

FAT 270

Φ

Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil

α

Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil

Forschungsstelle:

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Lichttechnik

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Dmitrij Polin

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V. (FAT) gefördert.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Motivation	3
1.1. Relevanz und Zielsetzung der Arbeit.....	3
1.2. Aufbau der Arbeit.....	3
2. Grundlagen	4
2.1. Dimmverfahren von LEDs	4
2.2. Visuelle Flimmereffekte.....	5
3. Stand der Forschung	7
3.1. Physiologische Studien.....	7
3.2. Lichttechnische Studien	8
3.3. Zusammenfassung.....	11
4. Voruntersuchungen im Labor	12
4.1. Einleitung.....	12
4.2. Untersuchung.....	12
4.3. Ergebnisse	16
4.4. Fazit	18
5. Flimmereffekte von pulsweiten-modulierten Innenraumbeleuchtung	18
5.1. Einleitung.....	18
5.2. Untersuchung.....	18
5.3. Ergebnisse	23
5.4. Fazit	30
6. Fahrversuche	31
6.1. Einleitung.....	31
6.2. Voruntersuchungen	31
6.2.1. Mutispot-Prototyp	31
6.2.2. Dimmung kompletter Lichtverteilung	32
6.2.3. Eigenbau aus Kfz-Scheinwerfermodulen.....	34
6.3. Untersuchung mit einem Serienfahrzeug mit LED-Scheinwerfern	36
6.3.1. Methodik.....	37
6.3.2. Ergebnisse	37
6.4. Fazit	39
7. Untersuchungen an einem Straßenmodell	39
7.1. Einleitung.....	39
7.2. Untersuchungen	40
7.2.1. Straßenkreuzung.....	40
7.2.2. Multispotmodell	44
7.3. Fazit	48
8. Zusammenfassung und Ausblick	49
9. Literaturverzeichnis	50

1. Einleitung und Motivation

1.1. Relevanz und Zielsetzung der Arbeit

Licht emittierende Dioden (LED) rücken aufgrund ihres sehr guten Wirkungsgrades, ihrer Flexibilität im Design und ihrer langen Lebensdauer in immer mehr Anwendungsgebiete vor. Im Automobil werden LEDs seit Jahren in Heckleuchten und Innenraum sowie seit 2007 zunehmend in den Frontscheinwerfern eingesetzt. Anfangs wurde nur das Abblendlicht damit realisiert. In den modernsten und hochentwickeltesten Kfz-Frontbeleuchtungssystemen sind ausschließlich LEDs zu finden. Bei einigen Herstellern hat die LED-Technologie sogar Hochdruck-Entladungslampen aus dem Premiumsegment verdrängt.

Aufgrund ihrer kleinen Bauform ermöglicht LED Beleuchtungskonzepte, die mit konventionellen Leuchtmitteln nur schwer realisierbar sind. Ein Beispiel dafür ist ein adaptives Multispotsystem. Dieses erzeugt eine an die Verkehrssituation angepasste Fernlichtverteilung. Dabei blendet es Bereiche, in denen sich andere Verkehrsteilnehmer befinden, ab und beleuchtet die restlichen Bereiche auf Fernlichtniveau, was die Erkennung gefährlicher Situationen verbessern und damit für die Sicherheit im Straßenverkehr sorgen soll.

Multispotsysteme bestehen in der Regel aus vielen LEDs, die einzelne Sektoren anstrahlen. Dabei sind außer den An- und Aus-Betriebszuständen auch Zwischenstufen möglich. Die Reduzierung der Helligkeit ist zum Beispiel bei stark reflektierenden Verkehrsschildern sinnvoll, um die Blendung vom reflektierten Licht eigener Scheinwerfer zu vermeiden. Ein weiteres Beispiel dafür ist die Verlagerung des Lichtschwerpunktes in Kurven, was anfällige mechanisch bewegte Komponenten überflüssig macht.

Die Änderung der Helligkeit oder Dimmung wird aus Kostengründen mittels Pulsweitenmodulation (PWM) erreicht. Dabei wird LED bei schneller Frequenz an- und ausgeschaltet. Um die Elektromagnetische Verträglichkeit mit anderen elektronischen Geräten im Kfz zu gewährleisten, soll diese Frequenz möglichst gering sein. Bei niedrigen Frequenzen kommt es allerdings zu unerwünschten visuellen Effekten, sogenannte stroboskopische Effekte, die für den Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer irritierend sein können und dadurch die Sicherheit im Straßenverkehr gefährden. Zudem sind negative psychologische bzw. physiologische Einflüsse auf den Fahrer bei langen und/oder häufigen Fahrten mit dem gepulsten Licht denkbar.

Die Überprüfung, inwieweit diese Befürchtungen für die PWM-gedimmte Kfz-Beleuchtung zutreffend sind, ist der Gegenstand dieser Arbeit. In erster Linie soll untersucht werden unter welchen technischen Parametern stroboskopische Effekte entstehen. Die Abschätzung der dabei entstehenden Gefahr ist ein weiteres Ziel dieser Arbeit.

1.2. Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit besteht aus 8 Hauptteilen. Das Kapitel 2 „Grundlagen“ skizziert den Problemhorizont. Verdeutlicht wird zunächst, welche Verfahren zur Dimmung der LED existieren und was wahrnehmbare Flimmereffekte überhaupt sind.

Kapitel 3 erfasst einige Arbeiten im Bereich der Flimmerforschung. Hier werden sowohl physiologische als auch lichttechnische Studien zusammengefasst.

Kapiteln 4 bis 7 befassen sich mit den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und ihrer Ergebnissen.

Anschließend werden wesentliche Ergebnisse der vorliegenden Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst.

2. Grundlagen

In Abschnitt 2.1 sollen zunächst zwei Verfahren zur Dimmung von LEDs vorgestellt. Anschließend werden die wahrnehmbaren Flimmereffekte erläutert, das heißt, visuell wahrnehmbares Flimmern und dabei entstehende Stroboskopeffekte.

2.1. Dimmverfahren von LEDs

Zur Einstellung der Helligkeit einer LED haben sich zwei Verfahren etabliert. Diese werden im Folgenden erläutert.

Konstantstromregelung

Der Lichtstrom einer LED ist nahezu proportional zum elektrischen Strom, der durch die LED fließt [1]. Die Stromänderung bewirkt also die Änderung der Helligkeit einer LED und ermöglicht eine stufenlose Einstellung. Produktionsbedingt entstehen bei LEDs gleichen Typs kleine Unterschiede in ihrer spektralen Zusammensetzung. Je nach Strom können diese Unterschiede visuell wahrgenommen werden. In hochwertigen Anwendungen ist eine stabile und an andere Lichtfunktionen angepasste Lichtfarbe Voraussetzung. Das ist einer der Gründe, warum Pulsweitenmodulation in vielen Anwendungen bevorzugt wird.

Pulsweitenmodulation

Bei diesem Verfahren wird die LED in schneller zeitlicher Folge ein- und ausgeschaltet. Aufgrund sehr kurzen Ein- und Ausschaltzeiten von LEDs (ns- bis μ s-Bereich) folgt das emittierte Licht dem Stromverlauf. Bei hohen Pulsfrequenzen oberhalb 100 Hz wird aufgrund der Trägheit lichtempfindlicher Rezeptoren im Auge eine mittlere Leuchtdichte wahrgenommen. Diese wird über das Verhältnis der Puls- zu Periodendauer eingestellt. Dieses zeitliche Hell-Dunkel-Verhältnis wird Tastverhältnis oder duty cycle (dc) genannt. Im Gegensatz zur Konstantstromreduzierung ist bei PWM der Strom durch die LED entweder maximal oder Null. Der Farbort bzw. das Spektrum ist demnach stabiler hinsichtlich der Helligkeitsänderung. Zudem ist dieses Verfahren kostengünstiger.

Allerdings bringt das Schalten des Stromes Nachteile mit sich. Besonders bei Hochleistungs-LEDs (Ströme im Bereich um 1 A) verursachen das Ein- und Ausschaltvorgänge elektromagnetische Felder, welche mit steigender Pulsfrequenz stärker werden. Um die Beeinträchtigung umgebender elektrischer Geräte durch diese Felder im kleinen Maße zu halten, versucht man möglichst geringe PWM-Frequenzen einzusetzen, um die Richtwerte der elektromagnetischen Verträglichkeit zu erfüllen. In Kfz-Beleuchtung liegen typische PWM-Frequenzen im Bereich um 200 Hz für Frontbeleuchtung und bis zu 600 Hz für Rückleuchten.

2.2. Visuelle Flimmereffekte

Basierend auf empirischen Beobachtungen kann zwischen direkter und indirekter Wahrnehmung von Flimmern differenziert werden. Die Grenzen der beiden Wahrnehmungsformen sind fließend und hängen von mehreren Faktoren ab.

Flimmern

Flimmern stellt den periodischen Wechsel von Lichtreizen dar, die vom visuellen System weder als getrennte Einzelreize noch verschmolzen wahrgenommen werden. Es handelt sich dabei also um die sichtbare Pulsation einer Lichtquelle.

Die Flimmerverschmelzungsfrequenz (FVF) bezeichnet jene Frequenz, ab der Flimmern nicht mehr direkt sichtbar ist [2]. Überschreitet die Frequenz, mit der sich die Leuchtdichte ändert, die Auflösungsfähigkeiten des visuellen Systems, so entsteht der Eindruck eines konstanten Lichtreizes. Die Höhe dieses Reizes entspricht dem zeitlichen Mittelwert des periodischen Reizes, das heißt, oberhalb der FVF entspricht die wahrgenommene Helligkeit einer intermittierenden Lichtquelle der mittleren Leuchtdichte. Diese empirisch beobachtete Regelmäßigkeit beschreibt das Talbotsche Gesetz [3], welches für Frequenzen oberhalb der FVF die mittlere Leuchtdichte

$$L_m = \frac{1}{T} \int_0^T L_v(t) dt \quad (2-1)$$

als Integral des zeitlichen Leuchtdichteverlaufs $L_v(t)$ über die Periodendauer T versteht, bezogen auf die Periodendauer. Gleichung (2-1) zeigt, dass die mittlere Leuchtdichte oberhalb der FVF unabhängig von der Modulationsfrequenz ist. Dieser Zusammenhang zeigt, warum die Variation der Helligkeit einer Lichtquelle überhaupt durch Pulsweitenmodulation (siehe Kapitel 2.2) möglich ist.

Bezogen auf einen einzelnen Beobachter ist die FVF ein sehr individueller Wert, der sich in Abhängigkeit von der Umgebung, der Lichtquelle und der spezifischen Leistungsfähigkeit des visuellen Systems einstellt. Grundsätzlich gilt jedoch: je stärker die Retina mit Flimmerlicht beleuchtet wird, desto höher liegt die FVF [2]. Die maximalen Werte für FVF liegen im Bereich von 100 Hz [2].

Der empirisch beobachtbare Anstieg der FVF bei steigender Leuchtdichte wird durch das Ferry-Porter-Gesetz beschrieben. Mit zunehmender Lichtintensität können Zapfen auch höhere Pulsfrequenzen empfinden. Eine Reduktion der Leuchtdichte wirkt hingegen der Wahrnehmung von Flimmern entgegen. Demnach lässt sich die FVF durch die Gleichung

$$FVF = a \cdot \log L_m + b \quad (2-2)$$

errechnen, wobei die Konstante a typischerweise bei 12 Hz liegt [3] und b in Abhängigkeit von der Modulationstiefe variiert [4].

Stroboskopische Effekte

Das Talbotsche Gesetz gilt nur für unbewegte Situationen. In bewegten Situationen können Flimmerfrequenzen oberhalb der FVF mit der Wahrnehmung spezieller visueller Phänomene einhergehen.

Anschaulich betrachtet ist der Wechsel zwischen Hell-Dunkel-Phasen bei einer pulsweitenmodulierten LED-Beleuchtung 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 des Objektes ab. Je höher sie ist, umso höher liegt die kritische Flimmerfrequenz [8]. Folgendes Bild veranschaulicht diese Abhängigkeit: Der weiße Kreis symbolisiert das Objekt, dessen zeitlicher Leuchtdichteverlauf eine Rechteckschwingung beschreibt. Die grauen Kreise stellen die durch die Trägheit der Rezeptoren entstehenden Nachbilder auf der Netzhaut dar. Während links das Nachbild einer langsamen Bewegung schematisch dargestellt ist, zeigt das rechte Bild den Effekt bei einer schnelleren Objektbewegung. Das PWM-Signal ist in beiden Fällen gleich.



Abbildung 2-1: Stroboskopeffekt bei langsamer (links) und schneller (rechts) Objektbewegung

Damit es zwischen Nachbildern keine Lücken entstehen, muss die vom Objekt zurückgelegte Strecke s zwischen zwei Lichtpulsen maximal der Objektausdehnung b in Bewegungsrichtung entsprechen.

$$b = s = vT = \frac{v}{f} \quad (2-3)$$

Dabei ist v die Objektgeschwindigkeit, T ist Zeit zwischen zwei Lichtpulsen und f ist Frequenz. Falls diese Bedingung erfüllt ist, entsteht folgendes Bild auf der Netzhaut.

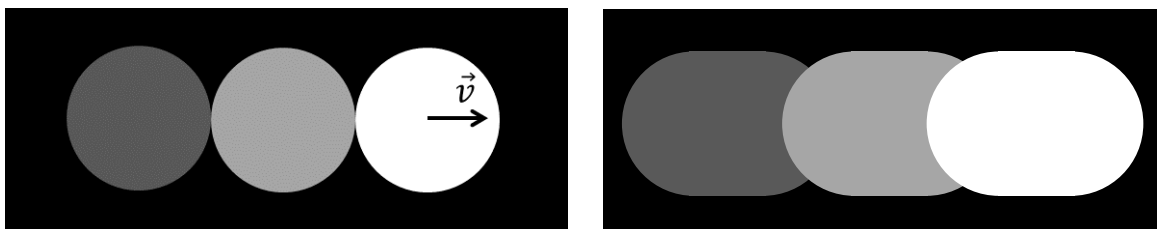


Abbildung 2-2: Stroboskopeffekt bei kritischer Flimmerfrequenz und kleinem (links) bzw. großem (rechts) Tastverhältnis

Aus (2-3) erhält man für die kritische Frequenz, ab der die Lücke zwischen Nachbildern verschwindet.

$$f = \frac{v}{s} \quad (2-4)$$

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

$$s = b + \varphi \cdot d \quad (2-5)$$

mit φ als Auflösungsvermögen des Beobachters in rad.

Setzt man (2-5) in (2-4) ein, ergibt sich für die kritische Flimmerfrequenz

$$f = \frac{v}{b + \varphi \cdot d} = \frac{v/d}{b/d + \varphi} = \frac{\omega}{\beta + \varphi} \quad (2-6)$$

mit der relativen Objektgeschwindigkeit ω in rad/s und der relativen Objektausdehnung β in rad.

Diesen stroboskopischen Effekt nennt man phantom array [3] oder Perlschnureffekt [4]. Im Gegensatz zu einem anderen stroboskopischen Effekt dem sogenannten Wagenradeneffekt, der bei schnell rotierenden Rädern oder Arbeitsmaschinen eine langsamere Bewegung oder gar Stillstand vortäuscht, entsteht der Perlschnureffekt bei deutlich niedrigeren Geschwindigkeiten und meistens geradlinigen Bewegungen. Die relative Bewegung kann sich dabei aus der Augenbewegung des Beobachters, Objektbewegung oder einer Überlagerung beider zusammensetzen.

Je nach Objektgeometrie kann dieser Effekt trotz der Überlappung der Nachbilder auch dann wahrgenommen werden, wenn es am Rande eine Welligkeit in den Nachbildern entsteht. Diese Welligkeit wird allerdings für große Tastverhältnisse kleiner (Abbildung 3). Demnach soll sich der Stroboskopeffekt sowohl durch die Erhöhung der Frequenz als auch durch die Erhöhung des Tastverhältnisses reduzieren lassen.

3. Stand der Forschung

Zahlreiche physiologische Studien geben einen tiefen Einblick in das zeitliche Auflösungsvermögen des menschlichen Auges. Dabei liegt der Fokus auf der direkten Wahrnehmung von Flimmern. Es werden also überwiegend Modulationsfrequenzen unterhalb der Flimmerverschmelzungsfrequenz untersucht. Lichttechnische Studien befassen sich erst seit den letzten Jahren verstärkt mit der Wahrnehmung von Flimmereffekten bei höheren Frequenzen. 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 das zeitliche Auflösungsvermögen des visuellen Systems. Als Modulationssignale wurden in der Regel periodische Rechteckschwingungen eingesetzt. Diese Studien festigten die Annahmen der Gesetze von Ferry und Porter sowie von Talbot [3]. Die

Empfindlichkeitskurven erreichen unter photopischen Lichtverhältnissen das Maximum zwischen 5 und 15 Hz und fallen anschließend rapide. Es handelt sich somit um Tiefpassverhalten. Während für eine niedrige FVF eine geringe Modulation ausreicht, ist für eine hohe FVF eine starke Modulation erforderlich.

In zahlreichen 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 in diesem Fall zu den Einflussparameter Kontrast, Ortsfrequenz, Ort des retinalen Reizes. [8]

Zudem existieren Studien über die Interaktion zwischen räumlichen und zeitlichen Kontrastschwankungen [9]. Dabei werden Augenbeschwerden bei Arbeiten im Büro unter Leuchtstofflampen, die mit 100 Hz flimmern, nicht nur auf die Beleuchtung, sondern auch auf das Lesen von Texten zurückgeführt. 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. [10]

Die Wahrnehmung von Flimmern variiert von Person zu Person. Studien zeigen, dass die Flimmerempfindlichkeit ab einem Alter von 20 Jahren [11] mit zunehmendem Alter deutlich abnimmt [12]. Des Weiteren sind keine signifikanten Unterschiede zwischen weiblichen und männlichen Personen zu beobachten [13].

3.2. Lichttechnische Studien

Im Gegensatz zu physiologischen Studien ist der Fokus lichttechnischer Untersuchungen in der Regel auf eine anwendungsbezogene Problemstellung gelegt. Dabei werden üblicherweise Beleuchtungsverhältnisse getestet, die denen in Alltagssituationen sehr nahe kommen. Demnach weisen solche Studien einen stärkeren Praxisbezug auf. Typischerweise wird der Einfluss auf die Leistungsfähigkeit bei der Arbeit oder in der Schule untersucht.

Studien mit Leuchtstofflampen

Großen Beitrag liefern die Untersuchungen mit Leuchtstofflampen, die in ihrer früheren Entwicklungsphase mit der doppelten Netzfrequenz von 100 Hz bzw. 120 Hz flimmerten.

Untersuchungen von Veitch und McColl [14] zeigen, dass Flimmern von Leuchtstofflampen die Geschwindigkeit beim Lesen komplizierter Texte reduzieren, den wahrgenommenen visuellen Komfort hingegen nicht beeinflussen. Andere Studien berichten über die Reduzierung der visuellen Leistungsfähigkeit und abnormale sakkadische Augenbewegungen [15] und die Erhöhung der Fehlerhäufigkeit beim Lesen [16]. Obwohl das Flimmern von Leuchtstofflampen nicht direkt wahrnehmbar ist, kann es zur Erhöhung des Auftretens von Kopfschmerzen führen [17]. Weitere negative Effekte von Flimmern können Panik- und Angstattacken darstellen [17]. Diesbezüglich hat die pulsierende Leuchtdichte signifikanten Einfluss auf die Befindlichkeit der Probanden und ist entscheidend für die Stärke der Effekte [18].

Flimmern von 100-120 Hz kann 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 [19].

Mittels eines elektronischen Vorschaltgerätes lassen sich negative Effekte nachweislich reduzieren. Dabei werden Leuchtstofflampen mit Wechselstrom deutlich höherer Frequenz von 45 kHz betrieben [17].

Studien mit PWM-gediminten 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 den indirekt wahrnehmbaren Flimmereffekt bei LED-Beleuchtungen.

Studien zeigen [5] die Wahrscheinlichkeit einen stroboskopischen Effekt wahrzunehmen wird größer mit steigender Modulationstiefe. Diese ist wie folgt 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.

Im Gegensatz zu Leuchtstofflampen verlaufen die An- bzw. Ausschaltvorgänge bei einer LED sehr rasch. Das führt dazu, dass das emittierte Licht dem PWM-Steuersignal folgt. Die minimale Leuchtdichte ist damit gleich Null und für die Modulationstiefe ergibt sich demnach ein Wert von 100%, auch bei hohen Frequenzen.

Bullough et al. [20] haben mit einer 400 lx starken LED-Schreibtischleuchte den Einfluss der Frequenz, Modulationstiefe, Farbtemperatur und des Verlaufs des Modulationssignals auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts getestet. Untersuchungen haben gezeigt, dass eine LED-Schreibtischleuchte bei einer Beleuchtungsstärke auf der Tischoberfläche von 400 lx bis 60 Hz direkt sichtbares Flimmern erzeugen kann, oberhalb von 100 Hz allerdings selbst bei Modulationstiefe von 100% nicht mehr. Ein Tastverhältnis von 10% wurde dabei als weniger angenehm empfunden als 50%. Der Stroboskopeffekt ist bis 300 Hz wahrnehmbar. Höhere Frequenzen wurden nicht getestet. Die Farbtemperatur und die Modulationssignalförm hatten keinen signifikanten Einfluss auf die direkte oder indirekte Wahrnehmung von Flimmern. Eine geeignete Methode zum Provozieren des Stroboskopeffektes ist zum Beispiel, schnelle Bewegungen unter der Lampe auszuführen, in der Untersuchung schnelles Schwenken der Hand (vgl. Abbildung 5-6).

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung haben Bullough et al. [21] potenzielle Interaktionseffekte geprüft und zugleich die Verschmelzungsfrequenz des Stroboskopeffekts ermittelt. Sie haben herausgefunden, 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 Worst-Case-Bedingungen. Das Auftreten von Stroboskopeffekten ist dabei besonders wahrscheinlich. Unter den Gegebenheiten des täglichen Lebens würde man erwarten, dass der Kontrast weniger stark ausgeprägt und damit die Wahrscheinlichkeit von Stroboskopeffekten deutlich geringer ist.

Wie im Kapitel 2.2 bereits erwähnt kann der Stroboskopeffekt durch die Augenbewegung entstehen. In diesem Fall wird der Stroboskopeffekt als Perlschnureffekt [21] [22] [7], phantom array [23] oder als intrasaccadic patterns [24] bezeichnet. Sehr schnelle und abrupte Augenbewegungen werden Sakkaden genannt. Diese dienen zur visuellen Abtastung der Umgebung. Der Perlschnureffekt tritt vor allem bei sehr schnellen Sakkaden mit Geschwindigkeiten bis zu 1000 °/s. Während einer Sakkade tritt die sakkadische Suppression ein. Hierbei findet die Unterdrückung von Seheindrücken während einer Sakkade statt. Diese Unterdrückung führt dazu, dass man letztendlich ein scharfes und nicht durch die Bewegung verschwommenes Bild wahrnimmt [25]. 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 [26].

Strauß [22] vermutet, dass der Schwellwert kein absoluter Wert ist, sondern von der Umgebungsleuchtdichte abhängig. Nachts ist dieser Schwellwert niedriger als zum Beispiel die Leuchtdichte einer Rückleuchte, so dass die Unterdrückung nicht funktioniert. Dadurch wird das Bild während einer Sakkade weiterverarbeitet und der Perlschnureffekt tritt auf [24]. Es sei angemerkt, dass kontinuierliche Lichtquellen eine kontinuierliche Linie anstatt einer diskontinuierlichen Perlschnur hinterlassen. Diese ist allerdings wesentlich dunkler und daher kaum wahrnehmbar [21]. Erst wenn die Abstände zwischen den Nachbildern der Lichtquelle auf der Netzhaut sehr klein und damit nicht mehr auflösbar sind, verschwindet der Perlschnureffekt. Da dieser Effekt bei Dunkelheit auf Grund des höheren Kontrastes deutlich stärker auftritt als bei Tageslicht, wird vermutet, dass die lange Integrationszeit der Stäbchen und die damit einhergehende visuelle Persistenz der Ursprung für seine Wahrnehmung sind [21].

Brückner und Khanh [7] haben beobachtet, dass insbesondere beim Anblicken PWM-gedimmten Rückleuchten eines überholenden Fahrzeuges eine PWM-Frequenz von 300-400 Hz erforderlich wäre, um die Wahrnehmung des Perlschnureffektes weitgehend zu vermeiden. Bei peripheren Beobachtungen ist der Effekt hingegen nicht wahrnehmbar.

In Anlehnung an dieses Problem haben Roberts und Wilkins [24] für eine sinusförmig modulierte vertikale Linie an einem Oszilloskop und eine Sakkadenamplitude von 40° eine durchschnittliche Schwellenfrequenz von 1,67 kHz ermittelt. Bei einer Sakkadenamplitude von 20° 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.

Bei Überholvorgängen treten üblicherweise Relativbewegungen von bis zu 1000 °/s auf [21]. In diesem Zusammenhang hat das Spektrum der Lichtquelle kaum Einfluss auf die kritische Frequenz zur Wahrnehmung des Perlschnureffektes. Strauß [22] empfiehlt auf Basis seiner Studien für das Design von Rückleuchten eine möglichst breite Konstruktion, um die Irritationen anderer Verkehrsteilnehmer durch den Perlschnureffekt bei horizontalen Augenbewegungen zu vermeiden.

Kaltenbach [27] hat unterschiedliche Maßnahmen zur Reduktion der Auffälligkeit des Perlschnureffektes bei gegebener Frequenz von 100 Hz und Tastverhältnis von 50% bewertet. Dazu hat der Autor verschiedene Verläufe des Modulationssignals gewählt, Abbildung 3-1. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Reduktion der Modulationstiefe (Testsignal 2) die Wahrnehmung

eines Schweißs an den einzelnen Elementen der Perlschnur bewirkt und damit die Auffälligkeit des Effekts reduziert.

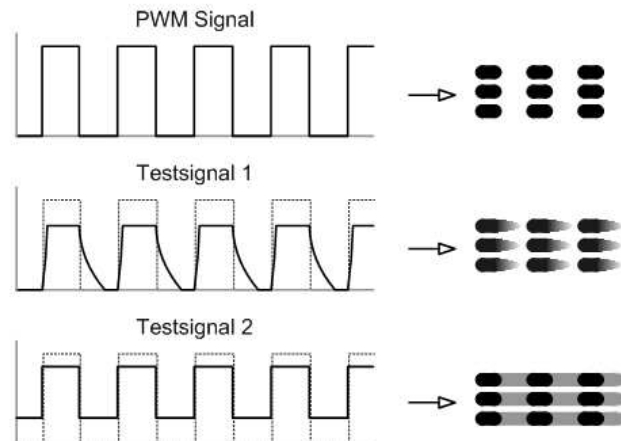


Abbildung 3-1: Verschiedene Modulationssignale und visuelles Signalbild bei drei bewegten LEDs

Hershberger und Jordan [23] haben gezeigt, dass bei einer Frequenz von 200 Hz, einem Tastverhältnis von 25% und voller Modulationstiefe die meisten Probanden (97%) den Perlschnureffekt wahrnehmen konnten.

Eine Arbeitsgruppe des IEEE beschäftigt sich mit den gesundheitlichen Effekten von sichtbarem und indirekt wahrnehmbarem Flimmern, erzeugt durch gepulste LEDs. Ziel der IEEE PAR1789 ist es, eine interdisziplinäre Gruppe von Wissenschaftlern aus den Bereichen Photobiologie, Psychologie, Medizin, Designern und Entwicklern sowie repräsentative Endverbraucher und weitere Interessensgruppen zusammenzuführen, um die gesundheitlichen Bedenken, die mit bestimmten Modulationsfrequenzen einhergehen, und die Gestaltung des technischen Designs zu diskutieren. Im Jahr 2010 hat die IEEE PAR1798 die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse in einem Bericht zusammengefasst, der jedoch weder auf Empfehlungen für den Einsatz von LEDs in der Praxis noch auf Empfehlungen für einen Standard eingeht.

In einer Untersuchung von Vogels et. al [28] äußerten die einige Probanden, dass sie aufgrund der AC-LEDs eine erhöhte Unruhe und Müdigkeit verspürten.

3.3. Zusammenfassung

Zusammenfassend lassen die vorliegenden Studien über die Wahrnehmung von Flimmern die Schlussfolgerung zu, dass modulierte Licht mit diversen körperlichen Reaktionen in Verbindung stehen kann. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass eine Frequenz von 100 oder 120 Hz zwar die Flimmerverschmelzungsfrequenz überschreitet, aber dennoch signifikanten Einfluss auf die Nervenaktivität ausübt. Bis zu welcher Frequenz die damit einhergehenden Reaktionen ein Auslöser zum Beispiel von Kopfschmerzen sind, ist bisher noch nicht belegt. Auch ist ungewiss, inwieweit LED-Beleuchtung als Alternative zu Leuchtstofflampen mit ähnlichen oder sogar verstärkten Effekten einhergeht. Um diesen und andere Problemkomplexe der Wahrnehmung von Flimmern abschließend klären zu können, sind weitere Studien unerlässlich.

Die vorliegenden Studien zeigen, dass für die Vermeidung von Stroboskopeffekten vor allem hohe Modulationsfrequenzen zu wählen sind. Bei starker Modulation der Leuchtdichte sollte die Frequenz im Idealfall bis in den Kilohertzbereich angehoben werden.

In der Praxis sind die Erkenntnisse über den Perlschnureffekt 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 in Kfz fehlen allerdings bislang.

Auf Druck derartiger Untersuchungsergebnisse und zahlreicher Beschwerden von Verkehrsteilnehmern haben die Automobilhersteller die Frequenz PWM-basierter Rückleuchten in der Regel von 100 Hz auf 150 Hz bis 600 Hz erhöht. Eine noch höhere Frequenz ist aufgrund auftretender Wechselwirkungen mit hohen Kosten verbunden. Die oben aufgeführten Studien bieten allerdings Grund zur Annahme, dass eine Frequenz von 200 Hz nicht ausreicht, um die Wahrnehmung von Perlschnureffekten zu verhindern.

4. Voruntersuchungen im Labor

4.1. Einleitung

Die in Kapitel 3 beschriebenen Ergebnisse der Studien über die Flimmerwahrnehmung haben gezeigt, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz unterhalb 100 Hz liegt und je nach Lichtverhältnissen variieren kann. Des Weiteren ist der Stroboskopeffekt bei starker Modulation und Frequenzen bis in den Kilohertzbereich wahrnehmbar. Die folgende Untersuchung soll die Frage klären, in wie weit diese Ergebnisse auf die Lichtbedingungen im nächtlichen Straßenverkehr übertragbar sind.

4.2. Untersuchung

Laboraufbau

Für die Untersuchungen wurde im Labor eine spezielle Box aufgebaut. Die Wände dieser Box sind mit schwarzen Molton überzogen, um unerwünschte Reflexionen zu vermeiden. An der Vorderseite dieser Box ist eine Öffnung mit einer davor befestigten Kopfstütze. Die Kopfstütze diente zur Fixierung des Kopfes der Testperson, um damit gleiche Testbedingungen für alle Testpersonen zu gewährleisten. An der inneren Rückwand gegenüber der Öffnung wurde auf dem schwarzen Hintergrund ein weißes Objekt aus Papier angebracht. Dieses wurde von einer speziell gebauten Beleuchtung angestrahlt. Die Lichtquelle besteht aus einer Hochleistungs-LED mit einer Farbtemperatur von 5700 K und einem Flüssigkeitskristallfilter (englisch: liquid crystal tunable filter, LCTF) vom Typ CRi VariSpec VIS. Mittels dieser Kombination aus der LED und des LCTF ist möglich, eine quasi-monochromatische Strahlung mit einer Halbwertsbreite von ca. 7 nm zu erzeugen. Als Stromquelle für die LED wurde ITC4005 von Thorlabs verwendet. Dieser wurde von einem Signalgenerator Agilent 33220a mit einem einstellbaren PWM-Signal angesteuert. Beide Geräte wurden über PC gesteuert. Dafür wurde eine Software entwickelt. Diese diente sowohl zur Aufnahme der Reaktion der Testperson und Einstellung der Strahlungsmodulation als auch zur Speicherung und Analyse der Ergebnisse. Abbildung 4-1 zeigt schematisch den Laboraufbau.

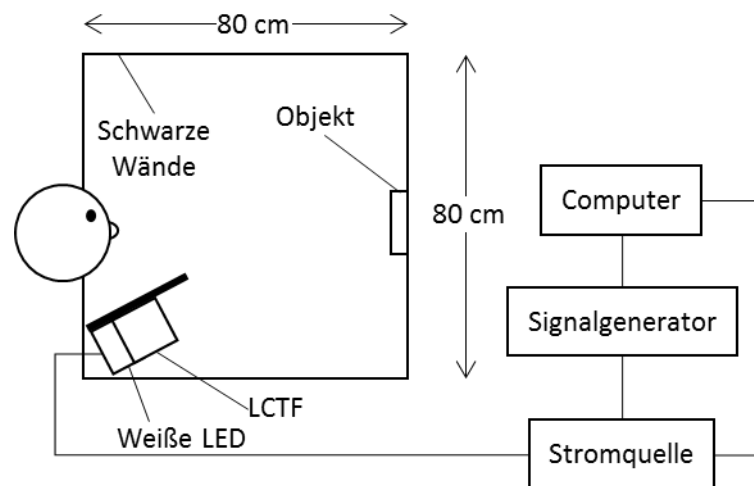


Abbildung 4-1: Laboraufbau

Flimmerverschmelzungsfrequenz

In einem Experiment wurde die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter den Nachtfahrbedingungen ähnlichen Lichtverhältnissen untersucht. In Abbildung 4-2 sieht man deutlich, dass die Leuchtdichte in dem unmittelbaren Fahrzeugumfeld im Bereich um $0,5 \text{ cd/m}^2$ liegt – roter Bereich. Dieser Wert wurde in der Untersuchung verwendet.

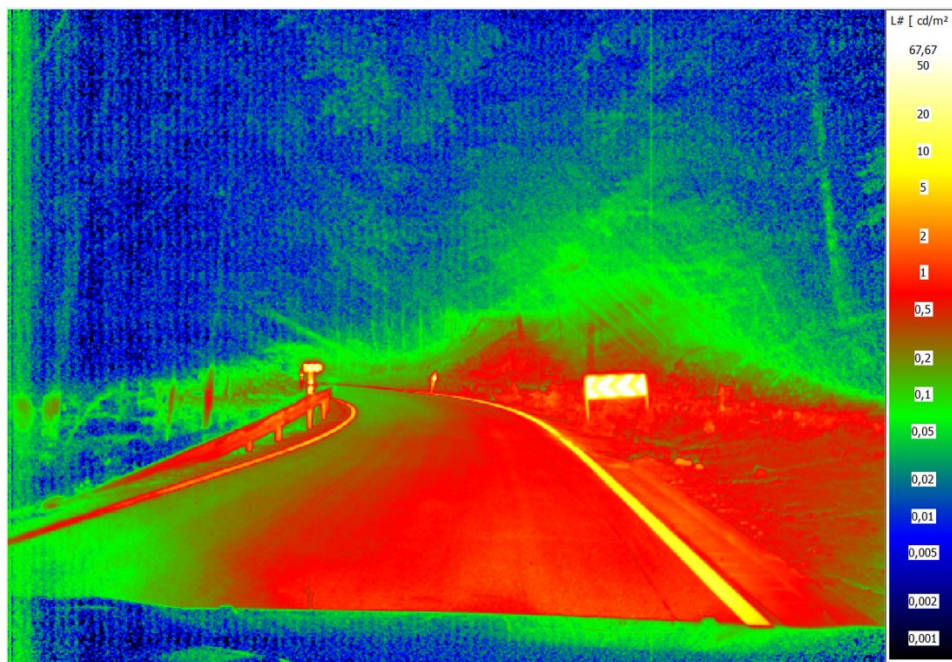


Abbildung 4-2: Leuchtdichteaufnahme einer Straße bei Nacht

An der inneren Rückwand der Box wurden 3 weiße Blätter mittig angebracht (siehe Abbildung 4-3).

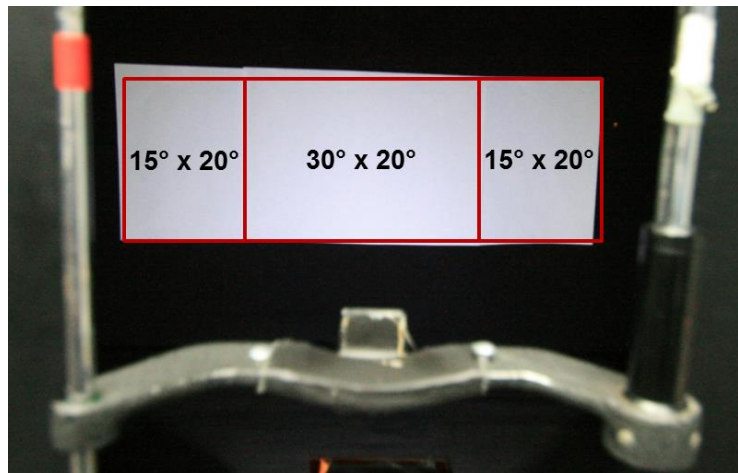


Abbildung 4-3: Aufbau FVF, Position der Reize

Damit wurden folgende Kombinationen untersucht:

1. Alle Felder: $55^\circ \times 20^\circ$,
2. Mittleres Feld: $30^\circ \times 20^\circ$,
3. Linkes Feld: $15^\circ \times 20^\circ$,
4. Rechtes Feld: $15^\circ \times 20^\circ$,
5. Beide seitliche Felder ohne mittleres Feld.

In diesem Versuch wurde der LCTF nicht eingesetzt. Es wurde also nur die weiße Strahlung von der LED getestet. Die LED wurde mit einem PWM-Signal variabler Frequenz angesteuert. Das Tastverhältnis von 15% wurde bei allen Einstellungen konstant gehalten. Dieses Tastverhältnis wurde gewählt, weil es an einem Multispotsystem-Prototyp (vgl. Kapitel 6.2.1) im seitlichen Bereich gemessen wurde. Der Kontrast zum Hintergrund betrug 96%.

Nach einer Dunkeladaptation von 15 min hatten die Probanden zu entscheiden, ob sie bei der dargebotenen Einstellung Flimmern wahrnehmen können. Dabei hatten die Testpersonen während der ganzen Untersuchung ihren Blick auf einen Punkt zu fixieren. Dieser befand sich mittig auf der Rückwand der Box gegenüber der Kopfstütze. Die Einstellung der Frequenz geschah automatisch nach der so genannten kombinierten Staircase-Methode. Dabei handelt es sich um ein adaptives Verfahren zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle. Wie der Name verrät, werden bei diesem Verfahren zwei Staircase-Methoden, welche unterschiedliche Startpunkte besitzen, kombiniert. Dabei berechnet jede Staircase-Methode einen neuen Wert, in dieser Untersuchung die PWM-Frequenz, in Abhängigkeit von der Probandenreaktion: Der Proband hatte zu jeder Einstellung einen entsprechenden Knopf zu drücken, ob das Flimmern wahrnehmbar ist oder nicht. Die eine Staircase-Methode hatte den Anfangspunkt um 10 Hz, randomisiert für jede Testperson, die andere ebenfalls randomisiert um 1000 Hz. Solange die Testperson eingab, Flimmern wahrnehmen zu können, wurde die Frequenz um eine Schrittweite erhöht. Sobald es zu einer Richtungsumkehr in den Antworten kam, wurde das Vorzeichen dieser Schrittweite ebenfalls umkehrt. Zusätzlich wurde die Schrittweite um einen festen Faktor reduziert. Der dabei entstandene Verlauf ist beispielsweise in der Abbildung 4-4 dargestellt. Als Abbruchkriterium wurde eine Schrittweite von 1 Hz gewählt.

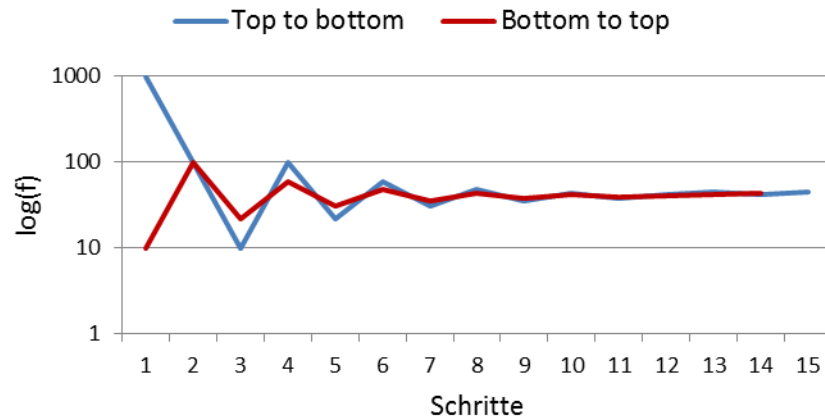


Abbildung 4-4: Kombinierte Staircase-Methode bei der Ermittlung der FVF

Perlschnureffekt

In einem weiteren Versuch wurde die Wahrnehmung des Perlschnureffektes untersucht. Unter dem Einsatz des LCTF wurde die Untersuchung für drei Wellenlängen (450 nm, 520 nm, 625 nm) durchgeführt. Der maximale Strom durch die LED wurde dabei so eingestellt, dass sich für jede Wellenlänge die gleiche Leuchtdichte ergab. Als Objekt diente ein Ring mit einem inneren Durchmesser von 4,4 cm und einem äußeren Durchmesser von 6 cm. Dieser wurde mittig auf die Rückwand gegenüber der Kopfstütze befestigt (Abbildung 4-5).

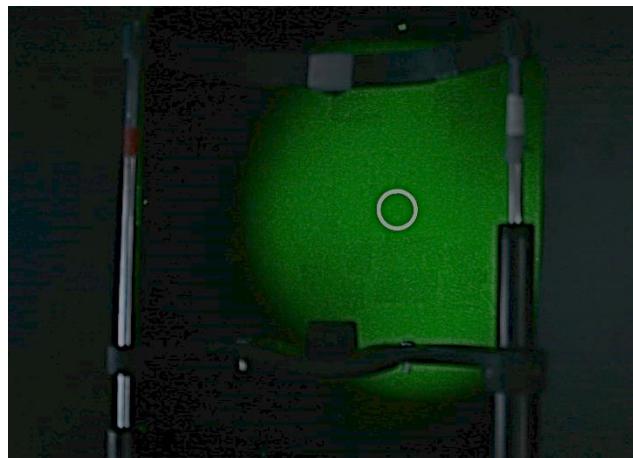


Abbildung 4-5: Versuchsanordnung Perlschnureffekt

Die Testpersonen hatten die Aufgabe im ersten Teil des Versuchs vertikale Sakkaden auszuführen. Diese sollten ausgehend vom Ringmittelpunkt abwechselnd nach oben bzw. nach unten ausgeführt werden. Für die Entscheidung, ob der Perlschnureffekt wahrnehmbar ist, wurden 5 Sekunden gegeben. Konnte sich die Testperson nach der Ablauf dieser Zeit nicht entscheiden, wurde die nächste Frequenz nach der Staircase-Methode eingestellt. Dabei wurde die Schrittweite aus der letzten Einstellung beibehalten. Das Tastverhältnis von 15% blieb bei allen Einstellungen unverändert. Im zweiten Teil des Versuchs hatten die Testpersonen horizontale Sakkaden auszuführen.

4.3. Ergebnisse

Flimmerverschmelzungsfrequenz

An dieser Untersuchung haben 9 Testpersonen im Alter zwischen 30 und 34 Jahren teilgenommen. In der Abbildung 4-6 sind die Ergebnisse für die fünf Konditionen dargestellt. Die blauen Balken zeigen den Mittelwert für die jeweilige Kondition. Die Fehlerbalken stellen die einfache empirische Standardabweichung dar. Es ist klar ersichtlich, dass im Durchschnitt über alle Konditionen die Flimmerverschmelzungsfrequenz etwa gleich ist und beträgt ca. 40 Hz. Dabei ist bei den mittig platzierten Reizen die Streuung zwischen den Testpersonen geringer. Am größten ist sie bei seitlich erscheinenden Reizen.

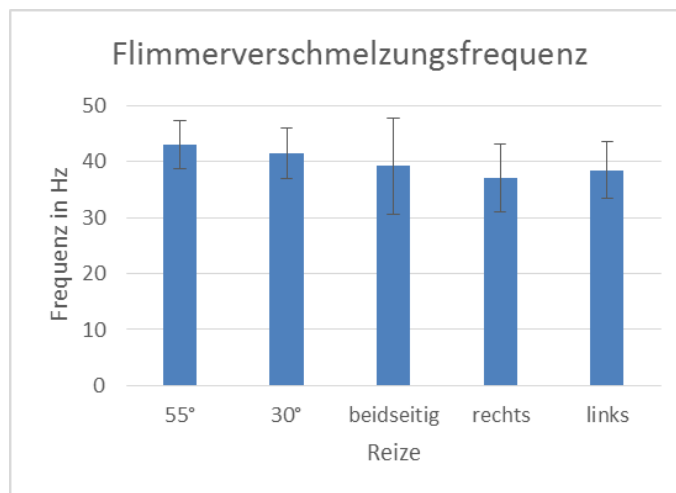


Abbildung 4-6: Ergebnisse Flimmerverschmelzungsfrequenz

Perlschnureffekt

Dieser Laborversuch wurde mit 4 Personen im Alter zwischen 30 bis 34 Jahren durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Ermittlung der Schwellenfrequenz nach der Staircase-Methode vor allem für ungeübte Personen Probleme bereitet. In der Abbildung 4-7 ist der Verlauf der Frequenzeinstellung einer geübten Testperson.

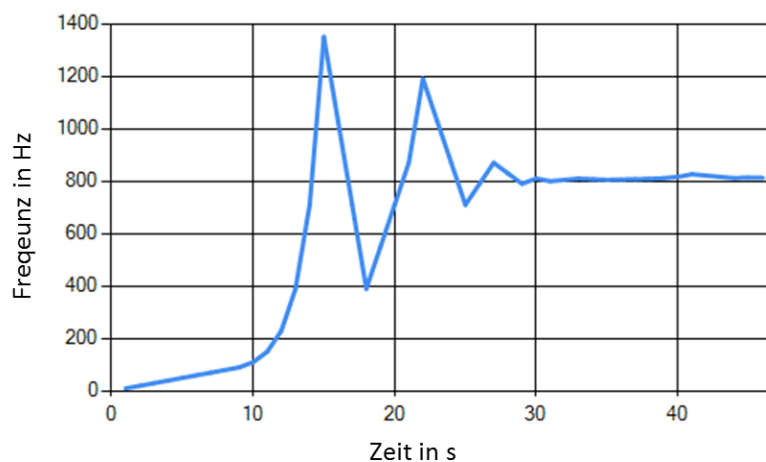


Abbildung 4-7: Perlschnureffekt, Staircase-Methode, geübte Testperson

Der Verlauf einer ungeübten Testperson ist in der folgenden Abbildung 4-8 dargestellt.

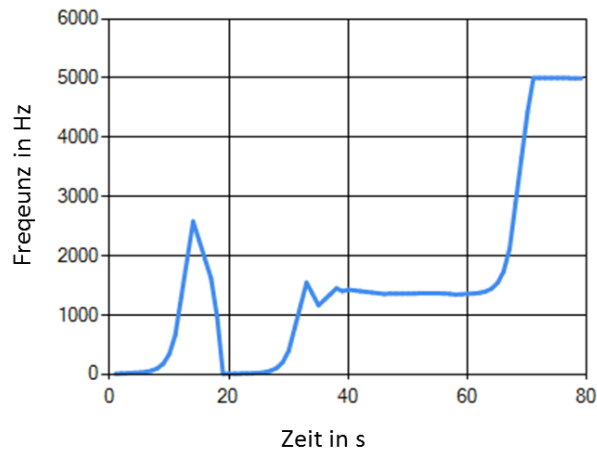


Abbildung 4-8: Perlschnureffekt, Staircase-Methode, ungeübte Testperson

Dieser Verlauf zeigt, dass die Entscheidung über die Detektion des Perlschnureffektes im Bereich der Schwellenfrequenz sehr schwer fällt. Ab einem Moment ist die Testperson nicht in der Lage den Perlschnureffekt von dem verschwommenen Nachbild zu unterscheiden und versucht eine höhere Frequenz einzustellen. In diesem Versuch wurde die Grenze für die Frequenzeinstellung auf 5000 Hz gelegt. Deshalb wurde der Versuch, zu dem der Verlauf aus der Abbildung 4-8 gehört, nach dem Erreichen dieser Grenze und weiterem Anstreben der Testperson, die Frequenz zu erhöhen, unterbrochen. In dem Fall wurde als Schwellenfrequenz die mittlere Frequenz im Bereich zwischen der 40 und 60 Sekunde genommen. Durch eine geeignete Wahl von Parameter für die Staircase-Methode ist möglich, solche Fälle zu vermeiden. Allerdings war es für die Probanden sehr anstrengend ständig die schnellen Sakkaden auszuführen. Demnach hängen die Ergebnisse stark von der Motivation der Probanden ab.

Die Ergebnisse in der Abbildung 4-9 zeigen deutlich, dass es Unterschiede in der Detektion des Perlschnureffektes in der Abhängigkeit der Sakkadenrichtung bestehen. Bei vertikalen Sakkaden liegt die mittlere Schwellenfrequenz mit dem Maximum um 600 Hz niedriger als bei horizontalen mit dem Maximum bei 800 Hz. In den beiden Fällen ist jedenfalls das Maximum bei 520 nm.

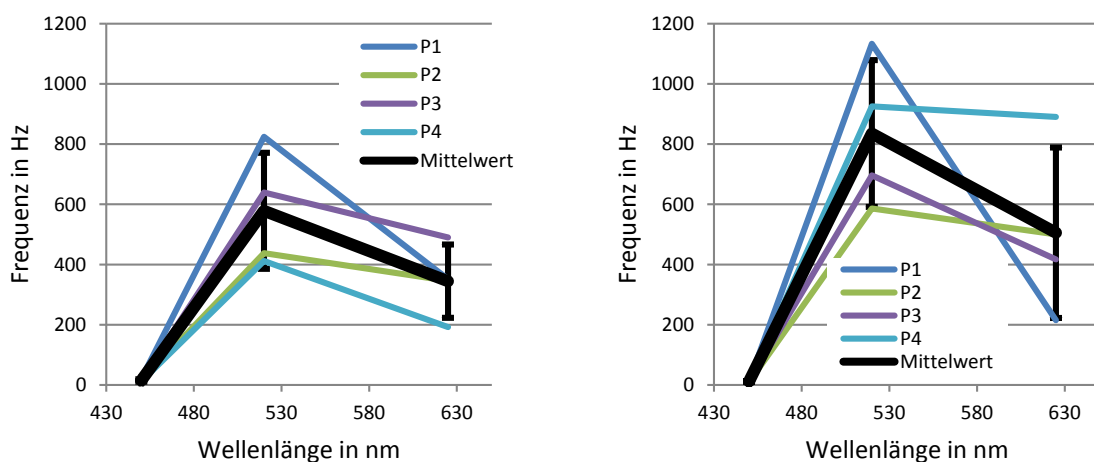


Abbildung 4-9: Ergebnisse Perlschnureffekt, vertikale Sakkaden (links), horizontale Sakkaden (rechts)

Es ist auch deutlich zu sehen, dass die Standardabweichung bei horizontalen Sakkaden höher ist. Während das Maximum für 625 nm bei 350 Hz für vertikale bzw. 500 Hz für horizontale Sakkaden liegt, ist der Perlschnureffekt bei 450 nm nicht wahrnehmbar: Die Frequenzeinstellung fang bei 10 Hz an. Die Flimmerverschmelzungsfrequenz lag im Bereich von 16-18 Hz. Bei höheren Frequenzen konnten die Testpersonen keinen Perlschnureffekt provozieren. Das lässt sich dadurch begründen, dass der Anteil der S-Zapfen, die hauptsächlich auf blauer Strahlung empfindlich sind, bei etwa 12% aller Zapfen liegt. Zudem beträgt der Anteil der S-Zapfen im Bereich des schärfsten Sehens nur 3-5% [29]. Die Nachbilder auf der Netzhaut werden demnach schlechter aufgelöst, was die Entstehung des Perlschnureffektes unmöglich macht.

4.4. Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass die Flimmerverschmelzungsfrequenz unter den Lichtverhältnissen wie im nächtlichen Straßenverkehr im Bereich um 40 Hz liegt. Diese Frequenz ist deutlich niedriger, als die PWM-Frequenzen, die in Kfz-Beleuchtung üblich sind. Daraus lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass die PWM-gedimmten Kfz-Scheinwerfer kein direkt wahrnehmbares Flimmern im Straßenverkehr verursachen werden.

An kontrastreichen Objekten könnte bei kleinen Tastverhältnissen der Perlschnureffekt allerdings wahrnehmbar werden. Denn die ermittelte Schwellenfrequenz oberhalb von der in Kfz üblichen PWM-Frequenz liegt. Basierend auf die Ergebnisse soll der Effekt an blauen Objekten kaum wahrnehmbar sein. An grünen und roten Objekten, wie zum Beispiel Bewuchs entlang der Straße bzw. der rote Rahmen an Geschwindigkeitsbegrenzungsschildern, könnte es zur Entstehung des Perlschnureffektes kommen. Voraussetzungen dazu sind kleine Abmessungen des Objektes sowie hoher Kontrast zur Umgebung.

5. Flimmereffekte von pulsweiten-modulierten Innenraumbeleuchtung

5.1. Einleitung

Zu dem Zeitpunkt dieser Arbeit stand kein Kraftfahrzeug mit LED-Scheinwerfern, deren Helligkeit mit einstellbarer PWM angesteuert werden könnte, zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung in einem Büroraum durchgeführt. Obwohl die Lichtbedingungen in einem Büro nicht denen im nächtlichen Straßenverkehr entsprechen, sollte diese Untersuchung zur Abschätzung relevanter Einflussparameter unter realen Bedingungen dienen. Außerdem wurde die zur Ansteuerung von Hochleistungs-LEDs speziell entwickelte Elektronik im Einsatz getestet.

Das im Folgenden beschriebene Experiment wurde durchgeführt, um objektive Daten zu gewinnen, die den Einfluss pulsweiten-modulierter LED-Beleuchtung unter möglichst realistischen Bedingungen charakterisieren.

5.2. Untersuchung

Untersuchungsparameter

Das im Folgenden beschriebene Experiment wurde durchgeführt, um die Auffälligkeit von stroboskopischen Effekten bei einer pulsweitenmodulierten LED-Beleuchtung in Abhängigkeit

von der Frequenz sowie vom Tastverhältnis zu untersuchen. Zusätzlich wurden die Testpersonen nach dem Störfaktor in Bezug auf diese Effekte befragt.

Untersuchungsraum

Der Raum, in dem das Experiment stattfand, verfügt über weiße Wände, was zu einer guten Ausleuchtung des Raumes führt. In der Untersuchung wurde eine in der Decke eingebaute LED-Leuchte mit diffusen aseptiv transmittierenden Abschlusscheiben verwendet. Unter dieser Leuchte befand sich ein Bürotisch mit einigen Gegenständen wie man Abbildung 5-1 entnehmen kann. Ein lichtundurchlässiges Rollo am einzigen Fenster sorgte dafür, dass es kein Licht von außen kam.



Abbildung 5-1: Untersuchungsraum

Beleuchtung

Die LED-Leuchte besteht aus 8 Hochleistungs-LEDs vom Typ Citizen CL-L233 mit einer Farbtemperatur von 4000 K. Die zur Ansteuerung der Leuchte verwendete Elektronik ermöglicht eine stufenlose Einstellung des Stromes. Zusätzlich kann die Leistung mittels Pulsweitenmodulation eingestellt werden. Das PWM-Signal wird mit einem Mikrocontroller erzeugt. Dabei kann sowohl das Tastverhältnis als auch die Frequenz variiert werden. Alle LEDs wurden mit gleichem PWM-Signal angesteuert. Der Mikrocontroller dient auch zur Kommunikation mit PC, von dem die Einstellungen vorgenommen werden.

Lichteinstellungen

In der Untersuchung wurden drei Signaltypen mit Tastverhältnissen von 20%, 50% und 100% verwendet. Um vergleichbare Bedingungen zu gewährleisten und den Einfluss des Leuchtdichteniveaus auf die Bewertung auszuschließen, wurde die mittlere Leuchtdichte für alle Einstellungen konstant gehalten, indem der maximale Strom entsprechend eingestellt wurde. In der Abbildung 5-2 sind die drei Signaltypen schematisch dargestellt. Da die Flächen unter den Signalkurven gleich sind, ergibt sich im zeitlichen Mittel einen gleichen Wert für die Leuchtdichte. Die Werte für den maximalen Strom wurden mit Hilfe eines

Beleuchtungsstärkemessgerätes ermittelt und für alle Lichteinstellungen kontrolliert. Die Einstellungen der Pulsweitenmodulation (Frequenz, Tastverhältnis) wurden anhand einer Messung mit Photodiode am Oszilloskop validiert.

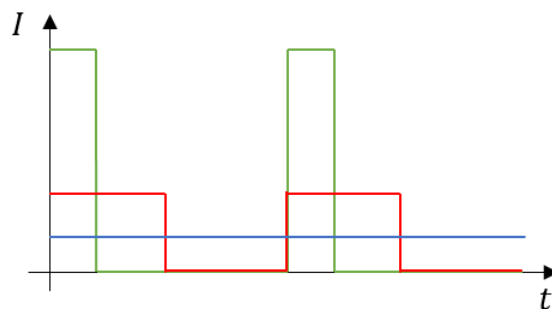


Abbildung 5-2: Signaltypen

Mit der vorhandenen Elektronik ließ sich nur eine LED-Leuchte im Raum ansteuern. Dabei betrug die maximal erreichbare Beleuchtungsstärke am Schreibtisch 250 lx. Die Abbildung 5-3 zeigt die Leuchtdichteverteilung aus Sicht der Testperson während des Versuchs. Man sieht, dass die Leuchtdichte sowohl auf dem Tisch (60 cd/m^2) als auch auf der weißen Wand vor dem Tisch (25 cd/m^2) sehr homogen verteilt ist. Mit einer Tischleuchtdichte von 60 cd/m^2 ist die Adaptation der Testpersonen im photopischen Bereich.

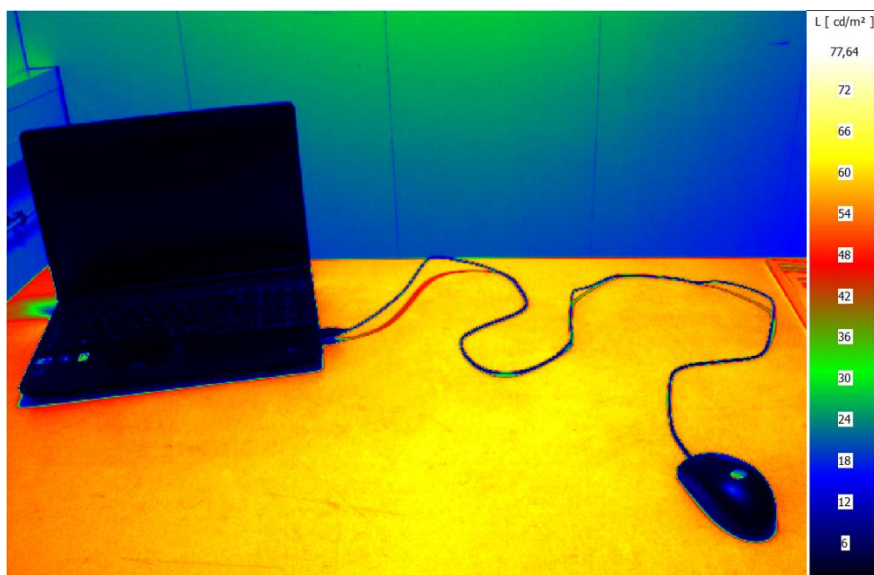


Abbildung 5-3: Leuchtdichteverteilung aus Sicht der Testperson

Die Leuchtdichte des Kabels der Computermaus liegt im Bereich von 5 cd/m^2 . Somit ergeben sich folgende Kontrastwerte für die Maus in Abhängigkeit vom Hintergrund: $K_{Tisch} = 70\%$, $K_{Wand} = 67\%$.

Ein weiterer Untersuchungsparameter war die Frequenz der Pulsweitenmodulation. Die Tastverhältnisse von 20% und 50% wurden bei fünf verschiedenen Frequenzen getestet. Dazu kam noch eine Konstantlicheinstellung – Tastverhältnis 100%. Insgesamt gab es demnach 11 verschiedene Einstellungen, die in der folgenden Tabelle 5-1 zusammengefasst sind. Ihre Reihenfolge wurde einmal randomisiert. In dieser Reihenfolge wurden dann alle Untersuchungen durchgeführt.

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

Tabelle 5-1: Einstellungen der getesteten PWM-Signale

Versuchsablauf

Der Versuchsablauf wurde in einem dafür entwickelten PC-Programm festgehalten. Bedient wurde es durch den Testleiter, der sich über den kompletten Test im Raum befand. Neben der Ansteuerung der Leuchte diente es zur Aufnahme der Information über die Testperson: Alter, Geschlecht, ob die Testperson eine Brille oder Kontaktlinsen trägt oder nicht. Außerdem wurden die Bewertungen der Testperson mit Hilfe dieses Programms dokumentiert.

Zu Beginn der Untersuchung wurde jede Testperson über den Ablauf instruiert. Anhand von PWM-Frequenzen von 50 Hz und 80 Hz und einem Tastverhältnis von 20% wurden die zu bewertenden stroboskopische Effekte veranschaulicht. Beim gleichen Tastverhältnis und 100 Hz wurde ein Probedurchlauf gemacht und die Aufgaben erläutert. Anhand schneller Handbewegung wurde der Unterschied zu einer Einstellung beim konstanten Lichtverlauf verdeutlicht.

Die Untersuchung sollte unter möglichst realistischen Bedingungen stattfinden. Dafür wurden für Probanden Aufgaben mit zum Teil schnellen aber natürlichen Bewegungen, zumindest hinsichtlich der Tätigkeiten in einem Büro, formuliert. Jede Testperson hatte fünf Aufgaben bei jeder der 11 Lichteinstellungen durchzuführen.

Aufgabe 1

Vor jedem Durchlauf stellte sich die Testperson etwa ein Meter vor dem Schreibtisch. Nachdem die Lichteinstellung vorgenommen wurde, hatte der Proband sich an den Tisch zu setzen. Das Ziel dieser Aufgabe ist es, die Person natürliche Orientierungsbewegung ausführen zu lassen.

Aufgabe 2

Bei dieser Aufgabe wurde die Bewegung kontrastreicher Objekte untersucht. Auf dem Tisch befand sich eine Computermaus, die man an das Notebook so anschließen sollte, dass sich das Kabel hinter dem Bildschirm befand. Die Testperson wurde gebeten, das Kabel in die Hand zu nehmen und mit Schwung über den Bildschirm umzuschlagen, Abbildung 5-4. Die Geschwindigkeit des Kabels kann mit 2-5 m/s abgeschätzt werden.



Abbildung 5-4: Anschließen einer Computermaus

Aufgabe 3

Als nächstes mussten die Testpersonen die Beleuchtung bei einer kognitiven Aufgabe bewerten. In einem Text ausgedruckt auf einem DIN-A4 Blatt hatten die Testpersonen bestimmte Wörter zu unterstreichen. Für jeden der drei Absätze sagte der Testleiter eine Zahl an, die Testperson zählte die Wörter ab und unterstrich dann das entsprechende Wort. Zur Unterstützung wurde ein Stift verwendet.

Aufgabe 4

Danach drehte die Testperson das Blatt um, verband vorgedruckte Punkte zu einem Quadrat und schraffierte dieses, was eine schnelle Schreibarbeit simulieren sollte.

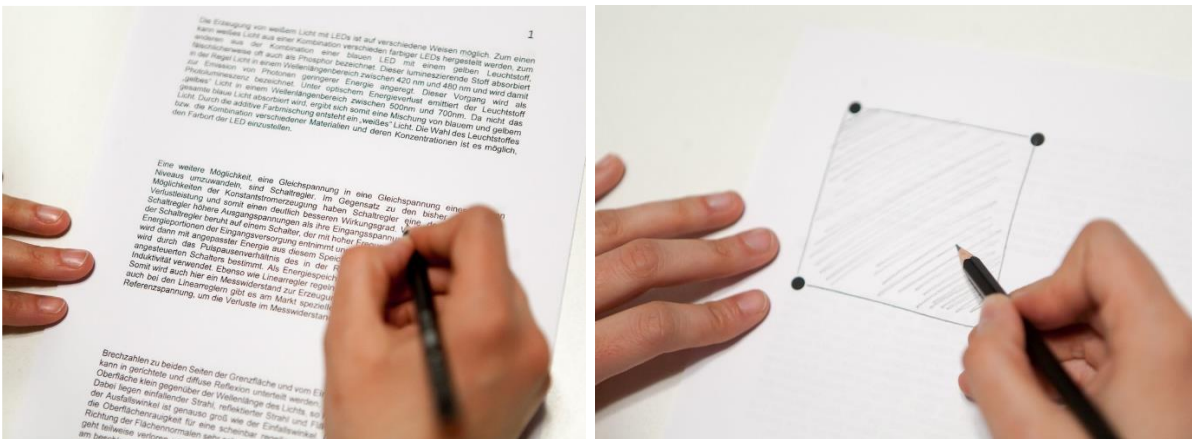


Abbildung 5-5: Aufgabe 3 (links) und Aufgabe 4 (rechts)

Aufgabe 5

Abschließend hatte der Proband seine Hand möglichst schnell hin und her zu bewegen. Danach wurden die Aufgaben bei der nächsten Lichteinstellung wiederholt.

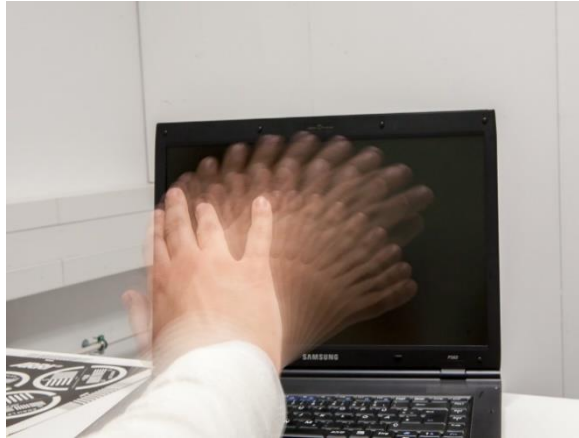


Abbildung 5-6: Schnelles Handbewegen

Nach jeder Aufgabe hatten die Testpersonen zwei Bewertungen auf einer Skala mit fünf diskreten Stufen von -2 bis 2 abzugeben. Zum einen wurde die Auffälligkeit von stroboskopischen Effekten bewertet. Dabei haben die Extremwerte folgende Bedeutung:

- 2: Der stroboskopische Effekt ist nicht wahrnehmbar
- 2: Der stroboskopische Effekt ist sehr deutlich wahrnehmbar.

Zum anderen wurde die Störung des wahrgenommen Effektes in Bezug auf die Aufgabe bewertet. Hier wurde ebenfalls eine diskrete Skala von -2 bis 2 verwendet. Die Bedeutung der Extremwerte war:

- 2: Der stroboskopische Effekt ist nicht störend
- 2: Der stroboskopische Effekt ist sehr störend.

Vor dem Testbeginn wurden die Einstellung beim konstanten Lichtverlauf und die PWM-Einstellung mit 100 Hz und Tastverhältnis von 20% als Beispiele für eine extreme Bewertung gezeigt.

5.3. Ergebnisse

Am Experiment haben insgesamt 38 Personen im Alter von 22 bis 61 Jahre teilgenommen. Davon waren 23 Männer (60%) und 15 Frauen (40%). 13 Personen (34%) trugen eine Sehhilfe: 10 Personen Brille, 3 Personen Kontaktlinsen. Das Histogramm der Altersverteilung ist in Abbildung 5-7 dargestellt. Das Durchschnittsalter der Teilnehmer lag bei 33 Jahren. Der älteste Teilnehmer war 61 und der jüngste Teilnehmer 22 Jahre alt.

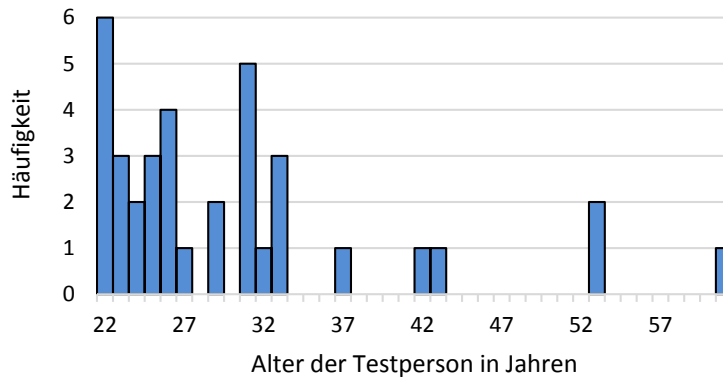


Abbildung 5-7: Histogramm der Altersverteilung der Testpersonen

Mittelwerte

Abbildung 5-8 (links) zeigt die mittleren Bewertungen der Auffälligkeit des Stroboskopeffektes für das Tastverhältnis von 20% in Abhängigkeit der Frequenz, sortiert nach Aufgaben. Es ist ersichtlich, dass bei Aufgaben mit schnellen Bewegungen (Anschließen der Maus, Schraffieren des Quadrats) die Auffälligkeit höher ist als bei Aufgaben mit langsameren Bewegungen (Hinsetzen, Wörter abzählen). Es zeichnet sich zudem bei allen Aufgaben ab, dass die Auffälligkeit mit steigender Frequenz exponentiell sinkt.

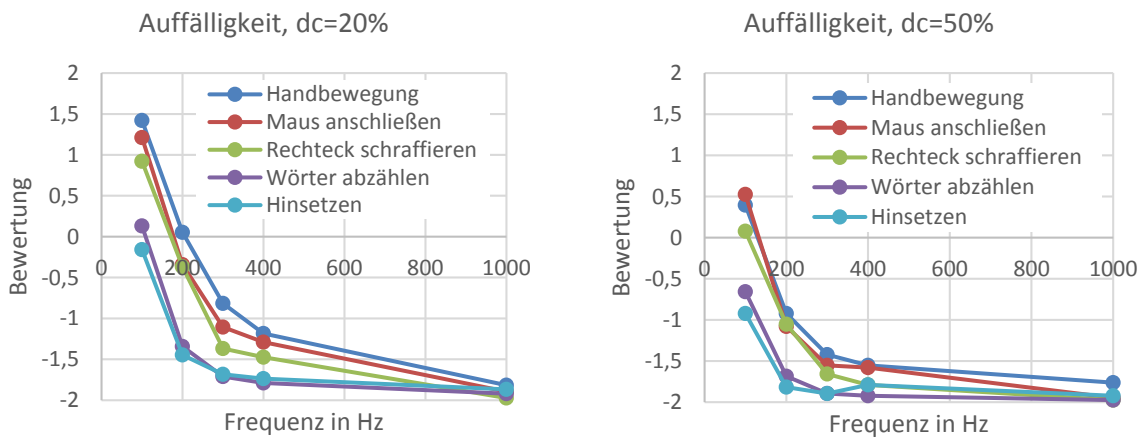


Abbildung 5-8: Mittlere Auffälligkeit nach Aufgaben, Tastverhältnis 20% (links) und 50% (rechts)

Ein ähnliches Verhalten ist auch beim Tastverhältnis von 50%, Abbildung 5-8 rechts, zu beobachten. Wie erwartet, ist hier die Auffälligkeit geringer als beim Tastverhältnis von 20%. Das deutet also darauf hin, dass die Auffälligkeit mit sinkendem Tastverhältnis steigt.

Dieselben Regelmäßigkeiten sind in den Bewertungen des Störfaktors wiederzufinden, Abbildung 5-9. Deutlichen Unterschied gibt es allerdings in der Höhe der Bewertung. Hier sind die Mittelwerte generell niedriger. Außerdem ist der Knick im Bereich von 200-300 Hz steiler.

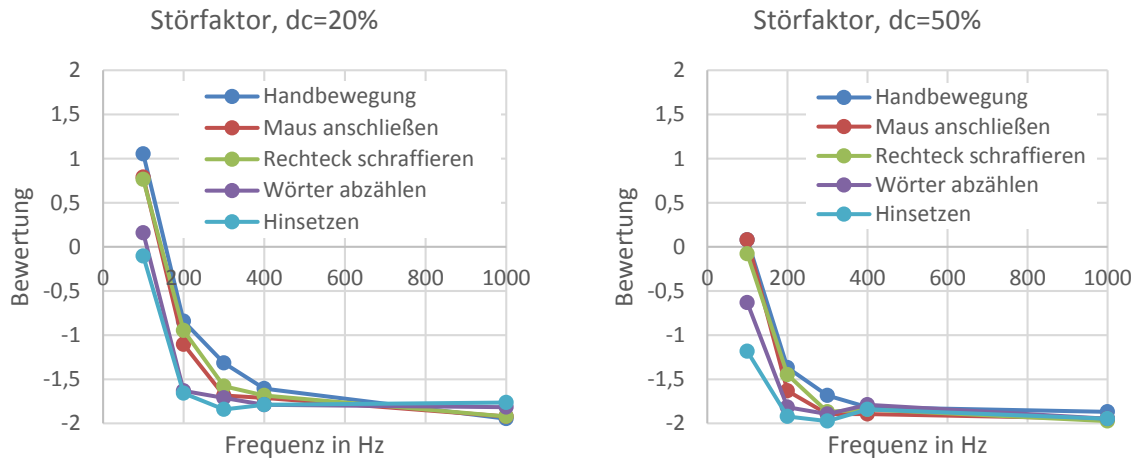


Abbildung 5-9: Mittlerer Störfaktor nach Aufgaben, Tastverhältnis 20% (links) und 50% (rechts)

Jetzt stellt sich die Frage, ob sich aus diesen Ergebnissen eine für die visuelle Wahrnehmung optimale Frequenz ermitteln lässt. Von allen in der Untersuchung getesteten Aufgaben, wurde die Aufgabe 5 (Schnelles Handbewegen) am kritischsten bewertet. Findet man also dafür eine optimale Frequenz, so wird diese für Aufgaben mit langsameren Bewegungen ebenfalls optimal sein. Aus diesen Überlegungen sollen im Weiteren die Ergebnisse für die Aufgabe 5 beim Tastverhältnis von 20% analysiert werden.

Wie bereits erwähnt, gaben Probanden eine diskrete Bewertung ab. Dabei sollte die Einstellung, bei der kein stroboskopischer Effekt wahrnehmbar war, mit -2 bewertet werden. Demzufolge kann der Wert -1 als Schwellenwert für den Effekt betrachtet werden. Aus Ergebnissen in Abbildung 5-8 geht hervor, dass die mittlere Bewertung für die Aufgabe 5 den Wert -1 im Bereich zwischen 300 Hz und 400 Hz erreicht. Mit anderen Worten: Durchschnittlich würden verschiedene Personen bei 400 Hz und einem Tastverhältnis von 20% keinen stroboskopischen Effekt wahrnehmen. Jedenfalls gibt es Menschen, welche ihn bei dieser Einstellung wahrnehmen können. Deshalb sollen die Bewertungen für die Aufgabe 5 genauer betrachtet werden. In Abbildung 5-10 sind neben dem Mittelwert (blaue Linie) zusätzlich noch Kurven für unteres Quartil (graue punktierte Linie) und für oberes Quartil (graue gestrichelte Linie). Die Fehlerbalken zeigen die einfache empirische Standardabweichung. Es ist ersichtlich, dass die Standardabweichung bis 400 Hz sehr groß ist. Der maximale Wert liegt bei 1,3 für 200 Hz. Für 200 Hz und 300 Hz ist auch der Quartilabstand am größten und beträgt 2. Das deutet darauf hin, dass die Testpersonen den Stroboskopeffekt sehr unterschiedlich bewerten.

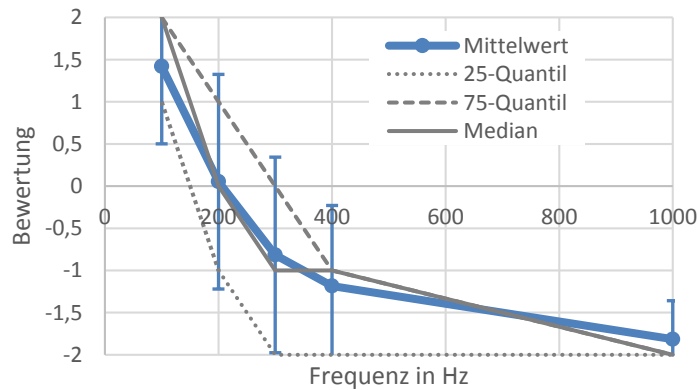


Abbildung 5-10: Bewertung der Auffälligkeit bei Aufgabe 5, Tastverhältnis 20%

Ein Grund für die große Streuung kann darin begründet sein, dass die Testpersonen ihre Hand unterschiedlich schnell bewegten. Das kann allerdings durch die Mittelung über alle Probanden kompensiert werden. Anhand einer Messung wurden für solche Bewegung Geschwindigkeiten im Bereich von 2-5 m/s ermittelt. Für den Abstand zum Auge von etwa 0,4 m ergibt sich eine Winkelgeschwindigkeit im Bereich von 250-700 °/s.

Abbildung 5- zeigt die Ergebnisse der Störfaktorbewertung für die Aufgabe 5 beim Tastverhältnis von 20%. Die Schwelle von -1 wird hier im Mittel bei etwas mehr als 200 Hz erreicht. Die Unterschiede zur Bewertung der Auffälligkeit zeigen: Obwohl der Stroboskopeffekt wahrnehmbar ist, wird er tendenziell als nicht störend empfunden.

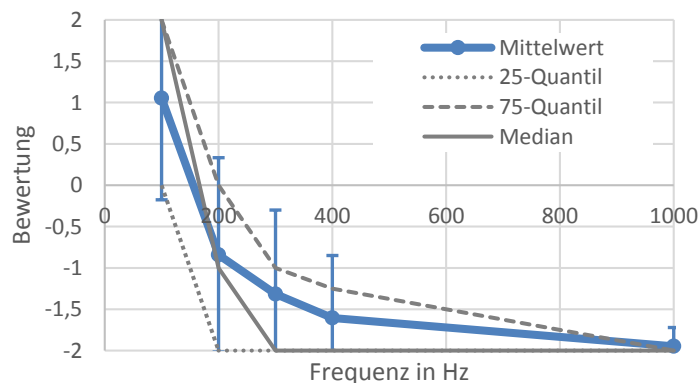


Abbildung 5-11: Bewertung des Störfaktors bei Aufgabe 5, Tastverhältnis 20%

Im Folgenden sollen die Ergebnisse für 200 Hz und 400 Hz miteinander verglichen werden. Der Grund für diesen Vergleich ist der verbreitete Einsatz von PWM-Frequenzen im Bereich um 200 Hz. Die folgende Abbildung 5.12 zeigt das Histogramm der Bewertungen bei diesen Frequenzen und einem Tastverhältnis von 20%. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass sich der Stroboskopeffekt durch die Frequenzverdoppelung von 200 Hz auf 400 Hz sehr stark reduzieren lässt. Während bei 200 Hz 10% der Probanden den Effekt nicht wahrnahmen, sind es bei 400 Hz ungefähr die Hälfte aller Teilnehmer. Auch bei Bewertungen größer -1 sind deutliche Unterschiede zu sehen: bei 200 Hz sind es zusammengezählt 63%, bei 400 Hz 21%.

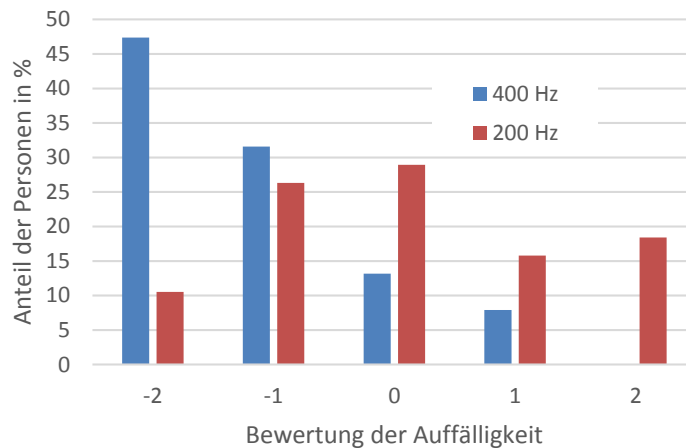


Abbildung 5-12: Histogramm der Bewertungen der Aufgabe 5, Tastverhältnis 20%

Deutliche Unterschiede bestehen auch in der Bewertung der Störgröße. Während bei 200 Hz zwei Drittel aller Probanden den Stroboskopeffekt störend (Bewertungen größer -2) empfanden, waren es bei 400 Hz weniger als ein Drittel.

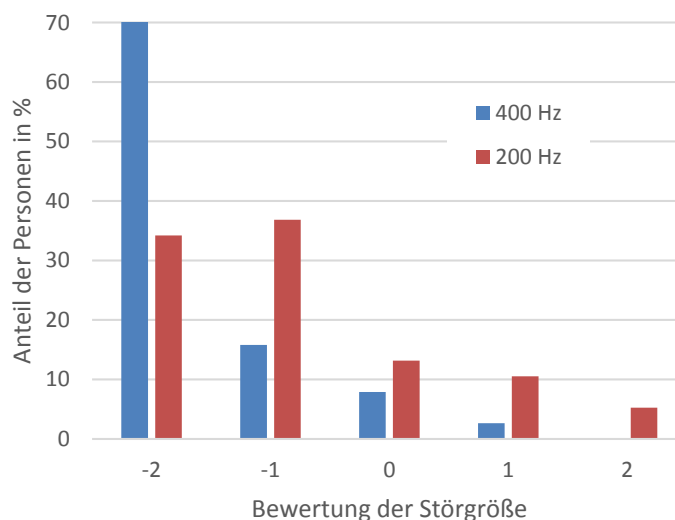


Abbildung 5-13: Histogramm der Störgröße bei der Aufgabe 5, Tastverhältnis 20%

Um zu überprüfen, ob sich signifikante Unterschiede zwischen dem gepulsten und konstanten Licht ergeben, wurde eine statistische Analyse der Bewertungen durchgeführt. Dabei wurde geprüft, ob sich die Mittelwerte signifikant unterscheiden. Die Analyse wurde basierend auf einen gepaarten U-Test von Mann-Whitney durchgeführt. Zuvor wurden die Bewertungen mittels des Jarque-Bera-Tests auf Normalverteilung geprüft. Dabei kam heraus, dass die Bewertungen für 100 Hz beim Tastverhältnis von 20% nicht normalverteilt sind. Deshalb wurde für die Analyse der U-Test, der nicht an die Normalverteilungsvoraussetzung geknüpft ist, eingesetzt. Bei diesem Verfahren wurden paarweise die Bewertungen beim gepulsten Licht mit den Bewertungen beim konstanten Licht verglichen. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 5.2 dargestellt. In den farbig markierten Feldern sind die errechneten Irrtumswahrscheinlichkeiten eingetragen. Ist der Wert kleiner als das Signifikanzniveau von

5%, liegt ein signifikanter Unterschied vor. In dem Fall ist das Feld grün markiert, andernfalls rot.

	Tastverhältnis 20%					Tastverhältnis 50%				
	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	1000 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	1000 Hz
Handbewegung	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11
Maus anschließen	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,50
Hinsetzen	0,00	0,00	0,02	0,02	0,12	0,00	0,04	0,20	0,02	0,33
Rechteck schraffieren	0,00	0,00	0,00	0,00	0,73	0,00	0,00	0,00	0,02	0,73
Wörter abzählen	0,00	0,00	0,06	0,11	0,66	0,00	0,03	0,50	0,66	0,92

Tabelle 5-2: Signifikanztest Auffälligkeit

Die Bewertungen der Störgröße wurden ebenfalls auf signifikante Unterschiede statistisch überprüft. Die Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 5.3. zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass bei Tastverhältnis von 50% und Frequenzen über 200 Hz bei meisten Aufgaben keine signifikanten Unterschiede zum Konstantlicht entstehen. Der Effekt beim schnellen Handbewegen wird allerdings signifikant unterschiedlich bewertet. Bei niedrigerem Tastverhältnis sind die Unterschiede für die Aufgaben mit schnellen Bewegungen signifikanter.

	Tastverhältnis 20%					Tastverhältnis 50%				
	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	1000 Hz	100 Hz	200 Hz	300 Hz	400 Hz	1000 Hz
Handbewegung	0,00	0,00	0,00	0,00	0,28	0,00	0,00	0,01	0,01	0,08
Maus anschließen	0,00	0,00	0,01	0,00	0,33	0,00	0,00	0,20	0,20	0,50
Hinsetzen	0,00	0,02	0,12	0,11	0,06	0,00	0,33	0,73	0,07	0,50
Rechteck schraffieren	0,00	0,00	0,00	0,01	0,33	0,00	0,00	0,12	0,07	0,73
Wörter abzählen	0,00	0,07	0,13	0,27	0,38	0,00	0,38	0,77	0,27	0,89

Tabelle 5-3: Signifikanztest Störfaktor

Des Weiteren wurde überprüft, ob sich die Bewertung von männlichen und weiblichen Testpersonen unterscheiden. Die folgende Abbildung 5- zeigt die mittleren Bewertungen der beiden Probandengruppen für die Aufgabe mit der schnellen Handbewegung beim Tastverhältnis von 20%. Die Ergebnisse zeigen, dass Frauen die Auffälligkeit des Stroboskopeffektes im Mittel niedriger bewerten als Männer. Der mittlere Störungsgrad ist jedoch bei Frauen über alle PWM-Frequenzen höher als bei Männern. Die Fehlerbalken in Diagrammen zeigen die einfache empirische Standardabweichung. Diese ist bei Frauen sowohl für die Auffälligkeit als auch für den Störfaktor deutlich größer als bei Männern. Um zu überprüfen, ob die Unterschiede in der Bewertung zwischen den beiden Gruppen einen signifikanten Charakter aufweisen, wurde mit diesen Daten der U-Test durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die in der Abbildung 5-10 zu sehende Unterschiede über alle Frequenzen statistisch nicht signifikant sind.

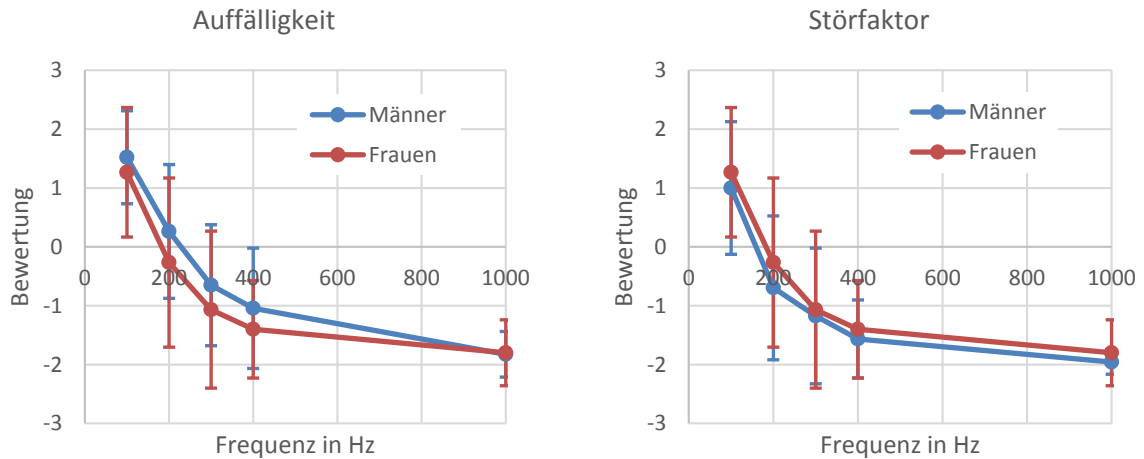


Abbildung 5-10: Mittelwerte von Männern und Frauen, Aufgabe 5, Tastverhältnis 20%

Die Ergebnisse machen es deutlich, dass die kritische Frequenz, ab der man keinen Stroboskopeffekt wahrnimmt, für die meisten Aufgaben zwischen 400 Hz und 1000 Hz liegt. Dieser Vergleich liefert allerdings keine Information darüber, wie stark der Unterschied ist.

Zur Abschätzung der praktischen Bedeutsamkeit von signifikanten Effekten kann die Größe des Effekts berechnet werden. Hier wird die Effektgröße nach Leonhart berechnet:

$$d = \frac{m_{PWM} - m_{DC}}{\sqrt{\frac{s_{PWM}^2 + s_{DC}^2}{2}}} \quad 5-1$$

Dabei ist m_{PWM} der Mittelwert der zu bewertenden PWM-Einstellung, m_{DC} ist die mittlere Bewertung der Konstantlichteinstellung, s_{PWM} und s_{DC} sind entsprechend die empirischen Standardabweichungen. Als Orientierungspunkte zur Beurteilung der Effektgröße gelten folgende Werte:

- Kleiner Effekt: $d = 0,2$
- Mittelgroßer Effekt: $d = 0,5$
- Großer Effekt: $d = 0,8$

Abbildung 5-11 zeigt die Abhängigkeit der Effektgröße von Frequenz beim Tastverhältnis von 20%, sortiert nach Aufgaben. Es zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Bewertung der Auffälligkeit (vgl. Abbildung 5-8), nämlich dass die Effektgröße mit steigender Frequenz sinkt. Hierbei zeigt sich, dass der Effekt bei 400 Hz noch groß ist und der Grenzwert für einen kleinen Effekt ($d=0,2$) bei Frequenzen um 1000 Hz erreicht wird.

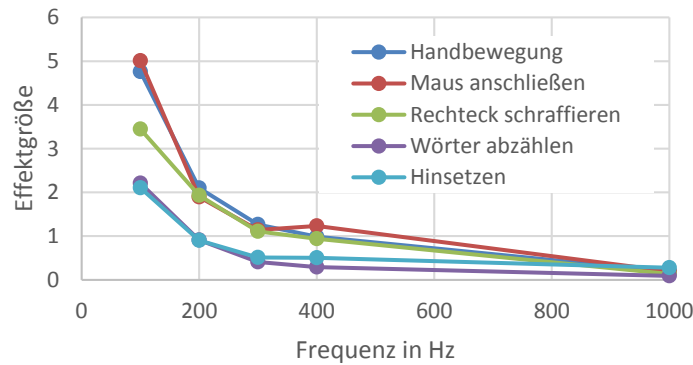


Abbildung 5-11: Effektgröße der Auffälligkeit, Tastverhältnis von 20%

Etwas niedrigere Ergebnisse bekommt man bei der Berechnung der Effektgröße für den Störfaktor, Abbildung 5-12. Allerdings liegt die Effektgröße für die Aufgaben mit schnellen Bewegungen im Bereich um 0,5. Das entspricht einem mittelgroßen Effekt.

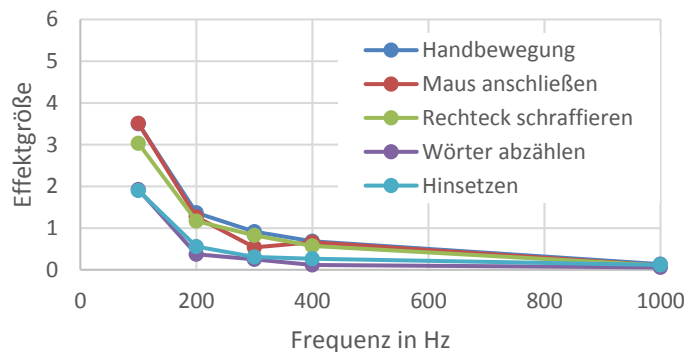


Abbildung 5-12: Effektgröße des Störfaktors, Tastverhältnis 20%

5.4. Fazit

Das hier beschriebene Experiment hatte das Ziel, die Auffälligkeit des Stroboskopeffektes bei einer pulswertenmodulierten LED-Beleuchtung in Abhängigkeit von Frequenz und Tastverhältnis zu untersuchen. Ein zusätzliches Ziel war es den Störungsgrad des Stroboskopeffektes zu ermitteln. Die Untersuchungsergebnisse basieren hierbei auf Bewertungen von 38 Testpersonen.

Die Untersuchung zeigt, dass sowohl die Auffälligkeit als auch der Störfaktor des Stroboskopeffektes mit steigender Frequenz exponentiell sinkt. Sie ist für kleine Tastverhältnisse größer. Bei Bewegungen mit Geschwindigkeiten um 500 %/s soll die PWM-Frequenz im Bereich um 1000 Hz oder höher liegen, um den Stroboskopeffekt zu vermeiden. Es existieren Bürotätigkeiten, bei denen eine ähnliche Objektgeschwindigkeit erreicht wird. Für PWM-Einstellungen mit Tastverhältnissen größer 20% kann die Frequenz kleiner 1000 Hz gewählt werden.

Da die Untersuchung mit instruierten Probanden durchgeführt wurde, zeigen die Ergebnisse extreme Werte hinsichtlich der visuellen Wahrnehmung. Bei Untersuchungen mit naiven Probanden, sind niedrigere Werte für die Auffälligkeit des Stroboskopeffektes zu erwarten.

Die ermittelte Streuung in den Bewertungen kann in künftigen Untersuchungen durch mehrere Wiederholungen reduziert werden.

Die Lichtbedingungen bzw. die Aufgaben, mit denen die Testpersonen befasst waren, entsprechen zwar nicht den Bedingungen im nächtlichen Straßenverkehr. Dennoch lässt sich eine Vermutung äußern, dass die kritische Frequenz im Straßenverkehr unter 1000 Hz liegen würde. Die schnelle Bewegung von 500 °/s würde hierbei in meisten Fällen durch die schnelle Augenbewegung entstehen. Während solchen Augenbewegungen nimmt jedoch das menschliche Auge praktisch nichts wahr, was dem Stroboskopeffekt entgegen wirken würde.

6. Fahrversuche

6.1. Einleitung

Die in Kapiteln 4 und 5 beschriebenen Untersuchungen zeigen, dass die Schwellenwerte für den Perlschnureffekt oberhalb 200 Hz liegen. Aufgrund der EMV-Problematik sowie damit verbundenen Kosten ist man in Kfz-Beleuchtung bestrebt möglichst niedrige Frequenzen für die Pulsweitenmodulation einzusetzen. Viele Hersteller verwenden Frequenzen im Bereich um 200 Hz.

Hauptziel der in folgenden Kapiteln beschriebenen Experimente ist es herauszufinden, ob unter Laborbedingungen ermittelte Schwellenwerte auf das visuelle Empfinden im realen nächtlichen Straßenverkehr übertragbar sind.

6.2. Voruntersuchungen

6.2.1. Mutispot-Prototyp

Für diese Untersuchung hat die Adam Opel AG ein Fahrzeug mit einem Multispot-Prototyp für die Fernlichtfunktion zur Verfügung gestellt. Zur Dimmung erzeugte die im Fahrzeug verbaute Steuerelektronik eine feste PWM-Frequenz von 200 Hz. Diese konnte nicht variiert werden. Die Ansteuerung einzelner Strahlen des Moduls lief nach einem Algorithmus, das nicht modifiziert werden konnte. Im stehenden Zustand wurde mittels einer Fotodiode beim Fernlicht im seitlichen Bereich ein Tastverhältnis von etwa 15% gemessen.

Methodik

Mit diesem Fahrzeug wurden Fahrversuche im realen Straßenverkehr im Dunkeln durchgeführt. Dafür wurde eine Strecke in der Umgebung von Darmstadt ausgewählt. Der Rundkurs beinhaltete 20 km Autobahn, 20 km Landstraße, 10 km Stadt und dauerte etwa 90 min pro Testperson. Der Landstraßenabschnitt wurde mit möglichst vielen Kurven ausgesucht, mit der Absicht, dass der Fahrer durch die Kurven häufig schnelle Augenbewegungen ausführt, verschiedene Bereiche der Lichtverteilung anschaut und dadurch den stroboskopischen Effekt provoziert. Vor der Fahrt wurde den Probanden der Stroboskopeffekt erläutert. Die Entstehung des Effektes durch schnelle Objektbewegung wurde durch das schnelle Schwenken der Hand vor dem Scheinwerfer deutlich gemacht. Der Perlschnureffekt wurde anhand eines PWM-gedimmten Kontrolllämpchens im Fahrzeuginnenraum erklärt. Dabei hatten die Probanden schnelle Augenbewegungen auszuführen. Die Testpersonen

wurden instruiert während des Fahrens nach diesen oder ähnlichen Effekten oder direkt wahrnehmbaren Flimmern zu suchen und im Falle der Detektion es zu berichten.

Ergebnisse

An dieser Untersuchung nahmen fünf Personen teil: Vier männliche im Alter zwischen 19 und 31 Jahren und eine 23-jährige Frau. Während der Fahrt entstanden viele unterschiedliche Verkehrssituationen. Sowohl auf der Autobahn als auch auf der Landstraße gab es Abschnitte unterschiedlicher Verkehrsaufkommen, so dass der Fahrer verschiedene Lichtverteilungen betrachten konnte.

Alle Probanden kannten den Stroboskopeffekt verursacht durch eine schnelle Bewegung. Vier Probanden war der Perlschnureffekt vor der Untersuchung nicht bekannt.

Keine der Testpersonen berichtete über das direkt wahrnehmbare Flimmern. An den Rädern vorbeifahrender Fahrzeuge nahmen alle Probanden den Wagenradeneffekt wahr. Sie bezeichneten ihn als nicht sicherheitskritisch und waren der Meinung in der normalen Fahrsituation, ihn nicht wahrnehmen zu können. Zwei Probanden sowie der Testleiter, der sich während der Fahrt am Beifahrersitz befand, nahmen etwas Ungewöhnliches an den Leitpfosten entlang der Straße sowie an einigen Schildern wahr. Vermutet wird der Perlschnureffekt. Aufgrund dynamischer Anpassung der Lichtverteilung des Scheinwerfers war es nicht möglich diesen Effekt reproduzierbar zu provozieren. Die Personen bewerteten ihn ebenfalls als nicht kritisch, nicht störend und nicht besonders auffällig. Viel auffälliger waren die stark angestrahlten Verkehrsschilder, welche sogar in verschiedenen Situationen von jeder Testperson als blendend bezeichnet wurden. Da es sich bei diesem Scheinwerfer um einen Prototyp handelt, ist denkbar, dass die Algorithmen für den Serienscheinwerfer so angepasst werden, dass die Schilder nicht mit voller Leistung angestrahlt werden, um die Blendung zu vermeiden. Die Leistungsreduzierung wird in dem Fall durch die Dimmung realisiert, was wiederum zum Perlschnureffekt führen könnte.

6.2.2. Dimmung kompletter Lichtverteilung

Die in Kapitel 6.2.1 beschriebene Untersuchungsergebnisse zeigen, dass der Perlschnureffekt und andere stroboskopische Effekte, wenn sie wahrnehmbar sind, von einem PWM-gedimmten Scheinwerfer im realen Straßenverkehr kaum auffällig sind. Dennoch stellt sich die Frage, ab welcher Frequenz diese Effekte nicht wahrnehmbar sind. Da es nicht möglich war, das PWM-Signal am Multispot-Prototyp zu variieren, wurde in dieser Untersuchung die Beleuchtung aus der in Kapitel 4 beschriebenen Laboruntersuchung eingesetzt.

Methodik

Die LED ohne den LCTF wurde auf dem Dach eines Fahrzeuges befestigt. Im Fahrzeuginnen wurde die Steuerelektronik platziert. Das Fahrzeug stand an einer Kreuzung einer Waldstraße mit vielen retroreflektierenden Schildern (Abbildung 6-1). Der Abstand zu den Schildern betrug etwa 15 m. Die Helligkeit der LED im ungedimmten Zustand wurde mittels Stromreduzierung an die Leuchtdichte auf den Schildern, die sich durch das Xenon-Fernlicht vom Fahrzeug ergibt, angepasst. Während der Untersuchung war das Xenon-Abblendlicht angeschaltet. Die Probanden hatten die Aufgabe schnelle Augenbewegungen ausgehend von

den Schildern zur Seite hin und her auszuführen. Dabei berichteten sie, wenn sie den Perlschnureffekt wahrnehmen konnten. Angefangen bei 100 Hz stellte der Testleiter demnach eine höhere Frequenz in 20 Hz Schritten ein. Nach dem die Testperson nicht in der Lage war, den Perlschnureffekt wahrzunehmen, wurde die Frequenz in 5 Hz Schritten reduziert, bis die Testperson ihn wieder detektierte.



Abbildung 6-1: Testort, Kreuzung einer Waldstraße

Ergebnisse

An der Untersuchung haben 4 Personen im Alter zwischen 22 und 30 Jahren teilgenommen. Die eingestellten Frequenzen sind in der Abbildung 6-2 dargestellt. Alle Testpersonen kannten bereits den Perlschnureffekt. Die Testperson 2 hatte bereits an anderen Untersuchungen zum Stroboskopeffekt teilgenommen. Die dabei gesammelte Erfahrung könnte ein Grund für die unter den Probanden höchste Schwellenfrequenz von 430 Hz sein. Jedenfalls liegen die Ergebnisse aller Probanden deutlich über 300 Hz. Der Unterschied zu den Fahrttests mit dem Multispot Prototypen könnte darin begründet sein, dass im realen Straßenverkehr Situationen, in welchen der Perlschnureffekt physiologisch gesehen wahrnehmbar wäre, nur von kurzer Dauer sind und dadurch nicht auffällig.

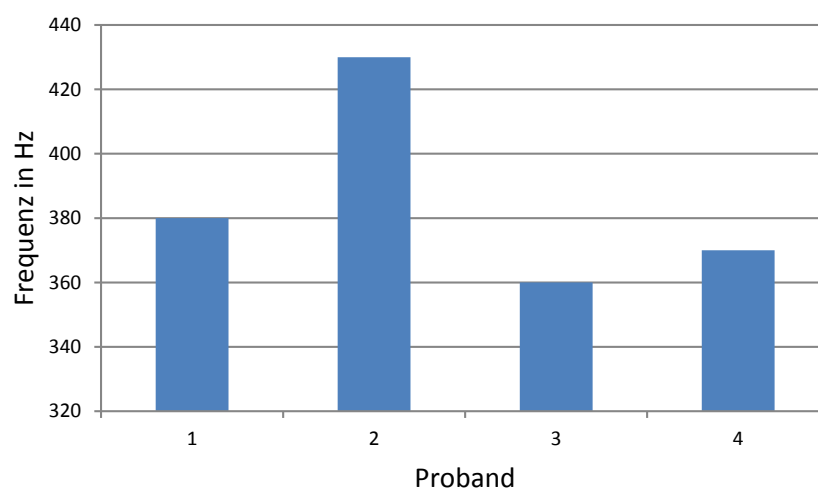


Abbildung 6-2: Schwellenfrequenz, Perlschnureffekt an Schildern

6.2.3. Eigenbau aus Kfz-Scheinwerfermodulen

Die in Kapiteln 6.2.1 und 6.2.2 beschriebenen Untersuchungsergebnisse zeigen deutlich, dass nicht nur das PWM-Signal alleine dafür verantwortlich ist, ob der Fahrer in der Lage ist den Perlschnureffekt wahrzunehmen. Die Aufgabe das Fahrzeug sicher im Straßenverkehr zu führen, ist offensichtlich ein weiterer Faktor, der unsere Wahrnehmung beeinflusst. Das Ziel des im Folgenden beschriebenen Tests ist die Untersuchung dieses Aspektes.

Methode

Da Multispot Scheinwerfer sehr komplexe Systeme sind, gestaltet sich die Änderung der PWM-Frequenz im fahrenden Fahrzeug sehr schwierig. Aus diesem Grund wurde eine Frontbeleuchtung aus LED-Modulen, die bereits in Serienfahrzeugen verfügbar waren, entwickelt. Zum Einsatz kamen LED-Module der aktuellen Mercedes S- und CLS-Klasse. Mit den Modulen der S-Klasse wurde die Abblendlichtverteilung erzeugt. Diese wurden auf einem Rahmen befestigt und zueinander nach der UN/ECE-Regelung R112 auf einem Kfz-Goniophotometer ausgerichtet. Danach wurde dieser Rahmen mit den Modulen im Frontbereich eines Fahrzeugs vom Typ BMW 5er-Serie montiert und erneut ausgerichtet (Abb. 6.3).



Abbildung 6-3: Befestigung LED-Module am Fahrzeug

Module der Mercedes CLS-Klasse erzeugten Fernlichtverteilung und wurden im Bereich der Nebelscheinwerfer positioniert und ebenfalls ausgerichtet (Abb. 6.4).



Abbildung 6-4: Fernlichtmodul der CLS-Klasse

Zur Dimmung des Fernlichtes wurde die speziell entwickelte Elektronik wie im Versuch in Kapitel 5 eingesetzt. Diese ermöglicht eine beliebige Einstellung des PWM-Signals bis in Kiloherzbereich. Außerdem ist möglich, den maximalen Strom im Bereich zwischen 0 und 1 A beliebig einzustellen. Eine weitere wichtige Eigenschaft dieser Elektronik, dass die Einstellungen im laufenden Betrieb vom PC aus vorgenommen werden können. Dadurch war es möglich das PWM-Signal (Tastverhältnis und Frequenz), während der Fahrt zu ändern.

Vor den Untersuchungen mit Probanden fuhr der Autor mit diesem Fahrzeug auf verschiedenen Strecken im öffentlichen Straßenverkehr. Während der Fahrt wurden in randomisierter Reihenfolge verschieden PWM-Signale für das Fernlicht fortlaufend eingestellt. Insgesamt gab es 30 verschiedene Steuersignale: Zu je 4 Frequenzen (100, 200, 400, 800 Hz), 6 Tastverhältnisse (5%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%). Zusätzlich gab es zu jedem Tastverhältnis eine entsprechende flimmerfreie Einstellung, bei der die Helligkeit mittels der Stromreduzierung eingestellt wurde. Der Fahrer musste den Perlschnureffekt durch schnelle Augenbewegungen provozieren und nach seinem Erscheinen ein Knopf drücken. Mit dem Knopfdruck bzw. nach dem Ablauf einer Minute wurde die nächste Einstellung vorgenommen. Ob der Fahrer den Knopf betätigt hatte oder nicht, wurde in einer Datei automatisch gespeichert. Die Fahrten fanden an fünf Nächten unter trockenen Straßenverhältnissen statt. Jede Fahrt hat etwa 2 Stunden gedauert. Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse aus den Ergebnissen ableiten:

- Flimmern ist nicht direkt wahrnehmbar;
- Perlschnureffekt erscheint nur an retro-reflektierenden Objekten, wie Schilder oder Leitpfosten;
- Maximale Detektionshäufigkeit für 800 Hz ist sehr gering und beträgt ca. 7%;
- Für Tastverhältnisse oberhalb 40% ist die Detektionsrate unter 3%;
- Perlschnureffekt ist an kurvigen Landstraßen einfacher zu provozieren.

Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden für die Probandentest folgende neun PWM-Signale ausgesucht: Helligkeitsstufen von 5%, 10%, 20% (jeweils PWM und Konstantstrom) bei 100 Hz und 200 Hz. Als Teststrecke wurde eine kurvige Straße zum Burg Frankenstein bei Darmstadt ausgewählt. Die 2,7 km lange öffentliche Strecke besitzt viele Retroreflektoren entlang der Straße.

Die Testpersonen wurden von Zuhause aus abgeholt und fuhren mit dem Fahrzeug zu der Teststrecke. Dabei war das Fernlicht auf 10% bei 200 Hz gedimmt. Die Testperson wurde nicht darüber informiert. Als Ziel der Untersuchung wurde die Homogenität und Helligkeit des Scheinwerferlichtes angegeben. Die Testperson wurde aufgefordert Retroreflektoren und Verkehrsschilder nach ihrer Helligkeit zu beurteilen. Nach der Ankunft an der Teststrecke und einer Runde darauf wurde das eigentliche Ziel der Untersuchung erläutert. Der Perlschnureffekt wurde an einem Verkehrsschild und einigen retroreflektierenden Leitpfosten deutlich gemacht. Anschließend wurde eine Runde bei jeweils einer PWM-Einstellung gemacht. Die Testperson hatte als Aufgabe schnelle ruckartige Augenbewegungen auszuführen um den Perlschnureffekt zu provozieren.

Ergebnisse

An dieser Untersuchung haben fünf Personen im Alter zwischen 26 und 55 Jahren teilgenommen, darunter 3 weibliche und 2 männliche Personen. Keine der Testpersonen kannte den Perlschnureffekt, auch nicht von PWM-gediminten Rückleuchten. Obwohl jede

Testperson während der Fahrt zur Teststrecke Leitposten und Schilder anzublicken hatten, nahmen die Testpersonen weder den Perlschnureffekt noch etwas Ungewöhnliches wahr. Die Ergebnisse von den Fahrten auf der Teststrecke sind in der folgenden Tabelle 6-1 zusammengefasst. Dabei bedeutet der Wert „1“, dass der Perlschnureffekt vom Probanden bei der entsprechenden Einstellung wahrgenommen wurde. Der Wert „0“ steht, wenn der Effekt nicht detektiert werden konnte. Bei Einstellungen mit flimmerfreien Licht gab es keine Fehldetektionen.

		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

Tabelle 6-1: Ergebnisse Voruntersuchung, Perlschnureffekt

Hier sieht man deutlich, dass die Detektionsrate bei 100 Hz und kleinem Tastverhältnis niedriger ist als die bei 200 Hz. Ein möglicher Grund dafür könnte die Tatsache sein, dass der Abstand zwischen den Nachbildern auf der Retina bei 100 Hz größer ist. Das könnte dazu führen, dass der Perlschnureffekt dadurch weniger auffällig ist. Obwohl keiner der Testpersonen den Effekt bei 10% und 200 Hz während der Fahrt zur Teststrecke wahrnahm, konnte jede Testperson, nachdem ihr der Effekt erklärt wurde, bei dieser Einstellung ihn hervorrufen. Allerdings gaben allen Testpersonen an, dass das zum Provozieren dieses Effektes notwendiges Blickverhalten nicht der normalen Augenbewegung im Straßenverkehr entspricht. Des Weiteren bewerteten alle Probanden den Effekt als nicht irritierend oder störend. Die Personen P1, P2 und P5 hatten den Effekt bei 200 Hz und 20% Tastverhältnis detektiert.

6.3. Untersuchung mit einem Serienfahrzeug mit LED-Scheinwerfern

Es ist aus den Ergebnissen der Voruntersuchung ersichtlich, dass beim gewöhnlichen Autofahren die Aufmerksamkeit des Fahrers primär auf das sichere Führen des Fahrzeugs gelegt. Demnach ist der Perlschnureffekt verursacht durch die PWM-Dimmung der Frontscheinwerfer nicht auffällig, obwohl er unter denselben Lichtverhältnissen wahrnehmbar wäre. In dieser Untersuchung soll die Aufmerksamkeit beim normalen Führen eines Fahrzeugs herbeigeführt werden, damit die Probanden von der Detektionsuntersuchung abgelenkt werden. Die unter diesen Umständen ermittelten Schwellenfrequenzen werden dann mit Schwellenfrequenzen verglichen, bei deren Ermittlung die Aufmerksamkeit der Testpersonen auf die Detektion des Perlschnureffektes liegt.

6.3.1. Methodik

Für diese Untersuchung wurde ein Serienfahrzeug Audi A3 Sportback ausgewählt. Sowohl das Abblend- als auch Fernlicht ist in diesem Kraftfahrzeug auf Basis von LEDs realisiert. Beim Fernlicht handelt es sich um eine feste nicht änderbare Lichtverteilung. Im normalen Betrieb wird diese auch nicht gedimmt. Für die Untersuchung wurde die Zuleitung zu den LEDs, die das Fernlicht erzeugen, von der Firma Hella KGaA Hueck & Co. so angepasst, dass es möglich war das Fernlicht über eine externe Elektronik mit Strom zu versorgen. Zur Ansteuerung kam die Elektronik aus den Vorversuchen.

Als Testsignale kamen folgende PWM-Signale zum Einsatz:

- Tastverhältnisse von 10% und 40%,
- Frequenzen von 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz,
- Flimmerfreies Licht gedimmt mittels Stromreduzierung auf 10% und 40%.

Mit jeweils drei Wiederholungen ergaben sich 24 Einstellungen, die für jeden Probanden in einer randomisierten Reihenfolge getestet wurden. Die Ergebnisse der Voruntersuchung haben gezeigt, dass sich die Probanden innerhalb der ersten Sekunden entscheiden können, ob der Perlschnureffekt wahrnehmbar ist oder nicht. Aus diesem Grund wurde jede Einstellung für 30 Sekunden dargeboten. Der Testperson wurde ein Knopf auf den Finger angebracht. Diesen musste sie betätigen, sobald der Perlschnureffekt entdeckt wurde. Zum Provozieren des Perlschnureffektes musste der Proband schnelle Augenbewegungen ausführen.

Die Fahrversuche fanden nachts auf einer öffentlichen Landstraße mit vielen retro-reflektierenden Leitpfosten und einigen Schildern. Die Strecke, die mehrfach abgefahren wurde, war 2,3 km lang.

Wie im Vorversuch (vgl. Kapitel 6.2.3) fuhren die Testpersonen zu der Teststrecke mit dem auf 20% gedimmten Fernlicht und mussten auf die Helligkeit von retroreflektierenden Objekten achten und diese beurteilen. Die PWM-Frequenz wurde dabei jede 30 Sekunden zwischen 100 Hz und 200 Hz gewechselt. Die Fahrt zur Teststrecke dauerte 20 bis 40 Minuten. Nach der Ankunft an der Teststrecke wurde darauf eine Runde gefahren, bevor das eigentliche Ziel der Untersuchung erläutert wurde.

6.3.2. Ergebnisse

An der Untersuchung haben 16 Probanden teilgenommen. 7 Personen waren jünger als 25 Jahre mit dem Durchschnittsalter von 23 Jahren. 3 Personen waren im Alter zwischen 25 und 35 Jahren mit dem Durchschnittsalter von 32 Jahren. 6 Personen waren über 40 Jahre, das Durchschnittsalter bei 53 Jahren.

Unter allen Probanden kannten 5 Personen bereits den Perlschnureffekt. Allerdings nahm ihn keiner der Testpersonen während der Fahrt zur Teststrecke wahr.

Da jede Einstellung 3 Mal während der Fahrt vorkam, wurde für jeden Probanden eine Entdeckungsrate für die jeweilige Einstellung gebildet. Bei 3 Wiederholungen sind 4 Stufen möglich:

1. 0% - 3 mal nicht detektiert,
2. 33% - 1 Mal detektiert, 2 Mal nicht detektiert,
3. 67% - 2 Mal detektiert, 1 Mal nicht detektiert
4. 100% - jedes Mal detektiert.

Die Häufigkeit der Entdeckungsraten bei dem Tastverhältnis von 10% ist in der Abbildung 6-5 dargestellt.

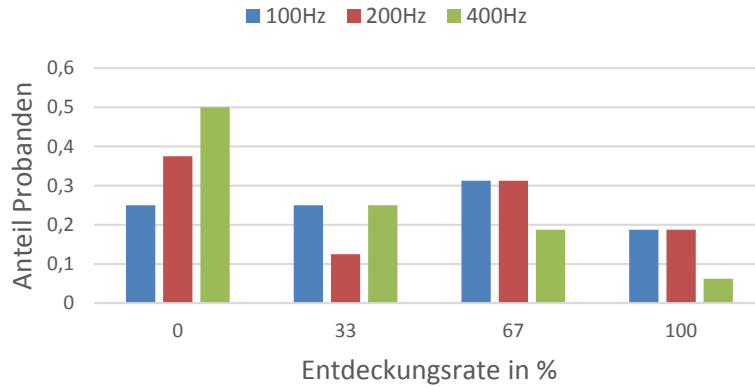


Abbildung 6-5: Entdeckungsrate Perlschnureffekt, Tastverhältnis 10%

Es ist ersichtlich, dass die Hälfte aller Probanden den Perlschnureffekt bei 400 Hz nicht wahrnahm. Während bei 100 Hz und 200 Hz etwa 20% (3 Personen) aller Probanden den Effekt eindeutig detektierten (Entdeckungsrate 100%), waren es bei 400 Hz nur ca. 6% (1 Person).

Nimmt man die Entdeckungsrate von 50% als Grenzwert dafür, ob der Effekt gut oder schlecht detektiert werden kann, ergibt sich für das Tastverhältnis von 10% folgende Verteilung aus der Abb. 6.6.

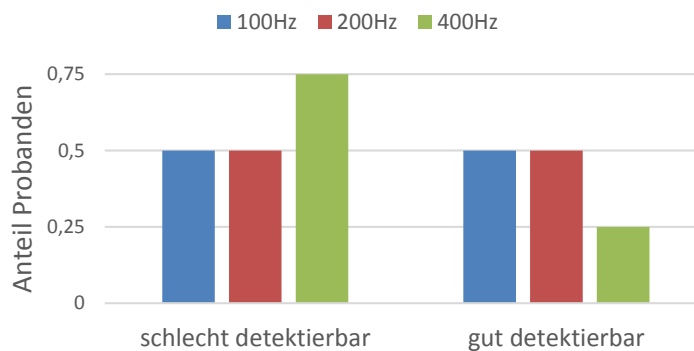


Abbildung 6-6: Detektierbarkeit Perlschnureffekt, Tastverhältnis 10%

Demnach kann die Hälfte aller Teilnehmer den Perlschnureffekt sowohl bei 100 Hz als auch bei 200 Hz gut detektieren. Bei 400 Hz war es nur ein Viertel. Die Ergebnisse für das Tastverhältnis von 40% sind in der Abbildung 6-7 dargestellt. Hier ist der Anteil von Probanden, die den Effekt gut detektieren konnten, bei jeder Frequenz gleich und beträgt ein Drittel. Der Grund für den Anstieg bei 400 Hz könnte darin liegen, dass der Perlschnureffekt aufgrund des höheren Helligkeitsniveaus auffälliger ist.

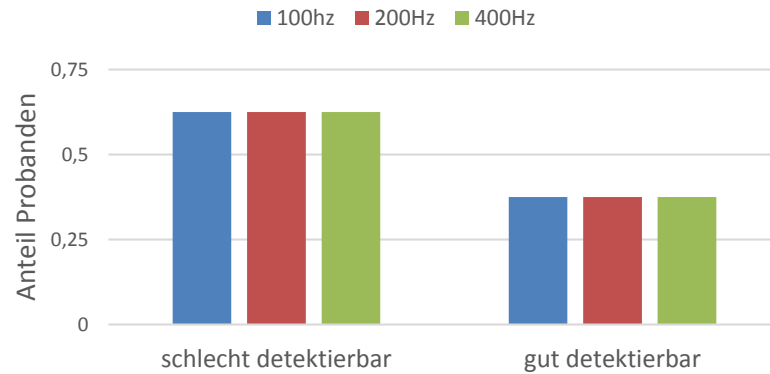


Abbildung 6-7: Detektierbarkeit Perlschnureffekt, Tastverhältnis 40%

Bei flimmerfreien Einstellungen gab es keine Fehldetektionen. Auch bei diesen Untersuchungen gaben Probanden an, dass das Blickverhalten zum Provozieren des Perlschnureffektes nicht dem normalen Blickverhalten während des Führens eines Kraftfahrzeuges entspricht.

6.4. Fazit

Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt, der durch die PWM-Dimmung der Fernlichtverteilung entsteht, kann bei der in der Kfz-Beleuchtung verbreiteten Frequenz von 200 Hz deutlich wahrgenommen werden. Der Perlschnureffekt entsteht dabei hauptsächlich an retroreflektierenden Objekten wie Leitpfosten oder Verkehrsschilder. Bei einem Tastverhältnis von 10% konnte die Hälfte aller Probanden den Perlschnureffekt wahrnehmen. Die Erhöhung der PWM-Frequenz wirkt dem Effekt entgegen. Während er bei 400 Hz je nach Tastverhältnis von etwa einem Drittel aller Testpersonen gut detektiert werden konnte, soll er bei 800 Hz kaum wahrnehmbar sein.

Um den Perlschnureffekt wahrzunehmen, sind schnelle ruckartige Augenbewegungen erforderlich. Die Untersuchungsergebnisse zeigen deutlich, dass solche Augenbewegungen beim Führen eines Kraftfahrzeuges sehr selten vorkommen bzw. dass der Perlschnureffekt die Aufmerksamkeit des visuellen Systems nicht erregt und lediglich nicht wahrgenommen wird.

7. Untersuchungen an einem Straßenmodell

7.1. Einleitung

Die in Kapitel 6 beschriebenen Fahrversuche sind sehr zeitintensiv. Pro eine Testperson sind je nach Testdesign mindesten 2 Stunden erforderlich. Deshalb wurden weitere Laboruntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden die Lichtverhältnisse möglichst nah an die Nachtfahrtbedingungen angepasst. Die Testpersonen hatten die Aufgabe in verschiedenen Szenarios den Perlschnureffekt durch schnelle Augenbewegungen zu provozieren. Die dabei gewonnenen Ergebnisse können zwar nicht direkt auf die realen Bedingungen im Straßenverkehr übertragen werden. Sie stellen allerdings das Worst-Case-Szenario dar und erlauben eine Einschätzung hinsichtlich der Einflussfaktoren.

7.2. Untersuchungen

Für die im Folgenden behandelten Untersuchungen wurde die in Kapitel 4 beschriebene Box erweitert. Dabei wurde ein Miniaturmodell einer Straße im Maßstab 1:18,75 erstellt. Damit entspricht der Abstand zur Rückwand von 80 cm einem Abstand von 15 m. Der Straßenbelag wurde durch die Dachpappe simuliert. Außerdem wurden einige Verkehrsschilder aus retroreflektierenden Folien, welche für reale Verkehrsschilder verwendet werden, erstellt. Die Abbildung 7-1 zeigt eine Aufnahme von dem Straßenmodell aus Sicht der Testperson.



Abbildung 7-1: Miniaturmodell

Zum Hervorrufen des Perlschnureffektes wurden verschieden Versuchsabläufe erarbeitet.

7.2.1. Straßenkreuzung

Ziel dieser Untersuchung ist die Ermittlung der Auffälligkeit des Perlschnureffektes an Verkehrsschildern einer Straßenkreuzung. Dafür wurde im Miniaturmodell die Lichtverhältnisse einer realen Kreuzung nachgestellt. Zum Provozieren des Perlschnureffektes hatten die Probanden natürliche Augenbewegungen auszuführen.

Die Leuchtdichteaufnahme von der in Kapitel 6.2.2 beschriebenen Szene ist in der Abbildung 7-2 dargestellt. Hierbei wurden sowohl das Ablend- als auch Fernlicht eines Bi-Xenon Scheinwerfers eingeschaltet.

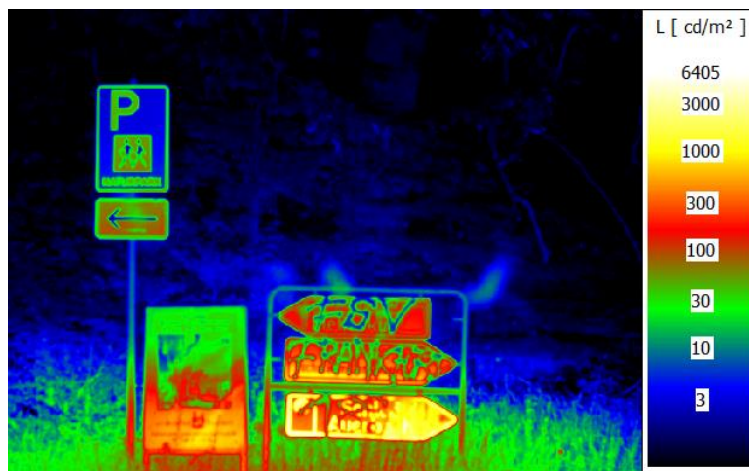


Abbildung 7-2: Leuchtdichteaufnahme reale Szene

Zur Lichterzeugung wurden im Miniaturmodell zwei Hochleistungs-LEDs mit der Farbtemperatur von 5000 K eingesetzt. Diese wurden mittels der in den Fahrversuchen

verwendeten Elektronik angesteuert. Der Abstrahlwinkel der entwickelten Beleuchtung liegt im Bereich von 40° . Der maximale Strom wurde so eingestellt, dass sich eine der realen Szene ähnliche Leuchtdichteverteilung ergibt. Die Abbildung 7-3 zeigt die resultierende Leuchtdichteaufnahme. An der mit dem Molton überzogenen Rückwand der Box ergab sich eine Leuchtdichte von $3\text{--}8\text{ cd/m}^2$. Das wurde von mehreren Probanden als zu hell und nicht realitätsnah angesehen und bemängelt.



Abbildung 7-3: Leuchtdichteaufnahme Miniaturmodell

In den Regelungen zur Auslegung lichttechnischer Parameter eines Kfz-Scheinwerfers geht man von einer Augenhöhe des Fahrers von $1,25\text{ m}$. Umgerechnet auf den Maßstab des Miniaturmodells ergibt sich zwischen dem Probandenaug und der Straßenebene eine Höhendifferenz von $6,4\text{ cm}$. Dies wurde mittels der in der Höhe einstellbaren Kopfstütze erreicht. Die Abbildung 7-4 (zur besseren Übersicht ohne Kopfstütze) verdeutlicht die bei dem Test verwendete Anordnung.



Abbildung 7-4: Proband am Miniaturmodell

Die LEDs, die die Scheinwerfer simulieren, wurden auf einer Höhe von ca. 4 cm über der Straßenebene angebracht, was einer realen Anbauhöhe von ca. 75 cm entspricht.

Zwischen den Schildern in der Mitte (weißer und gelber Pfeilwegweiser) wurde eine RGB-LED erkennbar befestigt. Eine weitere RGB-LED wurde ca. 45° links von der Testperson montiert (gelber Punkt links in Abbildung 7-5). Die Ströme für die RGB-Kanäle wurden so ausgewählt, dass die Leuchtdichte für jede Grundfarbe (rot, grün, blau) bei ca. 1 cd/m^2 lag.

Dadurch wurde die Farbe der linken RGB-LED aus dem Augenwinkel nicht erkennbar. Um sie zu erkennen, wurde eine Augenbewegung notwendig, was für die Untersuchung erforderlich war.



Abbildung 7-5: Linke Fixations-LED

Methoden

Aus Videoaufnahmen eines Fahrers wurde die durchschnittliche Dauer des Seitenblicks auf einer Kreuzung von ca. 400 ms ermittelt. Um es im Versuch zu simulieren, wurden die beiden RGB-LEDs für 400 ms eingeschaltet. In dieser Zeit musste die Testperson ausgehend von der mittleren LED auf die linke LED einen schnellen Blickwechsel ausführen. Da die RGB-LEDs, während sie eingeschaltet waren, ein zeitlich konstantes, also flimmerfreies, Licht emittierten, konnte der Perlschnureffekt nur an den Schildern auftreten, die von den Hochleistungs-LEDs angestrahlt waren.

Nach dem Ausführen schnellen Blickwechsels folgte die Bewertung, ob der Perlschnureffekt auftrat und wenn ja wie stark. Für die diskrete Bewertung wurde eine Skala von 1 bis 5 verwendet. Dabei bedeutet

1 – der Perlschnureffekt trat nicht auf und

5 – der Perlschnureffekt war sehr deutlich zu sehen.

Die Skalierung der Werte dazwischen wurde der Testperson überlassen. Am Anfang der Untersuchung wurden zwei Testdurchläufe einmal bei 60 Hz und Tastverhältnis von 20%, dies sollte als Anker für die Bewertung von 5 dienen, und einmal bei der gleichen Leuchtdichte und flimmerfreiem Licht, als Anker für eine Bewertung von 1.

Um sicher zu stellen, dass die Testperson die beiden LEDs angeschaut hat, und damit eine schnelle Augenbewegung ausgeführt hat, wurde die Farbe jeder LED randomisiert eingestellt. Dabei wurden keine Mischfarben sondern nur die Grundfarben Rot, Grün oder Blau verwendet. Durch die Betätigung eines entsprechenden Knopfes gab die Testperson an, ob die Lichtfarben der beiden RGB-LEDs gleich oder unterschiedlich sind. Für den Versuchsablauf sowie für die Ansteuerung der Geräte wurde eine Software entwickelt.

Eine weitere Bewertung bezog sich auf die Auffälligkeit des Perlschnureffektes beim Betrachten der Szene. Die Probanden wurden gebeten, die Objekte (Schilder, Straße) so anzuschauen, als würden sie an die Kreuzung sitzend in einem Fahrzeug zufahren. Für die Bewertung wurde die gleiche Skala verwendet.

Untersucht wurden folgende Lichteinstellungen:

- Tastverhältnisse von 20% und 50%
- Frequenzen von 60 Hz, 200 Hz, 400 Hz und 800 Hz,
- Flimmerfreies Licht mittels Stromreduzierung auf 20% und 50%.

Diese Einstellungen wurden jeweils 3 Mal wiederholt und in einer für jeden Probanden randomisierten Reihenfolge dargeboten. Somit ergaben sich 30 Konditionen.

Ergebnisse

An dieser Untersuchung haben 10 Personen im Alter zwischen 22 und 35 Jahren beim Durchschnittsalter von 31 Jahren teilgenommen.

Aus den Bewertungen der drei Wiederholungen wurde ein Mittelwert für die jeweilige Einstellung gebildet. Die Häufigkeit der Bewertungsmittelwerte für den schnellen Blickwechsel ist in der Abbildung 7-6 dargestellt. In der Abbildung 7-7 sind hingegen die Ergebnisse für das Betrachten der Szene zu sehen.

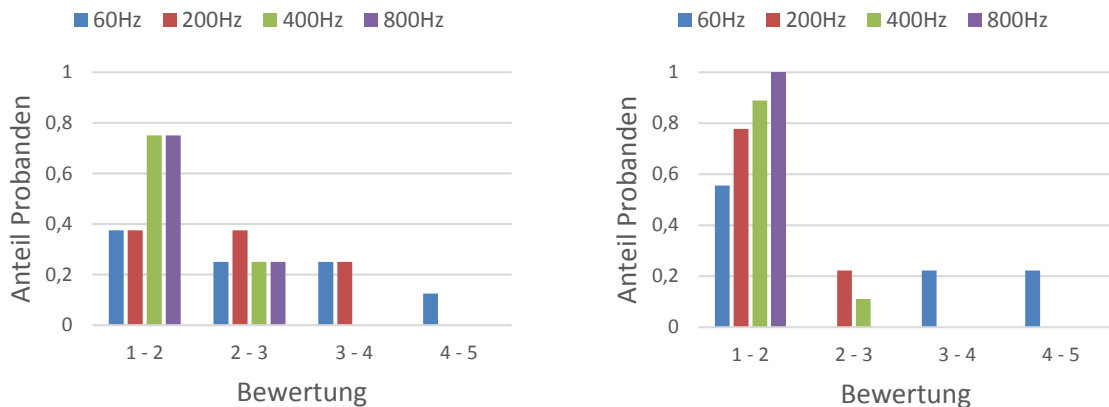


Abbildung 7-6: Häufigkeit der Bewertungsmittelwerte bei schnellem Blickwechsel, Tastverhältnis 20% (links) 50% (rechts)

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass ab 400 Hz und bei Tastverhältnis von 50% der Perlschnureffekt kaum wahrnehmbar ist. Bei Tastverhältnis von 20% und schnellen Augenbewegungen mit einer Nebenaufgabe haben über 70% aller Probanden Schwierigkeiten den Effekt wahrzunehmen, während es beim Betrachten der Szene 60% der Teilnehmer sind. Durch die Bewertung größer 2 ist ersichtlich, dass der Perlschnureffekt bei 200 Hz deutlicher wahrgenommen wird als bei 400 Hz.

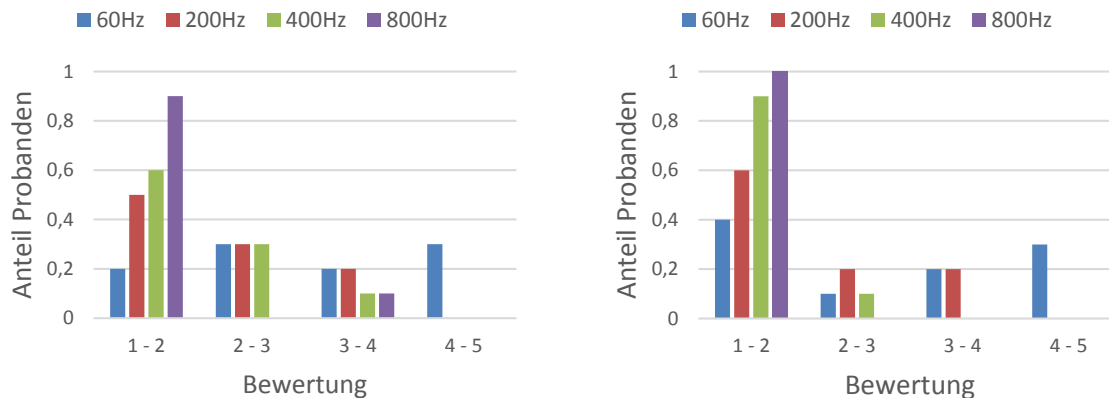


Abbildung 7-7: Häufigkeit der Bewertungsmittelwerte bei Betrachten der Szene, Tastverhältnis 20% (links) 50% (rechts)

7.2.2. Multispotmodell

Ziel dieses Experiments war die Ermittlung der Detektionswahrscheinlichkeit beim gezielten Provozieren des Perlschnureffektes. Zudem wurde untersucht, ob der Effekt auffällig ist, wenn die Aufmerksamkeit der Testperson auf die Bewertung anderer Effekte gelegt ist.

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Experiment, wurde bei dieser Untersuchung eine Beleuchtung mit einer abbildenden Optik entwickelt. Diese Beleuchtung erzeugt einen wesentlich schmalen nahezu rechteckigen Strahl von $1^\circ \times 2^\circ$, was einem Multispotsystem näher kommt. Dadurch wurde der Hintergrund deutlich dunkler. Die Szene sah laut Probanden realitätsnah. In der Beleuchtung wurden LEDs vom Typ LUXEON® Altilon Formfaktor Ix2 mit Farbtemperatur von 5700 K. LEDs dieses Typs werden in Kfz-Beleuchtung eingesetzt und sind speziell dafür entwickelt worden. Es wurden zwei Strahler gebaut. Jeder bestand aus einer LED, die auf einem aktiven Kühler befestigt wurde. Zur Erzeugung eines schmalen Strahls wurden zwei Linsen verwendet, einer direkt vor der LED, die andere in einem Abstand. Beide Linsen wurden an einem Tubus befestigt (Abbildung 7-8).

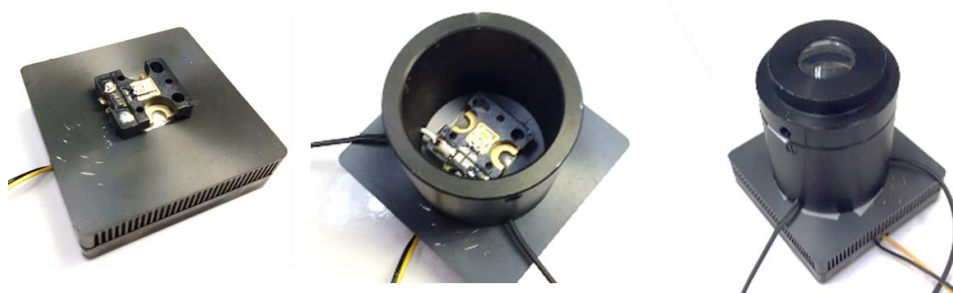


Abbildung 7-8: Strahler

Mit diesen Strahlern wurden zwei Schilder angeleuchtet. Zur Simulation des Abblendlichtes wurden zwei ähnlich aufgebaute Module verwendet. Der Abstrahlwinkel betrug ca. 40° . Die Abb. 7.9 zeigt die Leuchtdichteaufnahme.

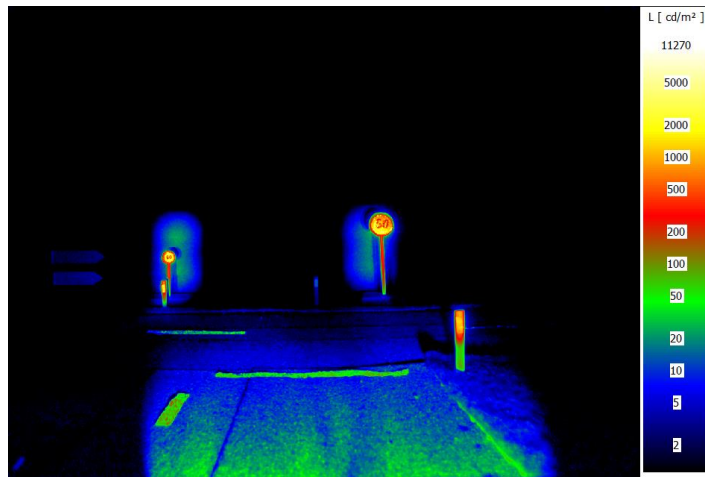


Abbildung 7-9: Leuchtdichteaufnahme, Multispot

Methoden

In den ersten zwei Teilen des Experiments wurde die Helligkeit der beleuchteten Schilder untersucht. Zunächst hatte die Testperson mittels der Staircase-Methode die Helligkeit der Schilder so einzustellen, dass sie hell aber nicht blendend erscheinen. Danach wurden 6 Helligkeitsstufen von 10%, 20%, 40%, 60%, 80% und 100% nacheinander dargeboten. Die Testperson hatte jeder Helligkeitsstufe umgehend einen der drei Begriffe zuzuordnen: Hell, normal oder dunkel. Die Einstellung der Helligkeit bei diesen beiden Aufgaben geschah mittels PWM bei 100 Hz.

Anschließend wurde der Perlschnureffekt erläutert. Im weiteren Testverlauf musste die Testperson schnelle Blickwechsel zwischen den beiden Schildern ausführen. In einem Vorversuch hat sich gezeigt, dass 2-3 Blickwechsel ausreichend sind, um sich zu entscheiden, ob der Perlschnureffekt wahrnehmbar ist. Den Probanden wurde es demnach so empfohlen. Getestet wurden die folgenden Einstellungen:

- Tastverhältnisse von 10%, 20%, 40% und 60%
- Frequenzen von 100 Hz, 200 Hz und 400 Hz
- Flimmerfreies Licht gedimmt mittels Stromreduzierung auf 10%, 20%, 40% und 60%.

Jede Einstellung wurde in einer randomisierten Reihenfolge dargestellt und 5 Mal wiederholt. Zur Entscheidung wurden 10 s gegeben, nach deren Ablauf die Testperson gebeten wurde, sich zu entscheiden, ob der Perlschnureffekt wahrnehmbar ist oder nicht. Beim Entdecken des Perlschnureffektes wurde nächste Einstellung umgehend vorgenommen.

Ergebnisse

An dieser Untersuchung haben insgesamt 58 Personen teilgenommen. Die Verteilung nach drei Altersgruppen ist in der Abbildung 7-10 gegeben. Für die Gruppe unter 25 Jahren ist der Durchschnittsalter bei 22 Jahren. Zu dieser Gruppe gehören ausschließlich Studenten. Die meisten davon haben zum ersten Mal an einer lichttechnischen Untersuchung teilgenommen. Der durchschnittliche Alter der Gruppe zwischen 25 und 40 Jahren lag bei 29 Jahren. 7 Personen aus dieser Gruppe sind Mitarbeiter des Fachgebiets Lichttechnik an der Technischen Universität Darmstadt. Die übrigen Personen (davon 8 Studenten) haben zum ersten Mal an einer lichttechnischen Untersuchung teilgenommen. Von 8 Personen in der Altersgruppe über

40 Jahren hat nur eine Person Erfahrungen mit lichttechnischen Untersuchungen gehabt. Der Durchschnittsalter in dieser Gruppe lag bei 55 Jahren.

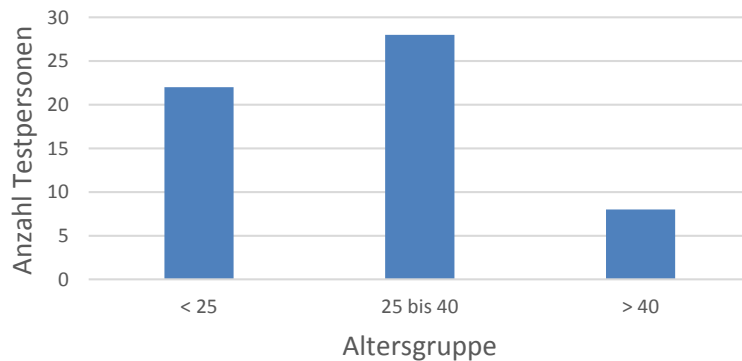


Abbildung 7-10: Anzahl Testpersonen nach drei Altersgruppen

42 Personen war der Perlschnureffekt bis dieser Untersuchung unbekannt. 16 Personen hingegen kannten bereits diesen Effekt. 9 von diesen Personen haben an den in Kapitel 6 beschriebenen Fahrversuchen teilgenommen.

Bei dem Einstellen der optimalen Helligkeit an den Schildern ergab sich die folgende Verteilung. Die meisten Teilnehmer würden demnach eine Helligkeit beim Tastverhältnis zwischen 50% und 60% präferieren (Abb. 7.11).

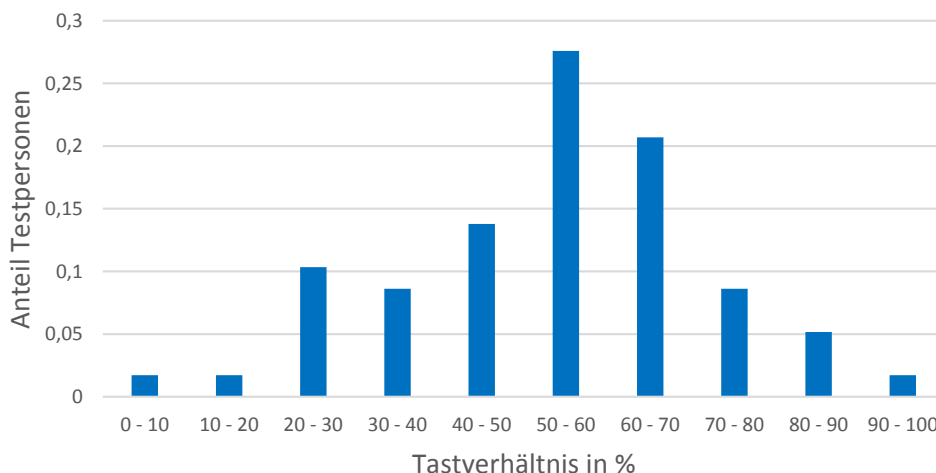


Abbildung 7-11: Histogramm optimale Helligkeit

Aus dem zweiten Teil des Tests geht hervor, dass die meisten Probanden die Helligkeit bei 40% Tastverhältnis als normal bezeichnen. Gleichzeitig empfinden 13% aller Probanden diese Einstellung als hell und genauso viele als dunkel. Demnach könnte das Tastverhältnis von 40% ein guter Kompromiss sein (Abb. 7.12).

Nur 4 Personen, die bereits an einer Untersuchung zum Perlschnureffekt teilgenommen haben, ist der Perlschnureffekt während der ersten zwei Teilen des Versuchs aufgefallen. Allerdings ist hier nicht auszuschließen, dass sie voreingenommen waren.

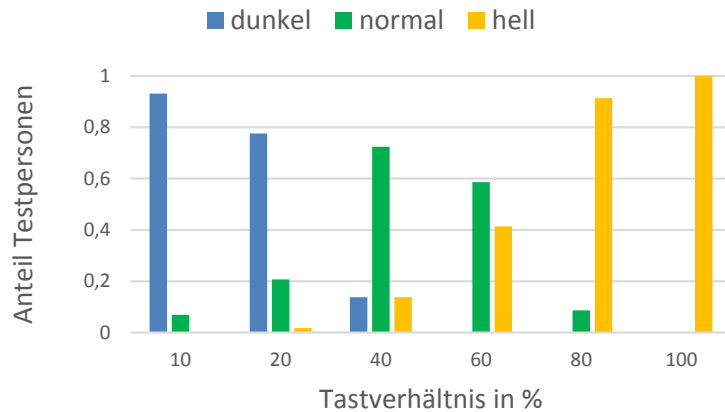


Abbildung 7-12: Histogramm Bewertung der Helligkeit nach Begriffen

Wie bereits zuvor angesprochen war der Perlschnureffekt den 42 Personen nicht bekannt. Die im Folgenden diskutierten Ergebnisse werden demnach für zwei Gruppen (naive und erfahrene Probanden) getrennt analysiert.

Wie bei der Analyse der Ergebnisse aus Fahrversuchen wurde auch hier aus 5 Wiederholungen für jeden Probanden und jede Einstellung zunächst die Detektionsrate ermittelt. Anschließend wurde der Perlschnureffekt für Einstellungen mit der Detektionsrate größer 50% als gut detektierbar bezeichnet. Somit ergeben sich für naive Testpersonen folgende Verläufe für verschiedene Frequenzen in Abhängigkeit vom Tastverhältnis (Abbildung 7-13).

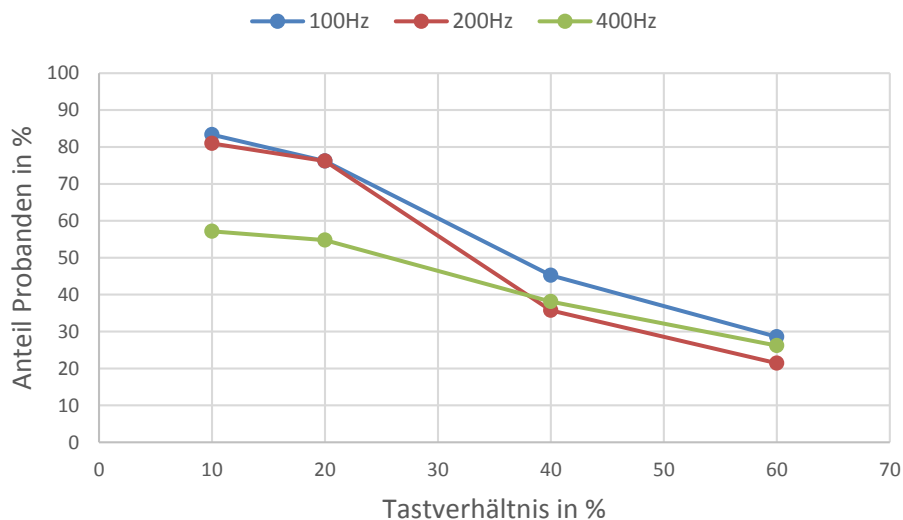


Abbildung 7-13: Detektierbarkeit beim Perlschnureffekt, naive Probanden

Während bei allen Frequenzen ab 40% Tastverhältnis der Anteil der Probanden, die in der Lage sind den Perlschnureffekt gut zu detektieren, ähnlich ist, bestehen vor allem bei kleinen Tastverhältnissen deutliche Unterschiede zu 400 Hz. Durch die Erhöhung der PWM-Frequenz von 200 Hz auf 400 Hz vergrößert sich der Anteil der Probanden, die den Perlschnureffekt nur schwer detektieren können, fast um Faktor 2: bei Tastverhältnis von 10% steigt der Anteil von 19% auf 43% aller Testpersonen und bei Tastverhältnis von 20% ist die Steigerung von 25% auf 45%. Dabei sind die Ergebnisse für 100 Hz und 200 Hz kaum zu unterscheiden.

Bei erfahrenen Testpersonen sehen die Ergebnisse etwas anders aus (Abbildung 7-14). Hier ist die Abhängigkeit vom Tastverhältnis nicht sehr ausgeprägt, was darauf hindeutet, dass die erfahrenen Testpersonen den Perlschnureffekt sehr gut verstehen und wissen worauf sie dabei achten sollen. Dennoch sieht man auch hier einen deutlichen Unterschied von 100 Hz bzw. 200 Hz zu 400 Hz.

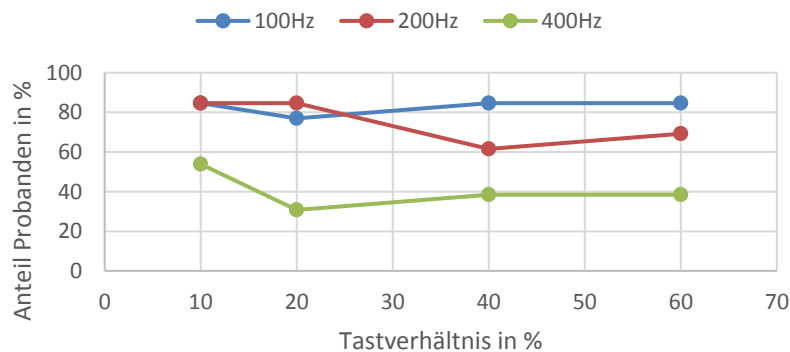


Abbildung 7-14: Detektierbarkeit Perlschnureffekt, erfahrene Probanden

7.3. Fazit

Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente beabsichtigten die Ermittlung der Schwellenfrequenz für den Perlschnureffekt. Dabei sollten die Lichtverhältnisse möglichst denen im nächtlichen Straßenverkehr entsprechen. Um die Vergleichbarkeit und damit die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Praxis zu schaffen, war es von großer Bedeutung Probanden vergleichbare Aufgaben ausführen zu lassen. Es wurden zwei Untersuchungen mit 10 bzw. 58 Probanden durchgeführt. Zusammenfassend lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die meisten auch nicht naive Probanden nehmen den Perlschnureffekt nicht wahr, wenn sie mit einer anderen Aufgabe (in der Untersuchung: Bewertung der Helligkeit) beschäftigt sind;
- Der Perlschnureffekt ist weniger auffällig bei einer zusätzlichen Nebenaufgabe (in der Untersuchung: Erkennung der LED-Farbe bei schneller Augenbewegung);
- Bei erfahrenen Probanden hängt die Auffälligkeit des Perlschnureffektes kaum vom Tastverhältnis;
- Sowohl bei naiven als auch bei erfahrenen Probanden ist der Unterschied zwischen 100 Hz und 200 Hz geringer als zu 400 Hz;
- Der Unterschied zwischen 200 Hz und 400 Hz ist hingegen sehr deutlich;

Vergleicht man die Ergebnisse aus diesen Experimenten mit den Ergebnissen aus den Fahrversuchen lässt sich daraus schließen, dass es möglich ist, auf die Praxis übertragbare Ergebnisse hinsichtlich des Perlschnureffektes unter Laborbedingungen zu gewinnen.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beantwortet mit drei Experimentreihen mehrere Fragen bezüglich der indirekten Flimmerwahrnehmung bei pulsweitenmodulierten Kfz-Frontbeleuchtung auf Basis von LEDs hinsichtlich der Einflussfaktoren und Konsequenzen.

Im ersten Experiment in Kapitel 5 wird der Einfluss des PWM-Signals auf die Wahrnehmung des Stroboskopeffekts in einem Büroraum untersucht. Sowohl die Erhöhung der PWM-Frequenz als auch des Tastverhältnisses wirkt dem Stroboskopeffekt entgegen. Des Weiteren stellten die normalsichtigen, nicht fotosensiblen Testpersonen keinen merklichen Einfluss auf ihr Wohlbefinden durch die mittels PWM gedimmte Beleuchtung. Hinsichtlich der Übertragbarkeit auf PWM-gedimmte Kfz-Frontscheinwerfer ist anzunehmen, dass aufgrund sehr hohen Winkelgeschwindigkeiten, bei denen der durch eine schnelle Objektbewegung verursachte Stroboskopeffekt auftritt, wird dieser im Straßenverkehr auch bei niedrigen PWM-Frequenzen von 100 Hz nicht erscheinen. Diese Vermutung wurde in der Voruntersuchung zu dem zweiten Experiment bestätigt.

Im zweiten Experiment in Kapitel 6 wird der Einfluss der PWM-gedimmten Frontscheinwerfer auf das Auftreten des Perlschnureffektes im realen Straßenverkehr untersucht. Dieser tritt vor allem auf stark reflektierenden Objekten wie Verkehrsschilder und Reflektoren an Leitpfosten. In der Stadt ist der Perlschnureffekt aufgrund hoher Umgebungsleuchtdichte praktisch nicht wahrnehmbar. Auf Autobahnen befinden sich die Leitpfosten peripher, dass sie kaum im zentralen Gesichtsfeld erscheinen. An den meist großen Autobahnschildern ist der Perlschnureffekt aufgrund ihrer Größe kaum wahrnehmbar. Nur an engen kurvigen Landstraßen mit vielen Leitpfosten ist die Wahrscheinlichkeit groß den Perlschnureffekt hervorzurufen. Die Ergebnisse der Fahrversuche mit Probanden zeigen deutlich, dass der Perlschnureffekt beim normalen Blickverhalten und bei in Kfz-Beleuchtung üblichen Frequenzen von 100 Hz und 200 Hz nicht wahrnehmbar ist. Die Situationen, in denen dieser Effekt auftritt, werden von Testpersonen als nicht sicherheitskritisch eingestuft.

Das dritte Experiment in Kapitel 7 beschäftigt sich hauptsächlich mit der Frage, inwieweit sich Ergebnisse aus Laboruntersuchungen auf die Situation im nächtlichen Straßenverkehr übertragen lassen. Es ist ersichtlich, dass die Ergebnisse aus Laboruntersuchungen gleiche Einflussparameter und Tendenzen aufweisen. Die Abweichungen in den absoluten Werten lassen sich dadurch erklären, dass sich die Lichtverteilung in der Laboruntersuchung von der Lichtverteilung der LED-Scheinwerfer unterscheidet. Es ist allerdings ersichtlich, dass sich der Einfluss einer Nebenaufgabe in beiden Untersuchungen (in Fahrtests das Fahrzeugführen, in der Laboruntersuchung die schnelle Augenbewegung zur Erkennung der LED-Farbe) auf die Reduktion des Perlschnureffektes positiv auswirkt. Des Weiteren ist der Perlschnureffekt in beiden Experimenten für die meisten Personen bei gewöhnlichen Augenbewegungen nicht auffällig. So nahmen ihn die Testpersonen in der Laboruntersuchung beim Einstellen und bewerten der Helligkeit unter PWM-gedimmten Beleuchtung nicht wahr. Genauso wie die Fahrer ihn nicht bemerkten bei der Fahrt zu der Teststrecke.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass einige Menschen besonders sensibel auf gepulstes Licht reagieren. Daher ist anzunehmen, dass ein gewisser Bevölkerungsanteil den Perlschnureffekt außergewöhnlich stark wahrnimmt und damit die Effekte noch stärker ausfallen. Daher sollten zukünftige Untersuchungen verstärkt der Frage nachgehen, mit welchen gesundheitlichen Risiken PWM-gedimmte LED-Beleuchtung einhergeht und dabei

insbesondere prüfen, welche Modulationsfrequenzen als im Betrieb unbedenklich und sicher angesehen werden können. Die Elektroenzephalografie (EEG) könnte in diesem Zusammenhang die Reaktion des visuellen Systems über die Gehirnaktivitäten messen. Derartige Messverfahren haben in den letzten Jahren eine große Weiterentwicklung erfahren und ermöglichen heute präzise Ergebnisse für lichttechnische Studien.

9. Literaturverzeichnis

- [1] S. Brückner und T. Q. Khanh, „Dimmung von Hochleistungs-LEDs,“ *Licht*, pp. 44-49, 2011.
- [2] P. R. Boyce, *Human Factors in Lighting*, CRC Press, 2003.
- [3] 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, July 1961.
- [4] C. Tyler und R. Hammer, „Analysis of visual modulation sensitivity. IV. Validity of the Ferry-Porter law,“ *J. Opt. Soc. Am.*, pp. 743-757, April 1990.
- [5] A. B. Watson, A. J. Ahumada und J. E. Farrell, „Window of visibility: a psychophysical theory of fidelity in time-sampled visual motion display,“ 1986.
- [6] W. Hershberger, „Saccadic eye movements and the perception of visual direction,“ *Perception & Psychophysics*, pp. 34-44, 1987.
- [7] S. Brückner und T. Q. Khanh, „A field experiment on the perception of automotive rear lights using pulsed LEDs with different frequencies,“ in *ISAL*, Darmstadt, 2007.
- [8] A. Wilkins, I. Nimmo-Smith, A. Tait, C. McManus, S. Della Sala, A. Tilley, K. Arnold, B. Margaret und S. Scott, „A neurological basis for visual discomfort,“ in *Brain*, 1984.
- [9] D. H. Kelly, „Nonlinear visual responses to flickering sinusoidal gratings,“ *J. Opt. Soc. Am.*, pp. 1051-1055, May 1981.
- [10] A. J. Wilkins, „Visually-Induced Seizures,“ *Progress in Neurobiology*, pp. 85-117, June 1980.
- [11] N. W. Coppinger, „The Relationship between Critical Flicker Frequency and Chronologic Age for Varying Levels of Stimulus Brightness,“ *Journal of Gerontology*, pp. 48-52, 1955.
- [12] E. Wolf, A. Gaeta und S. E. Geer, „Critical Flicker Frequencies in Flicker Perimetry: Standards and Confidence Limits,“ *Archives of Ophthalmology*, pp. 347-351, 1968.
- [13] H. Misiak, „Age and Sex Differences in Critical Flicer Frequency,“ *Journal of Experimental Psychology*, pp. 318-332, 1947.

-
- [14] 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*, pp. 243-256, 1995.
- [15] A. Kennedy und W. S. Murray, „The Effects of Flicker on Eye Movement Control,“ *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section*, pp. 79-99, 1991.
- [16] R. Küller und T. Laike, „The Impact of Flicker From Fluorescent Lighting on Well-Being, Performance and Physiological Arousal,“ *Ergonomics*, pp. 433-447, 1998.
- [17] J. Hazell und A. J. Wilkins, „A Contribution of Fluorescent Lighting to Agoraphobia,“ *Psychological Medicine*, pp. 591-596, 1990.
- [18] A. J. Wilkins, C. Darby, C. Binnie, S. Stefansson, P. Jeavons und G. Harding, „Television Epilepsy - The Role of Pattern,“ *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, pp. 163-171, 1979.
- [19] A. J. Wilkins und P. Wilkinson, „A Tint to Reduce Eye-Strain from Fluorescent Lighting? Preliminary Observations,“ *Ophthalmic & Physiological Optics*, pp. 172-175, 1991.
- [20] J. Bullough, K. Sweater Hickcox, T. Klein und N. Narendran, „Effects of flicker characteristics from solid-state lighting on detection, acceptability and comfort,“ *Lighting Research and Technology*, Nr. 43, pp. 337-348, 2011.
- [21] S. Strauß, „Theoretische und experimentell Untersuchungen zum Einsatz gepulster Halbleiterlichtquellen in der Kraftfahrzeugbeleuchtung,“ 2007.
- [22] S. 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*, München, Utz, 2007, pp. 724-732.
- [23] W. A. Hershberger und J. S. Jordan, „The Phantom Array: A Perisaccadic Illusion of Visual Direction,“ *The Psychological Record*, pp. 21-32, 1998.
- [24] J. Roberts und A. J. Wilkins, „Flicker can be perceived during saccades at frequencies in excess of 1 kHz,“ *Lighting Research and Technology*, pp. 124-132, 2013.
- [25] S. Stevenson, F. Volkmann, J. Kelly und L. Riggs, „Dependence of visual suppression on the amplitudes of saccades and blinks,“ *Vision Research*, pp. 1815-1824, 1986.
- [26] K. V. Thilo, L. Santoro, V. Walsh und C. Blakemore, „The Site of Saccadic Suppression,“ *Nature Neuroscience*, pp. 13-14, 2003.
- [27] A. Kaltenbach, „Entwicklung einer intelligenten Heckleuchte zur Adaptiven Anpassung der Lichtsignale an Variable Sichtbedingungen,“ Tönning: Der Andere Verlag, Ilmenau, 2009.
- [28] I. M. Vogels, S. D. Sekulovski und M. Perz, „Visible Artefacts of LEDs,“ in *27th Session of the CIE*, Sun City, South Africa, 2011.
-

-
- [29] 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*, pp. 18-34, 1987.
- [30] A. Wilkins, I. Nimmo-Smith, A. Slater und L. Bedocs, „Fluorescent lighting, headaches and eyestrain,“ *Lighting Research and Technology*, pp. 11-18, 1989.
- [31] A. Kennedy, „The Effects of Intermittent Illumination on a Visual Inspection Task,“ *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, pp. 135-151, 1998.
- [32] E. Owen, „Power Disturbance And Quality: Light Flicker Voltage Requirements,“ *IEEE Industry Applications Magazine*, Nr. 1, pp. 20-27, 1996.

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2010)

Nr.	Titel
227	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Dünnbleche aus Stahl, 2010
228	Systemmodellierung für Komponenten von Hybridfahrzeugen unter Berücksichtigung von Funktions- und EMV-Gesichtspunkten, 2010
229	Methodische und technische Aspekte einer Naturalistic Driving Study, 2010
230	Analyse der sekundären Gewichtseinsparung, 2010
231	Zuverlässigkeit von automotive embedded Systems, 2011
232	Erweiterung von Prozessgrenzen der Bonded Blank Technologie durch hydromechanische Umformung, 2011
233	Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge, 2011
234	Konsistentes Materialmodell für Umwandlung und mechanische Eigenschaften beim Schweißen hochfester Mehrphasen-Stähle, 2011
235	Makrostrukturelle Änderungen des Straßenverkehrslärms, Auswirkung auf Lästigkeit und Leistung, 2011
236	Verbesserung der Crashsimulation von Kunststoffbauteilen durch Einbinden von Morphologiedaten aus der Spritzgießsimulation, 2011
237	Verbrauchsreduktion an Nutzfahrzeugkombinationen durch aerodynamische Maßnahmen, 2011
238	Wechselwirkungen zwischen Dieselmotortechnik und -emissionen mit dem Schwerpunkt auf Partikeln, 2012
239	Überlasten und ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit widerstandspunktgeschweißter Feinblechstrukturen, 2012
240	Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte, 2012
241	Aerodynamik von schweren Nutzfahrzeugen - Stand des Wissens, 2012
242	Nutzung des Leichtbaupotentials von höchstfesten Stahlfeinblechen durch die Berücksichtigung von Fertigungseinflüssen auf die Festigkeitseigenschaften, 2012
243	Aluminiumschaum für den Automobileinsatz, 2012
244	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch belastungsgerechte Gestaltung und innovative Lösungen für lokale Verstärkungen von Fahrzeugstrukturen in Mischbauweise, 2012
245	Verkehrssicherheit von schwächeren Verkehrsteilnehmern im Zusammenhang mit dem geringen Geräuschniveau von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben, 2012
246	Beitrag zum Fortschritt im Automobilleichtbau durch die Entwicklung von Crashabsorbieren aus textil-verstärkten Kunststoffen auf Basis geflochtener Preforms und deren Abbildung in der Simulation, 2013
247	Zuverlässige Wiederverwendung und abgesicherte Integration von Softwarekomponenten im Automobil, 2013
248	Modellierung des dynamischen Verhaltens von Komponenten im Bordnetz unter Berücksichtigung des EMV-Verhaltens im Hochvoltbereich, 2013
249	Hochspannungsverkopplung in elektronischen Komponenten und Steuergeräten, 2013
250	Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter Schubbeanspruchung, 2013

- 251 Parametrischer Bauraum – synchronisierter Fahrzeugentwurf, 2013
- 252 Reifenentwicklung unter aerodynamischen Aspekten, 2013
- 253 Einsatz- und Marktpotenzial neuer verbrauchseffizienter Fahrzeugkonzepte – Phase 2, 2013
- 254 Qualifizierung von Aluminiumwerkstoffen für korrosiv beanspruchte Fahrwerksbauteile unter zyklischer Belastung (Salzkorrosion), 2013
- 255 Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf echten Fahrbahnen, 2013
- 256 Naturalistic Driving Data, Re-Analyse von Daten aus dem EU-Projekt euroFOT, 2013
- 257 Ableitung eines messbaren Klimasummenmaßes für den Vergleich des Fahrzeugklimas konventioneller und elektrischer Fahrzeuge, 2013
- 258 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen, Teile 1 und 2, 2013
- 259 Erweiterung des Kerbspannungskonzepts auf Nahtübergänge von Linienschweißnähten an dünnen Blechen, 2013
- 260 Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss, 2013
- 261 Rechnerische und probandengestützte Untersuchung des Einflusses der Kontaktwärmeübertragung in Fahrzeugsitzen auf die thermische Behaglichkeit, 2013
- 262 Modellierung der Auswirkungen verkehrsbedingter Partikelanzahl-Emissionen auf die Luftqualität für eine typische Hauptverkehrsstraße, 2013
- 263 Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
- 264 Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
- 265 Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
- 266 Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
- 267 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
- 268 Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
- 269 Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
- 270 Physiologische Effekte bei PMW-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2014

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2014

VDA

Verband der
Automobilindustrie

FAT

Forschungsvereinigung
Automobiltechnik

Behrenstraße 35
10117 Berlin
www.vda.de
www.vda-fat.de