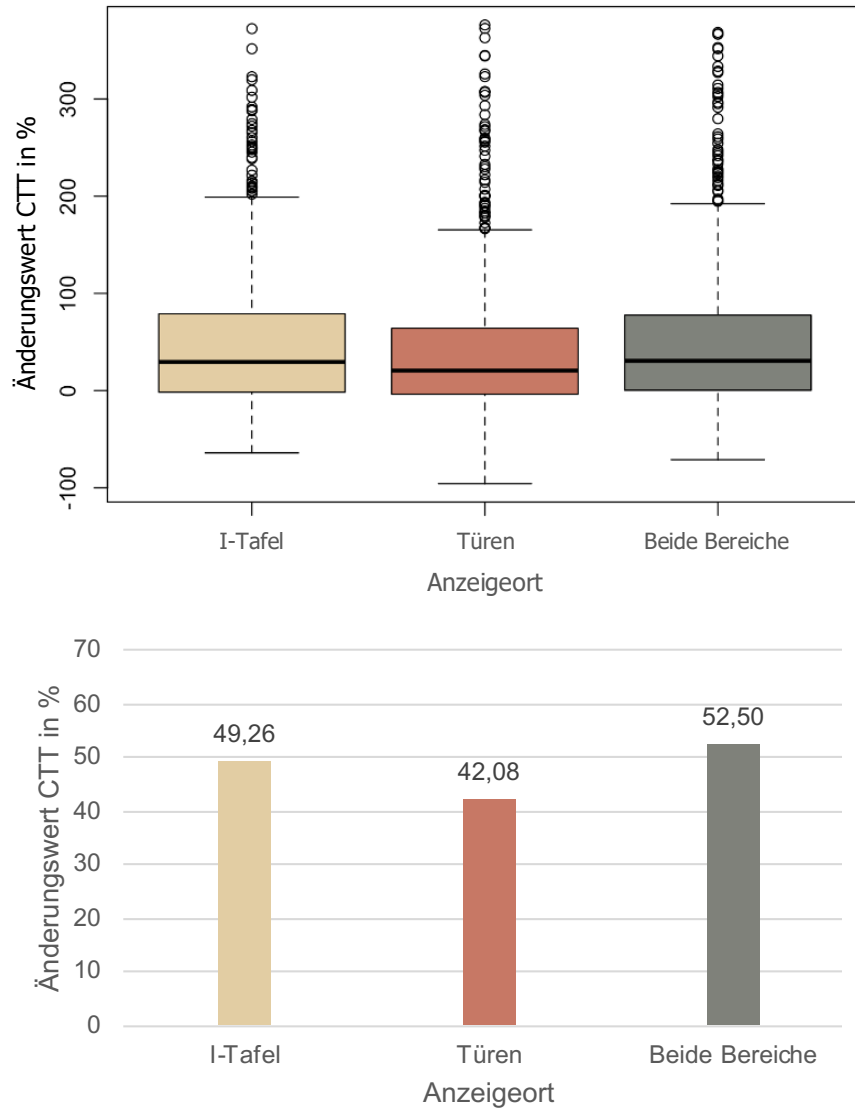


Abbildung 63: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Anzeigeort als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)

Die Signifikanz dieses Abstands lässt sich im Anschluss an den ebenfalls signifikanten Kruskal-Wallis-Test ($H(2) = 7,011$; $p = 0,03$) durch den paarweisen Vergleich im Post-hoc-Test bestätigen: die Anzeigeorte Türen und Beide Bereiche unterscheiden sich mit einer korrigierten Signifikanz von $p = 0,038$. Bei der Anzeige eines Effekts auf der I-Tafel besteht kein signifikanter Unterschied zu einer der

ändern beiden Anzeigeorte. Mit einem durchschnittlichen Änderungswert von 49,26% im CTT belegt der Anzeigeort I-Tafel den mittleren Rang der visuellen Beeinflussung. Dies überrascht, da die Anzeige auf der I-Tafel näher an dem Screen zur Bearbeitung des CTTs liegt als die Beleuchtung in den Türen auf Brüstungshöhe. Die bessere Lage hätte abgeleitet von entsprechender Forschung zur Position von Displays im Fahrzeuginnenraum zu einer geringeren Blickabweichung von der Primäraufgabe führen müssen als die Anzeige in den Türen (Stevens et al., 2002, S. 23), doch dies konnte in dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Stattdessen muss es andere Gründe für die Rangordnung der Mittelwerte geben. Neben der Lage im Blickfeld variiert auch die Anzahl an LEDs, die pro Anzeigeort betroffen sind. Hat womöglich die Menge der leuchtenden Fläche einen Einfluss auf die Bearbeitung des CTTs? Zur Erinnerung: in den Türen sind je 100 LEDs verbaut, in der I-Tafel 232 LEDs und damit sind insgesamt bei der Anzeige eines Effekts auf allen Fläche 432 LEDs betroffen. Diese zunehmende Menge entspricht auch der Reihenfolge der Ergebnisse des CTT-Änderungswerts. Wenn allerdings die Hypothese lautet, dass die Menge an leuchtender Fläche das Ergebnis der Primäraufgabe beeinflusst, so müsste sich das auch in dem Vergleich der Bewegungsarten *Auffüllen nach vorne* und *Impulse nach vorne* wiederfinden lassen, da sich die Effekte nur hinsichtlich der Gesamtmenge der leuchtenden LEDs unterscheiden. Für diese Ausprägungen wurde jedoch bereits im vorherigen Abschnitt kein Unterschied aufgezeigt: die Mittelwerte sind nahezu identisch.

Neben der Menge an leuchtender Fläche gibt die Anzahl der LEDs ein weiteres Maß wieder: Durch die regelmäßige Anordnung der LEDs im Abstand von 7 mm entspricht die Menge der LEDs auch der Gesamtstrecke, die ein Lichteffekt einnimmt bzw. zurücklegt. Umgerechnet wird ein Lichteffekt in den Türen auf einer Fläche von 1,40 m (je 70cm) angezeigt, in der I-Tafel auf 1,624 m und gesamthaft auf etwas über 3 m. Nimmt die Anzahl der beteiligten LEDs zu, so nimmt also auch die Strecke zu, die man betrachten muss, um den gesamten Effekt zu erfassen. Wenn man für das Absuchen einer größeren Strecke mehr Zeit einkalkuliert, scheint erneut der Aufwand für das Verstehen der optischen Erscheinung des

Lichteffekts der Grund für das gute Abschneiden der Türen bzw. das schlechte Abschneiden der Anzeige auf allen Bereichen sein.

Auswertung auf Effektebene

Die Ergebnisse der vorherigen Auswertung auf Ebene der unabhängigen Variablen Farbe, Bewegungsart und Anzeigeort implizieren, dass je aufwendiger die Erfassung eines Lichteffekts ist, desto mehr Einfluss er auf das Ergebnis des CTTs nimmt. Diese These müsste sich auch in der Zusammensetzung der Effekte finden lassen, die die jeweils größten und kleinsten Änderungen im Ergebnis des CTTs hervorgerufen haben. In Tabelle 23 sind die entsprechenden Lichteffekte vor und nach der Ausreißerkorrektur aufgelistet.

Tabelle 23: Übersicht der Effekte mit den kleinsten und größten CTT Änderungswerten

	Mit Ausreißerkorrektur			Ohne Ausreißerkorrektur		
	Lichteffekt	N	Änderungswert in %	Lichteffekt	N	Änderungswert in %
Kleinste Veränderung	Gelb, Blinken, Beide Bereiche	23	15,35	Gelb, Blinken, Beide Bereiche	23	15,35
	Blau, Impulse nach vorne, Türen	22	15,58	Blau, Impulse nach vorne, Türen	22	15,58
	Rot, Blinken, Beide Bereiche	22	15,91	Rot, Blinken, Türen	23	18,10
Mittelwert	...		47,95	...		58,12
Größte Veränderung	Gelb, Impulse nach vorne, Beide Bereiche	24	80,98	Weiß, Pulsen, Türen	17	132,81
	Weiß, Pulsen, Türen	15	81,59	Weiß, Impulse nach Vorne, Beide Bereiche	23	136,97
	Weiß, Pulsen, Beide Bereiche	21	102,29	Weiß, Pulsen, I-Tafel	9	148,05

Der Blick auf die Auswertung der Änderungswerte der einzelnen Lichteffekte spiegelt die zuvor erarbeiteten Ergebnisse wider. Die Effekte mit den kleinsten Veränderungen sind schnell zu erfassende Effekte mit deutlichen Bewegungen und/oder auf kleinen Flächen, während sich bei den Effekten mit den größten Veränderungen erneut die Merkmale zeigen, die für eine Erfassung aufgrund einer undeutlichen Farbe oder großer Strecken mehr Aufmerksamkeit benötigen.

Vor allem bei den Effekten, die die größten Veränderungen im CTT hervorgerufen haben, sind sich Ausprägungen wieder, die auch für langsame Reaktionszeiten verantwortlich waren. Um einen möglichen Zusammenhang zwischen den beiden metrischen Variablen strukturell zu überprüfen, wurden die Ergebnisse des CTTs und die Aufzeichnung der Reaktionszeit in einem Streudiagramm abgebildet.

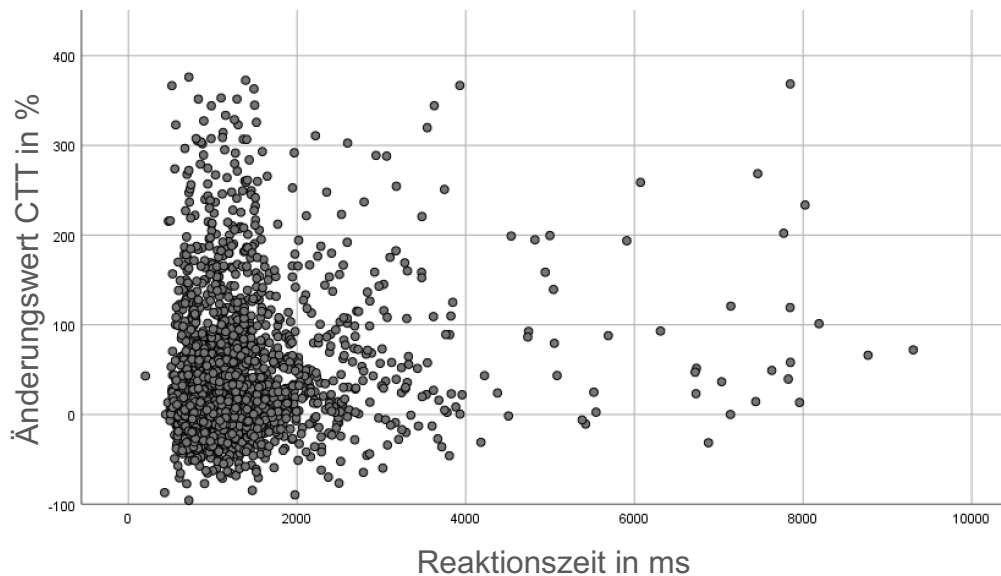


Abbildung 64: Streudiagramm mit den abhängigen Variablen Reaktionszeit und CTT-Änderungswert

Wenn eine lineare Korrelation zwischen den beiden Variablen bestünde, so würde sich dies in der Anordnung der Daten in Abbildung 64 entlang einer Diagonale widerspiegeln (Bortz & Schuster, 2010, S. 170). Bei der Verteilung der Werte im vorliegenden Streudiagramm ist jedoch zu sehen, dass für gleiche Reaktionszeiten sehr unterschiedliche CTT-Änderungswerte vorliegen. Damit ist ein eindeutiger linearer Zusammenhang der Variablen auszuschließen.

11.6 Fragebogen zum subjektiven Empfinden

Die Bewertung der vier Kriterien – Wie schön / ablenkend / hektisch / angenehm ist der Effekt? – fand auf einer Likert-Skala mit fünf Positionen statt. Dementsprechend liegen ordinalskalierte Daten vor. Die Graphen in Abbildung 65 zeigen die Ergebnisse auf Basis der einzelnen Variablenausprägungen der Lichteffekte. Für

die Faktoren *Farbe* und *Anzeigeort* liegen die Verläufe der Linien nah beieinander und weisen auf den ersten Blick nur bei den Bewertungen zu *schön* und *angenehm* leichte Unterschiede auf, was einen entsprechenden Einfluss der jeweiligen Faktoren andeutet. Die Ergebnisse der Auswertung des Faktors *Bewegungsart* weisen eine stärkere Heterogenität auf, die sich vor allem bei der Bewertung, wie hektisch die Bewegungsart eines Effekts ist, zeigt. Hier kann also davon ausgegangen werden, dass die Ausprägungen der einzelnen Faktoren den größten Einfluss nehmen.

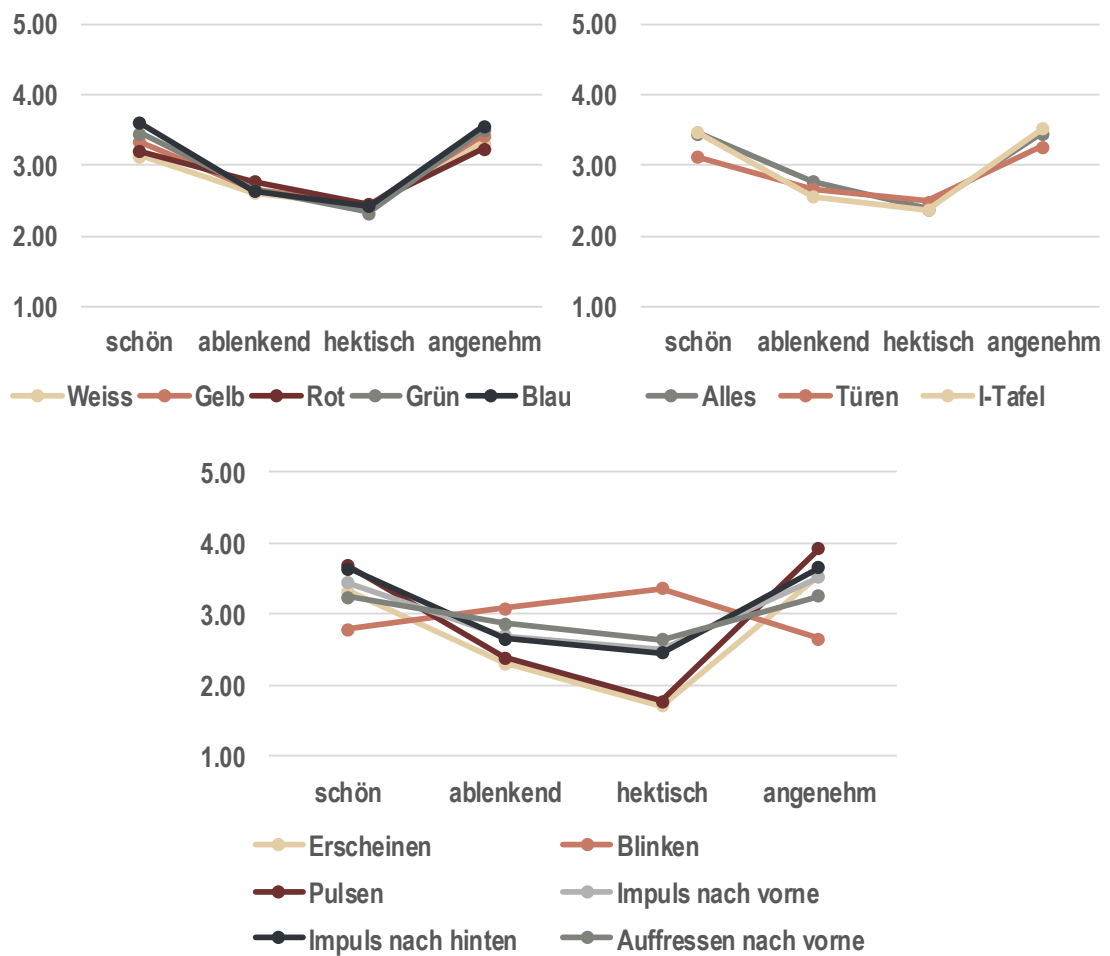


Abbildung 65: Übersicht der Ergebnisse des Fragebogens zur Bewertung der Lichteffekte, aufgeteilt in die einzelnen Variablen (von links oben: *Farbe*, *Anzeigeort*, *Bewegungsart*).

Festlegung der statistischen Auswertungsmethodik

Um vorhandene Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen und den vier Bewertungsmerkmalen zu belegen, wurde der Chi-Quadrat-Test nach Pearson verwendet. Dieser vergleicht mittels Kreuztabellen die aufgetretenen

Häufigkeiten mit den erwarteten Häufigkeiten pro Zelle in der Kreuztabelle (Field, 2011, S. 688). Das Resultat der insgesamt 12 durchgeführten Chi-Quadrat-Tests sind in Tabelle 24 zusammengefasst (Detail zu den einzelnen Tests sind im Anhang 6 aufgeführt). Für jede Kombination aus Variable und Merkmal ist der χ^2 -Wert sowie der Kontingenzkoeffizient nach Pearson angegeben und vorhandene Signifikanzen auf einem Level von $\alpha = 0,05$ und $\alpha = 0,01$ markiert.

Tabelle 24: χ^2 -Wert und Kontingenzkoeffizient nach Pearson zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen den Faktoren und den Kriterien, * bedeutet signifikant bei $\alpha = 0,05$; ** bei $\alpha = 0,01$.

Unabhängige Variable	Schön	Ablenkend	Hektisch	Angenehm
Farbe (df=16)	$\chi^2 = 67,039$ ** K ^P = 0,175	$\chi^2 = 22,187$	$\chi^2 = 13,526$	$\chi^2 = 36,310$ ** K ^P = 0,130
Bewegungsart (df=20)	$\chi^2 = 169,598$ ** K ^P = 0,273	$\chi^2 = 153,745$ ** K ^P = 0,260	$\chi^2 = 569,879$ ** K ^P = 0,461	$\chi^2 = 263,554$ ** K ^P = 0,333
Anzeigeort (df=8)	$\chi^2 = 49,847$ ** K ^P = 0,152	$\chi^2 = 16,573$ * K ^P = 0,88	$\chi^2 = 13,622$	$\chi^2 = 20,666$ ** K ^P = 0,098

Durch die durchgeführten Tests kann bei 9 von 12 Kombinationen ein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Wie bereits zuvor in der deskriptiven Beschreibung vermutet, besteht laut dem Kontingenzkoeffizient der größte Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variable und einem Bewertungsmerkmal bei der Kombination Bewegungsart – Hektisch. Im Folgenden sollen diejenigen Kombinationen näher betrachtet werden, in denen der Chi-Quadrat Test einen Zusammenhang hat nachweisen können. Da es sich bei den Ergebnissen des Fragebogens zum subjektiven Empfinden der Lichteffekte um ordinalskalierte Daten handelt, werden die Unterschiede in den einzelnen Ausprägungen der Faktoren mittels des Kruskal-Wallis-Tests und anschließenden Post-hoc-Tests (Mann-Whitney-Tests) untersucht.

Auswertung des Kriteriums schön und Faktors Farbe

Ein Kruskal-Wallis-Test hat bestätigt, dass Unterschiede bezüglich der Verteilung des Bewertungsergebnisses von schön und der einzelnen Farbausprägungen vorliegen ($H(4) = 49,822$; $p = 0,000$). Der korrigierte Signifikanzwert für die

durchgeführten paarweisen Vergleiche zeigt bei der Hälfte der Paarungen einen signifikanten Unterschied. Es ergibt sich die Rangordnung mit teilweise signifikanten Beziehungen, welche in Tabelle 25 zusammengefasst ist. Die blauen Lichteffekte wurden im Durchschnitt als am schönsten bewertet, was einhergeht mit der Tatsache, dass Blau die Lieblingsfarbe von 58% der Probanden ist (siehe Abschnitt 11.2). Die sonstigen Ränge entsprechen nicht der Verteilung der Lieblingsfarbe.

Tabelle 25: Rangordnung des Kriteriums *schön* für den Faktor *Farbe*

Rang	$\bar{\mu}$	Farbe	Signifikant zu
1	3,61	Blau	Gelb, Rot, Weiß
2	3,46	Grün	Rot, Weiß
3	3,34	Gelb	Blau
4	3,20	Rot	Blau, Grün
5	3,13	Weiß	Blau, Grün

Auswertung des Kriteriums *angenehm* und des Faktors *Farbe*

Die Betrachtung des Kriteriums *angenehm* zeigt ebenfalls einen signifikanten Unterschied in der zentralen Tendenz der einzelnen Farben ($H(4) = 19,621$; $p = 0,001$) Die Probanden beurteilten Blau als am angenehmsten ($\bar{\mu} 3,57$), es folgen Grün ($\bar{\mu} 3,51$), Gelb ($\bar{\mu} 3,44$), Weiß ($\bar{\mu} 3,33$) und Rot ($\bar{\mu} 3,25$) (siehe Tabelle 26). Die Post-hoc-Tests zeigen, dass sich jedoch nur die Ränge 1 und 2, also Blau und Grün, vom fünften Rang, Rot, signifikant unterschieden. Rot wird somit insgesamt am unangenehmsten empfunden, jedoch nur im Vergleich mit den beiden angenehmsten Farben als signifikant weniger angenehm.

Tabelle 26: Rangordnung des Kriteriums *angenehm* für den Faktor *Farbe*

Rang	Ø	Farbe	Signifikant zu
1	3,57	Blau	Rot
2	3,51	Grün	Rot
3	3,44	Gelb	
4	3,33	Weiß	
5	3,25	Rot	Blau, Grün

Auswertung des Kriteriums schön und des Faktors Bewegungsart

Die Auswertung der Beurteilung des Kriteriums *schön* ergab, dass *Pulsen* die schönste Bewegungsart ist (Ø 3,69), gefolgt von *Impulse nach hinten* (Ø 3,65), *Impulse nach vorne* (Ø 3,45), *Erscheinen* (Ø 3,32), *Auffüllen nach vorne* (Ø 3,25) und weit abgeschlagen der Bewegungsart *Blinken* (Ø 2,78). Die zentrale Tendenz unterscheidet sich nach dem Kruskal-Wallis-Test signifikant ($H(5) = 149,473$; $p = 0,000$).

Die Ergebnisse des Post-hoc-Tests zeigen, dass sich die beiden „schönsten“ Bewegungsarten, *Pulsen* und *Impulse nach hinten*, signifikant von den drei „unschönsten“ Bewegungsarten, *Erscheinen*, *Auffüllen nach vorne*, *Blinken*, unterscheiden. Der Unterschied in der Bewertung von *Blinken* ist auch im Vergleich zu den restlichen Bewegungsarten signifikant. Es kann also eindeutig davon gesprochen werden, dass *Blinken* als am wenigsten schön gilt, was nach mündlichen Aussagen der Probanden auf die hohe Frequenz zurückzuführen ist. Diese Erklärung wird von dem Fakt ergänzt, dass die schönsten Lichteffekte die langsamste Bewegungsfrequenz besaßen. Die Rangreihenfolge der Bewertungen pro Bewegungsart sind in Tabelle 27 zusammengefasst.

Für die Bewertungsreihenfolge der richtungsorientierten Lichteffekte fällt eine Erklärung schwer: Wäre der Grund für die unterschiedliche Beurteilung die Bewegungsrichtung gewesen wäre, hätten sich die *Impulse nach hinten* signifikant von *Impulse nach vorne* unterscheiden müssen, ebenso wie sie es zu *Auffüllen nach vorne* tun. Ähnlich steht es beim Vergleich der strichförmigen bewegten Impulse

im Vergleich zum Auffüllen der Kontur mit Licht: Auch hier lässt sich keine eindeutige Beziehung feststellen, weil sich zwar das *Auffüllen nach vorne* von den *Impulsen nach hinten* unterscheiden, jedoch aber nicht von der gleichen Bewegung nach vorne. Es kann also keine eindeutige Ursache für die Bewertung des Kriteriums *schön* identifiziert werden.

Tabelle 27: Rangordnung des Kriteriums *schön* für den Faktor *Bewegungsart*

Rang	$\bar{\mu}$	Bewegungsart	Signifikant zu
1	3,69	Pulsen	Erscheinen, Auffüllen nach vorne, Blinken
2	3,65	Impulse nach hinten	Erscheinen, Auffüllen nach vorne, Blinken
3	3,45	Impulse nach vorne	Blinken
4	3,32	Erscheinen	Pulsen, Impulse nach hinten, Blinken
5	3,25	Auffüllen nach vorne	Pulsen, Impulse nach hinten, Blinken
6	2,78	Blinken	Zu allen anderen Bewegungsarten

Auswertung des Kriteriums ablenkend und des Faktors Bewegungsart

Blinken gilt mit einer durchschnittlichen Bewertung von 3,08 als die am meisten ablenkende Bewegungsart. Die restlichen Bewegungsarten wurden wie folgt bewertet: *Auffüllen nach vorne* ($\bar{\mu} = 2,87$), *Impulse nach vorne* ($\bar{\mu} = 2,69$), *Impulse nach hinten* ($\bar{\mu} = 2,65$), *Pulsen* ($\bar{\mu} = 2,39$), *Erscheinen* ($\bar{\mu} = 2,31$). Das Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test bezüglich der zentralen Tendenz ist signifikant ($H(5) = 110,973$; $p = 0,000$), das heißt dass die einzelnen Ausprägungen der Bewegungsart als signifikant unterschiedlich hinsichtlich des Kriteriums *ablenkend* empfunden wurden.

Die Post-hoc-Tests, deren Ergebnisse in Tabelle 28 eingeflossen sind, zeigen, dass sich die Bewegungsarten *Erscheinen* und *Pulsen* signifikant in der Bewertung zu allen anderen Bewegungsarten unterscheiden. Es kann also festgehalten werden, dass diese beiden Ausprägungen subjektiv am wenigsten abgelenkt haben. Im Gegensatz dazu gilt *Blinken* als am meisten ablenkend, ein signifikanter Unterschied fehlt lediglich zur Bewegungsart *Auffüllen nach vorne*. Eine Erklärung für diese Ergebnisse kann erneut in den Geschwindigkeiten der Bewegung gefunden

werden: *Pulsen* bestand aus einer sehr langsamen zeitlichen Veränderung, während *Erscheinen* sogar noch einen Schritt weitergeht und nur zu einem einzigen Moment eine Veränderung aufweist, eben jenen Moment des Erscheinens. Beim *Blinken* hingegen treten in derselben Zeit deutlich mehr Veränderung des Lichts auf, die Frequenz des An- und Auszustands der LEDs ist wesentlich höher. Diese Unruhe führt zu der subjektiv empfundenen Ablenkung. Die drei richtungsorientierten Bewegungsarten lassen sich ebenfalls in diese Erklärung einordnen: Sie bewegen sich langsamer als die Frequenz des *Blinkens*, aber schneller als *Pulsen*. Dass *Auffüllen* von den drei sich ähnelnden Bewegungsarten als diejenige empfunden wird, die als am ablenkendsten gilt, könnte durch die größere Fläche erklärt werden, die sie im Laufe der Bewegung gleichzeitig einnimmt. Allerdings ist der Unterschied nicht signifikant.

Tabelle 28: Rangordnung des Kriteriums *ablenkend* für den Faktor *Bewegungsart*

Rang	\emptyset	Bewegungsart	Signifikant zu
1	3,08	Blinken	Impulse nach vorne, Impulse nach hinten, Pulsen, Erscheinen
2	2,87	Auffüllen nach vorne	Pulsen, Erscheinen
3	2,69	Impulse nach vorne	Blinken, Pulsen, Erscheinen
4	2,65	Impulse nach hinten	Blinken, Pulsen, Erscheinen
5	2,39	Pulsen	Blinken, Auffüllen nach vorne, Impulse nach vorne, Impulse nach hinten
6	2,31	Erscheinen	Blinken, Auffüllen nach vorne, Impulse nach vorne, Impulse nach hinten

Auswertung des Kriteriums hektisch und des Faktors Bewegungsart

Die Auswertung der Beurteilung, als wie *hektisch* die verschiedenen Bewegungsarten empfunden werden, hat folgende Reihenfolge ergeben: *Blinken* ($\emptyset = 3,37$), *Auffüllen nach vorne* ($\emptyset = 2,64$), *Impulse nach vorne* ($\emptyset = 2,49$), *Impulse nach hinten* ($\emptyset = 2,46$), *Pulsen* ($\emptyset = 1,77$), *Erscheinen* ($\emptyset = 1,71$). Bei dieser Auflistung liegen eindeutige Unterschiede in der Wirkungsweise der einzelnen Bewegungsarten vor ($H(5) = 437,137$; $p = 0,000$).

Die Post-hoc-Tests (zusammengefasst in Tabelle 29) zeigen ähnliche Zusammenhänge, wie bei der Auswertung des Kriteriums *ablenkend. Erscheinen* und *Pulsen* unterscheiden sich deutlich von allen anderen Ausprägungen, so dass deren Wahrnehmung als am wenigsten hektischste Bewegungsarten signifikant ist. Hingegen belegt *Blinken* mit signifikanter Unterscheidung den höchsten Rang in der Bewertung und ist somit nicht nur die am meisten ablenkende, sondern auch die hektischste Bewegungsart. An dieser Stelle wird aufgrund der gleichen Rangfolge der Ergebnisse auf die Erklärungen der Bewertungen des Kriteriums *ablenkend* verwiesen

Tabelle 29: Rangordnung des Kriteriums *hektisch* für den Faktor *Bewegungsart*

Rang	$\bar{\mu}$	Bewegungsart	Signifikant zu
1	3,37	Blinken	Zu allen anderen Bewegungsarten
2	2,64	Auffüllen nach vorne	Blinken, Pulsen, Erscheinen
3	2,49	Impulse nach vorne	Blinken, Pulsen, Erscheinen
4	2,46	Impulse nach hinten	Blinken, Pulsen, Erscheinen
5	1,77	Pulsen	Blinken, Auffüllen nach vorne, Impulse nach vorne, Impulse nach hinten
6	1,71	Erscheinen	Blinken, Auffüllen nach vorne, Impulse nach vorne, Impulse nach hinten

Auswertung des Kriteriums *angenehm* und des Faktors *Bewegungsart*

Die Auswertung des Merkmals *angenehm* zeigt eine im Vergleich zu der Rangfolge der hektischsten Bewegungsarten nahezu umgekehrte Reihenfolge. Angeführt wird die Liste durch die Variablenausprägung *Pulsen* ($\bar{\mu} = 3,93$), gefolgt von *Impulse nach hinten* ($\bar{\mu} = 3,66$), *Erscheinen* ($\bar{\mu} = 3,54$), *Impulse nach vorne* ($\bar{\mu} = 3,52$), *Auffüllen nach vorne* ($\bar{\mu} = 3,25$) und *Blinken* ($\bar{\mu} = 2,65$). Es liegt ein signifikantes Ergebnis des Kruskal-Wallis-Test vor ($H(5) = 228,977$; $p = 0,000$), welches durch die Post-hoc-Tests vertieft wird: Bis auf drei paarweise Vergleiche unterscheiden sich alle Kombinationen signifikant voneinander. Die sich nicht unterscheidenden Bewegungsarten sind *Impulse nach hinten*, *Impulse nach vorne* und *Erscheinen*, welche laut ihren Durchschnittswerten die Ränge 2 - 4 der angenehmsten Bewegungsarten belegen (Tabelle 30). Auffällig ist, dass die Bewegungsart *Auffüllen nach vorne*

als signifikant unangenehmer wahrgenommen wird *Impulse nach vorne*. Da sich die beiden Bewegungsarten in Richtung und Geschwindigkeit nicht unterscheiden, ist davon auszugehen, dass die größere leuchtende Fläche, die beim Auffüllen der Kontur vorhanden ist, für die unterschiedliche Bewertung verantwortlich ist.

Tabelle 30: Rangordnung des Kriteriums *angenehm* für den Faktor *Bewegungsart*

Rang	$\bar{\mu}$	Bewegungsart	Signifikant zu
1	3,93	Pulsen	Zu allen anderen Bewegungsarten
2	3,66	Impulse nach hinten	Pulsen, Auffüllen nach vorne, Blinken
3	3,54	Erscheinen	Pulsen, Auffüllen nach vorne, Blinken
4	3,52	Impulse nach vorne	Pulsen, Auffüllen nach vorne, Blinken
5	3,25	Auffüllen nach vorne	Zu allen anderen Bewegungsarten
6	2,65	Blinken	Zu allen anderen Bewegungsarten

Auswertung des Kriteriums schön und des Faktors Anzeigeort

Während bei der Auswertung der anderen Variablen- und Kriteriumskombinationen teils sehr deutlich Unterschiede zwischen den einzelnen Durchschnittswerten aufgetreten sind, liegen die Werte der Anzeigeorte deutlich näher beieinander. Die *Instrumententafel* wurde im Durchschnitt mit 3,47 für das Merkmal *schön* bewertet, das gemeinsame Bespielen aller Anzeigeorte erlangte eine Bewertung von 3,46. Die durchschnittliche Bewertung des Anzeigeorts *Türen* liegt bei 3,12 (siehe Tabelle 31). Trotz des geringen Unterschieds zwischen dem ersten und dem zweiten Platz, liegt laut dem Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede in der zentralen Tendenz der Werte vor ($H(2) = 43,342$; $p = 0,000$). Die Post-hoc-Berechnungen zeigen, dass dieses signifikante Ergebnis aus dem Unterschied zwischen der Bewertung der Türen im Vergleich zur Bewertung der beiden anderen Anzeigeorte herrührt. Dass die Türen der am wenigsten schönste Anzeigeort sind, ist somit rechnerisch bestätigt und könnte damit begründet werden, dass

es sich hierbei um den Sichtbereich handelt, der am weitesten von der Fahrerblickposition entfernt ist.

Tabelle 31: Rangordnung des Merkmals Schön für den Faktor Anzeigeort

Rang	\emptyset	Anzeigeort	Signifikant zu
1	3,64	Beide Bereiche	Türen
2	3,47	I-Tafel	Türen
3	3,12	Türen	Beide Bereiche, I-Tafel

Auswertung des Kriteriums ablenkend und des Faktors Anzeigeort

Auch hier liegen die einzelnen Bewertungen der Anzeigeorte wieder sehr nah beieinander (*Beide Bereiche* ($\emptyset = 2,78$), *Türen* ($\emptyset = 2,67$), *I-Tafel* ($\emptyset = 2,57$)), wobei die statistische Überprüfung eindeutige Unterschiede identifiziert ($H(2) = 11,082$; $p = 0,000$). Vom Post-hoc-Test wird bestätigt, dass ein Effekt für die Probanden signifikant ablenkender gilt, wenn er überall statt nur auf der *Instrumententafel* angezeigt wird (Zusammenfassung der Testergebnisse in Tabelle 32). Bereits bei dem Vergleich der Bewegungsarten *Impulse nach vorne* und *Auffüllen nach vorne* wurde die Vermutung aufgestellt, dass letzteres Verhalten eine höhere Zustimmung bei der Bewertung *ablenkend* erhalten hat, weil es eine vergleichsweise größere leuchtende Fläche hat. Mit dem signifikanten Unterschied zwischen der *I-Tafel* und der Anzeige auf *beiden Bereichen* kann nun bestätigt werden, dass ein Lichteffect umso ablenkender empfunden wird, je mehr Fläche leuchtet.

Tabelle 32: Rangordnung des Merkmals Ablenkend für den Faktor Anzeigeort

Rang	\emptyset	Anzeigeort	Signifikant zu
1	2,78	Beide Bereiche	I-Tafel
2	2,67	Türen	-
3	2,57	I-Tafel	Beide Bereiche

Auswertung des Kriteriums angenehm und des Faktors Anzeigeort

Zuletzt wurden in paarweisen Betrachtungen die unterschiedlichen Anzeigeorte bezüglich des Kriteriums *angenehm* verglichen, wobei sich die Werte - wie bereits bei den Vergleichen zuvor - ähneln: *I-Tafel* ($\bar{X} = 3,52$), *Alles* ($\bar{X} = 3,46$), *Türen* ($\bar{X} = 3,27$). Die an den signifikanten Kruskal-Wallis-Test ($H(2) = 17,283$; $p = 0,000$) anschließenden Post-hoc-Tests zeigen, dass die Bewertungen, wie *angenehm* ein Anzeigeort wahrgenommen wird, für die *Türen* signifikant hinter denen der anderen beiden Möglichkeiten liegen. Im Umkehrschluss lässt sich aus den Ergebnissen auch ablesen, dass es für die Probanden bezüglich des Kriteriums *angenehm* keinen Unterschied gibt, ob ein Effekt überall oder lediglich auf der begrenzten Fläche der Instrumententafel angezeigt wird (siehe Tabelle 33).

Tabelle 33: Rangordnung des Merkmals Angenehm für den Faktor Anzeigeort

Rang	\bar{X}	Anzeigeort	Signifikant zu
1	3,52	I-Tafel	Türen
2	3,46	Beide Bereiche	Türen
3	3,27	Türen	I-Tafel, Beide Bereiche

Zusammenhänge innerhalb der Bewertungskriterien

Neben dem Einfluss der unabhängigen Variablen auf die Ratings, wurde der Zusammenhang der Kriterien untereinander ausgewertet. Eine Darstellung der Daten in Streudiagrammen inklusive Trendlinien gibt Aufschluss über den Zusammenhang der Bewertungsparameter (siehe Abbildung 66). Dabei ist deutlich zu sehen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen allen Kriterien existiert: Je schöner oder angenehmer ein Effekt gilt, desto hektischer oder ablenkender wird er empfunden, wobei auch gleichzeitig ein schöner Effekt ein angenehmer Effekt ist und die Wahrnehmung als *hektisch* zu einer ebenfalls hohen Bewertung bei *ablenkend* führt.

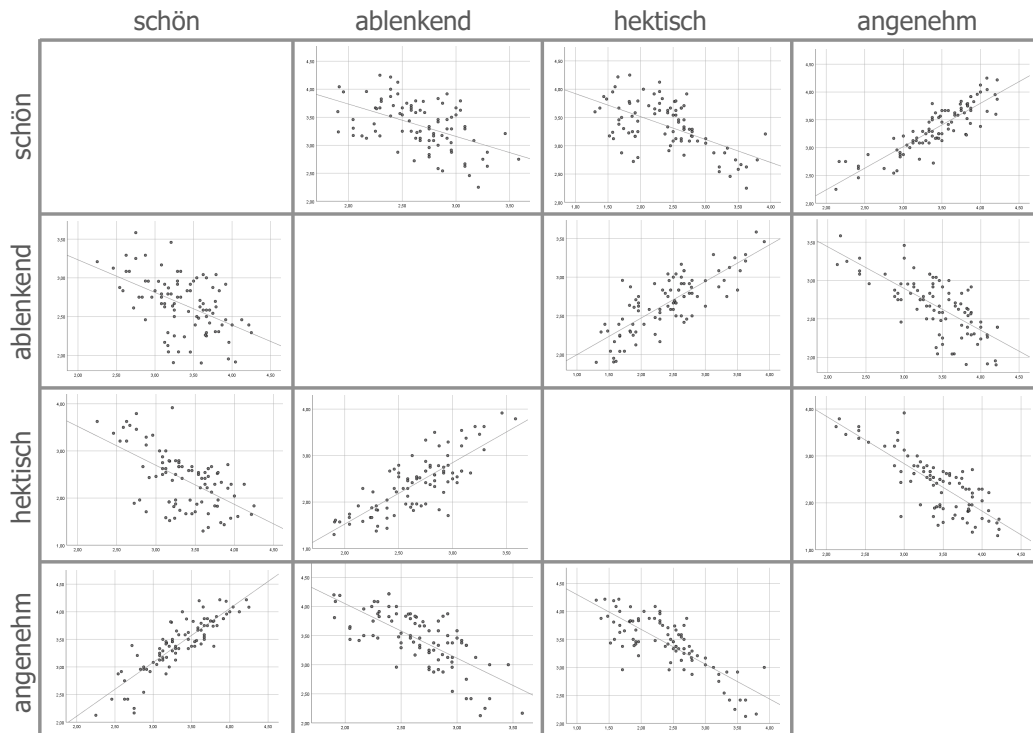


Abbildung 66: Darstellung des Zusammenhangs der Bewertungskriterien

Der Zusammenhang der ordinalskalierten Variablen untereinander lässt sich mit dem Spearman-Rho-Korrelationskoeffizienten empirisch validieren (Field, 2011, S. 179). Die Ergebnisse sind in Abbildung 67 abgebildet. Alle Bewertungskriterien korrelieren signifikant untereinander, wobei die Korrelation zwischen *schön* und *angenehm* die stärkste Ausprägung hat (Spearman's $\rho = 0,754$, $p = 0,000$) und damit die graphische Darstellung im Streudiagramm widerspiegelt.

		Schönheit	Ablenkung	Hektik	Angenehm	
Spearman-Rho	Schönheit	Korrelationskoeffizient	1,000	-,347**	-,438**	,754**
		Sig. (2-seitig)	.	,000	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
Ablenkung		Korrelationskoeffizient	-,347**	1,000	,474**	-,472**
		Sig. (2-seitig)	,000	.	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
Hektik		Korrelationskoeffizient	-,438**	,474**	1,000	-,563**
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	.	,000
		N	2112	2112	2112	2112
Angenehm		Korrelationskoeffizient	,754**	-,472**	-,563**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	,000	.
		N	2112	2112	2112	2112

Abbildung 67: Spearman-Rho-Test zur Überprüfung der Korrelation innerhalb der Bewertungsmerkmale

Auswertung auf Effektebene

Der Zusammenhang der Bewertungsmerkmale untereinander lässt sich auch in Tabelle 34 wiederfinden, in der pro Bewertungsmerkmal die drei Effekte mit den je höchsten und niedrigsten Bewertungen aufgelistet sind. Einige der Effekte sind dabei nicht nur an einer Stelle zu finden, sondern treten an mehreren Positionen auf. So zum Beispiel der Effekte *Weiß, Blinken, Türen*, welcher sowohl hinsichtlich des Kriteriums *schön* als auch des Kriteriums *angenehm* die niedrigste Bewertung aller Lichteffekte erhielt. Zugleich ist er an dritter Position der hektischsten Effekte zu finden. So wird erneut der Zusammenhang deutlich, dass Effekte die als besonders wenig *schön* und wenig *angenehm* empfunden wurden, gleichzeitig auch zu großer wahrgenommener Hektik geführt haben.

Tabelle 34: Übersicht der Lichteffekte mit den höchsten und niedrigsten Bewertungen pro Kriterium

	schön		angenehm	
	Lichteffekt	\emptyset		\emptyset
Höchste Bewertung	Blau, Pulsen, Beide Bereiche	4,25	Blau, Pulsen, I-Tafel	4,22
	Blau, Pulsen, I-Tafel	4,22	Grün, Pulsen, Beide Bereiche	4,22
	Blau, Impulse nach hinten, Beide Bereiche	4,13	Weiß, Pulsen, I-Tafel	4,20
Mittelwert	...	3,35	...	3,43
Niedrigste Bewertung	Weiß, Blinken, I-Tafel	2,54	Grün, Blinken, Beide Bereiche	2,25
	Rot, Blinken, Türen	2,46	Rot, Blinken, Beide Bereiche	2,17
	Weiß, Blinken, Türen	2,25	Weiß, Blinken, Türen	2,13
	hektisch		ablenkend	
	Lichteffekt	\emptyset		\emptyset
Höchste Bewertung	Blau, Blinken, Beide Bereiche	3,92	Rot, Blinken, Beide Bereiche	3,58
	Rot, Blinken, Beide Bereiche	3,79	Blau, Blinken, Beide Bereiche	3,46
	Weiß, Blinken, Türen	3,63	Weiß, Blinken, Beide Bereiche	3,29
Mittelwert	...	2,40	...	2,66
Niedrigste Bewertung	Grün, Pulsen, Beide Bereiche	1,43	Blau, Pulsen, Türen	1,91
	Grün, Erscheinen, Beide Bereiche	1,38	Weiß, Pulsen, I-Tafel	1,90
	Weiß, Pulsen, I-Tafel	1,30	Weiß, Erscheinen, I-Tafel	1,90

Auch für die Daten des Fragebogens sollen mögliche Korrelationen mit den anderen abhängigen Variablen untersucht werden (Details zu den Berechnungen in Anhang 7). Dabei erscheint besonders der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Befragung für das Kriterium *ablenkend* und der CTT-Aufgabe als Operationalisierung der visuellen Beeinflussung interessant. Zur Beantwortung der

Frage, ob ein Lichteffect, welcher subjektiv als *ablenkend* empfunden wurde auch einen entsprechenden Einfluss auf den CTT-Änderungswert genommen hat, wurde erneut ein Spearman-Rho-Korrelationskoeffizient berechnet.

Der Korrelationskoeffizient Spearmans $\rho = 0,148$ ist signifikant ($p = 0,000$). Es besteht also ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Messergebnissen zur Ablenkung, wenn auch mit schwachem Effekt. Die Richtung des Zusammenhangs wird deutlich, wenn pro Bewertungsstufe des Kriteriums *ablenkend* (1 bis 5 auf der Likert Skala) die Mittelwerte des CTT-Änderungswerts aufgelistet werden: $\mu(1) = 34,14\%$; $\mu(2) = 40,90\%$; $\mu(3) = 42,07\%$; $\mu(4) = 60,04\%$; $\mu(5) = 98,71\%$. Die aufsteigende Reihenfolge zeigt eindeutig, dass sich die subjektive Einschätzung, wie *ablenkend* ein Lichteffect ist, mit der Messung der visuellen Beeinflussung mit Hilfe des CTTs deckt. Je stärker ein Effekt den CTT-Änderungswert beeinflusst hat, desto ablenkender wurde er von den Probanden bewertet. Ein ähnlicher Zusammenhang lässt sich bei keinem der anderen Bewertungsmerkmale des Fragebogens finden. Laut dem Spearman-Rho-Koeffizienten besteht kein weiterer signifikanter Zusammenhang zwischen der Messung der visuellen Beeinflussung und den Erhebungsergebnissen für *schön*, *hektisch* und *angenehm*.

Anders schaut es hingegen bei der Betrachtung eines möglichen Zusammenhangs der Bewertungsmerkmale mit den Ergebnissen der Reaktionszeitmessung aus. Die Berechnung des Spearman-Rho-Koeffizienten belegt signifikante Korrelationen (mit schwachem Effekt) zwischen der Reaktionszeit und allen Merkmalen außer *ablenkend*, wobei der Blick auf Mittelwerte je Bewertungsstufe zeigt, dass die Beziehungen nicht so eindeutig sind, wie bei der zuvor betrachteten zur Ablenkung mit dem CTT-Änderungswert. Grundsätzlich gilt, dass je schneller ein Effekt wahrgenommen wird, desto hektischer und unangenehmer wirkt er, wobei es je eine Abweichung in der Rangreihenfolge der Mittelwerte zu beobachten gibt:

hektisch: $\mu(1) = 1567,13$ ms; $\mu(2) = 1404,60$ ms; $\mu(3) = 1441,47$ ms; $\mu(4) = 1251,35$ ms;
 $\mu(5) = 1068,12$ ms;

angenehm: $\mu(1) = 1309,18$ ms; $\mu(2) = 1280,28$ ms; $\mu(3) = 1344,88$ ms;
 $\mu(4) = 1448,89$ ms; $\mu(5) = 1532,21$ ms;

Die Beziehung zwischen den Bewertungen zu *schön* und den aufgezeichneten Reaktionszeiten scheint hingegen etwas komplexer zu sein: $\mu(1) = 1562,46$ ms; $\mu(2) = 1311,08$ ms; $\mu(3) = 1364,80$ ms; $\mu(4) = 1397,67$ ms; $\mu(5) = 1534,31$ ms. Sowohl besonders schöne als auch besonders unschöne Lichteffekte lösten bei den Probanden ähnlich langsame Reaktionszeiten aus. Aus der Erhebung der Reaktionszeit lässt sich dementsprechend nicht eindeutig auf deren subjektive Bewertung bezüglich des Kriteriums *schön* schließen.

Zuletzt wird der Zusammenhang zwischen der anfangs ausgewerteten Kategorisierung und allen Bewertungskriterien betrachtet. Auf Basis der bisher gesammelten Erkenntnisse ist davon auszugehen, dass eine Korrelation besteht und sich vor allem in der Kategorie *Komfort* Effekte mit hohen Wertungen hinsichtlich *schön* und *angenehm* wiederfinden lassen müssten, während eine wahrgenommene Hektik für die Kategorie *Sicherheit* sprechen sollte.

Die Überprüfung der Zusammenhänge mit dem Chi-Quadrat-Test zeigt für die vier Paarungen jeweils ein signifikantes Ergebnis. Entsprechend dem Kontingenzkoeffizienten nach Pearson liegt die stärkste Korrelation der Kategorisierung in Verbindung mit den Bewertungsmerkmalen *angenehm* und *schön* vor, während *ablenkend* den geringsten Einfluss nimmt.

Tabelle 35: χ^2 -Wert und Kontingenzkoeffizient nach Pearson zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Kategorisierung und den Bewertungsmerkmalen, ** bedeutet signifikant bei $\alpha = 0,01$.

Kriterium	Schön	Ablenkend	Hektisch	Angenehm
Kategorisierung (df = 12)	$\chi^2 = 264,670^{**}$ $K^p = 0,334$	$\chi^2 = 152,210^{**}$ $K^p = 0,259$	$\chi^2 = 224,916^{**}$ $K^p = 0,310$	$\chi^2 = 273,127^{**}$ $K^p = 0,338$

Eine Darstellung der Datenverteilung in Kreuztabellen zeigt, wie sich die einzelnen Bewertungen auf die Kategorien aufteilen. Wie bereits erwartet, erhielten die Effekte, die der Kategorie *Komfort* zugeordnet wurden, höhere Bewertungen auf der Likert-Skala zu *schön* als diejenigen in der Kategorie *Sicherheit*: Bei Betrachtung der Werte in Abbildung 68 oben wird im Vergleich deutlich, dass insgesamt 71,2% aller Effekte aus der Kategorie *Komfort* eine Zustimmung von 4 oder 5 auf der Skala erhielten, während diese Zahl in der Kategorie *Sicherheit* nur bei 41,1%

liegt. Ähnlich deutlich ist der Unterschied bei der Bewertung von *angenehm*. Von den *Komfort*-Effekten wurden 78,3% mit 4 oder besser bewertet, während es in der Kategorie *Sicherheit* nur 43,1% sind.

Schön * Kategorisierung Kreuztabelle

% innerhalb von Kategorisierung

		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Schön	1	2,5%	4,4%	6,5%	19,1%	6,0%
	2	9,4%	18,1%	24,3%	38,7%	19,9%
	3	16,9%	21,8%	28,2%	22,6%	22,6%
	4	44,7%	39,6%	31,9%	15,1%	36,2%
	5	26,5%	16,1%	9,2%	4,5%	15,3%
Gesamt		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Angenehm * Kategorisierung Kreuztabelle

% innerhalb von Kategorisierung

		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Angenehm	1	2,3%	4,7%	9,5%	19,1%	6,9%
	2	8,1%	16,9%	27,3%	32,2%	19,4%
	3	11,3%	18,9%	20,1%	22,1%	17,8%
	4	44,7%	40,1%	31,4%	19,6%	36,6%
	5	33,6%	19,5%	11,7%	7,0%	19,2%
Gesamt		100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%

Abbildung 68: Übersicht der Merkmale *schön* (oben) und *angenehm* (unten) in Abhängigkeit der Kategorisierung; Kreuztabellen mit Prozentangaben

Für die Betrachtung, inwiefern die Bewertung eines Effekts als *hektisch* mit der Kategorisierung zusammenhängt, eignet sich die prozentuale Verteilung der Daten pro Bewertungsstufe. Dadurch wird in Abbildung 69 ersichtlich, dass über die Hälfte aller Effekte, die eine 5 auf der Skala von *hektisch* erhielten, der Kategorie *Sicherheit* zugeteilt wurden. Diese Quote liegt für die Kategorie *Information* bei knapp 34%, während erwartungskonform die wenigstens der hektischsten Effekte auch als *Komfort* empfunden wurden (4,6%).

Hektisch * Kategorisierung Kreuztabelle

% innerhalb von Hektisch

		Kategorisierung				
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	Gesamt
Hektisch	1	41,8%	32,1%	18,2%	8,0%	100,0%
	2	20,0%	45,2%	26,7%	8,1%	100,0%
	3	14,3%	37,0%	37,4%	11,4%	100,0%
	4	11,4%	38,7%	38,0%	11,9%	100,0%
	5	4,6%	33,9%	50,5%	11,0%	100,0%
Gesamt		22,7%	38,6%	29,3%	9,4%	100,0%

Abbildung 69: Übersicht der Kategorisierung in Abhängigkeit des Kriteriums *hektisch*; Kreuztabelle mit Prozentangaben

11.7 Betrachtung der Helligkeit

Wie in Kapitel 10.3.6 zur Vorbereitung der Studie beschrieben, wurde zur Kontrolle des Parameters Helligkeit empfohlen, die Leuchtdichte aller Farben gleich zu setzen. Durch einen festen Wert sollte ausgeschlossen werden, dass die Helligkeit der LEDs einen Einfluss auf die Ergebnisse nimmt und somit lediglich die drei beschriebenen unabhängigen Variablen ausgewertet werden. Allerdings führte das Vorgehen nicht zum gewünschten Resultat. Bei der Leuchtdichte handelt es sich um die Einheit, die den Helligkeitseindruck einer Fläche in Abhängigkeit von Farbe und Material bestimmt (DIN EN 12665:2018-08, 2018). So können zwei gleich hell wahrgenommene Lichteffekte mit gleicher Leuchtdichte aufgrund der verschiedenen Farben eine unterschiedliche Helligkeit aufweisen. Zur Messung und Gleichsetzung dieser Lichtleistung wäre die Betrachtung der Lichtstärke, also die Verteilung des Lichtstroms pro Raumwinkel geeigneter gewesen (DIN EN 12665:2018-08, 2018).

Deshalb ist davon auszugehen, dass die erhobenen Ergebnisse nicht nur auf die anfangs festgelegten unabhängigen Variablen zurückzuführen sind, sondern auch von unterschiedlichen Helligkeiten beeinflusst sind. Eindeutig zu belegen ist dies rückwirkend nicht, allerdings gibt es Andeutungen, wenn man das Erscheinen der Lichteffekte in den Bereichen der Peripherie anschaut, in denen eine Farbwahrnehmung nicht möglich ist (vgl. Kapitel 4.4). Die Lichteffekte, die mit größtem Abstand zur Sichtachse erscheinen, sind diejenigen, die sich von hinten

nach vorne auf den Türen bewegen (eine schematische Darstellung der Winkelangaben ist in Abbildung 56 zu sehen). Die Mittelwerte der Reaktionszeiten der fünf Lichteffekte in ihren unterschiedlichen Farbausprägungen für die Bewegungsart *Impulse nach vorne* sind in Tabelle 36 aufgelistet. Die Reaktionszeiten unterscheiden sich laut dem Kruskal-Wallis-Test signifikant ($H(4) = 10,805$; $p = 0,03$), was daraufhin deuten kann, dass die Helligkeit einen Einfluss genommen hat (ähnliches zeigt sich bei derselben Berechnung mit der Bewegungsart *Auffüllen nach vorne*: $H(4) = 9,876$; $p = 0,043$). Da sich der Lichtimpuls jedoch mit 50 cm/s fortbewegt, wurde für die in der Tabelle angegebenen Mittelwerte eine Strecke von 60 bis 80 cm Strecke zurückgelegt, bis eine Reaktion aufgezeichnet wurde. Die Lichteffekte bewegten sich also bereits in den farbwahrnehmenden Bereich des Gesichtsfelds. Zudem ähnelt die Anordnung der wahrgenommenen Farben von schnell nach langsam der Verteilung der Wahrnehmung der Farben in der Peripherie: um *Rot* und *Grün* wahrnehmen zu können, muss der Lichteffekt weiter vorne im zentralen Gesichtsfeld sein als dies für *Blau* und *Gelb* der Fall ist. Dies deutet vor allem auf einen Einfluss der Variable *Farbe* auf die Reaktionszeit hin.

Rückwirkend ist es nicht möglich, eine mögliche Verzerrung der Ergebnisse durch die konstant gesetzte Leuchtdichte auszuschließen oder eindeutig zu belegen, da der Studienaufbau dafür zu komplex ist.

Tabelle 36: Reaktionszeiten pro Farbe für Lichteffekte *Impulse nach vorne* + Türen

Farbe	Bewegungsart	Anzeigeort	Mittelwert Reaktionszeit in ms
Blau	Impulse nach vorne	Türen	1242
Gelb	Impulse nach vorne	Türen	1255
Weiß	Impulse nach vorne	Türen	1344
Rot	Impulse nach vorne	Türen	1594
Grün	Impulse nach vorne	Türen	1682

Eine andere, die Studienergebnisse einengende Maßnahme, gilt es noch abschließend zur Betrachtung der Helligkeit zu diskutieren: Neben der Leuchtdichte der LED-Streifen wurde auch die Umgebungshelligkeit des Studiensettings kontrolliert, um so eine weitere einflussnehmende Variable zu eliminieren. Dies war im Rahmen des Messaufbaus notwendig, allerdings wurde damit einhergehend eine künstliche, kontrollierte Laborumgebung geschaffen, die von der real vorherrschenden Situation für Fahrzeuginnenräume abweicht. Parameter wie die Tageszeit, der Aufenthaltsort und die vorherrschenden Wetterverhältnissen sorgen für eine starke Variation der Helligkeit der Umgebung, in welcher sich ein Fahrzeug befinden kann. Dazu kommen die unterschiedlichen Ausprägungen des Fahrzeugs selbst (z.B. offenes Cabriolet, verbautes Panorama-Dach oder geschlossener Dachhimmel), die zusätzlichen Einfluss auf die Lichtmenge nehmen, die auf das leuchtende Element einfällt.

Die Beleuchtungsstärke E würde sich somit in realen Bedingungen stetig ändern. Welche Auswirkung hätte dies, wenn die Leuchtdichte L der Lichteffekte im Fahrzeuginnenraum konstant bleiben würden? Einblicke dazu liefert die in (Blankenbach, Hertlein, & Hoffmann, 2020) vorgestellte Studie .

Versuchsteilnehmer wurden angewiesen, die Helligkeit einer ambienten Beleuchtung auf der I-Tafel eines Fahrzeug-Cockpits in Abhängigkeit dreier verschiedener Beleuchtungsstärken ($E = \{1000 \text{ lx}, 2700 \text{ lx}, 6000 \text{ lx}\}$) zu manipulieren, um drei verschiedenen Aufgabenstellungen zu entsprechen: Zum einen sollte ein Helligkeitswert gefunden werden, ab der die leuchtende Fläche erstmalig wahrgenommen wurde, zum zweiten die Grenze, ab der die Helligkeit als „störend“ empfunden wird und zuletzt ein Wert der als „angenehm“ gilt.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich Konfidenzintervalle von $L_{\text{angenehm}}(E)$ für die drei Beleuchtungsstärken klar voneinander differenzieren. Es gibt dementsprechend deutliche Unterschiede in den Präferenzen der Probanden hinsichtlich der Leuchtdichte der ambienten Beleuchtung je Beleuchtungsstärke. Bezieht man die anderen beiden erhobenen Werte in die Auswertung mit ein, so wird deutlich, dass eine Leuchtdichte L , die bei $E = 2700 \text{ lx}$ als angenehm empfunden wird, bei

E = 6000 lx sehr nahe an der Wahrnehmungsschwelle liegt, während der gleiche Wert bei E = 1000 lx als störend empfunden wird.

Diese Grenzwerte spannen den Handlungsrahmen auf, der bereits in Kapitel 6.4 skizziert wurde. Demnach gibt es einen Bereich, in dem Lichteffekte eine Relevanz besitzen. Durch Manipulation von Variablen, in dem Fall der Beleuchtungsstärke (denkbar wäre aber ebenso die Leuchtdichte der Lichteffekte selbst) wird die Grenze der Erkennbarkeit unterschritten oder die Schwelle zur Störung überschritten, und somit das gewünschte Ziel der visuellen Einflussnahme verfehlt.

Ändern sich die äußeren Gegebenheiten dynamisch, wie es im Kontext des Fahrens der Fall ist, ist eine kontinuierliche Adaption der Leuchtdichte zum Halten der Lichteffekte im relevanten Bereich unerlässlich.

11.8 Fazit

In der Studie werden drei unabhängige Variablen hinsichtlich ihres Einflusses auf die subjektive und objektive Wahrnehmung von Nutzern bei der Anzeige von dynamischen Lichteffekten im Fahrzeuginnenraum untersucht. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Farbe, Bewegungsart und Anzeigeort wirken sich signifikant auf die Zuordnung eines Lichteffekts zu den Kategorien aus, wobei der Einfluss des Anzeigeorts zu vernachlässigen ist. Besonders hervorzuheben sind die starken Assoziationen der Bewegungsart *Blinken* sowie der Farbe *Rot* mit der Kategorie *Sicherheit*.

Die beiden Variablen *Farbe* und *Bewegungsart* haben einen signifikanten Einfluss auf die gemessenen Reaktionszeiten. Im Vergleich der einzelnen Farben lassen sich deutliche Unterschiede ablesen, manche davon auch signifikant. So wird die Ausprägung *Weiß* signifikant langsamer wahrgenommen als die zwei am schnellsten wahrgenommenen Farben *Rot* und *Blau*. *Blau* wurde zudem signifikant schneller wahrgenommen als *Grün* (zweitletzter Rang) und *Gelb* (drittletzter Rang). Bei dem Vergleich der Bewegungsarten gab es deutlich mehr signifikante Paarungen und sogar eine Ausprägung, die sich signifikant von allen anderen

unterscheidet: Pulsende Lichteffekte wurden mit Abstand am langsamsten wahrgenommen. Zwischen den Bewegungsarten *Blinken* und *Erscheinen* sowie zwischen den richtungsorientierten Effekten (*Impulse nach vorne*, *Impulse nach hinten*, *Auffüllen nach vorne*) gab es zwar jeweils keinen statistisch belegbaren Unterschied, allerdings jeweils zwischen diesen Gruppen (*Erscheinen* unterscheidet sich signifikant von *Impulse nach vorne*, *Blinken* von *Impulse nach vorne*, *Erscheinen* von *Impulse nach vorne*, usw.). Keinen signifikant belegbaren Einfluss auf die gemessene Reaktionszeit nimmt der Ort, an dem ein Lichteffekt angezeigt wird.

Die erhobenen Ergebnisse der visuellen Beeinflussung werden durch alle drei Variablen, *Farbe*, *Bewegungsart* und *Anzeigeort* signifikant beeinflusst. Allerdings können für die ersten beiden die durchgeführten Post-hoc-Tests keine eindeutigen Unterschiede beim Vergleich der jeweiligen Paarungen ausmachen. Anders beim Anzeigeort: Die Anzeige eines Effekts auf Türen und I-Tafel gleichzeitig führt zu einer signifikant stärkeren visuellen Beeinflussung (ca. 10%) als die Anzeige nur in der Tür.

Auf das subjektive Empfinden nahm die Variable *Bewegungsart* den größten Einfluss und wirkt sich signifikant auf alle vier Kriterien aus. Als am schönsten wahrgenommen wurden pulsierende Lichteffekte (signifikant bessere Bewertungen zu *schön* als von den letzten drei Rängen *Erscheinen*, *Auffüllen nach vorne*, *Blinken*). *Pulsen* gilt gleichzeitig auch als die angenehmste der Bewegungsarten (signifikant zu allen anderen). *Blinken* gilt als „unschönste“ und „unangenehmste“ Bewegungsart und erhielt gleichzeitig die höchste Bewertung für die Kriterien ablenkend und hektisch. Die Anzeige ist signifikant ablenkender als *Impulse nach vorne*, *Impulse nach hinten*, *Pulsen*, *Erscheinen* und signifikant hektischer als jede andere Bewegungsart.

Nach den Bewegungsarten nimmt der Anzeigeort den zweitgrößten Einfluss. Dabei ist es vor allem das gleichzeitige Bespielen der Türen und der I-Tafel, welches sich stark auf die Kriterien auswirkt. Die Anzeige auf den beiden Bereichen wurde am schönsten bewertet (signifikant zum letzten Rang *Türen*), gilt aber ebenso als am meisten ablenkend (signifikanter zum letzten Rang *I-Tafel*). Es liegt

auch ein signifikanter Unterschied im Vergleich von I-Tafel und Türen vor: Die Anzeige auf ersterem wurde signifikant als angenehmer eingestuft.

Die Variable *Farbe* nahm auf nur zwei der vier Kriterien einen signifikanten Einfluss und beides Mal ist *Blau* die Farbe, die sich am deutlichsten abhebt. Die Ergebnisse identifizieren sie als die schönste (signifikant zu den letzten drei Rängen *Gelb, Rot, Weiß*) und angenehmste Farbe (signifikant zum letztem Rang *Rot*). Für die Bewertungen der Kriterien *hektisch* und *ablenkend* scheinen die Farben der Effekte eine zu vernachlässigende Rolle zu spielen.

Aus den einzelnen Ergebnissen lassen sich nun Rückschlüsse ziehen, wie ein Effekt gestaltet sein muss, um beispielsweise besonders schnell wahrgenommen werden zu können oder wenig Ablenkung zu verursachen. Allerdings ergibt sich bei übergreifender Betrachtung der Ergebnisse nicht immer ein konsistentes Bild der Wirkungsweise. So werden zum Beispiel blaue Lichteffekte, die am schnellsten wahrgenommen werden, nur in seltenen Fällen mit der Kategorie Sicherheit assoziiert. Pulsen hingegen wurde von allen Bewegungsarten als am schönsten und angenehmsten bewertet sowie am häufigsten der Kategorie Komfort zugeordnet. Gleichzeitig liegt aber auch das negativste Ergebnis bei der Messung der visuellen Beeinflussung vor.

Es ist also stets von Nöten, bei der Ausgestaltung von Lichteffekten die Wirkungsweise der einzelnen Bausteine auf alle abhängigen Variablen zur gleichen Zeit zu betrachten. Nur dann kann dessen Eignung für einen gewissen Zweck bewertet werden. Der Zweck selbst ist dabei am wichtigsten: Ein Nutzer muss die Bedeutung eines Lichteffekts richtig verstehen, um richtig handeln zu können. Dementsprechend ist die Wahl der Farbe, der Bewegungsart und des Anzeigorts immer im Hinblick auf die gewünschte Kategorie durchzuführen und im Rahmen der dadurch entstehenden Optionen die Optimierung der Wirkungsweise hinsichtlich der anderen Variablen durchzuführen. Die Durchführung der Studie mit den insgesamt $5 \times 6 \times 3$ Stellhebeln zur Manipulation des Aussehens der Effekte liefert dafür einen ausreichend umfassenden Datensatz.

12 Validierung der Nutzerwahrnehmung

Zur Validierung der bisher erhobenen Ergebnisse wurde eine abschließende Studie durchgeführt, in welcher die zuvor erarbeiteten Erkenntnisse auf ausgewählte Use Cases angewandt wurden.

12.1 Motivation & Ziel

Die Durchführung der Studie soll beweisen, dass wenn die Anforderungen einer Situation identifiziert und darauf basierend Lichteffekte ausgewählt werden, diese zielführend für die Situation sind. Die Lichteffekte werden somit erstmalig im Verlauf der Forschungsarbeit im Kontext von Situationen betrachtet. Es wurden zwei verschiedene Situationen ausgewählt, je eine aus den Kategorien Information und Sicherheit. Um die Wirksamkeit der Lichteffekte in diesen beiden Situationen zu validieren, wurde ein weiterer Lichteffekt in das Studiensetting integriert. Dieser Lichteffekt ist für keine der beiden untersuchten Situationen geeignet, was sich in der Bewertung der Probanden deutlich identifizieren lassen sollte.

Zusätzlich wurde die Studie als Möglichkeit genutzt, das Medium Licht in Kombination mit Audio zu betrachten. Töne und Audicons stellen eines der wichtigsten Kommunikationsmittel im Fahrzeug dar und kommen bei vielen Warnungen oder Mitteilungen zum Einsatz, daher ist der gemeinsame Einsatz der beiden Kommunikationsmöglichkeiten wahrscheinlich. Dabei gibt es Situationen, wie dem Fahren ohne Anschnallgurt, in welchen der Audiohinweis für die Dauer der Situation unvermeidbar ertönt, während er bei Use Cases aus dem Bereich Infotainment, wie beispielsweise als Anrufklingelton, manuell deaktivierbar ist. Für Lichteffekte gilt zum Stand der Forschungsarbeit, dass diese im Fahrzeug generell manuell deaktivierbar sind. Diese Prämissen wurden auf das Studienkonzept übertragen, in welchem Licht- und Audioeffekte je einzeln, als auch in Kombination für jeden Use Case dargestellt wurden. Somit kann deren individuelle sowie die aus deren Kombination entstehende Wirkungsweise miteinander verglichen

werden. Um keine Wechselwirkung mit weiteren Anzeigemedien zu erzielen, wurde auf die zusätzliche Anzeige von Inhalten in der Kombianzeige oder dem CID verzichtet.

Ziel der Studie ist es die Anwendbarkeit der erarbeiteten Ergebnisse zu plausibilisieren und deren Wirksamkeit nachzuweisen. Zudem soll die Wechselwirkung aus konsistenter bzw. inkonsistenter Gestaltung von Audio- und Lichteffekten aufgezeigt werden, um Aussagen über die zukünftige kombinatorische Verwendung der beiden Kommunikationsmöglichkeiten treffen zu können.

12.2 Methodik

Wie bereits bei den vorherigen Forschungsabschnitten, wird eine Probandenstudie in kontrollierter Umgebung zur Validierung der Wirksamkeit der Lichteffekte gewählt. Nachfolgend wird das entsprechende Studiendesign erläutert.

12.2.1 Unabhängige Variablen

Untersucht wurden zwei verschiedene Situationen, in denen je eine Information oder eine Warnung dargestellt wurden. Die Darstellung des Inhalts konnte entweder über einen Audio- und/oder einen Lichteffekt erfolgen. Aus dieser Kombination ergeben sich sechs verschiedene Use Cases. Berücksichtigt man zusätzlich den Validierungslichteffect, welcher von den Probanden als nicht zu den Situationen zugehörig identifiziert werden sollte, ergeben sich insgesamt folgende neun Kombinationsmöglichkeiten aus Audio- und Lichtinhalten:

1. Lichteffect (Validierung)
2. Lichteffect (Information)
3. Audioeffect (Information)
4. Lichteffect (Information) + Audioeffect (Information)
5. Lichteffect (Validierung) + Audioeffect (Information)
6. Lichteffect (Warnung)
7. Audioeffect (Warnung)
8. Lichteffect (Warnung) + Audioeffect (Warnung)
9. Lichteffect (Validierung) + Audioeffect (Warnung)

12.2.2 Abhängige Variablen

Die Durchführung der Studie soll beweisen, dass die zugehörigen Lichteffekte in den jeweiligen Situationen zielführend sind. Die Eigenschaft „zielführend“ muss vor Untersuchung der Hypothese operationalisiert werden. Daher wurden zwei Eigenschaften ausgewählt, nach welchen die Eignung der Effekte gemessen wird: Wie oft wird der Effekt der vorgesehenen Situationen richtig zugeordnet (entspricht der Effektivität, ausgedrückt in einer Zuordnungsquote in Prozent) und wie wird die User Experience der Situation bewertet (gemessen durch UEQ)?

Für die Effekte Nr. 2 - 4 und 5 – 8 liegt jeweils eine eindeutige Situation vor, nach welcher die Zuordnungsquote berechnet werden kann. Für die Lichteffekte, in welchen der Validierungslichteffekt angezeigt wird, ist entweder keine Zuordnung oder diejenige des Audioeffekts zu erwarten. Hier wird eine explorative Auswertung stattfinden.

Der UEQ wurde ausgewählt, um neben der Effektivität des Effekts und der Effizienz, welche in Form der Reaktionszeiten der vorherigen Studie vorliegen, nun die hedonische Qualität zu untersuchen. Inwiefern steigert das Anzeigen eines Lichteffekts das User Experience Empfinden der Situation? Wird dies durch einen zusätzlichen Audioeffekt verstärkt? Welches Ergebnis resultiert bei inkonsistenter Gestaltung von Licht und Audio?

12.2.3 Laborstudie

Die Studie wurde erneut unter Laborbedingungen mit einer rekrutierten Stichprobe durchgeführt. Nur so konnten künstlich die für die Studie notwendigen Situationen herbeigeführt werden und die Reaktion der Nutzer ohne die Beeinträchtigung deren Sicherheit aufgezeichnet werden. Als Primäraufgabe wurde erneut der Critical-Tracking-Task verwendet, welcher eine fahraufgabenähnliche Beanspruchung der Probanden herstellte (detaillierte Erläuterungen zum CTT liegen bei der Beschreibung der vorherigen Studie, z.B. in Abschnitt 10.2.3, vor).

12.3 Vorbereitung

Es konnte in weiten Teilen auf den Versuchsaufbau der vorherigen Studie aufgebaut werden. Adaptionen im Aufbau sowie die inhaltliche Vorbereitung der Validierungsstudie werden in den folgenden drei Absätzen zusammengefasst.

12.3.1 Auswahl geeigneter Use Cases

Für die Studie musste je ein Use Case aus den Kategorien *Information* und *Sicherheit* ausgewählt werden, welcher im Rahmen der Laborstudie abgebildet werden konnte. Hierfür wurde auf die Liste in der im Cardsorting zugeteilten Use Cases zurückgegriffen. Von diesen wurden all jene ausgeschlossen, welche zum Durchführungszeitpunkt der Studie noch nicht in Serienproduktion oder an kein akustisches Signal gekoppelt sind. Von den übrigen Use Cases wurde in der Kategorie *Information* der Telefonanruf ausgewählt. Bei diesem Use Case handelt es sich um den wohl bekanntesten Informationshinweis mit Audioausgabe im Fahrzeuginnenraum. Als Soundfile wurde für die Studie der Klingelton verwendet, welcher bei einem BMW im Auslieferungszustand eingestellt ist.

Für die Kategorie *Sicherheit* wurde auf den ursprünglich als „Aufmerksamkeitsblitz“ bezeichneten Use Case zurückgegriffen. Dieser wurde im Cardsorting als generischer Fall verwendet, in welchem die Aufmerksamkeit durch einen Lichteffekt auf einen bestimmten Ort gezogen wird. Für die Durchführung dieser Studie wurde der Use Case konkretisiert und als Auffahrwarnung verwendet. Der Aufmerksamkeitsblitz sollte also die Aufmerksamkeit des Fahrers nach vorne richten und auf ein vor ihm, langsam fahrendes Auto aufmerksam machen. Diese seit 2009 in BMW-Fahrzeugen verfügbare Funktion erfolgt durch eine Audiowarnung und Symbolen in der Kombianzeige, sowie (wenn verfügbar) im Headup-Display (Santer, 2009). Die Anzeige der Symbolik wurden im Rahmen dieser Studie nicht genutzt, um sich auf die Wirkungsweise des Audioeffekts und des hinzugefügten Lichteffekts konzentrieren zu können.

12.3.2 Ausarbeitung Effekte

Um adäquate Lichteffekte zu gestalten, müssen zunächst die Anforderungen an die Situationen identifiziert werden. Sind diese bekannt, kann anhand der erarbeiteten Kenntnisse über die Wirkungsweise der einzelnen Bausteine, geeignete Lichteffekte zusammengesetzt werden.

Erster Schritt in der Gestaltung ist das Festlegen der Kategorie, zu welcher der Use Case gehört, um entsprechende Effekte auswählen zu können, die zu dieser Kategorie zugehörig assoziiert werden. Im vorliegenden Fall wurden beide ausgewählten Use Cases im Cardsorting in Kapitel 8 untersucht. Der Use Case eingehender Anruf wurde in die Kategorie Information einsortiert, während die Auffahrwarnung eindeutig der Kategorie Sicherheit angehört. Die Effekte für die Studie sollten entsprechend eindeutig kategorisiert worden sein, um die Interpretation der Bedeutung zu erleichtern.

Für den Lichteffekt zur Visualisierung des eingehenden Anrufs gilt darüber hinaus, dass er zwar gut wahrnehmbar sein sollte, er jedoch auf keine kritische Fahrsituation hinweisen muss. Für das Entgegennehmen des Anrufs bleibt für gewöhnlich viele Sekunden Zeit, weswegen eine besonders niedrige Reaktionszeit nicht vonnöten ist. Dabei ist eine visuelle Beeinflussung des Fahrers unter der Prämisse einer ruhigen Fahrsituation in Maßen zulässig, da der Nutzer den Effekt selbst jederzeitig durch eine Handlung (Annehmen des Anrufs) beenden kann. Der handlungsauffordernde Charakter darf sich in leicht erhöhten Werten bei der Empfindung des Merkmals hektisch ausdrücken, aber da es passieren kann, dass die Situation mehrfach während einer Fahrt auftritt, sollte die Inszenierung gleichzeitig als angenehm und schön empfunden werden.

Bei der Auswahl des Effekts für die Auffahrwarnung kann hingegen ein positives subjektives Empfinden vernachlässigt werden, denn es gilt vor allem auf die Möglichkeit einer schnellen Reaktion zu achten. Der Effekt muss dem Fahrer schnell und deutlich eine Handlungsanweisung vermitteln, wobei sich die Dringlichkeit auch in einer hohen Bewertung der Hektik widerspiegeln darf. Wichtig

ist, dass der Effekt nicht zu übersehen ist und sich der Fahrer auf das Verkehrsgeschehen konzentrieren kann.

Für den letzten für die Studie notwendigen Effekt, den Validierungseffekt, können kaum explizite Anforderungen geäußert werden. Es wurde ein Effekt gesucht, der sich in seinen Ausprägungen möglichst von denen der anderen beiden Effekte entscheidet. Zudem ist eine mangelnde Assoziation mit den Kategorien Information und Sicherheit von Vorteil, im besten Fall fehlt sogar häufig eine Möglichkeit der inhaltlichen Interpretation (=Zuordnung zu keiner Kategorie).

Auf Basis aller aufgeführten Anforderungen wurden die drei Lichteffekte in Tabelle 37 ausgewählt. Der eingehende Anruf wird in der Studie durch blaue Impulse im Gesamtraum der Sitzkiste visualisiert, die Auffahrwarnung durch das rote Aufleuchten der I-Tafel und der Validierungseffekt besteht aus einem grünen Puls in den Türen.

Tabelle 37: Für die Validierungsstudie ausgewählte Lichteffekte inkl. deren Ergebnisse bezüglich der abhängigen Variablen

Effekt	Kategorisierung	RT in ms	CTT-Wert in %	schön	ablenk.	hekt.	angen.
Blau, Impulse nach hinten, Beide Bereiche	Komfort=9 Information=15 Sicherheit=0 Keine=0	1217	52	4,13	2,46	2,29	4,00
Rot, I-Tafel, Erscheinen	Komfort=4 Information=0 Sicherheit=18 Keine=2	956	33	3,17	2,13	1,92	3,42
Grün, Pulsen, Türen	Komfort=11 Information=5 Sicherheit=2 Keine=5	2440	45	3,43	2,57	1,96	3,87

12.3.3 Versuchsaufbau

Für die Durchführung der Studie wurde der gleiche Hardware-Prototyp wie in der vorherigen Studie verwendet. Alle zuvor erhobenen Erkenntnisse sind dem-

entsprechend auch für diese Studie gültig, da kein Element der Lichtanzeige verändert wurde (gleiche LED-Helligkeiten, gleiche Anzeigeorte, gleiche Farben, etc.).

Allerdings wurde die Belegung der Tasten am Lenkrad für das neue Studiensetting angepasst. Statt der Aufzeichnung der Reaktion wurden diese nun für das Feedback der Probanden verwendet, welche der drei bekannten Situationen aufgetreten ist. Wenn der Proband den aufgetretenen Effekt für einen eingehenden Anruf hielt, so musste er die in Abbildung 70 rechte blau markierte Taste drücken, welche mit der Funktion der Annahme eines Telefonanrufs belegt ist. Wurde der Effekt als Auffahrwarnung interpretiert, sollte die blau markierte Taste im linken Feld der Multifunktionstasten gedrückt werden, welches bei BMW allgemein für die Funktionen der Fahrerassistenzsysteme reserviert ist. Dem Probanden wurde im Rahmen der Versuchsanleitung mitgeteilt, dass er durch Drücken der Taste auf die Auffahrwarnung durch eine Anpassung der aktuellen Fahrgeschwindigkeit reagieren würde.

Das Drücken beider Tasten parallel signalisierte, dass keine der beiden Situationen als zutreffend empfunden wurden. Stattdessen wäre es auch möglich gewesen, bei mangelnder Zuordnung kein Signal zu geben, jedoch sollte ein eindeutiges Feedback der Probanden stattfinden, um mit Verlässlichkeit seine Aussage aufzuzeichnen.



Abbildung 70: Belegung der Lenkradtasten für die Validierungsstudie. Rot markiert: Steuerung CTT; linke blau markierte Taste: Auffahrwarnung erkannt; rechte blau markierte Taste: Eingehender Anruf erkannt; beide blauen Tasten: keine Funktion erkannt.

12.4 Durchführung

Für die Studie wurden beliebige Teilnehmer aus dem BMW-Umfeld rekrutiert, die über normale oder zur Normalität korrigierte Sehkraft verfügen. Einzige Voraussetzung war der Besitz eines gültigen Führerscheins. Personen mit Farbfehlsichtigkeit wurden für die Studie zugelassen, insofern sie eindeutig die verwendeten Farben des Lichts benennen konnten. Dieses Kriterium wurde vor Studienbeginn überprüft.

Den Probanden wurde der Testablauf inkl. der Lenkradtastenbelegung und der Notwendigkeit für manuelles Feedback auf die Situationen erklärt. Die demographischen Daten wurden digital erfasst und nach einer Eingewöhnungsphase des CTTs mit der beispielhaften Demonstration eines Lichteffekts startete die Datenerhebungsphase. Nach jedem Durchgang des CTTs, der Darstellung eines Effekts sowie dessen Zuordnung, erfolgte eine kurze Pause, in welcher die Teilnehmer mit Hilfe des UEQs den zuvor gesehenen Effekt bewerteten.

Jeder Proband bewertete alle neun Kombinationen an Licht- und Audioeffekten in einer randomisierten Reihenfolge.

12.5 Auswertung

An der Studie nahmen fünf Frauen und 15 Männer teil (Alter: 80% \leq 30). Die Erfahrung mit dynamischen Lichteffekten lag in dieser Studie etwas höher an in der Vorherigen (\bar{x} 1,8 auf einer Skala von 1-5), ist aber trotzdem als sehr gering zu bewerten. Da vor Studienteilnahme keinem der Probanden der Inhalt oder das Ziel der Studie bekannt war, gelten sie alle als unvorbelastet. Vereinzelt kam es zu technischen Problemen bei der Darstellung der Effekte, so dass für sechs der neun angezeigten Effektvarianten 19 statt 20 Einzelerhebungen vorliegen.

Für die Auswertung des UEQs wurden nur jeweils die Bewertungen berücksichtigt, bei denen vorher eine korrekte Interpretation des Effekts stattgefunden. Diejenigen Fälle, in welchen der Effekt aus Nutzersicht mit keiner oder der inkorrekt-

ten Funktion belegt ist, wurden nicht hinsichtlich ihrer User Experience ausgewertet. Damit liegen für die Auswertung der Use Cases folgende Anzahl einzelner Datenpunkte vor:

Use Cases *eingehender Anruf*: Lichteffekt (Information) = 7; Audioeffekt (Information) = 20; Lichteffekt (Information) + Audioeffekt (Information) = 20; Lichteffekt (Validierung) + Audioeffekt (Information) = 19;

Use Case *Warnung*: Lichteffekt (Warnung) = 15; Audioeffekt (Warnung) = 13; Lichteffekt (Warnung) + Audioeffekt (Warnung) = 15; Lichteffekt (Validierung) + Audioeffekt (Warnung) = 8.

12.6 Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Studie berichtet, unterschieden nach den beiden Use Cases berichtet.

12.6.1 Auswertung Information (Eingehender Anruf)

In Tabelle 38 sind die Zuordnungsquoten für die verschiedenen Darstellung des Informations-Use Case zusammengefasst. Auf den ersten Blick wird deutlich, dass das Inkludieren des Audiosignals zu einer hundertprozentigen Erkennungsrate geführt hat. Dabei scheint es bei der Erkennung keine Rolle zu spielen, ob der speziell gestaltete Lichteffekt oder der nicht adäquate Validierungslichteffekt in der Kombination gezeigt wird.

Tabelle 38: Übersicht der Zuordnungsquoten aller Effektkombinationen für den Use Case eingehender Anruf

Angezeigter Effekt	Interpretiert als...		
	Information	Warnung	Nichts
Lichteffekt (Validierung)	11%	16%	74%
Lichteffekt (Information)	37%	5%	58%
Audioeffekt (Information)	100%	0%	0%
Lichteffekt (Information) + Audioeffekt (Information)	100%	0%	0%
Lichteffekt (Validierung) + Audioeffekt (Information)	100%	0%	0%

Eine singuläre Betrachtung der beiden Lichteffekte zeigt, dass diese nicht für eine eindeutige Zuordnung ausreichen. Es wurde erwartet, dass der Informationslichteffekt eine eindeutige Erkennung als eingehender Anruf erzielt. Allerdings konnte dies nur in 37% der Fälle erzeugt werden, im überwiegenden Fall wurde er als nichtssagend interpretiert. Nichtsdestotrotz wurde er mehr als dreimal so häufig als eingehender Anruf interpretiert als der Validierungslichteffekt. Auf eine Überprüfung der Signifikanz mit Hilfe eines Chi-Quadrat-Tests wurde aufgrund der kleinen Stichprobe und der damit verbundenen geringen statistischen Aussagekraft verzichtet.

Der informativ gestaltete Lichteffekt zum eingehenden Anruf konnte im direkten Vergleich nicht die Effizienz des bekannten Audio-Signals erreichen. Interessant ist aber, wie sich die subjektive Bewertung der Situation bei Hinzufügen des Lichteffekts änderte. Das zeigt die Auswertung des UEQs in Abbildung 71.

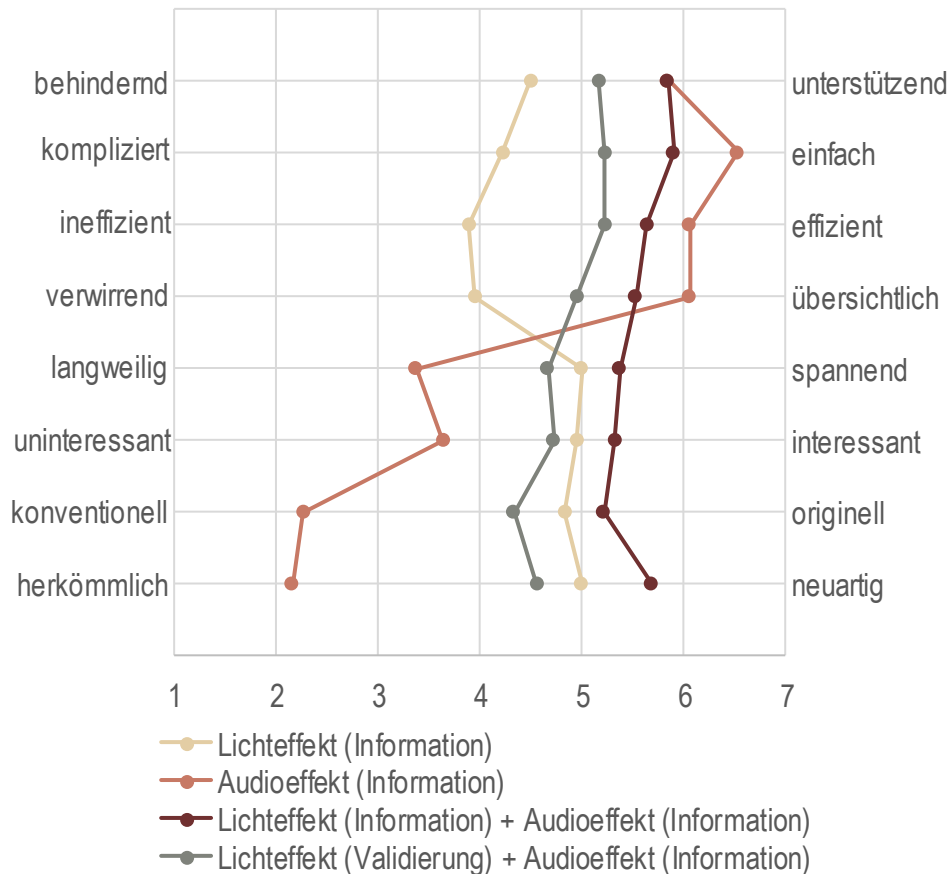


Abbildung 71: Ergebnisse des UEQ-Fragebogens für die verschiedenen Effektkombinationen des eingehenden Anrufs

In der Auswertung der ersten vier semantischen Differenziale des UEQs tendiert die Bewertung des Audioeffekts sehr stark nach rechts und gilt von allen bewerteten informativen Effekten als am unterstützenden, einfachsten, effizientesten und übersichtlichsten. Der informative Lichteffect hingegen liegt in der Auswertung für diese Items mittig, so dass weder ein deutlicher Einschlag nach rechts noch links erkennbar ist.

Betrachtet man die unteren vier Begriffspaare, so ändert sich das Bild: Der Audioeffekt ist nun eher den negativ konjugierten Begriffen wie herkömmlich und konventionell zugeordnet, während der informative Lichteffect im Durchschnitt einen Punkt rechts der Mitte einsortiert wurde. Er gilt somit als spannender, interessanter, origineller und neuartiger als die reine Anzeige des Audioeffekts. Am besten schnitt jedoch die Kombination aus Audio- und Lichteffect bei der Bewertung der Items fünf bis acht ab. Im Allgemeinen zeigt sich ein recht homo-

genes Bild im Verlauf der Auswertungslinie Lichteffect (Information) + Audioeffect (Information). Sie pendelt sich konsequent auf der Likert-Skala zwischen den Skalenpunkten 5 und 6 ein. Auch die Kombination aus Validierungslichteffect und Audioeffect erzielten im UEQ ein durchweg positives/rechtsseitiges Ergebnis, das jedoch stets 0,5 bis 1 Punkt links von der Bewertung des rein informativen Paares verlief.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die einzelnen informativen Audio- und Lichteffecte gegensätzlich wahrgenommen wurden, das Hinzufügen eines Lichteffects zu einem Audioeffect dessen Empfindung jedoch sowohl deutlich spannender, interessanter, origineller als auch neuartiger macht.

12.6.2 Auswertung Warnung (Auffahrwarnung)

Die Auswertung der Zuordnungsquote des Use Cases aus der Kategorie *Warnung* in Tabelle 39 zeigt weniger deutliche Ergebnisse, wie die der Kategorie *Information*. Den höchsten Anteil an richtigen Zuordnungen erzielte der warnende Lichteffect mit 79%, gefolgt in der Kombination mit dem Audioeffect (75%) und dem Audioeffect alleine (68%). Keiner der gezeigten Effekte konnte ein eindeutiges 100% Ergebnis erzielen. Das Abspielen des Warntons zur Auffahrwarnung wirkte in dieser Studie weniger effektiv als das Abspielen des informativen Klingeltons, welcher in 100% der Fälle richtig zugeordnet wurde. 4 der 19 Probanden ordneten dem Audioeffect keine Aussage zu.

Der warnende Lichteffect erzielte zusätzlich zur höchsten richtigen Zuordnung die wenigsten Falscheinschätzungen als informativer Lichteffect: Nur einer der 19 Teilnehmenden interpretierte ihn als eingehenden Anruf.

Tabelle 39: Übersicht der Zuordnungsquoten aller Effektkombinationen für den Use Case Auffahrwarnung

Angezeigter Effekt	Interpretiert als...		
	Information	Warnung	Nichts
Lichteffekt (Validierung)	11%	16%	74%
Lichteffekt (Warnung)	5%	79%	16%
Audioeffekt (Warnung)	11%	68%	21%
Lichteffekt (Warnung) + Audioeffekt (Warnung)	10%	75%	15%
Lichteffekt (Validierung) + Audioeffekt (Warnung)	11%	42%	47%

Die graphische Auswertung des UEQs zur Auffahrwarnung ist in Abbildung 72 dargestellt und zeigt, dass das Ergebnis der subjektiven Bewertung des warnenden Lichteffekts - wie bereits bei den Zuordnungsquoten, besser ist als das des warnenden Audioeffekts. Der Unterschied ist bei den ersten drei Gegensatzpaaren gering und beide Effekte liegen auf der positiven Seite. Bei den nachfolgenden Paaren erhöht sich der Unterschied jedoch deutlich und die Bewertung des Audioeffekts nähert sich den negativen Bezeichnungen langweilig, uninteressant, konventionell, herkömmlich. Die konsistent warnende Kombination aus Licht- und Audioeffekt wurde von allen dargestellten Effekten am besten bewertet und erreicht damit im Vergleich ein besseres Ergebnis als die Kombination auch Licht und Audio für den Use Case des eingehenden Anrufs. Nur beim Gegensatzpaar „konventionell – originell“ erreichte die Kombination des Audioeffekts mit dem Validierungseffekt eine höhere Bewertung und gilt als origineller. Zeitgleich wurde diese Kombination aus Validierungslichteffekt und Hindernis- ton als am kompliziertesten wahrgenommen. Nur von der Hälfte aller Probanden wurde diese Effektkombi als Warnung wahrgenommen. Dabei äußerten die Teilnehmer häufig Verwunderung über das Licht und dass die Entscheidung rein auf Basis des akustischen Signals stattgefunden hätte.

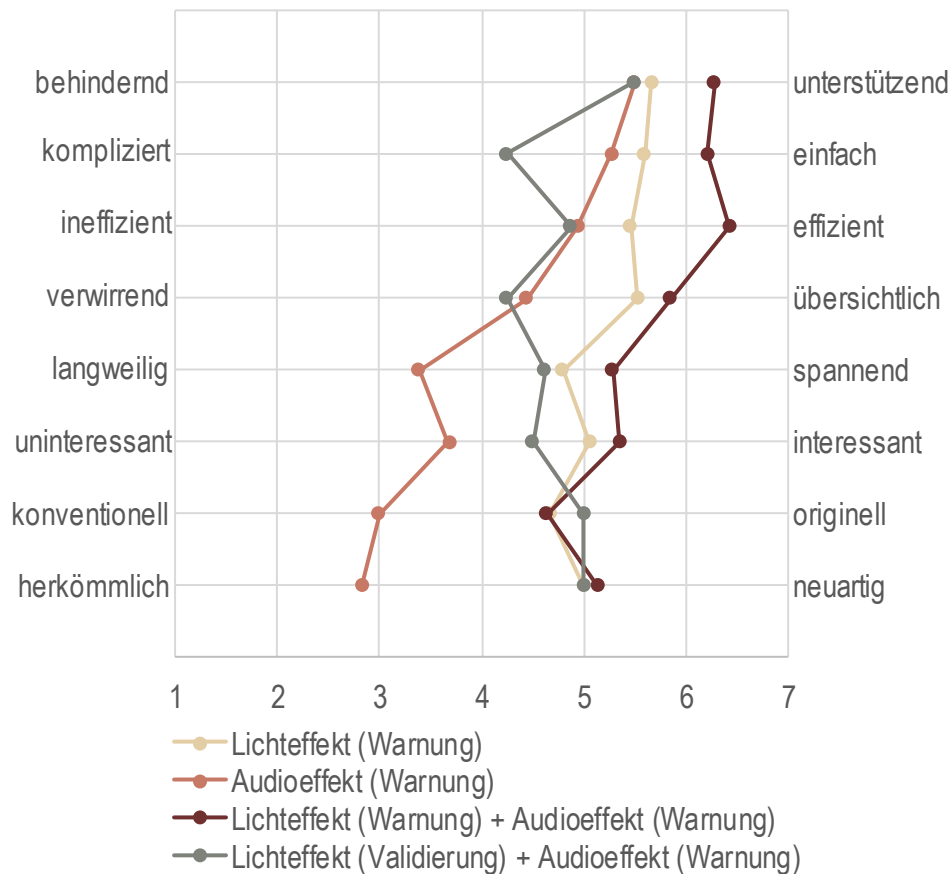


Abbildung 72: Ergebnisse des UEQ-Fragebogens für die verschiedenen Effektkombinationen der Auffahrwarnung

Am Ende der Studie wurden die Probanden gefragt, welche Modalität sie für welchen Use Case bevorzugen würden. Bei einer Möglichkeit zur freien Gestaltung des informativen Anruf-Use Cases, wünschten sich sieben der 20 Personen Audio, lediglich drei ausschließlich das Licht und die übrigen zehn Personen favorisierten eine Mischung aus beidem. Für die Auffahrwarnung würden 18 der 20 Probanden Licht und Audio in der Kombination bevorzugen, zwei werteten einen Lichteffekt als ausreichend. Auf eine nachfolgende Frage, welches der beiden Medien in der Anzeige dominiert hätte, nannten 75% der Probanden Audio und 25% Audio.

Die Aussagen über die Favoriten stützen die Ergebnisse der Auswertung der Zuordnungsquoten und des UEQs, wonach die Kombination der Effekte zu den verlässlichsten bzw. positivsten Ergebnissen führte. Die dominante Wirkung der Audioeffekte lässt sich möglicherweise damit erklären, dass Audio seit vielen Jahren im Fahrzeug zur Kommunikation verwendet wird und es sich damit um

eine erlernte Wirkung handeln kann, welche in der Form nicht für die Lichteffekte vorliegt.

12.7 Fazit

Die Validierungsstudie hat eine unterschiedliche Eignung der Lichteffekte aufgezeigt. Beispielsweise hat der Informationsgehalt, den der informative Lichteffekt transportierte, nicht für eine eindeutige Interpretation ausgereicht. Durch die Ergänzung um den Audioeffekt konnte jedoch ein einschlägiges Ergebnis erzielt werden. Die Kombination aus Licht- und Audioeffekte führte im Vergleich zur reinen Verwendung des Audioeffekts zusätzlich zu einem deutlich positiveren Gesamteindruck in der subjektiven Bewertung der Probanden.

Hingegen wurde die Verwendung des Lichteffekts als Auffahrwarnung deutlich häufiger richtig erkannt und zugeordnet. Die Effektivität des Warnlichts kann durch den räumlichen Bezug erklärt werden: Im Gegensatz zum ungerichteten Audioeffekt, stellt die Verortung des Lichteffekts auf der Instrumententafel einen örtlichen Bezug zum vorausliegenden Problem auf der Fahrbahn her und steigert so die Wirksamkeit. Aber auch bei den Warneffekten hat der UEQ gezeigt, dass die Verwendung beider Modalitäten bevorzugt wird.

Mit dem Validierungs-Lichteffekt wurde ein Effekt bewusst ohne inhaltliche Aussage gestaltet wurde. Die Zuordnungsquote belegt, dass dieser Zweck erfüllt wurde und somit die umgekehrte Anwendung der Gestaltungsregeln, weder einen informativen noch warnenden Effekt zu gestalten, möglich ist.

Insgesamt ist es auf Basis dieser Studie nicht empfehlenswert, jeden Lichteffekt ohne eine weitere zusätzliche Inhaltskommunikation zu verwenden. Signale, wie der abgeprüfte Klingelton, haben eine hohe Effektivität, die möglicherweise auch bei Lichteffekten erlernt werden kann, zum heutigen Zeitpunkt aber noch nicht gegeben ist. In jedem Fall steigert die Gestaltung eines Lichteffekts auf Basis der erhobenen Ergebnisse die subjektive Beurteilung der Anzeige deutlich.

TEIL IV

Bewertung und Zusammenfassung

13 Beantwortung der Forschungsfragen

Der Forschungsarbeit liegen insgesamt sechs aufeinander aufbauende Fragen zu Grunde (siehe Kapitel 2), die durch sich zeitlich aneinanderreihende Studien beantwortet werden konnten.

Eine Antwort auf die erste Frage „Gibt es Kategorien für den Einsatz von Lichteffekten?“ wird durch das Cardsorting (beschrieben in Kapitel 8) gegeben. Es wurden drei Kategorien erarbeitet – Komfort, Information und Sicherheit – sowie eine eindeutige Zuordnung von Use Cases zu den erhobenen Kategorien vorgenommen. Beispiele dieser Use Cases dienten als Untersuchungsgegenstände für die anschließende Studie, wobei sie dabei stets als Repräsentanten der erarbeiteten Kategorien verwendet wurden.

Die Bearbeitung der zweiten Frage „Welche Eigenschaften zeichnen Lichteffekte aus?“ in der in Kapitel 9 beschriebenen Studie, bestehend aus Experteninterviews mit anschließender Qualitativer Inhaltsanalyse der transkribierten Inhalte, lieferte eine Beschreibungssprache für Lichteffekte. Wiederkehrende Deskriptionen offenbarten zum einen aus welchen wahrnehmbaren Bestandteilen Effekte zusammengesetzt sind, zum anderen wurde deutlich, dass die Bausteine für die Interpretation des Inhalts der Lichteffekte verantwortlich sind.

Drei ausgewählte Bausteine (Farbe, Bewegungsart, Anzeigeort) bildeten den Untersuchungsgegenstand für die anschließende Studie, die Antworten auf vier Fragen lieferte, die jeweils die Einflussnahme von Lichteffekten auf verschiedene Aspekte adressieren. Die erste dieser Fragen („Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der Lichteffekte auf die Zuordnung der Effekte zu den erhobenen Kategorien?“) bezieht das Resultat des initial durchgeführten Cardsortings ein. Es zeigt sich, dass alle Eigenschaften der Lichteffekte signifikante Auswirkungen auf die Zuordnung der gesehenen Effekte zu den Kategorien haben, wobei die Einflussnahme schwankt. Während die gezeigten Farben und Bewegungsarten deutlichen Einfluss nehmen, ist dieser beim Faktor Anzeigeort nur sehr gering vorhanden.

Bei der Beantwortung der nächsten beiden Fragen zur Schnelligkeit der Wahrnehmbarkeit von Lichteffekten sowie deren visuelle Beeinflussung, zeigt sich auf den ersten Blick vor allem aufgrund der großen Schwankung der Ergebnisse der Einfluss der aus den einzelnen Bausteinen variierend zusammengesetzten Lichteffekte. Die strukturierte Auswertung zur Frage „Welchen Einfluss haben die Eigenschaften von Lichteffekten auf die Schnelligkeit der Wahrnehmbarkeit der Effekte?“ zeigt, dass die gewählten Farben sowie die Bewegungsarten die ausschlaggebenden Faktoren für die starke Einflussnahme sind. Die jeweiligen Rangreihenfolgen der einzelnen Ausprägungen zeigen signifikante Teilabstände. Gleiches konnte nicht für den Baustein Anzeigeort nachgewiesen werden.

Ein umgekehrter Zusammenhang findet sich bei der Antwort auf die Frage „Welchen Einfluss haben die Eigenschaften von Lichteffekten auf die visuelle Beeinflussung durch die Effekte?“. Die zuvor großen Einfluss nehmenden Faktoren Farbe und Bewegungsarten wirkten sich wenig auf die Messung der visuellen Beeinflussung aus, die verschiedenen Anzeigeorte führten jedoch nachweislich zu signifikanten Unterschieden in den Ergebnissen des angewandten Tests.

Für die Beantwortung der letzten Frage „Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der Lichteffekte auf die subjektive Beurteilung der Effekte?“ wurden vier verschiedene Kriterien betrachtet. Insgesamt lässt sich sagen, dass alle Eigenschaften der Lichteffekte einen signifikanten Einfluss auf die Bewertungskriterien „Schön“ und „Angenehm“ haben. Die Bewegungsart darüber hinaus auf die Kriterien „Ablenkend“ und „Hektisch“, der Anzeigeort nur auf „Ablenkend“. Auch wenn diese Ergebnisse alle signifikant waren, besitzt der Einfluss jeweils unterschiedliches Ausmaß. Besonders stark vorhanden ist er bei der Bewertung der Bewegungsarten hinsichtlich des Kriteriums „Hektisch“.

14 Möglichkeiten der Weiterführung

Die in dieser Forschungsarbeit angewandten qualitativen und quantitativen Methoden liefern einen umfangreichen Datensatz als Grundlage für die Gestaltung von Lichteffekten im Fahrzeuginterieur. Es wurden die einzelnen Bestandteile erarbeitet, aus denen sich Lichteffekte zusammensetzen und Erkenntnisse über deren individuelle Wirkungsweise hinsichtlich verschiedener Faktoren generiert. Auf Basis dieses Wissens können Lichteffekte anforderungsgetrieben aus den zusammengesetzt werden. Das bedeutet, dass nach einer Identifikation von Anforderungen an eine Situation, in welcher ein Lichteffekt unterstützend eingesetzt werden soll, über die vorhandene Datengrundlage entschieden werden kann, welcher Lichteffekt die größte Eignung besitzt.

Allerdings gibt es Fragestellungen, die aufgrund des begrenzten Umfangs der Studien außer Acht gelassen wurden, die die Inhalte jedoch sinnvoll ergänzen würden. Ein erster ergänzender, interessanter Bereich bezieht sich auf die Anzeigefläche der Lichteffekte. Wie ändert sich die Wahrnehmung und Wirkungsweise, wenn statt des untersuchten linienförmigen Konturlichts eine größere leuchtende Fläche zur Anzeige der Lichteffekte verwendet werden würde? Spielt es dabei eine Rolle, ob es sich um eine homogen leuchtende Fläche handelt oder ob diese mit einer Struktur durchzogen ist, wie es beispielsweise bei der Durchleuchtung eines Materials der Fall sein kann? Empfindet ein Nutzer einen Unterschied in der indirekten Beleuchtung einer Fläche im Vergleich zu einem selbstleuchtenden Bereich? Aus diesen Fragestellungen ergibt sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, welche in ähnlichen Studien wie den hier vorgestellten, untersucht werden könnten.

Ebenfalls spannend wäre es, die Rahmenbedingungen der Untersuchungen zu ändern. Die Erhebung der Ergebnisse fand bei einer kontinuierlichen Beleuchtung von 950 lx statt (Bereich des photopischen Sehens). Im realen Verkehr ändern sich die Lichtbedingungen jedoch kontinuierlich und reichen von starker Dunkelheit bei Nacht auf einer Landstraße bis hin zum Extremfall der direkten

Sonneneinstrahlung in einem Cabriolet. Dabei ändert sich nicht nur die Helligkeit, sondern auch die Farbtemperatur. Für eine gleichbleibende Wahrnehmung der Lichteffekte ist dementsprechend eine stetige Anpassung dieser an die Rahmenbedingungen notwendig. Hierzu empfiehlt sich die Ausarbeitung eines entsprechend technischen Konzepts, wobei die stichprobenartige Validierung des Konzepts durch Probandenstudien sinnvoll erscheint.

Ein weiterer Bereich, der untersucht werden könnte, ist, ob die Lichteffekte an unterschiedliche physische und psychische Zustände der Personen im Fahrzeug angepasst werden sollten. Denkt man beispielsweise an den Zustand eines Insassen während des vollautomatisierten Fahrens im Vergleich zum manuellen Fahren, so ergeben sich mentale als auch körperliche Unterschiede im Verhalten. Der Blick muss nicht länger auf die Fahrbahn gerichtet sein und dem Fahrer steht die Freiheit zu, sich mit fahraufgaben fremden Tätigkeiten zu beschäftigen. Lichteffekte müssten für eine gleiche Wirkung womöglich an anderer räumlicher Stelle angezeigt werden oder sich auffälliger verhalten.

Die erarbeiteten Ergebnisse dieser Forschungsarbeit basieren auf den Bewertungen von Probanden. Wie allerdings im Grundlagenteil erörtert, ist die Wahrnehmung von Farben durch Kulturen beeinflusst. Das bedeutet, dass die auf Basis der deutsch/europäisch geprägten Stichprobe erhobenen Aussagen nicht zwangsweise für andere Kulturkreise gelten. Zur Überprüfung einer globalen Gültigkeit der Gestaltungsregeln würde es repräsentative Untersuchungen in anderen Kulturkreisen benötigen. Ergeben sich abweichende Erkenntnisse, bedingt dies eine kulturspezifische Ausprägung der Lichteffekte für gleiche Situationen. Ein Beispiel hierfür könnte sein, dass ein Use Case in Nordamerika durch einen roten Lichteffekt repräsentiert ist, während die gleiche Situation in Asien durch Grün kommuniziert wird. Im Idealfall würde sich die Konfiguration der Fahrzeuge dabei nicht nach regionalen Landesgrenzen, sondern der kulturellen Herkunft des Insassen richten. Voraussetzung hierfür ist, dass dem Fahrzeug die Information über den Fahrer zur Verfügung steht. Gleiches gilt für eine mögliche Anpassung der Lichteffekte an Farbfehlsichtigkeit oder demographisches Alter

der Fahrzeugführenden. Auf Basis personalisierter Informationen wären individuell angepasste Lichteffekte möglich und als weiteres Forschungsfeld denkbar.

Abgesehen von der letzten Studie wurde das Licht als singuläres Medium betrachtet. Denkt man an eine gemeinsame Kommunikation von Inhalten über mehrere kombinierte Kanäle, so ergeben sich viele neue Fragestellungen: Ab wann wird ein Benutzer „überinformiert“? Welchen Inhalten wird mehr Vertrauen geschenkt, falls es beispielsweise in einem Fehlerfall zu inkonsistenten Anzeigen kommt? Ist ein paralleles oder aufeinander aufbauendes Anzeigekonzept sinnvoll? Die Kombinationsmöglichkeiten an Multimodalität sind vielfältig und es wäre interessant, welche Rolle dabei Lichteffekte als spezieller Fall von visueller Kommunikation spielen können.

15 Zusammenfassung

In mehreren nutzerzentrierten Studien wurden Erkenntnisse über die Möglichkeiten von dynamischen Lichteffekten zur Kommunikation verschiedener Inhalte im Fahrzeuginnenraum gewonnen.

Zu Beginn wurde der Kontext untersucht, in welchem Lichteffekte im Fahrzeuginnenraum auftreten können. Dazu wurde an eine bereits vorliegende Erarbeitung verschiedener Beispiel-Anwendungen angeknüpft und ein Cardsorting durchgeführt: Probanden gruppieren Szenarien auf Basis einer kurzen Inhaltsbeschreibung in für sie schlüssige Gruppen. Über alle Sortierungen hinweg wurde eine Clusteranalyse durchgeführt und so Kategorien erarbeitet, die die logische Zusammengehörigkeit der Szenarien aus Probandensicht widerspiegeln. Dieses Verfahren teilte die 30 zu sortierenden Situationen in drei Kategorien auf, die anschließend mit den Begriffen *Komfort*, *Information* und *Sicherheit* bezeichnet wurden.

Zum Zweiten wurden die Freiheitsgrade der Gestaltung von Licht in linienförmiger Anordnung basierend auf der Verbalisierung von Lichteffekten durch Nutzer untersucht. Es wurden Experteninterviews geführt und inhaltlich auf wiederkehrende Formulierungen untersucht. Daraus konnten Parameter abgeleitet werden, die aus Nutzerperspektive die Zusammensetzung von Lichteffekten beschreiben sowie deren konkrete Ausprägungen. Folgende Parameter wurden identifiziert: Farbe, Anzeigort, Richtung, Impulslänge, Aufstartverhalten und Geschwindigkeit. Für den darauffolgenden Forschungsabschnitt wurde die Zahl der Parameter auf ein für eine Probandenuntersuchung geeignetes Maß beschränkt, um alle daraus kombinierbaren Lichteffekte untersuchen zu können. Die Zusammenfassung ergab folgende Parameter: Farbe (mit den Ausprägungen *Weiß*, *Gelb*, *Rot*, *Grün*, *Blau*), Anzeigort (*Sichtbereich vorne*, *Sichtbereich Seiten*, *beide Sichtbereiche*) sowie Bewegungsart (*Erscheinen*, *Blitzen*, *Pulsen*, *Impulse nach vorne*, *Impulse nach hinten*, *Auffüllen nach vorne*)*.

Im dritten Teil wurde die Wirkung der Parameter in einer umfangreichen Usability Studie quantitativ analysiert. In der Studie wurden die Reaktionszeit sowie

der Einfluss auf eine visuelle Primäraufgabe als Maß für visuelle Beeinflussung erhoben. Des Weiteren wurde die Zuordnung von Effekten zu den anfangs postulierten Kategorien sowie eine subjektive Bewertung in Form eines Fragebogens erfasst. Die Studie fand in einem Teilfahrzeugaufbau mit umlaufendem Beleuchtungsstreifen auf Brüstungshöhe statt. Die große Stichprobe und das Studiensetting ermöglichten es, die Ergebnisse nicht nur auf Ebene der Lichteffekte, sondern zusätzlich auf Ebene der oben aufgeführten Parameter auszuwerten. Die Auswertung zeigt, dass nicht alle einzelnen Bausteine gleichen Einfluss auf alle abhängigen Variablen haben. Der Anzeigeort hat beispielsweise kaum Auswirkung auf die Kategorisierung, hier dominieren die Farbe und die Bewegungsart. Letztere Variable ist es auch, die den größten Einfluss auf die Reaktionszeit hat. Eine Hypothese, die in der Studie widerlegt werden konnte, ist, dass Lichteffekte, die eine schnelle Reaktion auslösen, sich negativ auf die Primäraufgabe auswirken. In der Gesamtheit der Auswertung der abhängigen Variablen sind einige scheinbar widersprüchliche Einzelergebnisse aufgetreten. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass diejenigen Effekte, die zur größten visuellen Beeinträchtigung bei den Probanden führten, trotzdem als Lichteffekt der Kategorie Komfort wahrgenommen wurden. Bei der Auswertung der Kategorisierungen wurde festgestellt, dass für die Kategorie Sicherheit eine aus Sicht der Reaktionszeitmessung ungeeignete Farbe präferiert wurde, während umgekehrt die am schnellsten wahrnehmbare Farbe mit Komfort assoziiert wird. Diese Ergebnisse zeigen eine Differenz zwischen subjektiver Wahrnehmung und objektiver Messung. Zur Überbrückung dieser Differenz muss eine Rangordnung der abhängigen Variablen festgelegt werden, welche sicherstellt, dass die Intention des Lichteffekts erreicht wird. Die Einordnung in die richtige Kategorie wird als wichtigstes Kriterium eines Effekts angesehen, daran schließen sich die Reaktionszeit und die visuelle Beanspruchung an, die je nach Kontext der Situation sehr unterschiedliche Anforderungen erfüllen müssen. Zuletzt kommt das Rating, auf dessen Basis die Wirkungsweise eines Lichteffekts feingestaltet werden kann.

Der letzte Datenerhebungsabschnitt verifizierte die Ergebnisse durch Anwendung auf verschiedene Situationen. Hierfür wurde eine Studie konzipiert, in welcher Probanden unbekannte Lichteffekte Situationen richtig zuordnen mussten. In das Studiendesign wurde auch das Medium Audio integriert und sowohl stimmige als auch widersprüchliche Kombinationen aus Audio- und Lichteffekten hergestellt. Die möglichen Situationen – stellvertretend je eine aus den Kategorien Information und Sicherheit – wurden vor der Datenerhebungsphase erklärt, die Effekte selbst jedoch nicht demonstriert. Dementsprechend musste jeweils spontan interpretiert werden, was der abgespielte Licht- und/oder Audioeffekt bedeutet. Dabei war nicht die Reaktionszeit das entscheidende Maß, sondern die Zuordnungsquote, d.h. die Anzahl der erwartungsgemäß zugeordneten Effekte sowie die Bewertung auf einem Fragebogen. Während der Warn-Lichteffekt in nahezu allen Fällen richtig zugeordnet wurde, variierte die Interpretation des Informations-Lichteffekts und konnte nur durch Ergänzung des Audio-Tons eine 100-prozentige korrekte Zuordnung erzielen. Das Licht allein konnte also nicht die Effektivität der langjährig erlernten Bedeutung von Tönen erreichen. Andersherum konnte gezeigt werden, dass ein nicht zur Situation passender Lichteffekt die Wirkung von Audiotönen abschwächen kann. In jedem Fall hat das Hinzufügen eines stimmigen Lichteffekts zu einer Situation die subjektive Beurteilung positiv beeinflusst.

Durch die umfassenden Untersuchungen zum Thema Licht als Funktionsträger im Fahrzeuginnenraum konnte eine Vielzahl unterschiedlicher Daten gesammelt werden, die kombiniert einen guten Überblick über die ganzheitliche Wirkungsweise von Lichteffekten liefern. Einen Mehrwert, den die Forschungsarbeit beiträgt, ist, dass die Ergebnisse auch Aussagen über die einzelnen erarbeiteten Bausteine der Lichteffekte zulassen. Sobald festgelegt ist, welchen Zweck ein Effekt erfüllen soll - ob Information vermitteln, als Sicherheitswarnung oder ohne inhaltliche Aussage zum Wohlbefinden beitragen – lassen sich auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse die Lichteffekte zielgerichtet konzipieren.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Links: Vereinfachtes Schnittbild des menschlichen Auges, Rechts: Verteilung der Sinneszellen in der Netzhaut in Abhängigkeit vom Winkel zur optischen Achse (Butz & Krüger, 2014, S. 16).....	17
Abbildung 2: Das binokulare Gesichtsfeld mit den beiden monokularen Bereichen (rechts und links schraffiert) sowie deren Überschneidung (mittiger, weißer Bereich) (Boyce, 2014, S. 44)	17
Abbildung 3: links: Verortung der Blickposition eines 50-Perzentil-Manns aus der Vogelperspektive. Rechts: 45°-Sichtfeld des 50-P-Manns (basierend auf internem Arbeitsmaterial der BMW AG)	18
Abbildung 4: verändertes Sichtfeld durch vertikale Rotation des Kopfes um 30°, 55° und 90° (basierend auf internem Arbeitsmaterial der BMW AG).	19
Abbildung 5: Darstellung der Empfindlichkeit des menschlichen Auges auf verschiedene Wellenlängen (Butz & Krüger, 2014, S. 15)	20
Abbildung 6: Gesichtsfeld des linken Auge mit eingezeichneten Erkennungsgrenzen von Grün, Rot, Blau und Gelb (Bartenbach & Witting, 2009, S. 99).....	21
Abbildung 7: Angaben zur zeitlichen Verzögerung beim An- und Ausgehen mehrerer Lichtpunkte und den daraus resultierenden Bewegungseindrücken (nach Goldstein & Ritter, 1997, S. 272).....	23
Abbildung 8: Zeitliche Übersicht der Beeinflussung des Cortisol- und Melatonin-Spiegels durch Tageslicht (Licht.de, 2014, S. 16)	28
Abbildung 9: Übersicht der Winkelabschnitte für biologische Wirkung von Licht (Licht.de, 2018, S. 19)	29
Abbildung 10: Übersicht der Empfindungsqualitäten in der Normfarbtafel nach Judd (Lübbe, 2013, S. 89).....	32
Abbildung 11: Ambiente Beleuchtung im Interieur der ersten Sitzreihe des BMW x7 aus 2018 (PressClub Deutschland BMW Group, 2018)	34
Abbildung 12: Studienkonzepte „Static Guiding Point“ (1) und „Dynamic Guiding Points“ (2) (auf Basis von Laquai et al., 2011)	38
Abbildung 13: Verortung der LED-Streifen zur Beeinflussung der Fahrgeschwindigkeiten im Projekt ChaseLight (Meschtscherjakov et al., 2015).39	
Abbildung 14: Lichteffect zur Unterstützung bei der Entscheidung über einen Fahrspurwechsel (Löcken et al., 2015)	40
Abbildung 15: Vermittlung von Kontextinformationen im Rahmen von Take-Over-Requests durch Lichteffecte (Borojeni et al., 2016)	42

Abbildung 16: Ambient light Display mit umlaufendem 360° LED-Streifen sowie dessen Einteilung in die vier Richtungssequenzen (Dziennus et al., 2016)	43
Abbildung 17: Darstellung der als „unscharfe Warnung“ bezeichneten LED-Anzeige in der Scheibenwurzel (Utesch, 2014, S. 17)	45
Abbildung 18: schematische Darstellung der möglichen Wirkung von Lichteffekten	50
Abbildung 19: Beispielkarte aus dem Cardsorting	59
Abbildung 20: Altersverteilung der 36 Probanden	60
Abbildung 21: Durchführung des Cardsortings (links) und Dokumentation einer fertigen Sortierung inkl. Benennung der Kategorien (rechts)	60
Abbildung 22: Ausschnitt der Auswertung des Cardsortings	62
Abbildung 23: Dendrogramm als Ergebnis der hierarchischen Clusteranalyse	64
Abbildung 24: Zuordnungen Use Cases aus hierarchischer und K-Means Clusteranalyse	65
Abbildung 25: Übersicht der drei Kategorien Komfort, Information und Sicherheit	67
Abbildung 26: Phasenmodell zum Verhältnis qualitativer und quantitativer Analyse (nach Mayring, 2015, S. 21)	77
Abbildung 27: Ausprägungen der Variable „Farbe“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	83
Abbildung 28: Ausprägungen der Variable „Art“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	84
Abbildung 29: Ausprägungen der Variable „Impulsgröße“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	85
Abbildung 30: Ausprägungen der Variable „Bereich“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	87
Abbildung 31: Ausprägungen der Variable „Richtung“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	88
Abbildung 32: Ausprägungen der Variable „Geschwindigkeit“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	90
Abbildung 33: Ausprägungen der Variable „Aufstartverhalten“ inkl. der Nennungshäufigkeit unterschieden nach Kategorien	92
Abbildung 34: Schematische Darstellung des CTTs. Ziel ist es, die rote Linie möglichst mittig auf der schwarz-gestrichelten Linie auszubalancieren	104
Abbildung 35: Hardware Sitzkiste	106

Abbildung 36: 45°-Blickperspektiven aus Sicht der RAMSIS-Modelle. Oben links: 5%-Perzentil Frau; oben rechts: 95%-Perzentil Mann; groß Mitte: 50%-Perzentil Mann; (Quelle: internes Arbeitsmaterial der BMW AG)	107
Abbildung 37: Lenkradtastenbelegung: rot-markiert = Navigation zwischen den Screens, Steuerung CTT; blau-markiert = Ausfüllen von Fragebögen, Reaktionszeitmessung.....	108
Abbildung 38: Java-Anwendung „Effektanzeige“, welche die graphischen Inhalte zur Ansteuerung der LEDs generiert.....	109
Abbildung 39: Struktur der verwendeten SQL-Datenbank, abgebildet in Form eines Entity-Relationship-Diagramms.....	111
Abbildung 40: Darstellung des Zusammenspiels der beteiligten Software-Komponenten	113
Abbildung 41: Schematische Darstellung der Lichtkondition im Versuchsraum für eine Person von 170 cm Körpergröße mit eingerichteten Fahrersitz.....	116
Abbildung 42: Digitaler Fragebogen zur Erfassung der demographischen Daten.	120
Abbildung 43: Beispielhafte Darstellung des verkleinerten Vignetten Designs	121
Abbildung 44: Absolute Stichprobenverteilung nach Geschlecht und Alter.....	123
Abbildung 45: Verteilung Lieblingsfarbe in Prozent.....	124
Abbildung 46: Prozentuelle Übersicht der Auswertung Kategorien über alle Effekte	125
Abbildung 47: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors Farbe	127
Abbildung 48: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors Bewegungsart.....	129
Abbildung 49: Betrachtung der Kategorisierung in Abhängigkeit des Faktors Anzeigeort.....	130
Abbildung 50: Histogramm der Reaktionszeiten; $\mu = 1689$ ms; $\sigma = 2524$ ms; $N = 2108$	134
Abbildung 51: Histogramm nach Ausreißerkorrektur von $\mu \pm 3\sigma$; $\mu = 1403$ ms; $\sigma = 996$ ms; $N = 2073$	136
Abbildung 52: Überprüfung der Varianzhomogenität als Voraussetzung einer ANOVA.....	138
Abbildung 53: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Farbe als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten).....	140
Abbildung 55: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Bewegungsart als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten).....	143

Abbildung 57: Anzeigeorte der Lichteffekte in Abhängigkeit des Sichtfelds eines Fahrers	147
Abbildung 58: Darstellung der Reaktionszeit für den Faktor Anzeigeort als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)	148
Abbildung 59: Berechnung des Änderungswert des CTTs als Maß für visuelle Beeinflussung	153
Abbildung 60: Histogramm des CTT Änderungswerts nach Ausreißerkorrektur von $\mu \pm 3\sigma$; $\mu = 47,95\%$; $\sigma = 76,79\%$; $N = 2009$	154
Abbildung 61: Ergebnis der Überprüfung der Varianzhomogenität des CTT Änderungswerts	156
Abbildung 62: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Farbe als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)	158
Abbildung 64: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Bewegungsart als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)	160
Abbildung 66: Darstellung des CTT-Änderungswerts für den Faktor Anzeigeort als Boxplot (oben) und Balkendiagramm der Mittelwerte (unten)	162
Abbildung 67: Streudiagramm mit den abhängigen Variablen Reaktionszeit und CTT-Änderungswert	165
Abbildung 68: Übersicht der Ergebnisse des Fragebogens zur Bewertung der Lichteffekte, aufgeteilt in die einzelnen Variablen (von links oben: Farbe, Anzeigeort, Bewegungsart).....	166
Abbildung 70: Darstellung des Zusammenhangs der Bewertungskriterien	176
Abbildung 71: Spearman-Rho-Test zur Überprüfung der Korrelation innerhalb der Bewertungsmerkmale	176
Abbildung 72: Übersicht der Merkmale schön (oben) und angenehm (unten) in Abhängigkeit der Kategorisierung; Kreuztabellen mit Prozentangaben	180
Abbildung 73: Übersicht der Kategorisierung in Abhängigkeit des Kriteriums hektisch; Kreuztabelle mit Prozentangaben	181
Abbildung 74: Belegung der Lenkradtasten für die Validierungsstudie. Rot markiert: Steuerung CTT; linke blau markierte Taste: Auffahrwarnung erkannt; rechte blau markierte Taste: Eingehender Anruf erkannt; beide blauen Tasten: keine Funktion erkannt.	193
Abbildung 75: Ergebnisse des UEQ-Fragebogens für die verschiedenen Effektkombinationen des eingehenden Anrufs.....	197
Abbildung 76: Ergebnisse des UEQ-Fragebogens für die verschiedenen Effektkombinationen der Auffahrwarnung.....	200

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Arten und Merkmale für sichtbare Codes (DIN EN 60073:2003-05; VDE 0199:2003-05, 2003).....	71
Tabelle 2: Übersicht der im Fahrzeuginnenraum relevanten Bausteine von Lichteffekten inkl. deren Ausprägungen	93
Tabelle 3: Übersicht der unabhängigen Variablen sowie deren Ausprägungen.....	99
Tabelle 4: Auflistung der Geschwindigkeiten der Lichtbewegungen	110
Tabelle 5: Vermessung der Leuchtdichte der Sitzkiste (Mischverhältnis der LEDs: R = 70%, G = 100%, B = 30%).....	117
Tabelle 6: Vermessung Leuchtdichte der Sitzkiste (Mischverhältnis der LEDs: R= 100%, G = 100%, B= 100%)	118
Tabelle 7: Absolute Kategorisierung der Ausprägungen von <i>Farbe</i>	126
Tabelle 8: Auflistung der drei am häufigsten/am seltensten zugeordneten Effekte. Beschreibungsreihenfolge der Effekte entspricht <i>Farbe, Bewegungsart, Anzeigeort</i> . (*Falls mehrere Effekte die gleiche prozentuale Zuordnung hatten, wurde eine Auswahl getroffen).....	131
Tabelle 9: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor <i>Farbe</i>	135
Tabelle 10: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor <i>Bewegungsart</i>	135
Tabelle 11: Prüfung auf Normalverteilung für den Faktor <i>Anzeigeort</i>	135
Tabelle 12: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Farbe</i> nach Ausreißerkorrektur	137
Tabelle 13: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Bewegungsart</i> nach Ausreißerkorrektur	137
Tabelle 14: Prüfung auf Normalverteilung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Anzeigeort</i> nach Ausreißerkorrektur.....	137
Tabelle 15: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Farbe</i>	141
Tabelle 16: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Bewegungsart</i>	144
Tabelle 17: Reaktionszeiten der drei richtungsorientierten Bewegungsarten in Abhängigkeit des Anzeigeorts.....	147
Tabelle 18: Rangordnung der Reaktionszeit für den Faktor <i>Anzeigeort</i>	149
Tabelle 19: Übersicht der Effekte mit den schnellsten und langsamsten Reaktionszeiten	150
Tabelle 20: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor <i>Farbe</i> nach Ausreißerkorrektur	155

Tabelle 21: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor <i>Bewegungsart</i> nach Ausreißerkorrektur.....	155
Tabelle 22: Prüfung auf Normalverteilung der visuellen Beeinflussung für den Faktor <i>Anzeigeort</i> nach Ausreißerkorrektur	156
Tabelle 23: Übersicht der Effekte mit den kleinsten und größten CTT Änderungswerten.....	164
Tabelle 24: Übersicht der Zusammenhänge zwischen den unabhängigen Variablen und den subjektiven Bewertungsmerkmalen. Zweiseitiger Test, * bedeutet signifikant bei $\alpha = 0,05$; ** bei $\alpha = 0,01$	167
Tabelle 25: Rangordnung des Kriteriums <i>schön</i> für den Faktor <i>Farbe</i>	168
Tabelle 26: Rangordnung des Kriteriums <i>angenehm</i> für den Faktor <i>Farbe</i>	169
Tabelle 27: Rangordnung des Kriteriums <i>schön</i> für den Faktor <i>Bewegungsart</i> ...	170
Tabelle 28: Rangordnung des Kriteriums <i>ablenkend</i> für den Faktor <i>Bewegungsart</i>	171
Tabelle 29: Rangordnung des Kriteriums <i>hektisch</i> für den Faktor <i>Bewegungsart</i>	172
Tabelle 30: Rangordnung des Kriteriums <i>angenehm</i> für den Faktor <i>Bewegungsart</i>	173
Tabelle 31: Rangordnung des Merkmals Schön für den Faktor <i>Anzeigeort</i>	174
Tabelle 32: Rangordnung des Merkmals Ablenkend für den Faktor <i>Anzeigeort</i>	174
Tabelle 33: Rangordnung des Merkmals Angenehm für den Faktor <i>Anzeigeort</i>	175
Tabelle 34: Übersicht der Lichteffekte mit den höchsten und niedrigsten Bewertungen pro Kriterium.....	177
Tabelle 35: Ergebnisse des Qui-Quadrat-Test zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen der Kategorisierung und den Bewertungsmerkmalen	179
Tabelle 36: Für die Validierungsstudie ausgewählte Lichteffekte inkl. deren Ergebnisse bezüglich der abhängigen Variablen	192
Tabelle 37: Übersicht der Zuordnungsquoten aller Effektkombinationen für den Use Case eingehender Anruf	196
Tabelle 38: Übersicht der Zuordnungsquoten aller Effektkombinationen für den Use Case Auffahrwarnung.....	199

Literaturverzeichnis

- Ansorge, U., & Leder, H. (2017). *Wahrnehmung und Aufmerksamkeit* (2. Aufl.). Springer Fachmedien.
- Arizton. (2019). *Automotive Interior Lighting System Market - Global Outlook and Forecast 2019-2024*.
- Audi AG. (2015a). *Audi Q7 - Animation Ausstiegswarnung*. Abgerufen am 9. April 2020, von <https://www.audi-mediacycenter.com/de/audimediatv/video/audi-q7-animation-ausstiegswarnung-2592>
- Audi AG. (2015b). *Audi Q7 Ausstiegswarnung*. Abgerufen am 9. April 2020, von <https://www.audi-technology-portal.de/de/elektrik-elektronik/fahrerassistenzsysteme/audi-q7-ausstiegswarnung>
- Audi AG. (2020). *Audi Fit Driver*. Abgerufen am 9. April 2020, von <https://www.audi-mediacycenter.com/de/audi-auf-der-ces-2016-5294/audi-fit-driver-5300>
- Auspurg, K., Abraham, M., Hinz, T. (2009). Die Methodik des Faktoriellen Surveys in einer Paarbefragung. In P. Kriwy, C. Gross (Hrsg.), *Klein aber fein! Quantitative empirische Sozialforschung mit kleinen Fallzahlen* (S. 179-210). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Backhaus, K., Erichson, B., Plinke, W., & Weiber, R. (2016). *Multivariate Analysemethoden: Eine anwendungsorientierte Einführung* (14., überarb. Aufl.). Springer.
- Bartenbach, C., & Witting, W. (2009). *Handbuch für Lichtgestaltung: Lichttechnische und wahrnehmungspsychologische Grundlagen*. Springer Wien. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-75780-2>
- Beck, M., & Opp, K.-D. (2001). Der faktorielle Survey und die Messung von Normen. *KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 53(2), 283–306. <https://doi.org/10.1007/s11577-001-0040-3>
- Becker, S. T., Vonthein, R., Volpe, N. J., & Schiefer, U. (2005). Factors Influencing Reaction Time during Automated Kinetic Perimetry on the Tübingen Computer Campimeter. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 46(7), 2633–2638.
- Berger, R., Burek, M., Saller, C. (2009). Online-Vignettenexperimente. Methode und Anwendung auf spieltheoretische Analysen. In Jakob, N., Schoen, H., & Zerback, T. (Hrsg.), *Sozialforschung im Internet: Methodologie und Praxis der Online-Befragung* (S. 305-319). VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-91791-7>
- Blankenbach, K., Hertlein, F., & Hoffmann, S. (2020). Advances in automotive interior lighting concerning new LED approach and optical performance.

Journal of the Society for Information Display, 28(8), 655–667.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/jSID.887>

- BMW AG. (2020). *BMW ConnectedDrive: Digital Services*. Abgerufen 9. April 2020, von <https://www.bmw.de/de/topics/service-zubehoer/connecteddrive/bmw-connected-drive-uebersicht.html>
- Bogner, A., Menz, W. (2002). Expertenwissen und Forschungspraxis: die modernisierungstheoretische und die methodische Debatte um die Experten. In A. Bogner, B. Littig, W. Menz (Hrsg.), *Das Experteninterview* (S. 7-29). Verlag für Sozialwissenschaften.
- Borojeni, S. S., Chuang, L., Heuten, W., & Boll, S. (2016). Assisting Drivers with Ambient Take-Over Requests in Highly Automated Driving. *Proceedings of the 8th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 237–244.
<https://doi.org/10.1145/3003715.3005409>
- Bortz, J., & Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler* (7. Aufl.). Springer.
- Boyce, P. R. (2014). *Human factors in lighting* (3. Aufl.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Budiu, R. (2018). Between-Subjects vs. Within-Subjects Study Design. Abgerufen 27. Mai 2020, von <https://www.nngroup.com/articles/between-within-subjects/>
- Butz, A., & Krüger, A. (2014). *Mensch-Maschine-Interaktion*. De Gruyter Oldenbourg.
- Caberletti, L., Kümmel, M., Elfmann, K., & Schierz, C. (2009). Influence of Ambient Lighting in Vehicle Interior on the Driver's Perception. In Y. A. W. de Kort, W. A. IJsselsteijn, I. M. L. C. Vogels, M. P. J. Aarts, A. D. Tenner, & K. C. H. J. Smolders (Hrsg.), *Proceedings Experience Light 2009* (S. 5–13).
- Cajochen, C. (2007). Alerting effects of light. *Sleep medicine reviews*, 11(6), 453–464.
<https://doi.org/10.1016/j.smr.2007.07.009>
- Optimal Workshop (o.D.). *Introduction to card sorting*. Abgerufen 19. Dezember 2016, von <https://www.optimalworkshop.com/learn/card-sorting-101-introduction-to-card-sorting/>
- CIE. (1932). *Commission internationale de l'Eclairage proceedings, 1931*. Cambridge University Press.
- Crundall, D., Underwood, G., & Chapman, P. (2002). Attending to the Peripheral World While Driving. *Applied Cognitive Psychology*, 16, 459–475.
- Dahm, M. (2006). *Grundlagen der Mensch-Computer-Interaktion*. Pearson Studium.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193–222.

- DIN EN 12665:2018-08. (2018). Licht und Beleuchtung - Grundlegende Begriffe und Kriterien für die Festlegung von Anforderungen an die Beleuchtung. Beuth Verlag.
- DIN EN 60073:2003-05; VDE 0199:2003-05. (2003). Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle, Kennzeichnung: Codierungsgrundsätze für Anzeigengeräte und Bedienteile. Beuth Verlag.
- Dziennus, M., Kelsch, J., & Schieben, A. (2016, 2-5 Mai). *Ambient light based interaction concept for an integrative driver assistance system* [Konferenzpräsentation]. International Conference on Traffic and Transport Psychology, Brisbane, Australien.
https://elib.dlr.de/105834/1/Dziennus%282016%29_ICTTP.pdf
- Elfmann, K. (2009). *Experimentelle Untersuchung zur Wahrnehmung von ambienten Beleuchtungselementen für die konzeptionelle Auslegung im Fahrzeug*. Fakultät für Maschinenbau, Ilmenau.
- Elmenhorst, D., Elmenhorst, E.-M., Luks, N., Maass, H., Mueller, E.-W., Vejvoda, M., Wenzel, J., Samel, A. (2009). Performance impairment during four days partial sleep deprivation compared with the acute effects of alcohol and hypoxia. *Sleep medicine*, 10(2), 189–197.
<https://doi.org/10.1016/j.sleep.2007.12.003>.
- Field, A. (2011). *Discovering statistics using SPSS* (3. Aufl.). Sage Publications Ltd.
- Fleischer, S. E. (2001). *Die psychologische Wirkung veränderlicher Kunstlichtsituationen auf den Menschen*. Naturwissenschaften, ETH Zürich.
<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004122647>
- Forstner, S. (2012). *Der Einfluss von Bright Light auf die Ausdauerleistungsfähigkeit*. Zentrum für Prävention und Sportmedizin, München.
- Franzke, D. (2006). *Einfluss ambienter Beleuchtung auf das Kontrastsehvermögen*. Fachhochschule Jena, Jena.
- Frodermann, C., Auspurg, K., Hinz, T., Bähr, S., Abraham, M., Gundert, S., & Bethmann, A. (2013). *Das Faktorielle Survey-Modul zur Stellenannahmefähigkeit im PASS: 5. Erhebungswelle (2011)*. Bundesagentur für Arbeit.
https://doku.iab.de/fdz/reporte/2013/MR_05-13.pdf
- Gläser, J., & Laudel, G. (2010). *Experteninterviews und qualitative Inhaltsanalyse: als Instrumente rekonstruierender Untersuchungen* (4. Aufl.). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Goldstein, E. B., & Ritter, M. (1997). *Wahrnehmungspsychologie: Eine Einführung*. Spektrum, Akad. Verl.
- Grimm, M. (2003). *Anforderungen an eine ambiente Innenraumbeleuchtung von Kraftfahrzeugen*. Herbert Utz Verlag.
- Gross, D. (2006). *Farbe - Erkenntnis - Wissenschaft: Zur epistemischen Bedeutung von Farbe in der Medizin*. Lit.

- Haines, R. F., Dawson, L. M., Galvan, T., & Reid, L. M. (1975). *Response time to colored stimuli in the full visual field*. National Aeronautics and Space Administration.
- Helfferrich, C. (2019). Leitfaden- und Experteninterviews. In N. Baur & J. Blasius (Hrsg.), *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung* (S. 669–686). https://doi.org/10.1007/978-3-658-21308-4_44
- Heller, E. (2006). *Wie Farben wirken: Farbpsychologie, Farbsymbolik, kreative Farbgestaltung*. Rowohlt-Taschenbuch-Verl.
- Hoffmann, A., & Menozzi, M. (1999). Applying the Ishihara test to a PC-based screening system. *Displays*, 20(1), 39–47. [https://doi.org/10.1016/S0141-9382\(98\)00053-5](https://doi.org/10.1016/S0141-9382(98)00053-5)
- Huber, H. (2009). *Experimentelle Untersuchung zur subjektiven Wahrnehmung von Leuchtdichte und Farbton ambienter Beleuchtung mit LEDs im Fahrzeuginnenraum*. Fakultät Maschinenbau und Mechatronik, Karlsruhe.
- Irwin, D. E., Colcombe, A. M., Kramer, A. F., & Hahn, S. (2000). Attentional and oculomotor capture by onset, luminance and color singletons. *Vision Research*, 40(10-12), 1443–1458. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(00\)00030-4](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(00)00030-4)
- Isele, R., & Hertlein, F. (2019). Die Vorteile vernetzter LEDs in einem Fahrzeug. *Elektronik in Praxis - Sonderheft LED- und OLED-Lichttechnik*, 16–18. <https://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/issues/ep/2019/625.pdf>
- ISO 26022:2010-09. (2010). *Straßenfahrzeuge - Ergonomische Aspekte über Transportinformationen und Regelsysteme - Simulierter Spurwechseltest zur Generierung fahrzeuginterner sekundärer Aufgaben*. Beuth Verlag.
- Janssen, J., & Laatz, W. (2017). *Statistische Datenanalyse mit SPSS* (9. Aufl.). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53477-9>
- Jex, H. R., & McDonnell, J. D. (1967). *A "critical" tracking task for man-machine research related to the operator's effective delay time: Part II: Experimental effects of system input spectra, control stick stiffness, and controlled element order*. National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19670006683/downloads/19670006683.pdf>
- Jex, H. R., McDonnell, J. D., & Phatak, A. V. (1966a). *A critical tracking task for man-machine research related to the operator's effective delay time: Part I: Theory and experiments with a first-order divergent controlled element*. National Aeronautics and Space Administration. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19660030603/downloads/19660030603.pdf>
- Jex, H. R., McDonnell, J. D., & Phatak, A. V. (1966b). A Critical Tracking Task for Manual Control research. *IEEE Transactions on Human Factors in Electronics*, 7(4), 138–145.

- Judd, D. B. (1940). Hue Saturation and Lightness of Surface Colors with Chromatic Illumination. *Journal of the Optical Society of America*, 30(1), 2–32.
<https://doi.org/10.1364/JOSA.30.000002>
- Kay, P., Berlin, B., Maffi, L., Merrifield, W. R., & Cook, R. (2010). *The world color survey*. Center for the Study of Language and Information Publications.
- Kelsch, J., & Dziennus, M. (2015, 26-30 Juli). *Joint driver-automation system design: Gradual action-oriented ambient stimuli* [Konferenzpräsentation]. 6th international Conference on Applied Human Factors and Ergonomics, Las Vega, Amerika.
<http://elib.dlr.de/99451/1/Kelsch.Dziennus.2015.-.Gradual.action-oriented.ambient.stimuli.pdf>
- Klein, R. H., & Jex, H. R. (1975). Effects of alcohol on a Critical Tracking Task. *Journal of Studies on Alcohol*, 336(1), 11–20.
- Klinger, K. D., & Lemmer, U. (2008). The influence of ambient light on the driver. *Proc. SPIE*, 7003.
<https://doi.org/10.1117/12.780017>
- Knepel-Stoll, C. (2010). *Referenzwerte für das Lübecker Reaktionszeitperimeter*. Universität zu Lübeck.
- Koninklijke Philips N.V. (2020). *Philips Sleep & Wake-Up Light*. Abgerufen 4. Mai 2020, von <https://www.philips.de/c-e/pe/lichttherapie/wake-up-lights.html>
- Kortum, P. (2008). *HCI beyond the GUI: Design for haptic, speech, olfactory and other nontraditional interfaces*. Morgan Kaufmann.
- Kühlmeyer, K., Muckel, P., & Breuer, F. (2020). Qualitative Inhaltsanalysen und Grounded-Theory-Methodologien im Vergleich: Varianten und Profile der „Instruktionalität“ qualitativer Auswertungsverfahren Kuehlmeyer Muckel Breuer FQS 2020. *Forum Qualitative Sozialforschung*, 21(1), 25.
- Künzer, L. (2016). *?Alarmstufe Rot!? oder ?Alles im grünen Bereich!?* *Farben im Kontext von Gefahr und Sicherheit*. Psychologie, Pädagogik und Sportwissenschaft, Regensburg.
<https://epub.uni-regensburg.de/33832/>
- Laquai, F., Chowanetz, F., & Rigoll, G. (2011). A large-scale LED array to support anticipatory driving. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2011 IEEE International Conference on*, 2087–2092.
<https://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6083980>
- Licht.de. (2014). *Wirkung des Lichts auf den Menschen*. (licht.wissen 19).
https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1403_lw19_Wirkung_auf_Mensch_web.pdf
- Licht.de. (2018). *Leitfaden Human Centric Lighting (HCL)*. (licht.wissen 21).
https://www.licht.de/fileadmin/Publikationen_Downloads/1806_lw21_HCL_web.pdf

- Löcken, A., Müller, H., Heuten, W., & Boll, S. (2015). An experiment on ambient light patterns to support lane change decisions. *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2015 IEEE*, 505–510.
<https://doi.org/10.1109/IVS.2015.7225735>
- Lübbe, E. (2013). *Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung: Eine Formel für die Farbsättigung*. Springer Vieweg.
- Mattes, S. (2003). *The Lane Change Task as a tool for driver distraction evaluation*. Research & Technology DaimlerChrysler AG.
<http://www-nrd.nhtsa.dot.gov/departments/nrd-01/IHRA/ITS/MATTES.pdf>
- Mattes, S., & Hallen, A. (2008). Surrogate Distraction Measurement Techniques. In M. Regan, J. Lee, & K. Young (Hrsg.), *Driver Distraction* (S. 107–122). CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781420007497>
- Matviienko, A., Rauschenberger, M., Cobus, V., Timmermann, J., Fortmann, J., Löcken, A., Müller, H., Trappe, C., Heuten, W., Boll, S. (2015). Towards New Ambient Light Systems: a Close Look at Existing Encodings of Ambient Light Systems. *Interaction Design and Architecture(s) Journal - IxD&A*, (26), 10–24.
- Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse: Grundlagen und Techniken* (12. Aufl.). Beltz Verlag.
- McKee, S. P., & Nakayama, K. (1984). The detection of motion in the peripheral visual field. *Vision Research*, 24(1), 25–32.
[https://doi.org/10.1016/0042-6989\(84\)90140-8](https://doi.org/10.1016/0042-6989(84)90140-8)
- McMains, S. A., & Kastner, S. (2009). Visual Attention. In M. D. Binder, N. Hirokawa, & U. Windhorst (Hrsg.), *Encyclopedia of Neuroscience* (S. 4296–4302). Springer.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-29678-2_6344
- Meschtscherjakov, A., Döttlinger, C., Rödel, C., & Tscheligi, M. (2015). Chase-Light: Ambient LED Stripes to Control Driving Speed. *Proceedings of the 7th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, 212–219.
<https://doi.org/10.1145/2799250.2799279>
- Michenfelder, S. (2010). *Ermittlung des Einflusses einer ambienten Innenraumbeleuchtung auf das Kontrastsehen des Fahrzeugführers*. Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe.
https://www.lti.kit.edu/rd_download/licht2006/Diplomarbeit_Steffen_Michenfelder.pdf
- Moser, C. (2012). *User Experience Design: Mit erlebniszentrierter Softwareentwicklung zu Produkten, die begeistern*. Springer.
- Müller, W. A., Frings, S., & Möhrlen, F. (2019). *Tier- und Humanphysiologie: Eine Einführung* (6. Aufl.). Springer Spektrum.

- National Highway Traffic Safety Administration. (2013). *Visual-Manual NHTSA Driver Distraction Guidelines for In-Vehicle Electronic Devices*. <https://www.federalregister.gov/d/2013-09883>
- Neville, H. J., & Lawson, D. (1987). Attention to central and peripheral visual space in a movement detection task: an event-related potential and behavioral study. I. Normal hearing adults. *Brain Research*, 405(2), 253–267. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(87\)90295-2](https://doi.org/10.1016/0006-8993(87)90295-2)
- NOVALOGY. (2019). *AYO Light Therapy Glasses*. Abgerufen 4. Mai 2020, von <https://goayo.com/>
- Osaka, N. (1976). Reaction Time as a Function of Peripheral Retinal Locus around Fovea: Effect of Stimulus Size. *Perceptual and Motor Skills*, 43(2), 603–606. <http://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.2466/pms.1976.43.2.603>
- Perz, M. (2010). *Flicker perception in the periphery*. Faculty of Industrial Engineering and Innovation Sciences, Eindhoven. <https://pure.tue.nl/ws/portalfiles/portal/46984624/685337-1.pdf>
- Petzoldt, T., Bellem, H., & Krems, J. F. (2014). The critical tracking task - A potentially useful method to assess driver distraction? *Human Factors*, 56(4), 784–803.
- Pituch, K. A., & Stevens, J. (2016). *Applied multivariate statistics for the social sciences: Analyses with SAS and IBM's SPSS* (6. Aufl.). Routledge.
- Popp, R. F. J. (2005). *Gegenmaßnahmen bei Schläfrigkeit: Der Effekt von kurzweiligem Licht und olfaktorischer Stimulation*. Psychologie, Pädagogik und Sportwissenschaft, Regensburg.
- Posner, M. (1980). Orienting of Attention. *The Quarterly journal of experimental psychology*, 32, 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Pousman, Z., & Stasko, J. (2006). A Taxonomy of Ambient Information Systems: Four Patterns of Design. *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces*, 67–74. <https://doi.org/10.1145/1133265.1133277>
- PressClub Deutschland BMW Group. (2018). *Der neue BMW X5*. Abgerufen 9. April 2020, von <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/compilation/T0281455DE/der-neue-bmw-x5:-das-prestige-sav-mit-den-innovativsten-technologien>
- Ramaekers, J. G., Kauert, G., van Ruitenbeek, P., Theunissen, E. L., Schneider, E., & Moeller, M. R. (2006). High-potency marijuana impairs executive function and inhibitory motor control. *Neuropsychopharmacology : official publication of the American College of Neuropsychopharmacology*, 31(10), 2296–2303. <https://doi.org/10.1038/sj.npp.1301068>
- Rauschenberger, M., Matviienko, A., Cobus, V., Timmermann, J., Müller, H., Löcken, A., Fortmann, J., Trappe, C., Heuten, W., Boll, S. (2015). Lumicons:

- Mapping Light Patterns to Information Classes. In S. Diefenbach, N. Henze, & M. Pielot (Hrsg.), *Mensch und Computer 2015 -- Proceedings* (S. 343–346). <https://doi.org/10.1515/9783110443929-048>
- Rogé, J., Pébayle, T., Lambilliotte, E., Spitzenstetter, F., Giselbrecht, D., & Muzet, A. (2004). Influence of age, speed and duration of monotonous driving task in traffic on the driver's useful visual field. *Vision Research*, 44(23), 2737–2744. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2004.05.026>
- Santer, B. (2009, November). *Die neue BMW 5er Limousine*. BMW Medieninformation, 78. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/attachment/T0071853DE/145422>
- Schellinger, S., Franzke, D., Klinger, K., & Lemmer, U. (2006). Advantages of ambient interior lighting for drivers contrast vision. *Proc. SPIE*, 6198. <https://doi.org/10.1117/12.663015>
- Schendera, C. F. G. (2011). *Clusteranalyse mit SPSS: Mit Faktorenanalyse*. Oldenbourg.
- Schüßler, C., Mandl, T., & Womser-Hacker, C. (2010). Die Effektivität virtueller Tools für die Usability Methode Card Sorting. *Mensch und Computer 2009*, 273–282.
- Schwarz, J., & Bruderer Enzler, H. (2018). *Clusteranalyse: 3.3. Bestimmen der Anzahl Cluster*. Methodenberatung Universität Zürich. https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/interdependenz/gruppierung/cluster.html
- Seidl, A. (1997). *RAMSIS - A New CAD-Tool for Ergonomic Analysis of Vehicles Developed for the German Automotive Industry*. SAE Technical Paper Series. <https://doi.org/10.4271/970088>
- Spencer, D. (2009). *Card Sorting: Designing Usable Categories*. Rosenfeld Media.
- Steiner, P. M., & Atzmüller, C. (2006). Experimentelle vignettendesigns in faktoriellen surveys. *KZfSS Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 58(1), 117–146. <https://doi.org/10.1007/s11575-006-0006-9>
- Stevens, A., Quimby, A., Board, A., Kersloot, T., & Burns, P. (2002). *Design Guidelines for Safety of In-Vehicle Information Systems*. Transport Research Laboratory.
- Theeuwes, J. (1992). Perceptual selectivity for color and form. *Perception & Psychophysics*, 51(6), 599–606.
- Traschütz, A., Zinke, W., & Wegener, D. (2012). Speed change detection in foveal and peripheral vision. *Vision Research*, 72, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2012.08.019>
- Tullis, T., & Albert, B. (2011). *Measuring the user experience: Collecting, analyzing, and presenting usability metrics*. Morgan Kaufmann.

- Tullis, T., & Wood, L. E. (2004, 10-12 Juni). *How Many Users Are Enough for a Card-Sorting Study?* [Posterpräsentation]. Annual Meeting of the Usability Professionals Association, Minneapolis, Amerika.
- usability.de. (2016). *Card Sorting*. Abgerufen 19. Dezember 2016, von <https://www.usability.de/leistungen/methoden/card-sorting.html>
- usability.gov. (2016). *Card Sorting*. Abgerufen 20. Dezember 2016, von <https://www.usability.gov/how-to-and-tools/methods/card-sorting.html>
- Utesch, F. (2014). *Unschärfe Warnungen im Kraftfahrzeug: Eignet sich eine LED-Leiste als Anzeige für Fahrerassistenzsysteme*. Fakultät für Lebenswissenschaft, Braunschweig.
- van der Meulen, P., & Seidl, A. (2007). Ramsis -- The Leading Cad Tool for Ergonomic Analysis of Vehicles. In V. G. Duffy (Hrsg.), *Digital Human Modeling* (S. 1008–1017). Springer.
- van Veen, T., Karjanto, J., & Terken, J. (2017). Situation Awareness in Automated Vehicles through Proximal Peripheral Light Signals. *Proceedings of the 9th International Conference on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications - AutomotiveUI '17*, 287–292. <https://doi.org/10.1145/3122986.3122993>
- Welsch, N., & Liebmann, C. C. (2012). *Farben: Natur Technik Kunst* (3. Aufl.). Spektrum Akademischer Verlag.
- Werth, L., Steidle, A., Hubschneider, C., de Boer, J., & Sedlbauer, K. (2013). Psychologische Befunde zu Licht und seiner Wirkung auf den Menschen - ein Überblick. *Bauphysik*, 35(3), 193–204. <https://doi.org/10.1002/bapi.201310058>
- Wichtrey, C. (2017). *Sensordatenbasierte Modellierung von Beleuchtungssituationen im Fahrzeug*. Betriebswirtschaft, Nürnberg.
- Wördenweber, B., Wallaschek, J., Boyce, P., & Hoffman, D. D. (2007). *Automotive Lighting and Human Vision*. Springer.

Anhang

Anhangsverzeichnis

Zu Kapitel 8 Erarbeitung von funktionellen Anwendungsgebieten mit Hilfe der Methode Cardsorting

Anhang 1	Kartenmaterial Cardsorting.....	227
	Auswertung Cardsorting.....	Digitaler Datenträger

Zu Kapitel 9 Ausarbeitung eines Baukastens für Lichteffekte durch Berücksichtigung von in Interviews gesammelten Assoziationen

Anhang 2	Versuchsleitfaden Experteninterviews.....	231
	Auswertung Inhaltsanalyse.....	Digitaler Datenträger
	Vereinheitlichte Auswertung.....	Digitaler Datenträger

Zu Kapitel 10 Erhebung der Einflussnahme von unabhängigen Variablen im Rahmen einer Nutzerstudie

Anhang 3	SPSS Auswertung Kategorisierung.....	236
Anhang 4	SPSS Auswertung Reaktionszeit.....	239
Anhang 5	SPSS Auswertung Visuelle Beeinflussung.....	241
Anhang 6	SPSS Auswertung Subjektives Empfinden.....	245
Anhang 7	SPSS Auswertung Korrelationen.....	260
	Ergebnisse Kategorisierung.....	Digitaler Datenträger
	Ergebnisse Reaktionszeit.....	Digitaler Datenträger
	Ergebnisse visuelle Beeinflussung.....	Digitaler Datenträger
	Ergebnisse Rating.....	Digitaler Datenträger

Anhang 1 Kartenmaterial Cardsorting

Fahrdynamisches Licht

Das Licht bewegt sich in Abhängigkeit von Kräften die in Längs- und Querdynamik auftreten.



Spurassistent

Bei versehentlichem seitlichen Verlassen des Fahrstreifens wird der Fahrer durch ein Lichtsignal wieder in die richtige Richtung "gedrückt".



Türverriegelung

Das Licht gibt Feedback wenn die Türen verriegelt werden. Dezent und nur von innen sichtbar.



Witterungsassistent

Auf veränderte Witterungsbedingungen, Außentemperaturen unter +3 Grad, Regen Wind, wird im Innenraum temporär durch ein Lichtsignal aufmerksam gemacht.



Check Control

Virtuelles „Scanlicht“ durchs Fahrzeug zur Visualisierung Fahrzeugstatus, Luftdruck, Airbags, Ölstand, Kühlwasser, Wischwasser, etc. werden gecheckt.



Müdigkeitsassistent

Sensorik im Fahrzeug registriert Müdigkeit des Fahrers und steuert mit belebender Lichtstimmung gegen.



Psychologisches Licht

Sensorik im Fahrzeug registriert Gemütszustand (Anspannung, Stress, etc.) des Fahrers und steuert mit entsprechender Lichtstimmung gegen.



Navigation

Anweisungen zu bspw. Abbiegevorgängen werden im Interieurlicht räumlich abgebildet.



Aufmerksamkeitsblitz

Das ambiente Licht weist auf potentielle Gefahrenquellen wie Stau, Wildwechsel, Hindernisse hin.



Crash Spotlight

Durch die Lichtumfänge im Fahrzeug wird nach außen hin auf ein verunfalltes Fahrzeug aufmerksam gemacht und Unfallhelfern die Orientierung ermöglicht.



Einsteigen

Bei Türöffnung geht von der jeweiligen Tür ein zonenabhängiger Lichtfluss aus.



Park Distance Control

Unterstützung der Park Distance Control (Einparkassistent) durch Anzeige im Raum.



Welcome-Szenario

Lichtchoreographie bei der der Kunde vom Fahrzeug begrüßt wird.



Aufenthalt

Das Interieurlicht erzeugt eine Aura um den jeweiligen Insassen.



Connectivity

Ein Lichtimpuls gibt sichtbares Feedback über erfolgtes Pairing einer Hardwarekomponente mit dem Fahrzeug.



Goodbye-Szenario

Lichtchoreographie bei der der Kunde vom Fahrzeug verabschiedet wird.



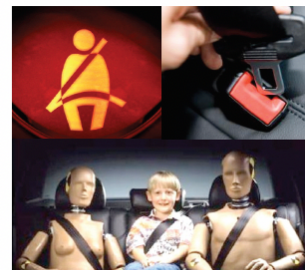
Seitenlinien Gefühl (Side Distance Control)

Bei seitlicher Annäherung eines Objektes oder beim Durchfahren einer Engstelle wird der Abstand durch ein Lichtsignal im Innenraum angezeigt.



Kind schnallt sich ab

Im Falle des Lösen der Sitzgurtverriegelung der hinteren Sitzreihe wird der Fahrer durch ein Lichtsignal alarmiert.



Automatisches Einparken

Der Fahrer wird während des automatischen Einparkvorgangs durch Lichtsignale unterstützt.



Tanken

Der Tankvorgang wird durch eine Lichtinszenierung begleitet die den Energiefluss visualisiert. Sie ist sowohl indirekt von außen wahrnehmbar als auch für Insassen, die im Fahrzeug sitzen geblieben sind.



Taschenlampe

Situative Ausleuchtung des Greifraums des Insassen.



Assistent "Blind Spot"

Bei Spurwechsel, Abbiegevorgängen oder vor Türöffnung am Straßenrand (Radfahrer) werden Objekte im toten Winkel bereits im peripheren Sichtfeld durch ein Lichtsignal im Innenraum angezeigt und können so früher und intuitiver wahrgenommen werden als mit bisherigen Systemen.



Umweltadaptives Licht

Adaption der Umgebunglichtfarbe in die ambiente Beleuchtung



Diebstahlwarnung

Das Fahrzeug signalisiert über die ambiente Beleuchtung wenn ein Einbruch- oder Diebstahlversuch erfolgt.



Licht Moods

Festgelegte Lichtensembles sind sog. Moods zugeordnet die sich in ihrer Raumwirkung unterscheiden Räume / Zonen betont werden.



Incoming Call

Ein eingehender Anruf wird über eine Lichtinszenierung gekennzeichnet.



Kinofeeling

Wird ein Film gestartet, erzeugt die Lichtinszenierung ein Kinofeeling im Fahrzeug.



Motorstart

Der Start des Motors wird durch Lichtimpulse visualisiert.



Fahrerlebnis-Schalter

Die Einstellung unterschiedlicher Fahrmodi (Eco, Comfort und Sport) über den Fahrerlebnis-Schalter wird durch ein Lichtensemble zusätzlich inszeniert.



Hochautomatisiertes Fahren (HAF)

Das Licht im Innenraum visualisiert die Aktivierung des HAF-Modus und dass das Auto ab dem jetzigen Zeitpunkt autonom fährt.



Kinofeeling

Wird ein Film gestartet, erzeugt die Lichtinszenierung ein Kinofeeling im Fahrzeug.



Motorstart

Der Start des Motors wird durch Lichtimpulse visualisiert.



Fahrerlebnis-Schalter

Die Einstellung unterschiedlicher Fahrmodi (Eco, Comfort und Sport) über den Fahrerlebnis-Schalter wird durch ein Lichtensemble zusätzlich inszeniert.



Hochautomatisiertes Fahren (HAF)

Das Licht im Innenraum visualisiert die Aktivierung des HAF-Modus und dass das Auto ab dem jetzigen Zeitpunkt autonom fährt.



Anhang 2 Versuchsleitfaden Experteninter- views

Einleitung

In diesem Test geht es darum, sich für bestimmte Use Cases einen Lichteffekt zu überlegen. Dabei kommt es weniger auf die technischen Möglichkeiten an, sondern es geht darum, wie du als Nutzer glaubst, wie ein Effekt gestaltet sein soll.

Erhebung demographische Daten

ID _____

Geschlecht männlich weiblich

Alter 21-30 31-40 41-50 über 50

Nationalität _____

Studium Ausbildung _____

Beschreibung Tätigkeit _____

Erfahrung mit dynamischen Innenlicht Keine Viel

TASK: Einverständniserklärung unterschreiben lassen

Erklärung des Ablaufs:

Ich werde dir mehrere kleine Szenarien vorlesen, die eine bestimmte Situation im Fahrzeug beschreiben. Im Anschluss daran werde ich dich bitten, mir zu erzählen, wie du dir eine entsprechende Reaktion des Lichts zur Unterstützung der Situation vorstellst.

Ausgangszustand aller Use Cases ist die ambiente Farbe „Orange“ im Fahrzeug.

In dieser Studie gibt es kein richtig und kein falsch. Du darfst mir immer frei und ohne Einschränkungen erzählen, wie der Effekt aussehen soll. Sobald du

fertig erzählt hast, werde ich dir unter Umständen noch einige Nachfragen stellen, die allerdings nur meinem eigenen Verständnis dienen.

Der Test wird insgesamt ca. 1 Stunde dauern und es werden dir mehrere Szenarien vorgelesen, zu welchen du dir einen Effekt überlegen sollst.

Testbeginn

TASK: Erneute Erinnerung für die folgenden Überlegungen, wie die Lichtanzeige aussehen könnte: Der Ausgangszustand für jeden Use Case ist Orange!

Instruktion 1.A

Du hast dir für eine lange Dienstreise ein Auto gemietet und möchtest während der Fahrt auf die Freisprechfunktion zugreifen können. Deswegen verbindest du dein Handy vor Fahrtbeginn mit dem Fahrzeug. Das Licht visualisiert den Vorgang. Wie?

Eingang: Wie erscheint der Effekt?

Wann:

Rampe:

Farbe:

Geschwindigkeit: Langsam schnell

Richtung: vorne ----- hinten rechts ----- links

Art: Fläche Punkt

Bereich: Front Fond Türen

Dauer: Wie bleibt der Effekt bestehen?

Farbe:

Geschwindigkeit: Langsam schnell

Richtung: vorne ----- hinten rechts ----- links

Art: Fläche Punkt

Dynamik/Bewegung: Blinken Pulsieren Wabbeln Auftau-
chend & Stehenbleibend

Bereich: Front Fond Türen

Ausgang: Wie verschwindet der Effekt?

Wann:

Rampe:

Farbe:

Geschwindigkeit: Langsam schnell

Richtung: vorne ----- hinten rechts ----- links

Art: Fläche Punkt

Bereich: Front Fond Türen

Der Fragebogen wurde für alle folgenden Instruktionen ausgefüllt:

Instruktion 1.B: WORST CASE: Ausgangszustand = vorherige Effektfarbe

Du hast dir für eine lange Dienstreise ein Auto gemietet und möchtest während der Fahrt auf die Freisprechfunktion zugreifen können. Deswegen verbindest du dein Handy vor Fahrtbeginn mit dem Fahrzeug. Das Licht visualisiert den Vorgang. Wie?

Instruktion 2.A

Während du auf der Autobahn fährst, wirst du angerufen. Der eingehende Anruf wird vom Licht signalisiert. Wie erwartest du die Anzeige?

Instruktion 2.B: WORST CASE: Ausgangszustand = vorherige Effektfarbe

Während du auf der Autobahn fährst, wirst du angerufen. Der eingehende Anruf wird vom Licht signalisiert. Wie erwartest du die Anzeige?

Instruktion 3.A

Du hast auf der Autobahn den Fahrspurassistenten aktiviert. Das Licht signalisiert dir, wenn du Gefahr läufst, die Fahrspur zu verlassen. Wie stellst du dir den entsprechenden Lichthinweis vor?

Instruktion 3.B: WORST CASE: Ausgangszustand = vorherige Effektfarbe

Du hast auf der Autobahn den Fahrspurassistenten aktiviert. Das Licht signalisiert dir, wenn du Gefahr läufst, die Fahrspur zu verlassen. Wie stellst du dir den entsprechenden Lichthinweis vor?

Instruktion 4.A

Du bist nun eine längere Strecke auf der Autobahn mit deinem Fahrzeug im HAF-Modus gefahren, das heißt dein Fahrzeug ist selbstständig gefahren. Du wirst aber die Autobahn bei der nächsten Ausfahrt verlassen und die HAF geeignete Strecke ende somit. Dein Fahrzeug informiert dich daher, dass du selbst wieder ans Steuer greifen und eigenständig fahren muss. Wie signalisiert dir das Licht diese Aufforderung?

Instruktion 4.B: WORST CASE: Ausgangszustand = vorherige Effektfarbe

Du bist nun eine längere Strecke auf der Autobahn mit deinem Fahrzeug im HAF-Modus gefahren, das heißt dein Fahrzeug ist selbstständig gefahren. Du wirst aber die Autobahn bei der nächsten Ausfahrt verlassen und die HAF geeignete Strecke ende somit. Dein Fahrzeug informiert dich daher, dass du selbst wieder ans Steuer greifen und eigenständig fahren muss. Wie signalisiert dir das Licht diese Aufforderung?

Übergeordnete Fragen zu Assoziationen mit den Kategorien:

- Information
- Wie soll in deinen Augen eine Lichtanzeige aus einer Kategorie namens „Information“ dargestellt werden? Was für eine Lichtanzeige assoziiert du mit einer Kategorie namens „Information“?

Sicherheit

Wie soll in deinen Augen eine Lichtanzeige aus einer Kategorie namens „Sicherheit“ dargestellt werden? Welche Lichteigenschaften assoziiert du mit „Sicherheit“?

Verabschiedung

Vielen Dank für deine Teilnahme am Test. Deine Ideen und Ergebnisse helfen mir sehr bei meiner Doktorarbeit weiter!

TASK: Audio-Aufzeichnung beenden und entsprechend speichern

TASK: Testdokumente auf ID-Eintragung überprüfen

TASK: Überprüfen, ob alle demographische Daten erfasst

Anhang 3 SPSS Auswertung Kategorisierung

Farbe x Kategorisierung

Farbe * Kategorisierung Kreuztabelle						
Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Farbe	Weiß	114	170	55	64	403
	Gelb	95	183	106	43	427
	Rot	35	58	317	19	429
	Blau	129	203	62	33	427
	Grün	106	202	78	40	426
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests			
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	556,038 ^a	12	,000
Likelihood-Quotient	520,740	12	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	5,953	1	,015
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 37,97.

Symmetrische Maße			
		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,513	,000
	Cramer-V	,296	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Bewegungsart x Kategorisierung

Bewegungsart * Kategorisierung Kreuztabelle						
Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Bewegungsart	Erscheinen	128	101	84	41	354
	Blinken	11	129	193	25	358
	Pulsen	132	96	61	36	325
	Impulse nach Vorne	71	155	98	33	357
	Impulse nach Hinten	83	173	75	28	359
	Auffüllen nach Vorne	54	162	107	36	359
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests			
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	282,488 ^a	15	,000
Likelihood-Quotient	295,152	15	,000
Zusammenhang linear mit linear	,078	1	,780
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 30,62.

Symmetrische Maße			
	Wert	Näherungsweise Signifikanz	
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,366	,000
	Cramer-V	,211	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

Anzeigeort x Kategorisierung

Anzeigeort * Kategorisierung Kreuztabelle						
Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Anzeigeort	I-Tafel	162	279	182	70	693
	Türen	150	248	237	70	705
	I-Tafel + Türen	167	289	199	59	714
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests			
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	12,921 ^a	6	,044
Likelihood-Quotient	12,890	6	,045
Zusammenhang linear mit-linear	,201	1	,654
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 65,30.

Symmetrische Maße			
		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,078	,044
	Cramer-V	,055	,044
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Anhang 4 SPSS Auswertung Reaktionszeit

Kruskal-Wallis-Test Reaktionszeit x Farbe

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Reaktionszeit ist über die Kategorien von Farbe identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,000	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanz werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Reaktionszeit über Farbe

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2073
Teststatistik	35,957 ^a
Freiheitsgrad	4
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Reaktionszeit x Farbe

Paarweise Vergleiche von Farbe					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Blau-Rot	108,345	41,232	2,628	,009	,086
Blau-Gelb	130,251	41,158	3,165	,002	,016
Blau-Grün	-161,314	41,331	-3,903	,000	,001
Blau-Weiss	244,734	41,992	5,828	,000	,000
Rot-Gelb	21,906	41,232	,531	,595	1,000
Rot-Grün	-52,969	41,404	-1,279	,201	1,000
Rot-Weiss	136,389	42,064	3,242	,001	,012
Gelb-Grün	-31,063	41,331	-,752	,452	1,000
Gelb-Weiss	114,484	41,992	2,726	,006	,064
Grün-Weiss	83,420	42,161	1,979	,048	,479

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanz (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Reaktionszeit x Bewegungsart

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Reaktionszeit ist über die Kategorien von Bewegungsart identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,000	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanz werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Reaktionszeit über Bewegungsart

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2073
Teststatistik	815,124 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Reaktionszeit x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Blinken-Erscheinen	47,619	44,993	1,058	,290	1,000
Blinken-Impulse nach Hinten	-644,969	44,802	-14,396	,000	,000
Blinken-Impulse nach Vorne	-681,417	44,865	-15,188	,000	,000
Blinken-Auffüllen nach Vorne	-702,451	44,739	-15,701	,000	,000
Blinken-Pulsen	-1075,191	47,141	-22,808	,000	,000
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-597,350	44,993	-13,277	,000	,000
Erscheinen-Impulse nach Vorne	-633,798	45,055	-14,067	,000	,000
Erscheinen-Auffüllen nach Vorne	-654,832	44,931	-14,574	,000	,000
Erscheinen-Pulsen	-1027,572	47,322	-21,714	,000	,000
Impulse nach Hinten-Impulse nach Vorne	36,448	44,865	,812	,417	1,000
Impulse nach Hinten-Auffüllen nach Vorne	-57,482	44,739	-1,285	,199	1,000
Impulse nach Hinten-Pulsen	430,222	47,141	9,126	,000	,000
Impulse nach Vorne-Auffüllen nach Vorne	-21,034	44,802	-,469	,639	1,000
Impulse nach Vorne-Pulsen	393,774	47,201	8,343	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Pulsen	372,740	47,081	7,917	,000	,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanz (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Reaktionszeit x Anzeigeort

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Reaktionszeit ist über die Kategorien von Anzeigeort identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,086	Nullhypothese beibehalten

Asymptotische Signifikanz werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Reaktionszeit über Anzeigeort

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2073
Teststatistik	4,914 ^{a,b}
Freiheitsgrad	2
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,086

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

b. Mehrfachvergleiche wurden nicht durchgeführt, weil der Gesamtest keine signifikanten Unterschiede zwischen Stichproben aufweist.

Anhang 5 SPSS Auswertung Visuelle Beeinflussung

Kruskal-Wallis-Test visuelle Beeinflussung x Farbe

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Änderungswert CTT ist über die Kategorien von Farbe identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,042	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanz werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Änderungswert CTT über Farbe

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2009
Teststatistik	9,926 ^a
Freiheitsgrad	4
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,042

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test visuelle Beeinflussung x Farbe

Paarweise Vergleiche von Farbe					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Rot-Blau	-2,703	40,466	-,067	,947	1,000
Rot-Grün	-41,029	40,718	-1,008	,314	1,000
Rot-Gelb	69,253	40,417	1,713	,087	,866
Rot-Weiß	109,039	41,484	2,628	,009	,086
Blau-Grün	-38,326	40,718	-,941	,347	1,000
Blau-Gelb	66,550	40,417	1,647	,100	,996
Blau-Weiß	106,336	41,484	2,563	,010	,104
Grün-Gelb	28,224	40,669	,694	,488	1,000
Grün-Weiß	68,010	41,729	1,630	,103	1,000
Gelb-Weiß	39,786	41,436	,960	,337	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test visuelle Beeinflussung x Bewegungsart

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Änderungswert CTT ist über die Kategorien von Bewegungsart identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,044	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Änderungswert CTT über Bewegungsart

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2009
Teststatistik	11,384 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,044

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test visuelle Beeinflussung x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Blinken-Erscheinen	23,950	44,330	,540	,589	1,000
Blinken-Impulse nach Hinten	-69,476	44,264	-1,570	,117	1,000
Blinken-Impulse nach Vorne	-97,086	44,462	-2,184	,029	,435
Blinken-Auffüllen nach Vorne	-98,932	44,297	-2,233	,026	,383
Blinken-Pulsen	-124,233	45,593	-2,725	,006	,096
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-45,525	44,426	-1,025	,305	1,000
Erscheinen-Impulse nach Vorne	-73,136	44,623	-1,639	,101	1,000
Erscheinen-Auffüllen nach Vorne	-74,982	44,458	-1,687	,092	1,000
Erscheinen-Pulsen	-100,283	45,750	-2,192	,028	,426
Impulse nach Hinten-Impulse nach Vorne	27,611	44,558	,620	,535	1,000
Impulse nach Hinten-Auffüllen nach Vorne	-29,457	44,393	-,664	,507	1,000
Impulse nach Hinten-Pulsen	54,758	45,686	1,199	,231	1,000
Impulse nach Vorne-Auffüllen nach Vorne	-1,846	44,591	-,041	,967	1,000
Impulse nach Vorne-Pulsen	27,147	45,878	,592	,554	1,000
Auffüllen nach Vorne-Pulsen	25,301	45,718	,553	,580	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
 Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.
 a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test visuelle Beeinflussung x Anzeigeort

Hypothesentestübersicht				
	Nullhypothese	Test	Sig.	Entscheidung
1	Die Verteilung von Änderungswert CTT ist über die Kategorien von Anzeigeort identisch.	Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben	,030	Nullhypothese ablehnen

Asymptotische Signifikanzen werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,050.

Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben

Änderungswert CTT über Anzeigeort

Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben

Gesamtzahl	2009
Teststatistik	7,011 ^a
Freiheitsgrad	2
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,030

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test visuelle Beeinflussung x Anzeigeort

Paarweise Vergleiche von Anzeigeort					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Türen-I-Tafel	64,319	31,827	2,021	,043	,130
Türen-Beide Bereiche	-78,543	31,542	-2,490	,013	,038
I-Tafel-Beide Bereiche	-14,224	31,746	-,448	,654	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Anhang 6 SPSS Auswertung Subjektives Empfinden

Chi-Quadrat-Tests und Kontingenzkoeffizient nach Pearson für alle Variablen x alle Bewertungskriterien

Farbe * Schönheit							
Kreuztabelle							
Anzahl		Schönheit					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Farbe	Weiß	40	94	91	129	49	403
	Gelb	24	82	109	150	62	427
	Rot	29	94	117	140	49	429
	Blau	19	64	77	171	96	427
	Grün	14	86	84	174	68	426
Gesamt		126	420	478	764	324	2112

Chi-Quadrat-Tests			
	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	67,039 ^a	16	,000
Likelihood-Quotient	65,591	16	,000
Zusammenhang linear mit-linear	27,816	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5. Die minimale erwartete Häufigkeit ist 24,04.

Symmetrische Maße			
		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,175	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Bewegungsart * Schönheit

Kreuztabelle

Anzahl		Schönheit				
		0	1	2	3	4
Bewegungsart	Erscheinen	20	67	96	122	49
	Blinken	38	124	87	95	14
	Pulsen	13	33	75	126	78
	Impulse nach Vorne	19	64	69	149	56
	Impulse nach Hinten	11	57	64	142	85
	Auffüllen nach Vorne	25	75	87	130	42
Gesamt		126	420	478	764	324

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	169,598 ^a	20	,000
Likelihood-Quotient	174,606	20	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	16,315	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 19,39.

Symmetrische Maße

	Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,273 ,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112	

Anzeigeort * Schönheit

Kreuztabelle

Anzahl		Schönheit					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Anzeigeort	Tafel	38	122	132	278	123	693
	Türen	56	168	182	230	69	705
	Alles	32	130	164	256	132	714
Gesamt		126	420	478	764	324	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	49,847 ^a	8	,000
Likelihood-Quotient	51,202	8	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	,030	1	,863
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 41,34.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,152	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Farbe * Ablenkung

Kreuztabelle

Anzahl		Ablenkung					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Farbe	Weiß	89	132	57	93	32	403
	Gelb	70	152	84	94	27	427
	Rot	63	142	80	116	28	429
	Blau	76	153	75	96	27	427
	Grün	75	139	85	110	17	426
Gesamt		373	718	381	509	131	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	22,187 ^a	16	,137
Likelihood-Quotient	22,511	16	,127
Zusammenhang linear-mit-linear	,068	1	,795
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 25,00.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,102	,137
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Bewegungsart * Ablenkung

Kreuztabelle

Anzahl		Ablenkung					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Bewegungsart	Erscheinen	111	119	45	61	18	354
	Blinken	29	96	78	127	28	358
	Pulsen	92	108	52	53	20	325
	Impulse nach Vorne	47	136	70	88	16	357
	Impulse nach Hinten	55	134	71	78	21	359
	Auffüllen nach Vorne	39	125	65	102	28	359
Gesamt		373	718	381	509	131	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	153,745 ^a	20	,000
Likelihood-Quotient	150,097	20	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	11,657	1	,001
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 20,16.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,260	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Anzeigeort * Ablenkung

Kreuztabelle

Anzahl		Ablenkung					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Anzeigeort	ITafel	143	244	112	159	35	693
	Türen	120	240	137	171	37	705
	Alles	110	234	132	179	59	714
Gesamt		373	718	381	509	131	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	16,573 ^a	8	,035
Likelihood-Quotient	16,215	8	,039
Zusammenhang linear-mit-linear	11,329	1	,001
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 42,98.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,088	,035
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Farbe * Hektik

Kreuztabelle

Anzahl		Hektik					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Farbe	Weiß	116	130	47	87	23	403
	Gelb	111	151	57	83	25	427
	Rot	101	157	66	84	21	429
	Blau	118	147	49	88	25	427
	Grün	131	139	54	87	15	426
Gesamt		577	724	273	429	109	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	13,526 ^a	16	,634
Likelihood-Quotient	13,729	16	,619
Zusammenhang linear-mit-linear	1,239	1	,266
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 20,80.

Symmetrische Maße

	Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,080
Anzahl der gültigen Fälle	2112	,634

Bewegungsart * Hektik

Kreuztabelle

Anzahl		Hektik					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Bewegungsart	Erscheinen	193	104	30	21	6	354
	Blinken	33	73	50	134	68	358
	Pulsen	160	109	29	25	2	325
	Impulse nach Vorne	65	148	59	74	11	357
	Impulse nach Hinten	74	146	47	84	8	359
	Auffüllen nach Vorne	52	144	58	91	14	359
Gesamt		577	724	273	429	109	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	569,879 ^a	20	,000
Likelihood-Quotient	532,023	20	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	22,417	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 16,77.

Symmetrische Maße

	Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,461
Anzahl der gültigen Fälle	2112	,000

Anzeigeort * Hektik

Kreuztabelle

Anzahl		Hektik					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Anzeigeort	ITafel	194	239	98	134	28	693
	Türen	173	241	99	157	35	705
	Alles	210	244	76	138	46	714
Gesamt		577	724	273	429	109	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	13,622 ^a	8	,092
Likelihood-Quotient	13,748	8	,089
Zusammenhang linear-mit-linear	,110	1	,741
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 35,77.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,080	,092
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Farbe * Angenehm

Kreuztabelle

Anzahl		Angenehm					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Farbe	Weiß	41	75	80	125	82	403
	Gelb	24	81	84	161	77	427
	Rot	36	100	79	149	65	429
	Blau	23	77	63	163	101	427
	Grün	22	77	70	176	81	426
Gesamt		146	410	376	774	406	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	36,310 ^a	16	,003
Likelihood-Quotient	35,796	16	,003
Zusammenhang linear-mit-linear	7,162	1	,007
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 27,86.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,130	,003
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Bewegungsart * Angenehm

Kreuztabelle

Anzahl		Angenehm					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Bewegungsart	Erscheinen	14	70	59	133	78	354
	Blinken	62	122	75	76	23	358
	Pulsen	10	30	42	134	109	325
	Impulse nach Vorne	21	54	61	160	61	357
	Impulse nach Hinten	12	57	55	151	84	359
	Auffüllen nach Vorne	27	77	84	120	51	359
Gesamt		146	410	376	774	406	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	263,554 ^a	20	,000
Likelihood-Quotient	256,388	20	,000
Zusammenhang linear mit-linear	5,540	1	,019
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 22,47.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,333	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Anzeigeort * Angenehm

Kreuztabelle

Anzahl		Angenehm					Gesamt
		0	1	2	3	4	
Anzeigeort	ITafel	41	119	115	272	146	693
	Türen	62	156	127	251	109	705
	Alles	43	135	134	251	151	714
Gesamt		146	410	376	774	406	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	20,666 ^a	8	,008
Likelihood-Quotient	20,705	8	,008
Zusammenhang linear mit-linear	,786	1	,375
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 47,91.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Kontingenzkoeffizient	,098	,008
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Kruskal-Wallis-Test Kriterium schön x Farbe

Schönheit über Farbe	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	49,822 ^a
Freiheitsgrad	4
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium schön x Farbe

Paarweise Vergleiche von Farbe					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Weiß-Rot	-24,494	40,783	-,601	,548	1,000
Weiß-Gelb	-96,461	40,830	-2,363	,018	,182
Weiß-Grün	-161,200	40,853	-3,946	,000	,001
Weiß-Blau	-247,148	40,830	-6,053	,000	,000
Rot-Gelb	71,967	40,188	1,791	,073	,733
Rot-Grün	-136,706	40,212	-3,400	,001	,007
Rot-Blau	-222,654	40,188	-5,540	,000	,000
Gelb-Grün	-64,738	40,259	-1,608	,108	1,000
Gelb-Blau	-150,686	40,235	-3,745	,000	,002
Grün-Blau	85,948	40,259	2,135	,033	,328

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium angenehm x Farbe

Angenehm über Farbe	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	19,621 ^a
Freiheitsgrad	4
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,001

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium angenehm x Farbe

Paarweise Vergleiche von Farbe					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Rot-Weiß	45,685	40,805	1,120	,263	1,000
Rot-Gelb	86,313	40,210	2,147	,032	,318
Rot-Grün	-125,077	40,233	-3,109	,002	,019
Rot-Blau	-159,739	40,210	-3,973	,000	,001
Weiß-Gelb	-40,628	40,852	-,995	,320	1,000
Weiß-Grün	-79,392	40,875	-1,942	,052	,521
Weiß-Blau	-114,054	40,852	-2,792	,005	,052
Gelb-Grün	-38,764	40,280	-,962	,336	1,000
Gelb-Blau	-73,426	40,257	-1,824	,068	,682
Grün-Blau	34,662	40,280	,861	,390	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium schön x Bewegungsart

Schönheit über Bewegungsart	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	149,473 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium schön x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Blinken-Auffüllen nach Vorne	-238,896	43,911	-5,440	,000	,000
Blinken-Erscheinen	271,310	44,066	6,157	,000	,000
Blinken-Impulse nach Vorne	-344,818	43,972	-7,842	,000	,000
Blinken-Impulse nach Hinten	-449,863	43,911	-10,245	,000	,000
Blinken-Pulsen	-467,693	45,043	-10,383	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Erscheinen	32,414	44,035	,736	,462	1,000
Auffüllen nach Vorne-Impulse nach Vorne	105,922	43,942	2,411	,016	,239
Auffüllen nach Vorne-Impulse nach Hinten	210,967	43,880	4,808	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Pulsen	228,797	45,013	5,083	,000	,000
Erscheinen-Impulse nach Vorne	-73,508	44,096	-1,667	,096	1,000
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-178,553	44,035	-4,055	,000	,001
Erscheinen-Pulsen	-196,383	45,164	-4,348	,000	,000
Impulse nach Vorne-Impulse nach Hinten	-105,045	43,942	-2,391	,017	,252
Impulse nach Vorne-Pulsen	122,875	45,073	2,726	,006	,096
Impulse nach Hinten-Pulsen	17,830	45,013	,396	,692	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.
a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium ablenkend x Bewegungsart

Ablenkung über Bewegungsart	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	110,973 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium ablenkend x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Erscheinen-Pulsen	-39,561	45,303	-,873	,383	1,000
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-181,058	44,170	-4,099	,000	,001
Erscheinen-Impulse nach Vorne	-202,972	44,232	-4,589	,000	,000
Erscheinen-Auffüllen nach Vorne	-288,302	44,170	-6,527	,000	,000
Erscheinen-Blinken	-394,130	44,201	-8,917	,000	,000
Pulsen-Impulse nach Hinten	-141,497	45,152	-3,134	,002	,026
Pulsen-Impulse nach Vorne	-163,411	45,212	-3,614	,000	,005
Pulsen-Auffüllen nach Vorne	-248,741	45,152	-5,509	,000	,000
Pulsen-Blinken	354,569	45,182	7,848	,000	,000
Impulse nach Hinten-Impulse nach Vorne	21,914	44,077	,497	,619	1,000
Impulse nach Hinten-Auffüllen nach Vorne	-107,244	44,015	-2,437	,015	,222
Impulse nach Hinten-Blinken	213,071	44,046	4,837	,000	,000
Impulse nach Vorne-Auffüllen nach Vorne	-85,330	44,077	-1,936	,053	,793
Impulse nach Vorne-Blinken	191,158	44,107	4,334	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Blinken	105,828	44,046	2,403	,016	,244

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanz (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium hektisch x Bewegungsart

Hektik über Bewegungsart	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	437,137 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium hektisch x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Erscheinen-Pulsen	-39,518	45,146	-,875	,381	1,000
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-397,924	44,018	-9,040	,000	,000
Erscheinen-Impulse nach Vorne	-417,551	44,079	-9,473	,000	,000
Erscheinen-Auffüllen nach Vorne	-488,320	44,018	-11,094	,000	,000
Erscheinen-Blinken	-783,136	44,048	-17,779	,000	,000
Pulsen-Impulse nach Hinten	-358,406	44,996	-7,965	,000	,000
Pulsen-Impulse nach Vorne	-378,033	45,055	-8,390	,000	,000
Pulsen-Auffüllen nach Vorne	-448,801	44,996	-9,974	,000	,000
Pulsen-Blinken	743,618	45,025	16,515	,000	,000
Impulse nach Hinten-Impulse nach Vorne	19,627	43,924	,447	,655	1,000
Impulse nach Hinten-Auffüllen nach Vorne	-90,396	43,863	-2,061	,039	,590
Impulse nach Hinten-Blinken	385,212	43,894	8,776	,000	,000
Impulse nach Vorne-Auffüllen nach Vorne	-70,769	43,924	-1,611	,107	1,000
Impulse nach Vorne-Blinken	365,585	43,955	8,317	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Blinken	294,816	43,894	6,717	,000	,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.
a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium angenehm x Bewegungsart

Angenehm über Bewegungsart	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	228,977 ^a
Freiheitsgrad	5
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000
a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.	

Post-hoc-Test Kriterium angenehm x Bewegungsart

Paarweise Vergleiche von Bewegungsart					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Blinken-Auffüllen nach Vorne	-276,165	43,935	-6,286	,000	,000
Blinken-Impulse nach Vorne	-411,069	43,996	-9,343	,000	,000
Blinken-Erscheinen	421,698	44,089	9,565	,000	,000
Blinken-Impulse nach Hinten	-482,836	43,935	-10,990	,000	,000
Blinken-Pulsen	-624,098	45,068	-13,848	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Impulse nach Vorne	134,904	43,966	3,068	,002	,032
Auffüllen nach Vorne-Erscheinen	145,533	44,059	3,303	,001	,014
Auffüllen nach Vorne-Impulse nach Hinten	206,671	43,904	4,707	,000	,000
Auffüllen nach Vorne-Pulsen	347,933	45,038	7,725	,000	,000
Impulse nach Vorne-Erscheinen	10,629	44,120	,241	,810	1,000
Impulse nach Vorne-Impulse nach Hinten	-71,767	43,966	-1,632	,103	1,000
Impulse nach Vorne-Pulsen	213,028	45,098	4,724	,000	,000
Erscheinen-Impulse nach Hinten	-61,138	44,059	-1,388	,165	1,000
Erscheinen-Pulsen	-202,400	45,189	-4,479	,000	,000
Impulse nach Hinten-Pulsen	141,261	45,038	3,137	,002	,026
Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind. Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.					
a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.					

Kruskal-Wallis-Test Kriterium schön x Anzeigeort

Schönheit über Anzeigeort	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	43,342 ^a
Freiheitsgrad	2
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000

a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.

Post-hoc-Test Kriterium schön x Anzeigeort

Paarweise Vergleiche von Anzeigeort					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Türen-Alles	-171,653	31,214	-5,499	,000	,000
Türen-ITafel	184,986	31,448	5,882	,000	,000
Alles-ITafel	13,332	31,350	,425	,671	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Kruskal-Wallis-Test Kriterium ablenkend x Anzeigeort

Ablenkung über Anzeigeort	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	11,082 ^a
Freiheitsgrad	2
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,004
a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.	

Post-hoc-Test Kriterium ablenkend x Anzeigeort

Paarweise Vergleiche von Anzeigeort					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
ITafel-Türen	-53,329	31,545	-1,691	,091	,273
ITafel-Alles	-104,681	31,446	-3,329	,001	,003
Türen-Alles	-51,352	31,310	-1,640	,101	,303
Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind. Asymptotische Signifikanz (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.					
a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.					

Kruskal-Wallis-Test Kriterium angenehm x Anzeigeort

Angenehm über Anzeigeort	
Zusammenfassung des Kruskal-Wallis-Tests bei unabhängigen Stichproben	
Gesamtzahl	2112
Teststatistik	17,283 ^a
Freiheitsgrad	2
Asymptotische Sig. (zweiseitiger Test)	,000
a. Die Teststatistik wird für Bindungen angepasst.	

Post-hoc-Test Kriterium angenehm x Anzeigeort

Paarweise Vergleiche von Anzeigeort					
Sample 1-Sample 2	Teststatistik	Std.-Fehler	Standardteststatistik	Sig.	Korr. Sig. ^a
Türen-Alles	-94,933	31,231	-3,040	,002	,007
Türen-ITafel	125,077	31,465	3,975	,000	,000
Alles-ITafel	30,144	31,367	,961	,337	1,000

Jede Zeile prüft die Nullhypothese, dass die Verteilungen in Stichprobe 1 und Stichprobe 2 gleich sind.
Asymptotische Signifikanzen (zweiseitige Tests) werden angezeigt. Das Signifikanzniveau ist ,05.

a. Signifikanzwerte werden von der Bonferroni-Korrektur für mehrere Tests angepasst.

Anhang 7 SPSS Auswertung Korrelationen

Reaktionszeit x Kategorisierung

Univariate Varianzanalyse			
Zwischensubjektfaktoren			
	Wertelabel	N	
Kategorisierung	0	Komfort	464
	1	Information	806
	2	Sicherheit	613
	3	Keine Zuordnung	190

Tests der Zwischensubjekteffekte						
Abhängige Variable: Reaktionszeit						
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.	Partielles Eta-Quadrat
Korrigiertes Modell	42223542,0 ^a	3	14074513,99	14,455	,000	,021
Konstanter Term	3250234928	1	3250234928	3338,080	,000	,617
Kategorisierung	42223541,98	3	14074513,99	14,455	,000	,021
Fehler	2014551921	2069	973683,867			
Gesamt	6140060119	2073				
Korrigierte Gesamtvariation	2056775463	2072				

a. R-Quadrat = ,021 (korrigiertes R-Quadrat = ,019)

Reaktionszeit x subjektives Empfinden

			Korrelationen			
			Schön	Ablenkend	Hektisch	Angenehm
Spearman-Rho	Schön	Korrelationskoeffizient	1,000	-,347**	-,438**	,754**
		Sig. (2-seitig)	.	,000	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Ablenkend	Korrelationskoeffizient	-,347**	1,000	,474**	-,472**
		Sig. (2-seitig)	,000	.	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Hektisch	Korrelationskoeffizient	-,438**	,474**	1,000	-,563**
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	.	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Angenehm	Korrelationskoeffizient	,754**	-,472**	-,563**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	,000	.
		N	2112	2112	2112	2112
Reaktionszeit	Korrelationskoeffizient	,110**	-,017	-,106**	,142**	
	Sig. (2-seitig)	,000	,450	,000	,000	
	N	2073	2073	2073	2073	

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Visuelle Beeinflussung x subjektives Empfinden

			Korrelationen			
			Schön	Ablenkend	Hektisch	Angenehm
Spearman-Rho	Schön	Korrelationskoeffizient	1,000	-,347**	-,438**	,754**
		Sig. (2-seitig)	.	,000	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Ablenkend	Korrelationskoeffizient	-,347**	1,000	,474**	-,472**
		Sig. (2-seitig)	,000	.	,000	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Hektisch	Korrelationskoeffizient	-,438**	,474**	1,000	-,563**
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	.	,000
		N	2112	2112	2112	2112
	Angenehm	Korrelationskoeffizient	,754**	-,472**	-,563**	1,000
		Sig. (2-seitig)	,000	,000	,000	.
		N	2112	2112	2112	2112
CTT Änderungswert	Korrelationskoeffizient	-,044	,148**	,001	-,044	
	Sig. (2-seitig)	,050	,000	,963	,051	
	N	2009	2009	2009	2009	

** Die Korrelation ist auf dem 0,01 Niveau signifikant (zweiseitig).

Subjektives Empfinden x Kategorisierung

Schön * Kategorisierung

Kreuztabelle

Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Schön	0	12	36	40	38	126
	1	45	148	150	77	420
	2	81	178	174	45	478
	3	214	323	197	30	764
	4	127	131	57	9	324
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	264,670 ^a	12	,000
Likelihood-Quotient	252,577	12	,000
Zusammenhang linear mit-linear	226,225	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 11,87.

Symmetrische Maße

	Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,354
	Cramer-V	,204
Anzahl der gültigen Fälle	2112	

Ablenkend * Kategorisierung

Kreuztabelle

Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Ablenkend	0	142	135	70	26	373
	1	198	286	189	45	718
	2	68	162	107	44	381
	3	55	190	198	66	509
	4	16	43	54	18	131
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	152,210 ^a	12	,000
Likelihood-Quotient	154,339	12	,000
Zusammenhang linear-mit-linear	124,182	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 12,34.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,268	,000
	Cramer-V	,155	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Hektisch * Kategorisierung

Kreuztabelle

Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Hektisch	0	241	185	105	46	577
	1	145	327	193	59	724
	2	39	101	102	31	273
	3	49	166	163	51	429
	4	5	37	55	12	109
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	224,916 ^a	12	,000
Likelihood-Quotient	220,011	12	,000
Zusammenhang linear mit-linear	135,625	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 10,27.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,326	,000
	Cramer-V	,188	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	

Angenehm * Kategorisierung

Kreuztabelle

Anzahl		Kategorisierung				Gesamt
		Komfort	Information	Sicherheit	Keine	
Angenehm	0	11	38	59	38	146
	1	39	138	169	64	410
	2	54	154	124	44	376
	3	214	327	194	39	774
	4	161	159	72	14	406
Gesamt		479	816	618	199	2112

Chi-Quadrat-Tests

	Wert	df	Asymptotische Signifikanz (zweiseitig)
Chi-Quadrat nach Pearson	273,127 ^a	12	,000
Likelihood-Quotient	271,281	12	,000
Zusammenhang linear mit-linear	251,209	1	,000
Anzahl der gültigen Fälle	2112		

a. 0 Zellen (0,0%) haben eine erwartete Häufigkeit kleiner 5.
Die minimale erwartete Häufigkeit ist 13,76.

Symmetrische Maße

		Wert	Näherungsweise Signifikanz
Nominal- bzgl. Nominalmaß	Phi	,360	,000
	Cramer-V	,208	,000
Anzahl der gültigen Fälle		2112	