

# **Spektrale Güte von Beleuchtung in Flugzeugkabinen**

## **Spectral quality of lighting in aircraft cabins**

### **1.1.1 Allgemeine Projektinformationen**

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

Herr Achim Schaub, Normenausschuss Luft- und Raumfahrt im DIN

#### ***Unterauftragnehmer***

Herr Dr. Jörn Burkert, AES GmbH

#### ***Gesamtprojektlaufzeit***

15.04.2010 – 15.12.2011

#### ***Berichtszeitraum***

15.04.2010 – 15.12.2011

### **1.1.2 Zusammenfassung**

Allgemein gilt, je höher die Farbwiedergabetreue einer Leuchte, also die Fähigkeit einer Lichtquelle eine möglichst gleiche Farbwahrnehmung von Objekten im Vergleich zu einem Referenzlicht auszulösen, desto hochwertiger ist die Leuchte. Dahinter steckt die Zielvorstellung durch ein natürliches, oder zumindest nicht befremdliches Farbklima, negative Auswirkungen physischer und psychischer Art auf den Menschen abzuwenden. Mit Hinblick auf den Aufenthalt in Flugzeugen, sind also die Farbwiedergabeeigenschaften der Kabinenbeleuchtung als wesentlich hervorzuheben.

Zur Entwicklung und Normierung eines Verfahrens, welches Farbwiedergabetreue einer Lichtquelle jedweden Leuchtmitteltyps mit Hinblick auf die Bedingungen in der Flugzeugkabine klassifiziert sind in einem ersten Schritt die Grenzen der Farbunterscheidbarkeit RGB-LED basierender Lichtquellen ermitteln worden.

In einem hierzu entwickelten Messverfahren wurden die Schwellenwerte wahrgenommener Farbunterscheidbarkeit von 8 Probanden anhand von RGB-LEDs bestimmt. Als Ausgangsfarbreize dienten 15 Testfarben des Color Quality Scale CQS im DIN99-Farbraum mit D65 als Referenzquelle. Weitere Messungen sollten erfolgen um die Streuung der Messdaten zu reduzieren.

### **1.1.3 Abstract**

In general it applies to light sources, that the higher the color rendering fidelity is, the higher is the lights quality. The objective is to prevent negative effects through an unnatural or strange color environment. With regard to air travel, the color rendering fidelity of cabin illumination is to be considered fundamental.

By determining the limits of color perception with RGB-LED based light sources, a first step was taken towards the development and standardization of a procedure that categorizes the color fidelity of any type of light source within the aircraft cabin.

For this purpose a new measuring procedure has been developed and color discrimination thresholds from 8 test persons have been determined with RGB-LED based light sources. As initial color stimuli, the 15 color samples of the Color Quality Scale CQS in DIN99 color space were chosen. Further tests need to be conducted in order to reduce the scatter of the measurement data.

## **1.1.4 Beschreibung des Projektes**

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

Der Einsatz von Leuchtdioden (LED)-Technologie für die Beleuchtung in Flugzeugkabinen nimmt aufgrund ihrer Energieeffizienz (Gewichtsreduktion) und langen Lebensdauer (geringere Wartungskosten) stetig zu. Zukünftige Kabinen werden fast ausschließlich LED-Beleuchtung nutzen. Kurz- bis mittelfristig wird die zukunftsweisende LED-Technologie auch vermehrt Einzug in die Innenraumbeleuchtung halten.

Neben elektrischer und photometrischer Werte spielen farbmetrische Eigenschaften eine immer größere Rolle bei der Beurteilung von Lichtquellen. Diese betreffen beispielsweise die Farbwiedergabetreue, die Farbsättigung erhöhenden Eigenschaften einer Leuchte, oder etwa subjektive Bewertungskriterien wiedergegebener Farben. Diese können als unterschiedliche Qualitätsdimensionen von Lichtquellen begriffen werden und sind Mittelpunkt zahlreicher Forschungsarbeiten und intensiver Diskussion.

Der CIE Color Rendering Index genießt zwar weltweite Verbreitung, hat sich aber für eine Charakterisierung des Farbwiedergabeverhaltens, insbesondere von schmalbandigen Lichtquellen, als unzulänglich herausgestellt. Das übergeordnete Ziel sollte also die Entwicklung und Normierung eines Verfahrens sein, welches die Farbwiedergabetreue einer Lichtquelle jedweden Leuchtmitteltyps mit Hinblick auf die Bedingungen in der Flugzeugkabine beschreibt und klassifiziert.

### ***Zielstellung***

Das Übergeordnete Ziel ist die Normierung eines Verfahrens, welches unter Berücksichtigung aktueller Erkenntnisse und den besonderen Bedingungen in der Flugzeugkabine, das Farbwiedergabeverhalten einer Lichtquelle jedweden Leuchtmitteltyps beschreibt, klassifiziert und bewertet, um durch eine moderne und transparente Kommunikationsebene die Beziehung Hersteller-Kunde-Endnutzer zu verbessern sowie durch eine standardisierte Beurteilung der Farbwiedergabequalität die Bedingungen und das Wohlbefinden in der Flugzeugkabine zu verbessern und Wettbewerbsvorteile zu sichern.

Ziel dieses Projektes war es, einen ersten Schritt in diese Richtung zu leisten. Hierzu galt es ein psychophysisches Messverfahren mit RGB-basierten Leuchtmitteln zu entwickeln um die Schwellenwerte von Farbunterscheidbarkeit zu bestimmen. D.h. der Bereich in dem unterschiedliche Farbreize durch den Betrachter noch als gleich wahrgenommen werden.



## 1.1.5 Beschreibung der geleisteten Arbeiten und erzielten Ergebnisse

Im Rahmen der Recherche waren zahlreiche Arbeiten Gegenstand eingehender Prüfung. Folgende Arbeiten wurden als besonders hilfreich angesehen.

- *Farbräume und Farberscheinungsmodelle*  
CIELAB, CIELUV, DIN99, CIECAM97, CIECAM02
- *Farbabstandsformeln*  
CMC, CIE94, CIE2000
- *Colorimetrische Ansätze von u.a.*  
J. Schanda, Y. Ohno, A. Zukauskas, M. R. Luo, M. Melgosa, K. Smet

Das anzuwendende Verfahren basiert zum Teil auf einer Reihe von Normen und Publikationen, vor allem der internationalen Beleuchtungskommission CIE, welche wissenschaftlich fundiert und weltweit anerkannt vielfach State-Of-The-Art Empfehlungen darstellen.

### ***Testverfahren zur Bestimmung der Schwellenwerte menschlicher Farbunterscheidbarkeit mit RGB-LED basierter Leuchten***

Zur Bestimmung des Toleranzbereiches innerhalb dessen zwei durch RGB-LEDs erzeugte unterschiedliche Farbreize noch als gleich wahrgenommen werden, wurde ein Testverfahren entwickelt, in welchem den Probanden stets drei durch LEDs beleuchtete Farbfelder angeboten werden. Während eines dieser Felder die Referenzfarbe darstellt, dienen zwei weitere Farbfelder dazu, die Farbunterscheidbarkeit zur Referenz zu bewerten.

Die Referenzfarbe wird stets durch das obere Farbfeld angezeigt und die Testfarben in den weiteren zwei Feldern von denen zufällig eins zur Referenz abweichend ist (siehe Abbildung 1). Um die Farbunterscheidbarkeit zu erhöhen grenzen alle Felder aneinander, und weisen einen Durchmesser von 13cm auf, was bei einem Augenabstand von 60cm einem Sehwinkel von 12° entspricht.

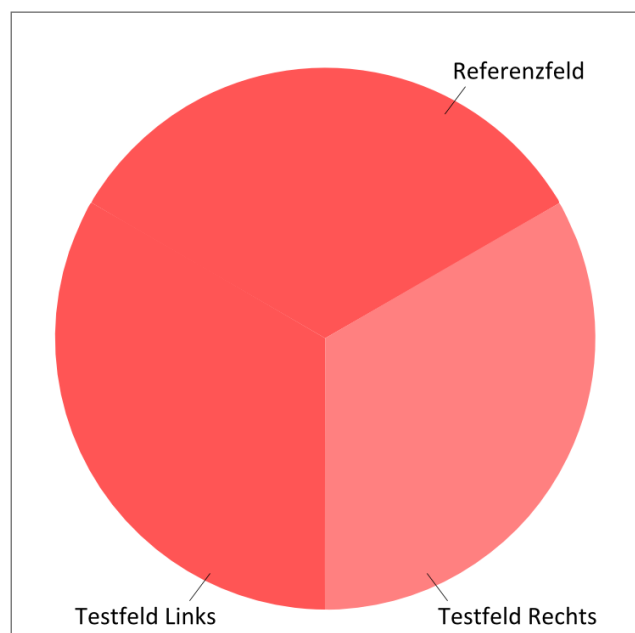


Abbildung 1: Felder von jeweils 13 cm Durchmesser mit beispielhaft abweichendem Farbreiz.

Der Proband wurde angehalten, das Testfeld mit der abweichenden Farbe zum Referenzfeld anzugeben. Wenn er dazu nicht in der Lage war, musste er raten (Two Alternative Forced Choice). Die jeweils nächste zu prüfende Farbe wurde nach der Maximum Likelihood Methode bestimmt. D.h. es wird bei derjenigen Farbe geprüft, die nach den bisherigen Prüfungen die größte Wahrscheinlichkeit hat, der Schwellenwert zu sein.

Dazu werden die bereits gefundenen richtigen Antworten mit einer 1, die falschen Antworten mit einer 0 bewertet. Auf diese Weise wird an diskreten Punkten eine Funktion  $t(f)$  definiert, wobei  $f$  für die Farbabweichung steht, die bei unterschwelligen Reizen (sehr geringe Farbabweichung) zwischen 0 und 1 alterniert, während sie bei überschwelligen Reizen (sehr starke Farbabweichung) nur Werte von 1 annehmen wird (bis auf Verwechslungen durch den Probanden).

Dann ist bei grob überschwelligen Reizen die Wahrscheinlichkeit einer richtigen Antwort gleich 1, bei grob unterschwelligen Reizen gleich 0,5 (Ratewahrscheinlichkeit bei zwei Alternativen). Mathematisch wird die jeweils nächste zu untersuchende Farbe, das heißt der Wert, der bis dato die höchste likelihood hat, Schwellenwert zu sein, durch Anpassung der bisher ermittelten Werte von  $t(f)$  an die psychometrische Funktion

$$w(f) = \frac{1}{4} \left( 3 - \operatorname{erf} \left[ \frac{f_s - f}{b} \right] \right) = \frac{3}{4} - \frac{1}{2\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{f_s - f}{b}} e^{-t^2} dt$$

ermittelt (siehe Abbildung 2). Der Wendepunkt dieser Funktion ist durch  $f_s$  gegeben; dieser Wert wird als der maximum likelihood-Wert für die Reizschwelle angenommen. Die Farbe  $f_s$  ergibt sich aus der Bedingung, dass für die  $N$  bisher ermittelten Probandenreaktionen gilt

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N (t(f_i) - w(f_i))^2 = \min.$$

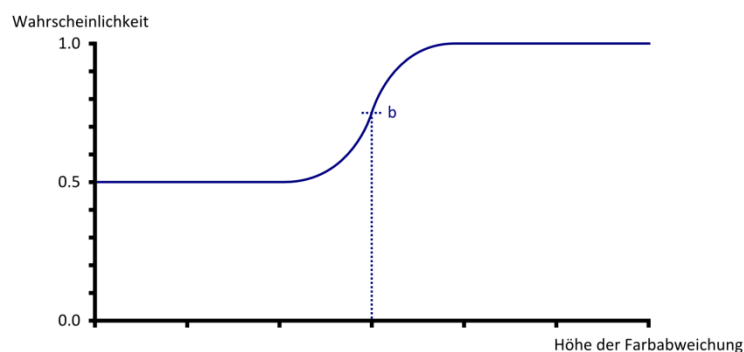
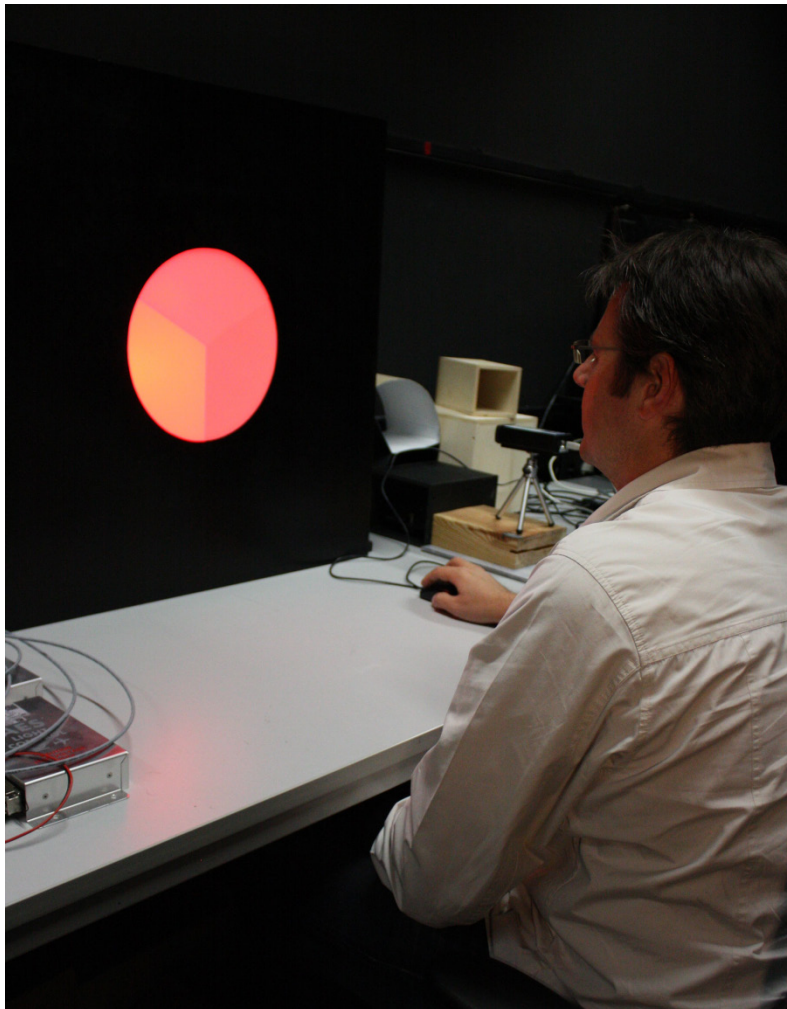


Abbildung 2: Die Psychometrische Funktion stellt den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit der richtigen Antwort mit der Farbabweichung dar.

Abbildung 2 zeigt die Psychometrische Funktion mit der Schwellenfarbabweichung  $f_s$  und der charakteristischen Breite des Übergangs zwischen unterschwelligem und überschwelligem Bereich;  $b$  stellt den Zusammenhang der Wahrscheinlichkeit der richtigen Antwort mit der Farbabweichung dar.

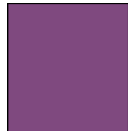
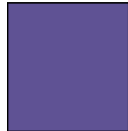


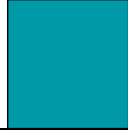
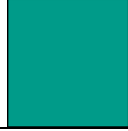
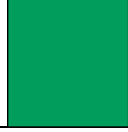
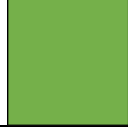

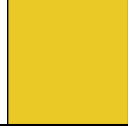
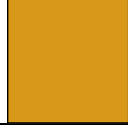
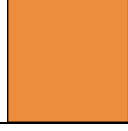
Diese Vorgehensweise bewirkte, dass nicht mehr als nötig mit Farben stimuliert wurde, die weit vom Schwellenwert abweichen, jede Messung also den maximal möglichen Informationsgewinn erbringt. Nachteil dieser Methode ist, dass die Probanden nahezu ständig in Schwellennähe stimuliert wurden, was häufig als besonders anstrengend empfunden wird.



*Abbildung 3: Messaufbau mit Proband zur Bestimmung der Schwellenwerte von Farburnterscheidbarkeit*

Die Messung der Schwellenwerte für Farbabweichungen mit RGB-LED-Leuchten ist im DIN99-Farbraum erfolgt, da erwartet wurde, dass in diesem die Schwellenwerte annähernd kreisförmig sind. Dies beinhaltete die Aufgabe, aus vorgegebenen DIN99 Farbraumwerten XYZ-Tristimuluswerte zu berechnen, die an die Ansteuerung der LED gesendet werden mussten. Aus mathematischen Gründen war dies nicht möglich. Daher wurden die Schwellenwerte der Farbabweichungen längs vertikaler, horizontaler und 45° schräger Halbachsen im DIN99-Farbraum bestimmt. Daraus berechenbare Ellipsen können anschließend nach DIN99d u.a. umgerechnet werden.

Als Ausgangsfarbreize zur Messung der Farbunterscheidbarkeit dienen 15 Farbborte des Color Quality Scale CQS mit D65 als Referenzquelle (siehe Tabelle 1).

Test Farbe		Farbkoordinaten im DIN99 - Farbraum			CIE Tristimulus Werte		
		L99	a99	b99	X	Y	Z
VS1		50.9632	13.1774	-10.7727	15.2020	10.8350	21.8860
VS2		50.5945	6.2834	-15.4876	13.2240	10.6260	30.2940
VS3		49.2169	-3.0840	-16.3713	10.1760	9.8750	33.3220
VS4		59.6051	-13.5844	-9.9091	13.2040	16.8400	39.7410
VS5		68.5684	-16.9129	-3.0276	18.1960	25.8880	41.7550
VS6		67.9195	-17.6820	3.0448	15.2110	25.1150	28.4440
VS7		68.1236	-15.8209	9.5165	13.9580	25.3560	14.6090
VS8		75.9271	-9.3641	15.4450	24.6370	36.2190	12.0880
VS9		83.6689	-1.4095	18.1601	40.7360	50.8410	12.0100
VS10		87.7634	5.8818	17.7776	55.8790	60.5150	10.2651
VS11		76.9728	11.1039	14.9900	40.4180	37.9470	5.8150
VS12		76.9153	14.7904	11.4111	45.2650	37.8500	8.7160

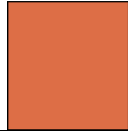

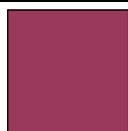
VS13		69.7526	17.2775	7.0776	37.0840	27.3520	8.9820
VS14		51.2725	18.7495	1.9594	19.2230	11.0130	4.9410
VS15		50.6815	17.7467	-3.3959	17.2550	10.6750	11.4130

Tabelle 1: Farbwertinformationen der CQS Testfarben unter D65 als Aufpunkte für die Schwellenwertbestimmung

Das Programm zur Messung der Farbunterscheidungsschwellen wurde mittels der Programmiersprache C++ und unter Verwendung von Qt3, einer Bibliothek graphischer Bildschirmoberflächenelemente geschrieben.

Abbildung 5 zeigt die Bedienoberfläche des Programms. Während der Untersuchung werden nach dem Zufallsprinzip entweder die rechte oder die linke Lampe mit abweichender Farbe im Vergleich zur Referenz angesteuert.

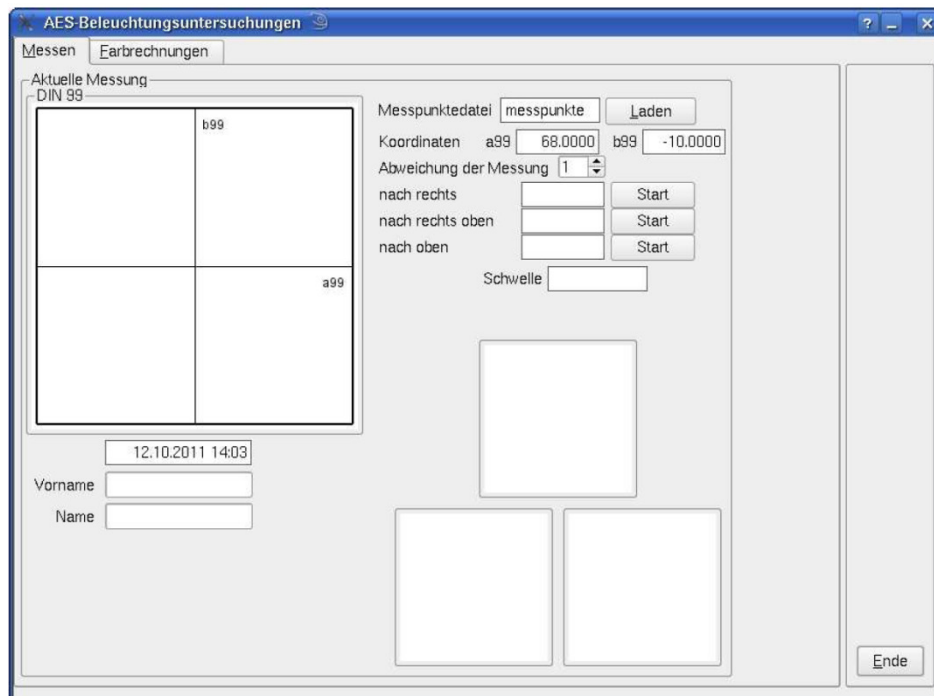


Abbildung 4: Bedienoberfläche des Messprogramms

### **Farbunterscheidbarkeit im DIN99-Raum mit RGB-LED basierten Leuchten**

Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Messergebnisse eines Probanden. Dargestellt sind die Bereiche gleicher Farbwahrnehmung für die verwendeten Testfarben im DIN99-Farbraum



(innere Ellipsen). Zur Verdeutlichung sind diese zusätzlich in 3-facher Vergrößerung dargestellt.

Es zeigt sich, dass das Messverfahren valide Daten liefert. Die Größen der Ellipsen entsprechen im Wesentlichen den Erwartungen. So sind zum Beispiel die Farbtoleranzen im grünen Bereich (VS6, VS7, VS8) deutlich größer als diejenigen im blauen Bereich (VS2 - VS5).

Weitere Untersuchungen sollten sich auf die intraspezifische Wiederholbarkeit der Messwerte beziehen. Erste Hinweise auf die interspezifische Wiederholbarkeit zeigt Abbildung 6.

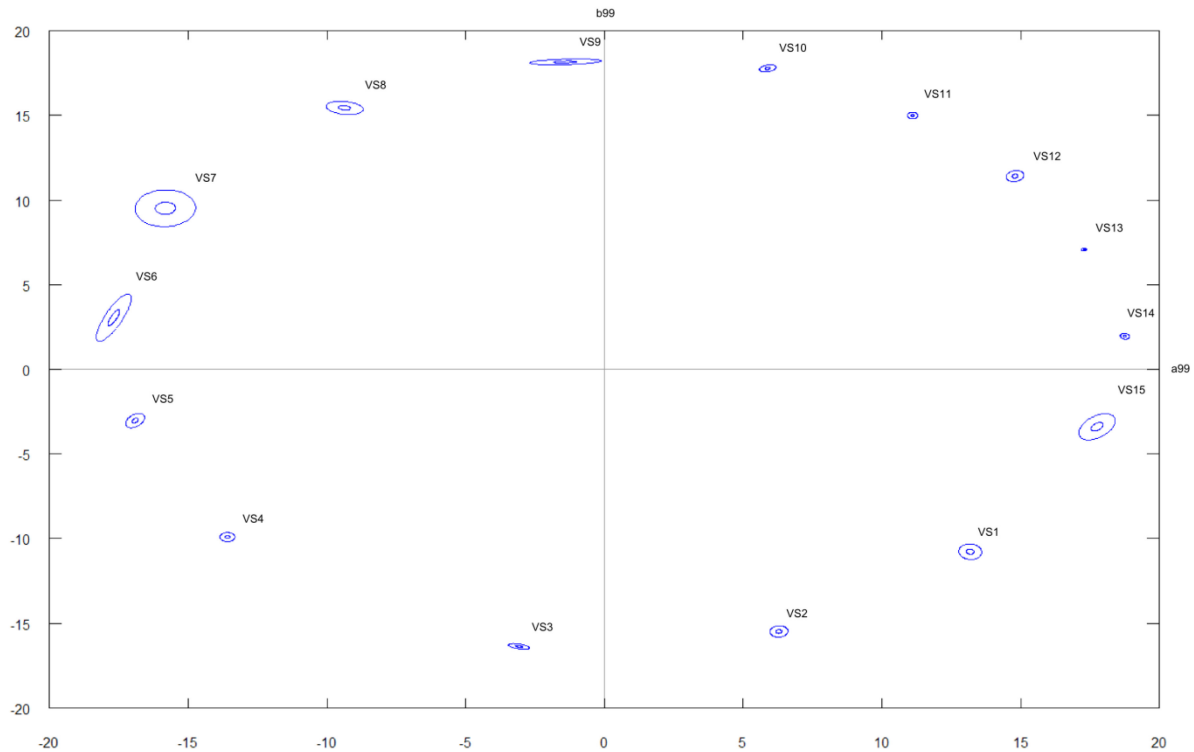


Abbildung 5: Farbunterscheidbarkeitstoleranzen von Proband 7 mit 3-facher Vergrößerung (äußere Ellipse)

In Abbildung 6 sind Mittelwerte und Standardabweichungen der Flächeninhalte der an 8 Probanden gemessenen Farbtoleranzbereiche. Die dargestellte Streuung der Messergebnisse ist typisch für psychophysische Messungen. Um die Streuung zu reduzieren und damit aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen, sind wesentlich mehr Probanden zu untersuchen.

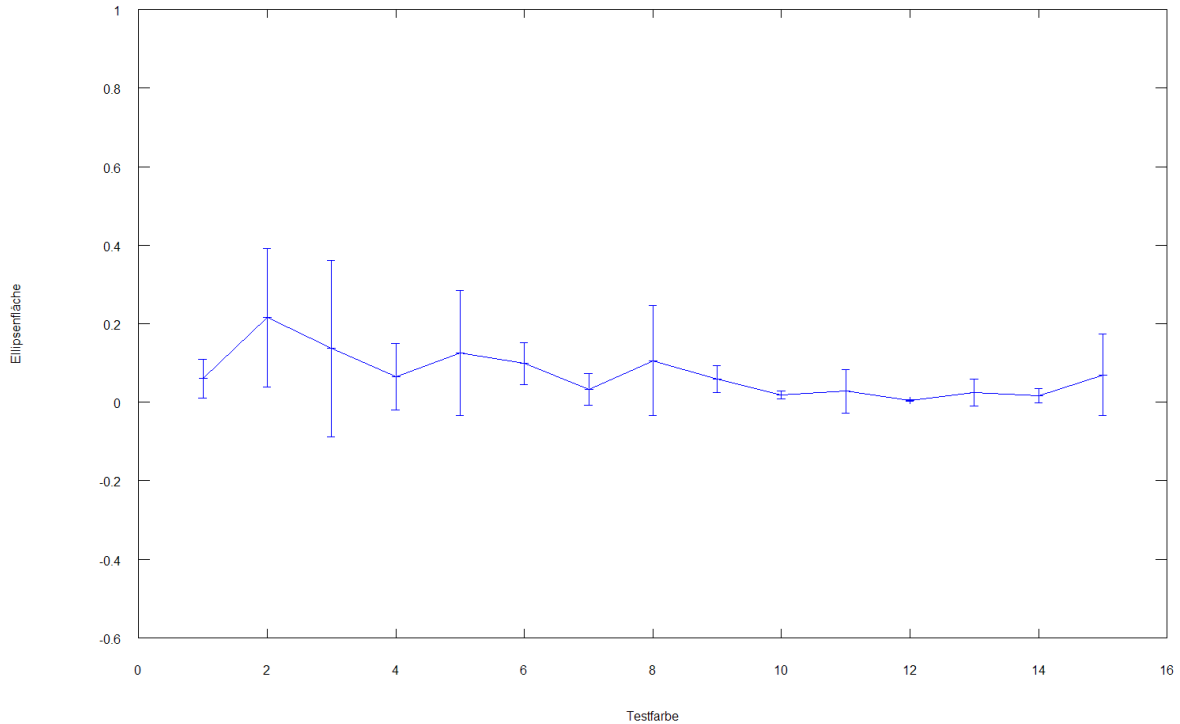


Abbildung 6: Mittelwerte und Standardabweichungen der Ellipsenflächen für die Testfarben VS1 - 15

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

Es wurden ein Versuchsaufbau und ein Messverfahren entwickelt, auf dessen Grundlage sich Güteklassen farbmatischer Eigenschaften von LED-basierten Leuchten ableiten lassen. Die Eignung der Messprozedur konnte bereits mit acht Probanden nachgewiesen werden, was als ein wichtiger Schritt zur Bildung eines normierten Verfahrens zu werten ist.

Die Wahl des DIN99 Farbraums hat sich ebenfalls als geeignet erwiesen, da eine Annäherung an die Kreisform der Farbtoleranzbereiche bei vielen Farben bereits beobachtet werden konnte. Die Testfarben des Color Quality Scale haben sich als zweckmäßig erwiesen. Ferner ergibt sich daraus der Vorteil der Vergleichbarkeit von Ergebnissen anderer Arbeitsgruppen.

Zur Entwicklung eines Standards sind im nächsten Schritt Messungen an einer größeren Anzahl von Probanden durchzuführen. Dies versetzt die Luftfahrtindustrie in die Lage, mit einer einheitlichen, normierten Kommunikationsebene vom Zulieferbetrieb bis zum Endkunden ein qualitativ optimiertes Produkt liefern zu können.

Die unmittelbare Folge ist die Steigerung der Kundenzufriedenheit, was erhebliche Wettbewerbsvorteile nach sich zieht.