

## **Definition einer Mess- und Bewertungsmethode für zeitlich modulierte Kabinenbeleuchtungen**

### **Definition of a measurement and appraisal method for temporally modulated cabin illumination**

#### **1.1.1 Allgemeine Projektinformationen**

##### ***Ansprechpartner/ Verantwortlicher im DIN***

Herr Achim Schaub, Normenausschuss Luft- und Raumfahrt im DIN

##### ***Unterauftragnehmer***

Dr. rer.nat. Reinhard Kusel, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

##### ***Gesamtprojektlaufzeit***

15.04.2010 – 15.12.2011

##### ***Berichtszeitraum***

01.01.2011 – 15.12.2011

#### **1.1.2 Zusammenfassung**

In modernen Verkehrsflugzeugen werden zunehmend LED als Leuchtmittel in der Kabine eingesetzt. Die Helligkeit der Beleuchtung wird durch Pulsweitenmodulation (PWM) bestimmt. Dass deshalb die Beleuchtung flickert, hat Konsequenzen für das Wohlbefinden und möglicherweise auch für die Gesundheit von Besatzung und Passagieren der Flugzeuge. Durch eine Norm sollen Grenzwerte für die Parameter der Beleuchtung festgelegt werden, die derartige Belastungen der Betroffenen ausschließen.

An 30 Probanden wurde deren Flimmerfusionsfrequenz (critical flicker frequency, CFF) bestimmt. Es zeigte sich, dass die CFF eine breite Verteilung aufweist, die nach unten bei ca. 70 Hz recht scharf begrenzt ist. Zu hohen Frequenzen ist die Grenze unscharf und die Verteilung verläuft wesentlich flacher. Unter den 30 untersuchten Personen hatten 5 eine CFF von mehr als 90 Hz und 2 sogar eine CFF von mehr als 100 Hz. Daraus kann gefolgert werden, dass in größeren Probandenkollektiven einige Fälle mit noch deutlich höherer CFF zu erwarten sind.

Ferner wurde die Beeinflussung der visuellen Belastung der 30 Probanden durch flickerndes Licht untersucht. Dazu waren sie aufgefordert, Texte zügig zu lesen und dabei Schreibfehler zu finden, während die Beleuchtung mit 50 Hz, 75 Hz oder 100 Hz flickerte. Wenn auch weder die benötigte Zeit, noch die Anzahl der entdeckten Fehler signifikant durch die Beleuchtung beeinflusst war, so machte diese Untersuchung doch sehr deutlich, dass der überwiegenden Anzahl der Probanden das Flickern des Lichts zwar lästig war, es sie darüber hinaus aber nicht ernsthaft beeinträchtigte. Einige der Probanden jedoch, und dies waren diejenigen mit überdurchschnittlich hoher CFF, reagierten sehr empfindlich auf die Beleuchtungsbedingungen und brachen den Test z.T. sogar ab oder beklagten Kopfschmerzen im Anschluss an die Untersuchung.

Die Studie hat gezeigt, dass es für die Festlegung normativer Grenzwerte für flickerndes Licht auf die physiologischen Eigenschaften dieses geringen, aber keineswegs vernachlässigbaren Anteils der Bevölkerung ankommt. Weitere Untersuchungen größerer Probandenkollektive werden sinnvolle obere Grenzwerte ergeben und damit die normative Festlegung der Eigenschaften von PWM gesteuerten LED-Leuchten ermöglichen. Die Untersuchungen werden zeitnah fortgesetzt.

### **1.1.3 Abstract**

In cabins of present-day airplanes LEDs are increasingly used as illuminants. The brightness of the illumination is adjusted by means of pulse width modulation (PWM). The flickering of the illumination resulting from PWM brightness control influences the subjective well-being and perhaps the health of passengers and crew. A standard shall ascertain limits of the parameters of the illumination that foreclose such loads.

In 30 subjects the critical flicker frequency (CFF) was estimated. It turned out that the CFF shows a broad distribution with a relatively sharp defined lower limit at about 70 Hz. To higher frequencies the limit is unsharp and shows a much broader distribution. 5 of the 30 subjects investigated had a CFF of more than 90 Hz, and 2 a CFF of more than 100 Hz. From this it can be concluded that in larger collectives even higher CFF values must be expected.

Furthermore the impact resulting the visual exposure of the 30 subjects by the application of flickering light was investigated. They were asked to read texts speedily, and to find typing errors while the illumination was flickering with 50 Hz, 75 Hz or 100 Hz. Even though neither the required time, nor the number of mistakes found in the texts was significantly influenced by the frequency of flicker, this investigation quite plainly showed that the major part of subjects was annoyed by the flickering light, but was not significantly affected. Some subjects however, and this were just those with a higher-than-average CFF responded very sensitive to the illumination. Some even aborted the test or complained of headache after the investigation.

The study revealed that normative limits for flickering light must be based on the physiological properties of this small but in no case neglectable part of the population. Further investigations of larger collectives will unfold useful upper limits, and will thus enable normative fixations of the properties of PWM controlled LED illuminants. The investigations will be carried forward promptly.

### **1.1.4 Beschreibung des Projektes**

#### ***Ausgangssituation und Problemstellung***

#### ***Zielstellung***

Folgende Fragestellungen sollen beantwortet werden:

1. Flimmerfusion: Bis zu welcher PWM-Frequenz gibt es Personen, die ein Flimmern der Lichtquellen bei sehr heller Ganzfeldbeleuchtung homogener Oberflächen wahrnehmen können?
2. Unangenehme Wahrnehmungen bei Sakkaden: Lässt sich die Vermutung bestätigen, dass auch PWM-Frequenzen jenseits der Flimmerfusion bei Blicksakkaden über strukturierte Oberflächen zu unangenehmen Wahrnehmungen führen?
3. Einfluss der Phase: Welche Rolle spielt der Einfluss der relativen Phase der PWM bei mehrfarbigen LED-Leuchten?
4. Farbe durch Tastverhältnis oder Amplitude: Wie ist der Einfluss des Tastverhältnisses der PWM? Ist es sinnvoll, die Farbe über die Stromstärke (Amplitude des PWM-Signals der jeweiligen LED), und die Helligkeit über das PWM-Tastverhältnis zu steuern?
5. Einfluss der Oberflächenstruktur: Wie ist der Einfluss der Struktur der Oberfläche (Farbverteilung, breites vs. schmales Ortsfrequenzspektrum, dominante Ortsfrequenz) auf diese unangenehmen Wahrnehmungen?
6. Einfluss auf die Leistungsfähigkeit: Wird die Leistungsfähigkeit von Passagieren in mit PWM-betriebenen LED-Leuchten beleuchteten Flugzeugkabinen beeinträchtigt?
7. Vorschlag für Europäische Norm: Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse soll eine Normenvorlage für den Antrag für eine neue Europäische Norm erarbeitet werden.

## **Lösungsansatz und Vorgehensweise**

An Probanden unterschiedlichen Alters und Geschlechts sollen Messungen insbesondere von Schwellenwerten der zu untersuchenden Phänomene durchgeführt werden.

## **Arbeits- und Zeitplanung**

Messungen werden durchgeführt in Zusammenarbeit mit den Firmen AES, Bremen und Airbus, Buxtehude.

### **1.1.5 Beschreibung der geleisteten Arbeiten und erzielten Ergebnisse** **Durchführung und geleistete Arbeiten**



*Abb. 1:* Die Messanlage besteht aus dem Steuercomputer (links), einem herkömmlichen Desktop-Computer mit Linux-Betriebssystem, und einem weiss beschichteten, aus Spanplatten gefertigten zweiteiligen Aufbau (rechts). Durch eine Trennplatte separiert beleuchten zwei mit RGB-Dioden versehene Leuchten die jeweiligen Rückwände. Der zeitliche Verlauf und die Farbe der Beleuchtung werden durch den Rechner gesteuert.

Mit der im Rahmen des Projekts erstellten Beleuchtungsanlage (Abb. 1) können computergesteuert beliebige Zeitverläufe von Beleuchtungen mit zwei aus maximal 4 Gruppen verschiedenfarbiger LED bestehenden Leuchtkörpern erzeugt werden. Diese Anlage besteht aus einem herkömmlichen Desktop-PC, einer Digital-zu-Analog-Wandlerkarte mit 8 unabhängigen Ausgangskanälen und zwei nachgeschalteten Verstärkern, die einen maximalen Ausgangsstrom von 350 mA pro Kanal an LED-betriebene Lampen zu liefern.

Über eine Bedienoberfläche können Messprogramme gesteuert werden. Diese Bedienoberfläche kann an die verschiedenen Messaufgaben flexibel angepasst werden. Weil es insbesondere um die Bestimmung von Schwellenwerten geht, wurde ein Algorithmus zur effektiven Schwellenwertbestimmung implementiert und getestet, der auf der „maximum likelihood“ Methode basiert. Diese Methode vermeidet bei „forced choice“ Experimenten unnötige Reizanbietungen weit entfernt vom gesuchten Schwellenwert.

Mit dieser Anlage wurden Experimente an insgesamt 30 Versuchspersonen bei den Firmen AES in Bremen und Airbus in Buxtehude durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass insbesondere auch wegen des erheblichen Zeitaufwandes für die Messungen die Akquisition von Versuchspersonen schwieriger ist als bei der Planung des Projekts erwartet worden war. Dennoch lassen sich aus den Versuchen an immerhin 30 Probanden einige relevante Aussagen ableiten. Es ist geplant, die Messanlage, die wegen ihrer Flexibilität leicht an unterschiedlichste Problemstellungen angepasst werden kann, auch über die Projektlaufzeit hinaus zu nutzen, begonnene Projekte fortzusetzen und weitere durchzuführen.

An den 30 Probanden wurden folgende Untersuchungen vorgenommen:

**1. Schwellenwerte der Flimmerfusion:** An jedem der Probanden wurde in dreifacher Wiederholung die Schwelle der Flimmerfusion bestimmt. Dabei saß der Proband mittig vor der in Abb. 1 gezeigten Versuchsanordnung. Es wurde weisses Licht verwendet. Beide Seiten wurden mit dem Tastverhältnis von 1,0 und der Modulationstiefe von 1,0 beleuchtet. Auf der einen Seite hatte das Licht die sehr hohe Frequenz von 400 Hz, die faktisch als Gleichlicht anzusehen ist. Auf der anderen Seite war das Licht mit der jeweils zu untersuchenden Frequenz getacktet. Welche Seite Flickerlicht, welche Gleichlicht zeigte, war durch das Steuerprogramm jeweils zufällig gewählt.

Die Probanden mussten durch Druck auf die linke oder rechte Taste einer Computermaus anzeigen, auf welcher Seite sie ein Flickern wahrnahmen. Sie waren angewiesen, wenn sie ein Flickern nicht eindeutig erkennen konnten, die Seite zu wählen, die am ehesten eine „unruhige Beleuchtung“ zeigte; und wenn sie durchaus keinen Unterschiede erkennen konnten, sollten sie die zu betätigende Maustaste zufällig wählen. In jedem Fall musste eine Reaktion des Probanden erfolgen („forced choice“ Experiment).

**2. Einfluss des Flimmerns auf die visuelle Wahrnehmung:** Um die Beeinflussung der visuellen Wahrnehmung durch flickerndes Licht zu untersuchen, waren die Probanden aufgefordert, drei Seiten eines Romantextes zu lesen. Dazu wurden in 12pt-Schrift drei DIN-4-Seiten mit Ausschnitten des Romans „Der kleine Hobbit“ von J.R.R. Tolkien verwendet. Dieser wurde gewählt, weil einerseits die grammatikalische Struktur relativ komplex (lange Sätze mit verschachtelten Nebensätzen), andererseits die Wortwahl relativ einfach ist (keine Fremdwörter, daher für jeden deutschsprachigen Leser prinzipiell verständlich). Die Seiten wurden auf DIN-A3 vergrößert und laminiert.

Die Probanden waren aufgefordert, möglichst schnell zu lesen. Gestartet wurde das Lesen durch den Druck auf eine Taste der Computermaus, ebenso wurde das Lesen durch einen Tastendruck beendet. Dadurch konnte das steuernde Programm die benötigte Zeit messen. Die Texte waren in einheitlicher Reihenfolge zu lesen. Beleuchtet wurden die Tafeln mit den Frequenzen 50 Hz, 75 Hz und 100 Hz in zufälliger Reihenfolge. Um ein möglichst einheitliches Aufmerksamkeitsniveau der Probanden zu erreichen und um die Beeinflussung der Aufmerksamkeit durch die flickernde Beleuchtung zu erfassen, waren ca. 10 Fehler im Text enthalten, die die Probanden zu zählen hatten. Dazu standen ein Notizzettel und ein Kugelschreiber zur Verfügung, so dass die Probanden gefundene Fehler notieren konnten, ohne den Blick vom Text abwenden zu müssen. Ausgewertet wurden die Ergebnisse hinsichtlich zweier Fragestellungen:

- a) Wird die Lesegeschwindigkeit durch flickernde Beleuchtung signifikant beeinflusst?
- b) Wird die Aufmerksamkeit der Probanden durch flickernde Beleuchtung signifikant beeinflusst?

## **Erzielte Ergebnisse**

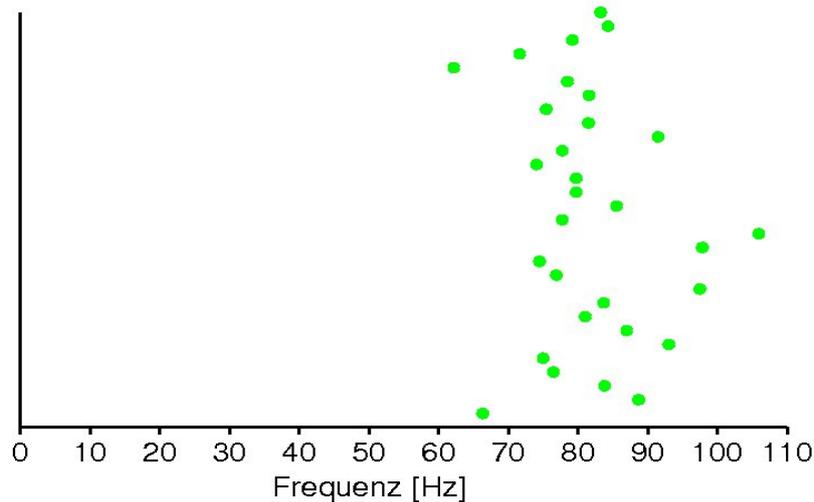


Abb. 2: Gegen die laufende Nummer der Probanden sind die gemessenen Schwellenwerte der Wahrnehmung des Flickerns dargestellt. Es zeigt sich, dass schon von den untersuchten 30 Probanden 5 Personen Flimmerfusionsfrequenzen von mehr als 90 Hz aufweisen.

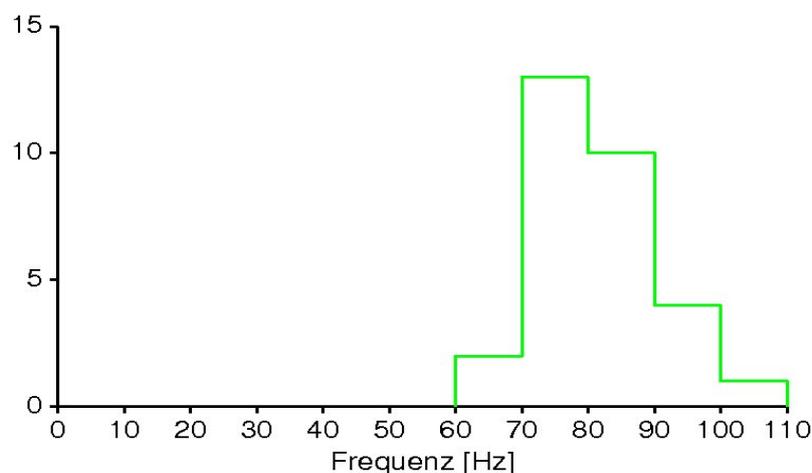


Abb. 3: Histogramm der gemessenen Flimmerfusionsfrequenzen. Es ergibt sich eine ausgesprochen schiefe Verteilung der Messwerte. Während zu niedrigen Frequenzen die Grenze bei ca. 70 Hz relativ scharf gezogen ist, ergibt sich zu höheren Frequenzen ein breiteres Spektrum mit Frequenzen bis über 100 Hz.

**1. Schwellenwerte der Flimmerfusion:** Das Ergebnis der Untersuchung zeigen die Abb. 2 und 3. Die Untersuchung ergab eine breite Streuung der Flimmerfusionsfrequenzen (critical flicker frequency, CFF). Auffällig ist zudem die relativ scharfe Grenze der Verteilung zu niedrigen Frequenzen bei ca. 70 Hz. Zu höheren Frequenzen ist die Verteilung erheblich breiter. Schon bei der relativ geringen Anzahl von 30 Versuchspersonen haben 5 Probanden eine CFF von mehr als 90 Hz, davon einer mit mehr als 100 Hz. Die Struktur der Verteilung in Abb. 2 lässt erwarten, dass in größeren Probandenkollektiven einzelne noch deutlich höhere CFF aufweisen werden.

Gerade die Probanden mit hoher CFF berichten, dass die Untersuchung sie sehr belastet hat und z.T. auch, dass sie im Anschluss an die Untersuchung unter Kopfschmerzen litten. Offenbar reagiert ein durchaus nicht unerheblicher Teil der Bevölkerung besonders sensibel

auf flickerndes Licht, während der überwiegende Teil der Bevölkerung mit relativ geringer CFF wesentlich unempfindlicher für flickerndes Licht ist.

Auffällig ist auch, dass einer der zwei Probanden mit einer CFF von weniger als 70 Hz der älteste der Probanden ist. Im übrigen hat der Autor (Alter 64 Jahre, Messung nicht in Abbn. 2 und 3 enthalten) eine CFF von 67,4 Hz. Möglicherweise nimmt die CFF und damit die Empfindlichkeit für flimmerndes Licht mit dem Alter ab.

Dieses Ergebnis reproduziert teilweise publizierte Untersuchungen von z.B. *C.W. Tyler, Analysis of visual modulation sensitivity. III. Meridional variations in peripheral flicker sensitivity JOSA A 4 (1987)*

Das Histogramm der Messergebnisse in Abb. 3 unterstreicht die Schiefe der Verteilung der CFF.

Man muss erwarten, dass es bei größeren Probandenkollektiven Einzelne geben wird, die noch deutlich höhere CFF aufweisen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Bedeutung der Untersuchung für die Praxis von Fluggesellschaften und Flugzeugkonstrukteuren. Denn schon die ernsthafte gesundheitliche Beeinträchtigung einer Passagierin oder eines Passagiers kann selbst dann nicht toleriert werden, wenn sie nur bei einem unter mehreren Flügen auftritt.

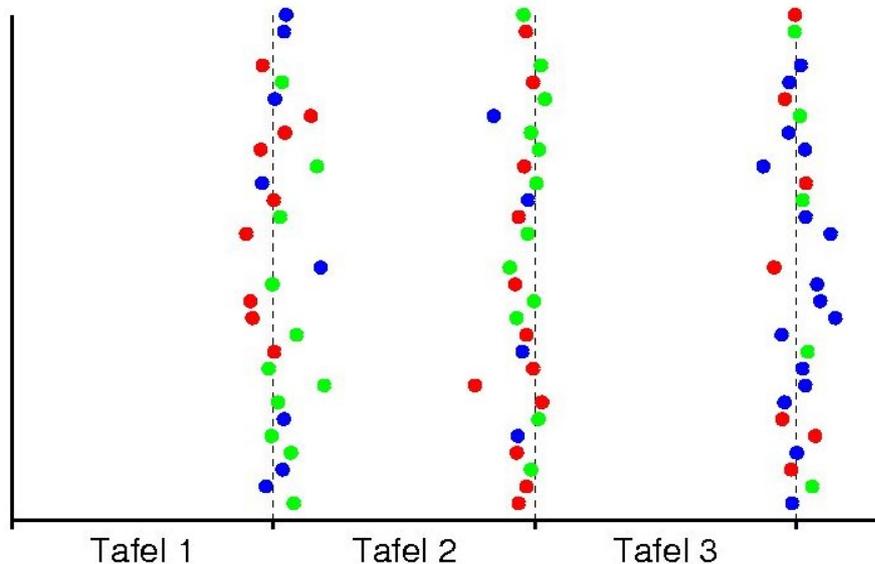


Abb. 4: Verteilung der zum Lesen der drei Tafeln benötigten normierten Zeiten (siehe Text). Rote Symbole bezeichnen die normierte Zeit bei 50 Hz-Beleuchtung, grüne diejenige bei 75 Hz-Beleuchtung und blaue diejenige bei 100 Hz-Beleuchtung. Ein systematischer Bezug der benötigten Zeiten zu der Flickerfrequenz der Beleuchtung ist nicht erkennbar.

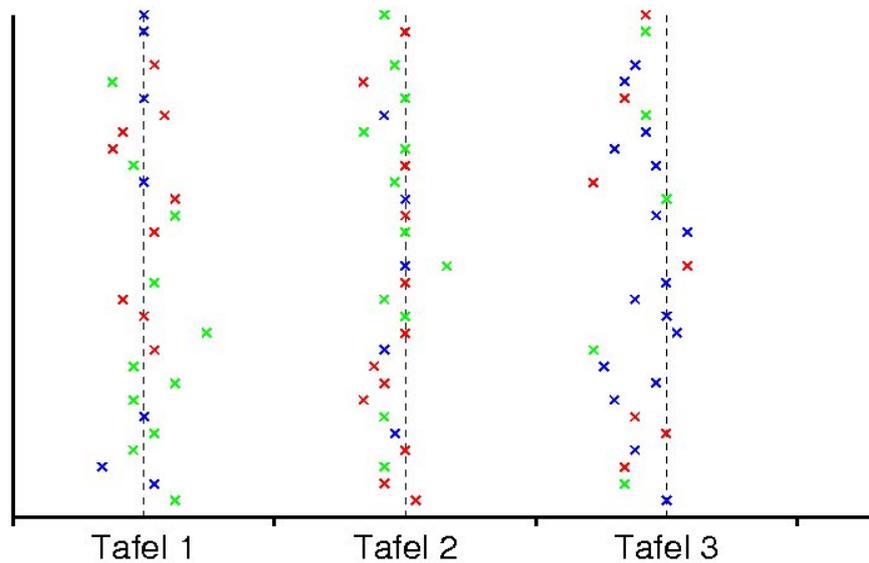


Abb. 5: Abweichung der gefundenen Fehler von der Anzahl der tatsächlich vorhandenen. Bedeutung der Farben wie in Abb. 4. Auch hier ist signifikanter Bezug zur Beleuchtungsfrequenz feststellbar.

**2. Einfluss des Flimmerns auf die visuelle Wahrnehmung:** Beim Lesen der Texttafeln wurden zwei Daten je Tafel notiert. 1. die benötigte Zeit und 2. die Anzahl der gefundenen Fehler im Text. Bei der Auswertung der gemessenen Zeiten ist zu bedenken, dass einerseits die Probanden grundsätzlich unterschiedlich schnell Lesen, und andererseits, dass der durchschnittlich schnelle Leser möglicherweise unterschiedliche Zeiten für die jeweiligen drei Tafeln benötigte. Beide Variationen sind für die Untersuchung unerheblich. Deshalb wurden zunächst für jeden Probanden die relativen Zeitspannen berechnet, die er für die drei Tafeln benötigt hat. Für die drei Tafeln wurden dann der Durchschnitt der Relativwerte berechnet. Abb. 4 zeigt für jeden Probanden und jede Tafel die Quotienten der einzelnen relativen Zeitspannen und dem Durchschnittswert als jeweils einen Punkt. Liegt der Punkt auf der vertikalen gestrichelten Linie, so hat der Proband also den gleichen Anteil der Gesamtlesezeit für die drei Tafeln für das Lesen der jeweiligen Tafel benötigt, wie der Durchschnitt der Probanden. Ein Punkt links der gestrichelten Linie bedeutet einen unterdurchschnittlichen Zeitanteil, ein Punkt rechts der Linie einen überdurchschnittlich hohen Anteil der Gesamtlesezeit, die der Proband für das Lesen der jeweiligen Tafel benötigt hat.

Rote Punkte stehen für das Lesen bei einer Beleuchtung mit 50 Hz, grüne Punkte für eine Beleuchtung mit 75 Hz und blaue Punkte für eine Beleuchtung mit 100 Hz. Bei der Untersuchung der ersten 16 Probanden wurden alle drei Farbanteile des verwendeten Lichtes gleichphasig mit einem Tastverhältnis von 1 an- und ausgeschaltet. Bei der Untersuchung der letzten 14 Probanden (in Abb. 4 die 14 von oben) wurde stattdessen jeder einzelne Farbanteil getrennt mit einem Tastverhältnis von 0,5 (d.h. 1/3 der Periode angeschaltet, 2/3 der Periode ausgeschaltet) geschaltet, wobei die jeweiligen Farbanteile um 120° in der Phase verschoben waren, so dass ständig 2 der drei LED-Diodenarten aktiv waren.

Es zeigte sich, dass beide Beleuchtungsarten die Lesezeit nicht signifikant verändern, der Einfluss der Beleuchtung auf die Lesegeschwindigkeit und die genaue Wahrnehmung des Gelesenen so gering ist, dass er mit diesem Test nicht messbar ist.

Interessant ist die Beobachtung, dass die Reaktion der Probanden auf das flickernde Licht sehr unterschiedlich war. Wie zu erwarten, wurde die 50 Hz Beleuchtung beider Typen als unangenehm empfunden. Zwei der Probanden, bei jedem Typ der Beleuchtung einer, weigerten sich, den Text zu Lesen, da sie Kopfschmerzen befürchteten. Die 75 Hz-Beleuchtung

wurde im Fall der gleichphasigen Beleuchtung unterschiedlich beurteilt. Probanden mit hoher CFF empfanden auch die 75 Hz-Beleuchtung als außerordentlich unangenehm. Bei der Beleuchtung mit verschobener Phase der Farbanteile war dies nicht mehr der Fall. Die 100 Hz-Beleuchtung wurde in der Regel nicht als störend empfunden, sie lag für die Mehrzahl der Probanden ja auch oberhalb der CFF, zwei der Probanden mit CFF oberhalb 90 Hz, nahmen auch die 100 Hz-Beleuchtung als sehr störend war.

Insgesamt entstand der Eindruck, dass einige Probanden, die sich durch eine hohe CFF auszeichneten, sensibler auf flickerndes Licht reagierten als andere. Während die meisten Probanden flickernd wahrgenommenes Licht zwar störte und sie es als unangenehm empfanden, dennoch aber den Test problemlos durchführten, reagierten einige mit vergleichsweise heftiger Abwehr bis hin zur Weigerung, den Test durchzuführen.

### ***Vergleich mit der ursprünglichen Planung***

Bei der Planung der Untersuchungen wurde der Aufwand für die Akquisition von Probanden erheblich unterschätzt. Es war eigentlich geplant, deutlich mehr Probanden auch mit weiteren Tests zu untersuchen. Man muss von einer deutlich verlängerten Projektlaufzeit ausgehen. Andererseits hat sich herausgestellt, dass mit der erstellten Testanlage in der Tat ein sehr flexibles Instrument für eine Vielzahl künftiger Untersuchungen zur Verfügung steht.

### **1.1.6 Darstellung des Nutzens des Projektes und der Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es tatsächlich Personen gibt, die besonders sensibel auf flickerndes Licht reagieren, während die überwiegende Zahl der Untersuchten zwar flickerndes Licht als unangenehm empfinden, es sie aber ansonsten nicht weiter beeinträchtigt. Dies ist ein bedeutendes Resultat. Es macht deutlich, dass es nicht hinreichend ist, die Beleuchtung in Flugzeugen für den durchschnittlichen Benutzer komfortabel zu gestalten, sondern dass es, und gar nicht so selten, Personen gibt, die außerordentlich viel sensibler reagieren. Darin wird auch eine Problematik der Untersuchungen deutlich: man benötigt hohe Probandenzahlen um diese wenigen besonders Sensiblen zu erfassen. Andererseits sind die Untersuchungen zeitaufwendig, so dass es, wie sich herausstellte, schwierig war, Probanden zu gewinnen.

Es gibt in der physiologischen Literatur einige Studien, die sich mit der CFF des Menschen befassen. Diese haben aber immer den „normalen“ Probanden im Blick, eine Normung muss jedoch immer auch die seltenen Fälle berücksichtigen und kann sich nicht an Durchschnittswerten orientieren. Dass es Einzelne gibt, die deutlich empfindlicher reagieren, hat diese Studie gezeigt. Hinsichtlich der zu erstellenden Norm liefert die Studie dadurch wichtige Hinweise: der Grenzwert der Flickerfrequenz hat deutlich oberhalb von 110 Hz zu liegen. Wo genau die Grenze zu ziehen ist, kann auf Grund der relativ geringen Probandenzahlen derzeit noch nicht spezifiziert werden, dazu sind weitere Messungen nötig. Um den erforderlichen Messaufwand zu begrenzen sollten sich diese, wenn möglich, insbesondere auf Personen beziehen, von denen bekannt ist, dass sie besonders empfindlich auf flickerndes Licht reagieren (z.B. auf die Bildwiederholffrequenzen von Computer-Monitoren). Die erstellte und erfolgreich eingesetzte Messanlage ermöglicht diese Messungen. Weitere Messungen werden zeitnah durchgeführt werden.