

---

# Flimmereffekte von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung

Dem Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von

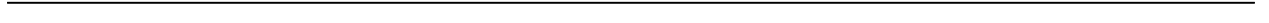
Dipl.-Ing. Dmitrij Polin  
Geboren am 10.08.1982  
in Kamensk, Russland

Referent: Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh  
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann

Tag der Einreichung: 13.04.2015  
Tag der mündlichen Prüfung: 01.07.2015

D17  
Darmstadt 2015

---



---

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt.

Ich möchte mich im Folgenden bei all jenen Menschen bedanken, die mich während meiner Arbeit und vor allem in der Vollendung meiner Dissertation unterstützt haben. Einen besonderen Dank richte ich an meinen Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Tran Quoc Khanh, der mir die Bearbeitung dieses hochinteressanten Themas ermöglichte und mich mit seinen fachlichen Hinweisen und Ratschlägen unterstützte.

Mein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Cornelius Neumann für sein Interesse an der Arbeit, der Annahme des Korreferats und der damit verbundenen Investition seiner Zeit.

Ein herzlicher Dank gebührt meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung, insbesondere Nils Haferkemper, Christoph Schiller und Max Wagner.

Dankbar bin ich den Studenten, die zu dem Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben: Kyriakos Kosmas, Stefan Klir, Alexander Herzog, Carsten Bruns, Lennart Schnarr und Rick Nitsche. Nicht zuletzt möchte ich mich bei allen Versuchsteilnehmern bedanken.

Meiner Frau, meinen Kindern und meinen Eltern danke ich von ganzem Herzen für ihre unermüdliche Unterstützung, ihre Liebe und Aufmunterung. Ohne ihren Rückhalt wäre diese Arbeit für mich nicht zu leisten gewesen.

---

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>V</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>VI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1 Relevanz der Arbeit .....	2
1.2 Problemstellung .....	3
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	4
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
2.1 Das visuelle System .....	5
2.1.1 Das menschliche Auge .....	5
2.1.2 Spektrale Empfindlichkeit .....	6
2.1.3 Photorezeptoren .....	6
2.1.4 Netzhaut .....	8
2.1.5 Augenbewegung .....	9
2.2 Helligkeitssteuerung bei LEDs .....	10
2.2.1 Konstantstromregelung (CCR) .....	10
2.2.2 Pulsweitenmodulation (PWM) .....	10
2.3 Visuelle Effekte bei intermittierendem Licht .....	12
2.3.1 Direkt wahrnehmbares Flimmern .....	12
2.3.2 Stroboskopische Effekte .....	13
<b>3 Stand der Forschung</b> .....	<b>17</b>
3.1 Physiologische Studien .....	17
3.2 Lichttechnische Studien .....	22
3.2.1 Studien über Leuchtstofflampen .....	22
3.2.2 Studien über PWM-gedimmte LED-Leuchten .....	23
3.3 Zusammenfassung .....	25
<b>4 Methode zur Reduzierung von Flimmereffekten</b> .....	<b>27</b>
<b>5 Laboruntersuchungen</b> .....	<b>29</b>
5.1 Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) .....	29
5.1.1 Ziele der Untersuchung .....	30
5.1.2 Versuchsaufbau .....	30
5.1.3 Methodik .....	31
5.1.4 Ergebnisse .....	34
5.1.5 Diskussion der Ergebnisse .....	35
5.2 Perlschnureffekt bei schnellen Augenbewegungen .....	36
5.2.1 Ziel der Untersuchung .....	36

5.2.2	Versuchsaufbau .....	36
5.2.3	Methodik.....	37
5.2.4	Ergebnisse.....	38
5.2.5	Diskussion der Ergebnisse .....	40
5.3	Perlschnureffekt beim Seitenblick an einer Kreuzung.....	41
5.3.1	Ziele der Untersuchung .....	42
5.3.2	Versuchsaufbau .....	42
5.3.3	Methodik.....	45
5.3.4	Ergebnisse.....	47
5.3.5	Diskussion der Ergebnisse .....	52
5.4	Perlschnureffekt beim Betrachten von Verkehrsschildern.....	53
5.4.1	Ziele der Untersuchung .....	53
5.4.2	Versuchsaufbau .....	53
5.4.3	Methodik.....	55
5.4.4	Ergebnisse.....	57
5.4.5	Diskussion der Ergebnisse .....	70
5.5	Fazit.....	71
<b>6</b>	<b>Perlschnureffekt in der Kraftfahrzeugbeleuchtung.....</b>	<b>74</b>
6.1	Vorversuche .....	74
6.1.1	Fahrversuch mit einem LED-Multispot-Scheinwerfer (Prototyp).....	74
6.1.2	Dimmung kompletter Lichtverteilung, statischer Versuch .....	76
6.2	Fahrversuch mit einer selbst aufgebauten LED-Frontbeleuchtung .....	78
6.2.1	Ziele der Untersuchung .....	78
6.2.2	Versuchsträger .....	78
6.2.3	Ermittlung der Untersuchungsparameter .....	79
6.2.4	Methodik.....	80
6.2.5	Ergebnisse.....	81
6.2.6	Diskussion der Ergebnisse .....	82
6.3	Fahrversuch mit einem Serienfahrzeug .....	83
6.3.1	Ziele der Untersuchung .....	83
6.3.2	Versuchsträger .....	83
6.3.3	Methodik.....	84
6.3.4	Ergebnisse.....	85
6.3.5	Diskussion der Ergebnisse .....	89
6.4	Fazit.....	91
<b>7</b>	<b>Stroboskopischer Effekt in der Bürobeleuchtung .....</b>	<b>93</b>
7.1	Untersuchung mit synchroner PWM .....	93
7.1.1	Ziele der Untersuchung .....	93
7.1.2	Versuchsraum.....	93
7.1.3	Methodik.....	96
7.1.4	Ergebnisse.....	100
7.1.5	Diskussion der Ergebnisse .....	120
7.2	Untersuchung mit phasenverschobener PWM.....	121
7.2.1	Ziele der Untersuchung .....	121
7.2.2	Versuchsaufbau .....	121

---

7.2.3	Methodik.....	122
7.2.4	Ergebnisse.....	125
7.2.5	Diskussion der Ergebnisse.....	126
7.3	Fazit.....	127
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>128</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>130</b>
	<b>Veröffentlichungen .....</b>	<b>137</b>
	<b>Betreute Arbeiten .....</b>	<b>139</b>
	<b>Wissenschaftlicher Werdegang.....</b>	<b>140</b>
	<b>Erklärung laut §9 der Promotionsordnung .....</b>	<b>141</b>

---

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

CCR	<i>Constant Current Regulation/Reduction</i>
CIE	<i>Commision Interantionale de l'Éclairage</i>
CRT	<i>Cathode Ray Tubes, Cathode Ray Tubes</i>
dc	<i>Duty cycle</i>
EEG	<i>Elektroenzephalografie</i>
EMV	<i>Elektromagnetische Verträglichkeit</i>
ERG	<i>Elektroretinogramm</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FVF	<i>Flimmerverschmelzungsfrequenz</i>
GS	<i>Befindlichkeitsskala Gute-Schlechte-Stimmung</i>
IQR	<i>Interquartilsabstand</i>
Kfz	<i>Kraftfahrzeug</i>
LCTF	<i>Liquid Crystal Tunable Filter</i>
LED	<i>Licht emittierende Diode</i>
MDBF	<i>Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen</i>
PWM	<i>Pulsweitenmodulation</i>
RGB-LED	<i>Farbige Rot-, Grün-, Blau-LED</i>
RU	<i>Befindlichkeitesskala Ruhe-Unruhe</i>
VEP	<i>Visuell evoziertes Potential</i>
WM	<i>Befindlichkeitsskala Wachheit-Müdigkeit</i>

---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1.1: Helligkeitsverteilung eines Multispotsystems .....	2
Abbildung 2.1: Schnitt durch rechtes Auge [14] .....	5
Abbildung 2.2: Sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung nach [18].....	6
Abbildung 2.3: Relative spektrale Empfindlichkeit der Photorezeptoren nach [20], [21].....	7
Abbildung 2.4: Verteilung der drei Zapfentypen auf der Netzhaut [28] .....	8
Abbildung 2.5: Aufbau der Netzhaut nach [29] .....	8
Abbildung 2.6: Örtliche Verteilungsdichte der Photozellen auf der Netzhaut [31] .....	9
Abbildung 2.7: PWM-Signal, zeitlicher Verlauf.....	11
Abbildung 2.8: Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur bei PWM und CCR nach [35].....	11
Abbildung 2.9: Abhängigkeit der FVF von der Leuchtdichte und der Modulationstiefe [43] .....	13
Abbildung 2.10: Nachbilder bei langsamer (links) und bei schneller Bewegung (rechts).....	14
Abbildung 2.11: Nachbilder bei einer Flimmerfrequenz unter der Grenzfrequenz.....	15
Abbildung 2.12: Stroboskopeffekt in Abhängigkeit des Tastverhältnisses .....	15
Abbildung 2.13: Abbildung der Lichtquelle bei verschiedenen Tastverhältnissen.....	16
Abbildung 2.14: Stroboskopeffekt bei schneller Handbewegung.....	16
Abbildung 3.1: FVF bei 2° Testfeld in Abhängigkeit der Form des Flimmerns [56] .....	17
Abbildung 3.2: Vergleich der Untersuchungen mit verschiedenen Feldgrößen.....	18
Abbildung 3.3: Empfindlichkeit chromatischer Mechanismen auf Flimmern aus [57] .....	19
Abbildung 3.4: Verteilung der FVF für ein 60°-Gesichtsfeld aus [59] .....	19
Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen FVF und Tastverhältnis [60] .....	20
Abbildung 3.6: FVF in Abhängigkeit der Position des Reizes im Gesichtsfeld und des Alters [61] ....	20
Abbildung 3.7: Perlschnureffekt bei PWM-gedimmten LED-Heckleuchten aus [48] .....	24
Abbildung 3.8: Modulationssignale und visuelles Signalbild bei drei bewegten LEDs aus [44].....	25
Abbildung 4.1: Zeitlicher Verlauf der Lichtstärke beim Überlappen der Lichtstärkeverteilungen....	27
Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf der überlagerten Lichtstärke .....	28
Abbildung 5.1: Vergleich der Spektren von LED und Glühlampe .....	29
Abbildung 5.2: Laboraufbau .....	30
Abbildung 5.3: Drei Felder aus Sicht der Testperson, Fixationspunkt in der Mitte.....	31
Abbildung 5.4: Schematische Darstellung einer kurvigen Waldstraße.....	32
Abbildung 5.5: Ablaufdiagramm des Versuchs zur Ermittlung der FVF .....	32
Abbildung 5.6: Ablaufdiagramm der Staircase-Methode .....	33
Abbildung 5.7: Kombinierte Staircase-Methode zur Ermittlung der FVF .....	33
Abbildung 5.8: Boxplots zur FVF in Abhängigkeit der dargestellten Sehobjekte.....	34



---

Abbildung 5.9: Ring als Sehobjekt.....	37
Abbildung 5.10: Ablaufdiagramm Laboruntersuchung Perlschnureffekt.....	38
Abbildung 5.11: Schwellenfrequenz bei horizontalen und vertikalen Sakkaden .....	39
Abbildung 5.12: Vergleich aller Testpersonen und Person P1, horizontale Sakkaden.....	39
Abbildung 5.13: Vergleich aller Testpersonen und Person P1, vertikale Sakkaden .....	40
Abbildung 5.14: Miniaturmodell einer Straßenkreuzung.....	43
Abbildung 5.15: Leuchtdichteaufnahme einer Straßenkreuzung bei Fernlicht .....	43
Abbildung 5.16: Leuchtdichteaufnahme des Miniaturmodells.....	44
Abbildung 5.17: Proband am Miniaturmodell .....	44
Abbildung 5.18: Linke Fixations-LED im gelb (links im Bild) .....	45
Abbildung 5.19: Ablaufdiagramm, Perlschnureffekt beim Seitenblick .....	46
Abbildung 5.20: Boxplots der ermittelten Bewertungen .....	48
Abbildung 5.21: Boxplots der ermittelten Bewertungen, empfindliche Testpersonen (Gruppe 2) ...	49
Abbildung 5.22: Approximierte Bewertung in Abhängigkeit von der Testbedingung .....	50
Abbildung 5.23: Anteil unempfindlicher Personen in Abhängigkeit der Frequenz .....	51
Abbildung 5.24: Beleuchtungsmodul.....	54
Abbildung 5.25: Schematische Darstellung der untersuchten Situation .....	54
Abbildung 5.26: Leuchtdichteaufnahme der Versuchsanordnung.....	55
Abbildung 5.27: Ablaufdiagramm der Laboruntersuchung mittels Straßenminiaturmodell .....	56
Abbildung 5.28: Ablaufdiagramm für Teilversuche 2 und 3.....	56
Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf der relativen Leuchtdichte bei phasenverschobener PWM.....	57
Abbildung 5.30: Anteil der Probanden nach Altersgruppen.....	58
Abbildung 5.31: Histogramm der Verteilung der Testpersonen nach der optimalen Leuchtdichte..	58
Abbildung 5.32: Histogramm der Bewertungen der Leuchtdichte nach semantischen Begriffen.....	59
Abbildung 5.33: Wahrnehmung des Perlschnureffekts, synchrone PWM .....	60
Abbildung 5.34: Anteil unempfindlicher Personen in Abhängigkeit des Tastverhältnisses .....	61
Abbildung 5.35: Empfindlichkeit der Wahrnehmung des Perlschnureffekts .....	63
Abbildung 5.36: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 1 .....	64
Abbildung 5.37: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 2 .....	65
Abbildung 5.38: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 3 .....	65
Abbildung 5.39: Wahrnehmung des Perlschnureffekts, phasenverschobene PWM.....	66
Abbildung 5.40: Anteil der unempfindlichen Personen, phasenverschobene PWM .....	67
Abbildung 5.41: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 1, phasenverschobene PWM .....	69
Abbildung 5.42: Anteil unempfindlicher Personen in Gruppe 2, phasenverschobene PWM.....	69
Abbildung 5.43: Anteil unempfindlicher Personen in Gruppe 3 bei phasenverschobener PWM .....	69

---

---

Abbildung 6.1: Untersuchungsort.....	76
Abbildung 6.2: Vergleich der Schwellenfrequenzen der Testpersonen.....	77
Abbildung 6.3: Die entwickelte LED-Frontbeleuchtung am Fahrzeug.....	79
Abbildung 6.4: Ablaufdiagramm Fahrversuch mit umgebauten LED-Scheinwerfern.....	81
Abbildung 6.5: Ablaufdiagramm Testfahrten.....	81
Abbildung 6.6: Histogramm der Altersverteilung der Teilnehmer.....	85
Abbildung 6.7: Boxplots der Wahrnehmungsraten der Altersgruppen.....	86
Abbildung 6.8: Approximierte Erkennungsrate in Abhängigkeit der Frequenz, Gruppe G1.....	87
Abbildung 6.9: Approximierte Erkennungsrate in Abhängigkeit der Frequenz, Gruppe G2.....	88
Abbildung 7.1: Untersuchungsraum.....	94
Abbildung 7.2: Lichtspektrum der LED-Leuchte.....	94
Abbildung 7.3: Untersuchte Signalformen.....	95
Abbildung 7.4: Leuchtdichtevertelung aus Sicht der Testperson.....	96
Abbildung 7.5: Beispiel einer Bewertung mit dem MDBF.....	97
Abbildung 7.6: Ablaufdiagramme für die Anweisungen und Testaufgaben.....	98
Abbildung 7.7: Ablaufdiagramm des Versuchsablaufs.....	99
Abbildung 7.8: Aufgaben 2 bis 5.....	100
Abbildung 7.9: Zeitpunkte der Wiederholungen.....	101
Abbildung 7.10: Tagesverlauf der Befindlichkeit einer Testperson.....	101
Abbildung 7.11: Boxplots der Auffälligkeitsbewertung bei $dc = 20\%$ , Aufgabe 5.....	101
Abbildung 7.12: Approximation der Bewertungen, Störungsgrad bei $dc = 20\%$ , Aufgabe 5.....	102
Abbildung 7.13: Vergleich der approximierten Funktionen nach Tastverhältnis und Aufgabe.....	103
Abbildung 7.14: Histogramm der Altersverteilung der Testpersonen.....	105
Abbildung 7.15: Boxplots der Bewertungen der Auffälligkeit bei $dc = 20\%$ , alle Testpersonen.....	106
Abbildung 7.16: Approximation der Bewertungen, alle Testpersonen.....	107
Abbildung 7.17: Beispiel für die Approximation des Anteils der unempfindlichen Testpersonen.....	109
Abbildung 7.18: Approximation des Anteils unempfindlicher Personen.....	110
Abbildung 7.19: Approximation des Anteils unempfindlicher Personen nach Altersgruppen.....	113
Abbildung 7.20: Ergebnisse der Befindlichkeitsgruppen.....	118
Abbildung 7.21: Versuchszeiten der Befindlichkeitsgruppen.....	119
Abbildung 7.22: Versuchszeiten der Empfindlichkeitsgruppen.....	119
Abbildung 7.23: Position der LED-Leuchten in der Decke des Raumes.....	122
Abbildung 7.24: Zeitliche Verläufe der relativen Beleuchtungsstärke, Modus 2.....	123
Abbildung 7.25: Zeitliche Verläufe der relativen Beleuchtungsstärke, Modus 3.....	124
Abbildung 7.26: Boxplots der Wahrnehmungsraten bei den verschiedenen Modi.....	126

---

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 2.1: Bereiche der Adaptation des visuellen Systems.....	6
Tabelle 5.1: Kombinationen der Reize .....	31
Tabelle 5.2: Statistische Kennwerte der Ergebnisse .....	35
Tabelle 5.3: Untersuchungsparameter.....	37
Tabelle 5.4: Untersuchten Lichteinstellungen .....	45
Tabelle 5.5: Semantische Bedeutung der Extremwerte der Bewertung.....	46
Tabelle 5.6: Testbedingungen.....	50
Tabelle 5.7: Grenz- und Schwellenfrequenzen für die untersuchten Bedingungen.....	51
Tabelle 5.8: Schwellenfrequenzen nach verschiedenen Methoden .....	51
Tabelle 5.9: Schätzparameter für Kennfrequenzen .....	52
Tabelle 5.10: Untersuchten Lichteinstellungen.....	57
Tabelle 5.11: Kennwerte der Verläufe der unempfindlichen Personen unter allen Testpersonen....	62
Tabelle 5.12: Beschreibung der Gruppen .....	62
Tabelle 5.13: Kennwerte der Gruppen.....	62
Tabelle 5.14: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, Gruppe 1 .....	64
Tabelle 5.15: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, Gruppe 2 .....	65
Tabelle 5.16: Kennwerte der empfindlichen Testpersonen, Gruppe 3.....	66
Tabelle 5.17: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, phasenverschobene PWM .....	67
Tabelle 5.18: Kennwerte der Gruppen, phasenverschobene PWM.....	68
Tabelle 5.19: Vergleich der Gruppen aus Teilversuchen 3 und 4 .....	68
Tabelle 5.20: Kennwerte der Gruppen in Teilversuchen zu Perlschnureffekt .....	70
Tabelle 5.21: Vergleich der Schwellentastverhältnisse für zwei PWM-Arten.....	71
Tabelle 6.1: Untersuchten Lichteinstellungen .....	79
Tabelle 6.2: Untersuchte Lichteinstellungen .....	80
Tabelle 6.3: Ergebnisse der Testfahrten für 5 Testpersonen .....	82
Tabelle 6.4: Untersuchten Fernlicheinstellungen.....	84
Tabelle 6.5: Altersgruppen.....	85
Tabelle 6.6: Probandengruppen .....	86
Tabelle 6.7: Kennwerte der approximierten Verläufe, Gruppe G1.....	87
Tabelle 6.8: Kennwerte der approximierten Verläufe, Gruppe G2.....	88
Tabelle 7.1: Untersuchte Einstellungen.....	95
Tabelle 7.2: MDBF-Skalen.....	96
Tabelle 7.3: Bedeutung der Extremwerte der Bewertung.....	97

---

Tabelle 7.4: Schwellen- Grenzfrequenz für alle Testbedingungen .....	104
Tabelle 7.5: Durchschnittliche Kennfrequenzen für verschiedene Aufgabentypen.....	105
Tabelle 7.6: Kennwerte der Ergebnisse für alle Aufgaben.....	108
Tabelle 7.7: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen, Methode 1 .....	108
Tabelle 7.8: Schwellenfrequenz in Abhängigkeit vom Tastverhältnis und Aufgabe .....	110
Tabelle 7.9: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2 .....	111
Tabelle 7.10: Altersgruppen .....	111
Tabelle 7.11: Kennwerte der Ergebnisse für AG1 .....	112
Tabelle 7.12: Durchschnittliche Kennfrequenzen nach Aufgabenart für AG2.....	112
Tabelle 7.13: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen, Methode 1 .....	113
Tabelle 7.14: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2 .....	113
Tabelle 7.15: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der empfindlichen Altersgruppe AG2.	114
Tabelle 7.16: Statistische Kennwerte der männlichen und weiblichen Personen.....	114
Tabelle 7.17: Durchschnittliche Kennfrequenzen, Methode 1 .....	115
Tabelle 7.18: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen Methode, 1 .....	115
Tabelle 7.19: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2 .....	116
Tabelle 7.20: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der männlichen Testpersonen.....	116
Tabelle 7.21: Beschreibung der Gruppen nach ihrer Bewertung des Stroboskopeffekts.....	116
Tabelle 7.22: Statistische Kennwerte der Gruppen .....	117
Tabelle 7.23: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der empfindlichen Testpersonen .....	117
Tabelle 7.24: Untersuchte Modi.....	125

---

## Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung von Flimmereffekten, die bei PWM-gedimmten LED-Beleuchtung entstehen. Für die Anwendungen in Büro- und Kfz-Beleuchtung soll die minimale PWM-Frequenz ermittelt werden, bei der keine Flimmereffekte, wie direkt wahrnehmbares Flimmern, der Stroboskopeffekt und der Perlschnureffekt, auftreten können.

Die Literaturrecherche zeigt, dass der Fokus vieler physiologischen Studien auf der direkten Wahrnehmung von Flimmern liegt und dass sich nur wenige Untersuchungen mit stroboskopischen Effekten bei intermittierendem Licht auseinandersetzen. Die vorliegenden lichttechnischen Studien wurden teilweise unter künstlichen Bedingungen durchgeführt, weshalb die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf die Praxis in Frage gestellt werden muss. Zudem liegen keine Studien über stroboskopische Effekte bei PWM-gedimmter Frontbeleuchtung im Automobil vor.

Zur Ermittlung und Eingrenzung der relevanten Einflussparameter wird im Labor ein Versuchsstand entwickelt. In vier Probandenstudien wird direkt wahrnehmbares Flimmern und der Perlschnureffekt unter den für die Kfz-Beleuchtung relevanten Bedingungen untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass PWM-Frequenzen, die in Kfz-Beleuchtung üblich sind, kein Flimmern verursachen. Der Perlschnureffekt kann in Kfz-Innenraumbeleuchtung bei Frequenzen bis über 1000 Hz entstehen. PWM-gedimmte Frontbeleuchtung kann den Perlschnureffekt an Verkehrsschildern und Retroreflektoren verursachen. Dabei wird in einer Probandenstudie die Grenzfrequenz unterhalb von 1000 Hz ermittelt. Für die Praxis ist eine PWM-Frequenz von ca. 460 Hz zu empfehlen, um den Perlschnureffekt zu vermeiden.

In zwei Fahrversuchen mit Probanden werden die Flimmereffekte im realen Straßenverkehr untersucht. Die Ergebnisse sind mit den Laborergebnissen qualitativ vergleichbar. Die absoluten Werte für die Grenzfrequenz sind etwas niedriger. Dies ist auf die Fahraufgabe und dynamische Verkehrssituationen zurückzuführen, die im Labor nicht nachgebildet werden können. Die Laborergebnisse liefern eine gute Schätzung der Extremwerte. Mithilfe des erarbeiteten Verfahrens kann die PWM-Frequenz sogar 200 Hz betragen, ohne dabei den Perlschnureffekt zu verursachen.

Das Entstehen des Stroboskopeffekts in PWM-gedimmten Bürobeleuchtungen wird in zwei weiteren Probandenstudien untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass eine PWM-Frequenz um 550 Hz für die Dimmung von Bürobeleuchtung sinnvoll ist, um bei typischen Bürotätigkeiten keinen Stroboskopeffekt zu verursachen. Mithilfe der vorgeschlagenen Methode kann die PWM-Frequenz deutlich geringer gewählt werden. Weiterhin sind große interpersonelle Unterschiede in Abhängigkeit des Alters, des Geschlechts und der aktuellen Befindlichkeit der Person zu verzeichnen. Zusätzlich hat die Tageszeit einen Einfluss auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts.

---

# 1 Einleitung

---

## 1.1 Relevanz der Arbeit

---

Licht emittierende Dioden (LED) erschließen aufgrund ihrer hohen Energieeffizienz, ihrer Flexibilität im Design und ihrer langen Lebensdauer immer mehr Anwendungen im Beleuchtungsbereich. Herkömmliche Leuchtmittel werden sukzessiv durch die LED-Technologie vom Markt verdrängt. Laut einer Marktstudie von McKinsey & Company [1] soll der Anteil von Leuchten auf Halbleiterbasis in der Allgemeinbeleuchtung im Jahr 2020 von heutigen 45 % auf 69 % stetig zunehmen. In der Automobilbeleuchtung soll der Marktanteil im selben Jahr 36 % im Vergleich zu 21 % im Jahr 2015 ausmachen.

Die LED-Technologie gilt allerdings nicht nur als Ersatz für herkömmliche Leuchtmittel. Viel mehr bietet sie neue Möglichkeiten, sowohl im Design, als auch in der Funktionalität. Zudem zeichnen sich LEDs gegenüber konventionellen Leuchtmitteln durch eine gute Dimmbarkeit aus. Aufgrund ihres schnellen Schaltverhaltens wird der Lichtstrom der LED in vielen Anwendungen mittels Pulsweitenmodulation (PWM) gesteuert.

In der Kfz-Beleuchtung finden LEDs seit Jahren im Innenraum, in Heckleuchten, in Fahrtrichtungsanzeigern und seit 2007 [2] zunehmend auch in Frontscheinwerfern zur Realisierung der Abblend- und Fernlichtverteilungen ihren Einsatz. Inzwischen sind die Effizienz und der Lichtstrom so gestiegen, dass die modernsten und hochentwickeltesten Kfz-Frontbeleuchtungssysteme ausschließlich aus LEDs bestehen [3].

Bei der sogenannten Multispot-Technologie ist das Fernlicht in unterschiedliche Bereiche unterteilt, die komplett individuell angesteuert werden können. Über eine Kamera im Fahrzeug wird der Verkehrsraum analysiert und entgegenkommender oder vorausfahrender Verkehr erkannt. Die Segmente, die andere Verkehrsteilnehmer blenden würden, werden abgeschaltet [4] (vgl. Abbildung 1.1 (a)).

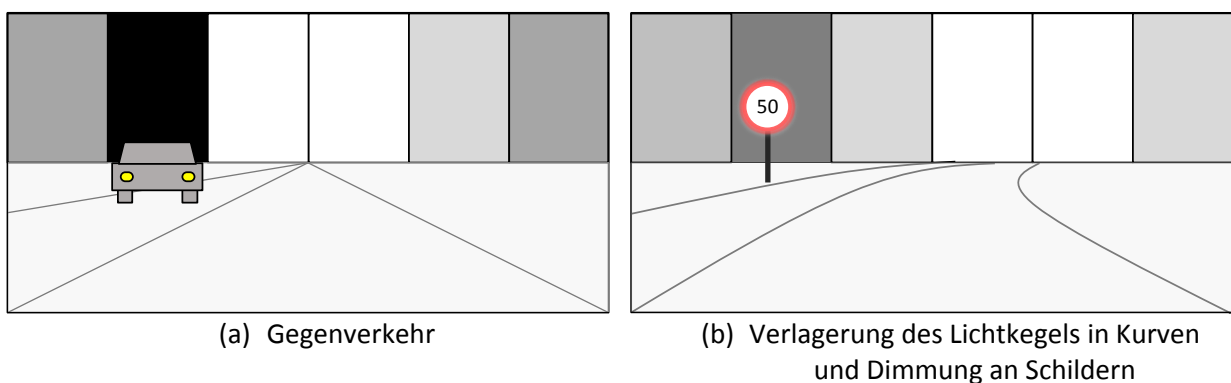


Abbildung 1.1: Helligkeitsverteilung eines Multispotsystems

Dadurch ergibt sich für den Fahrer der Vorteil, dass er die gesamte Zeit mit Fernlicht fahren kann ohne sich um die Fernlichtsteuerung kümmern zu müssen. Diese Technologie verspricht eine bessere Ausleuchtung der Straße und dadurch mehr Fahrkomfort und Sicherheit im Straßenverkehr [5]. Die

---

seitlichen Segmente, in denen sich keine relevanten Objekte befinden, werden in der Regel abgedimmt. Durch das Dimmen ist es zudem möglich, die Lichtverteilung in Kurven ohne mechanische Antriebselemente zu schwenken (vgl. Abbildung 1.1 (b)). Die Segmente, in denen sich stark retroreflektierende Verkehrsschilder befinden, werden gedimmt, um die Eigenblendung zu vermeiden. Das Dimmen wird bei solchen Systemen aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen mittels der PWM realisiert.

Durch die Steigerung des Automationsgrades von Fahrerassistenzsystemen werden dem Fahrer Teile seiner Fahraufgabe abgenommen. Beim hochautomatisierten Fahren soll in Zukunft die Fahrzeugführung in bestimmten Situationen komplett vom elektronischen System übernommen werden [6]. Während dieses System aktiv ist, wird die Aufmerksamkeit des Fahrers teilweise auf Objekte im Fahrzeuginnenraum gelenkt. Dadurch wird die Ambiente-Innenraumbeleuchtung mehr an Bedeutung gewinnen. Neben den zentralen Leuchten im Fahrzeuginnenraum, die im Standbetrieb zur Orientierung genutzt werden können, finden in den letzten Jahren vermehrt leuchtende Designelemente in Türverkleidung, Mittelkonsole, Fußraum oder Dachhimmel ihren Einsatz. Der Fokus dieser Beleuchtung liegt dabei nicht nur auf der Funktionalität. Das Innenlicht soll in Zukunft zum Wohlbefinden des Fahrers beitragen und seine Stimmung positiv beeinflussen [7]. Dabei spielt die Farbe bzw. das Spektrum des Lichtes eine große Rolle. Diese soll entweder automatisch und adaptiv oder individuell vom Fahrer einstellbar sein. Dabei kommen neben den weißen auch farbige RGB-LEDs (Rot-, Grün-, Blau-LED) zum Einsatz. Die Farbmischung geschieht über die Veränderung der Lichtströme der einzelnen LEDs. Hierbei wird der Strom der LED mittels der PWM moduliert [8].

Weiterhin befindet sich die Beleuchtung im öffentlichen Raum momentan in einem Umgestaltungsprozess. Kommunen statten ihre Straßen- und Bürobeleuchtung mit LED-Technik aus [9]. Der im Vergleich zu herkömmlichen Leuchtmitteln ohnehin geringe Energieverbrauch lässt sich durch eine adaptive Lichtsteuerung weiter reduzieren. Dabei besteht die Grundidee darin, den Lichtstrom in Abhängigkeit der aktuellen Verkehrslage, die durch die Sensoren des Verkehrsmanagementsystems erfasst wird, zu steuern [10].

Auch in der Beleuchtung von Innenräumen wird die LED-Technik in den nächsten Jahren eine wichtige Rolle einnehmen. Der Einsatz von LEDs mit unterschiedlichen spektralen Charakteristiken ermöglicht eine dynamische Einstellung des emittierten Lichtspektrums. Somit können sich Objekte unter solcher Beleuchtung durch geeignete Anpassung natürlich erscheinen oder nach einer besonderen Art in Szene gesetzt werden. Da das Licht bzw. sein Spektrum eine emotionale und physiologisch-biologische Wirkung auf die Menschen hat [11], sind neben dekorativen auch lichttherapeutische Anwendungen auf Basis von multispektralen LED-Lichtquellen möglich. Auch in der Straßen- und Innenraumbeleuchtung ist die PWM eine verbreitete Methode zum Dimmen [12].

---

## 1.2 Problemstellung

---

In den meisten Anwendungen, welche die PWM direkt zur Lichtstromsteuerung verwenden, wird die PWM-Frequenz möglichst gering gehalten. Je höher die Frequenz ist, umso stärker werden die elektromagnetischen Felder, die durch das Schalten der LEDs entstehen. Zusätzlich muss die PWM-Frequenz mindestens so hoch sein, dass kein wahrnehmbares Flimmern entsteht. Für die meisten Beleuchtungssituationen liegt die sogenannte Flimmerverschmelzungsfrequenz unterhalb von 100 Hz (vgl. Kapitel 2.3.1). Oberhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz können bei schnellen Augen-



---

und/oder Objektbewegungen unerwünschte visuelle Effekte, sogenannte stroboskopische Effekte, auftreten. Diese bilden eine potentielle Gefahr für das Entstehen von visuellen Irritationen und optischen Täuschungen. Zudem sind negative physiologische Einflüsse auf die Menschen durch das intermittierende Licht bekannt (vgl. Kapitel 2.3).

Bei der Entwicklung einer LED-Beleuchtung muss demnach ein Kompromiss zwischen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) und der visuellen Wahrnehmung getroffen werden.

---

### **1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit**

---

Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Einflussfaktoren einer PWM-gediminten LED-Beleuchtung auf die Wahrnehmung der Flimmereffekte in empirischen Untersuchungen unter praxisrelevanten Bedingungen zu ermitteln. Dabei ist der Fokus auf die Anwendungen in der Kfz- und Bürobeleuchtung gelegt.

Kapitel 2 beschäftigt sich mit den Grundlagen, die für das weitere Verständnis notwendig sind. Es erfolgt eine Beschreibung des menschlichen visuellen Systems. Dazu wird auf den Aufbau des Auges, die spektrale Empfindlichkeit, den Aufbau der Netzhaut und die Augenbewegungen eingegangen. Nach der Vorstellung von zwei verbreiteten Methoden zur Dimmung von LEDs werden wahrnehmbare visuelle Effekte, die intermittierendes Licht verursacht, exemplarisch erläutert.

Kapitel 3 erfasst die für diese Arbeit relevanten und wichtigsten Studien im Bereich der Flimmerforschung. Zusammengefasst werden sowohl physiologische, als auch lichttechnische Forschungsarbeiten. Basierend auf den Erkenntnissen dieser Studien wird in Kapitel 4 eine Methode zur Reduzierung von Flimmereffekten vorgestellt.

Die Beschreibung der durchgeführten Laboruntersuchungen folgt in Kapitel 5. Dabei werden die Flimmerempfindlichkeit und der Perlschnureffekt unter den für die Kfz-Beleuchtung relevanten Beleuchtungsbedingungen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen als Optimierungsmaßnahmen in das Design der Feldversuche ein. Diese werden in Kapitel 6 beschrieben.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit den Untersuchungen des Stroboskopeffekts unter möglichst realistischen und für die Bürobeleuchtung relevanten Bedingungen, sowohl in Bezug auf lichttechnische Einstellungen, als auch hinsichtlich der Aufgaben für die Testperson.

Abschließend wird die Arbeit zusammengefasst und auf die gestellten Forschungsfragen eingegangen. In der Diskussion werden die Grenzfrequenzen für stroboskopische Effekte in verschiedenen Anwendungen sowie die Methoden zu ihrer Reduzierung angegeben.



---

## 2 Grundlagen

Dieses Kapitel vermittelt das nötige Basiswissen zum Verständnis der Begriffe, die in den darauf folgenden Kapiteln verwendet werden. Zunächst wird eine kurze Einführung in die Grundbegriffe und Definitionen des menschlichen visuellen Systems gegeben. Nach einer Beschreibung der verbreiteten Verfahren zur Steuerung der Helligkeit von LEDs werden abschließend die wahrnehmbaren Flimmereffekte erläutert.

---

### 2.1 Das visuelle System

---

Die folgenden Abschnitte beschäftigen sich mit den für diese Arbeit relevanten Komponenten des menschlichen visuellen Systems.

#### 2.1.1 Das menschliche Auge

Das menschliche Auge lässt sich prinzipiell in zwei Komponenten aufteilen: Den dioptrischen Apparat und den rezeptiven Bereich (vgl. Abbildung 2.1). Der dioptrische Apparat besteht vor allem aus Linse, Hornhaut (Cornea) und Iris. Die Iris ist die Blende des Auges und die Öffnung in ihrer Mitte heißt Pupille.

Durch die Pupillengröße wird die Menge des einfallenden Lichtes reguliert. In einer sehr hellen Umgebung verengt sich die Pupille. Bei Dunkelheit öffnet sie sich und lässt mehr Licht ins Auge fallen. Durch diese Adaptation der Pupille an die Lichtbedingungen lassen sich die lichtempfindlichen Rezeptoren optimal ansteuern.

Durch das Zusammenspiel der Hornhaut mit dem Glaskörper und Linse wird das Licht gebündelt auf die Netzhaut projiziert. [13]

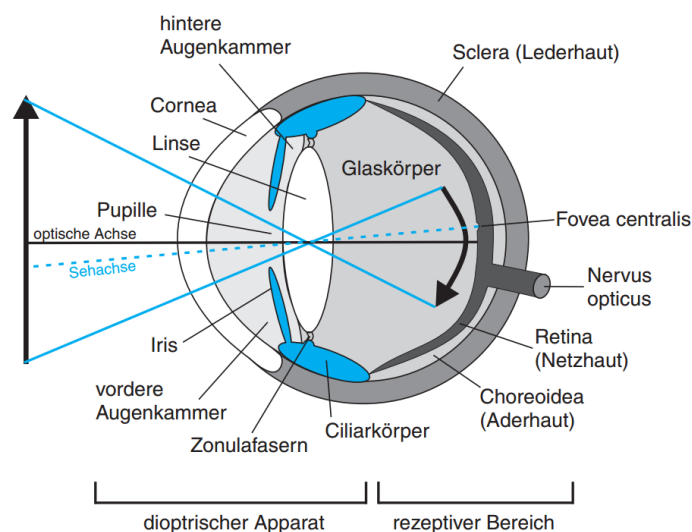


Abbildung 2.1: Schnitt durch rechtes Auge [14]

## 2.1.2 Spektrale Empfindlichkeit

Licht wird in der DIN 5031-7 [15] als der Wellenlängenbereich des elektromagnetischen Spektrums zwischen 380 und 780 nm definiert (vgl. Abbildung 2.2). Außerhalb dieses Bereiches ist die Wahrnehmung nur bei starken Strahlungsdichten möglich. Diese können jedoch das Auge schädigen [16]. Das menschliche Auge nimmt das Licht in Abhängigkeit seiner Intensität unterschiedlich wahr. Die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) definiert drei Adaptionszustände des visuellen Systems in Abhängigkeit von der Leuchtdichte des Umfeldes. Ihre Kennwerte sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Tabelle 2.1: Bereiche der Adaptation des visuellen Systems

	$L_U$ in $\text{cd}/\text{m}^2$	Aktive Photozellen
Photopisch	$[3; \infty)$	Zapfen
Mesopisch	$[10^{-5}; 3)$	Zapfen und Stäbchen
Skotopisch	$[0; 10^{-5})$	Stäbchen

In der *Netzhaut* – dem rezeptiven Bereich des Auges – setzen biochemische Prozesse die einfallenden elektromagnetischen Wellen in Neurosignale um [17]. Hier finden auch die ersten Stufen der Datenverarbeitung statt. Die verarbeiteten Signale werden dann über den *Sehnerv* (Nervus opticus) in das Gehirn weitergeleitet. An der Austrittsstelle des Sehnerven befinden sich keine *Photorezeptoren*. Das Auge nimmt an dieser Stelle keine Lichtreize auf. Demnach wird sie als *Blinder Fleck* bezeichnet.

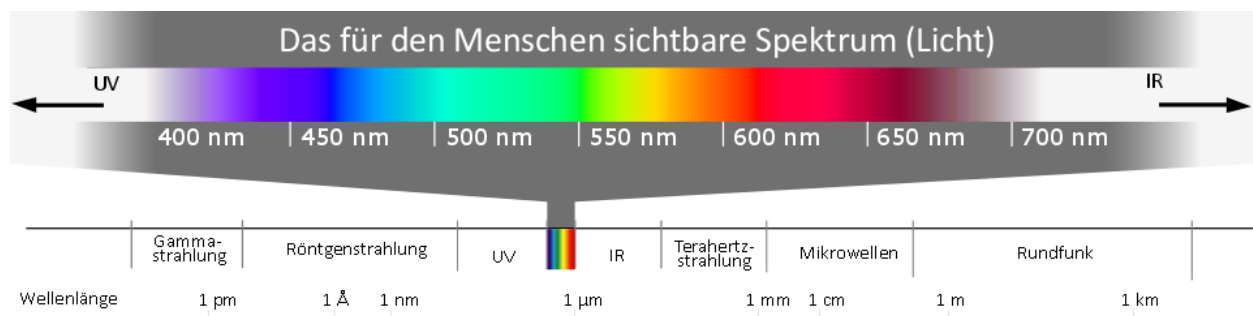


Abbildung 2.2: Sichtbarer Bereich der elektromagnetischen Strahlung nach [18]

## 2.1.3 Photorezeptoren

Die Sehachse des visuellen Systems liegt  $5^\circ$  temporal der optischen Achse [19]. Auf der Sehachse befindet sich die Sehgrube (Fovea centralis) – der Bereich des schärfsten Sehens der Netzhaut. Die Sehgrube besitzt nur einen Typ von Photorezeptoren – die Zapfen. Das menschliche Auge verfügt über drei verschiedene Zapfenarten:

S-Zapfen	Short Wavelength Sensitive Receptor
M-Zapfen	Medium Wavelength Sensitive Receptor
L-Zapfen	Long Wavelength Sensitive Receptor

Ihre relativen spektralen Absorptionskurven bzw. Empfindlichkeitskurven sind Abbildung 2.3 zu entnehmen. Für die S-Zapfen liegt das Maximum bei 442 nm. Das Absorptionsmaximum der M-Zapfen liegt bei 543 nm. Die L-Zapfen haben ihr Maximum bei 570 nm.

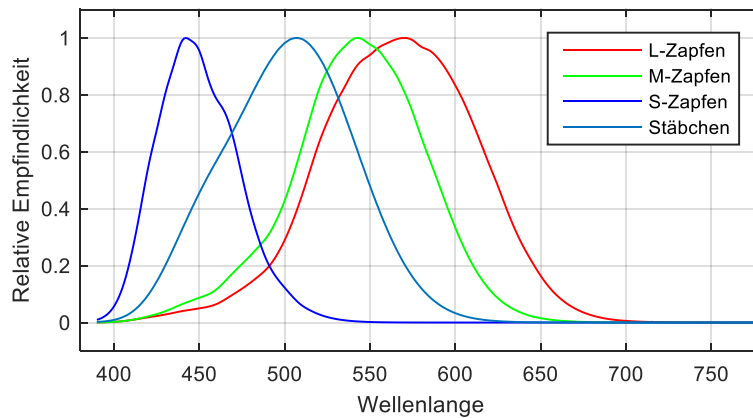


Abbildung 2.3: Relative spektrale Empfindlichkeit der Photorezeptoren nach [20], [21]

Die Zapfen sind für das Farbsehen verantwortlich und sind im mesopischen und photopischen Leuchtdichtebereich aktiv.

Die Stäbchen stellen den zweiten Typ der Photozellen dar. Sie sind lichtempfindlicher als die Zapfen und sind für das Sehen unter dunklen Bedingungen verantwortlich. Das Maximum ihrer spektralen Empfindlichkeit liegt bei 505 nm [22].

Sowohl die Stäbchen, als auch die Zapfen weisen im jeweils für sie optimalen Leuchtdichteumfeld eine ähnliche Reaktionszeit auf. Die minimale Reaktionszeit beträgt dabei für die beiden Rezeptortypen ca. 50 ms. Bei den Stäbchen steigt sie mit steigender Leuchtdichte, während die Zapfen mit steigender Leuchtdichte schneller reagieren [23]. Im mesopischen Bereich hingegen bestehen Wechselwirkungen sowohl zwischen den Stäbchen und Zapfen, als auch zwischen den verschiedenen Zapfentypen. Demzufolge sinkt die minimale Reaktionszeit auf 25 ms [24].

Das menschliche Auge enthält 100 bis 120 Millionen Stäbchen und 5 bis 6 Millionen Zapfen. Dabei ist der Anteil von L-Zapfen in der Regel doppelt so groß wie der Anteil von M-Zapfen [25]. Dieses Verhältnis variiert jedoch stark von Person zu Person [26]. Der Anteil der S-Zapfen, die im Bereich blauer Strahlung empfindlich sind, liegt bei etwa 12 % aller Zapfen [27].

Der zentrale Bereich der Sehgrube von ca.  $0,34^\circ$  enthält keine S-Zapfen. In Abbildung 2.4 wurden die Zapfen basierend auf Aufnahmen der Sehgrube entsprechend ihrer Empfindlichkeit farbig markiert:

- Rot: L-Zapfen,
- Grün: M-Zapfen,
- Blau: S-Zapfen.

Der weiße Kreis stellt den von S-Zapfen freien Bereich dar.

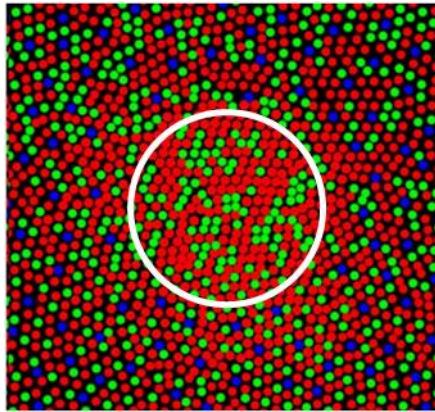


Abbildung 2.4: Verteilung der drei Zapfentypen auf der Netzhaut [28]

## 2.1.4 Netzhaut

Die in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Rezeptoren bilden mit anderen Nervenzellen der Netzhaut ein komplexes Netzwerk. Die *Stäbchen* und *Zapfen* sind miteinander über verschiedene Nervenzellen verbunden (vgl. Abbildung 2.5). Die *Horizontalzellen* übertragen Signale an weitere Rezeptoren. Dabei werden benachbarte Rezeptoren aktiviert und entfernte gehemmt. Das führt zur Kontrastverstärkung. Die *Bipolarzellen* sammeln die Signale von Horizontalzellen, gewichten sie und leiten sie an die *Ganglienzellen* weiter. Die *Müller-Zellen* sind als Stütz- und Transportzellen durch alle Schichten der Netzhaut verteilt. Die *Amakrinzellen* stellen, ähnlich wie Horizontalzellen, laterale Verbindungen zwischen Ganglien- und Bipolarzellen her [17]. Die Ganglienzellen codieren die Signale und senden sie in Form frequenzmodulierter Aktionspotenziale über die Axone ins Gehirn.

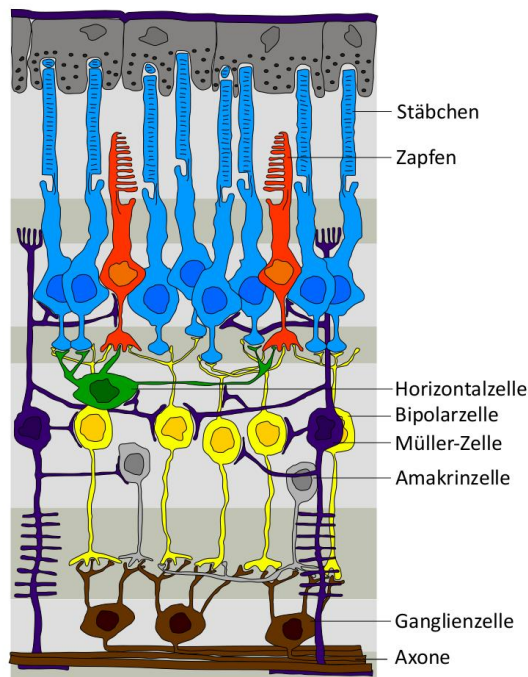


Abbildung 2.5: Aufbau der Netzhaut nach [29]

In der Sehgrube befinden sich 450.000 Zapfen, die eine direkte Verbindung zu den Ganglienzellen besitzen. Außerhalb der Sehgrube sind die Zapfen zu *rezeptive Feldern* verbunden, die ihre Neurosignale an eine einzige Ganglienzelle weiterleiten. [30]

Die Zapfen und Stäbchen sind nicht gleichmäßig auf der Netzhaut verteilt. Wie Abbildung 2.6 zeigt, besitzen die Zapfen in der Sehgrube die höchste Dichte. Diese fällt jedoch nach außen schnell ab. Im peripheren Bereich finden sich überwiegend Stäbchen, während die Sehgrube komplett stäbchenfrei ist. Am blinden Fleck sind weder Stäbchen noch Zapfen vorhanden.

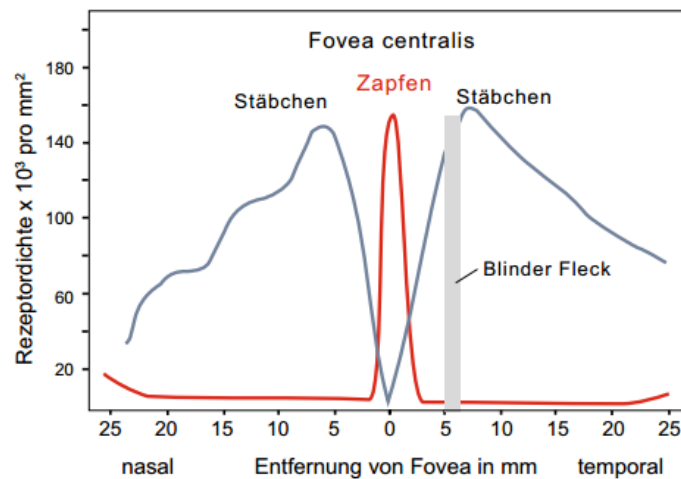


Abbildung 2.6: Örtliche Verteilungsdichte der Photozellen auf der Netzhaut [31]

## 2.1.5 Augenbewegung

Augenbewegungen haben für das visuelle System eine große Bedeutung. Zum einen ermöglichen sie das Verfolgen von bewegten Objekten, ohne dabei den Kopf zu bewegen. Zum anderen werden Photorezeptoren bei konstantem Reiz unempfindlich. Beim Betrachten eines ruhenden Objektes sorgen kleine „Zitterbewegungen“ des Auges dafür, dass die Photorezeptoren optimal angesteuert werden. Durch das Zusammenwirken verschiedener Mechanismen des visuellen Systems nehmen wir diese Augenbewegungen nicht wahr. [32]

Raymond [33] klassifiziert Augenbewegungen in fünf Arten:

- *Sakkaden* sind rasche, sprunghafte, ballistische Augenbewegungen, welche bewusst oder unbewusst ausgelöst werden können. Sie dienen zur Ausrichtung des Zielobjektes auf die *Fovea* – den Ort des schärfsten Sehens.
- *Gleitende Folgebewegungen* fixieren ein bewegtes Objekt auf der Fovea.
- *Vergenzbewegungen* dienen zum Abbilden eines Objektes in beiden Augen auf die Fovea. Dabei führen beide Augen unabhängige Bewegungen aus.
- *Verstibulookuläre Bewegungen* gleichen kleine Kopfbewegungen aus.
- *Optokinetische Bewegungen* sind für die Fixation eines Objektes bei einer gleichmäßigen Bewegung des Kopfes zuständig.

---

Die Sakkaden sind die schnellsten Augenbewegungen. Somit sind sie für die vorliegende Arbeit von großer Bedeutung. Denn der Perlschnureffekt – eine Art des Stroboskopeffekts entsteht durch schnelle Augenbewegungen. Die Sakkaden entstehen beim freien Umherschauen von einem Fixationspunkt zum nächsten. Ihre Amplitude liegt im Bereich von wenigen Winkelminuten bis zur 90°. Dabei nimmt die mittlere Winkelgeschwindigkeit mit der Amplitude zu. Bei großen Sakkaden werden Werte bis zu 1000°/s erreicht. Während der Sakkade wird die Wahrnehmung durch sakkadische Suppression unterdrückt, um die Menge der visuellen Information zu reduzieren. [34]

---

## 2.2 Helligkeitssteuerung bei LEDs

---

Zur Einstellung des Lichtstromes und damit der Helligkeit von LEDs haben sich zwei Verfahren etabliert. Ihre Vor- und Nachteile werden im Folgenden erläutert.

### 2.2.1 Konstantstromregelung (CCR)

Bei einer Konstantstromregelung (CCR, Constant Current Regulation/Reduction) wird der Lichtstrom der LED durch den elektrischen Strom geregelt. Die emittierte Strahlung einer LED ist nahezu proportional zum elektrischen Strom, der durch die LED fließt. Somit ergibt sich ein großer Vorteil dieses Verfahrens dadurch, dass es eine stufenlose Einstellung des Lichtstromes einer LED ermöglicht. Allerdings bringt die Stromänderung auch Nachteile mit sich: durch die Stromänderung ändern sich die in der LED umgesetzte Leistung und damit ihre Temperatur. Bei Halbleitern, auch bei LEDs, hängt die Energie der Bandlücke von der Temperatur ab. Zudem ist die Energie der Bandlücke ein Parameter, der das emittierte Spektrum der LED entscheidend beeinflusst. Demzufolge ist das Spektrum einer LED von der Stromstärke abhängig. [35]

Je nach LED-Typ können die stromabhängigen spektralen Änderungen visuell wahrgenommen werden, was für viele Anwendungen inakzeptabel wäre. Zudem ist die Temperaturabhängigkeit des Spektrums stark nichtlinear und kann somit nur bedingt ohne einen Temperatursensor kompensiert werden. In hochwertigen Anwendungen ist eine stabile und an andere Lichtfunktionen angepasste Lichtfarbe Voraussetzung. Dies ist einer der Gründe, warum Pulsweitenmodulation in vielen Anwendungen bevorzugt wird.

### 2.2.2 Pulsweitenmodulation (PWM)

Bei der Pulsweitenmodulation wird die LED in schneller zeitlicher Folge ein- und ausgeschaltet. Aufgrund der sehr kurzen Schaltzeiten von LEDs (ns- bis  $\mu$ s-Bereich) [36] folgt das emittierte Licht unmittelbar dem Stromverlauf. Der mittlere Lichtstrom der LED wird dabei über das Verhältnis der Pulsdauer  $T_{an}$  zur Periodendauer  $T$  eingestellt (vgl. Formel 2.1). Dieses zeitliche Hell-Dunkel-Verhältnis wird Tastverhältnis  $dc$  (duty cycle) genannt (vgl. Abbildung 2.7).

$$dc = \frac{T_{an}}{T} \quad 2.1$$

Bei hohen Pulsfrequenzen oberhalb von 100 Hz wird aufgrund der Trägheit der lichtempfindlichen Rezeptoren im Auge eine mittlere Leuchtdichte wahrgenommen (vgl. Kapitel 2.3).

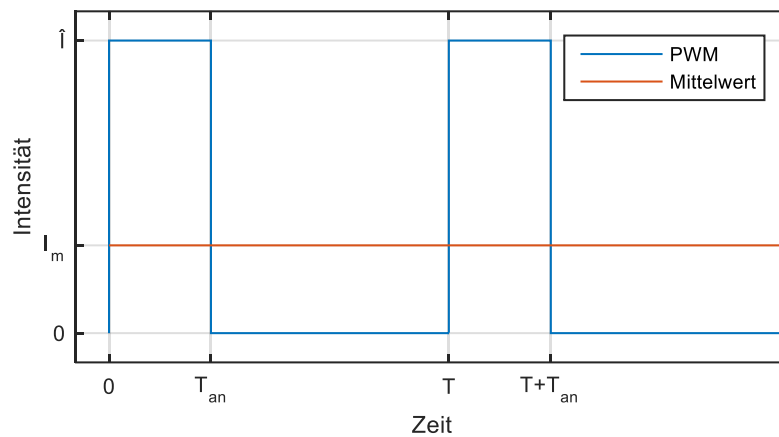


Abbildung 2.7: PWM-Signal, zeitlicher Verlauf

Der mittlere Strom und damit die mittlere Leuchtdichte kann nach Formel 2.2 berechnet werden. Dabei ergibt sich die mittlere Größe (Strom oder Leuchtdichte) aus dem Produkt des Maximums mit dem Tatverhältnis.

$$I_m = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \hat{I} \cdot T_{an} = \frac{T_{an}}{T} \cdot \hat{I} = dc \cdot \hat{I} \quad 2.2$$

Im Gegensatz zur CCR ist der Strom durch die LED bei PWM entweder maximal oder Null. Auch durch PWM ändert sich das emittierte Spektrum. Bei vielen LED-Typen sind diese Änderungen geringer bzw. akzeptabel im Vergleich zur Dimmung mittels CCR.

Das Spektrum weißen Lichtes kann annäherungsweise durch die ähnlichste Farbtemperatur beschrieben werden [37]. Abbildung 2.8 zeigt die Abhängigkeit der Farbtemperatur bei verschiedenen Dimmungsgraden für die beiden Verfahren.

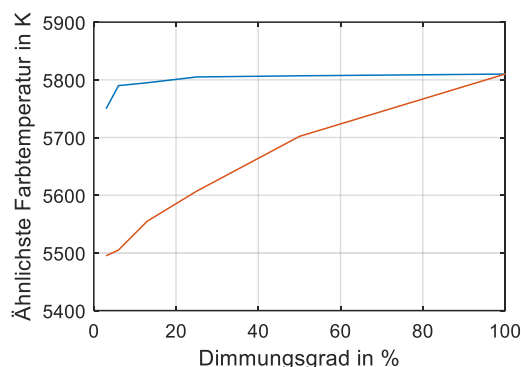


Abbildung 2.8: Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur bei PWM und CCR nach [35]

Der Unterschied ist deutlich zu erkennen. Während sich die Farbtemperatur bei der PWM um weniger als 100 K ändert, beträgt die Differenz bei der CCR zwischen dem niedrigsten (3 %) und dem



---

maximalen Dimmungsgrad (100 %) über 300 K. In einer Untersuchung stellten BIESKE und VANDAHL [38] fest, dass Farbtemperaturänderungen größer als 100 K visuell wahrgenommen werden können.

Allerdings bringt das schnelle Schalten des Stromes Nachteile mit sich. Besonders bei Hochleistungs-LEDs (Ströme im Bereich um 1 A) verursachen die Schaltvorgänge elektromagnetische Felder, welche mit steigender PWM-Frequenz stärker werden. Um die Beeinträchtigung umgebender elektrischer Geräte durch diese Felder gering zu halten und somit die Anforderungen und Spezifikationen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) [39] zu erfüllen, setzen Hersteller möglichst kleine PWM-Frequenzen ein. In der Kfz-Beleuchtung liegen typische PWM-Frequenzen im Bereich um 200 Hz für Frontbeleuchtung und bis zu 600 Hz für Rückleuchten. In der allgemeinen Beleuchtung sind Frequenzen von 100 bis 400 Hz üblich.

---

## 2.3 Visuelle Effekte bei intermittierendem Licht

---

Basierend auf empirischen Beobachtungen kann zwischen direkter und indirekter Wahrnehmung von Flimmern differenziert werden. Die Grenzen der beiden Wahrnehmungsformen sind fließend und hängen von vielen Faktoren ab. In den nachfolgenden Abschnitten werden die wesentlichen Einflussparameter und die Grundlagen über die Entstehung der beiden Effekte beschrieben.

### 2.3.1 Direkt wahrnehmbares Flimmern

Direkt wahrnehmbares Flimmern wird durch einen periodischen Wechsel von Lichtreizen hervorgerufen, die vom visuellen System weder als getrennte Einzelreize noch verschmolzen wahrgenommen werden. Es handelt sich dabei um die sichtbare Pulsation einer Lichtquelle. Das visuelle System ist im niederfrequenten Bereich besonders empfindlich. Mit steigender Frequenz nimmt allerdings die zeitliche Auflösungsfähigkeit ab. Die Frequenz, ab der die Pulsation einer Lichtquelle nicht mehr direkt wahrnehmbar ist, wird als *Flimmerverschmelzungsfrequenz* (FVF) bezeichnet [40].

Oberhalb der FVF entsteht der Eindruck eines konstanten Lichtreizes. Die Höhe dieses Reizes entspricht dem zeitlichen Mittelwert des periodischen Reizes (Formel 2.3). Diese empirisch beobachtete Regelmäßigkeit beschreibt das Talbotsche Gesetz [41].

$$L_m = \frac{1}{T} \int_0^T L_v(t) dt \quad 2.3$$

Formel 2.3 zeigt, dass die mittlere Leuchtdichte oberhalb der FVF unabhängig von der Modulationsfrequenz ist. Dieser Zusammenhang verdeutlicht, warum die Variation der Helligkeit einer Lichtquelle überhaupt durch Pulsweitenmodulation (vgl. Kapitel 2.2.2) möglich ist.

Die FVF ist ein sehr individueller Wert, der sich in Abhängigkeit von der Umgebung, der Lichtquelle und des Adaptationszustandes des visuellen Systems einstellt. Es gilt jedoch im Allgemeinen: Je höher die Leuchtdichte der flimmernden Lichtquelle ist, desto höher liegt die FVF [40].



Diese empirische Beobachtung beschreibt das Ferry-Porter-Gesetz (Formel 2.4). Mit zunehmender Leuchtdichte können Photorezeptoren auch höhere Pulsfrequenzen empfinden. Eine Reduktion der Leuchtdichte wirkt hingegen der Wahrnehmung von Flimmern entgegen. Die personenspezifische Konstante  $a$  in Formel 2.4 liegt typischerweise bei 12 Hz [42]. Der Parameter  $b$  hängt hingegen von den Extremwerten der Leuchtdichte während der Pulsation [43].

$$FVF = a \cdot \log L_m + b \quad 2.4$$

Abbildung 2.9 zeigt die Abhängigkeit der FVF von der Leuchtdichte und Modulationstiefe  $m$  (vgl. Formel 3.1). Diese Abhängigkeit wurde von KELLY [43] für ein homogenes, flimmerndes Feld von  $68^\circ$  ermittelt. Beim Dimmen von LEDs mittels der PWM entstehen Modulationstiefen nahe 1. Daher ist für diese Arbeit vor allem die obere Kurve von Bedeutung. Sie zeigt, dass die FVF bei großen flimmernden Lichtquellen und Leuchtdichten über  $100 \text{ cd/m}^2$  im Bereich um 80 Hz liegt.

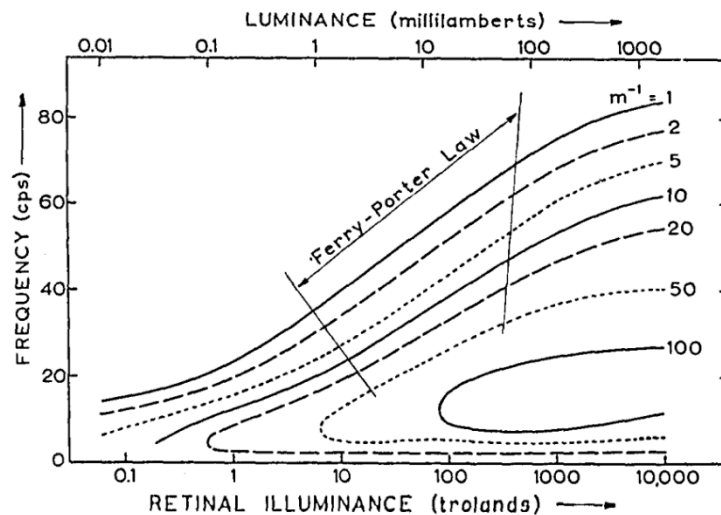


Abbildung 2.9: Abhängigkeit der FVF von der Leuchtdichte und der Modulationstiefe [43]

### 2.3.2 Stroboskopische Effekte

Der Eindruck eines konstanten Lichtreizes bei pulsierendem Licht entsteht nur in unbewegten Situationen [44]. In bewegten Situationen können Flimmerfrequenzen oberhalb der FVF spezielle visuelle Effekte hervorrufen, sogenannte Stroboskopeffekte.

Anschaulich betrachtet ist der Wechsel zwischen den Hell-Dunkel-Phasen bei pulsierendem Licht eine Abtastung, auf die das visuelle System mit der Interpolation der diskreten zeitlichen und räumlichen Informationen reagiert, um einen gleichmäßigen Bewegungseindruck hervorzurufen. Ob eine kontinuierliche Bewegung wahrgenommen wird, hängt von der Geschwindigkeit der Lichtquelle ab. Je höher sie ist, umso höher liegt die Grenze für die Flimmerfrequenz [45]. Abbildung 2.10 veranschaulicht diese Abhängigkeit: Das weiße Rechteck symbolisiert die Lichtquelle, dessen zeitlicher Leuchtdichteverlauf eine Rechteckschwingung (z. B. durch PWM) beschreibt. Während der Bewegung entstehen durch die Trägheit der lichtempfindlichen Rezeptoren räumlich verschobene Nachbilder der Lichtquelle auf der Netzhaut. In Abbildung 2.10 zeigt das linke Bild diesen Effekt für eine

langsame und das rechte Bild für eine schnelle Bewegung. Die Flimmerfrequenz ist in beiden Fällen gleich.



Abbildung 2.10: Nachbilder bei langsamer (links) und bei schneller Bewegung (rechts)

Die durch die schnelle Bewegung entstehenden Lücken zwischen den Nachbildern können je nach Situation zu Irritationen bzw. visuellen Täuschungen führen. Damit sie verschwinden, muss die von der Lichtquelle zurückgelegte Strecke  $s$  zwischen zwei Lichtpulsen mindestens der kleinsten Ausdehnung der Lichtquelle  $b$  in Bewegungsrichtung entsprechen. Somit gilt

$$b = s = vT = \frac{v}{f} \quad 2.5$$

Daraus folgt für die niedrigste Flimmerfrequenz, ab der die Lücke nicht entsteht

$$f = \frac{v}{s} \quad 2.6$$

Dabei ist  $v$  die Geschwindigkeit der Lichtquelle.

Da das räumliche Auflösungsvermögen des visuellen Systems begrenzt ist (bei einem normalsichtigen Menschen beträgt es eine Winkelminute), kann  $s$  dementsprechend länger sein. In einem Abstand zum Beobachter  $d$  ergibt sich

$$s = b + \varphi \cdot d \quad 2.7$$

mit  $\varphi$  als Auflösungsvermögen des Beobachters in rad.

Setzt man Formel 2.7 in Formel 2.6 ein, ergibt sich für die Grenzfrequenz

$$f_g = \frac{v}{b + \varphi \cdot d} = \frac{v/d}{b/d + \varphi} = \frac{\omega}{\beta + \varphi} \quad 2.8$$

mit der relativen Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  in rad/s und der kleinsten relativen Ausdehnung der Lichtquelle in Bewegungsrichtung  $\beta$  in rad.

Da in den vorangegangenen Überlegungen der Ursprung des flimmernden Lichts keine Rolle spielt, gilt die Formel 2.8 sowohl für selbstleuchtende als auch für lichtreflektierende Objekte. Nach einer etwas anderen Argumentation kommt STRAUß [46] in seiner Arbeit auf den gleichen Zusammenhang.

Weitere mögliche Einflussparameter für die Grenzfrequenz sind die Geometrie der Lichtquelle sowie der zeitliche Verlauf. Das soll am folgenden Beispiel verdeutlicht werden.

Je nach ihrer Form kann dieser Effekt bei Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz aus Formel 2.8 am Rande der Lichtquelle entstehen. Diesen Fall ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Die Nachbilder überlappen sich zwar, an ihren Rändern entsteht jedoch eine Welligkeit. Theoretisch gesehen, wird sie nur dann vom visuellen System nicht aufgelöst, wenn sie kleiner als die Winkel-Sehschärfe ist.

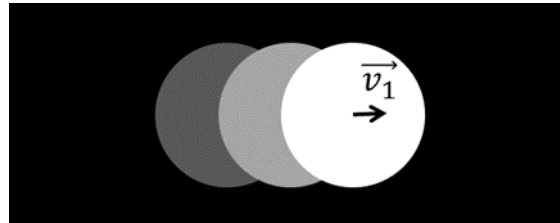


Abbildung 2.11: Nachbilder bei einer Flimmerfrequenz unter der Grenzfrequenz

Diese Welligkeit ändert sich mit dem Tastverhältnis der PWM. In Abbildung 2.12 sind sowohl die PWM-Frequenz, als auch die Geschwindigkeit der Lichtquelle in beiden Beispielen gleich. Aufgrund eines höheren Tastverhältnisses ist die Welligkeit im rechten Bild geringer als im linken. Das führt zu der Annahme, dass der Stroboskopeffekt bei einer konstanten Frequenz oberhalb eines bestimmten Tastverhältnisses, das von der Größe, Form und Leuchtdichte des Objektes abhängt, vom visuellen System nicht mehr wahrgenommen wird.

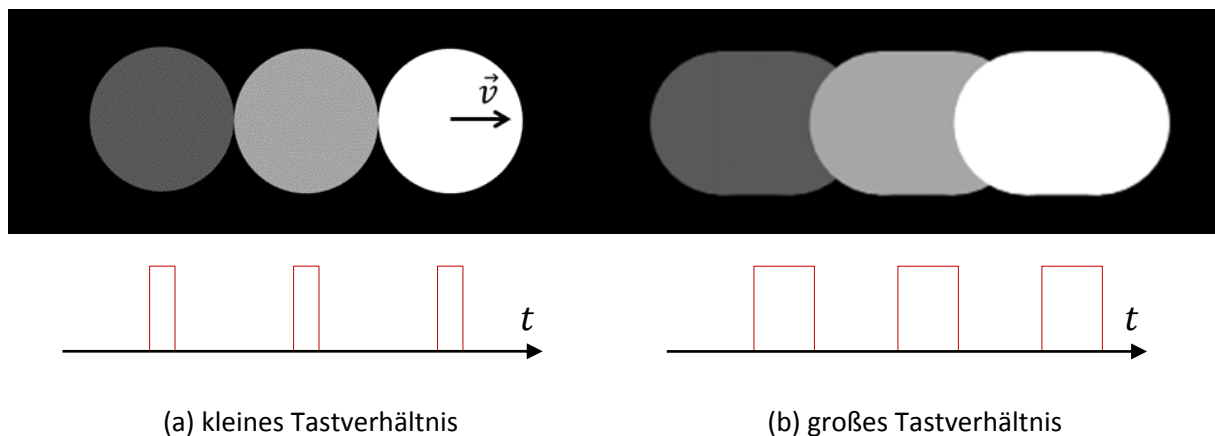
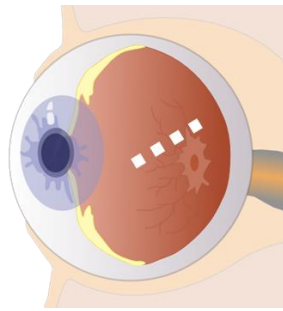


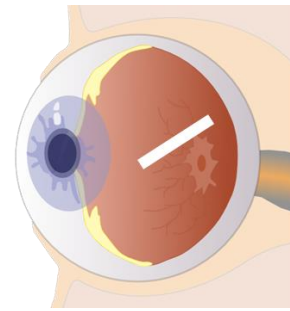
Abbildung 2.12: Stroboskopeffekt in Abhängigkeit des Tastverhältnisses

Neben der Geometrie der Lichtquelle und der PWM-Frequenz, spielt also das Tastverhältnis eine Rolle bei der Wahrnehmung des Stroboskopeffektes.

Der oben beschriebene Stroboskopeffekt kann sowohl bei schnellen Augen- als auch Objektbewegungen entstehen. Im Folgenden wird zwischen zwei Begriffen unterschieden. Der stroboskopische Effekt, der maßgeblich durch die schnellen Augenbewegungen – Sakkaden – entsteht, wird aufgrund des Erscheinens der Nachbilder als *Perlschnureffekt* bezeichnet. Abbildung 2.13 (a) zeigt schematisch die Abbildung einer PWM-gedimmten Lichtquelle auf der Netzhaut bei einer schnellen Augenbewegung und einem Tastverhältnis von 50 %. Für das Tastverhältnis von 100 % entsteht dagegen kein Perlschnureffekt (vgl. Abbildung 2.13 (b)).



(a)  $dc = 50\%$



(b)  $dc = 100\%$

Abbildung 2.13: Abbildung der Lichtquelle bei verschiedenen Tastverhältnissen

Die Effekte, die durch eine schnelle Objektbewegung unter einem PWM-gedimmten Licht entstehen, werden als *Stroboskopeffekt* bezeichnet. Abbildung 2.14 zeigt den Stroboskopeffekt bei schneller Handbewegung unter einer mittels PWM gedimmten LED-Beleuchtung (weitere Informationen in Kapitel 7).

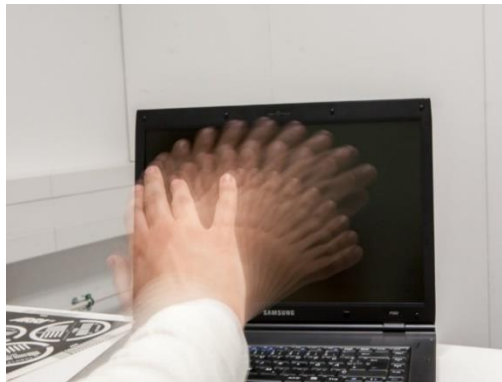


Abbildung 2.14: Stroboskopeffekt bei schneller Handbewegung

Der Perlschnureffekt wird in der englischsprachigen Literatur als phantom array [47], beads effect [48], [49] oder intersaccadic pattern [50] bezeichnet. Ein weiterer stroboskopischer Effekt ist der sogenannte Wagenradeffekt [51], der bei schnell rotierenden Rädern oder Arbeitsmaschinen eine langsamere Bewegung oder gar Stillstand vortäuscht. Im Gegensatz zu diesem Effekt entstehen der Perlschnureffekt und der in dieser Arbeit behandelte Stroboskopeffekt bei deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten und meistens geradlinigen Bewegungen.

### 3 Stand der Forschung

In der Literatur existiert eine Vielzahl an physiologischen Studien, die einen tiefen Einblick in das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges geben. Dabei liegt der Fokus auf der direkten Wahrnehmung von Flimmern. Es werden also überwiegend Modulationsfrequenzen unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz untersucht. In einem frühen Literaturüberblick nennt LANDIS im Jahr 1953 in seinem Buch [52] bereits hunderte Quellen. In den vergangenen 60 Jahren kamen zahlreiche weitere Studien hinzu. Lichttechnische Studien befassen sich erst seit einigen Jahren verstärkt mit der Wahrnehmung von Flimmereffekten bei Frequenzen über der FVF. Im Folgenden soll ein Überblick über einige Untersuchungen gegeben werden.

#### 3.1 Physiologische Studien

Der Schwerpunkt der ersten Studien, die sich mit der Wahrnehmung des modulierten Lichtes beschäftigten, lag auf dem zeitlichen Auflösungsvermögen des visuellen Systems. Als Modulationssignale wurden in der Regel periodische Rechteckschwingungen eingesetzt. Diese Studien bestätigten die Annahmen der Gesetze von FERRY [53] und Porter [54] sowie von Talbot [41].

IVES [55] zeigte 1922, dass Schwellenwerte für verschiedene Pulsformen aus den Ergebnissen, die durch das sinusförmiges Flimmern entstehen, berechnet werden können – eine Art Fourieranalyse. Dieser Ansatz wurde in den 1950er Jahren von DE LANGE [56] systematisch weitergeführt. In seinen Arbeiten betrachtete DE LANGE visuelle Prozesse aus systemtheoretischer Sicht und entwickelte dafür mathematische Modelle auf Basis der Fourieranalyse von Reizsignalen. In der Abbildung 3.1 sind die Zusammenhänge zwischen der Flimmerverschmelzungsfrequenz auf der Abszisse und der Welligkeit auf der Ordinate für vier verschiedene Modulationsformen unter drei Helligkeitsniveaus dargestellt. Die durchgezogenen Linien entsprechen dem aufgestellten Modell von DE LANGE.

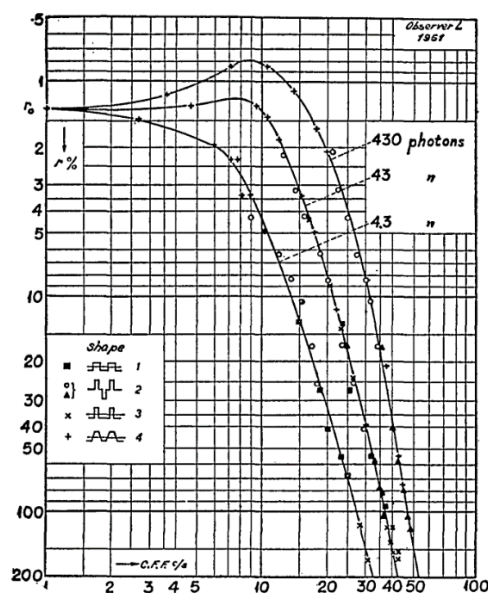


Abbildung 3.1: FVF bei 2° Testfeld in Abhängigkeit der Form des Flimmerns [56]

Die Welligkeit ist hier als Verhältnis der Amplitude der Grundschiwingung zum Mittelwert definiert. Dabei entsprach die Leuchtdichte des 60° Umfeldes der mittleren Leuchtdichte des 2° Testfeldes, das die Testperson foveal (0°) direkt anschaute. Untersucht wurde ausschließlich weißes Licht, das von einer Glühlampe erzeugt wurde. Dabei entsprechen 430 Photonen ca. 70 cd/m<sup>2</sup>. Somit zeigt der Verlauf dieser Kurven unter photopischen Lichtverhältnissen die maximale Empfindlichkeit auf. Mit abnehmender Leuchtdichte sinkt auch die Empfindlichkeit. Für große Welligkeiten sind höhere Frequenzen erforderlich, um das Flimmern wahrzunehmen. Die dabei maximal ermittelte FVF beträgt ca. 50 Hz. [56]

Aufbauend auf den Arbeiten von DE LANGE führte KELLY [41], [43], [57], [58] weitere umfangreiche Untersuchungen auf diesem Gebiet durch. Durch den Vergleich (Abbildung 3.2) seiner Ergebnisse mit anderen Studien stellte er fest, dass die Feldgröße einen Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung hat: bei kleinen Frequenzen sinkt die Flimmerempfindlichkeit mit zunehmender Größe, während im Bereich hoher Frequenzen die Ergebnisse nahezu identisch sind.

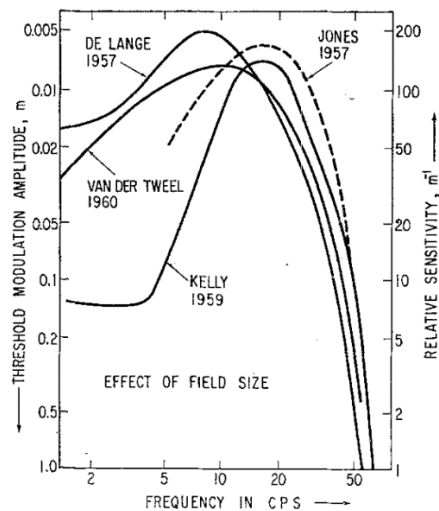


Abbildung 3.2: Vergleich der Untersuchungen mit verschiedenen Feldgrößen nach Kelly: 65°, Jones: 10°, De Lange: 2°, Van der Tweel: >2° [58]

Den Grund für die Abhängigkeit der FVF von der Feldgröße vermutet KELLY in der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen (vgl. Abschnitt 2.1.3) und in ihrer unterschiedlichen Verteilung in der Netzhaut (vgl. Abbildung 2.6). Das untersuchte er in einem weiteren Experiment [57] mit drei Lichtfarben eines Kathodenstrahlröhrenbildschirms (CRT, Cathode Ray Tubes). Zur spektralen Zusammensetzung der Reize macht er keine genauen Angaben. Folgende Peakwellenlängen können für CRT-Leuchtstoffe abgeschätzt werden: Blau 450 nm, Grün 531 nm. Der rote Leuchtstoff weist mehrere Peaks auf. Die wesentlichen Peaks liegen bei 590 nm, 620 nm, 710 nm. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3.3 zusammengefasst. Die maximale Empfindlichkeit in diesem Experiment lag beim Flimmern von grünem Licht (obere Kurve). Für das Flimmern von blauem Licht ergab sich die geringste Empfindlichkeit (untere Kurve). Es zeigt sich demnach, dass verschiedene chromatische Mechanismen des visuellen Systems unterschiedlich auf Flimmern reagieren. TYLER und HAMER [42] stellen in ihren Untersuchungen ebenfalls eine spektrale Abhängigkeit der FVF fest.

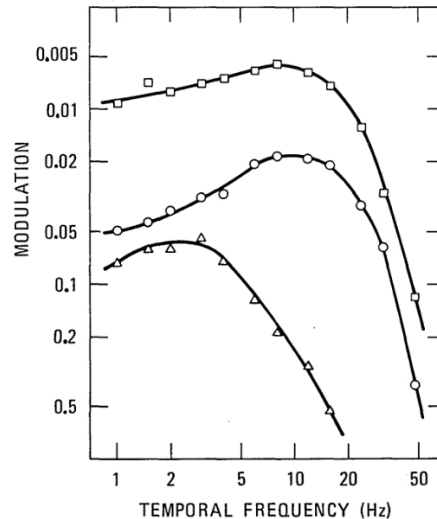


Abbildung 3.3: Empfindlichkeit chromatischer Mechanismen auf Flimmern aus [57]  
 □ M-Zapfen, ○ L-Zapfen, △ S-Zapfen

Neben der Stimulusgröße hat auch seine Position im Gesichtsfeld des Beobachters Einfluss auf die Flimmerverschmelzungsfrequenz. TYLER [59] variierte in seiner Arbeit den Ort des Reizes und beobachtete unterschiedliche Reaktionen des visuellen Systems. Dabei hielt er die Anzahl stimulierter Zapfen konstant. Als Lichtquelle verwendete er eine rote LED mit der Peakwellenlänge bei 660 nm. Das Ergebnis zeigt Abbildung 3.4 in einer topografischen Darstellung der Verteilung der FVF für ein Gesichtsfeld von 60°. Die gepunktete Fläche verdeutlicht den Bereich mit FVF > 60 Hz, während die dunkle Schattierung den Bereich mit FVF > 80 Hz darstellt. Seine Ergebnisse zeigen, dass das menschliche visuelle System im unteren und linken peripheren Bereich (ca. 15°) empfindlicher auf das Flimmern reagiert.

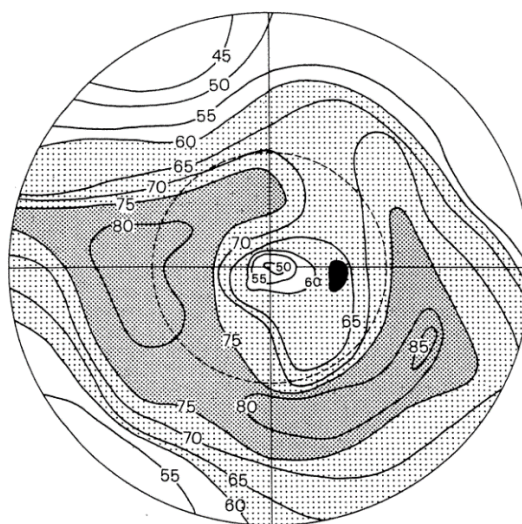


Abbildung 3.4: Verteilung der FVF für ein 60°-Gesichtsfeld aus [59]

BARTLEY und NELSON [60] untersuchten den Einfluss der FVF in Abhängigkeit von der Pulsdauer des Flimmerns. Sie stellten fest, dass die Erhöhung der Pulslänge nicht zwingend eine Reduktion der



FVF bewirkt. Es ergibt sich ein umgedrehter U-förmiger Verlauf mit einem Maximum bei Tastverhältnissen um 50%. Bei kleinen bzw. großen Tastverhältnissen fällt die FVF ab (vgl. Abbildung 3.5).

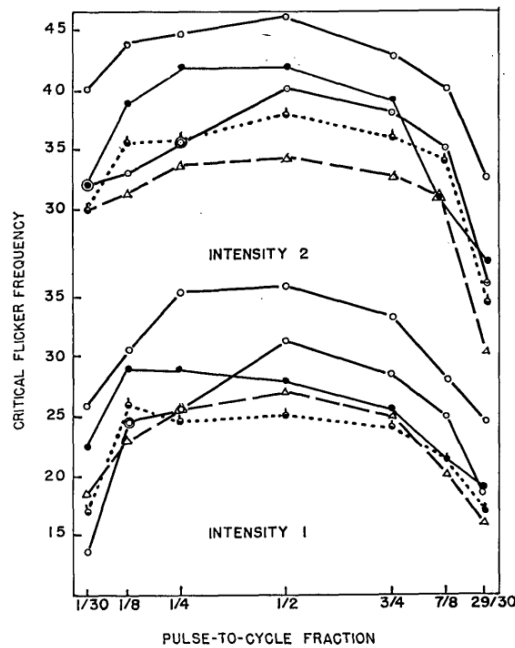


Abbildung 3.5: Zusammenhang zwischen FVF und Tastverhältnis für fünf verschiedene Probanden bei 0,3 cd/m<sup>2</sup> (Intensität 1) und 3 cd/m<sup>2</sup> (Intensität 2) aus [60]

Die Wahrnehmung von Flimmern variiert von Person zu Person. Vor allem der Einfluss des Alters stellt einen häufigen Untersuchungsgegenstand dar und prägt die Höhe der individuell wahrnehmbaren FVF. Studien belegen, dass im Durchschnitt mit zunehmendem Alter die FVF an allen Orten des visuellen Feldes abnimmt [61]. Aus Abbildung 3.6 geht hervor, dass im Alter von 20 Jahren die Menschen am empfindlichsten für das Flimmern sind. Des Weiteren sind keine signifikanten Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Personen zu beobachten [62].

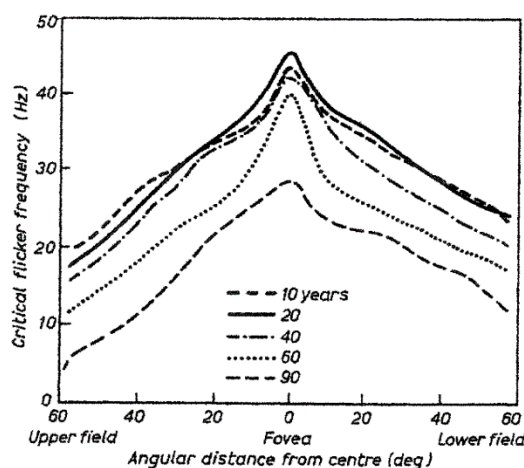


Abbildung 3.6: FVF in Abhängigkeit der Position des Reizes im Gesichtsfeld und des Alters aus [61]

In vielen physiologischen Untersuchungen wurden Hell-Dunkel-Muster mit einer bestimmten Ortsfrequenz als statisches Pendant zu Flimmereffekten genutzt. Dabei ist der Kontrast des Hell-Dunkel-



---

Musters mit der Modulationstiefe eines flimmernden Lichtreizes vergleichbar. Ähnlich wie bei zeitlich periodisch wechselnder Leuchtdichte gehören zu den Einflussparametern in diesem Fall der Kontrast, die Ortsfrequenz und der Ort des retinalen Reizes. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen, dass je komplexer die flimmernde Struktur bzw. je kleiner ihre Ortsfrequenz ist, umso niedriger ist die FVF. [63–65]

Die Ergebnisse, der oben beschriebenen Studien, wurden mithilfe psychophysiologischer Methoden ermittelt, die auf subjektiven Bewertungen der Testpersonen basieren. Bei elektrophysiologischen Untersuchungen werden dagegen Vitalparameter des menschlichen Körpers erfasst, die objektive Ergebnisse versprechen. Dabei können mithilfe eines Elektretinogramms (ERG) elektrische Potentiale der Netzhaut in Abhängigkeit vom Lichtreiz aufgezeichnet werden. Ein anderes Verfahren – die Elektroenzephalografie (EEG) – erfasst die elektrischen Aktivitäten des Gehirns, die durch elektrische Potentialänderungen an der Kopfoberfläche messbar sind. [66]

Untersuchungen mit beiden Verfahren belegen, dass das Nervensystem von Flimmerreizen angeregt wird, deren Frequenz über der subjektiven FVF liegt [67]. Das visuelle System zeigt also ein Filterverhalten, das die Wahrnehmung von Flimmern auf einen kleineren Frequenzbereich einschränkt.

BURNS et al. [68] konnten mit rechteck- und sinusförmigen Modulationen bei Frequenzen über 100 Hz Potentialänderungen in ERG messen. Zudem erfassten sie bei einer Flimmerfrequenz von 40 Hz die vierte Harmonische in der retinalen Reaktion.

Der Verlauf des visuell evozierten Potentials (VEP) bei einem EEG zeigt ebenfalls eine Reaktion auf Flimmereize bei Frequenzen über der FVF [69]. Besonders bei den Menschen, die an der fotosensitiven Epilepsie leiden, wurden starke Reaktionen in VEP bei Frequenzen über der FVF nachgewiesen [70]. Je stärker die VEP-Reaktion auf das intermittierende Licht ausfällt, umso wahrscheinlicher ist das Entstehen von Kopfschmerzen. Das gilt auch für nicht fotosensitive Menschen.

Epileptische Anfälle können nur bei direkt sichtbaren Flimmern bei Frequenzen unter 20 Hz ausgelöst werden. Das nicht wahrnehmbare Flimmern kann jedoch bei sehr empfindlichen Menschen zu Migräne führen [71]. Eine starke Empfindlichkeit auf intermittierendes Licht zeigen Personen, die unter photosensitiver Epilepsie [70], Elektrosensibilität [72], Asthenopie (unterschiedliche durch die Störungen des visuellen Systems verursachte Beschwerden) oder Migräne leiden.

WILKINS et al. [65] untersuchten den Einfluss von kontrastreichen Mustern, die sich räumlich und zeitlich wiederholend ändern. Die Ergebnisse zeigen, dass es zu einer Beeinträchtigung der Informationsverarbeitung in unserem Nervensystem führt. Als Folge sind negative Effekte hinsichtlich physiologischer und/oder psychologischer Funktionen zu verzeichnen.

Während zahlreiche physiologische Studien über die Messung der Flimmerverschmelzung vorliegen, existieren vergleichsweise wenige physiologische Grundlagenstudien über die indirekt wahrnehmbaren Flimmereffekte. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, kann das Betrachten eines bewegten Objektes unter Flimmerlicht zur Wahrnehmung von Stroboskopeffekten führen. Der Stroboskopeffekt ist im Zusammenhang mit flimmerndem Licht jedoch überwiegend dem lichttechnischen Forschungsfeld zuzuordnen (vgl. Abschnitt 3.2). Physiologische Grundlagenstudien über die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten beschränken sich in der Regel auf Stroboskopmuster als dissipative Struktur [73], den Wagenrad-Effekt bei kontinuierlicher Leuchtdichte [51] oder stroboskopische Scheinbewegungen (zum Beispiel das sogenannte Daumenkino) [74].

---

## 3.2 Lichttechnische Studien

---

Im Gegensatz zu physiologischen Studien wird der Fokus lichttechnischer Untersuchungen in der Regel auf eine anwendungsbezogene Problemstellung gelegt. Dabei werden überwiegend die für den privaten oder beruflichen Alltag relevanten Beleuchtungsbedingungen untersucht. Demnach weisen solche Studien einen stärkeren Praxisbezug auf. Viele Untersuchungen beschäftigen sich mit dem Einfluss der Beleuchtung auf die Leistungsfähigkeit bei der Arbeit oder in der Schule. Im Folgenden werden zunächst die Studien über Leuchtstofflampen, die in ihrer früheren Entwicklungsphase mit der doppelten Netzfrequenz von 100 Hz bzw. 120 Hz flimmerten, vorgestellt. Anschließend werden Untersuchungen über PWM-gedimmte Leuchten beschrieben.

### 3.2.1 Studien über Leuchtstofflampen

Die gravierendsten gesundheitlichen Effekte gehen von wahrnehmbaren Flimmerraten unterhalb der FVF aus. Jedoch zeigen diverse Studien mit Leuchtstofflampen, dass auch höhere Frequenzen Unbehagen, Ermüdung der Augen oder Kopfschmerzen auslösen können, da unser Nervensystem auch bei Frequenzen oberhalb der FVF angeregt wird.

Untersuchungen von VEITCH und McCOLL [75] zeigen, das Flimmern von Leuchtstofflampen zwar die Geschwindigkeit beim Lesen komplizierter Texte reduzieren, den wahrgenommenen visuellen Komfort hingegen nicht beeinflussen.

KENNEDY und MURRAY [76] berichten über die Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit und abnormale sakkadische Augenbewegungen. Obwohl das Flimmern von Leuchtstofflampen nicht direkt wahrnehmbar ist, kann es zur Erhöhung des Auftretens von Kopfschmerzen führen. Weitere negative Effekte von Flimmern können Panik- und Angstattacken darstellen [77]. Diesbezüglich hat die pulsierende Leuchtdichte einen signifikanten Einfluss auf die Befindlichkeit der Menschen und ist entscheidend für die Stärke der Effekte [78].

SMITH untersuchte in ihren Studien [67] Augenbeschwerden bei Arbeiten im Büro unter Leuchtstofflampen, die mit 100 Hz flimmern. Dabei stellte sie fest, dass Augenbeschwerden nicht nur auf die Beleuchtung, sondern auch auf das Lesen von Texten zurückzuführen sind. Hierbei wird eine Begünstigung für die Überanstrengung des visuellen Systems vermutet. Eingehende Untersuchungen fehlen jedoch bislang. Die Untersuchungen stellen jedenfalls fest, dass Menschen, die empfindlich auf flimmerndes Licht reagieren, häufig auch sensibel hinsichtlich kontrastreicher Muster sind.

WILKINS und WILKINSON stellten in ihren Untersuchungen [79] fest, dass Flimmern von Leuchtstofflampen (100-120 Hz) negative Effekte wie Kopfschmerzen oder Überanstrengung der Augen bewirken, da es einen Einfluss auf die neuronale Verarbeitung und damit auf die Bewegungen des Auges hat.

Mittels eines elektronischen Vorschaltgerätes lassen sich negative Effekte bei Leuchtstofflampen nachweislich reduzieren. Dabei werden sie mit Wechselstrom mit einer deutlich höheren Frequenz von 45 kHz betrieben [76].

---

### 3.2.2 Studien über PWM-gedimmte LED-Leuchten

Während zahlreiche Untersuchungen über den Einfluss des Lichtes von Leuchtstofflampen auf das visuelle System im speziellen und auf die Gesundheit der Menschen generell vorliegen, existieren vergleichsweise wenige Studien über Flimmereffekte bei PWM-gedimmter LED-Beleuchtung.

Die Studie von WATSON et. al [45] zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit einen stroboskopischen Effekt wahrzunehmen mit steigender Modulationstiefe größer wird. Dabei ist die Modulationstiefe nach Formel 3.1 definiert:

$$m = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad 3.1$$

$L_{max}$  ist die maximale und  $L_{min}$  die minimale Leuchtdichte. Bei der PWM-Dimmung entspricht die minimale Leuchtdichte der Umgebungsleuchtdichte ohne LED-Beleuchtung. Diese ist in der Regel deutlich geringer als die maximale Leuchtdichte, so dass sich für die Modulationstiefe ein Wert nahe 100 % ergibt.

BULLOUGH et al. [80] untersuchten mit einer LED-Schreibtischleuchte den Einfluss der Frequenz, der Modulationstiefe, der Farbtemperatur und des Verlaufs des Modulationssignals auf die Wahrnehmung der Flimmereffekte. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass direkt sichtbares Flimmern bei einer Beleuchtungsstärke auf der Tischoberfläche von 400 lx bis 60 Hz entsteht. Oberhalb von 100 Hz wird selbst bei der Modulationstiefe von 100 % kein Flimmern wahrgenommen. Des Weiteren wurde der Stroboskopeffekt untersucht. Um ihn zu provozieren, haben die Testpersonen die Aufgabe ihre Hand schnell unter der Leuchte zu bewegen. Die Autoren stellten fest, dass der Stroboskopeffekt bis 300 Hz wahrnehmbar ist. Höhere Frequenzen wurden nicht untersucht. Ein Tastverhältnis von 10 % wurde dabei als weniger angenehm empfunden als 50 %. Die Farbtemperatur und die Modulationssignalfrequenz hatten keinen signifikanten Einfluss auf die direkte oder indirekte Wahrnehmung von Flimmern.

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung ermittelten BULLOUGH et al. [81] potenzielle Interaktionseffekte und zugleich die Schwellenfrequenz des Stroboskopeffekts. Sie stellten fest, dass die Wahrnehmung und Akzeptanz von Stroboskopeffekten von der Höhe der Frequenz und der Modulationstiefe beeinflusst wird. Oberhalb von 1000 Hz hat die Höhe der Modulationstiefe keinen Einfluss auf die Akzeptanz der Lichtbedingungen, sondern nur noch auf die Wahrnehmung von Stroboskopeffekten. Erst ab 1000 Hz wurde der Stroboskopeffekt von den Probanden als akzeptabel und nicht störend bewertet. Im Durchschnitt wurde der Stroboskopeffekt bis 1000 Hz wahrgenommen, im Einzelfall jedoch bis 10000 Hz. Da diese Studien in abgedunkelten Räumen mit dunklem Hintergrund durchgeführt wurden, handelt es sich um extreme Bedingungen. Das Auftreten von Stroboskopeffekten ist dabei besonders wahrscheinlich.

In einer Untersuchung von VOGELS et. al [82] äußerten einige Probanden, dass sie aufgrund der AC-LEDs, die mit einer doppelten Netzfrequenz flimmern, eine erhöhte Unruhe und Müdigkeit verspürten.

Wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben, kann der Stroboskopeffekt durch die schnelle Augenbewegung entstehen. In diesem Fall wird der Stroboskopeffekt als Perlschnureffekt bezeichnet. Der Perlschnur-

---

effekt tritt vor allem bei sehr schnellen Sakkaden mit Geschwindigkeiten bis zu  $1000^\circ/\text{s}$  auf. Während einer Sakkade tritt die sakkadische Suppression ein. Hierbei findet die Unterdrückung von Seheindrücken während der Augenbewegung statt. Diese Unterdrückung führt dazu, dass die Fixationspunkte, zwischen denen die Sakkade ausgeführt wird, scharf und nicht durch die Bewegung verschwommen wahrgenommen werden [83]. Genau genommen handelt es sich dabei nicht um eine vollständige Unterdrückung der Reizverarbeitung, sondern vielmehr um eine Anhebung der Wahrnehmungsschwelle in Abhängigkeit von der jeweiligen Adaptionsleuchtdichte [84].

STRAUß [46] untersuchte den Perlschnureffekt in Bezug auf seine Entstehung bei PWM-gedimmten LED-Heckleuchten. Er vermutet, dass die Schwellenfrequenz des Perlschnureffekts kein absoluter Wert ist, sondern von der Umgebungsleuchtdichte abhängt. Nachts ist dieser Schwellwert niedriger als die Leuchtdichte einer Heckleuchte, so dass die Unterdrückung nicht funktioniert. Dadurch wird das Bild während einer Sakkade weiterverarbeitet und der Perlschnureffekt tritt auf [50]. STRAUß empfiehlt auf Basis seiner Studien für das Design von Heckleuchten eine möglichst breite Konstruktion der leuchtenden Flächen, um die Irritationen anderer Verkehrsteilnehmer durch den Perlschnureffekt bei schnellen Augenbewegungen zu vermeiden.

BRÜCKNER und KHANH [48] stellten fest, dass insbesondere beim Anblicken PWM-gedimmter LED-Heckleuchten eines überholenden Fahrzeuges eine PWM-Frequenz von 300-400 Hz erforderlich ist, um die Wahrnehmung des Perlschnureffektes weitgehend zu vermeiden. Bei peripheren Beobachtungen ist der Effekt hingegen nicht wahrnehmbar.



Abbildung 3.7: Perlschnureffekt bei PWM-gedimmten LED-Heckleuchten aus [48]

In Anlehnung an dieses Problem haben ROBERTS und WILKINS [50] für eine sinusförmig modulierte vertikale Linie an einem Oszilloskop und eine Sakkadenamplitude von  $40^\circ$  eine durchschnittliche Schwellenfrequenz von 1,67 kHz ermittelt. Bei einer Sakkadenamplitude von  $20^\circ$  erhöhte sich diese Frequenz auf 2,35 kHz. Laut der Autoren ist bei rechteckförmiger Modulation mit 120 Hz lediglich eine Modulationstiefe von 10 % erforderlich, um den Perlschnureffekt während schneller Augenbewegungen deutlich wahrzunehmen.

KALTENBACH [44] bewertete unterschiedliche Maßnahmen zur Reduktion der Auffälligkeit des Perlschnureffekts bei einer gegebenen Frequenz von 100 Hz und einem Tastverhältnis von 50 %. Dazu untersuchte der Autor verschiedene Verläufe des Modulationssignals (vgl. Abbildung 3.8). Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Modulationstiefe (Testsignal 2 in Abbildung 3.8) die Wahrnehmung eines Schweißs an den einzelnen Elementen der Perlschnur bewirkt und damit die Auffälligkeit des Effekts reduziert.

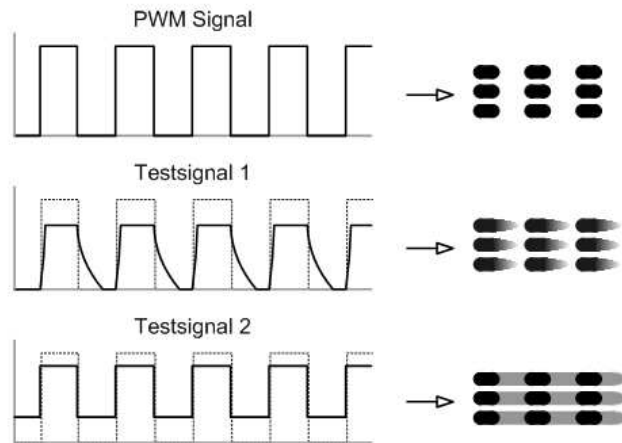


Abbildung 3.8: Modulationssignale und visuelles Signalbild bei drei bewegten LEDs aus [44]

HERSHBERGER und JORDAN [47] haben gezeigt, dass bei einer Frequenz von 200 Hz, einem Tastverhältnis von 25 % und maximaler Modulationstiefe die meisten Probanden (97 %) in der Lage sind den Perlschnureffekt wahrzunehmen.

### 3.3 Zusammenfassung

In der vorliegenden Literatur konnte kein einheitliches theoretisches Modell über die Reaktion des visuellen Systems auf moduliertes Licht formuliert werden. Dennoch geben zahlreiche physiologischen Studien einen tiefen Einblick in das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Sie beschäftigen sich jedoch überwiegend mit direkt wahrnehmbarem Flimmern auf physiologischer Ebene und zeigen bislang nur wenige Verbindungen zu praxisbezogenen lichttechnischen Problemstellungen.

Die Studien über Leuchtstofflampen zeigen, dass die Wirkung von intermittierendem Licht für körperliche und psychische Funktionen des Menschen Gefahren birgt.

Der Einfluss der PWM-gedimmten LED-Beleuchtung auf die Menschen ist weitestgehend unerklärt und bisher kaum untersucht. Die Forschungsergebnisse lassen zwar die Annahme zu, dass modulierte LED-Beleuchtung mit den gleichen potentiellen Risiken einhergeht wie die mit Leuchtstofflampen. Dies gilt jedoch für die Modulationsfrequenzen von 100 Hz bzw. 120 Hz. Die einigen wenigen Studien über PWM-gedimmte LED-Beleuchtung zeigen, dass stroboskopische Effekte bei Fluktuationsfrequenzen von über 1000 Hz wahrgenommen werden können.

Schlechte, irritierende oder unangenehme Sichtverhältnisse beanspruchen das visuelle System. Dies kann sich negativ auf die Konzentration des Menschen auswirken und beispielsweise eine höhere Fehlerquote am Arbeitsplatz mit sich bringen.

In der Praxis sind die Erkenntnisse über Flimmereffekte besonders für die Automobilbranche von Bedeutung, da die Wahrnehmung derartiger Effekte Verkehrsteilnehmer ablenken und damit eine Unfallgefahr darstellen könnte. Studien über stroboskopische Effekte bei PWM-gedimmter Frontbeleuchtung im Automobil fehlen allerdings bislang.

---

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse über den Perlschnureffekt bei PWM-gedimmten Heckleuchten und zahlreicher Beschwerden von Verkehrsteilnehmern haben die Automobilhersteller die PWM-Frequenz der LED-Heckleuchten von 100 Hz auf über 150 Hz (in einigen Heckleuchten auf bis zu 600 Hz) erhöht. Eine weitere Frequenzerhöhung ist aufgrund auftretender Wechselwirkungen mit hohen Kosten verbunden. Die oben aufgeführten Studien bieten allerdings Grund zur Annahme, dass eine in Kfz-Beleuchtung weit verbreitete PWM-Frequenz von 200 Hz nicht ausreicht, um die Wahrnehmung des Perlschnureffekts zu verhindern.

Aus den vorliegenden Studien lassen sich folgende Faktoren, die die Wahrnehmung von Flimmereffekten beeinflussen, ableiten.

- Leuchtdichte des Reizes
- Größe und Form des Reizes
- Position im Gesichtsfeld des Beobachters
- Alter des Beobachters
- Kontrast zur Umgebung
- Umgebungsleuchtdichte
- Modulationstiefe
- Modulationsgrad (Tastverhältnis bei PWM)
- Modulationsfrequenz

Der wohl einflussreichste Parameter, um wahrnehmbaren Flimmereffekten entgegenzuwirken, ist die Modulationsfrequenz sowohl für direkt wahrnehmbares Flimmern, als auch für stroboskopische Effekte. Aus diesem Grund wurde sie bei Leuchtstofflampen mittels elektronischen Vorschaltgeräts in höheren kHz-Bereich angehoben. Aufgrund einer großen Einschaltzeit ergibt sich für Leuchtstofflampen eine kleine Modulationstiefe, die eine akzeptable Auswirkung auf die EMV hat. Durch eine kurze Einschaltzeit ist hingegen die Modulationstiefe von LED-Beleuchtung auch bei hohen PWM-Frequenzen nahezu 100 %. In Kapitel 4 wird eine Methode vorgestellt, die dieses Problem unter bestimmten Voraussetzungen lösen kann.

## 4 Methode zur Reduzierung von Flimmereffekten

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien in Kapitel 3 zeigen, dass sich verschiedenen Flimmereffekte vor allem durch die Erhöhung der Fluktationsfrequenz reduzieren lassen. In der Praxis ist zwar die Erhöhung der Modulationsfrequenz technologisch möglich, sie ist jedoch hinsichtlich der EMV mit erheblichen Kosten verbunden. Ausgehend von dieser Problematik wurde eine Methode erarbeitet, die eine Erhöhung der Fluktationsfrequenz des Lichtes ermöglicht, ohne dabei die PWM-Frequenz anzuheben. Diese wird im Folgenden genauer beschrieben.

Der Lichtstrom einer einzigen LED ist für viele Anwendungen nicht ausreichend. Deshalb bestehen LED-Leuchten in der Regel aus mehreren LEDs. Dabei überlappen sich oft ihre Lichtstärkeverteilungen. Dieses Überlappen eröffnet eine zusätzliche Dimension zur Reduzierung der Flimmereffekte.

Die Lichtstärke summiert sich in Bereichen, in denen sich die Lichtverteilungen überlappen. Sind die LEDs mit demselben PWM-Signal angesteuert, so ergibt sich beispielsweise bei zwei LEDs ein zeitlicher Verlauf, der in Abbildung 4.1 (a) dargestellt ist. Dabei können sich die maximalen Teil-Lichtstärken einzelner LEDs unterscheiden. In diesem Beispiel ist  $I_2 = 0,6 \cdot I_1$ .

Durch eine zeitliche Verschiebung der PWM-Signale ist es jedoch möglich, die Fluktationsfrequenz der gesamten Lichtstärke zu erhöhen. Bei einer Verschiebung um eine halbe Zeitperiode verdoppelt sich sogar die Frequenz. Dieser Fall ist in Abbildung 4.1 (b) dargestellt.

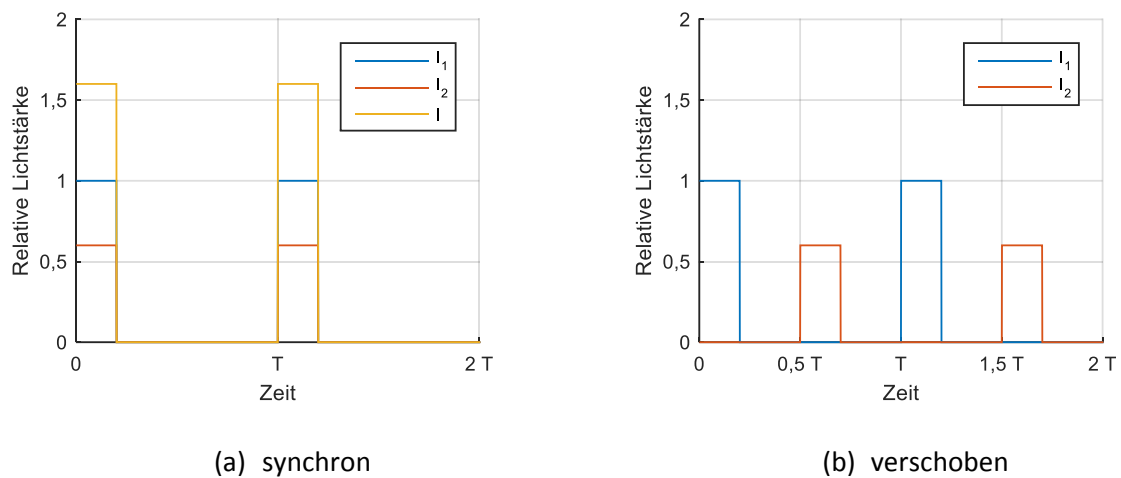


Abbildung 4.1: Zeitlicher Verlauf der Lichtstärke beim Überlappen der Lichtstärkeverteilungen

Die Verschiebung der PWM-Signale hat mehrere Effekte zur Folge, die zur Reduktion der Flimmereffekte beitragen. Zum einen erhöht sich die Flimmerfrequenz. Bei  $N$  LEDs und einer Verschiebung  $T/N$  zwischen jedem PWM-Signal erhöht sich nach Formel 4.1 die Flimmerfrequenz  $f_{Flimmer}$  um Faktor  $N$  gegenüber der PWM-Frequenz  $f_{PWM}$ .

$$f_{Flimmer} = N \cdot f_{PWM} \quad 4.1$$



Dabei ergibt sich eine kürzere Periodendauer. Da sich jedoch die Einschaltzeit einzelner LEDs nicht ändert, erhöht sich nach Formel 4.2 auch das Tastverhältnis des resultierenden Flimmerns, was vor allem zur Reduzierung der Stroboskopeffekte führt.

$$dc_{Flimmer} = \frac{T_{ein}}{T_{Flimmer}} = T_{ein} \cdot f_{Flimmer} = T_{ein} \cdot N \cdot f_{PWM} = N \frac{T_{ein}}{T_{PWM}} = N \cdot dc_{PWM} \quad 4.2$$

Des Weiteren entsteht bei  $dc > 1/N$  eine konstante Komponente im zeitlichen Verlauf der summierten Lichtstärke. Diese entspricht mindestens der unter den LEDs minimalen Teil-Lichtstärke. Den Fall, dass zwei LEDs eine gleiche maximale Lichtstärke erzeugen, zeigt Abbildung 4.2 (a). Falls sich die maximalen Lichtstärken der LEDs unterscheiden, können je nach Tastverhältnis überlagerte Fluktuationen entstehen. Dieser Fall ist in Abbildung 4.2 (b) dargestellt. Ihre Frequenzen sind jedoch mindestens so groß wie die PWM-Frequenz.

Die konstante Komponente erhöht sich um die minimale Teil-Lichtstärke bei jedem Überschreiten des Tastverhältnisses von  $K/N$ , mit ganzzahligem  $K \leq N$ . Bei gleichen Teil-Lichtstärken entsteht für  $dc = K/N$  sogar kein Flimmern. Zudem ist die maximale Änderung der Lichtstärke, die je nach Tastverhältnis entstehen kann, gleich der maximalen Teil-Lichtstärke. Demnach führt es zur Reduktion der Modulationstiefe und damit zur Reduktion der Flimmereffekte. Zudem wirkt sich eine niedrigere Modulationstiefe positiv auf die EMV aus.

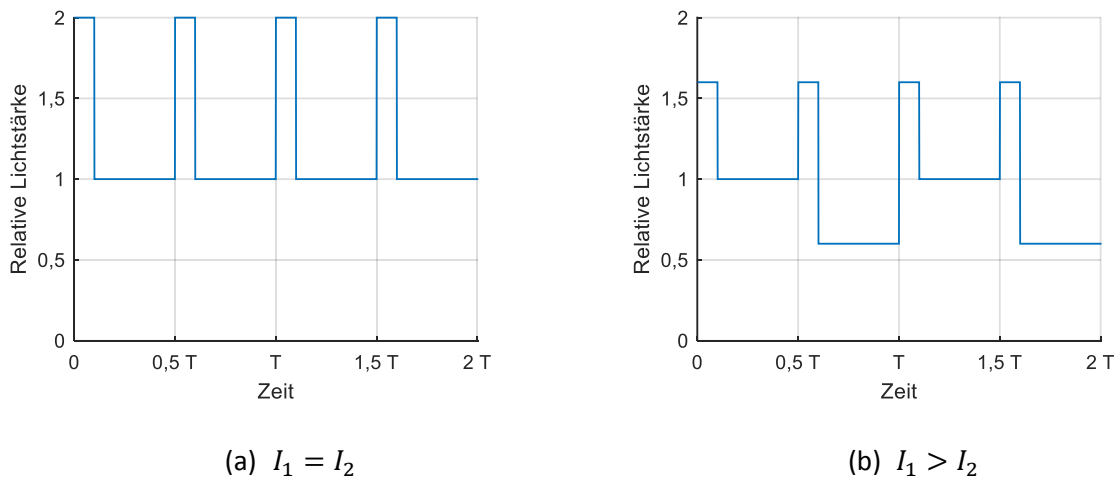


Abbildung 4.2: Zeitlicher Verlauf der überlagerten Lichtstärke bei zwei phasenverschobenen PWM mit  $dc = 60\%$

Dieses Prinzip wird in einigen Untersuchungen angewendet, die im Folgenden beschrieben sind.



---

## 5 Laboruntersuchungen

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit vier Laboruntersuchungen zur Bestimmung der Grenzfrequenz des direkt wahrnehmbaren Flimmerns und des Perlschnureffekts. Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen haben das Ziel, die genannten Flimmereffekte hinsichtlich der Anwendung der PWM-gedimmten LEDs in der Innen- und Frontbeleuchtung im Automobil zu untersuchen.

In Abschnitt 5.1 soll zunächst die Flimmerverschmelzungsfrequenz für den Fall einer gedimmten Frontbeleuchtung ermittelt werden. Abschnitt 5.2 beschäftigt sich mit der Grenzfrequenz des Perlschnureffektes bei schnellen Augenbewegungen und für die Kfz-Innenraumbeleuchtung relevanten Leuchtdichten. Anschließend beschreiben Abschnitte 5.3 und 5.4 die Untersuchungen zur Bestimmung des Perlschnureffekts, der durch die PWM-gedimmte Frontbeleuchtung entsteht, unter möglichst realistischen Bedingungen. In Abschnitt 5.5 werden die Ergebnisse zusammengefasst und für die Praxis relevante Erkenntnisse abgeleitet.

Teile der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen sind bereits in [85], [86] behandelt. In diesem Kapitel werden sie ausführlicher analysiert.

---

### 5.1 Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF)

---

Die in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Studien über die Flimmerverschmelzungsfrequenz bei weißem Licht wurde mithilfe von Glühlampen erzeugt. Aus weiteren Studien geht hervor, dass die spektrale Zusammensetzung des Lichts die Wahrnehmung des Flimmerns beeinflusst. In Abbildung 5.1 sind die Unterschiede der Spektren einer Glühlampe und LED deutlich zu erkennen. Demnach sind Unterschiede in der Flimmerwahrnehmung möglich.

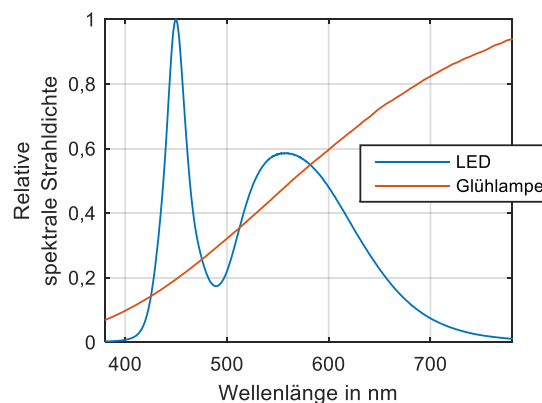


Abbildung 5.1: Vergleich der Spektren von LED und Glühlampe

Das im Folgenden beschriebene Experiment zielt unter anderem darauf ab, die Flimmerverschmelzungsfrequenz für typische kaltweiße, in der Kfz-Frontbeleuchtung verwendete LEDs zu bestimmen.

## 5.1.1 Ziele der Untersuchung

Bei einem Multispotsystem (s. Abschnitt 1.1) erzeugen die Segmente zur Beleuchtung der Fahrbahnmitte den maximalen Lichtstrom, vorausgesetzt, dass sich keine anderen Verkehrsteilnehmer in diesen Bereichen befinden. Die Segmente, in denen die Fahrzeugkamera keine für den Fahrer relevanten Informationen detektiert, werden gedimmt. Dadurch benötigt das Scheinwerfersystem auch weniger Energie. In den meisten Verkehrssituationen werden die vom Straßenrand entfernten Segmente gedimmt. Der Fahrer ist jedoch gerade im peripheren Gesichtsfeld besonders flimmerempfindlich. Somit hat das im Folgenden beschriebene Experiment das Ziel, in einer Probandenuntersuchung die FVF unter den für die Kfz-Frontbeleuchtung relevanten Bedingungen zu bestimmen. Dabei wird der Extremfall untersucht, dass alle Segmente gleichzeitig heruntergedimmt sind.

## 5.1.2 Versuchsaufbau

Für die Untersuchungen im Labor wurde ein Versuchsaufbau entwickelt. Dieser besteht aus drei wesentlichen Komponenten: der Beobachtungsbox, der Beleuchtungseinheit und der Steuerungssoftware.

Die Abmessungen der Beobachtungsbox betragen  $800 \times 1800 \times 800$  mm (Höhe  $\times$  Breite  $\times$  Tiefe). Um unerwünschte Reflexionen an den Innenwänden zu vermeiden, sind sie mit schwarzem Molton überzogen. An der Vorderseite der Beobachtungsbox befindet sich eine Öffnung mit einer davor befestigten Kopf- und Kinnstütze. Diese dient zur Fixierung des Kopfes der Testperson und gewährleistet somit gleiche Sehbedingungen für alle Testpersonen.

Die Beleuchtung besteht aus einer Hochleistungs-LED mit einer Farbtemperatur von 5700 K. Ihr Spektrum ist Abbildung 5.1 zu entnehmen. Zur Versorgung der LED dient die Stromquelle ITC4005 von Thorlabs. Der Signalgenerator vom Typ Agilent 33220a steuert die Stromquelle mit einem einstellbaren PWM-Signal an. Als Eingabegerät für Probanden kommt ein Xbox-Controller zum Einsatz. Die Ansteuerung aller Geräte erfolgt über einen PC. Zur Ansteuerung, Datenerfassung und -analyse, Kalibrierung und Versuchsdurchführung wurde eine Software in der Programmiersprache C# entwickelt. Diese dient auch als Basis für die Steuerungssysteme in weiteren Untersuchungen. Abbildung 5.2 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.

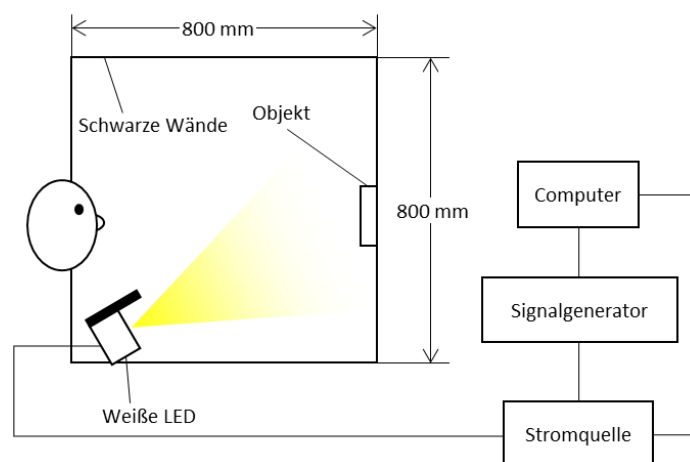


Abbildung 5.2: Laboraufbau

Als Reize dienen in diesem Versuch drei weiße Felder (vgl. Abbildung 5.3), die auf der Rückwand der Beobachtungsbox befestigt sind und von der Beleuchtungseinheit angestrahlt werden. Die Beleuchtung ist direkt unter der Beobachtungsöffnung so positioniert, dass die weißen Felder gleichmäßig angestrahlt werden. Eine Blende über der Beleuchtung sorgt dafür, dass die Testperson keine direkte Sicht auf sie hat.

Als Fixationspunkt dient eine in der Mitte des mittleren Feldes angebrachte rote LED (Peak-Wellenlänge bei 632 nm). Ihre Leuchtdichte wird konstant gehalten und beträgt  $0,05 \text{ cd/m}^2$ .

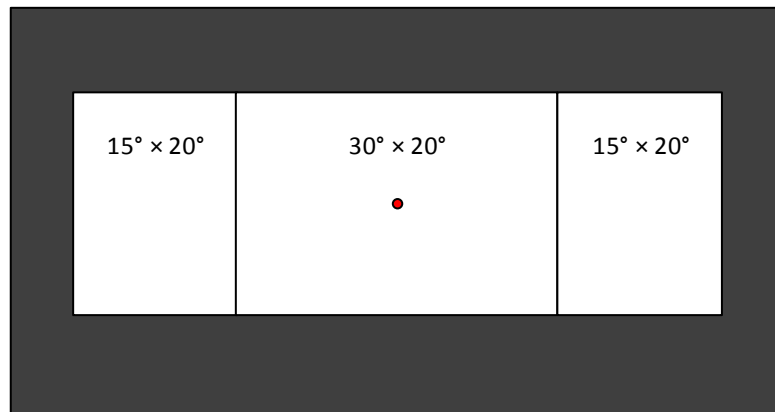


Abbildung 5.3: Drei Felder aus Sicht der Testperson, Fixationspunkt in der Mitte

## 5.1.3 Methodik

### 5.1.3.1 Versuchsbedingungen

Während des Versuchs werden 5 verschiedene Kombinationen aus weißen Feldern abwechselnd untersucht (vgl. Tabelle 5.1). Dabei besteht die Aufgabe der Testperson die rote LED in der Mitte der Rückwand anzuschauen, zu fixieren und Flimmern an den Feldern bei verschiedenen PWM-Frequenzen zu erkennen.

Die Kombinationen, Positionen und Größe der Felder sind an verschiedene Fahrsituationen angelehnt. Tabelle 5.1 fasst die untersuchten Objektkombinationen zusammen.

Tabelle 5.1: Kombinationen der Reize

Kombination	30°	15° links	15° rechts	Abbildung auf der Netzhaut
1	x	x	x	foveal
2	x			foveal
3		x		peripher
4			x	peripher
5		x	x	peripher

Der gesamte Bereich von allen 3 Feldern beträgt ca.  $60^\circ \times 20^\circ$  (Kombination 1) und entspricht den Abmessungen der gesamten Kfz-Lichtverteilung. Vor allem auf kurvigen Straßen durch den Wald

entstehen in diesem Bereich Reflexionen des Scheinwerferlichts an verschiedenen Objekten (vgl. Abbildung 5.4).

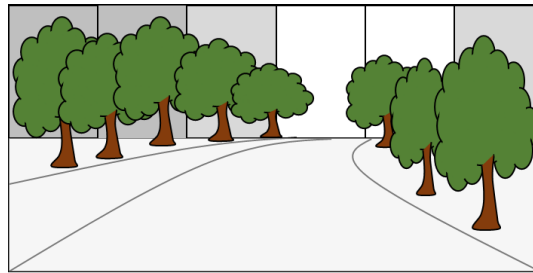


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung einer kurvigen Waldstraße

Die kleinen seitlichen Felder bilden jeweils einzeln (Kombinationen 3 und 4) und einmal gemeinsam (Kombination 5) einen Reiz. Dabei wird der Fall untersucht, wenn Objekte peripher am Straßenrand erscheinen. Das mittlere Feld mit  $30^\circ \times 20^\circ$  (Kombination 2) dient zur Abschätzung des Einflusses der Feldgröße. Alle Kombinationen werden nacheinander in einer randomisierten Reihenfolge dargestellt.

Die mittlere Leuchtdichte des Fahrzeugumfeldes bei Nacht beträgt ca.  $0,5 \text{ cd/m}^2$ . Für jede Kombination wurde in der Vorbereitungsphase ein entsprechender LED-Strom ermittelt.

Wie bereits in vorigen Kapiteln erwähnt, beschäftigt sich diese Arbeit mit Flimmereffekten, die durch in der Praxis übliche PWM-Signale verursacht werden. Daher wurde an einem Multispot-Prototypen (s. Kapitel 6) im äußeren Bereich mit Hilfe einer Fotodiode das PWM-Signal gemessen. Für das Tastverhältnis ergab sich ein Wert von 15 % bei einer Modulationstiefe von 100 %. Diese Parameter werden in der Untersuchung verwendet und konstant gehalten. Somit ist die PWM-Frequenz die einzige Variable.

### 5.1.3.2 Versuchsaufbau

Da die Untersuchung unter mesopischen Lichtbedingungen stattfindet (vgl. Kapitel 2.1), ist für die Probanden vor dem Versuchsbeginn Dunkeladaptation von 15 min erforderlich. Danach beginnt die Ermittlung der Flimmerverschmelzungsfrequenz für jedes Sehobjekt. Abbildung 5.5 zeigt das Ablaufdiagramm dieses Versuchs.

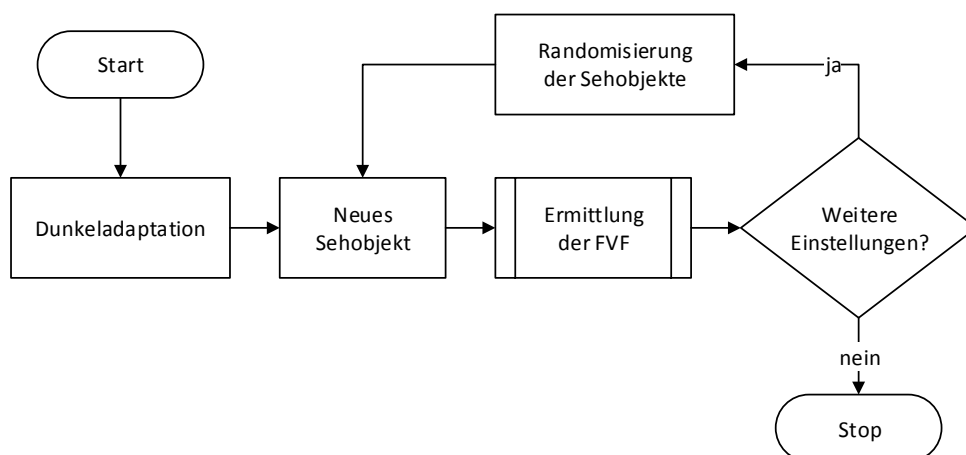


Abbildung 5.5: Ablaufdiagramm des Versuchs zur Ermittlung der FVF

Die Ermittlung der Flimmerverschmelzungsfrequenz verläuft nach der sogenannten Staircase-Methode [87]. Dabei handelt es sich um ein adaptives Verfahren zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle. Das Ablaufdiagramm für dieses Verfahren ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Nach jeder Reizdarbietung wird zunächst die Eingabe der Person abgewartet. Je nachdem, ob die Person das Flimmern wahrnimmt, drückt sie eine entsprechende Taste. Beim Erkennen des Flimmerns wird die Frequenz um eine festgelegte Schrittweite erhöht, beim Nichterkennen herabgesetzt. Wenn das Abbruchkriterium nicht erfüllt ist, wiederholt sich der Durchlauf mit einer neuen Frequenz. Sobald in der Antwortreihenfolge der Testperson ein Richtungswechsel stattfindet, wird die Schrittweite um einen Faktor reduziert.

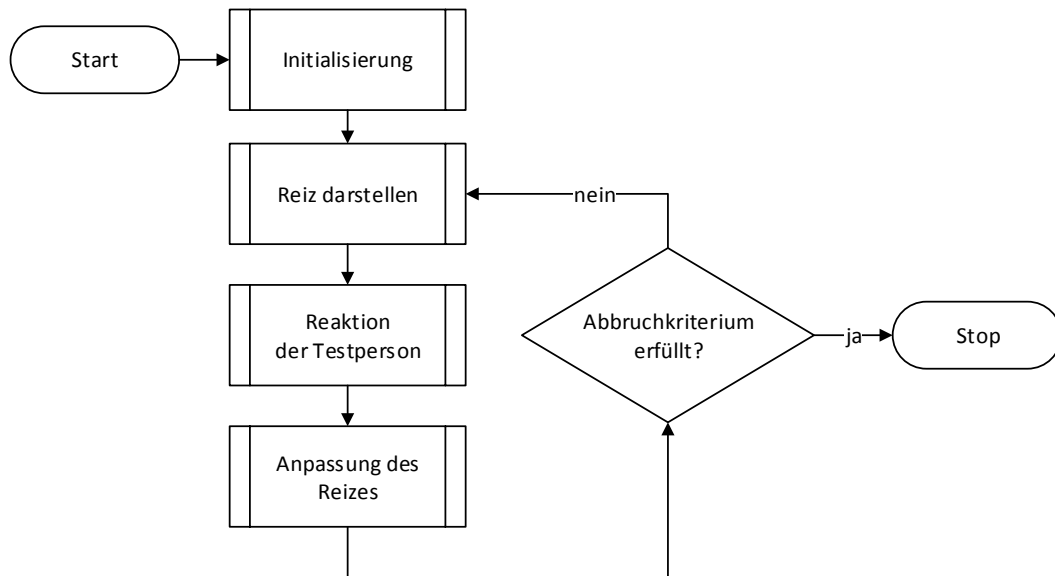


Abbildung 5.6: Ablaufdiagramm der Staircase-Methode

In diesem Versuch wird eine erweiterte Staircase-Methode eingesetzt. Diese besteht aus zwei einfachen Staircase-Verfahren, die abwechselnd die Reize darstellen. Allerdings unterscheiden sich ihre Startwerte. Die eine beginnt mit einer überschwelligen hohen Frequenz von 200 Hz, die andere mit einer unterschwelligen niedrigen Frequenz von 10 Hz. Abbildung 5.7 zeigt exemplarisch den dabei entstehenden Verlauf.

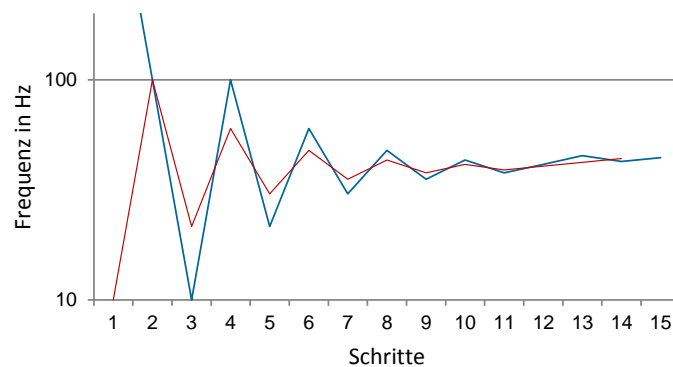


Abbildung 5.7: Kombinierte Staircase-Methode zur Ermittlung der FVF

Die Schwellenermittlung wird in dieser Untersuchung abgebrochen, sobald die Schrittweite der beiden Staircase-Verfahren unter 1 Hz sinkt. Die Flimmerverschmelzungsfrequenz errechnet sich aus der Mittelwertbildung der zuletzt eingestellten Frequenzen der beiden Staircase-Methoden.

Die Parameter für die kombinierte Staircase-Methode – Startwert, Schrittweite, Reduktionsfaktor, Abbruchschrittweite – wurden mithilfe eines Vorversuchs ermittelt.

## 5.1.4 Ergebnisse

An dieser Untersuchung nahmen 9 Testpersonen im Alter zwischen 30 und 34 Jahren (Durchschnittsalter 32 Jahre) teil. Alle Testpersonen wurden vor der Untersuchung auf Farbnormalsichtigkeit mit folgenden Tests untersucht: Test mit pseudochromatischen Farbtafeln [88], Farnsworth D-15 [89] und D-15 Test mit entsättigten Farbtafeln [90]. Es wurden keine Anomalien festgestellt.

In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse aller Testpersonen für die fünf Sehobjekte dargestellt. Die sogenannten Boxplots stellen folgende Werte grafisch dar:

- Medianwert – roter Strich
- Oberes und unteres Quartil – Grenzen des blauen Rechtecks
- Interquartilsabstand ( $IQR = Q_{75\%} - Q_{25\%}$ ) – Länge des blauen Rechtecks
- Ausreißer nach TUKEY [91] – rote Kreuze
- Extremwerte ausgeschlossen Ausreißer – gestrichelte Antennen ( $1,5 \times IQR$ ).

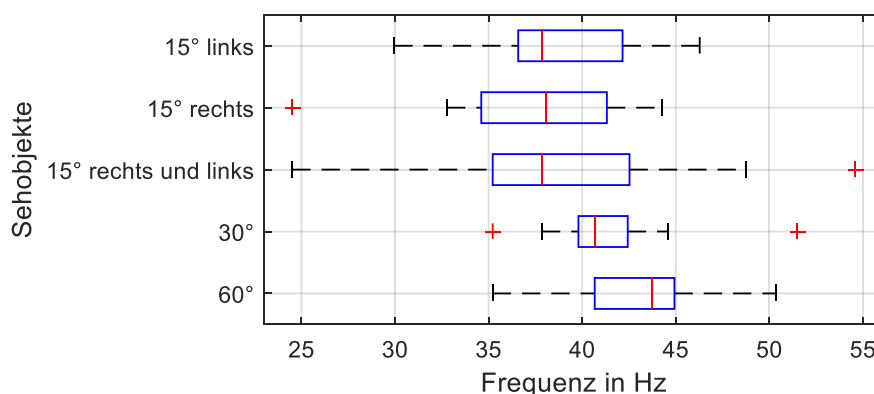


Abbildung 5.8: Boxplots zur FVF in Abhängigkeit der dargestellten Sehobjekte

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz im Durchschnitt über alle Konditionen unter 55 Hz liegt. In Tabelle 5.2 sind die statistischen Kennwerte zusammengefasst. Die Medianwerte liegen je nach Sehobjekt im Bereich zwischen 35 und 45 Hz. Für zentrale Reize sind die Median- und Mittelwerte höher als bei den peripheren Reizen. Bei seitlichen Sehobjekten ist jedoch die Streuung bzw. Interquartilsabstand höher. Am größten sind sie, wenn beide periphere Reize vorhanden sind. Die kleinste Streuung entsteht beim größten zentralen Feld mit  $60^\circ \times 20^\circ$ , während der kleinste  $IQR$  beim kleineren zentralen Feld mit  $30^\circ \times 20^\circ$  zu verzeichnen ist. Die Varianzanalyse (ANOVA, Analysis of Variance [92]) bei einem Signifikanzniveau von  $\alpha = 5\%$  ergibt allerdings, dass diese Unterschiede nicht statistisch signifikant sind. Daher wird ein Mittelwert über alle Testpersonen und alle Testbedingungen gebildet. Dabei ergibt sich die mittlere FVF von ca. 40 Hz.

Tabelle 5.2: Statistische Kennwerte der Ergebnisse

	Median / Hz	IQR / Hz	Min / Hz	Max / Hz	$\hat{\mu}$ / Hz	$\hat{\sigma}$ / Hz
15° links	37,9	5,6	30	46,3	38,5	5
15° rechts	38,1	6,7	24,5	44,3	37	6
15° rechts und links	37,9	7,3	24,5	54,6	39,2	8,5
30°	40,7	2,6	35,2	51,5	41,5	4,5
60°	43,7	4,3	35,2	50,3	43	4,3

### 5.1.5 Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung hatte das Ziel, die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter den für die Kfz-Frontbeleuchtung relevanten Bedingungen zu ermitteln und anhand der Ergebnisse zu klären, ob das Flimmern während der Fahrt mit einem PWM-gediminten Multispotsystem auftreten kann.

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass unter den Lichtverhältnissen, die von Kfz-Scheinwerfern bei Dunkelheit im Verkehrsraum entstehen ( $L = 0,5 \text{ cd/m}^2$ ), die FVF für ein PWM-Signal mit  $dc = 15\%$  im Bereich um 40 Hz liegt. Diese Frequenz ist deutlich niedriger, als die in der Kfz-Beleuchtung üblichen PWM-Frequenzen (um 200 Hz). Die Ergebnisse von BARTLEY und NELSON [60] wurden unter ähnlichen Leuchtdichten ( $0,3$  und  $3 \text{ cd/m}^2$ ) ermittelt und liegen im gleichen Frequenzbereich. Dabei verwendeten sie eine Glühlampe als Lichtquelle. Demnach sind die mit Glühlampen erhobenen Ergebnisse auf die Anwendung mit kaltweißen LEDs zumindest für den Leuchtdichtebereich  $0,3 - 3 \text{ cd/m}^2$  übertragbar. Zudem stellten die Autoren fest, dass die FVF für Tastverhältnisse unter  $12,5\%$  sowie über  $87,5\%$  sinkt (vgl. Abbildung 3.5). Demzufolge ist bei kaltweißen LEDs für andere Tastverhältnisse und PWM-Frequenzen über 40 Hz kein Flimmern zu erwarten.

Im Gegensatz zu den vorliegenden Literaturangaben (vgl. Abschnitt 3.1) wurde in diesem Test keine Erhöhung der Flimmerempfindlichkeit im peripheren Bereich festgestellt. Die Position des Reizes ergab keinen signifikanten Einfluss auf die Flimmerwahrnehmung. Ein möglicher Grund dafür kann in der spektralen Zusammensetzung des weißen Lichtes liegen. In dieser Untersuchung kam eine kaltweiße LED mit 5700 K zum Einsatz, während die früheren Untersuchungen hauptsächlich Glühlampen als Lichtquellen verwendeten. Das Spektrum einer Glühlampe weist im langwelligen Bereich eine deutlich höhere Intensität als das Spektrum einer kaltweißen LED (vgl. Abbildung 5.1). Dieses Teil des Spektrums regt vor allem die L-Zapfen an. Somit kann es zu einer höheren Flimmerempfindlichkeit führen. Die spektrale Strahldichte einer weißen LED ist hingegen im kurzwelligen Bereich deutlich höher. In diesem Bereich sind vor allem die S-Zapfen und die Stäbchen empfindlich. Zudem überwiegen die Stäbchen im peripheren Bereich. Dennoch führt es offensichtlich nicht zur Erhöhung der Flimmerempfindlichkeit. Dieser Aspekt soll in weiterführenden Untersuchungen behandelt werden.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung lässt sich die Schlussfolgerung ableiten, dass die in der Kfz-Frontbeleuchtung übliche PWM kein direkt wahrnehmbares Flimmern während der Fahrt verursacht.

---

## 5.2 Perlschnureffekt bei schnellen Augenbewegungen

---

Der Autofahrer schaut während der Fahrt oft verschiedene Elemente im Fahrzeuginnenraum an, z. B. den Tachometer, das Navigationssystem oder diverse Bedienelemente. Die Helligkeit der Hintergrundbeleuchtung dieser Elemente wird bei Nacht teilweise automatisch oder durch den Fahrer heruntergedimmt. Da die Dimmung mittels PWM geschieht, kann an diesen Elementen bei schnellen Augenbewegungen der Perlschnureffekt entstehen. Das diente als Motivation für die im Folgenden beschriebene Untersuchung.

### 5.2.1 Ziel der Untersuchung

In seinen Untersuchungen verwendet STRAUß [46] einen rotierenden Spiegel um den Perlschnureffekt bei Probanden hervorzurufen. Dabei ermittelte er für diesen Effekt eine Schwellenfrequenz von etwa 900 Hz und stellt keine spektrale Abhängigkeit fest. Zudem gibt er an, dass ungeübte Probanden die erforderlichen schnellen Sakkaden (vgl. Abschnitt 2.1.5) schlecht ausführen können. Daher stellt die von ihm ermittelte Frequenz den Extremfall dar. Für die praktische Anwendung wäre jedoch der Fall, dass die Personen schnelle Augenbewegungen selbst ausführen, von größerer Bedeutung. Die visuelle Suppression, die während einer Sakkade auftritt (vgl. Abschnitt 2.1.5), könnte dabei einen Einfluss auf die Schwellenfrequenz haben.

Während der Fahrt führt der Autofahrer verschiedene Augenbewegungen aus. Um die Fahrzeuggeschwindigkeit zu kontrollieren, schaut er oft den Tachometer an. Dabei führt er vertikale Augenbewegungen aus. Beim Bedienen des Autoradios oder beim Anschauen des Bildschirms des Navigationssystems kommen horizontale Augenbewegungen hinzu. An den PWM-gediminten Elementen, die er dabei anschaut, kann der Perlschnureffekt entstehen. Somit ist das Ziel dieses Laborversuchs, die Grenzfrequenz für den Perlschnureffekt bei horizontalen und vertikalen Sakkaden in einem Probandenversuch zu ermitteln. Da in der Innenraumbeleuchtung im Automobil vermehrt RGB-LEDs zum Einsatz kommen, soll der Einfluss der typischen RGB-Spektren untersucht werden.

### 5.2.2 Versuchsaufbau

In diesem Versuch wird der Aufbau aus der vorigen Untersuchung (vgl. Abschnitt 5.1) weiterentwickelt. Für die spektrale Einstellung wird ein LCTF (Liquid Crystal Tunable Filter) eingesetzt. Dieser wird direkt vor der LED befestigt. Der LCTF filtert aus der LED-Strahlung ein quasi-monochromatisches Licht mit einer Halbwertsbreite von 7 nm heraus. Dabei ist die Wellenlänge des Filters in nm-Schritten einstellbar.

In der Ambiente-Innenraumbeleuchtung kommen RGB-LEDs mit Peakwellenlängen um 450 nm (blau), 520 nm (grün) und 625 nm (rot) zum Einsatz. Bei einer Messung in einem Serienfahrzeug mit Ambiente-Innenraumbeleuchtung auf LED-Basis ergab sich für die niedrigste Helligkeitsstufe, bei der die LEDs noch leuchten, ein Tastverhältnis zwischen 13 und 18%. Diese Werte wurden an unterschiedlichen Elementen von Kontroll-Lämpchen im Armaturenbrett bis zu Lichtstreifen in der Türverkleidung ermittelt. Die maximale Leuchtdichte im ungediminten Zustand lag bei ca.  $1 \text{ cd/m}^2$ . Tabelle 5.3 fasst die Untersuchungsparameter zusammen.



Tabelle 5.3: Untersuchungsparameter

Tastverhältnis	15 %
Objektleuchtdichte in $\text{cd}/\text{m}^2$	0,1
Wellenlänge in nm	450, 520, 625

Als Sehobjekt dient ein Ring aus weißem Papier mit folgenden Abmessungen: Innendurchmesser 44 mm, Außendurchmesser 60 mm und Breite 8 mm (vgl. Abbildung 5.9). In Voruntersuchung zu diesem Experiment erwies sich ein ringförmiges Objekt aufgrund seiner Symmetrie für das Hervorrufen des Perlschnureffektes als besser geeignet als ein punkt- oder kreuzförmiges Objekt. Im Abstand von 800 mm zum Probandenaugen ergibt sich für die Ringbreite eine relative Größe von ca.  $0,57^\circ$ . Sie entspricht der durchschnittlichen Größe von leuchtenden Elementen im Kfz-Innenraum.

Der Ring ist mittig auf die Rückwand gegenüber der Kopfstütze auf der Augenhöhe der Testperson befestigt und wird von der LED-Beleuchtung angestrahlt. Im Ringmittelpunkt befindet sich eine rote LED (Peak-Wellenlänge von 632 nm) mit einer konstanten Leuchtdichte von  $0,05 \text{ cd}/\text{m}^2$ . Diese verhilft der Testperson den Ringmittelpunkt schneller zu finden und anzuvisieren. In der Voruntersuchung konnte der Perlschnureffekt nicht wahrgenommen werden, wenn sich der Ring peripher befand. Deshalb wurde der Ausgangspunkt für die Sakkaden in den Ringmittelpunkt gelegt.

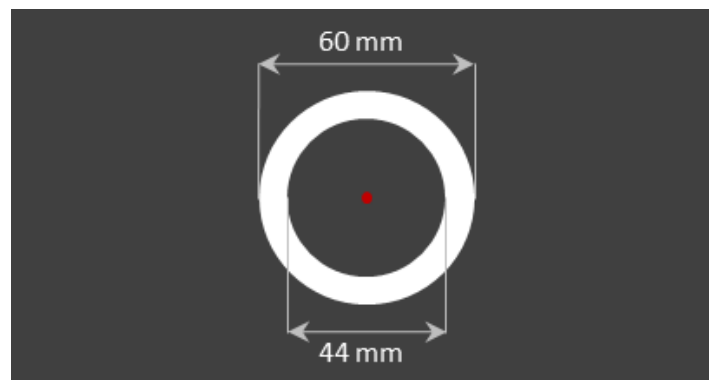


Abbildung 5.9: Ring als Sehobjekt

### 5.2.3 Methodik

Die Aufgabe der Testperson besteht im Detektieren des Perlschnureffektes beim Ausführen von schnellen ruckartigen Augenbewegungen. Im ersten Teil der Untersuchung wird die Schwellenfrequenz für den Perlschnureffekt bei vertikalen Sakkaden ermittelt. Anschließend werden horizontale Sakkaden untersucht. Abbildung 5.10 zeigt das Ablaufdiagramm des Versuchs.

Während der Dunkeladaptation von 15 min wird die Testperson über ihre Aufgabe im Versuch instruiert. Die auszuführenden Sakkaden sollen ausgehend vom Ringmittelpunkt abwechselnd nach oben bzw. nach unten (bei horizontalen Sakkaden dementsprechend zur linken bzw. rechten Seite) ausgeführt werden.

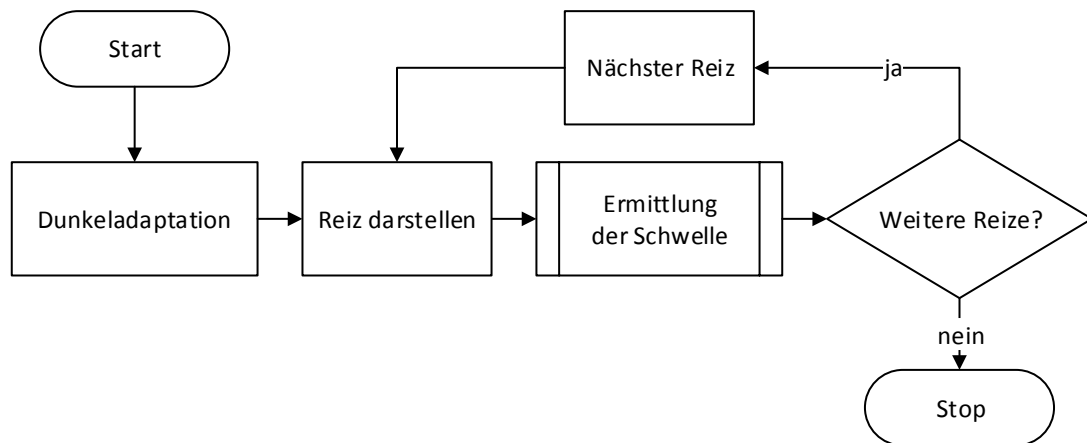


Abbildung 5.10: Ablaufdiagramm Laboruntersuchung Perlschnureffekt

Zur Ermittlung der Schwellenfrequenz kommt die Staircase-Methode zum Einsatz (vgl. Abbildung 5.6). Dabei wird nur die Frequenz angepasst. Das Tastverhältnis bleibt für alle Einstellungen konstant. Zur Bestimmung der intrapersonellen Streuung wird eine Testperson fünfmal an verschiedenen Tagen untersucht.

## 5.2.4 Ergebnisse

Dieser Laborversuch wurde mit vier Probanden, drei männlichen und einer weiblichen Person, im Alter zwischen 30 und 34 Jahren durchgeführt. Das Durchschnittsalter lag bei 32 Jahren. Alle Testpersonen wurden vor der Untersuchung auf Farbnormsichtigkeit (vgl. Abschnitt 5.1.4) überprüft. Es wurden keine Anomalien bei ihnen festgestellt.

Ein interessantes Resultat ergibt sich für die Wellenlänge von 450 nm: Unabhängig von der PWM-Frequenz konnte keine Testperson den Perlschnureffekt bei dieser Wellenlänge wahrnehmen. Der untere Startwert der Staircase-Methode lag bei 10 Hz. Bis ca. 20 Hz waren alle Personen in der Lage Flimmern wahrzunehmen. Ab ca. 20 Hz wurde der Ring nur verschwommen wahrgenommen, unabhängig von der Art der Augenbewegung und der PWM-Frequenz. Ein Grund dafür ist, dass der Perlschnureffekt nur dann entsteht, wenn das Objekt auf der Netzhaut scharf abgebildet wird. Da jedoch die S-Zapfen in der Fovea centralis – dem Bereich des schärfsten Sehens – fehlen (vgl. Abbildung 2.4) und die M- und L-Zapfen offensichtlich bei dieser Leuchtdichte und Wellenlänge nicht ausreichend angeregt werden (vgl. Abbildung 2.3), kommt es zu keiner scharfen Abbildung des Rings. Somit entsteht kein Perlschnureffekt. Zudem kann die Sakkadensuppression, die bei Augenbewegungen auftritt und dabei auf die visuelle Wahrnehmung hemmend wirkt, eine Rolle spielen.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die Wellenlängen 520 und 625 nm betrachtet. Diese sind in Abbildung 5.11 zusammengefasst und zeigen deutliche Unterschiede in der Wahrnehmung des Perlschnureffektes in Abhängigkeit der Sakkadenrichtung.

Für 625 nm und für vertikale Sakkaden liegt der Median der Schwellenfrequenz bei 340 Hz. Der Interquartilabstand (IQR) weist zwar bei dieser Wellenlänge den kleinsten Wert auf. Dieser ist jedoch größer als 100 Hz. Auch die Extremwerte liegen weit auseinander. Das Minimum liegt knapp unter

200 Hz und das Maximum ist ca. 500 Hz. Bei horizontalen Sakkaden liegt das Minimum für diese Wellenlänge im gleichen Frequenzbereich. Das Maximum ist jedoch deutlich höher und beträgt ca. 900 Hz. Der IQR ist hierbei ca. 400 Hz. Der Anstieg der Schwellenfrequenz ist bei allen Testpersonen zu verzeichnen. Allerdings ist er von Person zu Person sehr unterschiedlich ausgeprägt.

Für die Wellenlänge von 520 nm ergibt sich ein qualitativ ähnliches Verhältnis zwischen vertikalen und horizontalen Sakkaden: Der Median der vertikalen Sakkaden ist mit 540 Hz niedriger als der Median der horizontalen Sakkaden mit 805 Hz. Der IQR ist bei vertikalen Sakkaden (ca. 300 Hz) etwas niedriger als bei horizontalen (ca. 400 Hz).

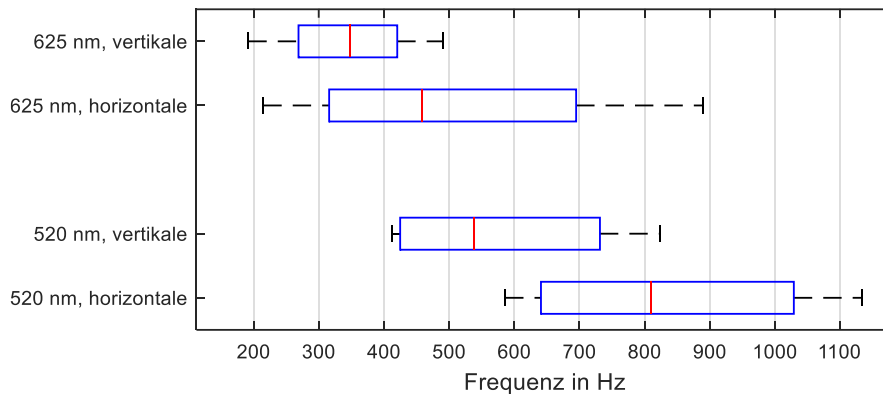


Abbildung 5.11: Schwellenfrequenz bei horizontalen und vertikalen Sakkaden

Abbildung 5.12 und Abbildung 5.13 vergleichen die Ergebnisse der vier Testpersonen mit den Ergebnissen einer Person (P1), die an diesem Versuch fünfmal an verschiedenen Tagen zur gleichen Uhrzeit teilgenommen hat. Qualitativ zeigen die Ergebnisse ein ähnliches Verhalten: Die Schwellenfrequenz ist bei 520 nm und bei horizontalen Sakkaden höher.

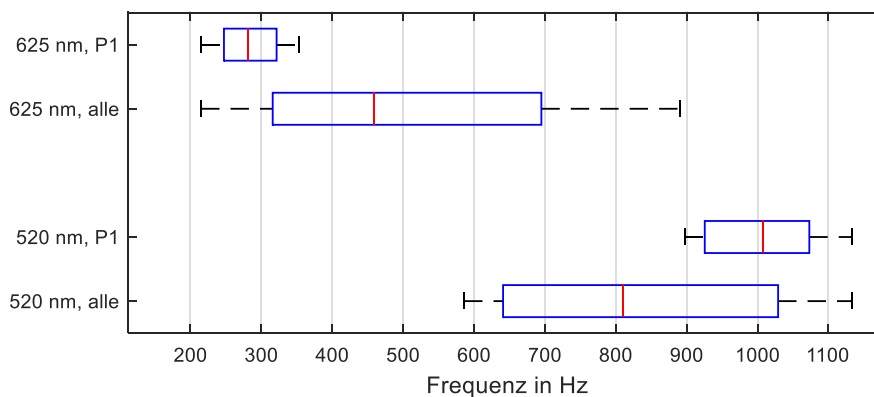


Abbildung 5.12: Vergleich aller Testpersonen und Person P1, horizontale Sakkaden

Bei 625 nm und horizontalen Sakkaden nimmt die Testperson P1 den Perlschnureffekt schlechter wahr als die anderen Personen: Ihre Grenzfrequenz liegt bei 280 Hz, während der Median anderer Probanden 460 Hz beträgt. Bei 520 nm gehört allerdings die Testperson P1 mit der Grenzfrequenz von knapp über 1000 Hz zu den empfindlichsten Probanden.

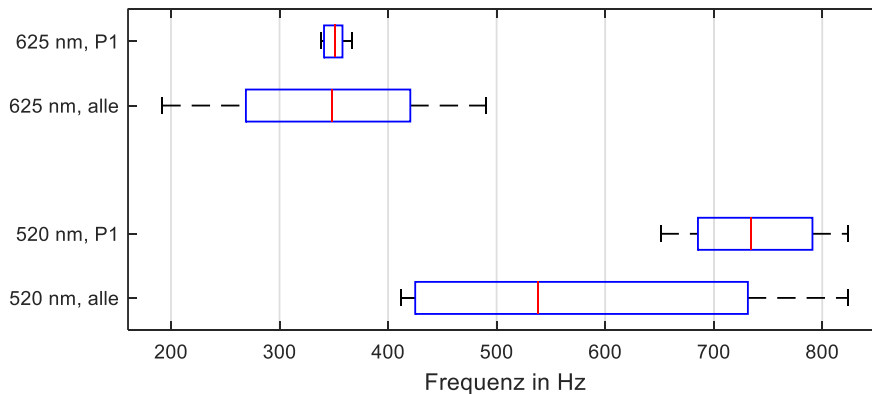


Abbildung 5.13: Vergleich aller Testpersonen und Person P1, vertikale Sakkaden

Bei vertikalen Sakkaden und 520 nm liegt die Grenzfrequenz der Testperson P1 deutlich über dem Median anderer Testpersonen. Bei 625 nm sind die Ergebnisse hingegen nahezu identisch. Allerdings ist die Streuung bei der Testperson P1 für beide Sakkadenarten deutlich geringer. Das deutet darauf hin, dass von Person zu Person der Perlschnureffekt unterschiedlich wahrgenommen wird.

## 5.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung hatte das Ziel, die Grenzfrequenzen des Perlschnureffekts bei schnellen horizontalen und vertikalen Augenbewegungen unter den für die Kfz-Innenraumbeleuchtung relevanten Leuchtdichten zu ermitteln und anhand der Ergebnisse zu klären, ob der Perlschnureffekt beim Führen eines Fahrzeugs an der PWM-gedimmten Innenraumbeleuchtung wahrnehmbar ist.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt von der spektralen Zusammensetzung des PWM-gedimmten Lichtes abhängt. Bei quasi-monochromatischem Licht nehmen die Testpersonen den Perlschnureffekt bei der Wellenlänge von 520 nm besser wahr, als bei 625 nm. Das gilt sowohl für die vertikalen als auch für die horizontalen Sakkaden. Allerdings ist ein deutlicher Unterschied in den Ergebnissen zwischen den Sakkadenarten bei allen untersuchten Testpersonen zu verzeichnen: Die Grenzfrequenz des Perlschnureffekts ist bei horizontalen Sakkaden höher als die bei vertikalen. Der Grund dafür kann in der Geschwindigkeit der Augenbewegung liegen. Die Grenzfrequenz ist umso höher, je schneller die Augenbewegung. Daraus lässt sich schließen, dass bei horizontalen Sakkaden die Augen schneller bewegt werden als bei vertikalen.

Des Weiteren wurde eine große intrapersonelle Streuung in den Ergebnissen eines Probanden festgestellt. Diese kann bis zu 100 Hz betragen. Die Wahrnehmung des Perlschnureffektes unterscheidet sich von Person zu Person noch stärker. Bei den untersuchten Testpersonen beträgt der maximale Unterschied in der Grenzfrequenz ca. 500 Hz (vgl. Abbildung 5.11).

Bei der Wellenlänge von 450 nm konnte keine Testperson den Perlschnureffekt wahrnehmen. Bei Frequenzen unter 20 Hz nahm jede Person das Flimmern wahr. Bei höheren Frequenzen verschwand zwar das Flimmern, was mit den Ergebnissen von KELLY [57] übereinstimmt, allerdings kam der Perlschnureffekt nicht zustande. Die Gründe dafür werden in der Verteilung der S-Zapfen vermutet: Bei 450 nm wird die blaue Farbe des Testobjekts wahrgenommen, was die Aktivität der S-Zapfen bestätigt. Da jedoch der zentrale Bereich der Fovea centralis komplett von S-Zapfen frei ist, kommt

---

es zu keiner scharfen Abbildung des Testobjektes, die für das Entstehen des Perlschnureffektes erforderlich ist. Bei Wellenlängen um 450 nm und mittleren Leuchtdichte von  $0,1 \text{ cd/m}^2$  sind M- und L-Zapfen offensichtlich inaktiv. Bei höheren Leuchtdichten würden sie jedoch zur Entstehung des Perlschnureffektes beitragen. Das zeigen die Untersuchungen von STRAUß [46].

Die Ursache für die niedrigere Schwellenfrequenz bei 625 nm muss einen anderen Grund haben. Denn die Anzahl der L-Zapfen, die hauptsächlich von dieser Strahlung angeregt werden, überwiegt in der Sehgrube (vgl. Abbildung 2.4). Daher soll eine scharfe Abbildung des Objektes möglich sein. Bei 625 nm beträgt jedoch die relative Empfindlichkeit der L-Zapfen ca. 50 % und die der M-Zapfen ca. 10 %. Im Gegensatz dazu weisen beide Zapfenarten bei 520 nm eine hohe Empfindlichkeit auf (M-Zapfen: 95 %, L-Zapfen: 80 %). Das Zusammenwirken beider Zapfentypen bei 520 nm wäre eine mögliche Erklärung für eine höhere Empfindlichkeit für den Perlschnureffekt.

Für die Anwendung von RGB-LEDs in der Kfz-Innenraumbeleuchtung lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Bei PWM-gedimmten farbigen LEDs aus dem Wellenlängenbereich von ca. 500-600 nm, in dem beide M- und L-Zapfen eine hohe Aktivität aufweisen, kann die Schwellenfrequenz des Perlschnureffektes bis zu 1000 Hz betragen.
- Bereiche im Fahrzeug, die für den Fahrer wichtige Informationen während der Fahrt beinhalten, sollen entweder mittels der CCR oder mittels der PWM bei einer Frequenz um 1000 Hz oder höher gedimmt werden, um den Perlschnureffekt und damit verbundene Irritationen zu vermeiden. Dazu zählen beispielsweise der Tachometer oder der Bildschirm des Navigationssystems.
- PWM-gedimmte blaue LEDs verursachen bei mittleren Leuchtdichten unter  $0,1 \text{ cd/m}^2$  keinen Perlschnureffekt.

---

### 5.3 Perlschnureffekt beim Seitenblick an einer Kreuzung

---

Multispot-Frontscheinwerfer sind komplexe Systeme, sowohl aus lichttechnischer Sicht, als auch aus Sicht der Elektronik und Datenverarbeitung. Ein kamerabasiertes System im Fahrzeug analysiert die Verkehrssituation und erzeugt nach einem Algorithmus Signale zur Ansteuerung einzelner Segmente der Fernlichtverteilung.

Das Kamerasystem ist jedoch nicht die einzige Datenquelle. Diverse andere Fahrzeugsensoren liefern wichtige Informationen über die Verkehrssituation und Fahrzeugzustand: Die Fernlichtfunktion wird erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit aktiv, je nach Hersteller ab 50 km/h. In Kurven benötigt das Scheinwerfersystem die Information über den Lenkwinkel, die Geschwindigkeit, die Giergeschwindigkeit. Fehlt in der Datenverarbeitungskette eine dieser Informationen, so funktioniert das System unter Umständen nicht ordnungsgemäß. Die hohe Komplexität adaptiver Scheinwerfersysteme erschwert die Untersuchung ihrer Parameter.

Zur Zeit der Konzipierung der im Folgenden beschriebenen Untersuchung stand kein Kraftfahrzeug mit LED-Frontscheinwerfern zur Verfügung, bei dem es mit einem vertretbaren Aufwand ohne Be-

---

einträchtigung der Funktionalität des gesamten Scheinwerfersystems möglich wäre, die PWM-Frequenz zu verändern. Aus diesem Grund wurde eine weitere Laboruntersuchung erarbeitet. Dabei wurde der Versuchsaufbau aus Abschnitten 5.1 und 5.2 weiter entwickelt.

### 5.3.1 Ziele der Untersuchung

Aus den Untersuchungen von STRAUß [46] und aus den Ergebnissen der vorigen Abschnitte geht hervor, dass die Entstehung des Perlschnureffekts umso wahrscheinlicher ist, je höher die Leuchtdichte der intermittierenden Lichtquelle ist. Aus Sicht des Fahrers, dessen Fahrzeug PWM-gedimmte Scheinwerfer besitzt, kann demnach der Perlschnureffekt vor allem an stark reflektierenden Objekten wie Verkehrsschilder und anderen Retroreflektoren, z. B. an Leitpfosten, auftreten. Das retroreflektierende Material, aus dem die Oberfläche von Verkehrsschildern besteht, wird für die Objekte in dieser Untersuchung verwendet.

Eine besondere Herausforderung bei Laboruntersuchungen besteht im Ausführen schneller Augenbewegungen, die für das Entstehen des Perlschnureffekts erforderlich sind. Um anwendungsrelevante Ergebnisse zu erzielen, soll die Geschwindigkeit der Augenbewegungen kontrolliert werden. Auch die Augenbewegung an sich soll zweckmäßig ausgewählt werden. Dafür wurde im Vorfeld dieser Untersuchung das Blickverhalten eines Fahrers während einer zweistündigen Fahrt aufgezeichnet. Die Analyse dieser Aufnahme ergab, dass die schnellsten Augenbewegungen meistens an Straßenkreuzungen entstehen. Zudem verfügen viele Straßenkreuzungen über Verkehrsschilder. Somit sind sie für die Untersuchung des Perlschnureffektes besonders geeignet.

Aus diesen Überlegungen wurde ein Miniaturmodell erstellt, das eine Straßenkreuzung bildet. Mit diesem Miniaturmodell soll das Entstehen des Perlschnureffekts bei typischen Augenbewegungen an Straßenkreuzungen untersucht werden.

### 5.3.2 Versuchsaufbau

Für diesen Versuch wird der Laboraufbau aus der vorigen Untersuchungen weiterentwickelt (vgl. Abschnitt 5.2). Dabei wird ein Miniaturmodell einer Straße im Maßstab 1:18,75 erstellt. Damit entspricht der Abstand zur Rückwand der Beobachtungsbox von 80 cm einem virtuellen Abstand von 15 m in der Realität.

Um die Szene realistischer zu gestalten, wurden mehrere Verkehrsschilder aus retroreflektierenden Folien, welche in der Herstellung realer Verkehrsschilder eingesetzt werden, erstellt. Abbildung 5.14 zeigt einen Entwicklungszwischenstand des Modells aus Sicht der Testperson.

Zur Beleuchtung kommen zwei Module zum Einsatz, die jeweils aus einer weißen LED (Farbtemperatur 5000 K) bestehen, die auf einem Kühlkörper befestigt sind. Zudem ist jede LED mit einem Spiegelreflektor (Abstrahlwinkel 40°) versehen.



Abbildung 5.14: Miniaturmodell einer Straßenkreuzung

Anders als in den vorigen Untersuchungen werden die LEDs von einer speziell dafür entwickelten Stromquelle versorgt. Diese ermöglicht eine präzise Einstellung des maximalen Stromes, der durch die LED fließt. Zudem kann der Strom über ein externes Signal moduliert werden. Für diesen Versuch wurden zwei Ausführungen der Stromquelle hergestellt. Diese werden über ein FPGA (Field Programmable Gate Array) angesteuert. Dabei erzeugt das FPGA das PWM-Signal und das Signal zur Einstellung des maximalen Stromes. Zur Ansteuerung des FPGA und Datenerfassung während des Versuchs wurde die Software aus den vorigen Untersuchungen weiterentwickelt.

Die Module sind so positioniert und mit Strom versorgt, dass die entstehende Leuchtdichte möglichst gut die Leuchtdichteverteilung einer realen Szene trifft. Abbildung 5.15 zeigt die Leuchtdichteaufnahme von Objekten auf einer Straßenkreuzung bei Fernlicht. Die maximalen Leuchtdichtewerte um  $6400 \text{ cd/m}^2$  weisen die retroreflektierenden Verkehrsschilder auf. Im nahen Vorfeld (Entfernung 15 m) herrscht eine Leuchtdichte um  $30 \text{ cd/m}^2$ , während der weiter entfernte Hintergrund eine Leuchtdichte unter  $3 \text{ cd/m}^2$  aufweist.

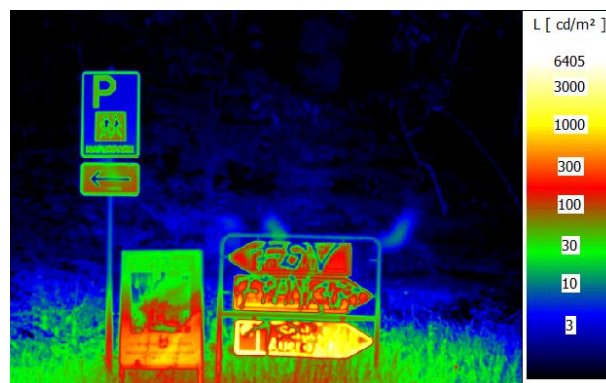


Abbildung 5.15: Leuchtdichteaufnahme einer Straßenkreuzung bei Fernlicht

Angelehnt an diese Szene wird eine ähnliche Anordnung sowie Leuchtdichteverteilung im Modell erzeugt. In Abbildung 5.16 ist die Leuchtdichteaufnahme der Modellstraße zu sehen. Für die Untersuchung relevante Bereiche – Schilder, Hintergrund weisen eine gute Übereinstimmung mit der realen Szene auf.



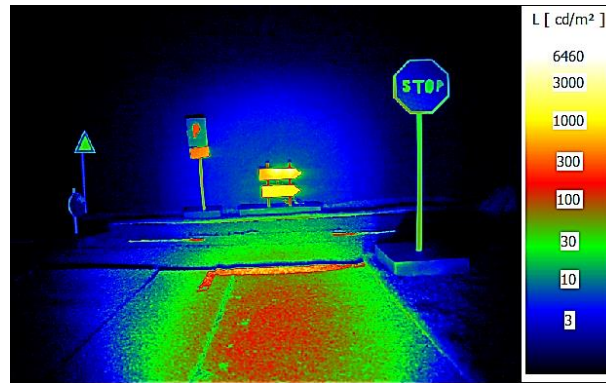


Abbildung 5.16: Leuchtdichteaufnahme des Miniaturmodells

In den Regelungen zur Auslegung lichttechnischer Parameter eines Kfz-Scheinwerfers geht man von einer Augenhöhe des Fahrers von 1,25 m [93] aus. Umgerechnet auf den Maßstab des Miniaturmodells ergibt sich zwischen dem Probandenauge und der Straßenebene eine Höhendifferenz von 6,4 cm. Um für jeden Probanden gleiche Sehbedingungen zu gewährleisten, wird die verwendete Kopfstütze in ihrer Höhe für jeden Probanden individuell eingestellt. Abbildung 5.17 verdeutlicht die bei dem Test verwendete Anordnung, zur besseren Übersicht ohne Kopfstütze.

Die LED-Module, die die Scheinwerfer simulieren, werden auf eine Höhe von ca. 4 cm über der Straßenebene angebracht, was einer virtuellen Anbauhöhe von ca. 75 cm entspricht.



Abbildung 5.17: Proband am Miniaturmodell

In dieser Untersuchung wird das Blickverhalten der Testperson mithilfe von zwei RGB-LEDs gesteuert. Zwischen den Pfeilwegweisern in der Mitte wird eine RGB-LED erkennbar befestigt (vgl. Abbildung 5.17). Eine weitere RGB-LED befindet sich 45° links von der Testperson (gelber Punkt links in Abbildung 5.18). In dieser Position ist sie nicht aus dem Augenwinkel zu sehen, wenn die Testperson die LED in der Mitte anschaut. Um sie zu erkennen, bedarf es einer Kopf- und Augenbewegung. So wird die Augenbewegung an einer Straßenkreuzung simuliert.

Die Ströme für die RGB-Kanäle sind so ausgewählt, dass die Leuchtdichte für jede Grundfarbe (rot, grün, blau) 1 cd/m<sup>2</sup> beträgt. Dabei erscheinen die LEDs nicht hell und ihre Lichtfarbe ist dennoch gut erkennbar. Die Steuerung der beiden RGB-LEDs geschieht über das FPGA. Dabei werden sie lediglich für eine kurze Zeit von 400 ms eingeschaltet und nicht gedimmt, sie flimmern also nicht. In der Untersuchung wird die Lichtfarbe dieser LEDs variiert. Um den Probanden die Erkennung ihrer Lichtfarbe zu erleichtern, werden nur die Grundlichtfarben und keine Mischfarben dargestellt.





Abbildung 5.18: Linke Fixations-LED im gelb (links im Bild)

Der Perlschnureffekt wird bei 10 verschiedenen Lichtbedingungen untersucht. Die LED-Module, die die Frontscheinwerfer simulieren, werden mit den Einstellungen aus Tabelle 5.4 angesteuert.

Tabelle 5.4: Untersuchte Lichteinstellungen

Dimmverfahren	Dimmstufe in %	Frequenz in Hz
PWM	20, 50	60, 200, 400, 800
CCR	20, 50	k. A.

Diese Einstellungen werden jeweils 3 Mal wiederholt und in einer randomisierten Reihenfolge dargeboten. Somit ergeben sich für jede Testperson 30 zu bewertende Lichtszenarien.

### 5.3.3 Methodik

Bei jeder Einstellung führt die Testperson zwei Aufgaben aus. Die erste Aufgabe besteht darin, schnelle Augenbewegungen, wie sie beim Seitenblick auf einer Straßenkreuzung auftreten, auszuführen. Bei der zweiten Aufgabe hat die Testperson die Szene (Schilder, Straße) so anzuschauen, als würde sie im Fahrzeug an die Kreuzung zufahren. Bei beiden Aufgaben haben die Probanden darauf zu achten, ob der Perlschnureffekt an den Verkehrsschildern entsteht. Danach bewerten sie ihre Auffälligkeit, bevor die nächste Lichteinstellung vorgenommen wird. Das Ablaufdiagramm ist in Abbildung 5.19 dargestellt.

In den Videoaufnahmen der Autofahrt dauerte ein seitlicher Blickwechsel auf einer Kreuzung im Durchschnitt ca. 400 ms. Um sicherzustellen, dass die Testperson den Blickwechsel schnell ausführt, werden die beiden RGB-LEDs jeweils für 400 ms eingeschaltet. In dieser Zeit hat die Testperson ausgehend von der mittleren LED auf die linke LED einen schnellen Blickwechsel auszuführen. Dabei hat die Testperson auf die Farbe der beiden LEDs zu achten und anschließend zu berichten, ob sie identisch ist oder nicht. Die Farbe jeder LED wird unabhängig voneinander zufällig gesetzt. Wie bereits erwähnt, werden dabei keine Mischfarben dargestellt. Eine falsche Angabe der Testperson über die Farbe der LEDs deutet darauf hin, dass sie die linke LED nicht gesehen hat und daher die Bewegung nicht schnell genug ausgeführt hat. In diesem Fall wird die Einstellung wiederholt. Da die RGB-LEDs ein zeitlich konstantes, also flimmerfreies, Licht emittieren, kann der Perlschnureffekt nur an den Schildern auftreten. Die Einstellung der PWM-gesteuerten Modell-Scheinwerfer geschieht 100 ms

bevor die RGB-LEDs eingeschaltet werden. Damit soll vermieden werden, dass die Testperson bereits vorher durch schnelle Augenbewegungen feststellt, ob der Perlschnureffekt erkennbar ist oder nicht.

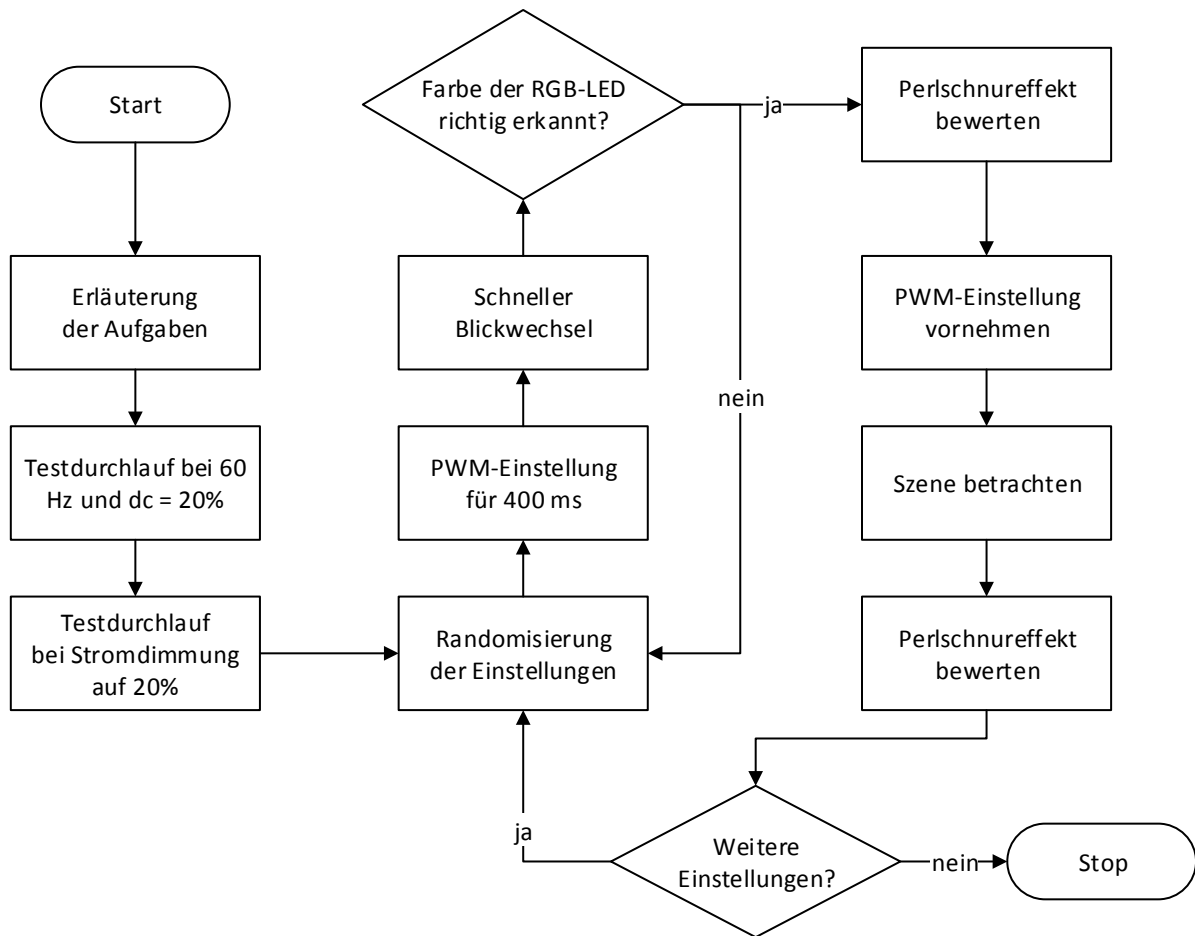


Abbildung 5.19: Ablaufdiagramm, Perlschnureffekt beim Seitenblick

Nach dem Ausführen der ersten Aufgabe folgt die Bewertung, ob der Perlschnureffekt während des Blickwechsels wahrnehmbar war und wenn ja, wie stark. Für die diskrete Bewertung wurde eine Skala von 1 bis 5 verwendet. Die semantische Bedeutung ist in Tabelle 5.5 angegeben.

Tabelle 5.5: Semantische Bedeutung der Extremwerte der Bewertung

Bewertung	Bedeutung
1	Perlschnureffekt ist nicht wahrnehmbar
5	Perlschnureffekt ist deutlich wahrnehmbar

Zu Beginn der Untersuchung werden zwei Testdurchläufe durchgeführt. Der erste Durchlauf bei 60 Hz und Tastverhältnis von 20 % dient als Anker für die Bewertung von 5. Bei dieser Einstellung wurde bei ruhendem Auge kein direktes Flimmern wahrgenommen. Der Perlschnureffekt tritt hingegen schon bei kleinsten Augenbewegungen auf.

Ein weiterer Testdurchlauf bei der gleichen Leuchtdichte und flimmerfreiem Licht zeigt beispielhaft eine Situation für die Bewertung von 1. Die zweite Aufgabe bewerten die Probanden auf der gleichen Skala.

### 5.3.4 Ergebnisse

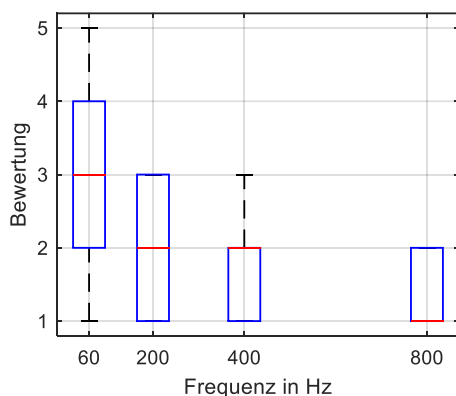
An dieser Untersuchung haben 10 Personen im Alter zwischen 22 und 35 Jahren mit einem Durchschnittsalter von 31 Jahren teilgenommen. Wie in den vorigen Untersuchungen (vgl. Abschnitte 5.1 und 5.2) wurden sie vorher auf Farbnormalsichtigkeit überprüft. Es wurden keine Anomalien festgestellt.

Für jede Testperson je Einstellung wird zunächst der Medianwert über drei Wiederholungen ermittelt. Abbildung 5.20 fasst die Ergebnisse über alle Probanden für verschiedene Tastverhältnisse und Aufgaben in Form von Boxplots zusammen.

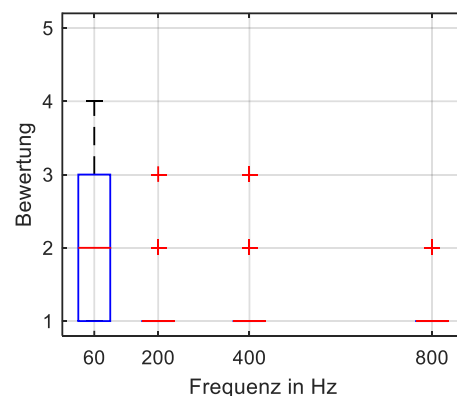
Es sind deutliche Unterschiede sowohl zwischen den Einstellungen, als auch zwischen den Aufgaben zu erkennen. Bei der ersten Aufgabe, dem schnellen Blickwechsel bei einem Tastverhältnis von 50% nehmen die meisten Testpersonen den Perlschnureffekt bei Frequenzen oberhalb von 60 Hz schlecht wahr, während er von einigen Probanden bei hohen Frequenzen und einem Tastverhältnis von 20% wahrgenommen werden kann.

Die Ergebnisse der zweiten Aufgabe, das Betrachten der Szene, zeigen wie erwartet eine ähnliche Abhängigkeit vom Tastverhältnis. Allerdings zeigt sich generell ein deutlicher Unterschied zu der ersten Aufgabe. Für 60 und 200 Hz liegen die Medianwerte der ersten Aufgabe bei einem Tastverhältnis von 20% unter den Medianwerten der zweiten Aufgabe. Diese Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass die Nebenaufgabe, das Erkennen der Farbe der RGB-LEDs, beim schnellen Blickwechsel die Wahrnehmung des Perlschnureffektes beeinflusst.

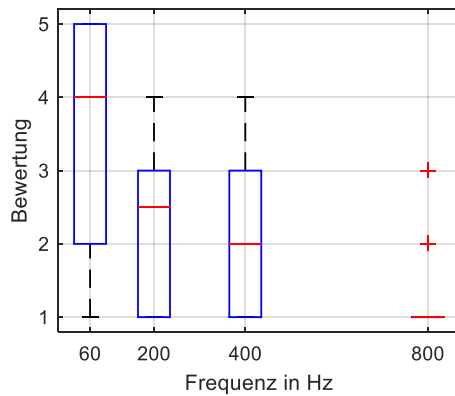
Hieraus lässt sich schließen, dass der Perlschnureffekt beim Autofahren wegen der eigentlichen Fahraufgabe weniger auffällig sein könnte, als beim Betrachten einer statischen Szene, die mit PWM-gedimmtem Licht ausgeleuchtet ist.



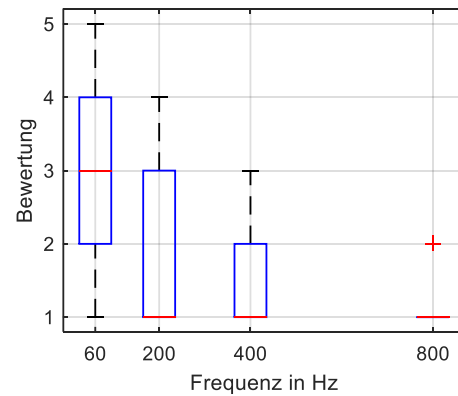
(a) Schneller Blickwechsel,  $dc = 20\%$



(b) Schneller Blickwechsel,  $dc = 50\%$



(c) Betrachten der Szene,  $dc = 20\%$



(d) Betrachten der Szene,  $dc = 50\%$

Abbildung 5.20: Boxplots der ermittelten Bewertungen

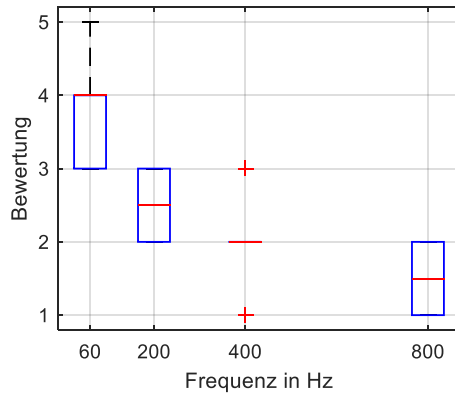
Beim Betrachten der Ergebnisse einzelner Testpersonen fällt auf, dass manche Personen generell den Perlschnureffekt niedrig bewerten. Andere Personen geben dagegen bei gleichen PWM-Einstellungen höhere Bewertungen ab. Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Perlschnureffekt unterschiedlich je nach Person wahrgenommen wird. Deshalb werden die Testpersonen in Gruppen unterteilt.

Für die Gruppierung wird ein Klassifizierungsverfahren angewendet. In der Informatik im Bereich Clusteranalyse existieren diverse dafür geeignete Verfahren [94], [95]. Dazu gehört der Fuzzy C-Means Algorithmus. Bei diesem Verfahren wird zunächst die Anzahl der Cluster festgelegt. Für jeden Messpunkt wird ein Zugehörigkeitsgrad zu jedem Cluster berechnet. Das geschieht jedoch nicht in einem Schritt, sondern erfordert mehrere Iterationen, bei denen sowohl die Zugehörigkeitsgrade, als auch die Clusterzentren nach der Methode der kleinsten Quadrate angepasst werden [96].

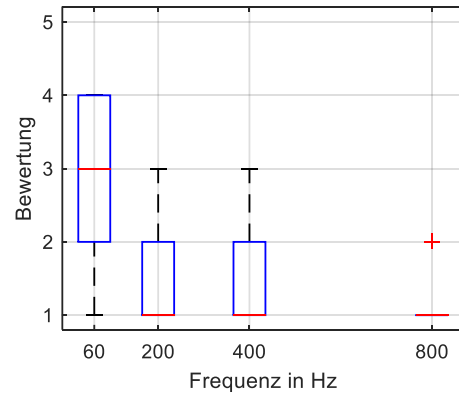
Nach dem Anwenden dieses Verfahrens erhält jede Testperson jeweils drei Zugehörigkeitsgrade. Um eine eindeutige Zuordnung zu schaffen, wird die Testperson der Gruppe mit der größten Zugehörigkeit zugeteilt. Je nach Eigenschaften der vorliegenden Daten, kann somit sogar die Anzahl der so entstandenen Gruppen geringer sein als die vorher festgelegte Anzahl der Cluster.

Es werden zwei Gruppen gebildet. Die eine Gruppe besteht aus 4 Probanden (40%). Die anschließende Analyse der Daten von diesen Probanden zeigt, dass es sich um Personen handelt, deren Bewertungen über alle Testbedingungen deutlich kleiner sind als die Bewertungen anderer Probanden. Es sind zwei Gründe dafür möglich: Entweder nehmen sie den Perlschnureffekt nicht wahr oder sie empfinden ihn nicht auffällig.

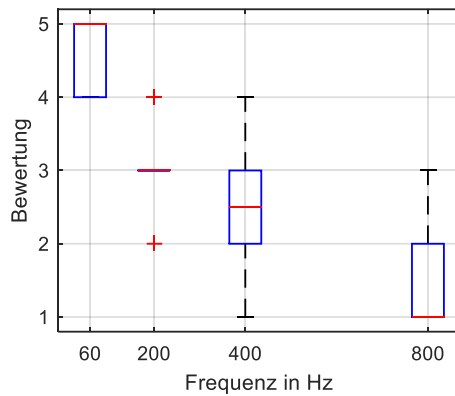
Die andere Gruppe besteht aus 6 Testpersonen (60%), deren Ergebnisse im Folgenden genauer analysiert werden. Abbildung 5.21 stellt die Ergebnisse dieser Gruppe dar. Qualitativ sind die gleichen Abhängigkeiten zu erkennen, wie bei den Ergebnissen aller Probanden (vgl. Abbildung 5.20). Der IQR ist jedoch in dieser Gruppe bei den meisten Testbedingungen deutlich geringer. Die Medianwerte der zweiten Aufgabe liegen über den Medianwerten der ersten. Eine Ausnahme bilden die Ergebnisse bei 800 Hz. Hier sind die Werte nahezu identisch und liegen für die meisten Probanden unter der Bewertung 2. Anhand dieser Ergebnisse liegt die Frequenz, ab der die meisten Probanden die Auffälligkeit des Perlschnureffekts in den beiden Aufgaben gering bewerten, im Bereich zwischen 400 und 800 Hz.



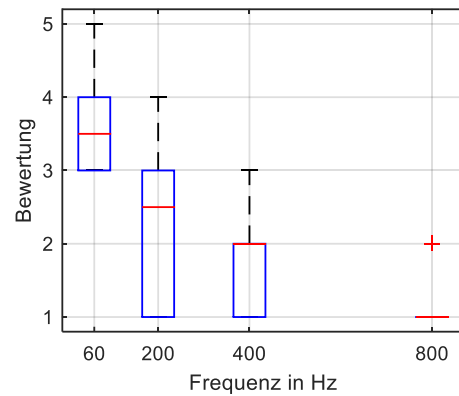
(a) Schneller Blickwechsel,  $dc = 20\%$



(b) Schneller Blickwechsel,  $dc = 50\%$



(c) Betrachten der Szene,  $dc = 20\%$



(d) Betrachten der Szene,  $dc = 50\%$

Abbildung 5.21: Boxplots der ermittelten Bewertungen, empfindliche Testpersonen (Gruppe 2)

Um den Bereich für die Grenzfrequenz einzuschränken, wird die Abhängigkeit der Bewertungen von der PWM-Frequenz mit einer Funktion approximiert. Die Approximationsfunktion soll dabei monoton fallend sein und in ihren Randbereichen gegen endliche Werte konvergieren. Dafür eignet sich besonders eine Sigmoidfunktion wie zum Beispiel die komplementäre Normalverteilungsfunktion nach Formel 5.1.

$$\Phi_{\mu, \sigma^2}(x) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad 5.1$$

Dabei stellt der Parameter  $\mu$  den Wendepunkt dar und der Parameter  $\sigma$  ist umgekehrt proportional zur Steigung der Kurve im Wendepunkt. Diese Parameter werden mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate an die Daten angepasst.

Die mit dieser Funktion approximierten Verläufe sind in Abbildung 5.22 dargestellt. Für die Bezeichnungen der Bedingungen wird die Kurzschreibweise aus Tabelle 5.6 verwendet.

Tabelle 5.6: Testbedingungen

Testbedingung	Aufgabe	$dc$ / %
B1	Schneller Blickwechsel	20
B2	Schneller Blickwechsel	50
B3	Betrachten der Szene	20
B4	Betrachten der Szene	50

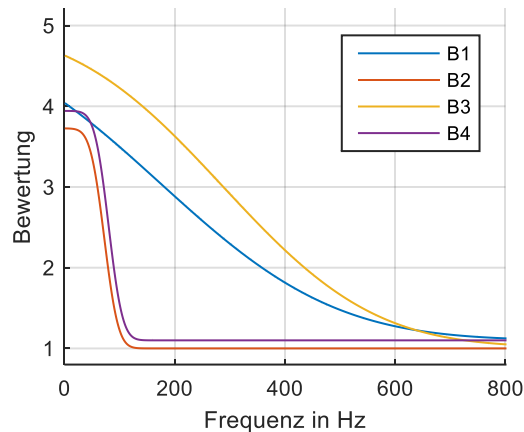


Abbildung 5.22: Approximierte Bewertung in Abhängigkeit von der Testbedingung

Wie bereits beschrieben, steht die Bewertung 1 für den Fall, dass der Perlschnureffekt nicht wahrnehmbar ist (vgl. Tabelle 5.5). Da die Bewertung auf einer Skala mit diskreten Werten erfolgt, geben Probanden eine gerundete Bewertung ab. Es kann also der Fall auftreten, dass der Proband den Perlschnureffekt wahrnimmt, ihn allerdings für eine Bewertung von 2 als nicht allzu auffällig empfindet und ihn mit 1 bewertet. Es wird angenommen, dass dabei ein Quantisierungsfehler in der Bewertung von maximal 0,5 entsteht. Somit wird die *Grenzfrequenz*  $f_g$  definiert als die Frequenz, bei der die Approximationsfunktion den Wert 1,5 erreicht. Für die Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz entsteht also der Perlschnureffekt nicht.

In der Psychophysik wird oft der Wendepunkt der Sigmoidfunktion als *Schwellenwert* verstanden. Bei dieser Frequenz ergibt sich für den Perlschnureffekt eine mittlere Auffälligkeit. Oberhalb von dieser Frequenz nimmt die Auffälligkeit stärker ab. Bei den Frequenzen, die unterhalb der Schwellenfrequenz liegen, wird der Perlschnureffekt hingegen deutlich auffälliger.

Die Grenzfrequenzen  $f_g$  sowie Schwellenfrequenzen  $f_s$  sind für die untersuchten Bedingungen in Tabelle 5.7 aufgelistet. Wie erwartet, steigt sowohl die Grenz- als auch die Schwellenfrequenz mit sinkendem Tastverhältnis. Die maximale Grenzfrequenz von 540 Hz ist beim Betrachten der Szene (Bedingung B3) zu verzeichnen. Die Schwellenfrequenz beträgt dabei 287 Hz, sie ist also um Faktor 1,9 geringer als die Grenzfrequenz. Eine ähnliche Abhängigkeit ist beim Ausführen schneller Augenbewegungen (Bedingung B1) zu beobachten. Dabei beträgt die Schwellenfrequenz 173 Hz, während die Grenzfrequenz bei 492 Hz liegt.

Tabelle 5.7: Grenz- und Schwellenfrequenzen für die untersuchten Bedingungen

	$f_s$ / Hz	$f_g$ / Hz
Schneller Blickwechsel $dc = 20\%$	173	492
Schneller Blickwechsel $dc = 50\%$	72	91
Betrachten der Szene $dc = 20\%$	287	540
Betrachten der Szene $dc = 50\%$	80	102

In der weiteren Datenanalyse wird pro Testbedingung der Anteil der Probanden ermittelt, der eine Bewertung kleiner 2 gibt, was auf eine geringe Auffälligkeit bzw. kein Auftreten des Perlschnureffekts hinweist. Der Anteil dieser Personen wird in Abhängigkeit von der Frequenz mittels der Normalverteilungsfunktion angenähert. Das Diagramm in Abbildung 5.23 zeigt die sich ergebenden Verläufe für die untersuchten Bedingungen.

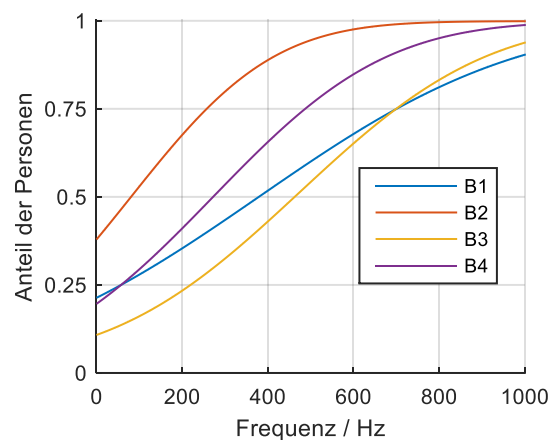


Abbildung 5.23: Anteil unempfindlicher Personen in Abhängigkeit der Frequenz

Aus der approximierten Funktion wird die Frequenz  $f_{50\%}$  ermittelt, bei der der Anteil der unempfindlichen Personen 50 % entspricht. Damit die meisten Probanden den Perlschnureffekt nicht wahrnehmen, ist demnach für die Bedingung B3 eine Frequenz  $f_{50\%} = 450$  Hz erforderlich. Bei anderen Testbedingungen ist eine niedrigere Frequenz erforderlich. Tabelle 5.8 fasst die Ergebnisse zusammen. Zudem ist die Grenzfrequenz, die mit der weiter oben beschriebenen Methode ermittelt wurde, zum Vergleich angegeben. Angesichts der Tatsache, dass sich bei der Ermittlung der Grenzfrequenz des Perlschnureffekts bedingt durch die schnellen Augenbewegungen eine intraindividuelle Streuung von ca. 100 Hz ergeben kann (vgl. Abschnitt 5.2), liefern beide Auswertungsmethoden ähnliche Ergebnisse.

Tabelle 5.8: Schwellenfrequenzen nach verschiedenen Methoden

	$f_{50\%}$ / Hz	$f_g$ / Hz
Schneller Blickwechsel $dc = 20\%$	377	492
Schneller Blickwechsel $dc = 50\%$	83	91
Betrachten der Szene $dc = 20\%$	450	540
Betrachten der Szene $dc = 50\%$	243	102

Diese Ergebnisse gelten jedoch nur für die untersuchten Tastverhältnisse von 20 % und 50 %. Für ein Multispotsystem sind allerdings Tastverhältnisse unterhalb von 20 % nicht auszuschließen. Mithilfe der linearen Extrapolation der vorliegenden Daten ist möglich, die Grenze der Kennfrequenzen für sehr kleine Tastverhältnisse abzuschätzen. Dabei kann Formel 5.2 herangezogen werden.

$$\hat{f}_{dc \rightarrow 0} = \frac{f_1 - f_2}{dc_2 - dc_1} \cdot dc_2 + f_2 \quad 5.2$$

Hierbei ist  $f_1$  die Frequenz bei  $dc_1$ ,  $f_2$  die Frequenz bei  $dc_2$  und es gilt  $dc_2 > dc_1$ . In dieser Untersuchung ist  $dc_1 = 20\%$  und  $dc_2 = 50\%$ .

Mit Formel 5.3 kann zudem die Grenze für die jeweilige Kennfrequenz zu einem Tastverhältnis  $dc$  abgeschätzt werden.

$$f(dc) = \hat{f}_{dc \rightarrow 0} - \frac{f_1 - f_2}{dc_2 - dc_1} \cdot dc = \hat{f}_{dc \rightarrow 0} - m \cdot dc \quad 5.3$$

Mit den Werten aus Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 ergeben sich nach dem Anwenden von Formeln 5.2 und 5.3 Schätzparameter, die in Tabelle 5.9 zusammengefasst sind.

Tabelle 5.9: Schätzparameter für Kennfrequenzen

	$\hat{f}_{50\%} / \text{Hz}$	$\hat{f}_g / \text{Hz}$	$\hat{f}_s / \text{Hz}$	$m_{50\%} / \text{Hz}/\%$	$m_g / \text{Hz}/\%$	$m_s / \text{Hz}/\%$
Schneller Blickwechsel	573	759	240	9,8	13,4	3,4
Betrachten der Szene	588	832	425	6,9	14,6	6,9

Für die beiden Aufgabenarten ergibt sich bei kleinen Tastverhältnissen eine ähnliche Grenzfrequenz  $\hat{f}_g$ . Dies kann dadurch erklärt werden, dass der Perlschnureffekt bei kleinen Tastverhältnissen sehr auffällig wird, so dass er auch beim schnellen Blickwechsel mit einer Nebenaufgabe deutlich wahrgenommen wird. Das Gleiche gilt für die Frequenz  $\hat{f}_{50\%}$ .

Mit den Werten aus Tabelle 5.9 ergibt sich für alle Kennfrequenzen nach Formel 5.3 bei einem Tastverhältnis von 100 % ein negativer Wert. Die Abhängigkeit der Kennfrequenz vom Tastverhältnis ist bei großen Tastverhältnissen offensichtlich nicht linear. Das Gleiche kann für sehr kleine Tastverhältnisse vermutet werden, so dass die tatsächlichen Grenzen für die Kennfrequenzen  $f_g$ ,  $f_s$  und  $f_{50\%}$  niedriger liegen, als die Werte in Tabelle 5.9. Die beschriebene Methode dient demnach zur Abschätzung des Extremfalls.

### 5.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegende Untersuchung hatte das Ziel, die Grenzfrequenz des Perlschnureffekts bei typischen Augenbewegungen an Straßenkreuzungen unter den für die Kfz-Frontbeleuchtung relevanten Lichtbedingungen zu ermitteln. Dies wurde in einer Probandenstudie unter kontrollierten Lichtbedingungen im Labor erreicht.



---

Die Ergebnisse zeigen, dass 40 % der Testpersonen den Perlschnureffekt unter den untersuchten Bedingungen generell schlecht wahrnehmen können. Für die anderen Probanden, die diesen Effekt gut wahrnehmen, konnte festgestellt werden, dass die Schwellen- und Grenzfrequenz beim Ausführen einer Nebenaufgabe geringer ist, als beim Abtasten des Vorfelds mit schnellen Augenbewegungen (vgl. Tabelle 5.7).

Da der Fahrer im realen Straßenverkehr mit dem Führen des Fahrzeugs stark beschäftigt ist, sind die Ergebnisse der Testbedingungen mit einer Nebenaufgabe für die Praxis von größerer Relevanz. Aus den Versuchsergebnissen wurden Grenzfrequenzen des Perlschnureffekts für den Extremfall bei kleinen Tastverhältnissen berechnet. Demzufolge würde für eine PWM-Frequenz um 240 Hz ( $\hat{f}_s$  in Tabelle 5.9) eine mittlere Auffälligkeit für den Perlschnureffekt ergeben. Diese wird mit steigender Frequenz geringer, bis der Perlschnureffekt ab ca. 570 Hz ( $\hat{f}_{50\%}$  in Tabelle 5.9) von den meisten Testpersonen nicht mehr wahrgenommen wird. Ab einer Frequenz von 760 Hz ( $\hat{f}_g$  in Tabelle 5.9) soll der Perlschnureffekt praktisch nicht mehr auftreten. Für die Praxis wäre eine mittlere Frequenz zwischen  $\hat{f}_s$  und  $\hat{f}_{50\%}$  mit einem Wert um 400 Hz ein guter Kompromiss.

---

## 5.4 Perlschnureffekt beim Betrachten von Verkehrsschildern

---

Während der Fahrt tastet der Autofahrer den Verkehrsraum mit schnellen Blickbewegungen ab. Besonders bei einem hohen visuellen Anspruch der Verkehrssituation, z. B. in unbekannter Gegend und/oder bei Nacht, steigt die Frequenz der Sakkaden an [97]. Verkehrsschilder sind eine der wichtigsten Informationsquellen für den Fahrer. Da sie das Scheinwerferlicht stark reflektieren, werden bei einem Multispotsystem entsprechende Segmente gedimmt. Dadurch kann an Verkehrsschildern der Perlschnureffekt entstehen, wenn der Fahrer sie schnell anschaut.

### 5.4.1 Ziele der Untersuchung

In einer Probandenuntersuchung sollen folgende Fragen beantwortet werden:

1. Bei welcher Leuchtdichte blenden Verkehrsschilder den Fahrer nicht?
2. Welches Tastverhältnis der PWM ist dabei erforderlich?
3. Welchen Einfluss hat das Tastverhältnis auf die Wahrnehmung des Perlschnureffekts?
4. Welchen Einfluss hat das Prinzip der Phasenverschiebung der PWM auf den Perlschnureffekt?

Da die maximale Lichtstärke eines Kfz-Frontscheinwerfers gesetzlich geregelt ist, für Frontscheinwerfer mit LED als Lichtquelle gilt unter anderem die Regulierung UNECE Nr. 112 [98], lässt sich für die ergebende optimale Leuchtdichte das entsprechende Tastverhältnis absolut bestimmen.

### 5.4.2 Versuchsaufbau

Im Gegensatz zu dem in Abschnitt 7.2.1 beschriebenen Experiment wurde für diese Untersuchung ein LED-Modul mit abbildender Optik entwickelt (Abbildung 5.24). Dieses Modul besteht aus einer

LED (LUXEON Altilon, Formfaktor Ix2, Farbtemperatur 5700 K), die speziell für die Kfz-Frontbeleuchtung entwickelt wurde und dort bereits eingesetzt wird, und einem aktiven Kühler, auf dem die LED befestigt ist. Die LED besteht aus zwei nebeneinander angeordneten LED-Chips, die mit zwei Linsen abgebildet werden. Die Linsen sind so zueinander positioniert, dass die LED ein nahezu rechteckiges Strahlbündel von  $1^\circ \times 2^\circ$  erzeugt.

Für diese Untersuchung wurden vier LED-Module hergestellt. Vertikal ausgerichtet beleuchten jeweils zwei Module ein Modell-Verkehrsschild.

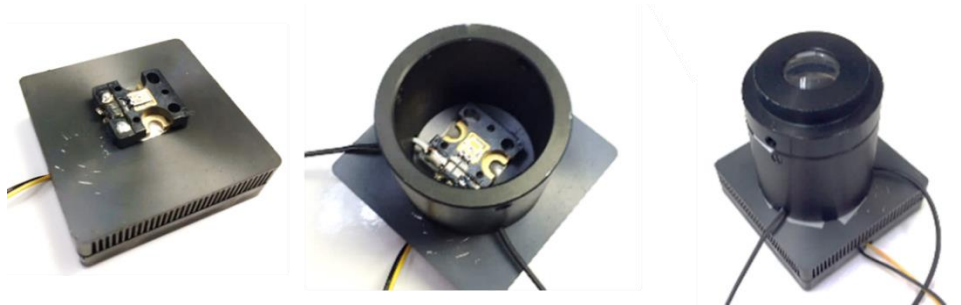


Abbildung 5.24: Beleuchtungsmodul bestehend aus einem Kühlkörper, einer LED und der abbildenden Optik

Die Module sind so positioniert, dass sich ihre Lichtverteilungen auf dem Modell-Schild überlappen. Ein Schild befindet sich am rechten Straßenrand (virtueller Abstand 20 m) und das andere am linken Straßenrand (virtueller Abstand 50 m). Abbildung 5.25 zeigt diese Anordnung schematisch. Der Winkel zwischen den Schildern beträgt ca.  $20^\circ$  und stützt sich auf die reale Situation der zweispurigen Straße mit einer Fahrbahnbreite von 7 m. Die Modell-Schilder wurden maßstabgetreu hergestellt. Ihre Oberfläche besteht aus einem retroreflektierenden Material, das auch bei realen Verkehrsschildern verwendet wird.

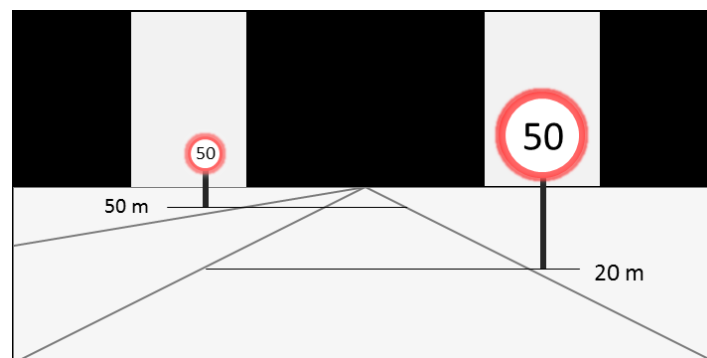


Abbildung 5.25: Schematische Darstellung der untersuchten Situation

Um die Testbedingungen realistisch zu gestalten, werden zwei zusätzliche LED-Module zur Simulation des Abblendlichtes eingesetzt. Der Abstrahlwinkel beträgt ca.  $30^\circ \times 60^\circ$ . Diese Module beleuchten nur das Vorfeld und strahlen die Schilder nicht an. Zudem werden sie mit einem konstanten Strom versorgt, um ein Flimmern auszuschließen.

---

Die Leuchtdichte für die beiden Schilder wurde experimentell mit einem Serien-LED-Scheinwerfer bei Fernlicht ermittelt. Dabei lag die maximale Leuchtdichte bei ca. 11.000 cd/m<sup>2</sup>. Die maximalen Ströme der LED-Module werden entsprechend dieser Messung eingestellt. In Abbildung 5.26 ist die Leuchtdichteaufnahme der untersuchten Anordnung dargestellt.

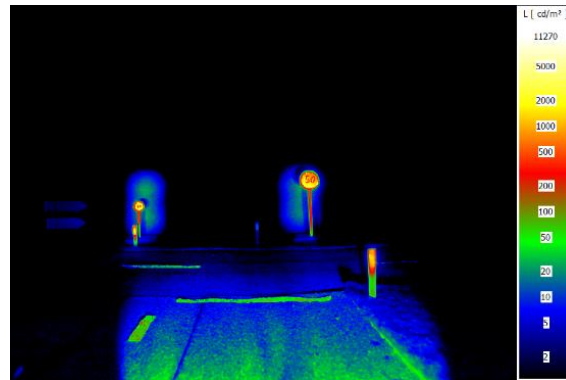


Abbildung 5.26: Leuchtdichteaufnahme der Versuchsanordnung

### 5.4.3 Methodik

Die Untersuchung besteht aus vier Teilversuchen.

1. Ermittlung der optimalen Leuchtdichte mittels Staircase-Methode
2. Semantische Zuordnung der Helligkeitsstufen
3. Untersuchung des Perlschnureffekts bei synchronen PWM-Signalen
4. Untersuchung des Perlschnureffekts bei phasenverschobenen PWM-Signalen

Die ersten drei Teilversuche wurden an einem Tag durchgeführt. Der vierte Teilversuch fand an einem anderen Tag statt. In den ersten zwei Teilversuchen wird die Testperson nicht auf ein mögliches Auftreten des Perlschnureffekts hingewiesen. Der Verlauf der Untersuchung am ersten Tag ist im Ablaufdiagramm in Abbildung 5.27 dargestellt.

Zunächst werden die ersten Teilversuche erläutert. Im ersten Teilversuch hat die Testperson die Aufgabe die Helligkeit der Schilder hinsichtlich der nachgestellten Fahrsituation zu bewerten. Die Einstellung der Helligkeitsstufen geschieht dabei automatisch mithilfe der Staircase-Methode. Hierbei hat die Testperson beide Schilder abwechselnd anzuschauen und zu bewerten, ob sie bei der dargebotenen Lichteinstellung hell oder dunkel erscheinen. Die Dimmung geschieht mittels der PWM bei 100 Hz. Die Staircase-Methode wird abgebrochen, wenn die Schrittweite für die Anpassung des Tastverhältnisses unter 2 % sinkt. Das dabei resultierende Tastverhältnis erzeugt die optimale Leuchtdichte.

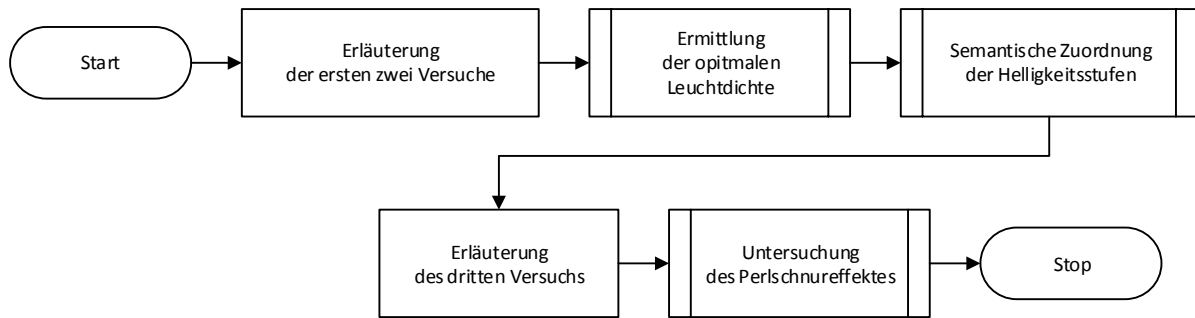


Abbildung 5.27: Ablaufdiagramm der Laboruntersuchung mittels Straßenminiaturmodell

Im zweiten Teilversuch werden 6 Helligkeitsstufen von 10, 20, 40, 60, 80 und 100 % der maximalen Leuchtdichte untersucht. Die Aufgabe der Testperson besteht darin, jeder Helligkeitsstufe einen der drei Begriffe zuzuordnen: Hell, normal oder dunkel. Die Helligkeitsstufen werden in einer randomisierten Reihenfolge dargestellt. Das Ablaufdiagramm zu diesem Versuch ist Abbildung 5.28 zu entnehmen.

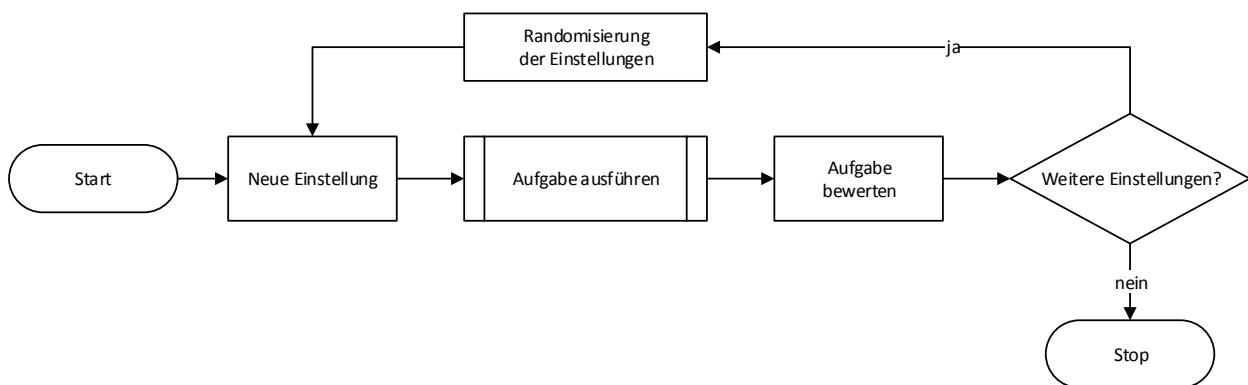


Abbildung 5.28: Ablaufdiagramm für Teilversuche 2 und 3

Die Leuchtdichte wird auch in diesem Teilversuch mittels PWM bei 100 Hz eingestellt. Dabei werden die Probanden nicht auf den möglichen Perlschnureffekt aufmerksam gemacht. Sie werden lediglich aufgefordert, beim Bewerten der Helligkeit beide Schilder abwechselnd anzuschauen. Durch die Augenbewegung könnte der Perlschnureffekt entstehen.

Im dritten Teilversuch wird der Perlschnureffekt untersucht. Vor dem Versuchsbeginn wird er exemplarisch bei 100 Hz und unterschiedlichen Tastverhältnissen erläutert. Beim Tastverhältnis von 100% wird der Unterschied zu nicht flimmerndem Licht gezeigt. Zudem wird die Testperson gefragt, ob sie ihn in den ersten Teilen der Untersuchung wahrgenommen hat.

Die Testperson hat die Aufgabe, schnelle Blickwechsel zwischen den beiden Modell-Schildern auszuführen. In einem Vorversuch zeigte sich, dass 2-3 Blickwechsel ausreichend sind, um sich zu entscheiden, ob der Perlschnureffekt wahrnehmbar ist oder nicht. Daher wird den Probanden diese Vorgehensweise empfohlen. Gedimmt wird nur das Licht der LED-Module, die die Schilder anstrahlen. Die untersuchten Lichteinstellungen sind Tabelle 5.10 zu entnehmen.

Tabelle 5.10: Untersuchten Lichteinstellungen

Dimmverfahren	Dimmstufe in %	Frequenz in Hz
PWM	10, 20, 40, 60	100, 200, 400
CCR	10, 20, 40, 60	k. A.

Jede Einstellung wird in einer randomisierten Reihenfolge dargestellt und fünfmal wiederholt.

Die Abläufe des dritten und vierten Teilversuchs sind identisch. Im vierten Teil der Untersuchung werden allerdings die PWM-Signale der zwei Module, die dasselbe Schild anstrahlen, zeitlich zueinander um eine halbe Periodendauer verschoben (vgl. Kapitel 4). In Folge dessen reflektiert das Schild ein Licht, dessen Fluktuation der Überlagerung der zwei PWM-Steuersignale entspricht. Somit verdoppelt sich die Fluktuationsfrequenz. Da sich dabei die Pulsdauer nicht ändert, verdoppelt sich auch das Tastverhältnis (vgl. Abbildung 5.29 (a)). Für ein Tastverhältnis von 60 % ergibt sich im Signal sogar eine konstante Komponente, deren Größe 50 % des Maximums beträgt (Abbildung 5.29 (b)).

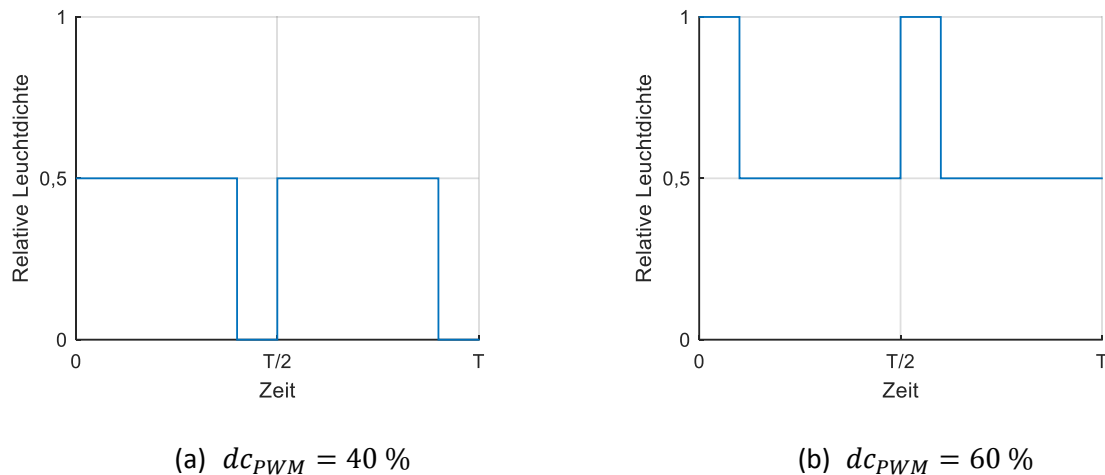


Abbildung 5.29: Zeitlicher Verlauf der relativen Leuchtdichte bei phasenverschobener PWM

#### 5.4.4 Ergebnisse

An den ersten drei Versuchen nahmen insgesamt 55 Personen teil. Die Verteilung nach drei Altersgruppen ist in Abbildung 5.30 dargestellt.

Für die Gruppe unter 25 Jahren liegt das Durchschnittsalter bei 22 Jahren. Zu dieser Gruppe gehören ausschließlich Studenten. Die meisten davon nahmen zum ersten Mal an einer lichttechnischen Untersuchung teil. Das durchschnittliche Alter der Gruppe zwischen 25 und 40 Jahren liegt bei 29 Jahren. 7 Personen aus dieser Gruppe sind Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik der Technischen Universität Darmstadt. Sie nahmen bereits mindestens einmal an einer Untersuchung über den Perlschnureffekt teil. Die übrigen Personen (davon 8 Studenten) nahmen zum ersten Mal an einer solchen Untersuchung teil.

Von 8 Personen in der Altersgruppe über 40 Jahren nahm bis dahin nur eine Person an einem Test teil, in dem der Perlschnureffekt untersucht wurde. Das Durchschnittsalter in dieser Gruppe liegt bei 55 Jahren.

Von 55 Teilnehmern kannten nur 13 Testpersonen den Perlschnureffekt. Den anderen 42 Testpersonen war er bis dahin nicht bekannt.

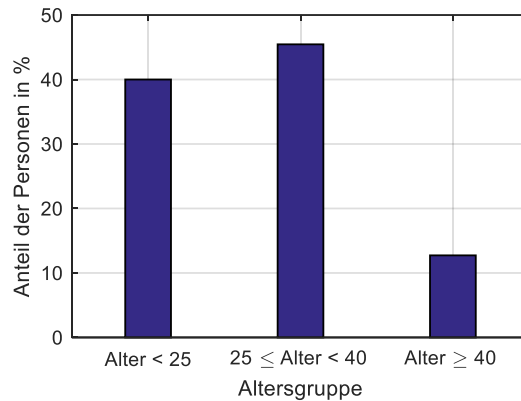


Abbildung 5.30: Anteil der Probanden nach Altersgruppen

#### 5.4.4.1 Ergebnisse der Teilversuche 1 und 2

Die Ergebnisse des ersten Teilversuchs sind in Abbildung 5.31 in Form eines Histogramms dargestellt. Für die meisten Teilnehmer (64 %) ergab sich eine Leuchtdichte im Bereich zwischen 4.400 und 7.700  $\text{cd}/\text{m}^2$  mit einem Tastverhältnis zwischen 40 % und 70 %.

Der Mittelwert liegt beim Tastverhältnis von ca. 55 %. Dabei ergibt sich eine Leuchtdichte von 6.000  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Die Standardabweichung beträgt ca. 18%, was einer Leuchtdichte von 1.980  $\text{cd}/\text{m}^2$  entspricht. Neun Testpersonen (16 %) stellten für die optimale Leuchtdichte einen Wert von über 7.700  $\text{cd}/\text{m}^2$  ( $dc > 70\%$ ) ein. Eine Leuchtdichte von unter 4.400  $\text{cd}/\text{m}^2$  ( $dc < 40\%$ ) ergab sich für 11 Probanden (20%).

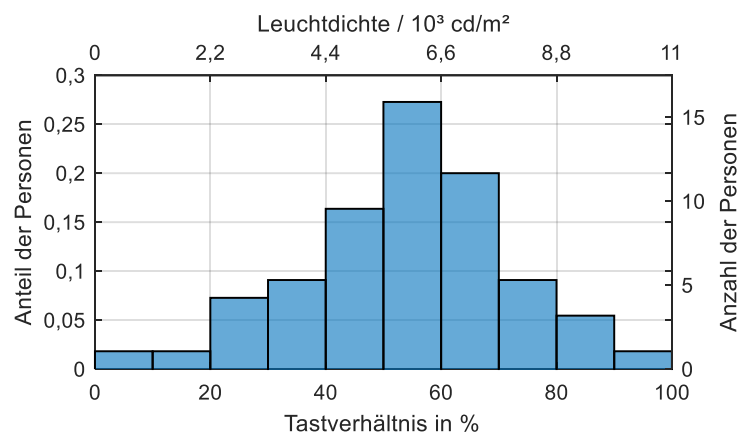


Abbildung 5.31: Histogramm der Verteilung der Testpersonen nach der optimalen Leuchtdichte

Die Ergebnisse des zweiten Teilversuchs stellt Abbildung 5.32 in Form von Histogrammen dar. Für den Begriff „dunkel“ stehen die blauen Balken. Die meisten Probanden weisen diesen Begriff Tastverhältnissen von 10 % und 20 % zu. Dabei ergeben sich für die Leuchtdichten der Schilder Werte von  $1.100 \text{ cd/m}^2$  und  $2.200 \text{ cd/m}^2$ .

Als „hell“ empfinden die meisten Testpersonen die Helligkeit der Schilder, wenn ihre Leuchtdichten  $8.800 \text{ cd/m}^2$  ( $dc = 80\%$ ) und  $11.000 \text{ cd/m}^2$  ( $dc = 100\%$ ) betragen. Für diesen Begriff stehen die gelben Balken in Abbildung 5.32.

Die Helligkeit der Schilder bezeichnen die meisten Testpersonen als „normal“ bei Tastverhältnissen von 40 % ( $4.400 \text{ cd/m}^2$ ) und 60 % ( $6.600 \text{ cd/m}^2$ ). Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen aus dem ersten Teilversuch.

Demzufolge liegt die optimale Leuchtdichte bei einem Tastverhältnis um 50 %. Ausgehend aus der maximalen Leuchtdichte von  $11.000 \text{ cd/m}^2$  ergibt sich für die optimale Leuchtdichte ein Wert von  $5.500 \text{ cd/m}^2$ .

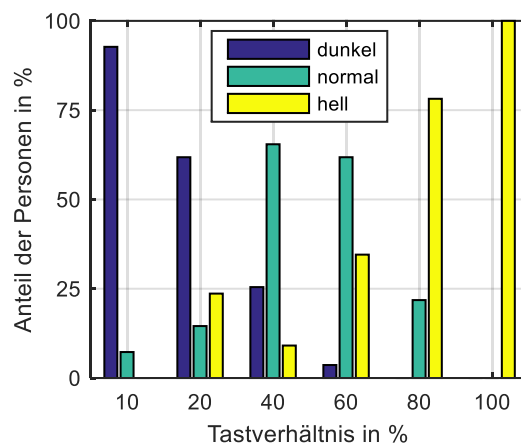


Abbildung 5.32: Histogramm der Bewertungen der Leuchtdichte nach semantischen Begriffen

Nur 4 Testpersonen ist der Perlschnureffekt während der ersten beiden Teile des Versuchs aufgefallen. Allerdings handelt es sich bei diesen Personen um Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik, die bereits vorher an einer Untersuchung über den Perlschnureffekt teilgenommen haben und dadurch voreingenommen sein könnten.

#### 5.4.4.2 Synchroner PWM

Bei der Untersuchung des Perlschnureffekts wurde jedes PWM-Signal fünfmal in einer zufälligen Reihenfolge getestet. Aus diesen Wiederholungen wird die Wahrnehmungsrates des Perlschnureffekts für jeden Probanden ermittelt.

Die Ergebnisse aller Probanden sind in Abbildung 5.33 in Form von Boxplots zusammengefasst. Die Ergebnisse der Testpersonen, die den Perlschnureffekt bereits kannten, zeigen keine statistisch signifikanten Unterschiede zu den anderen Testpersonen. Beim Betrachten des Medianwertes (roter Strich) fällt auf, dass die Erkennungsrate nicht von der Frequenz abhängt. Das bedeutet, dass die gewählten Frequenzen unterhalb der Grenzfrequenz des Perlschnureffektes liegen.

Für die Tastverhältnisse von 10 und 20 % sind die Medianwerte gleich. Erst ab einem Tastverhältnis von 40 % sinkt der Medianwert der Wahrnehmungsrate unter 50 %. Eine Wahrnehmungsrate von unter 50 % entsteht, wenn der Perlschnureffekt in den meisten Wiederholungen nicht wahrgenommen wird. Demzufolge nehmen die meisten Testpersonen den Perlschnureffekt bei einem Tastverhältnis von 40 % nicht wahr. Bei einem Tastverhältnis von 60 % sinkt der Median weiter und beträgt nur noch 20 %.

Das obere Boxplot in Abbildung 5.33 zeigt die Ergebnisse für die Einstellungen mit flimmerfreiem Licht ( $dc = 100\%$ ). Bei nicht flimmerndem Licht und schnellen Augenbewegungen wird das Umfeld unscharf auf die Netzhaut abgebildet. Diesen Effekt verwechseln offensichtlich manche Testpersonen mit dem Perlschnureffekt. In diesem Fall wird die Wahrnehmungsrate als Fehlerrate bezeichnet. Der Median der Fehlerrate liegt bei 15 %. Der IQR ist bei allen Testbedingungen sehr groß. Im Folgenden wird noch genauer darauf eingegangen.

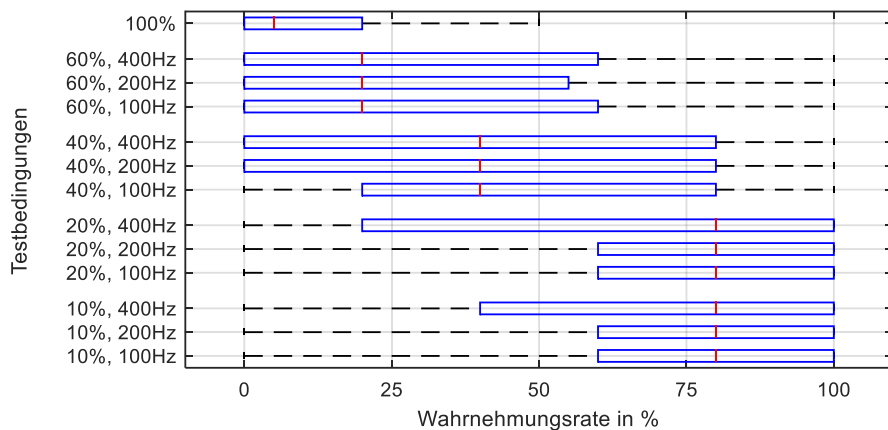


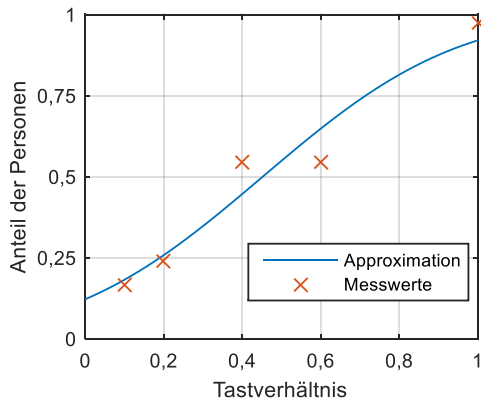
Abbildung 5.33: Wahrnehmung des Perlschnureffekts, synchrone PWM

Die Testpersonen, deren Wahrnehmungsrate unter 50 % liegt, können den Perlschnureffekt bei entsprechenden Bedingungen schlecht wahrnehmen. Im Folgenden werden diese Testpersonen als unempfindliche Testpersonen bezeichnet. Der Anteil unempfindlicher Testpersonen ist in Abbildung 5.34 in Abhängigkeit des Tastverhältnisses für die untersuchten Frequenzen dargestellt. Rote Kreuze sind die ermittelten Werte. Die blauen Linien sind die mit einer Sigmoidfunktion approximierten Verläufe.

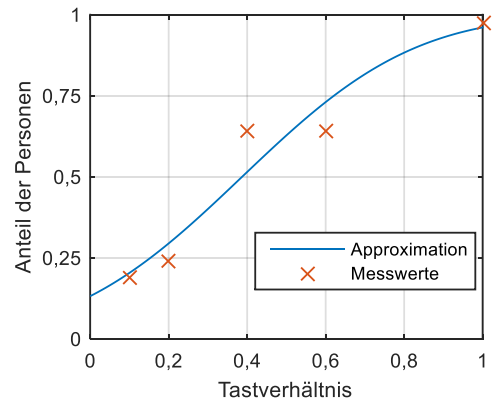
Die charakteristischen Werte aus den approximierten Funktionen fasst Tabelle 5.11 zusammen. Der Wendepunkt  $\hat{\mu}_{dc}$  der Sigmoidfunktion gibt an, ab welchem Tastverhältnis der Einfluss des Tastverhältnisses auf den Anteil unempfindlicher Personen geringer wird. Dieser Wert wird als *Schwellentastverhältnis* bezeichnet. Ab welchem Tastverhältnis mehr als 50 % der Testpersonen den Perlschnureffekt nicht wahrnehmen, zeigt der Wert  $dc_{50\%}$ . Zudem sind die Anteile der Testpersonen bei den extremen Tastverhältnissen angegeben. Der Anteil der Testpersonen bei  $dc = 0$  zeigt, wie viele Personen den Perlschnureffekt auch bei kleinen Tastverhältnissen nicht wahrnehmen können. Für  $dc = 100\%$  steht der Anteil der Testpersonen, die den Unschärfeeffect mit dem Perlschnureffekt bei hohen Tastverhältnissen verwechseln.

Die Verläufe für 100 und 200 Hz sind nahezu identisch das Schwellentastverhältnis liegt für diese Frequenzen bei einem Wert von 48% bzw. 44%.

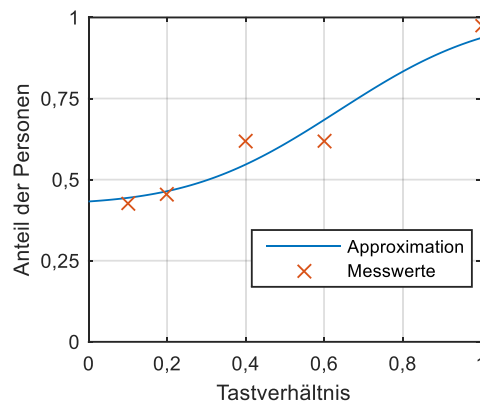




(a) 100 Hz



(b) 200 Hz



(c) 400 Hz

Abbildung 5.34: Anteil unempfindlicher Personen in Abhängigkeit des Tastverhältnisses

Der Schnittpunkt mit der Ordinate zeigt für 100 und 200 Hz, dass 13 % aller Probanden den Perlschnureffekt bei diesen Frequenzen und sehr kleinen Tastverhältnissen nicht wahrnehmen. Weitere 7-8% der Testpersonen verwechseln ihn bei  $dc = 100\%$  mit dem Unschärfeneffekt.

Bei 100 und 200 Hz sind  $\hat{\mu}_{dc}$  und  $dc_{50\%}$  praktisch identisch. Ihre Werte zeigen deutlich, dass die meisten Probanden den Effekt bei dem in den ersten Teilversuchen ermittelten optimalen Tastverhältnis ( $dc = 50\%$ ) nicht wahrnehmen können.

Für 400 Hz beträgt  $\hat{\mu}_{dc} = 64\%$ . Allerdings verläuft sie flacher und höher als die Funktionen für 100 und 200 Hz. Das zeigt, dass die meisten Probanden den Perlschnureffekt bei dieser Frequenz schlechter wahrnehmen. Der Anteil der Probanden, die den Effekt bei kleinen Tastverhältnissen generell nicht wahrnehmen, liegt für diese Frequenz bei 44%, was mehr als das Dreifache der Probanden bei 100 und 200 Hz ist. Damit die meisten Probanden bei 400 Hz den Perlschnureffekt nicht wahrnehmen, ist mindestens ein Tastverhältnis von 32% erforderlich.

Tabelle 5.11: Kennwerte der Verläufe der unempfindlichen Personen unter allen Testpersonen

	$\hat{\mu}_{dc}$	$dc_{50\%}$	Anteil bei $dc \rightarrow 0\%$	Anteil bei $dc = 100\%$
100 Hz	48%	46%	13%	92%
200 Hz	44%	38%	13%	93%
400 Hz	64%	32%	44%	93%

Der große IQR in den Ergebnissen zeigt, dass der Perlschnureffekt von Person zu Person unterschiedlich wahrgenommen wird (vgl. Abbildung 5.33). Manche Testpersonen können ihn sogar bei niedrigen Frequenzen und niedrigen Tastverhältnissen kaum wahrnehmen, worauf eine Erkennungsrate nahe 0 hindeutet. Um das genauer zu untersuchen, werden die Testpersonen in 3 Gruppen unterteilt.

Die Gruppenzuordnung geschieht mithilfe des Fuzzy C-Means-Verfahrens. Die Ergebnisse der einzelnen Gruppen sind in Abbildung 5.35 dargestellt. Basierend auf diese Ergebnisse lassen sich die Gruppen in Bezug auf ihre Wahrnehmung des Perlschnureffekts beschreiben. Die Beschreibung ist Tabelle 5.13 zu entnehmen.

Tabelle 5.12: Beschreibung der Gruppen

Gruppe	Beschreibung
1	Perlschnureffekt <i>gut</i> wahrgenommen
2	Perlschnureffekt <i>oft</i> wahrgenommen
3	Perlschnureffekt <i>kaum</i> wahrgenommen

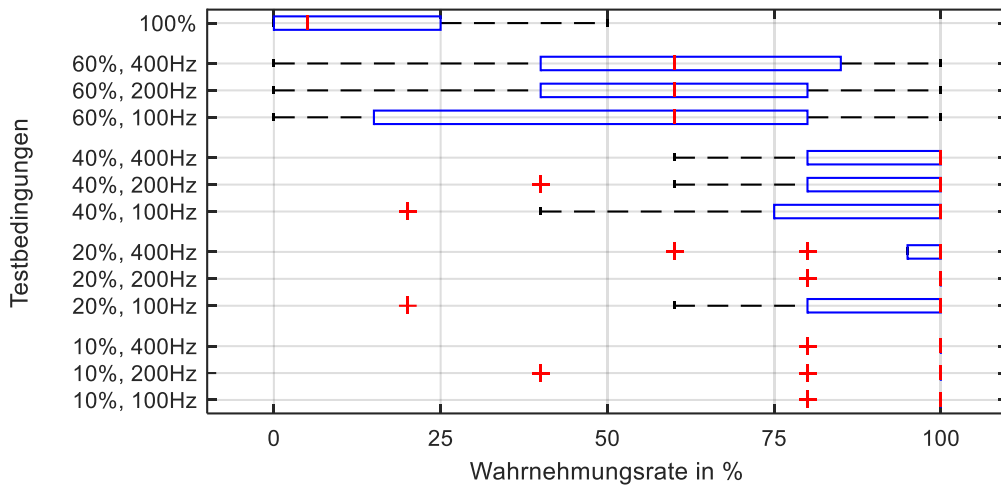
Die statistischen Kennwerte der Gruppen sind in Tabelle 5.13 zusammengefasst. Der Anteil der Personen, die den Perlschnureffekt kaum wahrnehmen (Gruppe 3), liegt bei 24 %. Die größte Gruppe wird von 25 Testpersonen (45 %) gebildet, die in der Lage sind, den Perlschnureffekt bei unterschiedlichen Testbedingungen wahrzunehmen (Gruppe 2). 17 Testpersonen, was fast einem Drittel aller Testpersonen entspricht, können den Perlschnureffekt generell bei verschiedenen Testbedingungen gut wahrnehmen (Gruppe 1).

Die ähnlichen Altersmittelwerte und Streuungen in den Gruppen zeigen, dass die Gruppen aus Personen unterschiedlicher Altersklassen bestehen.

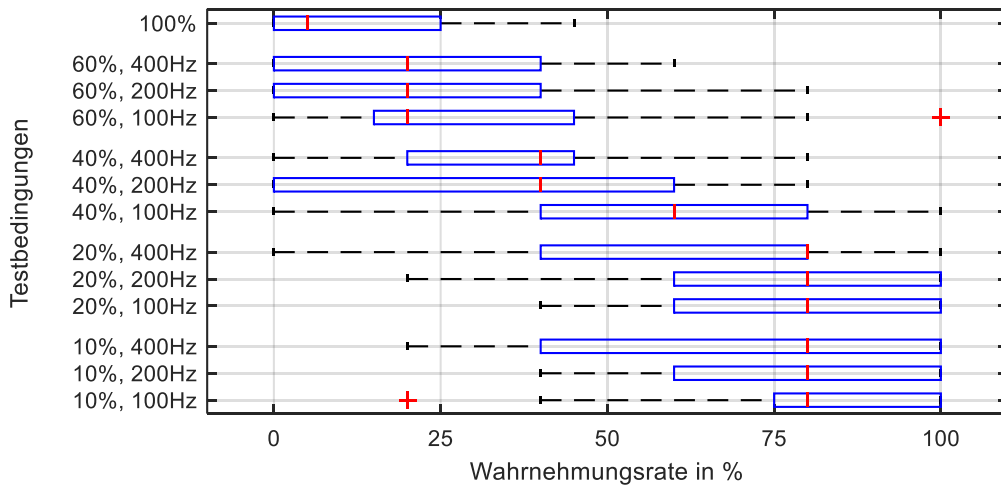
Tabelle 5.13: Kennwerte der Gruppen

	Durchschnittsalter in Jahren	Streuung in Jahren	Anzahl (Anteil)
Gruppe 1	28	8	17 (31%)
Gruppe 2	31	12	25 (45%)
Gruppe 3	30	13	13 (24%)

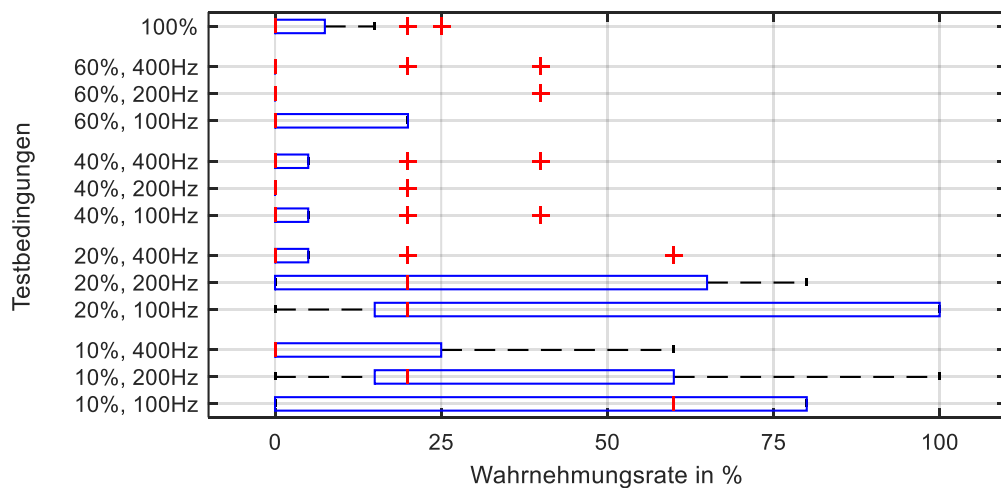
Die Versuchsergebnisse verschiedener Gruppen wurden mittels der Varianzanalyse auf Unterschiede überprüft. Das Resultat ergibt hoch signifikante Unterschiede ( $\alpha = 5\%$ ,  $p \ll 10^{-6}$ ) zwischen allen Gruppen. Zwischen den drei Altersgruppen (vgl. Abbildung 5.28) besteht jedoch kein signifikanter Unterschied ( $\alpha = 5\%$ ,  $p=76\%$ ).



(a) Gruppe 1, Perlschnureffekt gut wahrgenommen



(b) Gruppe 2, Perlschnureffekt oft wahrgenommen



(c) Gruppe 3, Perlschnureffekt kaum wahrgenommen

Abbildung 5.35: Empfindlichkeit der Wahrnehmung des Perlschnureffekts

Wie schon bei der Auswertung der Ergebnisse aller Probanden wurde auch in jeder Gruppe der Anteil der Personen, deren Wahrnehmungsrate unterhalb von 50 % liegt, für jede Testbedingung ermittelt.

Abbildung 5.36 zeigt die approximierten Verläufe für den Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 1 für die untersuchten Frequenzen.

Interessanterweise verläuft die Kurve von 100 Hz über den beiden anderen Kurven. Das bedeutet, dass die Probanden aus Gruppe 1 den Perlschnureffekt bei höheren Frequenzen besser wahrnehmen. Das liegt daran, dass der Abstand zwischen den Nachbildern auf der Netzhaut mit steigender Frequenz geringer wird, was offensichtlich zur besseren Wahrnehmung des Effektes führt.

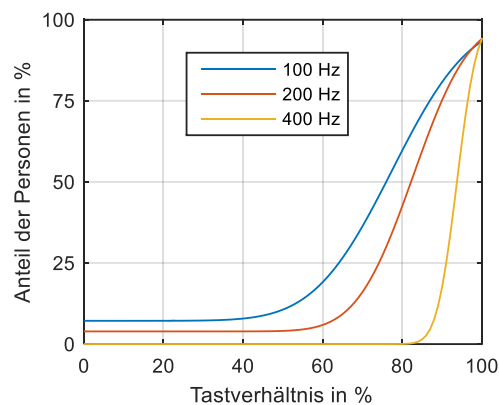


Abbildung 5.36: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 1 in Abhängigkeit vom Tastverhältnis

Tabelle 5.14 fasst einige Kennwerte der Verläufe aus Abbildung 5.36 zusammen. Das Schwellentastverhältnis  $\hat{\mu}_{dc}$  und das Tastverhältnis  $dc_{50\%}$  sind praktisch identisch und weisen Werte über 70 % auf. Die Testpersonen dieser Gruppe können offensichtlich den Perlschnureffekt reproduzierbar durch schnelle Augenbewegungen hervorrufen und wissen, worauf sie dabei achten sollen, um ihn wahrzunehmen. Einige Probanden verwechseln ihn jedoch mit dem Unschärfefeffer, der bei flimmerfreiem Licht durch Augenbewegungen entsteht. Darauf deutet eine im Vergleich zu den anderen Gruppen höhere Fehlerrate von 6-7 %.

Tabelle 5.14: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, Gruppe 1

	$\hat{\mu}_{dc}$	$dc_{50\%}$	Anteil bei $dc \rightarrow 0\%$	Anteil bei $dc = 100\%$
100 Hz	77%	77%	7%	93%
200 Hz	82%	83%	4%	94%
400 Hz	93%	95%	0%	94%

Die Probanden aus der Gruppe 2 nehmen den Perlschnureffekt schlechter wahr. Die höher verlaufenden Sigmoidfunktionen (Abbildung 5.37) weisen einen höheren Anteil an unempfindlichen Testpersonen als in Gruppe 1.

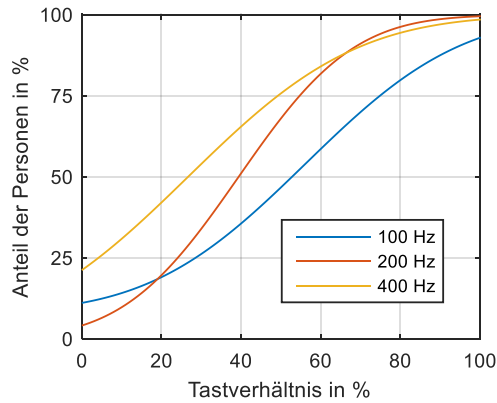


Abbildung 5.37: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 2 in Abhängigkeit vom Tastverhältnis

Die Tastverhältnisse  $\hat{\mu}_{dc}$  und  $dc_{50\%}$  sind auch in dieser Gruppe praktisch identisch (vgl. Tabelle 5.15). Die meisten Probanden nehmen den Perlschnureffekt bei 100 Hz ab einem Tastverhältnis  $dc = 52\%$  nicht wahr. Bei 200 Hz ist dafür ein kleineres Tastverhältnis von 39% und bei 400 Hz ein noch kleineres von 28% erforderlich.

Tabelle 5.15: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, Gruppe 2

	$\hat{\mu}_{dc}$	$dc_{50\%}$	Anteil bei $dc = 0\%$	Anteil bei $dc = 100\%$
100 Hz	56%	52%	11%	93%
200 Hz	39%	39%	4%	100%
400 Hz	26%	28%	21%	99%

Die Gruppe 3 besteht aus eher unempfindlichen Testpersonen, die den Perlschnureffekt nur bei 100 Hz und kleinen Tastverhältnissen unterhalb von 20% wahrnehmen. Aus dem Diagramm in Abbildung 5.38 ist deutlich zu erkennen, dass die meisten Probanden dieser Gruppe den Perlschnureffekt bei Frequenzen von 200 und 400 Hz sogar bei kleinen Tastverhältnissen nicht wahrnehmen.

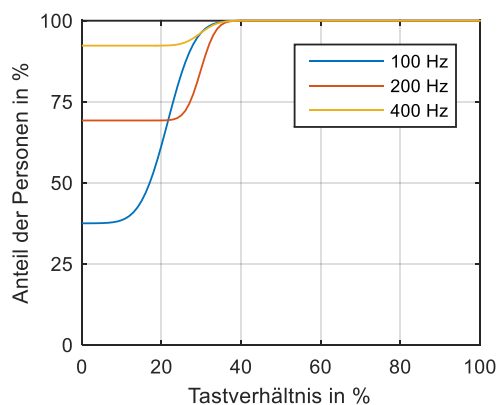


Abbildung 5.38: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 3 in Abhängigkeit vom Tastverhältnis

Die Kennwerte der Gruppe 3 fasst Tabelle 5.16 zusammen.

Tabelle 5.16: Kennwerte der empfindlichen Testpersonen, Gruppe 3

	$\hat{\mu}_{dc}$	$dc_{50\%}$	Anteil bei $dc = 0\%$	Anteil bei $dc = 100\%$
100 Hz	22%	18%	38%	100%
200 Hz	30%	<1%	69%	100%
400 Hz	30%	<1%	92%	100%

### 5.4.4.3 Phasenverschobene PWM

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchung mit phasenverschobenen PWM-Signalen vorgestellt. An diesem Versuch wurden 27 Personen getestet, die vorher an der ersten Teiluntersuchungen und unter anderem am Versuch mit synchroner PWM teilnahmen.

Die Wahrnehmungsraten über alle Probanden bei verschiedenen Testbedingungen sind in Abbildung 5.39 dargestellt. Die Wahrnehmungsrate liegt im Vergleich zur synchronen PWM nur bei den Tastverhältnissen von 10 und 20 % über der Schwelle von 50 %.

Der Einfluss der Frequenz ist ebenfalls zu erkennen: Die Ergebnisse für 100 und 200 Hz sind sehr ähnlich. Der Median der Wahrnehmungsrate bei diesen Frequenzen und einem Tastverhältnis von 10 % ist 100 %. Das bedeutet, dass mindestens 50 % aller Testpersonen den Perlschnureffekt bei diesen Bedingungen und bei jeder der fünf Wiederholungen wahrnehmen.

Im Gegensatz dazu, liegt der Median bei der PWM-Frequenz von 400 Hz bei 60 % nahe an der Wahrnehmungsschwelle. Für größere Tastverhältnisse ist der Median der Wahrnehmungsrate unter dem Schwellenwert von 50 %.

Weitere Ergebnisse zeigt Abbildung 5.40. Aus den Verläufen erkennt man deutlich, dass bereits bei 100 Hz und  $dc > 36\%$  die meisten Testpersonen den Perlschnureffekt nicht wahrnehmen. Bei synchroner PWM war dafür ein Tastverhältnis größer 46 % erforderlich (vgl. Abbildung 5.3 (a) und Tabelle 5.11).

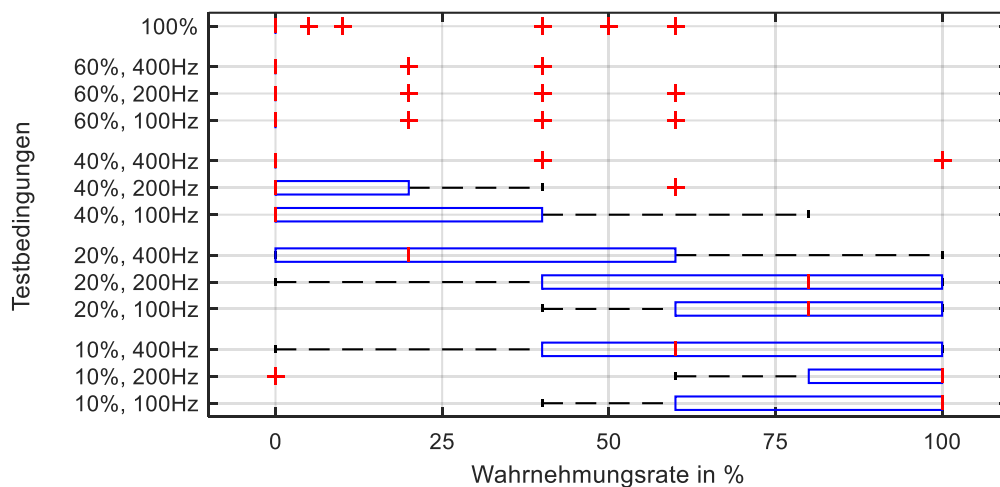


Abbildung 5.39: Wahrnehmung des Perlschnureffekts, phasenverschobene PWM

Für 200 Hz liegt das Schwellentastverhältnis bei 23 %. Ab dem Tastverhältnis von 30 % kann die Wahrnehmung des Perlschnureffekts praktisch ausgeschlossen werden. Hierbei steigt der Anteil unempfindlicher Personen über 90 %. Bei synchroner PWM lag hingegen das Schwellentastverhältnis mit 44 % deutlich über diesem Wert.

Das niedrigste Schwellentastverhältnis ist mit 18 % bei 400 Hz zu verzeichnen, während sich bei synchroner PWM und derselben Frequenz ein deutlich höheres Tastverhältnis von 64 % ergab.

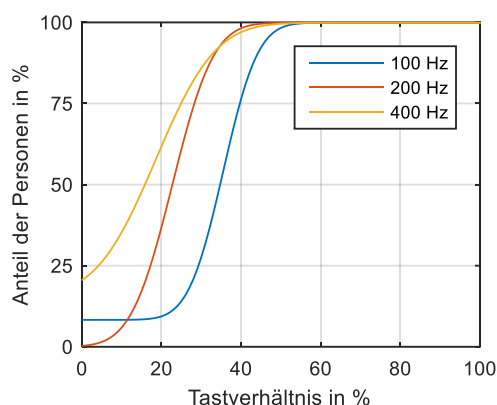


Abbildung 5.40: Anteil der unempfindlichen Personen, phasenverschobene PWM

Die Kennwerte der approximierten Verläufe sind Tabelle 5.17 zu entnehmen.

Tabelle 5.17: Kennwerte der unempfindlichen Testpersonen, phasenverschobene PWM

	$\hat{\mu}_{dc}$	$dc_{50\%}$	Anteil bei $dc \rightarrow 0\%$	Anteil bei $dc = 100\%$
100 Hz	36%	36%	8%	100%
200 Hz	23%	24%	3%	100%
400 Hz	18%	17%	21%	100%

Für die weitere Analyse werden auch hier Probandengruppen mithilfe des Fuzzy C-Means-Verfahrens gebildet. Die Gruppenbezeichnung entspricht der aus dem vorigen Versuch (vgl. Tabelle 5.12)

Die Kennwerte der Gruppen sind in Tabelle 5.18 zusammengefasst. Im Gegensatz zur Untersuchung mit der synchronen PWM bilden hier 14 Testpersonen (41 %), die den Perlschnureffekt kaum wahrnehmen, die größte Gruppe (Gruppe 3). Dabei sind dies ausschließlich jüngere Personen. Ihr Durchschnittsalter liegt bei 24 Jahren.

Die zweitgrößte Gruppe besteht aus 11 Testpersonen (32 %), die in der Lage sind, den Perlschnureffekt bei verschiedenen Testbedingungen gut wahrzunehmen (Gruppe 1). Ihr durchschnittliches Alter ist deutlich höher und liegt bei 40 Jahren. Die Streuung beträgt 17 Jahre.

Gruppe 2 ist die kleinste Gruppe. Sie besteht aus 9 Testpersonen (27 %), die den Perlschnureffekt in Abhängigkeit des PWM-Signals oft wahrnehmen können. Das Durchschnittsalter beträgt in dieser

Gruppe 29 Jahre. Die Streuung liegt bei 8 Jahren. Es ist ein Alterseinfluss zu erkennen. Jüngere Personen, die an diesem Versuch teilnahmen, nehmen den Perlschnureffekt signifikant schlechter wahr ( $\alpha = 5\%$ ,  $p=0,002\%$ ).

Tabelle 5.18: Kennwerte der Gruppen, phasenverschobene PWM

	Durchschnittsalter in Jahren	Streuung in Jahren	Anzahl (Anteil)
Gruppe 1	40	17	11 (32 %)
Gruppe 2	29	8	9 (27 %)
Gruppe 3	24	3	14 (41 %)

Die Gruppenverteilung der Probanden im vorigen Versuch ist in Tabelle 5.18 dargestellt. Die meisten Testpersonen gehörten in beiden Untersuchungen zu der gleichen Gruppe. Es ist eine kleine Verschiebung zwischen Gruppe 1 und Gruppe 2 in den beiden Versuchen zu erkennen: 3 Personen aus Gruppe 1 waren im vorigen Versuch in Gruppe 2. Dabei gehörte kein Proband zu Personen, die den Perlschnureffekt kaum wahrnehmen (Gruppe 3). Die meisten Personen in Gruppe 2 gehören zu den Testpersonen, die in beiden Versuchen den Perlschnureffekt oft wahrnahmen (Gruppe 2). Zwei Personen waren im vorangegangenen Versuch in Gruppe 1 und eine Person in Gruppe 3. Gruppe 3 besteht aus 9 Personen, die im Versuch mit synchroner PWM ebenfalls zu Gruppe 3 gehörten. 5 Personen nahmen dagegen im vorigen Versuch den Perlschnureffekt öfter wahr (Gruppe 2). Es ist jedoch keine Verschiebung zwischen Gruppe 1 und Gruppe 3 zu verzeichnen.

Tabelle 5.19: Vergleich der Gruppen aus Teilversuchen 3 und 4

	Gruppen im Versuch mit synchroner PWM		
	Gruppe 1 / Personen	Gruppe 2 / Personen	Gruppe 3 / Personen
Gruppe 1	8	3	0
Gruppe 2	2	6	1
Gruppe 3	0	5	9

Abbildung 5.41 fasst die Ergebnisse der Gruppe 1 zusammen. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus dem ersten Durchlauf ist auch bei empfindlichen Personen eine deutliche Reduzierung des Perlschnureffektes zu verzeichnen. Dennoch nimmt ein großer Teil dieser Personen den Perlschnureffekt bei kleinen Tastverhältnissen von unter 30 % auch bei hohen Frequenzen wahr.

Dabei entsteht praktisch kein Unterschied bei den Frequenzen von 200 und 400 Hz. Bei der PWM-Frequenz von 100 Hz nehmen die Probanden den Perlschnureffekt noch deutlich wahr, was der flachere Verlauf der Kurve zeigt.



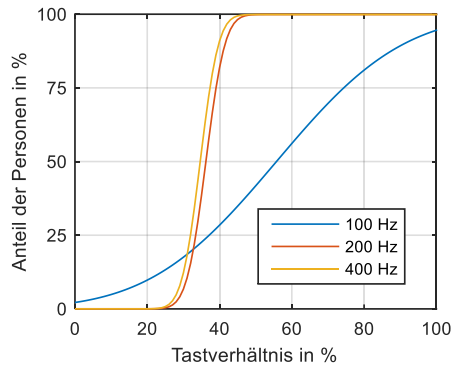


Abbildung 5.41: Anteil der unempfindlichen Personen in Gruppe 1, phasenverschobene PWM

Die Testpersonen aus Gruppe 2 benötigen mit steigender Frequenz ein kleineres Tastverhältnis um den Perlschnureffekt wahrzunehmen (vgl. Abbildung 5.42). Für Tastverhältnisse über 40 % nehmen sie den Effekt unabhängig von der Frequenz praktisch nicht mehr wahr. In dieser Gruppe ist der Unterschied zwischen den Ergebnissen für 100 und 200 Hz gering.

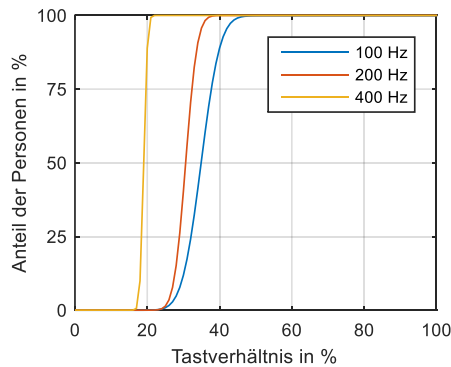


Abbildung 5.42: Anteil unempfindlicher Personen in Gruppe 2, phasenverschobene PWM

Die Gruppe 3 fasst generell unempfindliche Personen zusammen. Die meisten von ihnen können den Perlschnureffekt bei 200 Hz und Tastverhältnissen von über 20 % nicht mehr wahrnehmen. Bei 400 Hz wird der Perlschnureffekt praktisch nicht wahrgenommen.

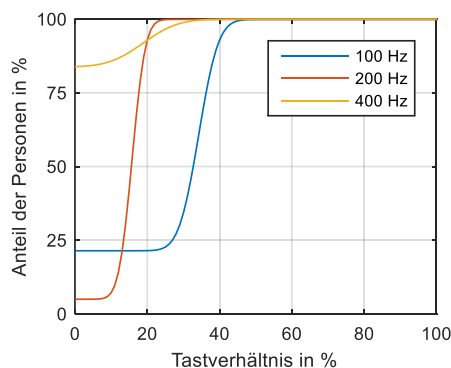


Abbildung 5.43: Anteil unempfindlicher Personen in Gruppe 3 bei phasenverschobener PWM

## 5.4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die beschriebene Untersuchung hatte das Ziel, eine optimale Leuchtdichte für die Beleuchtung von Verkehrsschildern zu ermitteln und den Einfluss des Tastverhältnisses auf die Wahrnehmung des Perlschnureffekts an Verkehrsschildern zu untersuchen. Darüber hinaus soll geklärt werden, welchen Vorteil eine phasenverschobene PWM mit sich bringt. Dies wurde in einer Probandenuntersuchung (55 Personen) unter kontrollierten Lichtbedingungen im Labor erreicht.

Bezüglich der Leuchtdichte von Verkehrsschildern konnte festgestellt werden, dass die meisten untersuchten Testpersonen eine Leuchtdichte im Bereich von 4.400 bis 6.600 cd/m<sup>2</sup> als optimal empfinden. Die an die reale Situation angelehnte maximale Leuchtdichte betrug dabei 11.000 cd/m<sup>2</sup>. Somit ist bei der PWM-Dimmung ein Tastverhältnis im Bereich von 40 % bis 60 % erforderlich. Während der Ermittlung der optimalen Leuchtdichte konnte keine der naiven Testpersonen den Perlschnureffekt bei einer PWM-Frequenz von 100 Hz wahrnehmen, obwohl sie dabei ihre Augen von einem Schild zu dem anderen bewegte. Nach der Erläuterung des Perlschnureffekts war hingegen jede Testperson in der Lage den Perlschnureffekt bei 100 Hz durch ihre Augenbewegungen hervorzurufen.

Unter den getesteten Probanden wurden starke interpersonelle Unterschiede in der Wahrnehmung des Perlschnureffekts festgestellt. Tabelle 5.20 gibt einen Überblick über die Probandengruppen nach ihrer Wahrnehmung (vgl. Tabelle 5.12).

Der Anteil der Testpersonen von ca. 30 %, die den Perlschnureffekt gut wahrnehmen (Gruppe 1), ist für die beiden PWM-Arten nahezu gleich. Bei phasenverschobener PWM steigt hingegen der Anteil der Personen, die den Perlschnureffekt schlecht wahrnehmen (Gruppe 3), von 24 % (synchrone PWM) auf 41 %.

Tabelle 5.20: Kennwerte der Gruppen in Teilversuchen zu Perlschnureffekt

	Synchrone PWM		Phasenverschoben PWM	
	Durchschnittsalter in Jahren	Anzahl (Anteil)	Durchschnittsalter in Jahren	Anzahl (Anteil)
Gruppe 1	28	17 (31%)	40	11 (32%)
Gruppe 2	31	25 (45%)	29	9 (27%)
Gruppe 3	30	13 (24%)	24	14 (41%)

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Methode der Phasenverschiebung der PWM-Signale zu einer deutlichen Reduzierung des Perlschnureffekts führt. Tabelle 5.21 gibt einen Überblick über die Schwellentastverhältnisse bei den untersuchten Frequenzen einmal für alle Probanden und einmal für die empfindlichen Probanden aus Gruppe 1.

Durch das Umformen von Formel 5.3 nach Tastverhältnis ergibt sich

$$dc(f) = \frac{\hat{f} - f}{m} \quad 5.4$$

Mit Formel 5.4 ist möglich zu einer gegebenen Frequenz  $f$  das Schwellentastverhältnis  $dc$  zu bestimmen. Mit der in Abschnitt 5.3.4 ermittelten Frequenz  $\hat{f}_{50\%} = 573$  Hz ergeben sich für 100 Hz und

200 Hz Tastverhältnisse von 48 % und 38 %. Diese stimmen praktisch mit den Schwellentastverhältnissen  $dc_{sync,50\%}$  aller Probanden überein (vgl. Tabelle 5.21).

Für 400 Hz ergibt sich nach Formel 5.4  $dc = 18 \%$ , das sich stark von dem in diesem Versuch ermittelten Tastverhältnis von 32 % unterscheidet. Allerdings verläuft die approximierte Kurve für 400 Hz generell sehr flach und bei Tastverhältnissen unterhalb von 30 % sehr nah an der 50 %-Schwelle (vgl. Abbildung 5.34). Deshalb können in diesem Bereich für das Schwellentastverhältnis große Abweichungen in Abhängigkeit der Stützpunkte entstehen.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Anteil der unempfindlichen Personen für  $dc = 20 \%$  bei 48 % liegt. Somit ist das nach Formel 5.4 ermittelte Tastverhältnis von 18 % ein guter Schätzwert.

Tabelle 5.21: Vergleich der Schwellentastverhältnisse für zwei PWM-Arten

	Alle Probanden		Gruppe 1	
	$dc_{sync,50\%}$	$dc_{shift,50\%}$	$dc_{sync,50\%}$	$dc_{shift,50\%}$
100 Hz	46 %	36 %	77 %	56 %
200 Hz	38 %	24 %	83 %	36 %
400 Hz	32 %	17 %	95 %	34 %

Die Ergebnisse aus Tabelle 5.21 zeigen deutlich, dass die meisten Testpersonen den Perlschnureffekt bei 200 Hz und Tastverhältnissen oberhalb von 38 % nicht wahrnehmen. Somit sind sie nicht in der Lage, ihn wahrzunehmen, wenn Verkehrsschilder optimal ausgeleuchtet sind ( $dc = 40 \dots 60 \%$ ). Bei phasenverschobener PWM kann die Frequenz sogar niedriger sein. Die empfindlichen Testpersonen können ihn hingegen bei synchroner PWM auch bei 400 Hz sehr gut wahrnehmen. Durch die Phasenverschiebung in der PWM ist für diese Testpersonen eine Frequenz von 200 Hz ausreichend, um bei der optimalen Ausleuchtung von Verkehrsschildern das Entstehen des Perlschnureffekts zu verhindern.

Demzufolge kann die in der Kfz-Frontbeleuchtung übliche PWM-Frequenz von 200 Hz in Multispot-Systemen verwendet werden. Dabei muss die Lichtverteilung einzelner Segmente aus mindestens zwei sich nahezu komplett überlappenden Lichtverteilungen, die von verschiedenen LED-Gruppen erzeugt werden, bestehen. Die PWM-Signale dieser LED-Gruppen müssen zudem zeitlich zueinander verschoben sein. Durch die Erhöhung der LED-Gruppen und die Phasenverschiebung ihrer PWM-Signale wird die Fluktuationsfrequenz des resultierenden Lichtes um ein Vielfaches höher als die PWM-Frequenz (vgl. Kapitel 4). Demnach kann die PWM-Frequenz sogar reduziert werden, ohne dadurch das Entstehen des Perlschnureffekts zu begünstigen.

---

## 5.5 Fazit

---

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen beantworten mehrere Fragen in Bezug auf die Wahrnehmung der Flimmereffekte, die durch die PWM-Dimmung entstehen. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der Einflussfaktoren im Labor unter möglichst für die Anwendung im Automobil relevanten Bedingungen.

---

---

In der ersten Untersuchung in Abschnitt 5.1 wird die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter den für die Kfz-Frontbeleuchtung relevanten Bedingungen ermittelt. Dabei werden verschiedene Fahrsituationen simuliert, in denen flimmernde Bereiche sowohl foveal, als auch peripher erscheinen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die FVF für die untersuchten Bedingungen bei 40 Hz liegt. Zudem ist keine Erhöhung der FVF im peripheren Bereich zu verzeichnen. Da die ermittelte FVF deutlich niedriger ist, als die in der Kfz-Frontbeleuchtung übliche PWM-Frequenz von 200 Hz, werden die PWM-gedimten Frontscheinwerfer kein direkt wahrnehmbares Flimmern verursachen.

Im zweiten Experiment in Abschnitt 5.2 wird die Grenzfrequenz des Perlschnureffekts bei schnellen Augenbewegungen untersucht. Die untersuchten Parameter orientieren sich dabei an Lichtbedingungen im Kfz-Innenraum insbesondere an den Lichtspektrum und Größe der Lichtquelle.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt vom Spektrum der Lichtquelle abhängig ist. Bei blauem Licht mit der Peak-Wellenlänge von 450 nm und einer Leuchtdichte von  $0,1 \text{ cd/m}^2$  entsteht der Perlschnureffekt nicht. Bei gleicher Leuchtdichte und bei rotem Licht mit der Peak-Wellenlänge von 625 nm ist die Grenzfrequenz des Perlschnureffekts höher als bei grünem Licht mit der Peak-Wellenlänge von 520 nm. Da die meisten leuchtenden Elemente im Kfz-Innenraum sehr schmal sind, kann dort der Perlschnureffekt bei kleinen Tastverhältnissen und PWM-Frequenzen bis über 1000 Hz entstehen. Um eventuelle Irritationen zu vermeiden, sollen Bereiche, die der Fahrer während der Fahrt oft ansieht entweder mittels CCR oder hohen PWM-Frequenzen gedimmt werden. Durch die Methode der Phasenverschiebung kann eine niedrigere PWM-Frequenz gewählt werden. Allerdings sind dafür mehrere LED-Gruppen, die mit phasenverschobenen PWM-Signalen angesteuert werden können, erforderlich.

Die dritte Untersuchung in Abschnitt 5.3 beschäftigt sich mit dem Perlschnureffekt, der durch die PWM-gedimnte Kfz-Frontbeleuchtung an Verkehrsschildern einer Straßenkreuzung entstehen kann. Um die Testbedingungen möglichst realistisch zu gestalten, wird für die Testperson eine Nebenaufgabe formuliert. Diese sorgt vor allem für eine schnelle Augenbewegung der Testperson.

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der Perlschnureffekt bei einer Nebenaufgabe weniger auffällig ist als beim Abtasten der Szene mit schnellen Augenbewegungen. Anhand der gewonnenen Ergebnisse ist es möglich die Grenzfrequenzen und die Schwellenfrequenz des Perlschnureffekts (vgl. Formel 5.3 und Tabelle 5.9) für verschieden Tastverhältnisse abzuschätzen. Die Gültigkeit dieser Schätzmethode bestätigen die Ergebnisse der Untersuchung aus Abschnitt 5.4. Basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchung ist für die Dimmung der Kfz-Frontscheinwerfer eine PWM-Frequenz von 400 Hz erforderlich, um das Auftreten des Perlschnureffekts zu vermeiden.

In der vierten Laboruntersuchung in Abschnitt 5.4 wird neben der für Verkehrsschilder optimalen Leuchtdichte der Einfluss des Tastverhältnisses auf das Entstehen des Perlschnureffekts an Retroreflektoren ermittelt. Zudem wird überprüft, ob naive Testpersonen in der Lage sind den Perlschnureffekt wahrzunehmen.

Die Ergebnisse geben deutliche Hinweise darauf, dass der Perlschnureffekt vor allem dann entsteht, wenn die Testperson ihn kennt und wenn sie ihn gezielt durch schnelle Augenbewegungen provoziert. 30 % aller Testpersonen können den Perlschnureffekt bei der höchsten getesteten Frequenz von 400 Hz und bei verschiedenen Tastverhältnissen gut wahrnehmen. Durch die Phasenverschiebung der PWM-Signale sind diese Personen nicht mehr in der Lage den Perlschnureffekt bei einer

---

PWM-Frequenz von 200 Hz und einem Tastverhältnissen oberhalb von 36 % wahrzunehmen. Dies hat zur Folge, dass die Phasenverschiebung das Wahrnehmen des Perlschnureffekts bei optimal ausgeleuchteten Verkehrsschildern (40-60 %) sogar für empfindliche Testpersonen unmöglich macht.

In der zusammenfassenden Betrachtung deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die PWM-gedimmte Innenraum- sowie Frontbeleuchtung im Automobil in verschiedenen Situationen während der Fahrt den Perlschnureffekt verursachen kann. Dennoch bleibt die Frage offen, ob das visuelle System, das durch die Fahraufgabe stark beansprucht ist, den Perlschnureffekt unterdrückt. Diesem Aspekt widmet sich Kapitel 6.

---

## 6 Perlschnureffekt in der Kraftfahrzeugbeleuchtung

Aus den Ergebnissen der in Kapitel 5 beschriebenen Laboruntersuchungen geht hervor, dass die Schwelle des Perlschnureffekts zum Teil deutlich über der in der Kfz-Beleuchtung typischen PWM-Frequenz von 200 Hz liegt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Testbedingungen hinsichtlich der Beleuchtungssituation sowie der Aufgabe der Testperson möglichst an die für die Praxis relevante Situationen optimiert. Dennoch können im realen Straßenverkehr zusätzliche Faktoren die visuelle Wahrnehmung beeinflussen. Die Komplexität einer realen Verkehrssituation ist neben der Vielfalt an verschiedenen Objekten – wie Verkehrsteilnehmer, Passanten, Verkehrsschilder oder Tiere auch durch die Fahraufgabe an sich begründet. Somit ist das Hauptziel der im Folgenden beschriebenen Experimente das Wahrnehmen des Perlschnureffekts im realen Straßenverkehr zu untersuchen.

Abschnitt 6.1 beschreibt zwei Vorversuche, in denen einerseits die Ergebnisse der Laboruntersuchungen überprüft werden. Andererseits sollen anhand der gewonnenen Ergebnisse Anforderungen für eine systematische Untersuchung im realen Straßenverkehr erarbeitet werden. Abschnitt 6.2 beschäftigt sich mit Fahrversuchen in einem Fahrzeug mit selbstgebaute LED-Scheinwerfern. Der Fokus liegt hierbei auf der Überprüfung der erarbeiteten Versuchsmethodik. Anschließend beschreibt Abschnitt 6.3 Fahrversuche mit einem Serienfahrzeug mit LED-Scheinwerfern zur Untersuchung der Flimmereffekte unter möglichst realistischen Bedingungen. Abschließend werden die gewonnenen Ergebnisse im Abschnitt 6.4 zusammengefasst und diskutiert.

Teile der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen sind bereits in [85], [99] behandelt. In diesem Kapitel werden sie ausführlicher analysiert.

---

### 6.1 Vorversuche

---

Die im Folgenden beschriebenen Vorversuche wurden durchgeführt, um das Erscheinen der Flimmereffekte – direktes Flimmern, Perlschnureffekt, Stroboskopeffekt – unter möglichst realistischen Bedingungen zu ermitteln. Die dabei gewonnenen Ergebnisse werden mit den Ergebnissen der Laboruntersuchungen verglichen.

#### 6.1.1 Fahrversuch mit einem LED-Multispot-Scheinwerfer (Prototyp)

Das Ziel dieses Fahrtests ist die Untersuchung von Flimmereffekten bei einem adaptiven Multispot-system in verschiedenen realen Fahrsituationen.

Für diesen Versuch stellte die Adam Opel AG ein Fahrzeug mit einem Multispotsystem zur Verfügung. Dieses System befand sich derzeit in einer Entwicklungsphase. Die Frequenz der PWM-Dimmung von 200 Hz und der Algorithmus zur Ansteuerung einzelner Segmente konnte jedoch nicht geändert werden.

Im stehenden Zustand bei aktiviertem Fernlicht wurde im äußeren seitlichen Bereich ein Tastverhältnis von 15 % ermittelt. Zur Mitte hin wurde das Tastverhältnis größer. Bei mittleren Segmenten betrug es 80 %. Laut Hersteller werden einige Segmente während der Fahrt je nach Verkehrssituation mit dem maximal möglichen Tastverhältnis von 100 % angesteuert.

---

Mit dem Fahrzeug werden bei Dunkelheit Fahrversuche mit Probanden im realen Straßenverkehr durchgeführt. Dafür wurde eine Strecke in der Umgebung von Darmstadt ausgewählt. Der Rundkurs beinhaltete insgesamt 20 km Autobahn, 20 km Landstraße, 10 km Stadt und dauert etwa 90 min pro Testperson. Der Landstraßenabschnitt wurde mit möglichst vielen Kurven ausgesucht, so dass der Fahrer durch die Kurven häufig schnelle Augenbewegungen ausführt, verschiedene Bereiche der Lichtverteilung anschaut und dadurch eventuelle Flimmereffekte wahrnimmt.

#### **6.1.1.1 Methodik**

Vor der Fahrt werden die Flimmereffekte erläutert. Da der seitliche Bereich bei Fernlicht im stehenden Zustand auf 15 % gedimmt ist, führt der Testleiter dort schnelle Handbewegungen aus, um den Stroboskopeffekt zu veranschaulichen (vgl. Abbildung 2.14). Der Perlschnureffekt wird im Fahrzeuginnenraum an einem Kontrolllämpchen, das über PWM gedimmt ist, erörtert. Um ihn hervorzurufen führt die Testperson schnelle Augenbewegungen vom Kontrolllämpchen weg und wieder zurück. Die Testperson wird instruiert, beim Führen des Fahrzeugs nach diesen oder ähnlichen Effekten oder direkt wahrnehmbarem Flimmern zu suchen und zu berichten, wenn diese wahrgenommen werden.

#### **6.1.1.2 Ergebnisse**

An dieser Untersuchung nahmen fünf Personen teil: Vier männliche im Alter zwischen 19 und 31 Jahren und eine 23-jährige weibliche Person. Während der Fahrt entstanden viele unterschiedliche Verkehrssituationen. Sowohl auf der Autobahn als auch auf der Landstraße gab es Abschnitte unterschiedlichen Verkehrsaufkommens, so dass der Fahrer verschiedene Lichtverteilungen, die adaptiv durch das Multispotsystem erzeugt wurden, betrachten konnte.

Alle Probanden kannten den Stroboskopeffekt, der durch eine schnelle Bewegung verursacht wird. Vier Probanden war der Perlschnureffekt vor der Untersuchung nicht bekannt. Direktes Flimmern wurde von keiner Testperson wahrgenommen. Nachdem sie darauf hingewiesen wurden, konnten alle Testpersonen den Wagenradeneffekt (vgl. Abschnitt 2.3.2) wahrnehmen. Dabei waren alle Testpersonen der Meinung, dass ihnen dieser Effekt ohne den Hinweis des Testleiters nicht aufgefallen wäre. Sie bezeichneten ihn als nicht sicherheitskritisch.

Zwei männliche Probanden und der Testleiter nahmen an den Leitpfosten und an einigen Verkehrsschildern einen Effekt wahr, konnten ihn jedoch nicht eindeutig zuordnen. Vermutet wird der Perlschnureffekt. Aufgrund der dynamischen Anpassung der Lichtverteilung in Abhängigkeit der Verkehrssituation war es nicht möglich diesen Effekt gezielt zu wiederholen. Deshalb kann an dieser Stelle keine eindeutige Aussage über das Wahrnehmen des Perlschnureffekts beim Fahren gemacht werden.

Sehr auffällig fanden alle Probanden stark reflektierende Verkehrsschilder, welche in einigen Situationen laut Probanden sogar blendeten. Da es sich bei diesem Multispotsystem um einen Prototypen handelt, sollten die Algorithmen für den Serieneinsatz angepasst werden, so dass Verkehrsschilder mit geringerem Lichtstrom angestrahlt werden. Dafür wäre ein Tastverhältnis aus dem Bereich von 40 - 60 % geeignet. Dieser wurde in der Laboruntersuchung in Abschnitt 5.4 als optimal ermittelt. Allerdings konnten in der Laboruntersuchung etwa 30 % aller Probanden bei der PWM-Frequenz von 200 Hz den Perlschnureffekt wahrnehmen. Auf die Frage, ob er auch beim Fahren wahrnehmbar ist, gehen die weiteren Untersuchungen in Abschnitt 6.2 und 6.3 an. Im nächsten Abschnitt wird zunächst der zweite Vorversuch beschrieben.



---

## 6.1.2 Dimmung kompletter Lichtverteilung, statischer Versuch

Die in Abschnitt 6.1.1 beschriebenen Ergebnisse zeigen für die untersuchten Probanden, dass sie keine Flimmereffekte beim Fahren mit einem Multispotsystem wahrnehmen können. Allerdings passt sich die Lichtverteilung des Scheinwerfersystems dynamisch an die Verkehrssituation an, indem verschiedene Segmente unterschiedlich gedimmt werden. Da es keine Möglichkeit bestand, die Ansteuerung der Segmente zu ändern, konnte die Untersuchung nicht systematisch durchgeführt werden, um eine Aussage über das Auftreten der Flimmereffekte zu treffen. Somit ist das Ziel dieses Vorversuchs zu überprüfen, bei welchen PWM-Frequenzen der Perlschnureffekt an Verkehrsschildern wahrgenommen werden kann.

### 6.1.2.1 Methodik

Für diesen Versuch wurde eine T-Kreuzung einer selten befahrenen Waldstraße mit mehreren Verkehrsschildern ausgesucht. Diese Kreuzung wurde im Laboraufbau in Abschnitt 5.3 nachgebildet. Abbildung 6.1 zeigt den Untersuchungsort aus etwas weiterer Entfernung. Während des Versuchs befindet sich das Fahrzeug weiter vorne, so dass der Abstand zu den Schildern in der Mitte 15 m beträgt.



Abbildung 6.1: Untersuchungsort

Als Lichtquelle diente die LED-Beleuchtung (Farbtemperatur 5700 K) aus der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Laboruntersuchung. Diese ist auf dem Dach des Fahrzeugs befestigt. Ihre Lichtstärkeverteilung ist nahezu symmetrisch und besitzt einen Öffnungswinkel von  $90^\circ$ . Somit erfasst sie den kompletten Fernlichtbereich eines Kfz-Frontscheinwerfers.

Der maximale Lichtstrom der LED-Beleuchtung wird mittels Stromreduzierung an die Leuchtdichte der Schilder angepasst, die sich bei Fernlicht des Fahrzeugs ergibt. Das Fahrzeug verfügt über Frontscheinwerfer auf Basis von Hochdruckentladungslampen (ugs. Xenon). Die Leuchtdichteaufnahme ist in Abbildung 5.15 dargestellt.

Während der Untersuchung ist das Abblendlicht des Fahrzeugs angeschaltet. Die LED-Beleuchtung, die das Fernlicht simuliert, ist mittels PWM auf 20 % gedimmt. Das Tastverhältnis wird während des Versuchs nicht geändert. Damit wird der Extremfall untersucht, bei dem die komplette Fernlichtverteilung mit dem gleichen Tastverhältnis moduliert ist.



---

Zur Veranschaulichung des Perlschnureffekts wird die PWM-Frequenz vor dem Versuch auf 50 Hz eingestellt. Dabei reichen bereits kleine Augenbewegungen um den Effekt wahrzunehmen.

Die Testperson hat die Aufgabe schnelle Augenbewegungen ausgehend von den Schildern abwechselnd zur linken und rechten Seite hin und wieder zurück auszuführen, als würde sie nach seitlich ankommendem Verkehr schauen. Dabei berichtet die Testperson, ob sie den Perlschnureffekt wahrnehmen kann. Angefangen bei 100 Hz stellt der Testleiter eine höhere Frequenz in 20 Hz Schritten ein. Nach dem die Testperson nicht mehr in der Lage ist, den Perlschnureffekt wahrzunehmen, wird die Frequenz in 5 Hz Schritten reduziert, bis die Testperson ihn wieder detektierte. Diese Schwellenfrequenz wird dokumentiert.

### 6.1.2.2 Ergebnisse

An diesem Versuch nahmen 4 Personen im Alter zwischen 22 und 30 Jahren teil. Alle Testpersonen kannten bereits den Perlschnureffekt. Bei der PWM-Frequenz von 50 Hz, die zur Veranschaulichung des Perlschnureffekts vor dem Versuchsbeginn diente, nahm keine Testperson das Flimmern wahr, was die Ergebnisse aus dem Laborversuch in Abschnitt 5.1 bestätigt. Dabei konnte der Perlschnureffekt an Bäumen und Verkehrsschildern wahrgenommen werden. Ab 100 Hz traf der Perlschnureffekt ausschließlich an den Schildern auf.

Die ermittelten Schwellenfrequenzen des Perlschnureffekts an den Schildern sind in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Testperson 2 nahm bereits an mehreren Untersuchungen über den Perlschnureffekt teil. Die dabei gesammelte Erfahrung ist ein möglicher Grund für die unter den Probanden höchste Schwellenfrequenz von 430 Hz.

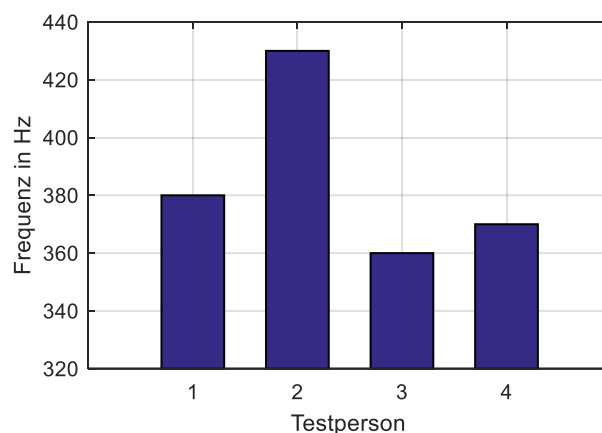


Abbildung 6.2: Vergleich der Schwellenfrequenzen der Testpersonen

Die Ergebnisse anderer Testpersonen sind sehr ähnlich. Im Durchschnitt ergibt sich eine Schwellenfrequenz von 385 Hz. In der Laboruntersuchung in Abschnitt 5.3 unter gleichen Testparametern – Leuchtdichte, Tastverhältnis, Aufgabe der Testperson – wurde für die Schwellenfrequenz des Perlschnureffekts ein Frequenzbereich zwischen 377 Hz und 492 Hz ermittelt. Die mittlere Schwellenfrequenz aus diesem Versuch liegt in diesem Frequenzbereich. Das zeigt, dass die Laborergebnisse auf die statisch nachgestellten Situationen auf der Straße übertragbar sind.

---

Der Unterschied zu den Fahrttests mit dem Multispot-Prototypen ist darin begründet, dass die Segmente, die Verkehrsschilder anstrahlen, entweder gar nicht oder bei einem hohen Tastverhältnis gedimmt sind, was sich aus der entstehenden Blendung schließen lässt (vgl. Abschnitt 6.1.1.2). In diesem Fall ist jedoch das Entstehen des Perlschnureffekts unwahrscheinlich bzw. nicht möglich. Um das Wahrnehmen des Perlschnureffekts während der Fahrt systematisch untersuchen zu können, ist deswegen zwingend erforderlich, die Frequenz und das Tastverhältnis des PWM-Signals in Feldversuchen variieren zu können.

---

## **6.2 Fahrversuch mit einer selbst aufgebauten LED-Frontbeleuchtung**

---

Die Ergebnisse der Vorversuche (vgl. Abschnitt 6.1) zeigen, dass die in den Laborversuchen ermittelten Schwellenfrequenzen zumindest auf statische Situationen im Straßenverkehr übertragbar sind. Die Fahrversuche mit einem Multispot-Prototypen geben Hinweise auf ein mögliches Auftreten des Perlschnureffekts auch in dynamischen Situationen.

Allerdings ist für eine systematische Untersuchung des Perlschnureffekts während der Fahrt eine kontrollierte und reproduzierbare Einstellung des PWM-Signals erforderlich. Aus diesem Grund wird für diesen Fahrversuch eine Frontbeleuchtung entwickelt, die während der Fahrt mit einem einstellbaren PWM-Signal angesteuert werden kann.

### **6.2.1 Ziele der Untersuchung**

Die im Folgenden beschriebene Untersuchung hat einen explorativen Charakter. Ziel ist die Ermittlung von Verkehrssituationen, in denen das Entstehen des Perlschnureffekts besonders begünstigt ist. Dabei soll die Abhängigkeit von der PWM – der Frequenz und des Tastverhältnisses berücksichtigt – werden.

In einem Fahrversuch mit Probanden soll zudem ermittelt werden, ob die Testperson in der Lage ist, den Perlschnureffekt bei einem gewöhnlichen Blickverhalten beim Führen eines Fahrzeugs wahrzunehmen.

Des Weiteren soll das Wahrnehmen des Perlschnureffekts bei seinem gezielten Hervorrufen durch schnelle Augenbewegungen untersucht werden. Die Ergebnisse sind anschließend zu vergleichen.

### **6.2.2 Versuchsträger**

Für diese Untersuchung wird eine Frontbeleuchtung auf Basis von LED-Scheinwerfermodulen entwickelt, die bereits in Serienfahrzeugen verwendet werden. Zum Einsatz kommen LED-Module der Mercedes S- und CLS-Klasse.

Mit den Modulen der S-Klasse wird die Abblendlichtverteilung erzeugt. Diese sind auf einem Rahmen befestigt und zueinander nach den Vorschriften der UNECE Nr. 112 [98] auf einem Kfz-Goniophotometer ausgerichtet. Danach werden sie im Frontbereich eines Fahrzeugs vom Typ BMW 5er-Serie montiert und entsprechend der UNECE Nr. 112 eingestellt. Abbildung 6.3 (a) zeigt die entwickelte Vorrichtung befestigt am Fahrzeug.

Die LED-Module der Mercedes CLS-Klasse erzeugen eine Fernlichtverteilung. Sie sind im Bereich der Nebelscheinwerfer positioniert und ebenfalls regelkonform ausgerichtet (Abbildung 6.3 (b)).



(a) Abblendlicht



(b) Fernlicht

Abbildung 6.3: Die entwickelte LED-Frontbeleuchtung am Fahrzeug

Zur Dimmung des Fernlichtes wird die Elektronik aus der Laboruntersuchung in Abschnitt 5.4 weiterentwickelt. Diese Elektronik ermöglicht eine genaue Dimmung mittels der PWM und der CCR gleichzeitig. Die CCR-Dimmung ist für flimmerfreie Einstellungen erforderlich. Diese werden zur Überprüfung verwendet, ob die Testperson den Perlschnureffekt mit dem Unschärfeneffekt verwechselt, der bei flimmerfreiem Licht und schnellen Augenbewegungen auftritt (vgl. Abschnitt 5.3 und 5.4). Diese Elektronik wird über einen PC im Fahrzeuginnenraum gesteuert. Somit ist die Änderung der Dimmung während der Fahrt möglich. Dabei wird nur das Fernlicht gedimmt. Das Abblendlicht ist konstant und flimmerfrei.

### 6.2.3 Ermittlung der Untersuchungsparameter

Vor den Untersuchungen mit Probanden fuhr der Autor mit der entwickelten LED-Frontbeleuchtung auf verschiedenen Strecken im öffentlichen Straßenverkehr. Insgesamt wurden 30 unterschiedliche Lichteinstellungen getestet: 24 PWM-Einstellungen und 6 Konstantstromeinstellungen. Diese sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Untersuchten Lichteinstellungen

Dimmverfahren	Dimmstufe in %	Frequenz in Hz
PWM	5, 10, 20, 40, 60, 80	100, 200, 400, 800
CCR	5, 10, 20, 40, 60, 80	k. A.

Die flimmerfreien Konstantstromeinstellungen dienen zur Vermeidung des Lerneffektes und des Ratens beim Wahrnehmen des Perlschnureffektes.

---

Während der Fahrt wurden verschiedene PWM-Signale für das Fernlicht in randomisierter Reihenfolge fortlaufend eingestellt. Der Fahrer hatte die Aufgabe den Perlschnureffekt durch schnelle Augenbewegungen zu provozieren und nach seinem Erscheinen einen Taster zu drücken. Mit dem Tasterdruck bzw. nach dem Ablauf einer Minute wurde das nächste PWM-Signal eingestellt.

Die Lichteinstellungen wurden automatisch mithilfe einer speziell entwickelten Software vorgenommen. Zudem speicherte diese Software ihre Reihenfolge und die Reaktion des Fahrers.

Die Fahrten fanden an fünf Nächten unter trockenen Straßenverhältnissen statt. Jede Fahrt dauerte etwa 2 Stunden. Dabei wurde in keiner Situation ein direkt wahrnehmbares Flimmern beobachtet. Der Wagenradeffekt (vgl. Abschnitt 2.3.2) konnte an Rädern anderer Fahrzeuge wahrgenommen werden. An sich wiederholenden Strukturen wie beispielweise an Brückengeländern, Schutzwänden oder Schutzplanken auf Autobahnen oder Schnellstraßen traten keine stroboskopischen oder andere irritierende Effekte auf.

Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse für das Wahrnehmen des Perlschnureffekts ableiten:

- Er erscheint nur an retro-reflektierenden Objekten, wie Schilder oder Leitpfosten,
- Seine Wahrnehmungsrate bei 800 Hz ist sehr gering und beträgt max. 7 % bei  $dc = 5\%$ ,
- für  $dc \geq 60\%$  liegt die max. Wahrnehmungsrate bei allen getesteten Frequenzen unter 3 %,
- er ist an kurvigen Landstraßen einfacher zu provozieren,
- er entsteht bei raschen Augenbewegungen,
- an großen Verkehrstafeln tritt er nicht auf.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden für den Probandentest neun PWM-Signale ausgewählt. Diese fasst Tabelle 6.2 zusammen.

Tabelle 6.2: Untersuchte Lichteinstellungen

Dimmverfahren	Dimmstufe in %	Frequenz in Hz
PWM	5, 10, 20	100, 200
CCR	5, 10, 20	k. A.

Als Teststrecke wurde eine kurvige Straße bei Darmstadt gewählt. Die 2,7 km lange öffentliche Strecke besitzt viele Retroreflektoren entlang der Straße, was das Provozieren des Perlschnureffektes erleichtern soll.

## 6.2.4 Methodik

Die Testpersonen werden mit dem Fahrzeug abgeholt und fahren selbst zu der Teststrecke. Das Fernlicht ist dabei auf 10 % bei 200 Hz gedimmt. Die Testperson wird in dieser Versuchsphase über diese Einstellung nicht informiert.

Als Versuchsziel werden zunächst die Untersuchung der Homogenität des Scheinwerferlichtes und die Eigenblendung von retroreflektierenden Objekten angegeben. Dabei hat die Testperson die Aufgabe Retroreflektoren an Leitpfosten und Verkehrsschilder nach ihrer Helligkeit zu beurteilen. Die

Testperson führt also Augenbewegungen zu Objekten, an denen der Perlschnureffekt potentiell wahrgenommen werden kann, aus. Abbildung 6.4 zeigt das Ablaufdiagramm zu diesem Versuch.

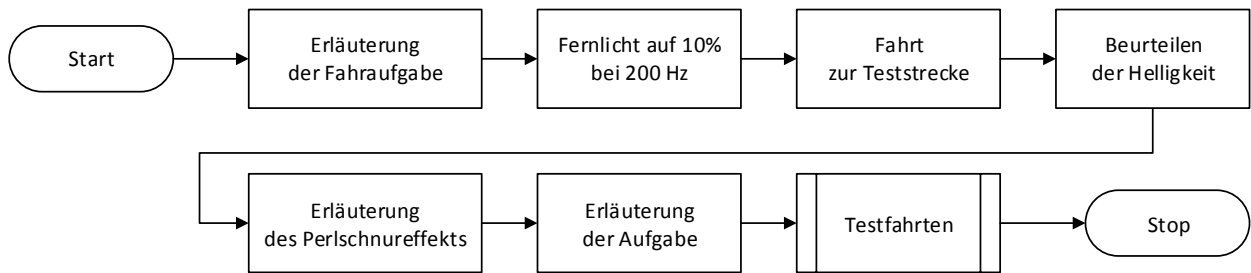


Abbildung 6.4: Ablaufdiagramm Fahrversuch mit umgebauten LED-Scheinwerfern

Nach der Ankunft an der Teststrecke fährt die Testperson einmal eine Runde. Danach wird der Perlschnureffekt an einem Verkehrsschild und einigen retroreflektierenden Leitpfosten bei verschiedenen Frequenzen und Tastverhältnissen deutlich gemacht.

Anschließend wird jeweils eine komplette Runde bei einer PWM-Einstellung gefahren. Die Aufgabe der Testperson besteht im Ausführen schneller ruckartiger horizontaler Augenbewegungen, um den Perlschnureffekt zu provozieren. Das Ablaufdiagramm des Fahrttests ist Abbildung 6.5 zu entnehmen.

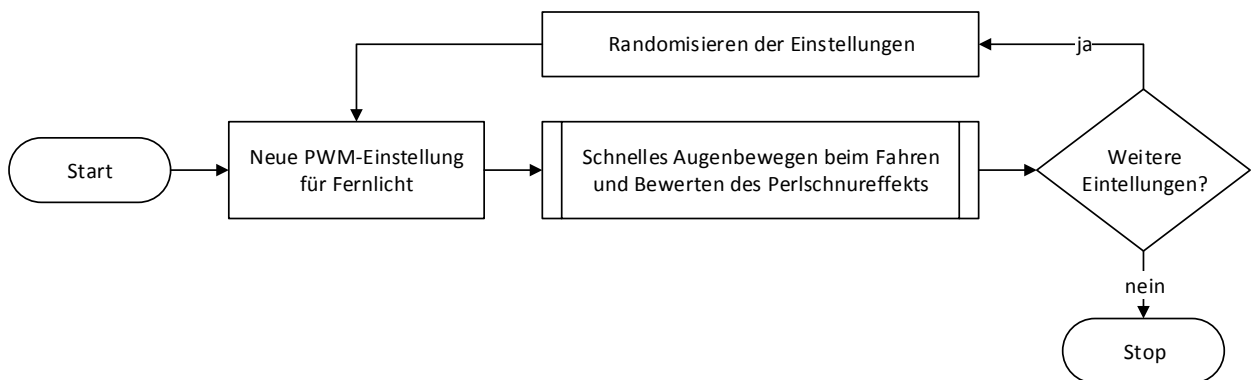


Abbildung 6.5: Ablaufdiagramm Testfahrten

## 6.2.5 Ergebnisse

An dieser Untersuchung haben fünf Personen im Alter zwischen 26 und 55 Jahren teilgenommen, darunter 3 weibliche und 2 männliche Personen. Keine Testperson kannte bisher den Perlschnureffekt.

Obwohl jede Testperson während der Fahrt zur Teststrecke die Helligkeit von Leitpfosten und Verkehrsschildern zu beurteilen hatte, nahm dabei keine Testperson weder den Perlschnureffekt noch etwas Ungewöhnliches an diesen Objekten wahr.

Die Ergebnisse für die Fahrten auf der Teststrecke sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Dabei bedeutet eine 1, dass der Perlschnureffekt vom Probanden bei der entsprechenden Einstellung wahrgenommen wurde. Eine 0 steht für den Fall, wenn der Effekt nicht auftrat. Bei Einstellungen mit flimmerfreien Licht gab es keine Fehldetektionen.

Tabelle 6.3: Ergebnisse der Testfahrten für 5 Testpersonen  
1 – wahrgenommen, 0 – nicht wahrgenommen

		P1	P2	P3	P4	P5
5%	100 Hz	0	1	0	0	0
10%	100 Hz	1	1	0	0	1
20%	100 Hz	0	1	0	1	1
5%	200 Hz	1	1	1	1	1
10%	200 Hz	1	1	1	1	1
20%	200 Hz	1	1	0	0	1

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Testperson P2 bei allen PWM-Einstellungen den Perlschnureffekt wahrnahm. Testpersonen P1, P3, P4 und P5 nehmen ihn bei 200 Hz besser wahr, als bei 100 Hz. Ein ähnliches Verhalten wurde in Laboruntersuchungen festgestellt (vgl. Abschnitt 5.4). Ein möglicher Grund dafür könnte darin liegen, dass der Abstand zwischen den Nachbildern auf der Netzhaut bei 100 Hz größer ist, als bei 200 Hz. Dadurch wird der Perlschnureffekt bei 200 Hz auffälliger.

Es wurde beobachtet, dass sich die Testpersonen innerhalb kürzerer Zeit während der Fahrt entscheiden konnten, ob sie den Perlschnureffekt bei der jeweiligen Einstellung wahrnehmen oder nicht.

Obwohl keine Testperson den Perlschnureffekt bei 10 % und 200 Hz während der Fahrt zur Teststrecke wahrnahm, konnte ihn jede Testperson, nachdem der Effekt ihr erklärt wurde, ihn bei dieser Einstellung hervorrufen. Allerdings gaben alle Testpersonen an, dass die dafür erforderlichen Augenbewegungen nicht ihrem normalen Blickverhalten im Straßenverkehr entsprechen.

Des Weiteren bewerteten alle Probanden den Effekt als nicht irritierend oder störend. Außer dem Perlschnureffekt konnten die Testpersonen weder direktes Flimmern noch stroboskopische oder andere irritierende Effekte wahrnehmen.

## 6.2.6 Diskussion der Ergebnisse

Das beschriebene Experiment hatte das Ziel, Verkehrssituationen, in denen das Entstehen des Perlschnureffekts durch die PWM-gedimmte Frontbeleuchtung besonders begünstigt wird, zu identifizieren und dabei für die Probandenuntersuchung relevante PWM-Einstellungen zu ermitteln. Darüber hinaus sollte in einem Fahrversuch mit Probanden der Perlschnureffekt untersucht werden. Dabei sollte der Perlschnureffekt einmal bei Augenbewegungen, die der Proband gewöhnlich beim Fahren ausführt, und einmal bei schnellen Augenbewegungen, die der Proband an Verkehrsschildern und Retroreflektoren zum gezielten Hervorrufen des Perlschnureffekts ausführt, untersucht werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt bei Frequenzen von 200 Hz während der Autofahrt auftreten kann. Allerdings nahmen ihn die untersuchten Testpersonen nur dann wahr, wenn sie ihn durch schnelle Augenbewegungen gezielt provozierten. Das bestä-

---

tigt auch die Ergebnisse der Laboruntersuchung aus Abschnitt 5.4. Bei der gleichen PWM und gewöhnlichen Augenbewegungen während der Fahrt nahmen ihn die Testpersonen nicht wahr. Diese Augenbewegungen sind offensichtlich zu langsam um den Perlschnureffekt hervorzurufen. Außerdem kannten ihn die Testpersonen bis dahin nicht. Da der Autor diesen Effekt auch bei gewöhnlichen Augenbewegungen wahrnehmen konnte, lässt sich annehmen, dass die Kenntnis des Perlschnureffektes sein Wahrnehmen bzw. Erkennen begünstigt. Außer des Perlschnureffektes, der ausschließlich an Verkehrsschildern oder an Retroreflektoren an Leitpfosten zum Erscheinen kommt, wurden keine anderen Effekte durch die PWM beobachtet.

---

## 6.3 Fahrversuch mit einem Serienfahrzeug

---

Aus Abschnitt 6.2 wird deutlich, dass die PWM-Dimmung der Frontbeleuchtung im Automobil den Perlschnureffekt an Verkehrsschildern und anderen Retroreflektoren verursachen kann. Wie bereits beschrieben (vgl. Abschnitt 5.3), ist die Änderung der PWM-Frequenz in einem Multispotscheinwerfer nicht möglich. Aus diesem Grund kommt in dieser Untersuchung ein Serienfahrzeug mit LED-Scheinwerfern zum Einsatz. Seine Scheinwerfer besitzen keine komplexen Lichtassistentenfunktionen. Dies ermöglicht die Ansteuerung des Fernlichts über eine externe Elektronik, ohne dabei andere Fahrzeugfunktionen zu beeinträchtigen. Im normalen Betrieb wird das Fernlicht dieses Fahrzeugs zwar nicht gedimmt. Der Scheinwerfer besitzt jedoch eine ähnliche Fernlichtverteilung wie ein Multispotsystem. Somit kann der Extremfall, in dem die komplette Fernlichtverteilung mit gleichem Tastverhältnis gedimmt ist, für das Multispotsystem untersucht werden. Zudem besitzt dieses Fahrzeug eine moderne Innenraumbelichtung, die mittels der PWM gedimmt werden kann.

### 6.3.1 Ziele der Untersuchung

In diesem Fahrversuch mit Testpersonen soll der Perlschnureffekt, der durch die PWM-gedimmte Frontbeleuchtung bei schnellen Augenbewegungen an Verkehrsschildern und Retroreflektoren entstehen kann, in Abhängigkeit der Frequenz und des Tastverhältnisses sowie bei normaler und phasenverschobener PWM (vgl. Kapitel 4) untersucht werden. Des Weiteren soll ermittelt werden, ob der Perlschnureffekt an der PWM-gedimmten Ambiente-Beleuchtung im Fahrzeug während der Fahrt auftritt.

### 6.3.2 Versuchsträger

Auf Empfehlung der Firma Hella KGaA Hueck & Co. kommt ein Serienfahrzeug vom Typ Audi A3 mit Frontscheinwerfern auf LED-Basis zum Einsatz. Die Versorgung der LEDs, die Fernlicht erzeugen, wurde so modifiziert, dass die Fernlichtfunktion über die eigene Elektronik gedimmt werden kann. Dafür wurde die Elektronik aus Abschnitt 6.2 weiterentwickelt.

Die PWM- und CCR-Signale werden mit einem FPGA erzeugt. Die untersuchten Fernlichteinstellungen sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst. Dabei sind die PWM-Signale der beiden Scheinwerfer einmal identisch (synchrone PWM) und einmal um eine halbe Periode des PWM-Signals verschoben (phasenverschobene PWM). Die Vorteile der Phasenverschiebung sind in Abschnitt Kapitel 4 angegeben.



Tabelle 6.4: Untersuchten Fernlichteinstellungen

Dimmverfahren	Dimmstufe in %	Frequenz in Hz
Synchrone PWM	10, 40	100, 200, 400
Phasenverschobene PWM	10, 40	100, 200, 400
CCR	10, 40	k. A.

Mit jeweils drei Wiederholungen ergeben sich 42 Einstellungen. Diese werden in einer randomisierten Reihenfolge getestet.

Die Innenraumbeleuchtung in diesem Fahrzeug wird ab Werk über PWM gesteuert. Eine Messung an verschiedenen Elementen ergab PWM-Frequenzen im Bereich von 150 Hz bis 450 Hz. Über die Fahrzeugeinstellungen lässt sich die Helligkeit stufenweise einstellen. In diesem Versuch wird die niedrigste Helligkeitsstufe gewählt, bei der die LEDs noch leuchten. Dabei liegt das Tastverhältnis zwischen 8 und 21 %.

### 6.3.3 Methodik

Die Vorgehensweise ist in diesem Fahrversuch ähnlich wie im Versuch aus Abschnitt 6.2.

Die Fahrversuche finden bei Dunkelheit auf einer öffentlichen Landstraße mit vielen retroreflektierenden Leitpfosten und 4 Verkehrsschildern statt. Die Strecke wird in Runden abgefahren. Eine komplette Runde hat eine Länge von 4,6 km.

Die Testperson fährt das Fahrzeug zu der Teststrecke mit dem auf 20 % gedimmten Fernlicht und hat die Aufgabe auf die Helligkeit von retroreflektierenden Objekten zu achten und diese zu beurteilen. Die PWM-Frequenz wechselt dabei jede 30s zwischen 100 Hz und 200 Hz. Der Testleiter erläutert nach der Ankunft an der Teststrecke das Ziel der Untersuchung und führt den Perlschnureffekt bei verschiedenen PWM-Einstellungen vor.

Zum Provozieren des Perlschnureffektes führt die Testperson schnelle Augenbewegungen aus. Um den Perlschnureffekt wahrzunehmen, benötigten die Testpersonen im Fahrversuch aus Abschnitt 6.2 nur wenige Sekunden. Deshalb wird in diesem Versuch jede Einstellung für 30 s dargeboten. Sobald die Testperson den Perlschnureffekt wahrnimmt, hat sie einen Knopf, der ihr unter einer Fingerkuppe mit Klebeband befestigt ist, zu betätigen.

Um den Perlschnureffekt in der Innenraumbeleuchtung des Fahrzeuges zu testen, wird diese auf die niedrigste Helligkeitsstufe eingestellt. Die Probanden werden während der Fahrt zur Teststrecke gebeten drei Navigationsziele einzugeben und Radioeinstellungen zu wechseln. Das hat den Zweck die Probanden verschiedene Bedienelemente anschauen zu lassen, an denen der Perlschnureffekt potentiell erscheinen kann.



### 6.3.4 Ergebnisse

An der Untersuchung nahmen 16 Personen teil. In Abbildung 6.6 ist die Altersverteilung der Testpersonen dargestellt. Die Teilnehmer lassen sich in zwei gleichgroße Gruppen nach ihrem Alter aufteilen (vgl. Tabelle 6.5).

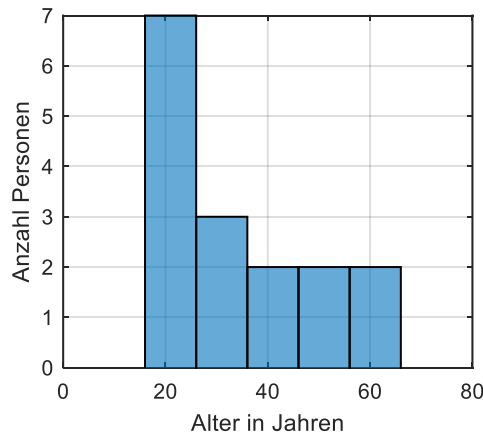


Abbildung 6.6: Histogramm der Altersverteilung der Teilnehmer

Die erste Gruppe (A1) besteht aus Personen, deren Alter unter 30 Jahren ist. Das durchschnittliche Alter liegt in dieser Gruppe bei 22 Jahren mit einer Standardabweichung von 2 Jahren. In der zweiten Gruppe (A2) sind Personen über 30 Jahre alt. Ihr Alter unterscheidet sich stärker. Die Standardabweichung liegt bei 12 Jahren. Das Durchschnittsalter beträgt in der zweiten Gruppe 48 Jahre.

Tabelle 6.5: Altersgruppen

	Durchschnittsalter in Jahren	Streuung in Jahren	Anzahl (Anteil)
A1	22	2	8 (50%)
A2	48	12	8 (50%)

Da jede Einstellung dreimal wiederholt wurde, werden bei der weiteren Analyse die entsprechenden Wahrnehmungsraten betrachtet. Die Wahrnehmungsraten sind für jede Einstellung der Anteil der Wiederholungen, bei denen der Perlschnureffekt wahrgenommen wurde. Dabei sind 4 verschiedene Werte möglich:

- 0 niemals wahrgenommen
- 1/3 einmal wahrgenommen
- 2/3 zweimal wahrgenommen
- 1 bei jeder Wiederholung wahrgenommen

Abbildung 6.7 zeigt für die beiden Altersgruppen ihre Wahrnehmungsraten in Abhängigkeit der PWM-Frequenz bei einem Tastverhältnis von 10%. Die Unterschiede sind deutlich zu erkennen. Höhere Medianwerte der Wahrnehmungsraten (oberhalb von 50%) bei allen getesteten Frequenzen deuten darauf hin, dass die Testpersonen der Gruppe A1 (Alter < 30 Jahre) den Perlschnureffekt besser hervorrufen und wahrnehmen können. Einige Testpersonen aus dieser Gruppe sind in der Lage ihn sogar bei 400 Hz gut wahrzunehmen – Wahrnehmungsraten 100%.

Die Teilnehmer aus der Gruppe A2 (Alter > 30 Jahre) haben hingegen Schwierigkeiten den Perlschnureffekt sogar bei 100 Hz wahrzunehmen bzw. durch schnelle Augenbewegungen hervorzurufen. Der Median der Wahrnehmungsrate beträgt hierbei ein Drittel und liegt somit unter der Schwelle von 50 %. Dies bedeutet, dass die meisten Testpersonen dieser Gruppe den Perlschnureffekt unter den untersuchten Bedingungen nicht wahrnehmen. Das obere Quartil liegt für diese Frequenz bei 2/3 und das Maximum sogar bei 1. Manche Testpersonen aus dieser Gruppe sind also in der Lage den Perlschnureffekt bei 100 Hz durch schnelle Augenbewegungen zu provozieren.

Bei einer Frequenz von 200 Hz beträgt der Median nur 1/6. Das Maximum ist mit 2/3 auch niedriger als bei 100 Hz. Für 400 Hz sinkt der Median der Wahrnehmungsrate auf 0. Das Maximum beträgt nur noch 1/3. Demnach kann keine Testperson aus dieser Gruppe den Perlschnureffekt bei 400 Hz reproduzierbar hervorrufen.

Die Varianzanalyse ( $\alpha = 5\%$ ) zeigt, dass die Unterschiede zwischen den Altersgruppen signifikant sind ( $p = 0,003$ ).

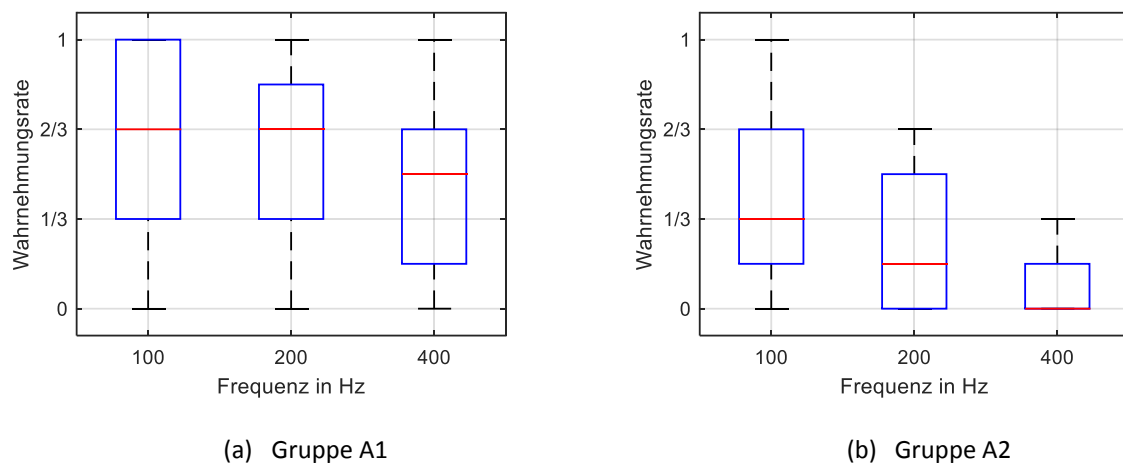


Abbildung 6.7: Boxplots der Wahrnehmungsraten der Altersgruppen bei synchroner PWM mit  $dc = 10\%$

Beide Gruppen weisen jedoch eine große interpersonelle Streuung auf. Eine nähere Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass in Gruppe A1 eine Person (22 Jahre) ein unempfindliches Verhalten aufweist. Gleichzeitig liegen die Erkennungsraten eines Probanden (54 Jahre) aus der Gruppe A2 deutlich über dem Durchschnitt. Aus diesem Grund erfolgt eine andere Gruppierung mittels des Fuzzy C-Means-Verfahrens. Dabei werden auch zwei Gruppen (G1 und G2) gebildet. Einige Kennwerte dieser Gruppen sind der Tabelle 6.6 zu entnehmen. Die Gruppe G1 besteht aus empfindlichen Testpersonen. Diese sind überwiegend aus der Altersgruppe A1. Die zweite Gruppe G2 fasst dagegen eher unempfindliche Testpersonen zusammen.

Tabelle 6.6: Probandengruppen

	Durchschnittsalter in Jahren	Streuung in Jahren	Anzahl (Anteil)	Personen aus A1	Personen aus A2
G1	29	13	8 (50%)	6	2
G2	42	16	8 (50%)	2	6

Die Wahrnehmungsraten werden für verschiedene PWM-Signaltypen in Abhängigkeit der Frequenz mit einer komplementären Sigmoidfunktion approximiert. Die sich dabei ergebenden Verläufe sind für die Testpersonen aus der Gruppe G1 in Abbildung 6.8 zusammengefasst.

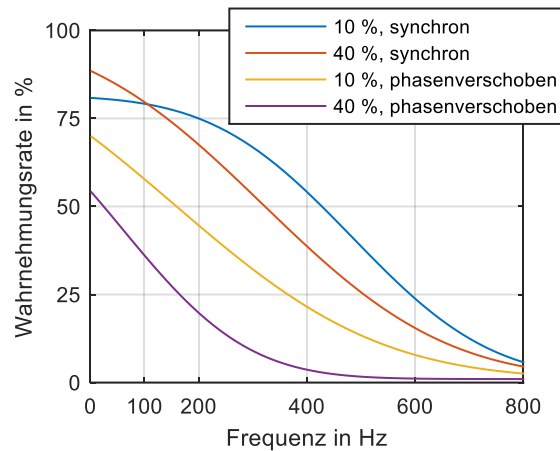


Abbildung 6.8: Approximierte Erkennungsrate in Abhängigkeit der Frequenz, Gruppe G1

Obwohl sich die Lichtverteilungen der beiden Frontscheinwerfer nicht komplett überlappen, ist der Unterschied zwischen dem synchronen und asynchronen PWM-Betrieb deutlich zu erkennen. Wie erwartet, ist der Perlschnureffekt im synchronen Betrieb beim Tastverhältnis von 10 % am auffälligsten im Vergleich zu den anderen PWM-Einstellungen. Die Kennwerte der approximierten Verläufe sind Tabelle 6.7 zu entnehmen.

Um eine Erkennungsrate von 50 % bei synchroner PWM und bei einem Tastverhältnis von 10 % zu erreichen, ist eine Frequenz von 428 Hz erforderlich. Diese Frequenz wird als Schwellenfrequenz  $f_s$  bezeichnet. Sie ist bei einem Tastverhältnis von 40 % niedriger und beträgt 323 Hz. Bei Frequenzen von 100, 200 und 400 Hz ergeben sich entsprechend die Wahrnehmungsraten:  $r_{100 \text{ Hz}} = 79\%$ ,  $r_{200 \text{ Hz}} = 75\%$  und  $r_{400 \text{ Hz}} = 54\%$ . Diese liegen über der Schwelle von 50 %.

Bei den phasenverschobenen PWM-Einstellungen sind deutlich niedrigere Werte zu verzeichnen. Bei einem Tastverhältnis von 10 % ist die Schwellenfrequenz mit 159 Hz um Faktor 2,7 niedriger als bei synchroner PWM. Für das Tastverhältnis von 40 % ist der Perlschnureffekt bei phasenverschobener PWM praktisch nicht wahrnehmbar. Die Schwellenfrequenz liegt dabei deutlich unter 100 Hz.

Tabelle 6.7: Kennwerte der approximierten Verläufe, Gruppe G1

	$f_s / \text{Hz}$	$r_{100 \text{ Hz}}$	$r_{200 \text{ Hz}}$	$r_{400 \text{ Hz}}$
<b>Synchrone PWM</b>				
$dc = 10 \%$	428	79%	75%	54%
$dc = 40 \%$	323	80%	68%	39%
<b>Phasenverschobene PWM</b>				
$dc = 10 \%$	159	58%	45%	22%
$dc = 40 \%$	25	36%	20%	37%

Die Ergebnisse der Gruppe G2 sind in Abbildung 6.9 und Tabelle 6.8 zusammengefasst.

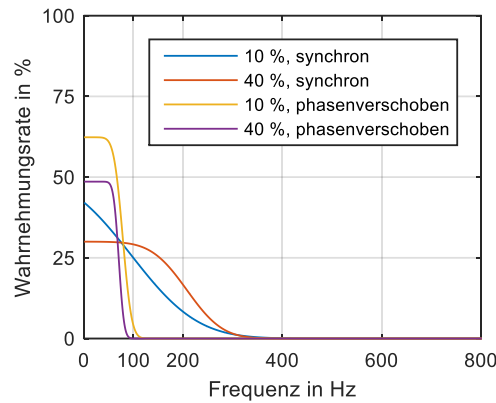


Abbildung 6.9: Approximierte Erkennungsrate in Abhängigkeit der Frequenz, Gruppe G2

Diese Testpersonen konzentrierten sich offensichtlich stärker auf das Fahren und können dadurch den Perlschnureffekt schlecht durch schnelle Augenbewegungen hervorrufen bzw. wahrnehmen. Die Ergebnisse dieser Gruppe zeigen eine höhere Wahrnehmungsrates beim Tastverhältnis von 40 %. Das kann an der höheren mittleren Leuchtdichte, die hellere und dadurch auffälligere Nachbilder verursacht, liegen.

Tabelle 6.8: Kennwerte der approximierten Verläufe, Gruppe G2

	$f_s / \text{Hz}$	$r_{100 \text{ Hz}}$	$r_{200 \text{ Hz}}$	$r_{400 \text{ Hz}}$
Synchrone PWM				
$dc = 10 \%$	k. A.	25 %	8 %	0 %
$dc = 40 \%$	k. A.	29 %	17 %	0 %
Phasenverschobene PWM				
$dc = 10 \%$	67	4 %	0 %	0 %
$dc = 40 \%$	k. A.	0 %	0 %	0 %

Von allen Teilnehmern kannten 5 Personen bereits den Perlschnureffekt. Während der Fahrt zur Teststrecke nahm ihn jedoch keine Testperson wahr. Das stimmt mit den Ergebnissen des Fahrversuchs aus Abschnitt 6.2 und den Ergebnissen der Laboruntersuchung aus Abschnitt 5.4 überein und bestätigt die aufgestellten Annahmen, dass der Fahrer durch die Konzentration auf das sichere Führen des Fahrzeugs den Perlschnureffekt nicht wahrnimmt bzw. dass die Augenbewegungen des Fahrers nicht zum Auftreten des Perlschnureffekts führen. Nach dem Versuch gaben alle Testpersonen an, dass die Augenbewegungen, die sie auszuführen hatten, nicht ihrem normalen Blickverhalten beim Autofahren entsprechen. Der Perlschnureffekt wurde von Probanden, die ihn wahrnehmen konnten, generell als nicht störend bewertet.

Im Fahrzeuginnenraum nahm keine Testperson den Perlschnureffekt wahr. Nach der Erläuterung dieses Effekts waren alle Probanden in der Lage ihn auch im Innenraum wahrzunehmen, besonders an kleinen Kontrolllampchen in der Mittelkonsole (200 Hz) und in der Türverkleidung (150 Hz). Am Tachometer (250 Hz) und am Bildschirm des Navigationssystems (200 Hz) konnten nur zwei Probanden den Effekt hervorrufen. Diese Personen gaben an, dass der Perlschnureffekt das Ablesen der

---

Geschwindigkeit während der Fahrt beeinträchtigt – nach ihrem subjektiven Empfinden benötigen sie mehr Zeit um die Geschwindigkeit am Tachometer zu erfassen. Während des Fahrversuchs nahm sonst keine Testperson den Perlschnureffekt im Fahrzeuginnenraum wahr.

Aufgrund eines technischen Problems am Fahrzeug konnten keine weiteren Untersuchungen damit durchgeführt werden.

### 6.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Das beschriebene Experiment hatte das Ziel, den Perlschnureffekt zum einen an Verkehrsschildern und Retroreflektoren in Abhängigkeit des PWM-Signals der Frontscheinwerfer und zum anderen an der Ambiente-Beleuchtung im Fahrzeuginnenraum zu untersuchen. Des Weiteren sollte das Wahrnehmen des Perlschnureffekts während der Fahrt bei gewöhnlichem Blickverhalten und bei möglichst schnellen Augenbewegungen untersucht werden.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt bei normalem Blickverhalten während der Fahrt weder an Verkehrsschildern bzw. Retroreflektoren noch an der PWM-gedimmten Ambiente-Innenraumbeleuchtung erscheint. Die Geschwindigkeit der Augenbewegung ist hierbei offensichtlich für das Entstehen des Perlschnureffekts zu gering.

Nach dem Erläutern der Entstehung des Perlschnureffekts konnten zwei Testpersonen ihn am Tachometer während der Fahrt wahrnehmen. Nach ihrer subjektiver Einschätzung wird das Ablesen der Geschwindigkeit beeinträchtigt: Es soll mehr Zeit dafür benötigt werden. Dieser Aspekt besitzt einen direkten Bezug zur Sicherheit im Straßenverkehr und soll in weiterführenden Arbeiten untersucht werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Testpersonen im Alter unter 30 Jahren den Perlschnureffekt öfter als die älteren Testpersonen und auch bei 400 Hz wahrnehmen können. In den Laboruntersuchungen in Abschnitt 5.4 hingegen waren die älteren Testpersonen empfindlicher. Die Laborergebnisse zeigen jedoch, dass es in verschiedenen Altersgruppen Personen gibt, die den Perlschnureffekt deutlich besser oder deutlich schlechter als der Durchschnitt wahrnehmen. Da an dieser Untersuchung wenige Testpersonen (16 Personen) als an der Laboruntersuchung (55 Personen) teilnahmen, kann sich der Unterschied durch Zufall ergeben. Demzufolge sollen Untersuchungen der Altersabhängigkeit mit einer großen Anzahl der Testpersonen aus verschiedenen Altersgruppen durchgeführt werden. Ein anderer Grund für den altersbedingten Unterschied kann darin liegen, dass sich die älteren Testpersonen stärker auf das Fahren konzentrieren und deshalb die zusätzlichen schnellen Augenbewegungen schlechter ausführen können.

Die Gruppierung nach der Wahrnehmungsrate ergibt eine geringere Streuung in den Ergebnissen innerhalb der Gruppen, als bei der Gruppierung nach Alter. Die Hälfte der Testpersonen kann dabei den Perlschnureffekt während der Fahrt generell schlecht bzw. gar nicht hervorrufen. Wie schon in Laboruntersuchungen zeigt sich auch hier bei den empfindlichen Testpersonen für die synchrone PWM eine geringe Abhängigkeit vom Tastverhältnis. Setzt man die Schwellenfrequenzen mit entsprechenden Tastverhältnissen für die synchrone PWM aus Tabelle 6.7 in Formel 5.2, so bekommt man eine Grenzfrequenz von 463 Hz, die für kleine Tastverhältnisse unterhalb von 10 % gilt. Diese Frequenz ist um 110 Hz niedriger als die in den Laboruntersuchungen ermittelte Frequenz von 573 Hz (vgl. Tabelle 5.9). Da jedoch die Streuung der Grenzfrequenz einer einzelnen Testperson bis

---

zu 100 Hz betragen kann (vgl. Abschnitt 5.2), liegen demnach die genannten Frequenzen in einem ähnlichen Bereich. Die aus dem Fahrversuch niedrigere Grenzfrequenz deutet darauf hin, dass der Perlschnureffekt durch die Fahraufgabe weniger auffällig ist. Zudem ändert sich durch das Fahren ständig die Position der Verkehrsschilder und Leitpfosten im Gesichtsfeld des Fahrers. Auch die Beleuchtungssituation ändert sich dabei: In einem Moment ist das Hintergrund um den Retroreflektor dunkler, in anderem heller. Dies kann ebenfalls hemmend auf die Wahrnehmung des Perlschnureffekts wirken.

Wie bereits in der Laboruntersuchung in Abschnitt 5.4 festgestellt, hat die Phasenverschiebung der PWM-Signale einen großen Einfluss auf das Entstehen des Perlschnureffekts. Sogar für empfindliche Testpersonen beträgt die Schwellenfrequenz für phasenverschobene PWM und ein Tastverhältnis von 10 % 159 Hz (vgl. Tabelle 6.7). Die Grenzfrequenz nach Formel 5.2 ergibt sich dabei zu 204 Hz. Die große Abweichung zu den Laborergebnissen kann durch die dynamische Änderung des Gesichtsfeldes beim Fahren erklärt werden. Während sich im Labor die Schilder sich nicht bewegen und die Testperson die Möglichkeit hat, eine zusätzliche Augenbewegung auszuführen, wenn sie nicht ganz sicher ist, ob der Perlschnureffekt auftritt, wird dies beim Fahren schwieriger, da sich die Position von Schildern im Gesichtsfeld ständig ändert.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Perlschnureffekt während der Fahrt beim gewöhnlichen Blickverhalten nicht auftritt. Um sein Erscheinen auch für sehr schnelle Augenbewegungen auszuschließen, ist eine PWM-Frequenz um 463 Hz erforderlich. Mit der Methode der Phasenverschiebung kann diese bei zwei LED-Gruppen um Faktor 2,3 auf 204 Hz reduziert werden. Dies bestätigt die Überlegungen in Kapitel 4. Durch die Erhöhung der LED-Gruppen, die mit zueinander Phasenverschobenen PWM-Signalen angesteuert werden, kann die PWM-Frequenz sogar niedriger gewählt werden (vgl. Kapitel 4).

Dies kann bei der Entwicklung von Frontbeleuchtungssystemen, die mittels PWM gedimmt werden, berücksichtigt werden. Dabei wäre es sinnvoll, die Lichtstärkeverteilung, z. B. eines Segments eines Multispotscheinwerfers, aus mehreren einzelnen Lichtstärkeverteilungen, die sich nahezu komplett überlappen und die von verschiedenen LED-Gruppen erzeugt werden, zu entwerfen. Die einzelnen LED-Gruppen sollten dabei mit einem individuellen PWM-Signal angesteuert werden. Für  $N$  LED-Gruppen ergibt sich bei einer Verschiebung der einzelnen PWM-Signale um jeweils  $1/(Nf_{PWM})$  eine Fluktationsfrequenz des Lichts, die um Faktor  $N$  höher ist als die PWM-Frequenz. Dabei kann die zur Vermeidung des Perlschnureffekts erforderliche PWM-Frequenz nach Formel 6.1 abgeschätzt werden.

$$f_{PWM} = \frac{460 \text{ Hz}}{N} \quad 6.1$$

Um ein wahrnehmbares Flimmern bei eventuellem Ausfall einer oder mehrerer LED-Gruppen zu vermeiden, soll die PWM-Frequenz die FVF nicht unterschreiten. Sinnvoll wäre dabei eine minimale Frequenz von 100 Hz.

---

## 6.4 Fazit

---

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen bearbeiten mehrere Fragen in Bezug auf die Wahrnehmung des Perlschnureffekts, der durch die PWM-Dimmung der Frontbeleuchtung sowie der Innenraumbeleuchtung im Automobil verursacht werden kann.

In den Vorversuchen in Abschnitt 6.1 wird untersucht, welche Flimmereffekte bei PWM-gedimmten Frontbeleuchtung im realen Straßenverkehr entstehen können.

Bei den Fahrversuchen mit einem Multispot-Prototypen wird bei genauerem Hinsehen an den Rädern vorbeifahrender Fahrzeuge der Wagenradeneffekt registriert. Da sein Erscheinen kaum auffällig ist, stellt er keine Gefahr für die Sicherheit im Straßenverkehr dar. Andere Flimmereffekte kommen bei diesem Multispotsystem nicht zum Erscheinen. Angestrahlte Verkehrsschilder erscheinen dabei sehr hell bis blendend. Daraus lässt sich schließen, dass die entsprechenden Sektoren des Multispotscheinwerfers nicht ausreichend gedimmt werden. Da es sich dabei um einen Prototypen handelt, sollten die Steueralgorithmen für den Serieneinsatz angepasst werden, indem die entsprechenden Segmente zur Vermeidung der Eigenblendung stärker gedimmt werden. Um dabei das Erscheinen des Perlschnureffekts zu vermeiden, zeigen die Ergebnisse des zweiten Vorversuchs, dass eine PWM-Frequenz von 200 Hz zu gering ist.

In den Fahrversuchen in Abschnitt 6.2 wird der Perlschnureffekt an Verkehrsschildern bei gewöhnlichem Blickverhalten und bei schnellen Augenbewegungen untersucht. Dafür wird eine Frontbeleuchtung aus LED-Modulen aufgebaut und in einem Fahrzeug installiert.

Die Ergebnisse bestätigen die in Abschnitt 5.5 formulierte Annahme, dass der Perlschnureffekt während der Fahrt bei einem normalen Blickverhalten nicht erscheint. Bei einem gezielten Hervorrufen durch schnelle Augenbewegungen ist es möglich den Perlschnureffekt bei einer PWM-Frequenz von 200 Hz wahrzunehmen.

Der Fahrversuch in Abschnitt 6.3 beschäftigt sich mit dem Perlschnureffekt, der durch die PWM-gedimmte Frontbeleuchtung an Retroreflektoren entsteht. Dazu wird die Abhängigkeit von der Form der PWM ermittelt. Des Weiteren wird der Perlschnureffekt während der Fahrt an der PWM-gedimmten Beleuchtung im Fahrzeuginnenraum untersucht.

Wie bereits im vorangegangenen Fahrversuch in Abschnitt 6.2 ermittelt, können die naiven Testpersonen den Perlschnureffekt bei normalem Blickverhalten nicht wahrnehmen. Beim gezielten Hervorrufen durch schnelle Augenbewegungen ist seine Auffälligkeit gering. Bei einer synchronen PWM-Dimmung, wenn beide Frontscheinwerfer mit demselben PWM-Signal angesteuert werden, ist eine PWM-Frequenz von ca. 460 Hz erforderlich, um das Entstehen des Perlschnureffekts praktisch zu verhindern.

Die Frequenz kann deutlich niedriger gewählt werden, wenn die PWM-Signale der einzelnen LED-Gruppen zueinander verschoben werden. Durch die Verschiebung ergibt sich eine Fluktationsfrequenz des Lichts, die ein Vielfaches der PWM-Frequenz beträgt. Je höher die Anzahl der LED-Gruppen ist, umso geringer kann die PWM-Frequenz sein. Allerdings sollten sich die Lichtstärkeverteilungen der einzelnen LED-Gruppen möglichst komplett überlappen. Nur dann erhöht sich die Fluktationsfrequenz der resultierenden Lichtstärkeverteilung.

---

Am Tachometer, dessen Hintergrundbeleuchtung mit PWM bei 200 Hz gedimmt ist, kann der Perlschnureffekt wahrgenommen werden. Dadurch kann das Ablesen der Fahrzeuggeschwindigkeit beeinträchtigt werden. Dies stellt für den Straßenverkehr einen sicherheitsrelevanten Aspekt dar und soll in weiterführenden Arbeiten genauer untersucht werden.



---

## 7 Stroboskopischer Effekt in der Bürobeleuchtung

Die vorliegenden Studien (vgl. Abschnitt 3.2.2), die sich mit der Wahrnehmung des Stroboskopeffekts in der Innenraumbeleuchtung beschäftigen, wurden teilweise unter künstlichen Bedingungen durchgeführt. VOGELS et. al [82] verwenden eine schwarze rotierende Scheibe mit einem weißem Punkt an ihrem Rand, um den Stroboskopeffekt unter moduliertem Licht zu untersuchen.

BULLOUGH et. al [80] lassen die Probanden in einer Untersuchung des Stroboskopeffekts verschiedene Aufgaben unter PWM-gedimmtem Licht ausführen. Dabei verwenden sie eine Tischleuchte in einem dunklen Raum. Im Rahmen einer weiteren Untersuchung [81] provozieren die Testpersonen den Stroboskopeffekt unter derselben Tischleuchte durch ein schnelles Schwenken eines Stabes. Die Ergebnisse dieser Studien zeigen zwar die Grenzen des visuellen Systems auf. Die Frage, ob sie auf die Praxis übertragbar sind, bleibt jedoch weitestgehend unbeantwortet.

Die Untersuchungen in diesem Kapitel sollen demnach unter möglichst realistischen und für die Praxis relevanten Bedingungen sowohl hinsichtlich der lichttechnischen Einstellungen, als auch hinsichtlich der von der Testperson auszuführenden Aufgaben durchgeführt werden. Im Experiment in Abschnitt 7.1 wird der Stroboskopeffekt untersucht, wenn alle LEDs in der Leuchte mit derselben PWM gedimmt werden. In Abschnitt 7.2 kommt unter anderem eine phasenverschobene PWM zum Einsatz.

Teile der im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden bereits in [85], [100–103] behandelt. In diesem Kapitel werden sie ausführlicher analysiert.

---

### 7.1 Untersuchung mit synchroner PWM

---

Der im Folgenden beschriebene Versuch beschäftigt sich mit der Auffälligkeit und dem Störungsgrad des Stroboskopeffekts, der durch eine PWM-gedimmte LED-Beleuchtung in einem Büroraum bei üblichen Tätigkeiten entstehen kann.

#### 7.1.1 Ziele der Untersuchung

Ziel dieser Probandenuntersuchung ist, den Einfluss der PWM auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts zu ermitteln. Zudem soll untersucht werden, bei welchen Tätigkeiten und welchen PWM-Signalen die Testpersonen den Stroboskopeffekt als störend empfinden. Um praxisbezogene Ergebnisse zu erreichen sollen für die Testpersonen geeignete Aufgaben formuliert werden. Die Testbedingungen sollen sich dabei an den Einsatz der Beleuchtung in Büroräumen orientieren.

#### 7.1.2 Versuchsraum

Für diesen Versuch wurde ein spezieller Raum aufgebaut. Dieser verfügt über weiß gestrichene Wände, was zu einer gleichmäßigen Ausleuchtung des Raumes führt. Die Decke ist mit mehreren LED-Leuchten ausgestattet. In dieser Untersuchung kommt eine LED-Leuchte zum Einsatz. Direkt

---

unter dieser Leuchte ist ein Schreibtisch aufgestellt. Die Testpersonen werden während der Untersuchung verschiedene Aufgaben sitzend an diesem Tisch ausführen. Um den Versuch an eine übliche Bürosituation anzulehnen, befinden sich verschiedene Objekte darauf: Laptop, PC-Maus, Blume, Buch und weiße Papierblätter. Um den Einfluss vom Tageslicht zu vermeiden, ist das einzige Fenster im Raum mit einem lichtundurchlässigen Rollo abgedeckt. Abbildung 7.1 zeigt ein Foto vom Untersuchungsraum.



Abbildung 7.1: Untersuchungsraum

### 7.1.2.1 Beleuchtung

Die verwendete LED-Leuchte besteht aus 8 Hochleistungs-LEDs vom Typ Citizen CL-L233 mit einer ähnlichsten Farbtemperatur von 4000 K. Das Spektrum zeigt Abbildung 7.2.

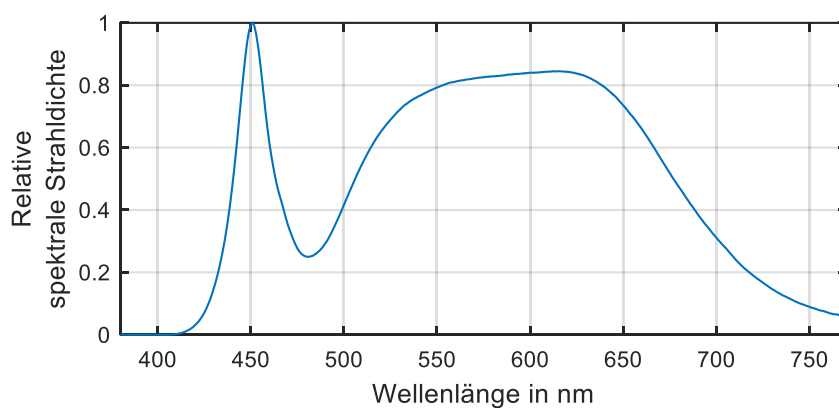


Abbildung 7.2: Lichtspektrum der LED-Leuchte

Zur Versorgung und Ansteuerung der Leuchte wird die Elektronik aus vorigen Untersuchungen weiterentwickelt. Die Steuersignale erzeugt ein Mikrocontroller. Bei der PWM kann sowohl das Tastverhältnis, als auch die Frequenz variiert werden. Zugleich ist eine stufenlose Einstellung des maximalen

Stromes (CCR) möglich. Alle LEDs werden mit dem gleichen PWM-Signal angesteuert. Der Mikrocontroller dient auch zur Kommunikation mit einem PC, von dem aus die Einstellungen vorgenommen werden.

### 7.1.2.2 Lichteinstellungen

In der Untersuchung werden drei Signaltypen mit Tastverhältnissen von 20, 50 und 100 % verwendet. Um den Einfluss des Leuchtdichteniveaus auf die Bewertung auszuschließen, wird der mittlere Lichtstrom für alle Einstellungen konstant gehalten, indem der maximale elektrische Strom entsprechend angepasst wird. Mit der zur Zeit dieses Versuchs vorhandenen Elektronik konnte nur eine Leuchte versorgt werden. Bei einem Tastverhältnis von 20 % konnte somit auf der Tischoberfläche maximal eine Beleuchtungsstärke von 250 lx erzeugt werden. Um diese Beleuchtungsstärke bei einem Tastverhältnis von 50 % zu erreichen, wird der elektrische Strom auf 40 % reduziert. Für die flimmerfreie Lichteinstellung beträgt der elektrische Strom 20 % des maximalen Stromes. In Abbildung 7.3 sind die untersuchten Signalformen dargestellt. Die Einstellungen der Pulsweitenmodulation (Frequenz, Tastverhältnis) wurden anhand einer Photodiode am Oszilloskop validiert.

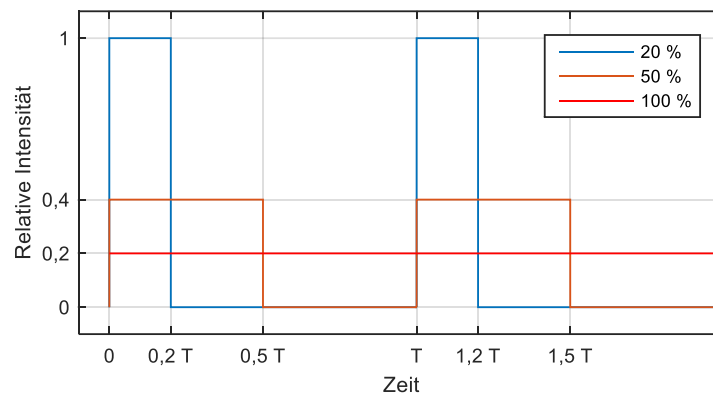


Abbildung 7.3: Untersuchte Signalformen

Abbildung 7.4 zeigt die Leuchtdichteverteilung aus Sicht der Testperson während des Versuchs. Die Leuchtdichte auf der Tischoberfläche beträgt  $60 \text{ cd/m}^2$ . Auf der weißen Wand gegenüber der Testperson liegt sie bei  $25 \text{ cd/m}^2$ . Sowohl auf dem Tisch, als auch auf der Wand ist die Leuchtdichteverteilung sehr homogen. Mit einem Maximum von ca.  $78 \text{ cd/m}^2$  ist die Adaptation der Testpersonen im photopischen Bereich.

In der Untersuchung kommen 11 verschiedene Lichteinstellungen zum Einsatz: fünf verschiedene Frequenzen zu je einem Tastverhältnis und eine Konstantstromeinstellung. Diese werden in einer randomisierten Reihenfolge dargestellt. Tabelle 7.1 gibt eine Zusammenstellung der untersuchten Einstellungen.

Tabelle 7.1: Untersuchte Einstellungen

Strom in mA	1000					400					200
Tastverhältnis in %	20					50					100
Frequenz in Hz	100	200	300	400	1000	100	200	300	400	1000	k. A.

Für diesen Versuch wurde eine Software in der Programmiersprache C# entwickelt. Die Software wird vom Testleiter, der sich während des kompletten Versuchs im Raum befindet, bedient. Dabei werden die Probandendaten aufgenommen, der Versuchsablauf gesteuert und die Antworten der Probanden digital erfasst.

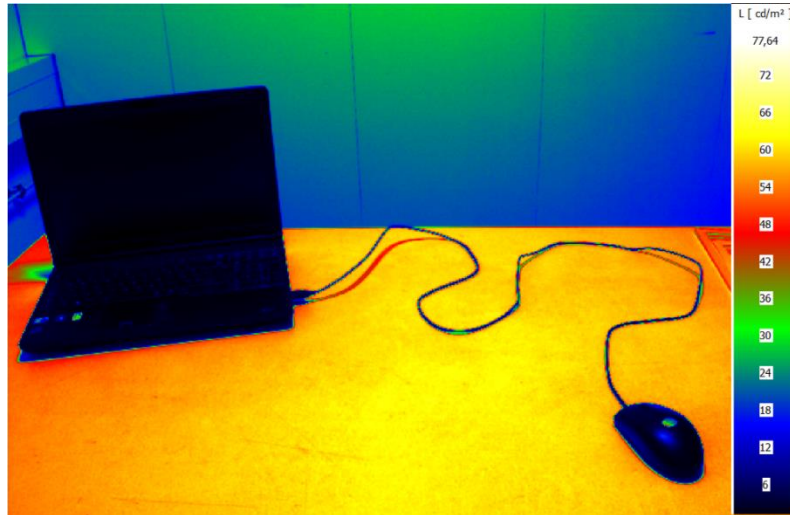


Abbildung 7.4: Leuchtdichteverteilung aus Sicht der Testperson

### 7.1.3 Methodik

Im Folgenden werden die Aufgaben der Testperson während des Versuchs, der Versuchsablauf und ein Verfahren zur Ermittlung der Befindlichkeit der Testperson genauer beschrieben.

#### 7.1.3.1 Mehrdimensionaler Befindlichkeitsfragebogen

Zu Beginn der Untersuchung füllt die Testperson den sogenannten Mehrdimensionalen Befindlichkeitsfragebogen (MDBF) aus. Dieser Fragebogen dient zur Erfassung der aktuellen Befindlichkeit einer Person. Aufgrund seiner kurzen und einfachen Durchführung findet er in Praxis und Forschung einen breiten Einsatz [104]. Der MDBF erfasst drei Merkmale der Stimmungslage einer Person. Diese werden als MDBF-Skalen bezeichnet. Tabelle 7.2 zeigt ihre Bezeichnung und Kurzschreibweise.

Tabelle 7.2: MDBF-Skalen

MDBF-Skala	Abkürzung
Gute-Schlechte-Stimmung	GS
Wachheit-Müdigkeit	WM
Ruhe-Unruhe	RU

Die Merkmale finden sich im Fragebogen in Form von insgesamt 24 einfachen Adjektiven – sogenannte Items, wie *wohl*, *unwohl*, *ruhig*, *unruhig*, etc. Die Testperson bewertet die Items mit Hilfe einer fünfstufigen Antwortskala (vgl. Abbildung 7.5).

Im Moment  
fühle ich mich

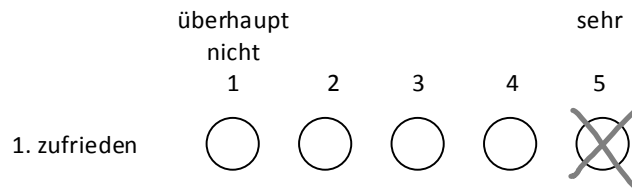


Abbildung 7.5: Beispiel einer Bewertung mit dem MDBF

Nach der Auswertung können die MDBF-Skalen Werte zwischen 8 und 40 annehmen. Dabei bedeutet ein großer Wert bei Gute-Schlechte-Stimmung, dass die Person gut gelaunt ist und sich wohl fühlt. Kleine Werte ergeben sich generell bei schlechtgelaunten oder unzufriedenen Probanden. Bei der Skala Wachheit-Müdigkeit deuten hohe Werte darauf hin, dass die Person wach und ausgeruht ist. Bei Personen, die sich müde oder schläfrig fühlen, ergibt sich ein kleinerer Wert. Innerlich ruhig und gelassen fühlen sich Testpersonen, wenn sich auf der Skala Ruhe-Unruhe hohe Werte finden. Bei angespannten und nervösen Personen ergeben sich auf dieser Skala niedrigere Werte. [104]

### 7.1.3.2 Instruktion der Testpersonen

Nach dem Ausfüllen des MDBF instruiert der Testleiter die Testperson über ihre Aufgaben im Versuch. Das Ablaufdiagramm in Abbildung 7.6 gibt einen Überblick über diese Testphase.

Bei einer PWM-Frequenz von 50 Hz und einem Tastverhältnis von 20 % wird das Flimmern im Versuchsraum direkt wahrgenommen. Anhand der PWM-Frequenzen von 50 Hz und 80 Hz wird der Unterschied zwischen dem direkt wahrnehmbaren Flimmern und den stroboskopischen Effekten veranschaulicht.

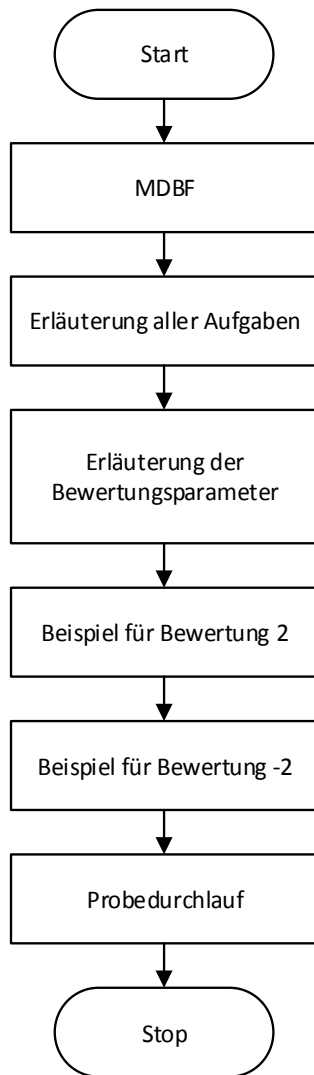
Anschließend führt die Testperson einen Probetest bei 100 Hz und einem Tastverhältnis von 20 % durch. Dabei erläutert der Testleiter die auszuführenden Aufgaben. Nach jeder Aufgabe wird der Stroboskopeffekt nach seiner Auffälligkeit und seinem Störungsgrad auf einer diskreten Skala von -2 bis 2 bewertet. Die Bedeutung der Extremwerte wird mit folgenden Begriffen verankert.

Tabelle 7.3: Bedeutung der Extremwerte der Bewertung

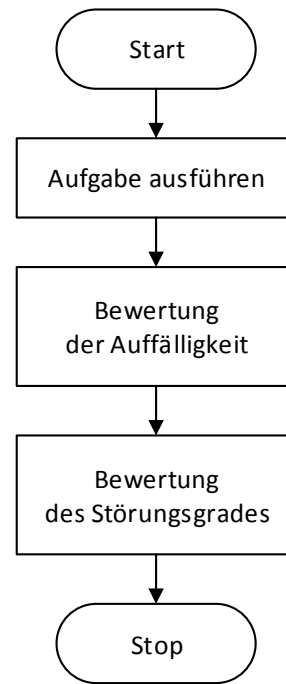
Bewertung	Auffälligkeit	Störungsgrad
-2	Nicht wahrnehmbar	Nicht störend
2	Sehr deutlich wahrnehmbar	Sehr störend

Für die Zwischenwerte wird keine Bedeutung vorgegeben. Die Testpersonen haben lediglich mit einer diskreten Zahl, die im vorgegebenen Bereich liegt, zu bewerten.

Der Probedurchlauf bei 100 Hz und dem Tastverhältnis von 20 % dient als Anker für eine Bewertung von 2. Danach wird die KonstantstromEinstellung vorgenommen, um den Unterschied deutlich zu machen. Die KonstantstromEinstellung dient als Anker für die Bewertung -2.



(a) Anweisungen



(b) Aufgaben

Abbildung 7.6: Ablaufdiagramme für die Anweisungen und Testaufgaben

### 7.1.3.3 Testablauf

Der Ablauf des gesamten Versuchs ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Nach der Anweisung der Testperson werden die 11 Lichteinstellungen bei 5 verschiedenen Aufgaben untersucht.

Da die Untersuchung unter möglichst realistischen Bedingungen stattfinden soll, wurden für Probanden Aufgaben mit zum Teil schnellen, aber natürlichen Bewegungen, zumindest hinsichtlich der Tätigkeiten in einem Büro, formuliert.

**Aufgabe 1** Vor jedem Durchlauf stellt sich die Testperson vor den Schreibtisch. Nachdem der Testleiter die neue Lichteinstellung vorgenommen hat, setzt sich die Testperson an den Tisch (Abbildung 7.1). Dabei macht sie ein paar Schritte und rückt beim Setzen den Stuhl zurecht. Somit führt sie einige natürliche Orientierungsbewegungen durch.

- Aufgabe 2** Bei dieser Aufgabe wird die Bewegung kontrastreicher Objekte untersucht. Auf dem Tisch befindet sich eine Computermaus, die von der Testperson an den Laptop so angeschlossen werden soll, dass sich das Kabel hinter dem Bildschirm befindet. Dafür hat die Testperson das Kabel in die Hand zu nehmen und mit Schwung über den Bildschirm umzuschlagen (Abbildung 7.8 (a)). Aus einer Aufnahme dieses Vorgangs mit einer Kamera wurde die Geschwindigkeit des Kabels von 2 bis 5 m/s ermittelt.
- Aufgabe 3** In dieser Aufgabe hat die Testperson eine kognitive Aufgabe auszuführen. Ein Text auf einem DIN-A4 Blatt besteht aus drei Abschnitten. Für jeden Abschnitt sagt der Testleiter eine Zahl an. Die Testperson zählt die Wörter ab und unterstreicht dann das entsprechende Wort. Zur Unterstützung beim Zählen wird ein Stift verwendet (Abbildung 7.8 (b)).
- Aufgabe 4** Die Testperson dreht danach das Blatt um und verbindet vier vorgedruckte Punkte zu einem Quadrat. Anschließend hat sie dieses Quadrat mit schnellen Zügen zu schraffieren (Abbildung 7.8 (c)).
- Aufgabe 5** In der letzten Aufgabe führt die Testperson mit ihrer Hand möglichst schnelle Bewegungen durch (Abbildung 7.8 (d)). Solche Bewegungen sind zum Beispiel beim Gestikulieren während eines Gesprächs nicht selten. Die maximale Geschwindigkeit beträgt dabei ca. 3 m/s.

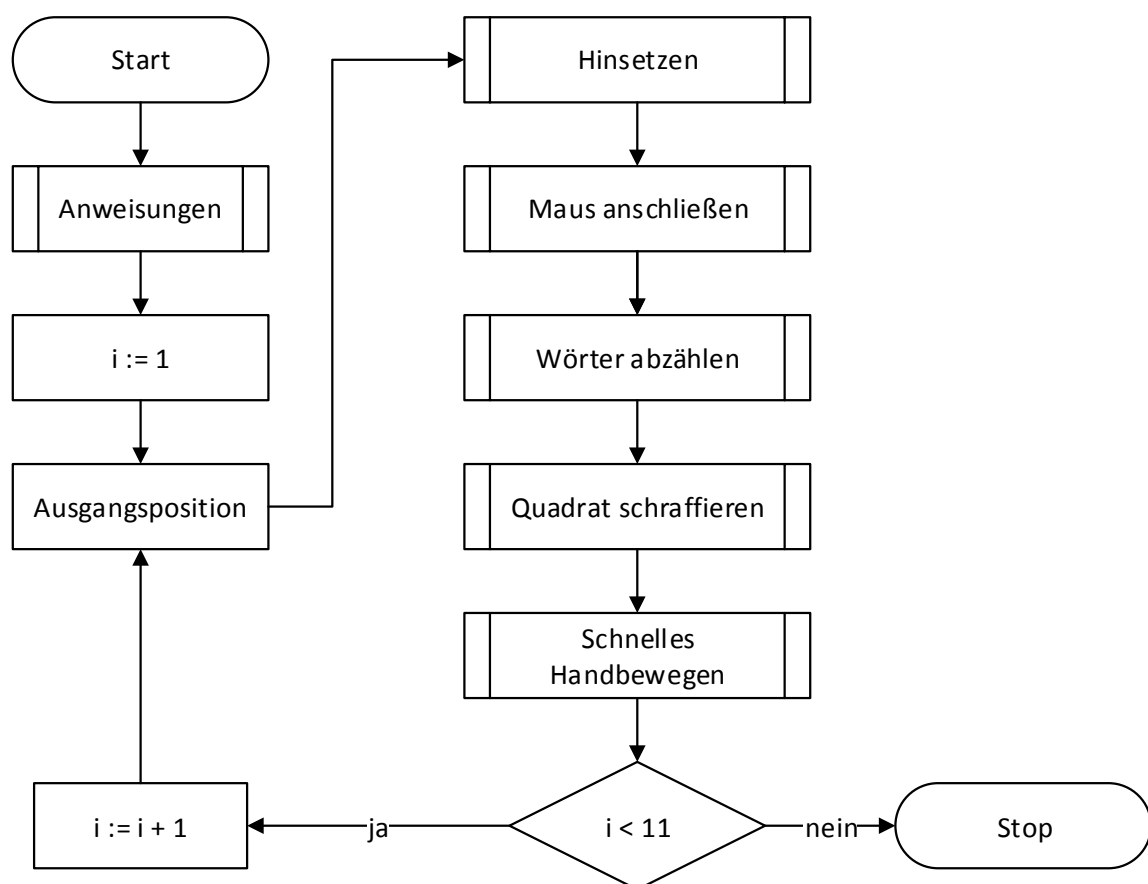
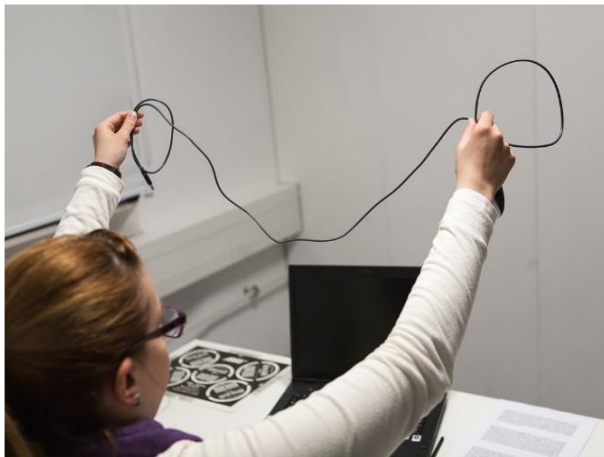


Abbildung 7.7: Ablaufdiagramm des Versuchsablaufs

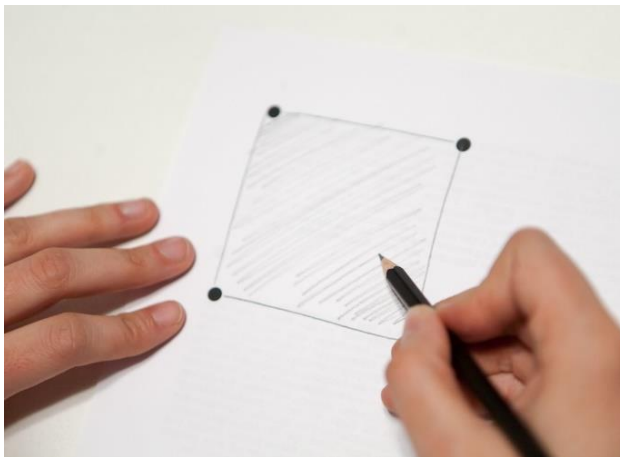




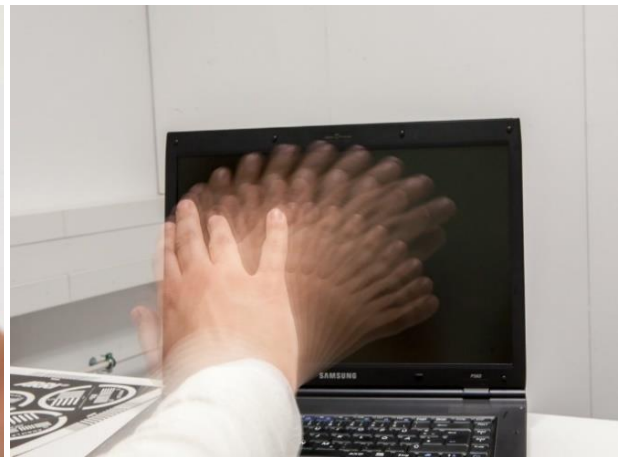
(a) Aufgabe 2, PC-Maus anschließen



(b) Aufgabe 3, Wörter abzählen



(c) Aufgabe 4, Quadrat schraffieren



(d) Aufgabe 5, Handbewegung

Abbildung 7.8: Aufgaben 2 bis 5

## 7.1.4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die erhobenen Daten nach verschiedenen Methoden analysiert.

### 7.1.4.1 Testperson mit mehreren Wiederholungen

Eine Testperson im Alter von 25 Jahren wiederholte diesen Versuch fünfmal an einem Tag. Die Zeiten der Wiederholungen sind Abbildung 7.9 zu entnehmen. Das Ziel dieser Untersuchung ist die Ermittlung der Streuung in den Bewertungen einer Person. Da die Wiederholungen zu unterschiedlichen Zeiten stattfinden, wird zudem der Einfluss der Tageszeit analysiert.

Die Ergebnisse in Abbildung 7.10 zeigen, dass sich die Befindlichkeitsskalen GS und RU (vgl. Tabelle 7.2) über den Tag nicht stark ändern. Die Werte der WM-Skala sinken am späten Vormittag leicht ab und steigen am Nachmittag wieder.



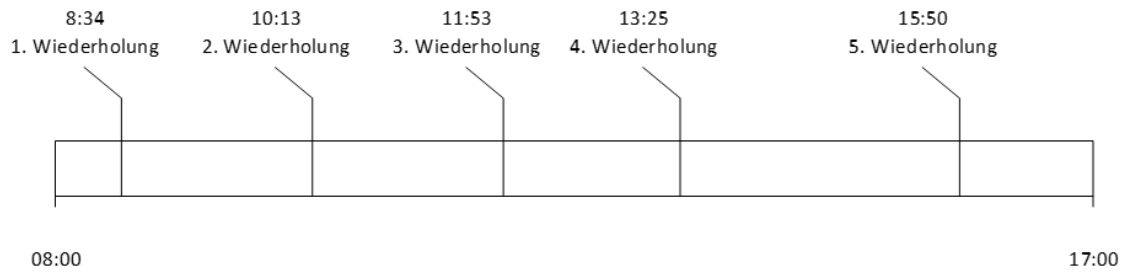


Abbildung 7.9: Zeitpunkte der Wiederholungen

Die Testperson fühlt sich demnach in der ersten Tageshälfte schläfrig und müde. Die Erhöhung der WM-Werte am Nachmittag deutet darauf hin, dass die Testperson zum Chronotyp *Spätaufsteher* [105] gehört. Die Änderung der Befindlichkeit während des Tages zeigt jedoch bei dieser Testperson keinen signifikanten Zusammenhang mit den Bewertungen des Stroboskopeffekts.

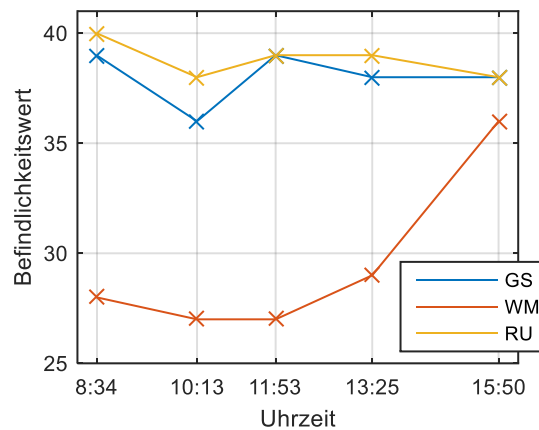


Abbildung 7.10: Tagesverlauf der Befindlichkeit einer Testperson

Die Bewertungen des Stroboskopeffektes weisen bei dieser Person generell eine geringe Streuung über alle Signalformen und Aufgaben auf. Für die meisten Testbedingungen liegt sie unter 1.

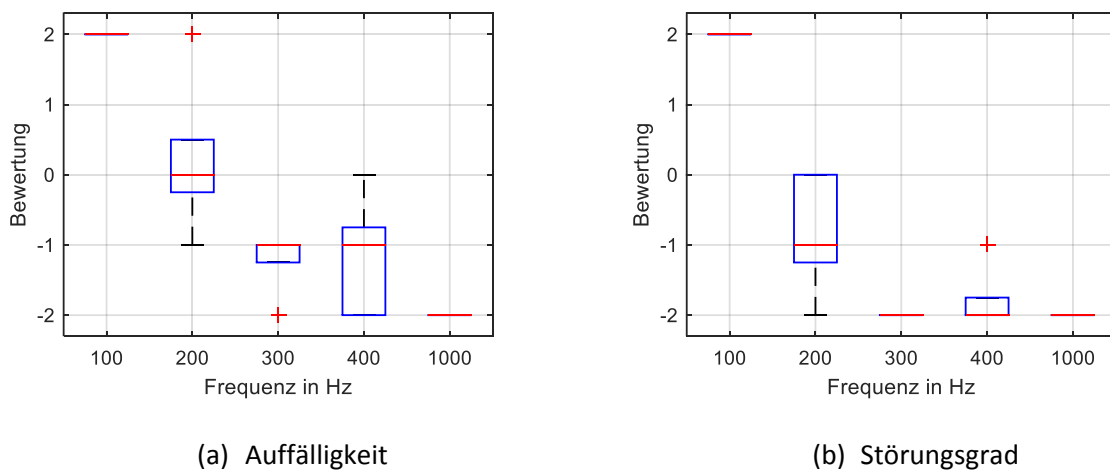


Abbildung 7.11: Boxplots der Auffälligkeitsbewertung bei  $dc = 20\%$ , Aufgabe 5

Da der arithmetische Mittelwert von Ausreißern stärker beeinflusst wird, basiert die folgende Analyse der Ergebnisse auf den Medianwerten. Abbildung 7.11 zeigt in Form von Boxplots die Ergebnisse über 5 Wiederholungen für die Aufgabe 5 in Abhängigkeit der Frequenz bei  $dc = 20\%$ . Das linke Diagramm zeigt die Ergebnisse für die Auffälligkeit, das rechte Diagramm für den Störungsgrad. In der Aufgabe 5 führt die Testperson schnelle Handbewegungen durch. Daher stellt sie eine der Aufgaben dar, bei denen der Stroboskopeffekt leichter wahrgenommen werden kann.

Bei 100 Hz erhält sowohl die Auffälligkeit als auch der Störungsgrad in jeder Wiederholung eindeutig die höchste Bewertung von 2. Somit sind die Quartile und der Medianwert gleich – aus dem Boxplot wird ein Strich. Für die Frequenz von 1000 Hz ergibt sich für die Auffälligkeit und für den Störungsgrad des Stroboskopeffekts ebenfalls eine eindeutige Bewertung in diesem Fall von -2, also weder auffällig noch störend.

Bei 200 Hz beträgt der Median der Auffälligkeit einen Wert von 0. Ausgehend aus der Bedeutung der Extremwerte (vgl. Tabelle 7.3) kann die Bewertung von 0 so interpretiert werden, dass der Stroboskopeffekt nicht allzu auffällig, aber gut wahrzunehmen ist. Bei 300 und 400 Hz liegt der Median hingegen bei -1, also mit einer Tendenz zu einer geringeren Auffälligkeit. Demnach zeigen diese Ergebnisse, dass die Auffälligkeit des Stroboskopeffekts mit steigender Frequenz sinkt, was die Annahmen in Abschnitt 2.3.2 bestätigen und mit den Ergebnissen von BULLOUGH et. al [80], [81] und von VOGELS et. al [82] übereinstimmt.

Aus den Ergebnissen des Störungsgrades geht deutlich hervor, dass die Testperson den Stroboskopeffekt ab 300 Hz als nicht störend empfindet, obwohl sie ihn bei Frequenzen von 300 und 400 Hz noch wahrnimmt. Dies beobachteten auch BULLOUGH et. al [80], [81] in ihren Untersuchungen.

Um die Störung vom Stroboskopeffekt zu vermeiden, würde für diesen Probanden eine PWM-Frequenz von 300 Hz ausreichen. Die Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts muss dagegen zwischen 300 und 1000 Hz liegen. Um diesen Bereich einzugrenzen, werden im Folgenden die Ergebnisse mit einer komplementären Sigmoidfunktion approximiert. Abbildung 7.12 zeigt den dabei entstehenden Verlauf für die Auffälligkeit bei Aufgabe 5.

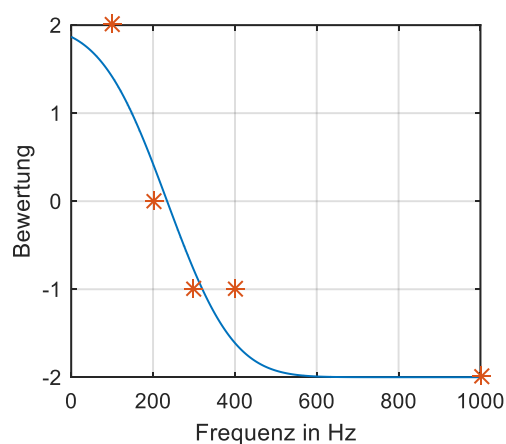
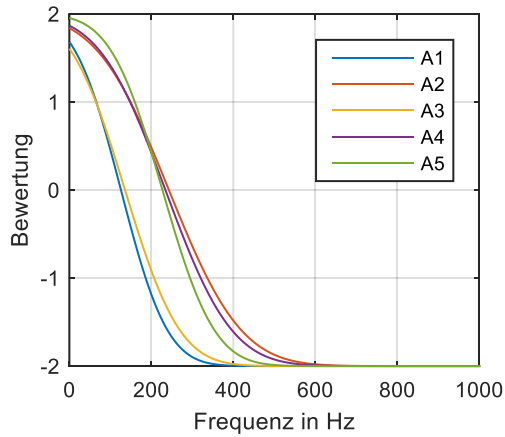
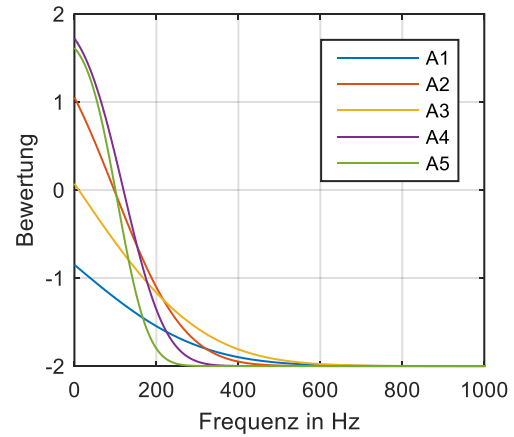


Abbildung 7.12: Approximation der Bewertungen mit einer Sigmoidfunktion, Störungsgrad bei  $dc = 20\%$ , Aufgabe 5

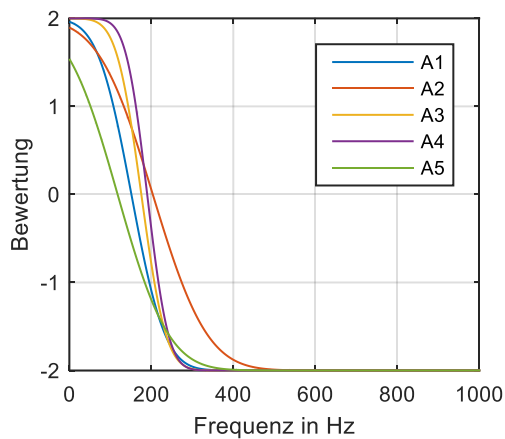
Abbildung 7.13 vergleicht die approximierten Verläufe in Abhängigkeit des Tastverhältnisses. Die oberen Diagramme in (a) und (b) stellen die Ergebnisse für die Auffälligkeit dar, während die unteren Diagramme in (c) und (d) die Verläufe des Störungsgrades aufzeigen. Für die Aufgaben 1 bis 5 wird die Kurzschreibweise A1 bis A5 verwendet.



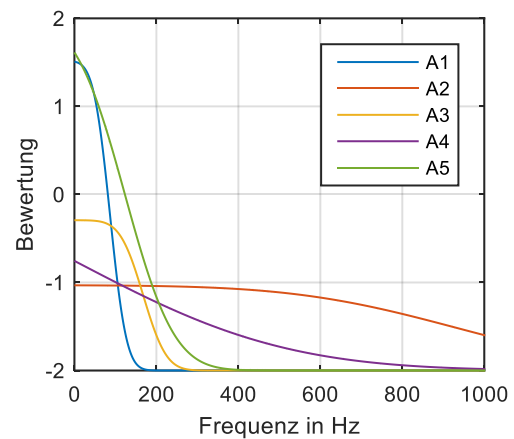
(a) Auffälligkeit bei  $dc = 20 \%$



(b) Auffälligkeit bei  $dc = 50 \%$



(c) Störungsgrad bei  $dc = 20 \%$



(d) Störungsgrad bei  $dc = 50 \%$

Abbildung 7.13: Vergleich der approximierten Funktionen nach Tastverhältnis und Aufgabe

Für die Auffälligkeit liegen die Verläufe der Aufgaben mit relativ schnellen Bewegungen (A2, A4, A5) erwartungsgemäß über bzw. rechts von den Kurven zu dem Aufgaben mit langsamen Bewegungen (A1, A3). Dies entspricht einer höheren Auffälligkeit des Stroboskopeffektes bei schnellen Bewegungen. Das gilt für die beiden untersuchten Tastverhältnisse. Bei  $dc = 50 \%$  sinkt die Auffälligkeit bei langsameren Bewegungen stärker, worauf die kleinen Bewertungen bei niedrigen Frequenzen hindeuten.

Der Störungsgrad wird bei  $dc = 20 \%$  in jeder Aufgabe ähnlich bewertet. Bei  $dc = 50 \%$  und niedrigeren Frequenzen bewertet die Testperson den Stroboskopeffekt in A1 und A5 als störender, während bei den anderen Aufgaben die Bewertung deutlich unter 0 bleibt.

Die Testperson wurde zwar vor dem Versuchsbeginn instruiert eine Bewertung von -2 für die Testbedingungen zu geben, bei denen kein Stroboskopeffekt wahrnehmbar ist. Allerdings geschieht die

Bewertung auf einer diskreten Skala, daher können Rundungsfehler von maximal 0,5 in der Bewertung entstehen. Demnach wird die Frequenz, bei der die approximierte Bewertungskurve den Wert -1,5 annimmt, als *Grenzfrequenz*  $f_g$  definiert. Ab dieser Frequenz tritt der Stroboskopeffekt praktisch nicht auf.

Eine zweite wichtige Größe ist die *Schwellenfrequenz*  $f_s$ . Bei dieser Frequenz befindet sich der Wendepunkt und somit die maximale Steigung der Bewertungskurve. Eine kleine Frequenzänderung um die Schwellenfrequenz bewirkt also eine große Änderung in der Bewertung. Dieser Einfluss wird bei anderen Frequenzen umso geringer, je weiter sie von  $f_s$  liegen. Bei dieser Frequenz wechselt also das Erscheinen des Stroboskopeffekts. Für Frequenzen oberhalb von  $f_s$  wirkt der Stroboskopeffekt weniger auffällig bzw. weniger störend. Bei der Schwellenfrequenz  $f_s$  ergibt sich also eine mittlere Auffälligkeit bzw. ein mittlerer Störungsgrad des Stroboskopeffekts.

In Tabelle 7.4 sind die Schwellen- und Grenzfrequenz für die verschiedenen Testbedingungen zusammengefasst. Die kleinsten Werte ergeben sich für die Aufgabe A1 und A3 mit relativ langsamen Bewegungen. Beim Tastverhältnis von 20 % ergeben sich wie bereits erwähnt höhere Werte für die beiden Kennfrequenzen. Dabei liegt die Schwellenfrequenz der Auffälligkeit im Durchschnitt für diese Aufgaben bei 131 Hz. Die durchschnittliche Grenzfrequenz der Auffälligkeit beträgt 242 Hz. Die durchschnittlichen Kennfrequenzen des Störungsgrades liegen in einem ähnlichen Frequenzbereich wie die der Auffälligkeit:  $\bar{f}_s = 164$  Hz,  $\bar{f}_g = 227$  Hz.

Tabelle 7.4: Schwellen- Grenzfrequenz für alle Testbedingungen

	Auffälligkeit				Störungsgrad			
	$dc = 20\%$		$dc = 50\%$		$dc = 20\%$		$dc = 50\%$	
	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$
A1	126	228	99	183	151	225	87	120
A2	243	402	200	252	204	323	932	>1000
A3	135	256	99	278	176	229	168	191
A4	234	380	200	212	190	236	11	340
A5	227	341	130	169	117	230	123	231

Die Kennfrequenzen der Aufgaben mit schnellen Bewegungen (A2, A4, A5) liegen in einem ähnlichen Frequenzbereich. Ihre durchschnittliche Schwellenfrequenz beträgt 235 Hz bei  $dc = 20\%$ . Die durchschnittliche Grenzfrequenz liegt in diesem Fall bei 375 Hz. Bei gleichem Tastverhältnis ergeben sich für die Schwellenfrequenz des Störungsgrades im Mittel 170 Hz und für die Grenzfrequenz 263 Hz.

Für die Aufgabe A2 bei  $dc = 50\%$  und Frequenzen von 100, 200 und 400 Hz sind die Bewertungen des Störungsgrades gleich und betragen -1. Daher ergeben sich für die Schwellen- und Grenzfrequenz zu hohe Werte. Zudem liegen diese Werte deutlich über den Werten bei  $dc = 20\%$ . Somit ist in diesem Fall von einem Ausreißer auszugehen. Ein ähnliches Verhalten ist bei der Aufgabe A4 zu verzeichnen. Der Grund für diese Ausreißer liegt wahrscheinlich in der Rundung der Bewertung. Die Erhöhung der Wiederholungen würde den Einfluss der Rundung beim Bewerten reduzieren.

Tabelle 7.5 gibt einen Überblick über die Durchschnittswerte der beiden Aufgabentypen. Beim Betrachten der Grenzfrequenz ist deutlich zu erkennen, dass die Unterschiede zwischen den Aufgabentypen nur bei der Auffälligkeit und bei  $dc = 20\%$  bestehen. Die Unterschiede beim Störungsgrad und dem Tastverhältnis von  $50\%$  sind auf die Ausreißer zurückzuführen. Demzufolge empfindet die Testperson den Stroboskopeffekt bei allen Aufgaben gleichstörend. Zugleich führt die höhere Auffälligkeit bei Aufgaben mit schnellen Bewegungen nicht zwingend zu einem höheren Störungsgrad.

Tabelle 7.5: Durchschnittliche Kennfrequenzen für verschiedene Aufgabentypen

	Auffälligkeit				Störungsgrad			
	$dc = 20\%$		$dc = 50\%$		$dc = 20\%$		$dc = 50\%$	
	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$
A1, A2	131	242	99	231	164	227	128	156
A3, A4, A5	235	375	177	211	170	263	355	523

Ausgehend von diesen Ergebnissen ist für diese Person eine PWM-Frequenz um  $400\text{ Hz}$  für eine stroboskopfreie Bürobeleuchtung erforderlich. Bei einer Frequenz um  $300\text{ Hz}$  würde die Testperson den Stroboskopeffekt bei den untersuchten Tätigkeiten als nicht störend empfinden. Wie die anderen Testpersonen den Stroboskopeffekt wahrnehmen soll in den folgenden Abschnitten analysiert werden.

#### 7.1.4.2 Alle Testpersonen

An diesem Versuch haben insgesamt  $38$  Personen im Alter von  $22$  bis  $61$  Jahren teilgenommen. Davon sind  $23$  männliche ( $60\%$ ) und  $15$  weibliche ( $40\%$ ) Personen.  $13$  Personen ( $34\%$ ) trugen eine Sehhilfe –  $10$  Personen eine Brille,  $3$  Personen Kontaktlinsen. Das Durchschnittsalter der Teilnehmer liegt bei  $33$  Jahren. Der älteste Teilnehmer ist  $61$  und der jüngste Teilnehmer  $22$  Jahre alt. Das Histogramm der Altersverteilung ist in Abbildung 7.14 dargestellt.

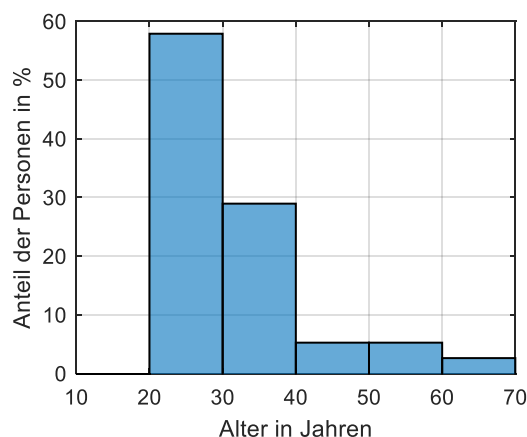


Abbildung 7.14: Histogramm der Altersverteilung der Testpersonen

Im Folgenden werden die erhobenen Daten nach zwei Methoden analysiert.

## Methode 1

Bei dieser Methode werden die Bewertungen der Probanden durch eine sigmoidale Funktion approximiert. In den Ergebnissen aller Testpersonen sind ähnliche Zusammenhänge festzustellen wie in den Ergebnissen der einzelnen Testperson (vgl. Abschnitt 7.1.4.1).

Die Abbildung 7.15 vergleicht die Ergebnisse der Aufgaben 1 und 5 bei einem Tastverhältnis von 20%. In beiden Diagrammen ist die Frequenzabhängigkeit deutlich zu erkennen: Die Bewertung der Auffälligkeit und die des Störungsgrades sinkt mit steigender Frequenz. Dabei sind die Bewertungen in der Aufgabe 5 bei höheren Frequenzen größer als in der Aufgabe 1. Allerdings weisen die Ergebnisse viele Ausreißer, rote Kreuze in Diagrammen, auf. Zudem zeigt die höhere Streuung, dass die Unterschiede in der Wahrnehmung des Stroboskopeffektes zwischen den Personen höher sind, als die intrapersonelle Streuung (vgl. Abschnitt 7.1.4.1).

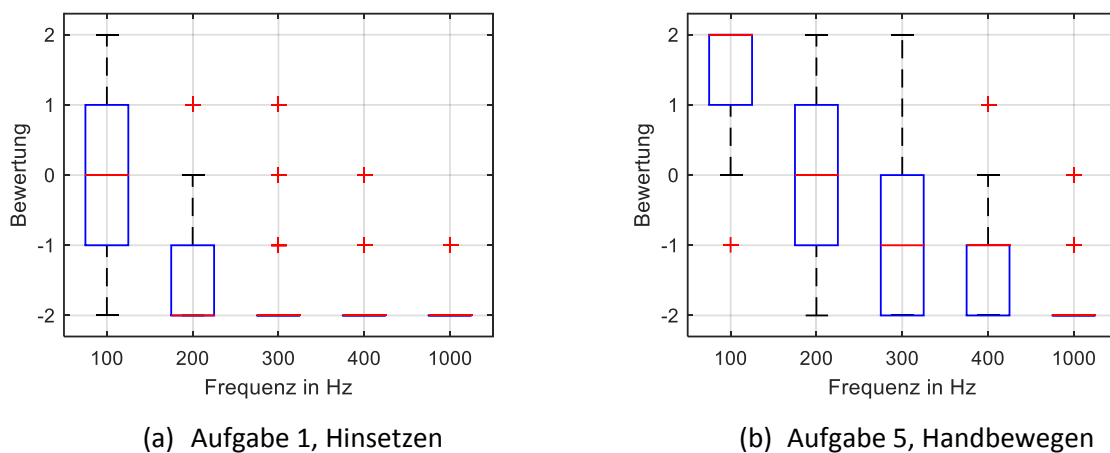
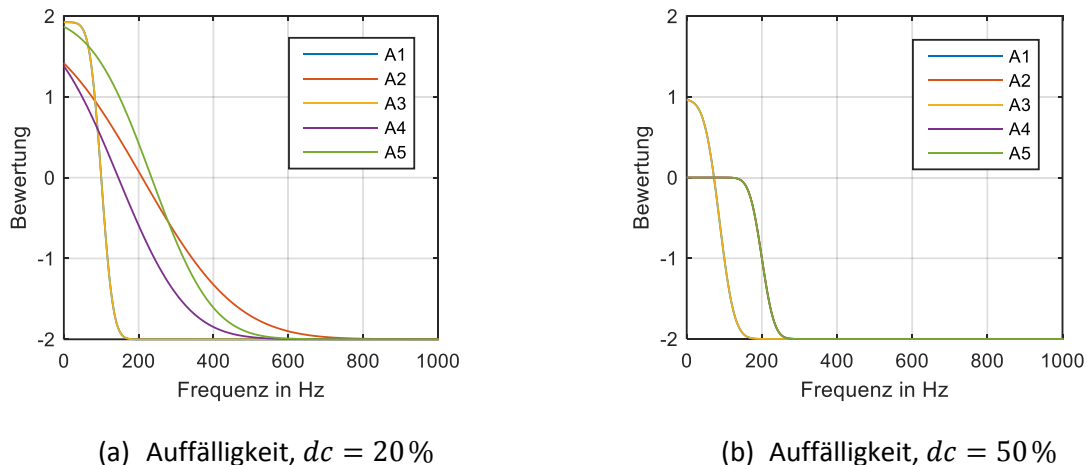
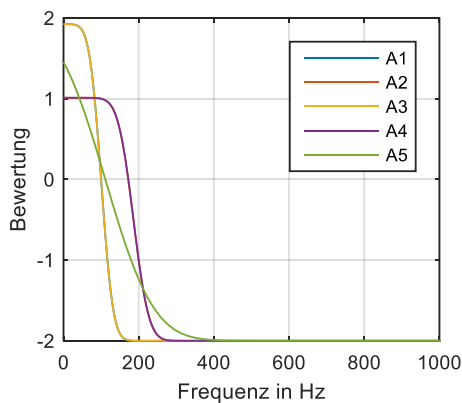


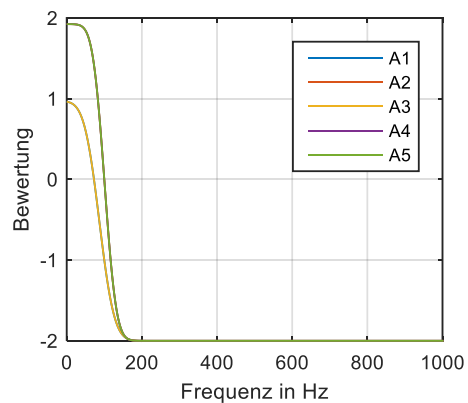
Abbildung 7.15: Boxplots der Bewertungen der Auffälligkeit bei  $dc = 20\%$ , alle Testpersonen

Wie in Abschnitt 7.1.4.1 werden die Bewertungen durch eine komplementäre Sigmoidfunktion approximiert. Die oberen Diagramme in Abbildung 7.16 (a) und (b) zeigen die Ergebnisse für die Bewertung der Auffälligkeit. Die beiden unteren Diagramme (c) und (d) vergleichen die Verläufe des Störungsgrades. Dabei stellen die linken Diagramme (a) und (c) die Ergebnisse für  $dc = 20\%$  und die rechten (b) und (d) für  $dc = 50\%$  dar.





(c) Störungsgrad,  $dc = 20\%$



(d) Störungsgrad,  $dc = 50\%$

Abbildung 7.16: Approximation der Bewertungen, alle Testpersonen

Bis auf die Ergebnisse der Auffälligkeit bei  $dc = 20\%$  verlaufen die Kurven deutlich näher an der Ordinate als die Ergebnisse der einzelnen Testperson aus dem vorigen Abschnitt. Das bedeutet, dass diese Testperson (25 Jahre alt) überdurchschnittlich empfindlich ist.

Die Schwellen-  $f_s$  und Grenzfrequenz  $f_g$  sowie die approximierte Bewertung bei 100 Hz  $r_{100\text{ Hz}}$  sind für die untersuchten Bedingungen in Tabelle 7.6 aufgezeigt. In den zwei untersten Zeilen finden sich die Mittelwerte über die langsamen Aufgaben (A1, A3) und über die schnellen Aufgaben (A2, A4, A5). Die beiden Aufgabenarten weisen unter sich ähnliche Ergebnisse auf. Deshalb überlagern sich ihre Verläufe bei manchen Testbedingungen (vgl. Abbildung 7.16).

Bei den schnellen Aufgaben entstehen wie erwartet die höchsten Kennfrequenzen. Die maximale Grenzfrequenz ergibt sich für die Auffälligkeit beim Tastverhältnis von 20 %. Dabei beträgt die durchschnittliche Grenzfrequenz 375 Hz. Hier liegt auch die maximale Schwellenfrequenz. Sie beträgt im Mittel 202 Hz. Für den Störungsgrad bei  $dc = 20\%$  ergibt sich für die beiden Kenngrößen als Mittelwert:  $\bar{f}_s = 160\text{ Hz}$ ,  $\bar{f}_g = 220\text{ Hz}$ . Für das größere Tastverhältnis von 50 % sind die Kennfrequenzen erwartungsgemäß niedriger.

Bei den Aufgaben mit relativ langsamen Bewegungen liegen die Kennfrequenzen deutlich unter 200 Hz. Dabei beträgt die maximale Grenzfrequenz 127 Hz. Zudem sind die Ergebnisse für die Auffälligkeit und für den Störungsgrad identisch.

In der Einführungsphase wurde die PWM-Einstellung mit  $dc = 20\%$  bei 100 Hz als Anker für die Bewertung von 2 verwendet. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch für diese Testbedingung teilweise deutlich niedrigere Werte auf (vgl. Tabelle 7.6). Nur bei Aufgabe 5 ergibt sich eine Bewertung der Auffälligkeit von  $r_{100\text{ Hz}} = 1,4$ , die nah am Ankerwert von 2 liegt. Bei Aufgaben 1 und 3 ist dieser Wert 0. Bei Aufgaben 2 und 4 entstehen entsprechend die approximierte Bewertungen von 0,8 und 0,5. Die Ergebnisse des Störungsgrades liegen ebenfalls für diese Einstellung unter der Bewertung von 2.

Der Grund für die niedrigere Bewertung liegt darin, dass viele Testpersonen offensichtlich den Stroboskopeffekt generell als nicht auffällig und nicht störend wahrnehmen. Zudem ist aus der Sozialforschung bekannt, dass manche Testpersonen dazu neigen, die Bewertungsskala nicht komplett auszunutzen [106]. Während die Bewertung von -2 mit der Bedeutung „der Stroboskopeffekt ist nicht wahrnehmbar“ keinen Raum für falsche Interpretationen zulässt, kann die Bewertung von 2 mit der Bedeutung „der Stroboskopeffekt ist deutlich wahrzunehmen“ von Person zu Person aber auch abhängig von der Testbedingung unterschiedlich verstanden werden. Zudem fehlt der direkte Vergleich zu dem Effekt bei der Bezugseinstellung. Aus diesen Gründen ergibt sich im Durchschnitt über die Testpersonen eine niedrigere Bewertung für die Ankereinstellung.

Tabelle 7.6: Kennwerte der Ergebnisse für alle Aufgaben

	Auffälligkeit						Störungsgrad					
	$dc = 20\%$			$dc = 50\%$			$dc = 20\%$			$dc = 50\%$		
	$r_{100}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100 \text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100 \text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100 \text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$
A1	0	100	127	-1	87	116	0	100	127	-1	87	116
A2	0,8	215	437	0	200	216	1	185	216	0	100	127
A3	0	100	127	-1	87	116	0	100	127	-1	87	116
A4	0,5	151	309	0	200	216	1	185	216	0	100	127
A5	1,4	239	380	0	200	216	0,2	111	227	0	100	127
A1, A3	0	100	127	-1	87	116	0	100	127	-1	87	116
A2, A4, A5	0,9	202	375	0	200	216	0,7	160	220	0	100	127

Die Ergebnisse in Tabelle 7.6 gelten allerdings nur für die untersuchten Tastverhältnisse von 20 % und 50 %. Sie zeigen, dass die Kennfrequenzen für ein kleines Tastverhältnis höher sind. Demnach sind für Tastverhältnisse unterhalb von 20 % noch höhere Kennfrequenzen zu erwarten.

Mithilfe der gewonnenen Ergebnisse kann die Grenzfrequenz für kleinere Tastverhältnisse nach Formel 5.2 abgeschätzt werden (vgl. Abschnitt 5.3.4). Auch für die Schwellenfrequenz wird ein Wert nach diesem Prinzip ermittelt. Die Ergebnisse fasst Tabelle 7.7 zusammen.

Tabelle 7.7: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen, Methode 1

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$\hat{f}_s / \text{Hz}$	$\hat{f}_g / \text{Hz}$	$\hat{f}_s / \text{Hz}$	$\hat{f}_g / \text{Hz}$
Langsame Aufgaben	109	134	100	116
Schnelle Aufgaben	203	481	200	282

Zusammenfassend lassen sich aus den Ergebnissen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Die Auffälligkeit und der Störungsgrad sinken mit steigender Frequenz.
- Es bestehen interpersonelle Unterschiede in der Wahrnehmung des Stroboskopeffekts.
- Generell nimmt sowohl die Auffälligkeit, als auch der Störungsgrad mit steigendem Tastverhältnis ab.
- Bei Aufgaben mit schnellen Bewegungen ist der Stroboskopeffekt auffälliger und störender.
- Für langsame Aufgaben ist eine PWM-Frequenz von 134 Hz ausreichend, um im Durchschnitt den Stroboskopeffekt bei den Probanden nicht zu verursachen.



- Bei der Frequenz von 481 Hz wird der Stroboskopeffekt auch bei schnellen Aufgaben im Durchschnitt nicht wahrgenommen.
- Die Grenzfrequenz für eine störungsfreie Beleuchtung liegt bei 282 Hz.
- Für die mittlere Auffälligkeit und Störungsgrad ergibt sich bei schnellen Aufgaben eine Frequenz von ca. 200 Hz. Bei langsamen Aufgaben liegt sie bei ca. 100 Hz.

Nach dieser Auswertungsmethode ist für die Innenraumbeleuchtung eine PWM-Frequenz im Bereich zwischen der maximalen Schwellen- und der maximalen Grenzfrequenz zu empfehlen, also im Bereich 200-500 Hz.

Manche Testpersonen nehmen jedoch den Stroboskopeffekt bei Frequenzen aus diesem Bereich deutlich wahr. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse im Folgenden mit einer weiteren Methode analysiert.

## Methode 2

Für jede Testbedingung (Aufgabe und Tastverhältnis) wird die Anzahl der Personen, die den Stroboskopeffekt nicht auffällig bzw. nicht störend bewerteten (Bewertung -2, vgl. Tabelle 7.3), zu jeder getesteten Frequenz ermittelt. Diese Personen werden als unempfindlich bezeichnet.

Die Abhängigkeit der unempfindlichen Personen wird mit einer Sigmoidfunktion approximiert. Abbildung 7.17 zeigt exemplarisch die Werte für die Auffälligkeit bei Aufgabe 5 und einem Tastverhältnis von 20 %. Durch die approximierte Funktion ist möglich, zu einer gegebenen Frequenz den Anteil unempfindlicher Personen zu ermitteln.

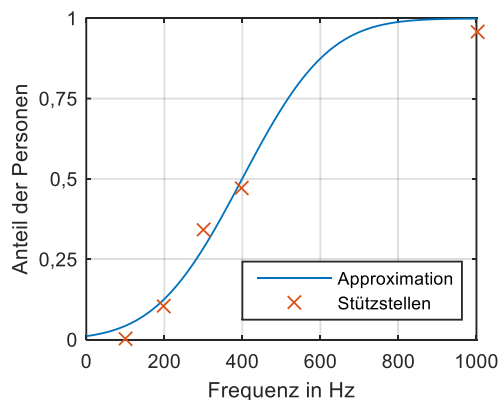
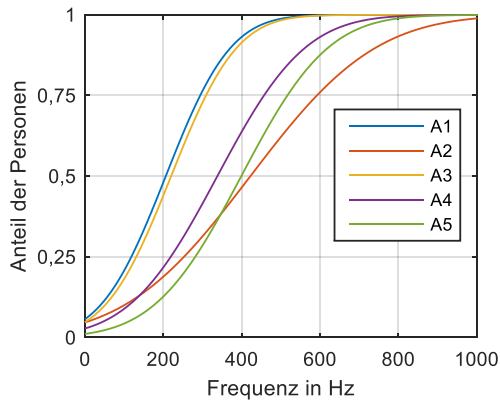
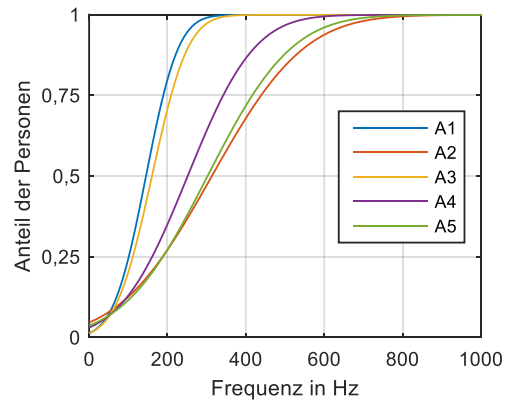


Abbildung 7.17: Beispiel für die Approximation des Anteils der unempfindlichen Testpersonen

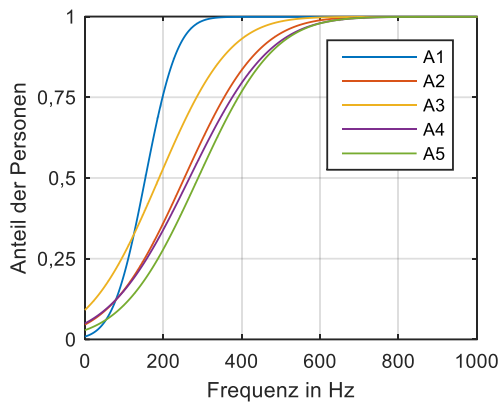
Als *Schwellenfrequenz*  $f_{50\%}$  wird bei dieser Methode, die Frequenz definiert, für die der Anteil der unempfindlichen Testpersonen bei 50 % liegt. Im Folgenden wird die Schwellenfrequenzen  $f_{50\%}$  für die untersuchten Bedingungen ermittelt. Die approximierten Verläufe für alle Testbedingungen sind in Abbildung 7.18 aufgezeigt.



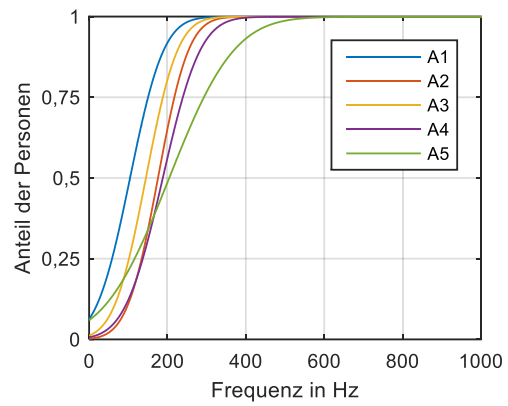
(a) Auffälligkeit,  $dc = 20\%$



(b) Auffälligkeit,  $dc = 50\%$



(c) Störungsgrad,  $dc = 20\%$



(d) Störungsgrad,  $dc = 50\%$

Abbildung 7.18: Approximation des Anteils unempfindlicher Personen in Abhängigkeit von der Frequenz, alle Testpersonen

Generell gilt, je flacher die approximierte Funktion verläuft, umso geringer ist der Einfluss der Frequenz auf den Anteil der unempfindlichen Testpersonen und somit umso kritischer ist die Testbedingung hinsichtlich des Stroboskopeffekts.

Nach dieser Methode ergeben sich qualitativ ähnliche Zusammenhänge wie bei der ersten Auswertungsmethode. Tabelle 7.8 zeigt die ermittelte Schwellenfrequenz  $f_{50\%}$  für alle Testbedingungen.

Tabelle 7.8: Schwellenfrequenz in Abhängigkeit vom Tastverhältnis und Aufgabe

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$f_{50\%}(dc = 20\%) / \text{Hz}$	$f_{50\%}(dc = 50\%) / \text{Hz}$	$f_{50\%}(dc = 20\%) / \text{Hz}$	$f_{50\%}(dc = 50\%) / \text{Hz}$
A1	208	146	155	105
A2	424	314	255	177
A3	221	161	190	146
A4	339	253	268	189
A5	400	303	290	205
A1, A3	215	154	173	126
A2, A4, A5	388	290	271	190

Auch nach dieser Auswertungsmethode ergeben sich für die schnellen Aufgaben (A2, A4, A5) höhere Werte als für die langsameren Aufgaben (A1, A3). Die maximalen Frequenzen entstehen bei der Bewertung der Auffälligkeit und  $dc = 20\%$ . Als Mittelwert über die schnellen Aufgaben ergibt sich hierbei eine Frequenz von 388 Hz. Für den Störungsgrad resultiert eine niedrigere Frequenz von 271 Hz. Bei den Aufgaben mit langsameren Bewegungen ergeben sich wie erwartet niedrigere Frequenzen.

Des Weiteren wird die Schwellenfrequenz für kleinere Tastverhältnisse nach Formel 5.2 abgeschätzt. Die Ergebnisse fasst Tabelle 7.9 zusammen. Diese liegen im ähnlichen Frequenzbereich wie die Grenzfrequenz nach der ersten Methode (vgl. Tabelle 7.7).

Tabelle 7.9: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2

	Auffälligkeit	Störungsgrad
	$\hat{f}_{50\%} / \text{Hz}$	$\hat{f}_{50\%} / \text{Hz}$
Langsame Aufgaben	256	204
Schnelle Aufgaben	453	325

Beim Betrachten der Ergebnisse aller Testpersonen fällt eine deutlich höhere Streuung in der Bewertung auf, als bei den Ergebnissen der einzelnen Testperson mit mehreren Wiederholungen. Im Folgenden werden die Probanden in Gruppen nach verschiedenen Kriterien aufgeteilt und die Ergebnisse nach Gruppen analysiert.

### 7.1.4.3 Gruppierung nach Altersgruppen

Den größten Anteil an Probanden machen Studenten unter dem Alter von 26 Jahren aus. Mit einer Grenze bei 26 Jahren lassen sich zwei gleichgroße Altersgruppen bilden (vgl. Abbildung 7.14). In Tabelle 7.10 sind einige Kenngrößen dieser Gruppen zusammengefasst. Die Anzahl weiblicher und männlicher Personen ist in den beiden Gruppen praktisch identisch. Dabei ist der Anteil männlicher Personen mit 60% etwas höher.

Tabelle 7.10: Altersgruppen

	$\mu_{\text{Alter}} / \text{Jahre}$	$\sigma_{\text{Alter}} / \text{Jahre}$	$N$	$N_{\text{weiblich}}$	$N_{\text{männlich}}$
AG1	23	2	19 (50%)	8 (42%)	11 (58%)
AG2	36	10	19 (50%)	7 (37%)	12 (63%)

Die Ergebnisse der beiden Gruppen weisen unter allen Testbedingungen Unterschiede auf. Die Bewertungen der Testpersonen unter 26 Jahre (AG1) liegen unter den Bewertungen der Testpersonen, die älter als 26 Jahre sind (AG2). Die Testpersonen aus AG1 bewerten den Stroboskopeffekt demnach als weniger auffällig. Die Varianzanalyse ( $\alpha = 5\%$ ) zeigt eine hohe Signifikanz ( $p < 10^{-6}$ ) der Unterschiede.

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach den in Abschnitt 7.1.4.2 beschriebenen Methoden ausgewertet.

## Methode 1

Tabelle 7.11 gibt einen Überblick über die Kennwerte der approximierten Funktionen der Bewertungen für die Gruppe AG1. Die Testpersonen in dieser Gruppe nehmen den Stroboskopeffekt bei Aufgaben mit langsamen Bewegungen (A1 und A3) schlecht bis gar nicht wahr. Dies ist an  $r_{100\text{ Hz}} \leq 0$  und  $f_g < 130\text{ Hz}$  deutlich zu erkennen. Höhere Empfindlichkeit zeigt sich bei Aufgaben mit schnellen Bewegungen (A2, A4, A5). Auch für diese Probanden entsteht die maximale Grenzfrequenz bei einem Tastverhältnis von 20 %. Für die Auffälligkeit beträgt hierbei die durchschnittliche Grenzfrequenz  $\bar{f}_{g,A2,A4,A5} = 277\text{ Hz}$ . Für den Störungsgrad liegt sie bei 216 Hz (die unterste Zeile in Tabelle 7.11).

Tabelle 7.11: Kennwerte der Ergebnisse für AG1

	Auffälligkeit						Störungsgrad					
	$dc = 20\%$			$dc = 50\%$			$dc = 20\%$			$dc = 50\%$		
	$r_{100\text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100\text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100\text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$	$r_{100\text{ Hz}}$	$f_s / \text{Hz}$	$f_g / \text{Hz}$
A1	-1	87	116	-1	87	116	-1	87	116	-2	45	0
A2	0,5	165	402	0	200	216	0	200	216	0	100	127
A3	0	100	127	-1	87	116	0	100	127	-1	86	116
A4	1	185	216	0	100	127	1	185	216	0	100	127
A5	2	180	212	0	200	216	1	185	216	-1	87	116
A1, A3	-0,5	94	122	-1	87	116	-0,5	94	122	-1,5	66	58
A2, A4, A5	1,2	177	277	0	167	186	0,6	190	216	-0,3	96	123

Tabelle 7.12 gibt den Überblick über die durchschnittlichen Kennfrequenzen der empfindlicheren Gruppe AG2 für die schnellen und langsamen Aufgaben. Auch hier ist der Stroboskopeffekt beim Tastverhältnis von 20 % am auffälligsten und weist dabei einen höheren Störungsgrad auf. Die durchschnittliche Grenzfrequenz für die Auffälligkeit bei den Aufgaben A2, A4, A5 beträgt 370 Hz. Für den Störungsgrad liegt sie bei 244 Hz. Für die Aufgaben 1 und 3 ergeben sich entsprechend niedrigere Frequenzen von 172 Hz und 135 Hz.

Tabelle 7.12: Durchschnittliche Kennfrequenzen nach Aufgabenart für AG2

	Auffälligkeit				Störungsgrad			
	$dc = 20\%$		$dc = 50\%$		$dc = 20\%$		$dc = 50\%$	
	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$
A1, A3	150	172	94	122	108	135	87	116
A2, A4, A5	217	370	168	272	169	244	110	138

Die für kleinere Tastverhältnisse nach Formel 5.2 abgeschätzten Frequenzen sind Tabelle 7.13 zu entnehmen. Die Unterschiede zwischen den Gruppen sind zwar nicht allzu groß, für die Gruppe AG1 ergeben sich jedoch in der Regel kleinere Frequenzen. Beim Störungsgrad sind die Unterschiede geringer als bei der Auffälligkeit. Demnach bewerten die jüngeren Testpersonen den Störungsgrad des Stroboskopeffekts kritischer als seine Auffälligkeit.

Tabelle 7.13: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen, Methode 1

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$\hat{f}_s$ / Hz	$\hat{f}_g$ / Hz	$\hat{f}_s$ / Hz	$\hat{f}_g$ / Hz
<b>Gruppe AG1</b>				
Langsame Aufgaben	98	126	113	165
Schnelle Aufgaben	184	338	253	278
<b>Gruppe AG2</b>				
Langsame Aufgaben	187	205	122	148
Schnelle Aufgaben	250	435	208	315

## Methode 2

Im Folgenden wird der Anteil unempfindlicher Personen in Abhängigkeit der Frequenz ermittelt. Abbildung 7.19 zeigt exemplarisch das Ergebnis für die Aufgabe 5 bei einem Tastverhältnis von 20 %. Die approximierte Funktion der Auffälligkeit der Gruppe AG2 verläuft deutlich flacher (vgl. Abbildung 7.19(a)). Dies bestätigt die höhere Empfindlichkeit der Testpersonen in dieser Gruppe. Für den Störungsgrad ist hingegen der Unterschied geringer (vgl. Abbildung 7.19).

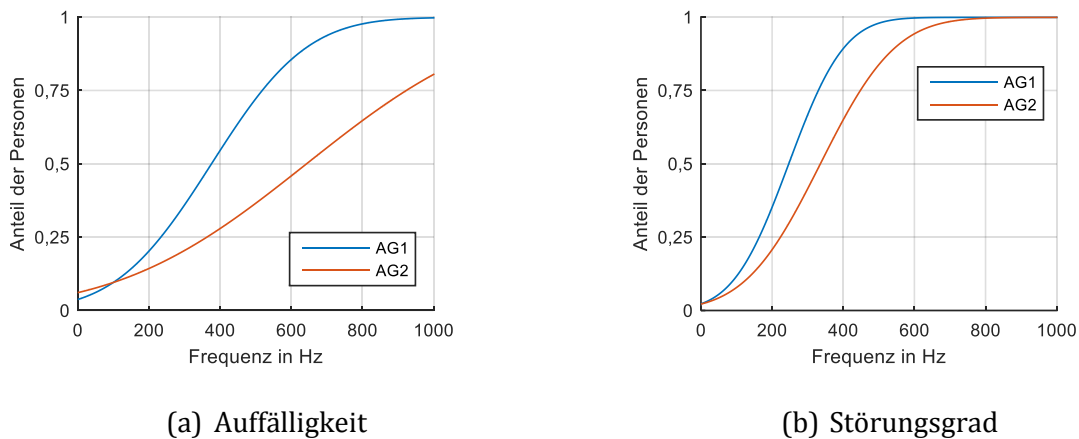


Abbildung 7.19: Approximation des Anteils unempfindlicher Personen nach Altersgruppen, Aufgabe 5 und  $dc = 20\%$

Die nach Formel 5.2 geschätzte Schwellenfrequenz ist für verschiedene Aufgabenarten in Tabelle 7.14 aufgelistet. Nach dieser Methode werden die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen deutlicher.

Tabelle 7.14: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2

	Auffälligkeit	Störungsgrad
	$\hat{f}_{50\%}$ / Hz	$\hat{f}_{50\%}$ / Hz
<b>Gruppe AG1</b>		
Langsame Aufgaben	240	174
Schnelle Aufgaben	424	280
<b>Gruppe AG2</b>		
Langsame Aufgaben	272	237
Schnelle Aufgaben	644	371

Die maximalen Schwellenfrequenzen nach der zweiten Auswertungsmethode liegen deutlich über den mit der ersten Methode ermittelten Frequenzen (vgl. Tabelle 7.13). Das liegt daran, dass die Testpersonen, die eine Bewertung von -2 bei der jeweiligen Testbedingung geben, bei der zweiten Auswertungsmethode als unempfindlich definiert werden. Da dieser Wert nicht dem mittleren Skalenswert entspricht, wird dadurch der Anteil der unempfindlichen Testpersonen unterschätzt. Folglich wird die Grenzfrequenz überschätzt.

Bei der ersten Schätzmethode werden hingegen die Bewertungen aller Testpersonen der jeweiligen Gruppe berücksichtigt. Deshalb ergibt sich eine niedrigere und für die empfindlichen Testpersonen unterschätzte Grenzfrequenz.

Für den praktischen Einsatz wäre die mittlere Frequenz  $f_G = 0,5(\bar{f}_G + \hat{f}_{50\%})$  sinnvoll. Die minimale PWM-Frequenz  $f_{min}$  soll dagegen die Schwellenfrequenz  $f_s$  nicht unterschreiten. Bei dieser Frequenz weist der Stroboskopeffekt eine mittlere Auffälligkeit auf. In Tabelle 7.15 sind die beiden Frequenzen anhand der Ergebnisse der empfindlichen Testpersonen (Gruppe AG2) aufgezeigt.

Tabelle 7.15: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der empfindlichen Altersgruppe AG2

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$f_{min}$ / Hz	$f_G$ / Hz	$f_{min}$ / Hz	$f_G$ / Hz
Langsame Aufgaben	98	239	113	193
Schnelle Aufgaben	184	540	253	343

#### 7.1.4.4 Gruppierung nach Geschlecht

An diesem Versuch nahmen 23 männliche und 15 weibliche Personen teil. Tabelle 7.16 fasst die statistischen Werte der beiden Testpersonengruppen zusammen. Das Durchschnittsalter  $\mu_{Alter}$  mit 29 Jahren bei männlichen und 30 Jahren bei weiblichen Personen sowie die Altersverteilung repräsentiert durch die Streuung  $\sigma_{Alter}$  mit 8 Jahren bei männlichen und 12 Jahren bei weiblichen Personen sind ähnlich.

Tabelle 7.16: Statistische Kennwerte der männlichen und weiblichen Personen

	$\mu_{Alter}$ / Jahre	$\sigma_{Alter}$ / Jahre	$min_{Alter}$ / Jahre	$max_{Alter}$ / Jahre	$N$
Männlich	29	8	21	53	23 (61%)
Weiblich	30	12	21	60	15 (39%)

Die Varianzanalyse ( $\alpha = 5\%$ ) zeigt eine hohe Signifikanz ( $p < 10^{-6}$ ) der Unterschiede zwischen diesen Gruppen. Dabei weisen die Bewertungen der männlichen Testpersonen höhere Werte auf.

Im Folgenden werden die Ergebnisse nach den in Abschnitt 7.1.4.2 beschriebenen Methoden ausgewertet.

## Methode 1

Tabelle 7.17 gibt einen Überblick über die durchschnittlichen Kennfrequenzen der approximierten Bewertungen nach Aufgabenart für die männlichen und weiblichen Testpersonen.

Tabelle 7.17: Durchschnittliche Kennfrequenzen nach Aufgabenart für die männlichen und weiblichen Testpersonen nach Methode 1

	Auffälligkeit				Störungsgrad			
	$dc = 20\%$		$dc = 50\%$		$dc = 20\%$		$dc = 50\%$	
	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$	$\bar{f}_s / \text{Hz}$	$\bar{f}_g / \text{Hz}$
<b>Männlich</b>								
A1, A3	200	217	87	116	108	135	87	116
A2, A4, A5	191	311	151	282	186	216	100	128
<b>Weiblich</b>								
A1, A3	100	128	87	116	100	128	87	116
A2, A4, A5	129	272	95	217	138	196	100	128

Mithilfe von Formel 5.2 werden aus diesen Daten die Frequenzen für kleine Tastverhältnisse abgeschätzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.18 dargestellt.

Tabelle 7.18: Geschätzte maximale Werte der Kennfrequenzen für die männlichen und weiblichen Testpersonen nach Methode 1

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$\hat{f}_s / \text{Hz}$	$\hat{f}_g / \text{Hz}$	$\hat{f}_s / \text{Hz}$	$\hat{f}_g / \text{Hz}$
<b>Männlich</b>				
Langsame Aufgaben	275	284	122	148
Schnelle Aufgaben	218	330	243	275
<b>Weiblich</b>				
Langsame Aufgaben	109	136	109	136
Schnelle Aufgaben	152	309	163	241

Die niedrigeren Werte als in den Ergebnissen aller Testpersonen deuten darauf hin, dass unter den Testpersonen in den hier gebildeten Gruppen große Unterschiede bestehen.

## Methode 2

Die Ergebnisse der Approximation des Anteils der unempfindlichen Testpersonen sind in Tabelle 7.19 zusammengefasst. Auch nach dieser Auswertungsmethode ergeben sich niedrigere Frequenzen als bei der Gruppierung nach Alter (vgl. Tabelle 7.14). Dies gibt einen Hinweis darauf, dass das Alter einen höheren Einfluss auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffektes hat, als der geschlechtsbedingte Einfluss.

Tabelle 7.19: Geschätzte maximale Werte der Schwellenfrequenz nach Methode 2

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$\hat{f}_{50\%} / \text{Hz}$		$\hat{f}_{50\%} / \text{Hz}$	
<b>Männlich</b>				
Langsame Aufgaben	273		224	
Schnelle Aufgaben	604		355	
<b>Weiblich</b>				
Langsame Aufgaben	218		172	
Schnelle Aufgaben	373		274	

Aus den Ergebnissen der männlichen Testpersonen lassen sich nach den gleichen Kriterien, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, für die Praxis relevanten Frequenzen ermitteln. Diese fasst Tabelle 7.20 zusammen.

Tabelle 7.20: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der männlichen Testpersonen

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$f_{min} / \text{Hz}$	$f_G / \text{Hz}$	$f_{min} / \text{Hz}$	$f_G / \text{Hz}$
Langsame Aufgaben	275	279	122	186
Schnelle Aufgaben	218	467	243	315

#### 7.1.4.5 Gruppierung nach Bewertungen

Die einzelnen Gruppen nach der Alters- bzw. Geschlechtsaufteilung weisen große interpersonelle Unterschiede auf. Deshalb werden im Folgenden die Testpersonen nach ihrer Bewertung gruppiert. Dabei wird wie schon in Kapiteln 5 und 6 das Fuzzy C-Means-Verfahren angewendet. Die Anzahl der Gruppen von 3 erwies sich dabei als sinnvoll. Tabelle 7.21 zeigt die semantische Bedeutung der einzelnen Gruppen in Bezug auf die Bewertung des Stroboskopeffekts über alle Testbedingungen.

Tabelle 7.21: Beschreibung der Gruppen nach ihrer Bewertung des Stroboskopeffekts

Gruppe	Beschreibung
G1	Stroboskopeffekt <i>auffällig</i> und <i>störend</i>
G2	Stroboskopeffekt <i>oft auffällig</i> und <i>weniger störend</i>
G3	Stroboskopeffekt <i>kaum auffällig</i> und <i>kaum störend</i>

Die statistischen Kennwerte der Gruppen sind in Tabelle 7.22 dargestellt. An diesem Versuch nahmen insgesamt  $N_{FGLT} = 14$  Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik teil, die bereits mit verschiedenen lichttechnischen Untersuchungen vertraut waren. Die Ergebnisse dieser Testpersonen weisen keinen signifikanten Unterschied zu den anderen Testpersonen auf ( $\alpha = 5\%$ ,  $p = 68\%$ ).

Fast die Hälfte aller Testpersonen (47%) bilden die Gruppe der unempfindlichen Personen (Gruppe G3). Der Anteil der weiblichen und männlichen Personen ist gleich. Diese Gruppe besteht allerdings aus 60% aller weiblichen Testpersonen, während der Anteil der männlichen Testpersonen in dieser Gruppe 39% aller männlichen Testpersonen beträgt. Dies bestätigt die in Abschnitt 7.1.4.4 ermittel-



ten Unterschiede zwischen männlichen und weiblichen Testpersonen. In der Gruppe G3 sind Testpersonen unterschiedlichen Alters vertreten. Dabei sind 13 Testpersonen (72% in G3) jünger als 26 Jahre. Dies bestätigt die in Abschnitt 7.1.4.3 ermittelte Altersabhängigkeit.

Die Gruppe G2 besteht aus 9 Testpersonen (24%). Davon sind 8 Testpersonen männlich und eine weiblich. Das Alter der Testpersonen ist gleichmäßig zwischen 21 und 42 Jahren verteilt.

Die zweitgrößte Gruppe (G1) bilden 11 Testpersonen (29%), die den Stroboskopeffekt auch bei hohen Frequenzen wahrnehmen und ihn bei verschiedenen Testbedingungen als störend empfinden. Der Anteil der männlichen und weiblichen Testpersonen ist nahezu gleich. Dabei sind 2 weibliche und 3 männliche Testpersonen Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik.

Tabelle 7.22: Statistische Kennwerte der Gruppen

	$\mu_{\text{Alter}} /$ Jahre	$\sigma_{\text{Alter}} /$ Jahre	$N_{\text{Alter}<26} /$ Personen	$N_{\text{FGLT}} /$ Personen	$N_{\text{männlich}} /$ Personen	$N_{\text{weiblich}} /$ Personen	$N /$ Personen
G1	29	9	4	5	6	5	11 (29%)
G2	32	7	2	3	8	1	9 (24%)
G3	29	12	13	6	9	9	18 (47%)

Wie in vorangegangenen Abschnitten werden auch hier die Bewertungen der einzelnen Gruppen mit zwei Methoden analysiert. Basierend auf die Ergebnisse der empfindlichen Testpersonen (Gruppe G1) werden für die Praxis relevante PWM-Frequenzen abgeleitet, die in Tabelle 7.23 aufgezeigt sind.

Tabelle 7.23: Für die Praxis relevante Frequenzen anhand der empfindlichen Testpersonen (Gruppe G1)

	Auffälligkeit		Störungsgrad	
	$f_{\text{min}} / \text{Hz}$	$f_G / \text{Hz}$	$f_{\text{min}} / \text{Hz}$	$f_G / \text{Hz}$
Langsame Aufgaben	244	429	243	302
Schnelle Aufgaben	229	709	265	634

Da der Anteil der Testpersonen in Gruppe G1 rund ein Drittel aller Testpersonen entspricht, hat dieses Ergebnis eine große Bedeutung für die Beleuchtungsindustrie. Für eine wahrnehmungsgerechte Beleuchtung, die mittels PWM gedimmt wird, ist demnach eine PWM-Frequenz um 700 Hz erforderlich.

#### 7.1.4.6 Gruppierung nach Befindlichkeit

Jede Testperson füllte vor dem Versuchsbeginn einen Fragebogen zu ihrer Befindlichkeit aus (MDBF, vgl. Abschnitt 7.1.3.1). Anhand dieser Ergebnisse wurden die Testpersonen mithilfe des Fuzzy C-Means-Verfahrens in drei Gruppen nach ihrer Befindlichkeit aufgeteilt. Abbildung 7.20 zeigt die Ergebnisse der Gruppen in drei Ebenen, die von jeweils zwei Befindlichkeitsskalen gebildet werden.

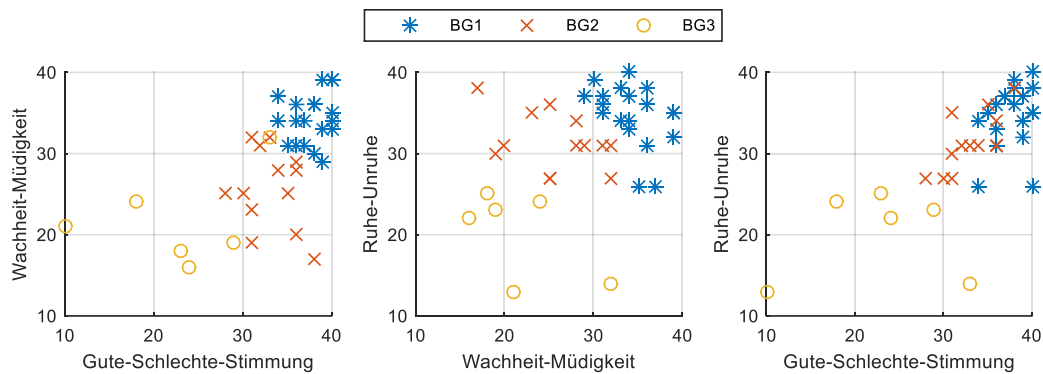


Abbildung 7.20: Ergebnisse der Befindlichkeitsgruppen

Wie bereit in Abschnitt 7.1.3.1 beschrieben, stehen hohe Werte für die positive Bedeutung der jeweiligen Befindlichkeitsskala. Somit fühlten sich die Testpersonen der Gruppe BG1 wach und ruhig und sie waren gut gelaunt. Diese Gruppe besteht aus 19 Testpersonen (50 %) unterschiedlichen Alters. Ihre Ergebnisse sind durch die blauen Sterne in den Diagrammen in Abbildung 7.20 dargestellt. Im Gegensatz dazu fühlten sich die Testpersonen aus der Gruppe BG2 eher müde, unruhig und weniger gut gelaunt (gelbe Kreise). Diese Gruppe zählt 6 Testpersonen (16 %), deren Alter unter 33 Jahren liegt. Die Befindlichkeitswerte der Testpersonen aus der Gruppe BG2 (orangene Kreuze) liegen zwischen den Ergebnissen der beiden anderen Gruppen. Die Gruppe BG2 besteht aus 13 Testpersonen (34 %) unterschiedlichen Alters.

Die Testpersonen aus BG3 gehören zu den unempfindlichen Testpersonen (Gruppe G3, vgl. Tabelle 7.21 in Abschnitt 7.1.4.5). Die Testpersonen der Befindlichkeitsgruppen BG1 und BG2 sind hingegen ähnlich in den Gruppen G1 und G2 verteilt. Demnach kann der Einfluss der Befindlichkeit einer Testperson auf ihre Bewertung und somit auf ihre Wahrnehmung des Stroboskopeffekts vermutet werden.

Diese Vermutung wird beim Betrachten der Uhrzeiten, zu denen die Testpersonen am Versuch teilnahmen, gestützt. Die Versuchsurzeiten der Befindlichkeitsgruppen sind in Form von Boxplots in Abbildung 7.21 dargestellt. Die Versuche mit den Testpersonen aus BG3 fanden zwischen 10 Uhr und 13 Uhr statt. Zu dieser Uhrzeit fühlen sich viele Menschen müde und ihre Leistungsbereitschaft sinkt [107], [108]. Es sind keine Studien über den Einfluss der Tageszeit bzw. der Müdigkeit auf das Wahrnehmen des Stroboskopeffekts bekannt. Allerdings berichten Studien [109], [110] über die Reduzierung der Flimmerverschmelzungsfrequenz durch die Ermüdung. Das zeitliche Auflösungsvermögen wird demnach geringer. Dies kann auch ein Grund dafür sein, dass der Stroboskopeffekt schlechter wahrgenommen wird. Die meisten Testpersonen aus BG2 nahmen am Versuch ab ca. 14 Uhr teil. Dies kann ihre leichte Müdigkeit erklären. Die Testpersonen aus BG1 wurden hingegen zur unterschiedlichsten Uhrzeiten getestet. Die Testpersonen der Gruppen BG1 und BG2 sind jedoch in verschiedenen Empfindlichkeitsgruppen vertreten (vgl. Tabelle 7.21). Demnach wird das Wahrnehmen des Stroboskopeffekts von Person zu Person unterschiedlich nach ihrer Befindlichkeit beeinflusst.

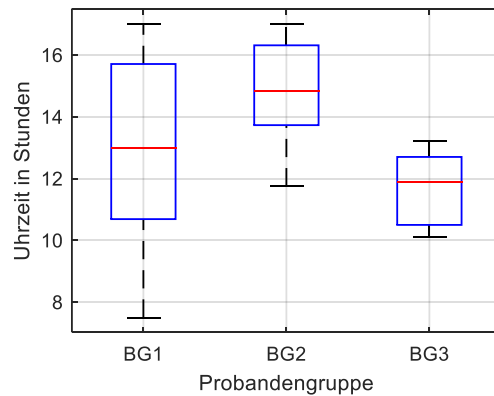


Abbildung 7.21: Versuchszeiten der Befindlichkeitsgruppen

#### 7.1.4.7 Einfluss der Versuchsuhrzeit

Die Versuche fanden zwischen 7 Uhr und 17 Uhr statt. Der Vergleich der Versuchsuhzeiten der Empfindlichkeitsgruppen (vgl. Tabelle 7.21) zeigt Abbildung 7.22. Die meisten empfindlichen Testpersonen (G1) wurden am Nachmittag ab ca. 13 Uhr untersucht. Die Testpersonen aus G2 nahmen hingegen an der Untersuchung überwiegend am Vormittag bis 11 Uhr teil. Im Zeitraum zwischen 10 Uhr und 14 Uhr wurden die meisten unempfindlichen Personen getestet.

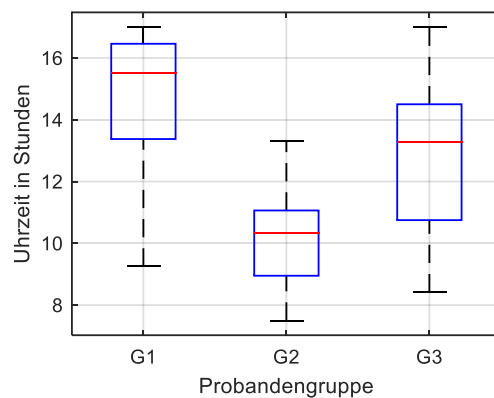


Abbildung 7.22: Versuchsuhzeiten der Empfindlichkeitsgruppen

Diese Ergebnisse deuten auf einen Einfluss der Tageszeit hin. Bei der mehrfach zu verschiedenen Uhrzeiten untersuchten Testperson (vgl. Abschnitt 7.1.4.1) wurde allerdings kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen festgestellt. Dennoch soll dieser Aspekt in weiterführenden Studien systematisch untersucht werden.

---

## 7.1.5 Diskussion der Ergebnisse

Das hier beschriebene Experiment hatte das Ziel, die Auffälligkeit des Stroboskopeffektes bei einer pulsweitenmodulierten LED-Beleuchtung in Abhängigkeit von Frequenz und Tastverhältnis zu untersuchen. Ein zusätzliches Ziel war es den Störungsgrad des Stroboskopeffektes zu ermitteln. Dies wurde in einer Untersuchung mit 38 Testpersonen erreicht. Zur Auswertung der Ergebnisse wurden verschiedene Methoden erarbeitet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die gewählte Bewertungsmethode basierend auf einer diskreten Skala mit 4 Werten eine relativ geringe intraindividuelle Streuung aufweist. Diese beträgt bei einer mehrfach getesteten Person ein Wert von 1. Wie erwartet, ist der Stroboskopeffekt bei Aufgaben mit schnellen Bewegungen auffälliger und störender als bei Aufgaben mit relativ langsamen Bewegungen wie zum Beispiel beim Schreiben oder Lesen. Für diese überdurchschnittlich empfindliche Testperson liegt die Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts bei 375 Hz (vgl. Tabelle 7.5). Diese Testperson empfindet den Stroboskopeffekt ab einer niedrigeren Frequenz von 263 Hz als nicht störend. Diese Gesetzmäßigkeit ist auch bei anderen Testpersonen festzustellen.

Betrachtet man die Ergebnisse aller Testpersonen, so stellt man fest, dass die Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts bei schnellen Aufgaben um 450 Hz liegt. Als nicht störend wird er im Durchschnitt ab 325 Hz empfunden (vgl. Tabelle 7.9).

In den Bewertungen zeigen sich jedoch von Person zu Person große Differenzen. So nehmen die jüngeren Testpersonen den Stroboskopeffekt schlechter wahr, als die älteren Testpersonen (vgl. Tabelle 7.14). Das kann jedoch daran liegen, dass die meisten jüngeren Testpersonen zwischen 10 Uhr und 14 Uhr am Versuch teilnahmen. Zu dieser Uhrzeit nahmen die meisten Testpersonen den Stroboskopeffekt schlecht wahr. In dieser Gruppe waren die Testpersonen, die laut des MDBF schlechter gelaunt waren bzw. die sich müde fühlten. Die meisten Testpersonen, die den Stroboskopeffekt gut wahrnehmen konnten, wurden hingegen nach 14 Uhr getestet (vgl. Abbildung 7.22). Obwohl in den Ergebnissen einer einzelnen Testperson, die im Verlauf eines Tages fünfmal getestet wurde, keine Abhängigkeit von der Uhrzeit zu verzeichnen ist, sollte dieser Aspekt in weiterführenden Arbeiten systematisch untersucht werden.

Des Weiteren unterscheiden sich die Ergebnisse der männlichen und weiblichen Testpersonen signifikant. Dabei sind die männlichen Testpersonen in der Lage den Stroboskopeffekt bei höheren PWM-Frequenzen wahrzunehmen, als die weiblichen Testpersonen (vgl. Tabelle 7.20). In den beiden Geschlechtsgruppen sind jedoch große interpersonelle Unterschiede zu verzeichnen.

Die Ergebnisse zeigen, dass rund 29 % aller Testpersonen den Stroboskopeffekt gut wahrnehmen können. Diese Testpersonen sind aus unterschiedlichen Altersgruppen. Dabei ist der Anteil der weiblichen und männlichen Personen praktisch identisch (vgl. Tabelle 7.22). Die Grenzfrequenz beträgt bei schnellen Aufgaben 709 Hz. Dabei liegt die Grenzfrequenz für den Störungsgrad des Stroboskopeffekts bei 634 Hz. Diese Grenzfrequenzen gelten für sehr kleine Tastverhältnisse. Für eine Arbeitsplatzbeleuchtung geltende Vorschriften sehen eine Beleuchtungsstärke auf der Arbeitsfläche von 500-1500 lx vor [111]. Bei einem Tastverhältnis von 1 % würde sich dabei eine Beleuchtungsstärke von 5-15 lx ergeben, was sehr dunklen Lichtverhältnissen entspricht. Daher kommt dieser Fall in der Praxis wahrscheinlich nicht vor. Ein Tastverhältnis von 20 %, bei dem der Helligkeitseindruck ca.

---

50 % des Helligkeitseindrucks bei einem Tastverhältnis von 100 % entspricht, ist hingegen wahrscheinlicher. Bei diesem Tastverhältnis konnten die empfindlichen Testpersonen den Stroboskopereffekt in der Untersuchung bei 400 Hz gut wahrnehmen. Demnach ist eine PWM-Frequenz um 550 Hz ein guter Kompromiss für die Bürobeleuchtung. Sind kleine Tastverhältnisse erforderlich, ist eine PWM-Frequenz um 700 Hz zu wählen.

Die Geschwindigkeit der untersuchten Handbewegungen lag im Bereich 3-5 m/s. Bei schnelleren Objektbewegungen, zum Beispiel von einem Rotor, ist eine höhere PWM-Frequenz erforderlich, um den Stroboskopereffekt zu vermeiden.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass bei typischen Bürotätigkeiten und Lichtverhältnissen eine PWM-gedimmte Beleuchtung mit einer Frequenz von ca. 550 Hz keine stroboskopischen Effekte verursacht.

---

## 7.2 Untersuchung mit phasenverschobener PWM

---

Die Ergebnisse der Untersuchung in Abschnitt 7.1 zeigen eine deutliche Reduzierung des Stroboskopereffekts durch die Erhöhung der PWM-Frequenz. Dabei waren alle LEDs mit demselben PWM-Signal angesteuert. Im Folgenden wird ein Versuch beschrieben, in dem das Prinzip der Phasenverschiebung der PWM-Signale (vgl. Kapitel 4) zum Einsatz kommt.

### 7.2.1 Ziele der Untersuchung

Die Erhöhung der PWM-Frequenz kann wegen der Beeinträchtigung der EMV unerwünscht sein. Da sich LED-Leuchten in der Regel aus mehreren LEDs zusammensetzen, kann die Erhöhung der Fluktationsfrequenz des resultierenden Lichtes dadurch erreicht werden, indem einzelne LEDs oder Gruppen von LEDs in der Leuchte mit phasenverschobenen PWM-Signalen angesteuert werden. Je nach der Anzahl der einzeln ansteuerbaren LED-Gruppen entsteht eine höhere Fluktationsfrequenz als die PWM-Frequenz (vgl. Kapitel 4). In diesem Versuch soll der Vorteil dieser Methode unter für die Bürobeleuchtung üblichen Lichtverhältnissen untersucht werden.

### 7.2.2 Versuchsaufbau

Dieser Versuch fand im gleichen Raum wie der Versuch in Abschnitt 7.1 statt. Wie bereits beschrieben, besteht eine LED-Leuchte aus 8 LEDs. Diese sind in 4 Gruppen je 2 LEDs verbunden. Um jede LED-Gruppe individuell ansteuern zu können, wurde die Stromversorgung und die Steuerelektronik weiterentwickelt. Im Gegensatz zum vorigen Versuch werden hierbei die PWM-Signale mithilfe eines FPGA erzeugt. Dieses ermöglicht eine präzise Phasenverschiebung, die einfacher zu realisieren ist als mithilfe eines Mikrocontrollers.

In diesem Versuch kommen 4 LED-Leuchten zum Einsatz. Abbildung 7.23 zeigt schematisch ihre Position in der Decke des Raumes. Die gelben Kreise symbolisieren die einzelnen LEDs und ihre Position in der Leuchte.

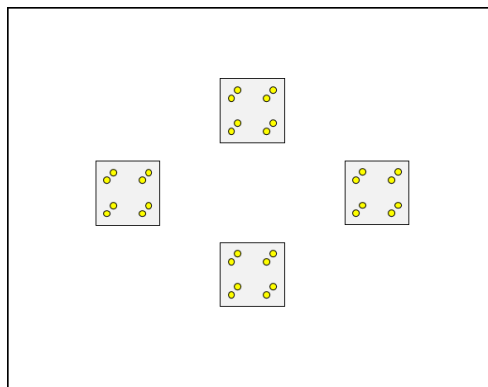


Abbildung 7.23: Position der LED-Leuchten in der Decke des Raumes

### 7.2.3 Methodik

Die Ergebnisse der Untersuchung in Abschnitt 7.1 zeigen, dass die Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts bei schnellen Bewegungen deutlich höher liegt als bei langsamen Bewegungen. Dabei ergeben sich bei den untersuchten Aufgaben mit schnellen Bewegungen ähnliche Grenzfrequenzen. Da ein schnelles Handbewegen leicht auszuführen ist, wird die Testperson den Stroboskopeffekt bei dieser Bewegung und verschiedenen Lichteinstellungen beurteilen. Dabei hat die Testperson nur zu berichten, ob sie den Stroboskopeffekt bei der jeweiligen Einstellung wahrnehmen kann oder nicht. Da sich jede Lichteinstellung dreimal wiederholt, wird bei der anschließenden Analyse die Wahrnehmungsrate betrachtet.

Die Testperson sitzt während der Untersuchung an einem Schreibtisch, der mittig im Raum aufgestellt ist. Die maximalen Ströme einzelner LED-Gruppen sind so eingestellt, dass die Beleuchtungsstärke auf der Tischoberfläche bei einem Tastverhältnis von 100 % bei einzelnen LED-Gruppen gleich ist und in der Summe 1000 lx ergibt. Diese Beleuchtungsstärke schreibt die DIN 12464-1 für feine Arbeiten sowie für Qualitäts- und Farbkontrollen vor [111].

Untersucht werden vier Dimmstufen von 1, 5, 10 und 20 %. Jede Dimmstufe wird einmal mittels PWM und einmal mittels CCR erzeugt. Dabei ändert sich der maximale Strom bei PWM-Einstellungen nicht. Somit entstehen bei verschiedenen Dimmstufen verschiedene Helligkeitseindrücke: Je dunkler ist die Lichteinstellung, umso kleiner ist das Tastverhältnis, umso besser kann der Stroboskopeffekt bei kleinen Fluktationsfrequenzen wahrgenommen werden. Um zu vermeiden, dass die Testpersonen diese Gesetzmäßigkeit während des Versuchs bemerken und nach dem Helligkeitseindruck beurteilen, dienen CCR-Einstellungen mit den gleichen Dimmstufen.

Es werden vier PWM-Modi getestet. Der erste Modus stellt den Fall dar, dass alle Leuchten und alle ihre LED-Gruppen mit dem gleichen PWM-Signal angesteuert werden. Dabei entspricht die Fluktationsfrequenz des Lichtes der PWM-Frequenz.

Im zweiten Modus werden die vier LED-Gruppen einer Leuchte mit phasenverschobenen PWM-Signalen angesteuert. Die Phasenverschiebung beträgt ein Viertel der Periode des PWM-Signals. Die einzelnen Leuchten werden jedoch untereinander synchron angesteuert. Somit ist die Fluktationsfrequenz des Lichtes um Faktor vier höher als die PWM-Frequenz. Abbildung 7.24 zeigt die sich dabei

ergebenden zeitlichen Verläufe der relativen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Tastverhältnisses. Durch die Phasenverschiebung beträgt die maximale Beleuchtungsstärke nur ein Viertel der maximalen Beleuchtungsstärke, die sich im Modus 1 ergibt. Da sich die Pulsdauer der LEDs durch die Verschiebung nicht ändert, ergibt sich im Vergleich zum PWM-Signal ein vierfaches Tastverhältnis. Dadurch, dass die einzelnen LED-Gruppen gleiche Beleuchtungsstärke erzeugen, ergeben sich bei der Phasenverschiebung Fluktuationen gleicher Amplituden (vgl. Kapitel 4).

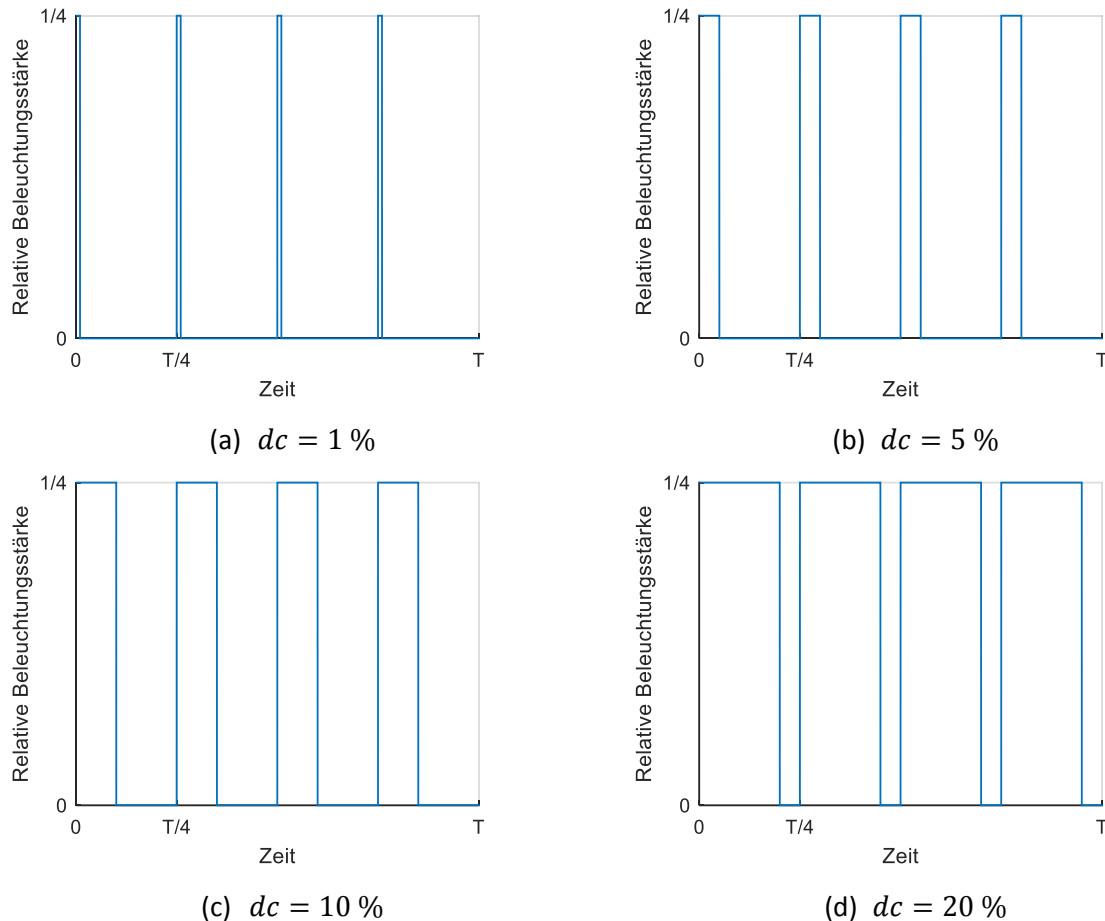
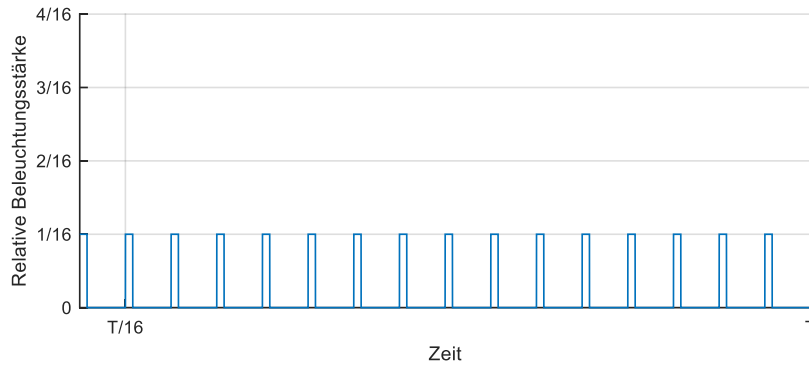


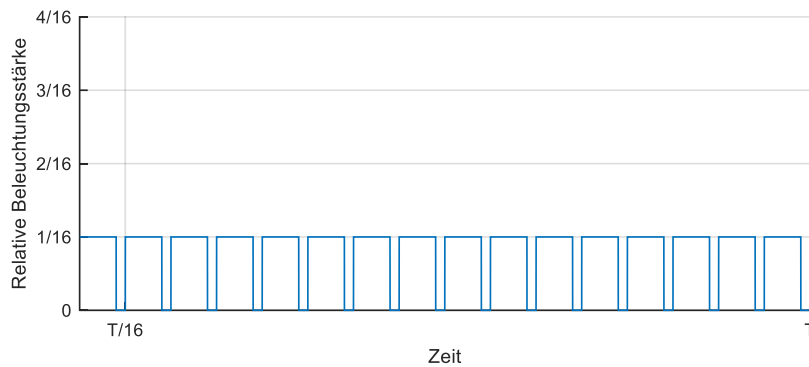
Abbildung 7.24: Zeitliche Verläufe der relativen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Tastverhältnisses für Modus 2

Die jeweils vier LED-Gruppen in vier Leuchten können individuell gedimmt werden. Somit entstehen 16 LED-Gruppen. Durch eine Phasenverschiebung um  $1/16$  der PWM-Periode ergibt sich für das gesamte Licht eine Fluktuationsfrequenz, die um Faktor 16 höher ist als die PWM-Frequenz. Dies ist der dritte untersuchte Modus.

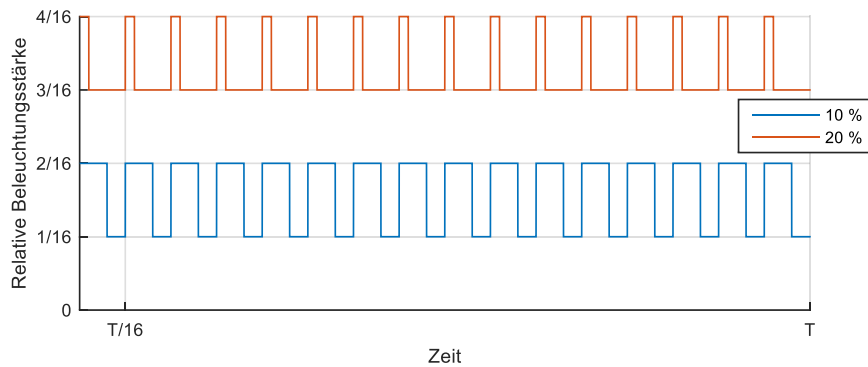
Die resultierenden zeitlichen Verläufe der Beleuchtungsstärke sind in Abbildung 7.25 dargestellt. Zu den bereits erwähnten Änderungen, die durch die Phasenverschiebung entstehen, ist bei Tastverhältnissen von 10% und 20% im zeitlichen Verlauf eine Konstantkomponente zu erkennen. Dadurch wird die Modulationstiefe geringer. Dies trägt auch zur Reduktion des Stroboskopeffekts bei.



(a)  $dc = 1\%$



(b)  $dc = 5\%$



(c)  $dc = 10\%$  und  $dc = 20\%$

Abbildung 7.25: Zeitliche Verläufe der relativen Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Tastverhältnisses für Modus 3

Unter Modus 4 werden die CCR-Einstellungen verstanden. Tabelle 7.24 gibt einen Überblick über die untersuchten Modi. Dabei steht  $\varphi$  für die Phasenverschiebung und  $f_{\text{Licht}}$  für die Fluktationsfrequenz des resultierenden Lichtes. Die PWM-Frequenz wird in diesem Versuch nicht variiert und beträgt bei allen Einstellungen 100 Hz.



Tabelle 7.24: Untersuchte Modi

Modus	Gruppenanzahl	$\varphi$	$f_{\text{Licht}}$
1	1	0	$f_{\text{PWM}}$
2	4	$T_{\text{PWM}}/4$	$4 \cdot f_{\text{PWM}}$
3	16	$T_{\text{PWM}}/16$	$16 \cdot f_{\text{PWM}}$
4	1	0	0

Vor dem Versuchsbeginn erläutert der Testleiter den Versuch und den Stroboskopeffekt bei verschiedenen Tastverhältnissen und bei Frequenzen von 100 Hz und 400 Hz. Dabei werden alle LED-Gruppen mit demselben PWM-Signal angesteuert (Modus 1). Bei entsprechenden Konstantstromereinstellungen wird der Unterschied zu zeitlich konstantem Licht verdeutlicht.

## 7.2.4 Ergebnisse

An dieser Untersuchung nahmen 13 männliche Testpersonen teil. Ihr Durchschnittsalter lag bei 26 Jahren mit einer Streuung von 4,6 Jahren. Der jüngste Proband war im Alter von 21 Jahren. Der älteste Proband war 37 Jahre alt. 4 Testpersonen nahmen vorher am Versuch in Abschnitt 7.1 teil und gehörten zu den empfindlichen Testpersonen (Gruppe G1, vgl. Tabelle 7.21).

Die aus drei Wiederholungen ermittelten Wahrnehmungsraten sind für die untersuchten Bedingungen in Form von Boxplots in Abbildung 7.26 dargestellt. Bei Konstantstromereinstellungen (Modus 4) kann der Stroboskopeffekt nicht entstehen. Demnach wird die Wahrnehmungsrate hierbei als Fehlerrate verstanden. In diesem Fall verwechseln die Testpersonen den Stroboskopeffekt mit dem Unschärfeeffekt, der bei schnellen Bewegungen unter zeitlich konstantem Licht entsteht.

Bei vielen Testbedingungen entstehen zwischen den Ergebnissen der meisten Probanden keine Unterschiede. Der Median und die beiden Quartile besitzen dabei den gleichen Wert, so dass der Boxplot zu einem horizontalen Strich wird.

3 Testpersonen im Alter unter 26 Jahren weisen große Abweichungen zu den anderen Testpersonen auf. Bei Tastverhältnissen von 1 % und 10 % ist die Fehlerrate bei diesen Testpersonen sogar größer 50 %. Allerdings findet sich keine Gesetzmäßigkeit in ihren Antworten. Deshalb wird bei diesen Personen davon ausgegangen, dass sie den Stroboskopeffekt vom Unschärfeeffekt nicht unterscheiden können. Die durch die roten Kreuze dargestellten Ausreißer entstehen aus den Ergebnissen dieser Testpersonen.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Testpersonen für die normale PWM (Modus 1) und für den Modus mit 4 LED-Gruppen (Modus 2,  $f_{\text{Licht}} = 4f_{\text{PWM}} = 400 \text{ Hz}$ ) in der Lage sind, den Stroboskopeffekt mit einer Wahrnehmungsrate von über 50 % gut wahrzunehmen. Dabei erhöht sich durch die Phasenverschiebung in Modus 2 neben der Frequenz auch das Tastverhältnis um Faktor 4. Somit beträgt er 80 % bei einem PWM-Tastverhältnis von 20 % (vgl. Abbildung 7.24). Dennoch können die meisten Testpersonen bei dieser Testbedingung den Stroboskopeffekt wahrnehmen.

Ist die Wahrnehmungsrate unter 50 %, so kann der Stroboskopeffekt schlecht bis gar nicht wahrgenommen werden. Das ist der Fall für die Phasenverschiebung mit 16 LED-Gruppen (Modus 3) und

für die Konstantstromereinstellungen (Modus 4) bei allen getesteten Tastverhältnissen. In Modus 3 beträgt die Fluktationsfrequenz des resultierenden Lichtes durch die Phasenverschiebung 1600 Hz. Da die Testpersonen den Stroboskopeffekt auch bei einem kleinen Tastverhältnis von 1 % nicht wahrnehmen konnten, liegt die Grenzfrequenz unterhalb von 1600 Hz. Dies bestätigt die Ergebnisse aus Abschnitt 7.1.

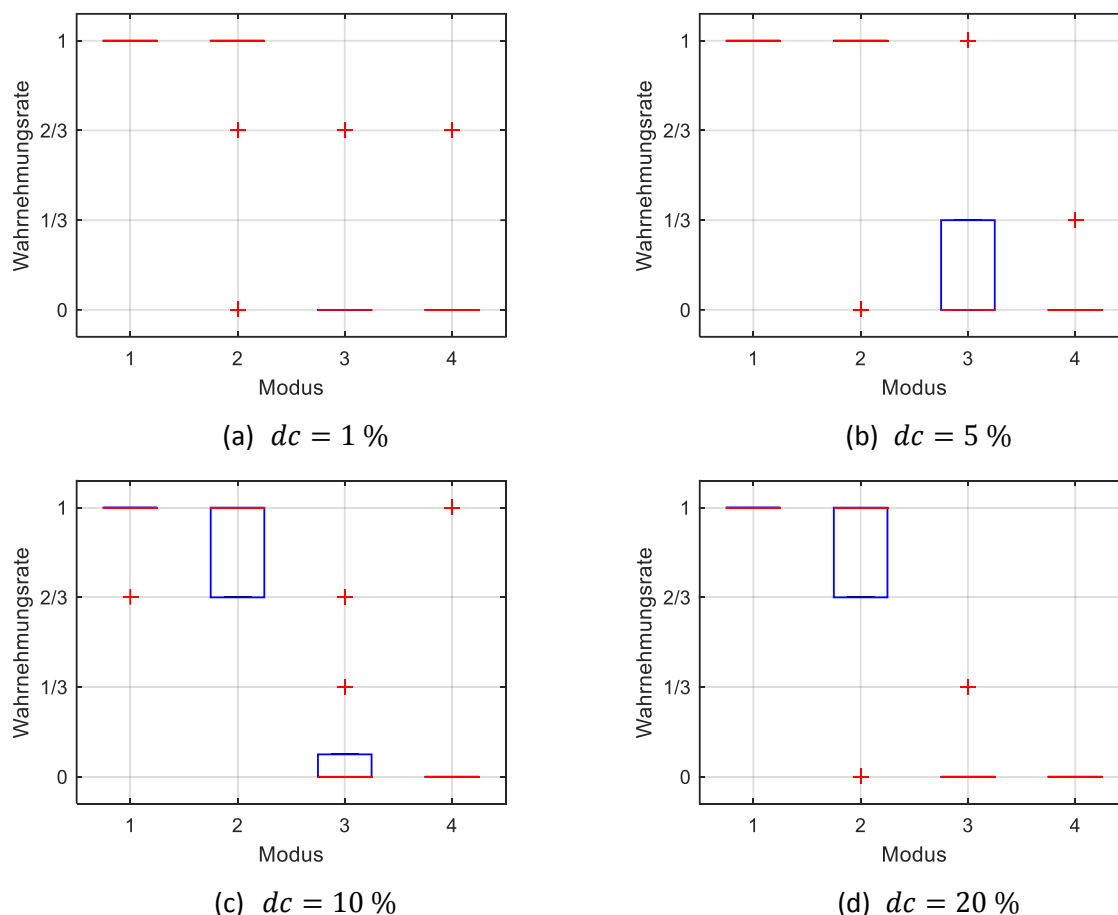


Abbildung 7.26: Boxplots der Wahrnehmungsrates bei den verschiedenen Modi und Tastverhältnissen

## 7.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Basierend auf der durchgeführten Analyse der Ergebnisse lassen sich folgende Erkenntnisse zusammenfassend formulieren.

Die Testpersonen sind in der Lage den Stroboskopeffekt bei einer Fluktationsfrequenz von 400 Hz gut wahrzunehmen. Durch die Phasenverschiebung der PWM-Signale von 16 LED-Gruppen ist sogar eine vom Stroboskopeffekt freie Bürobeleuchtung bei einer PWM-Frequenz von 100 Hz möglich. Für kleine Tastverhältnisse wurde in Abschnitt 7.1 eine Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts von ca. 700 Hz ermittelt. Demnach würden 7 individuell angesteuerten LED-Gruppen bei einer PWM-Frequenz von 100 Hz ausreichen, um den Stroboskopeffekt zu vermeiden. Da es für den Bereich gilt, in dem sich die einzelnen Lichtstärkeverteilungen überlappen, soll die PWM-Frequenz nicht allzu gering gewählt werden. Auch für den Fall, dass eine LED-Gruppe ausfällt, ist eine hohe PWM-Frequenz

---

von Vorteil. Zudem sind dabei nur wenige LED-Gruppen notwendig, die individuell angesteuert werden. Dies reduziert den Aufwand zur Signalgenerierung und Phasenverschiebung.

---

### 7.3 Fazit

---

Die in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen klären mehrere Fragestellungen in Bezug auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts, der durch die PWM-Dimmung einer LED-Bürobeleuchtung verursacht werden kann.

In der ersten Untersuchung in Abschnitt 7.1 wird der Stroboskopeffekt unter den für die Bürobeleuchtung relevanten Bedingungen ermittelt. Dabei werden unterschiedliche Lichtbedingungen und Tätigkeiten untersucht, die in einem Büroumfeld häufig vorkommen.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts von Person zu Person stark unterscheidet. Als Einflussfaktoren sind das Alter, das Geschlecht und die aktuelle Befindlichkeit der Testperson sowie die Tageszeit der Untersuchung auszumachen. Bei technischen Parametern spielt die PWM-Frequenz eine entscheidende Rolle in der Entstehung des Stroboskopeffekts. Aber auch die Art der Tätigkeit bzw. die dabei entstehenden Geschwindigkeiten von Objekten besitzen einen großen Einfluss auf den Stroboskopeffekt. Im Vergleich zu den anderen Studien zu diesem Thema, deren Testbedingungen nur schwer auf die Praxis übertragbar sind [80–82], ergibt sich in dieser Untersuchung unter den anwendungsrelevanten Bedingungen eine niedrigere Grenzfrequenz des Stroboskopeffekts. Im Extremfall liegt sie für sehr kleine Tastverhältnisse bei ca. 700 Hz. Die meisten Bürobeleuchtungen werden in der Regel nicht stark gedimmt. Deshalb ist die Frequenz von 550 Hz ein guter Richtwert für die PWM-Frequenz, um das Entstehen des Stroboskopeffekts zu vermeiden.

Im zweiten Experiment in Abschnitt 7.2 wird der Einfluss des PWM-Signals auf den Stroboskopeffekt untersucht. Dabei werden mehrere LED-Gruppen in einer Büroleuchte mit individuellen PWM-Signalen angesteuert, die zueinander zeitlich verschoben sind.

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Gewinn durch die Phasenverschiebung: Die resultierende Erhöhung der Fluktationsfrequenz des gesamten Lichts verhindert die Entstehung des Stroboskopeffekts, ohne dabei die PWM-Frequenz zu erhöhen. Somit kann in der Bürobeleuchtung die übliche PWM-Frequenz von 200 Hz weiterhin verwendet werden. Um auf eine unkritische Fluktationsfrequenz von 500-700 Hz zu gelangen, sind dabei 3-4 individuell ansteuerbare LED-Gruppen nötig. Zudem sollen sich ihre Lichtstärkeverteilungen möglichst komplett überdecken. Da Büroleuchten in der Regel aus mehreren LEDs bestehen, sollte dies kein Problem darstellen. Die zeitliche Verschiebung der PWM-Signale ist mit einem Mikrocontroller oder integriertem Schaltkreis realisierbar.

---

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beantwortet mehrere Fragestellungen in Bezug auf die Wahrnehmung von Flimmereffekten, die durch die PWM-Dimmung einer LED-Beleuchtung entstehen können. Der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Einsatz in der Büro- und Kfz-Beleuchtung.

Nach ausführlicher Literaturrecherche zu dieser Thematik wird deutlich, dass vor allem stroboskopische Effekte nicht hinreichend erforscht sind (vgl. Kapitel 3). Zudem liegen keine Studien über Flimmereffekte bei PWM-gedimmter Frontbeleuchtung im Automobil vor. Aus diesem Grund werden mehrere Probandenstudien konzipiert und durchgeführt. Zusätzlich wird ein Verfahren zur Reduzierung von Flimmereffekten erarbeitet. Dabei werden die einzelnen LED-Gruppen einer Beleuchtung mit PWM-Signalen angesteuert, die zwar die gleiche Frequenz aufweisen aber zeitlich zueinander verschoben sind. In den Bereichen, in denen sich die Lichtstärkeverteilungen der einzelnen LED-Gruppen überlappen, entstehen Lichtfluktuationen, deren Frequenz höher ist, als die PWM-Frequenz (vgl. Kapitel 4). Dieses Verfahren wird in mehreren Probandenstudien evaluiert.

Die Laboruntersuchungen in Kapitel 5 beschäftigen sich hauptsächlich mit direkt wahrnehmbarem Flimmern und dem Perlschnureffekt, die in der Kfz-Beleuchtung durch die PWM-Dimmung entstehen können. Die Ergebnisse zeigen, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter praxisnahen Bedingungen 40 Hz beträgt. Die übliche PWM-Frequenz in Kfz-Frontbeleuchtung liegt mit 200 Hz deutlich über dieser Frequenz. Demnach wird die PWM-Dimmung kein direkt wahrnehmbares Flimmern im Straßenverkehr verursachen.

Die Ergebnisse zum Perlschnureffekt zeigen, dass die übliche PWM-Frequenz von 200 Hz für die Kfz-Innenraumbeleuchtung nicht ausreichend ist, was dadurch die Ergebnisse der Fahrversuche bestätigt. Diese geben Hinweise darauf, dass der Perlschnureffekt das Ablesen der Geschwindigkeit am Tachometer, dessen Hintergrundbeleuchtung mit PWM bei 200 Hz gedimmt ist, beeinträchtigt. Den gleichen Effekt konnte am Head-up-Display von zwei Serienfahrzeugen beobachten. Für den Straßenverkehr ist dieser von sicherheitsrelevanter Bedeutung und sollte in weiterführenden Arbeiten untersucht werden. Da die Hintergrundbeleuchtung in der Regel aus mehreren LEDs besteht, kann zur Lösung dieses Problems das erarbeitete Verfahren aus Kapitel 4 herangezogen werden.

Aus den Laboruntersuchungen geht hervor, dass die Fernlicht-Dimmung eines LED-Frontscheinwerfers auf 40-60% dazu führt, dass Verkehrsschilder hell und zugleich nicht blendend wahrgenommen werden. Für diese Tastverhältnisse liegt die Grenzfrequenz des Perlschnureffekts unterhalb von 400 Hz. Bei zwei LED-Gruppen ergibt sich durch die Phasenverschiebung der PWM-Signale eine Grenzfrequenz unterhalb von 200 Hz.

In den Fahrversuchen in Kapitel 6 werden Flimmereffekte durch die PWM-gedimmte Kfz-Beleuchtung im realen Straßenverkehr untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Erkenntnisse, die unter Laborbedingungen gewonnen werden, gut auf die Praxis übertragen lassen. Die absoluten Grenzfrequenzen aus den Laboruntersuchungen liegen zwar etwas höher als die aus den Fahrversuchen. Die Laboruntersuchungen erfordern jedoch einen deutlich geringeren Aufwand und liefern zugleich eine gute Schätzung der Grenzfrequenz für den Extremfall.

Aus den Fahrversuchen im realen Straßenverkehr geht hervor, dass der Perlschnureffekt bei einem gewöhnlichen Blickverhalten sogar bei PWM-Frequenzen von 100 und 200 Hz nicht wahrgenommen

---

wird. Beim gezielten Provozieren durch schnelle Augenbewegungen liegt die Grenzfrequenz für kleine Tastverhältnisse in den gleichen Verkehrssituationen bei 460 Hz. Die Testpersonen empfinden das erforderliche Blickverhalten jedoch als anstrengend und deutlich abweichend von ihrem normalen Blickverhalten beim Autofahren. Schnelle Augenbewegungen werden insbesondere in komplexen Verkehrssituationen häufiger [97]. Dabei wäre eine zusätzliche Beeinträchtigung durch den Perlschnureffekt unerwünscht. Um diese zu vermeiden, sollte die PWM-Frequenz für die Frontbeleuchtung 400 Hz betragen, die sich durch die Phasenverschiebung zusätzlich reduzieren lässt. In den Fahrversuchen entsteht bei zwei LED-Gruppen und bei einer PWM-Frequenz von 200 Hz kein Perlschnureffekt.

In den Probandenstudien in Kapitel 7 wird der Stroboskopeffekt unter verschiedenen Lichtbedingungen und Tätigkeiten untersucht, die in einem Büroräumfeld häufig vorkommen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Stroboskopeffekt bei PWM-Frequenzen bis ca. 700 Hz wahrgenommen und unter den getesteten Bedingungen bis ca. 600 Hz als störend empfunden werden kann. Für die Praxis ist eine PWM-Frequenz von 550 Hz zu empfehlen. Als weitere Einflussfaktoren zeigten sich das Alter, das Geschlecht und die aktuelle Befindlichkeit der Testperson sowie die Tageszeit. Durch die Phasenverschiebung der PWM-Signale, deren Frequenz 100 Hz beträgt, ist bei einer Anzahl von 16 individuell ansteuerbaren LED-Gruppen kein Stroboskopeffekt mehr wahrzunehmen.

Das vorgestellte Verfahren der Phasenverschiebung der PWM wirkt in verschiedenen Anwendungen dem Entstehen von Flimmereffekten entgegen. Da LED-Leuchten in der Regel aus mehreren LEDs bestehen, kann dieses Verfahren im Entwicklungsprozess der Leuchte berücksichtigt werden.

Es bedarf weiterer Forschung um die Langzeitfolgen von moduliertem Licht aufzuklären. Weiterhin liegen keine wissenschaftlichen Studien vor, die den Einfluss vom Stroboskopeffekt bzw. vom Perlschnureffekt auf die Gesundheit des Beobachters tiefgreifend untersucht haben. Da auch oberhalb der FVF durch moduliertes Licht Prozesse ausgelöst werden (vgl. Abschnitt 3.1), reicht der reine Fokus auf die Untersuchung der wahrgenommenen Lichtqualität nicht aus. Die Kombination subjektiver Bewertungen mit objektiven Messverfahren könnte dem entgegenwirken. Das EEG kann in diesem Zusammenhang für die Messung der Reaktion des visuellen Systems herangezogen werden. Da der Perlschnureffekt durch schnelle Augenbewegungen entsteht, wäre ein Blickerfassungssystem bei seiner Untersuchung sinnvoll. Derartige Messverfahren haben in den letzten Jahren eine große Weiterentwicklung erfahren und ermöglichen heute präzise Ergebnisse.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit mit gesunden Menschen durchgeführt wurden. Einige Menschen reagieren jedoch besonders empfindlich auf moduliertes Licht. Daher ist anzunehmen, dass ein gewisser Bevölkerungsanteil den Perlschnureffekt außergewöhnlich stark wahrnimmt. Daher sollten zukünftige Untersuchungen verstärkt der Frage nachgehen, mit welchen gesundheitlichen Risiken PWM-gedimmte LED-Beleuchtung einhergeht und dabei insbesondere prüfen, welche Modulationsfrequenzen im Betrieb als unbedenklich und sicher angesehen werden können

---

## Literaturverzeichnis

- [1] T. Baumgartner, F. Wunderlich, D. Wee, und A. Jaunich, "Lighting the way: Perspectives on the global lighting market," McKinsey & Company, Inc., Marktstudie, Aug. 2012.
- [2] T. Inaba, S. Watanabe, und Y. Yamada, "LED headlamp development for mass production," SAE Technical Paper, 2008.
- [3] M. Hamm, "Innovative Lichtquellen für Fahrzeuge," *Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 113, no. 1, 2010.
- [4] J. Moisel, R. Ackermann, und M. Griesinger, "Adaptive Headlights Utilizing LED Arrays," in *Proceedings of the International Symposium on Automotive Lighting*, 2009, pp. 287–296.
- [5] S. Berlitz, M. Hamm, und C. Funk, "Matrix-LED-Scheinwerfer von Audi," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 116, no. 3, 2014.
- [6] I. N. Kämpchen, M. Aeberhard, M. Ardel, und S. Rauch, "Techniken für das hochautomatisierte Fahren auf der Autobahn," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 114, no. 6, pp. 498–503, 2012.
- [7] P. Amiraslanow, S. Bogdanow, B. Kleinert, und M. Marutzky, "Wahrnehmung und Bewertung innovativer Innenraumbeleuchtung," *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, vol. 115, no. 9, pp. 666–671, 2013.
- [8] R. Wagner, "LED-Treiber für das Armaturenbrett," *ATZ - Elektronik*, vol. 9, no. 7, pp. 20–23, 2014.
- [9] W. Pepler, C. Schiller, und T. Q. Khanh, "Kommunen in neuem Licht - Praxiserfahrungen zur LED in der kommunalen Beleuchtung," *Projektbericht*. Siebel Druck und Grafik, 2013.
- [10] H. Zeilinger, T. Novak, und W. Wimmer, "Energieevaluierung einer adaptiven LED Straßenbeleuchtung," *Beitrag in der 9. Interantionalen Energiewirtschaftstagung*, 2015.
- [11] D. Sülflow, "Zur Wirkung von kurzweiligem Licht auf Befindlichkeit und Melatoninsynthese bei gesunden Probanden in den Abendstunden unter Berücksichtigung des Chronotypus und des Geschlechtes," *Dissertation*, Freie Universität Berlin, Germany, 2013.
- [12] J. Just, A. Müller, U. Fischer-Hirchert, und C. Reinboth, "Ausgewählte technische Aspekte bei der Entwicklung von LED-Außenbeleuchtung," in *Tagungsband der 11. Nachwuchswissenschaftlerkaonferenz*, S. 339-342, Schmalkalden, 2010.
- [13] H.-G. Schaible und R. F. Schmidt, *Neuro-und Sinnesphysiologie*. Springer Medizin Verlag Heidelberg, 2006.
- [14] W. Clauss und C. Clauss, *Humanbiologie kompakt*. Springer-Verlag, 2009.
- [15] "Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Benennung der Wellenlängenbereiche," no. DIN 5031–7. 1984.

- 
- [16] L. Udovici, F. Mainusch, M. Janßen, D. Nowack, und G. Ott, "Photobiologische Sicherheit von Licht emittierenden Dioden (LED)," *Fachbeitrag*, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitssicherheit, Dortmund, 2013.
- [17] U. Eysel, "Signalaufnahme und Verarbeitung in der Netzhaut," *Der Ophthalmologe*, vol. 104, no. 1, pp. 79–92, 2007.
- [18] Wikipedia, "Sichtbares Licht," URL: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic\\_spectrum\\_c.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electromagnetic_spectrum_c.svg) [Stand: 17.032015].
- [19] F. Lang und P. Lang, *Basiswissen Physiologie*. Springer-Verlag, 2007.
- [20] A. Stockman und L. T. Sharpe, "The spectral sensitivities of the middle-and long-wavelength-sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype," *Vision research*, vol. 40, no. 13, pp. 1711–1737, 2000.
- [21] A. Stockman, L. T. Sharpe, und C. Fach, "The spectral sensitivity of the human short-wavelength sensitive cones derived from thresholds and color matches," *Vision research*, vol. 39, no. 17, pp. 2901–2927, 1999.
- [22] J. E. Dowling, "The site of visual adaptation," *Science*, vol. 155, no. 3760, pp. 273–279, 1967.
- [23] D. Cao und J. Pokorny, "Rod and cone contrast gains derived from reaction time distribution modeling," *Journal of vision*, vol. 10, no. 2, p. 11, 2010.
- [24] A. J. Zele, M. L. Maynard und B. Feigl, "Rod and cone pathway signaling and interaction under mesopic illumination," *Journal of vision*, vol. 13, no. 1, p. 21, 2013.
- [25] R. E. Marc und H. G. Sperling, "Chromatic organization of primate cones," *Science*, vol. 196, no. 4288, pp. 454–456, 1977.
- [26] H. Hofer, J. Carroll, J. Neitz, M. Neitz und D. R. Williams, "Organization of the human trichromatic cone mosaic," *The Journal of Neuroscience*, vol. 25, no. 42, pp. 9669–9679, 2005.
- [27] P. K. Ahnelt, H. Kolb und R. Pflug, "Identification of a subtype of cone photoreceptor, likely to be blue sensitive, in the human retina," *Journal of Comparative Neurology*, vol. 255, no. 1, pp. 18–34, 1987.
- [28] L. Meylan, D. Alleysson und S. Süsstrunk, "Model of retinal local adaptation for the tone mapping of color filter array images," *JOSA A*, vol. 24, no. 9, pp. 2807–2816, 2007.
- [29] Wikipedia, "Aufbau der Retina," URL: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retina\\_layers.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retina_layers.svg) [Stand: 17.032015].
- [30] G. D. Valderrama-Gonzalez, T. M. McGinnity, L. Maguire und Q. Wu, "Review of Neuron Types in the Retina: Information Models for Neuroengineering," in *Artificial Neural Networks–ICANN 2009*, Springer, 2009, pp. 335–344.
- [31] W. A. Müller und S. Frings, *Tier- und humanphysiologie: Eine einföhrung*. Springer-Verlag, 2009.



- 
- [32] S. Frings und F. Müller, *Biologie der Sinne: Vom Molekül zur Wahrnehmung*. Springer-Verlag, 2014.
- [33] J. E. Raymond, K. L. Shapiro, und K. M. Arnell, "Temporary suppression of visual processing in an RSVP task: An attentional blink?," *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, vol. 18, no. 3, p. 849, 1992.
- [34] P. Bittencourt, P. Wade, A. Smith, und A. Richens, "The relationship between peak velocity of saccadic eye movements and serum benzodiazepine concentration.," *British journal of clinical pharmacology*, vol. 12, no. 4, pp. 523–533, 1981.
- [35] S. Brückner, T. Q. Khanh, "Dimming von Hochleistungs-LEDs," *Licht*, pp. 44–49, 2011.
- [36] E. F. Schubert, T. Gessmann, und J. K. Kim, *Light emitting diodes*. Wiley Online Library, 2005.
- [37] "Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik; Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik," no. DIN 5031–3. 1982.
- [38] K. Bieske und C. Vandahl, "Welche Farbunterschiede kann der Mensch wahrnehmen?," in *Tagungsband Farbinfo*, 2007
- [39] *Richtlinie 2014/30/EU zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit*. Europäisches Parlament, 2014.
- [40] P. R. Boyce, *Human factors in lighting*. Crc Press, 2014.
- [41] D. H. Kelly, "Visual Responses to Time-Dependent Stimuli. II. Single-Chanel Model of the Photopic Visual System," *Journal of the Optical Society of America*, pp. 747–754, Jul. 1961.
- [42] C. W. Tyler und R. D. Hamer, "Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry-Porter law," *JOSA A*, vol. 7, no. 4, pp. 743–758, 1990.
- [43] D. Kelly, "Visual responses to time-dependent stimuli. II. Single-channel model of the photopic visual system," *JOSA*, vol. 51, no. 7, pp. 747–754, 1961.
- [44] A. Kaltenbach, "Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur Adaptiven Anpassung der Lichtsignale an Variable Sichtbedingungen," *Dissertation*, TU Ilmenau, 2009.
- [45] A. B. Watson, A. J. Ahumada Jr, J. E. Farrell, "Window of visibility: a psychophysical theory of fidelity in time-sampled visual motion displays," *JOSA A*, vol. 3, no. 3, pp. 300–307, 1986.
- [46] S. Strauß, "Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahr-zeugbeleuchtung," *Disseratation*, Universität Paderborn, 2007.
- [47] W. A. Hershberger und J. S. Jordan, "The phantom array: a perisaccadic illusion of visual direction," *The Psychological Record*, vol. 48, no. 1, p. 2, 2012.
- [48] S. Brückner und T. Q. Khanh, "A field experiment on the perception of automotive rear lights using pulsed LEDs with different frequencies," in *Proceedings of the 7 th Internat ional Symposium of Automotive Lighting, ISAL*, 2007.
-



- 
- [49] A. Wernicke und S. Strauß, „The analytical and experimental study of the effects of pulsewidth-modulated light sources on visual perception,” in *Proceedings of the 7th International Symposium on Automotive Lighting*, 2007, pp. 724–732.
- [50] J. Roberts und A. Wilkins, “Flicker can be perceived during saccades at frequencies in excess of 1 kHz,” *Lighting Research and Technology*, 2012.
- [51] R. VanRullen, “The continuous Wagon Wheel Illusion is object-based,” *Vision research*, vol. 46, no. 24, pp. 4091–4095, 2006.
- [52] C. Landis, *An Annotated Bibliography of Flicker Fusion Phenomena: Covering the Period 1740-1952*. Armed Forces-National Research Council, Vision Committee Secretariat, 1953.
- [53] E. S. Ferry, “Persistence of vision,” *American Journal of Science*, no. 261, pp. 192–207, 1892.
- [54] T. C. Porter, “Contributions to the study of flicker. Paper II,” *Proceedings of the Royal Society of London*, vol. 70, no. 459–466, pp. 313–329, 1902.
- [55] H. E. IvEs, “A theory of intermittent vision,” *JOSA*, vol. 6, no. 4, pp. 343–359, 1922.
- [56] H. De Lange Dzn, “Research into the dynamic nature of the human fovea→ cortex systems with intermittent and modulated light. I. Attenuation characteristics with white and colored light,” *JOSA*, vol. 48, no. 11, pp. 777–783, 1958.
- [57] D. Kelly, “Spatio-temporal frequency characteristics of color-vision mechanisms,” *JOSA*, vol. 64, no. 7, pp. 983–990, 1974.
- [58] D. Kelly, “Sine waves and flicker fusion,” *Documenta Ophthalmologica*, vol. 18, no. 1, pp. 16–35, 1964.
- [59] C. W. Tyler, “Analysis of visual modulation sensitivity. III. Meridional variations in peripheral flicker sensitivity,” *JOSA A*, vol. 4, no. 8, pp. 1612–1619, 1987.
- [60] S. H. Bartley und T. M. Nelson, “A further study of pulse-to-cycle fraction and critical flicker frequency. A decisive theoretical test,” *JOSA*, vol. 51, no. 1, pp. 41–45, 1961.
- [61] G. Brundrett, “Human sensitivity to flicker,” *Lighting Research and Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 127–143, 1974.
- [62] H. Misiak, “Age and sex differences in critical flicker frequency.,” *Journal of experimental psychology*, vol. 37, no. 4, p. 318, 1947.
- [63] D. Kelly, “Nonlinear visual responses to flickering sinusoidal gratings,” *JOSA*, vol. 71, no. 9, pp. 1051–1055, 1981.
- [64] A. Wilkins, C. Binnie, und C. Darby, “Visually-induced seizures,” *Progress in Neurobiology*, vol. 15, no. 2, pp. 85–117, 1980.
- [65] A. WILKINS, I. NIMMO-SMITH, A. TAIT, C. McMANUS, S. DELLA SALA, A. TILLEY, K. ARNOLD, M. BARRIE, und S. SCOTT, “A neurological basis for visual discomfort,” *Brain*, vol. 107, no. 4, pp. 989–1017, 1984.
-

- 
- [66] D. Purves, E. M. Brannon, R. Cabeza, S. A. Huettel, K. S. LaBar, M. L. Platt, and M. G. Woldorff, *Principles of cognitive neuroscience*, vol. 83, no. 3. Sinauer Associates Sunderland, MA, 2008.
- [67] E. L. Smith, "Effect of the visual environment on avian welfare.," *Disseration*, University of Bristol, 2003.
- [68] S. A. BURNS, A. E. ELSNER, and M. R. KREITZ, "Analysis of nonlinearities in the flicker ERG.," *Optometry & Vision Science*, vol. 69, no. 2, pp. 95–105, 1992.
- [69] L. Van der Tweel und H. V. Lunel, "Human visual responses to sinusoidally modulated light," *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 18, no. 6, pp. 587–598, 1965.
- [70] F. Fylan and G. Harding, "The Effect of Television Frame Rate on EEG Abnormalities in Photosensitive and Pattern-Sensitive Epilepsy," *Epilepsia*, vol. 38, no. 10, pp. 1124–1131, 1997.
- [71] F. L. Golla und A. Winter, "Analysis of cerebral responses to flicker in patients complaining of episodic headache," *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 11, no. 3, pp. 539–549, 1959.
- [72] M. Sandström, E. Lyskov, A. Berglund, S. Medvedev, and K. H. Mild, "Neurophysiological effects of flickering light in patients with perceived electrical hypersensitivity," *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, vol. 39, no. 1, pp. 15–22, 1997.
- [73] S. A. Stwertka, "The stroboscopic patterns as dissipative structures," *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, vol. 17, no. 1, pp. 69–78, 1993.
- [74] D. Kahneman und R. E. Wolman, "Stroboscope motion: Effects of duration and interval," *Perception & Psychophysics*, vol. 8, no. 3, pp. 161–164, 1970.
- [75] J. A. Veitch und S. L. McColl, "Modulation of fluorescent light: Flicker rate and light source effects on visual performance and visual comfort," *Lighting Research and technology*, vol. 27, no. 4, pp. 243–256, 1995.
- [76] A. Kennedy und W. S. Murray, "The effects of flicker on eye movement control," *The quarterly journal of experimental Psychology*, vol. 43, no. 1, pp. 79–99, 1991.
- [77] J. Hazell und A. J. Wilkins, "A contribution of fluorescent lighting to agoraphobia," *Psychological medicine*, vol. 20, no. 03, pp. 591–596, 1990.
- [78] A. Wilkins, C. Darby, C. Binnie, S. Stefansson, P. Jeavons, and G. Harding, "Television epilepsy—The role of pattern," *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, vol. 47, no. 2, pp. 163–171, 1979.
- [79] A. J. Wilkins und P. Wilkinson, "A tint to reduce eye-strain from fluorescent lighting? Preliminary observations," *Ophthalmic and Physiological Optics*, vol. 11, no. 2, pp. 172–175, 1991.
- [80] J. Bullough, K. S. Hickcox, T. Klein, and N. Narendran, "Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort," *Lighting Research and Technology*, vol. 43, no. 3, pp. 337–348, 2011.

- 
- [81] J. D. Bullough, K. S. Hickcox, T. Klein, A. Lok, und N. Narendran, "Detection and acceptability of stroboscopic effects from flicker," *Lighting Research and Technology*, 2011.
- [82] I. Vogels, S. Sekulovski, und M. Perz, "Visible artefacts of LEDs," in *27th Session of the CIE, Sun City, South Africa, 9-16 July 2011*, 2011.
- [83] S. Stevenson, F. Volkman, J. Kelly, und L. Riggs, "Dependence of visual suppression on the amplitudes of saccades and blinks," *Vision Research*, vol. 26, no. 11, pp. 1815–1824, 1986.
- [84] K. V. Thilo, L. Santoro, V. Walsh, und C. Blakemore, "The site of saccadic suppression," *Nature neuroscience*, vol. 7, no. 1, pp. 13–14, 2004.
- [85] D. Polin, "Physiologische Effekte bei PMW-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil," *Projektbericht*, FAT - Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Berlin, 2014.
- [86] D. Polin und T. Q. Khanh, "Flickering Effects of Vehicle Exterior Light Systems and Consequences," in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2013.
- [87] F. Kingdom und N. Prins, "Psychophysics: a practical introduction." Academic Press London, 2010.
- [88] H. Ichikawa, K. Hukami, S. Tanabe, und G. Kawakami, "Standard Pseudoisochromatic Plates.," *Clinical and Experimental Optometry*, vol. 62, p. 362, 1979.
- [89] A. Linksz, "The Farnsworth panel D-15 test," *American journal of ophthalmology*, vol. 62, no. 1, pp. 27–37, 1966.
- [90] P. Lanthony, "The desaturated panel D-15," *Documenta Ophthalmologica*, vol. 46, no. 1, pp. 185–189, 1978.
- [91] J. W. Tukey, "Exploratory data analysis," *Reading, Ma*, vol. 231, p. 32, 1977.
- [92] R. V. Hogg und J. Ledolter, *Engineering statistics*. Macmillan Pub Co, 1987.
- [93] The United Nations Economic Commission for Europe, "Regulation No. 48, Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the installation of lighting and light-signalling devices." 2013.
- [94] M. T. Thai und P. M. Pardalos, *Handbook of optimization in complex networks: theory and applications*, vol. 57. Springer Science & Business Media, 2011.
- [95] J. C. Bezdek, *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Kluwer Academic Publishers, 1981.
- [96] S. L. Chiu, "Fuzzy model identification based on cluster estimation," *Journal of intelligent and Fuzzy systems*, vol. 2, no. 3, pp. 267–278, 1994.
- [97] H. Bubb, K. Bengler, R. E. Grünen, und M. Vollrath, *Automobilergonomie*. Springer-Verlag, 2015.

- 
- [98] The United Nations Economic Commission for Europe, "Regulation No. 112, Uniform provisions concerning the approval of motor vehicle headlamps emitting an asymmetrical passing beam or a driving beam or both and equipped with filament lamps." 2013.
- [99] D. Polin und T. Q. Khanh, "Field Studies on the Flickering and Stroboscopic Effects of LED-PWM-Front Lighting Systems," in Tagungsband *VISION*, Versailles, Frankreich, 2014.
- [100] D. Polin, "Flicker and Stroboscopic Perception of White LEDs under Photopic Conditions," in *LED Lighting: Technology and Perception*, T. Khan, P. Bodrogi, Q. T. Vinh, and H. Winkler, Eds. John Wiley & Sons, 2014.
- [101] D. Polin und T. Q. Khanh, "Flimmern und Stroboskopeffekte – visuelle Aspekte der pulswertenmodulierten weißen LEDs," *Licht*, vol. 11–12, 2014.
- [102] D. Polin und T. Q. Khanh, "Untersuchung stroboskopartiger Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten," in *Lux Junior*, Ilmenau, 2013.
- [103] D. Polin und T. Q. Khanh, "Visual Flickering Effects," in *Lux Europa*, Krakau, Polen, 2013.
- [104] R. Steyer, P. Schwenkmezger, P. Notz, und M. Eid, "Der mehrdimensionale Befindlichkeitsfragebogen (MDBF). Handanweisung [The multidimensional affect rating scale (MDBF). Manual]," *Göttingen, Hogrefe*, 1997.
- [105] E. O. Kohlhoff, "Circadiane Variationen von Aufmerksamkeitsfunktionen bei extremen Chronotypen," *Dissertation*, Universität Leipzig, 2014.
- [106] P. Atteslander, *Methoden der empirischen Sozialforschung*. Walter de Gruyter, 2003.
- [107] F. G. Licht, *licht.wissen 02 - Besser lernen mit gutem Licht*. Druckhaus Haberbeck, Lage/Lippe, 2012.
- [108] C. Schmidt, F. Collette, C. Cajochen, und P. Peigneux, "A time to think: circadian rhythms in human cognition," *Cognitive Neuropsychology*, vol. 24, no. 7, pp. 755–789, 2007.
- [109] G. Busch und K. Wachholder, "Der Einfluß ermüdender geistiger Beanspruchung auf die Flimmerverschmelzungsfrequenz," *Arbeitsphysiologie*, vol. 15, no. 2, pp. 149–164, 1953.
- [110] Z. Li, K. Jiao, M. Chen, und C. Wang, "Reducing the effects of driving fatigue with magnitopuncture stimulation," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 36, no. 4, pp. 501–505, 2004.
- [111] "Licht und Beleuchtung - Beleuchtung von Arbeitsstätten - Teil 1: Arbeitsstätten in Innenräumen," no. DIN 12464–1:2011–08. 2011.

---

## Veröffentlichungen

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "An approach to avoid stroboscopic effects on pulse-width modulated LED headlamps", in *IFAL – International Forum on Automotive Lighting*, Shanghai, China, 2015.

Polin, Dmitrij; Bruns, Carsten; Klir, Stefan; Khanh, Tran Quoc, "Evaluation system of adaptive lighting systems in dynamic situations at night-time", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2015.

Kosmas, Kyriakos; Polin, Dmitrij; Schiller, Christoph; Kobbert, Jonas; Khanh, Tran Quoc, "Comparing the glare load of low beam, high beam and glare-free high beam under different traffic conditions on the road", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2015.

Kobbert, Jonas; Polin, Dmitrij; Kosmas, Kyriakos; Khanh, Tran Quoc, "Field test of visibility distances and recognition rates – comparison of LED and laser systems", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2015.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Flicker and Stroboscopic Perception of White LEDs under Photopic Conditions", *LED Lighting – Technology and Perception*, Wiley, 2014, ISBN 978-3-527-41212-9.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, „Flimmern und Stroboskopeffekte – visuelle Aspekte der pulsweitenmodulierten weißen LEDs“, *Licht 11-12*, 2014.

Polin, Dmitrij, „Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil“, *Projektbericht*, FAT-Schriftreihe 270, FAT – Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V., Berlin, 2014, ISSN 2192-7863.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Field Studies on the Flickering and Stroboscopic Effects of LED-PWM-Front Lighting Systems", in *VISION*, Versailles, Frankreich, 2014.

Gegenfurtner, Karl; Schütz, Alexander; Billino, Jutta; Bodrogi, Peter; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Speed estimation during driving", European Conference on Visual Perception, Belgrade, Serbia, 2014.

Zydek, Bastian; Schiller, Christoph; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, „Bewertung von Scheinwerfern mit blendfreiem Fernlicht“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 6/2014, S. 64-69, 2014.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Flickering Effects of Vehicle Exterior Light Systems and Consequences", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2013.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, „Visual Flickering Effects“, in *Lux Europa*, Krakau, Polen, 2013.

Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, „Untersuchung stroboskopartiger Effekte von PWM-gesteuerten LED-Leuchten“, in *Lux Junior*, Ilmenau, 2013.

Zydek, Bastian; Schiller, Christoph; Wagner, Max; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Performance Evaluation of Vehicles with Adaptive Headlamp Systems", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2013.

---

Polin, Dmitrij; Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc, "Measurement of pupil diameter during night driving", in *VISION*, Versailles, Frankreich, 2012.

Söllner, Stefan; Polin, Dmitrij; Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc, „Wirksamkeit und Nutzen von Scheinwerferreinigungsanlagen“, *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift*, 2/2012, S. 174-180, 2012.

Polin, Dmitrij; Haferkemper, Nils; Khanh, Tran Quoc, „Messungen von Augenpupillendurchmesser – Notwendigkeit, Experimentaufbau, erste Ergebnisse“, in *Lux Junior*, Ilmenau, 2011.

Haferkemper, Nils; Söllner, Stefan; Polin, Dmitrij; Bodrogi, Peter, "Brightness perception in the mesopic range – models and new laboratory experiments", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2011.

Söllner, Stefan; Sprute, Jan Holger; Polin, Dmitrij; Khanh, Tran Quoc, "Field Study: Driver Data on Visual Topics", in *ISAL – International Symposium on Automotive Lighting*, Darmstadt, 2011.

---

## Betreute Arbeiten

Raphael Kuhl, Masterarbeit: *Erkennung von Fahrbahnunebenheiten mit einem wärmebildbasierten Nachtsichtsystem im Personenkraftwagen*

Kyriakos Kosmas, Masterarbeit: *Messtechnische Charakterisierung von Scheinwerfern mit adaptivem Fernlicht unter dynamischen Bedingungen*

Albert Frank, Studienarbeit: *Erfassung und Auswertung von CAN-Bus-Daten im Kraftfahrzeug*

Peter Schneider, Masterarbeit: *Untersuchung der lichttechnischen Größen von Kfz-Heckleuchten als Funktion von Fahrabständen und Umfeldhelligkeiten*

Jonas Kobbert, Masterarbeit: *Kalibrierung, Charakterisierung und Optimierung eines Eye-Tracking Systems für den Kfz-Einsatz*

David Witon, Bachelorarbeit: *Entwicklung und Aufbau eines Versuchsaufbaus zur Untersuchung der Helligkeitswahrnehmung*

Stefan Klir, Bachelorarbeit: *Entwicklung von Verfahren zur Reduzierung visueller Artefakte bei PWM-gesteuerten LED-Leuchten*

Sergio Congiu, Bachelorarbeit: *Lichttechnische Konzeption eines KFZ-Frontscheinwerfers auf Basis von RGBW-LEDs*

Carsten Bruns, Bachelorarbeit: *Entwicklung eines modularen Datenloggers auf FPGA-Basis*

Rick Nitsche, Bachelorarbeit: *Entwicklung eines mehrkanaligen EEG-Messsystems für den Einsatz in Untersuchungen zur Lichtwahrnehmung*

Jonas Kobbert, Master Thesis Proposal: *Auswahl, Aufbau und Charakterisierung eines Eye-Tracking Systems für die Optimierung von Kzf-Scheinwerfern*

Alexander Drescher, Bachelorarbeit: *Entwicklung eines Verfahrens zur Untersuchung der Helligkeitswahrnehmung von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung*

Lennart Schnarr, Studienarbeit: *Die Wahrnehmung von flimmerndem Licht*

---

## Wissenschaftlicher Werdegang

- Seit 11/2009 Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen, Fachgebiet Lichttechnik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Thema Dissertation: *Flimmereffekte von pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung*
- 10/2003 – 09/2009 Technische Universität Darmstadt  
Elektrotechnik und Informationstechnik, Automatisierungstechnik  
Abschluss: Diplom-Ingenieur  
Thema Diplomarbeit: *Interaktive Konstruktion von Prothesengerüsten für die Zahnmedizin*  
Thema Studienarbeit: *Methoden zur Analyse von Tiefeninformationen*
- 09/1999 – 03/2000 National Research Nuclear University, Moscow  
Theoretische Physik

Bensheim, den 14. Juli 2015



---

## Erklärung laut §9 der Promotionsordnung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Dissertation allein und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur verfasst habe. Die Arbeit hat bisher noch nicht zu Prüfungszwecken gedient.

Bensheim, den 14. Juli 2015

Dmitrij Polin