

Untersuchungen zur Wahrnehmung von Farbunterschieden

Karin Bieske, Andreas Kaltenbach

1. Zusammenfassung

Eine wesentliche Voraussetzung für adaptive Beleuchtungssysteme, die neben einer Anpassung des Beleuchtungsniveaus auch die Veränderung der Lichtfarbe und damit der spektralen Wirkung erlauben, ist die Kenntnis geeigneter Steuerungsprinzipien für die Variation der Lichtfarbe. Im Beitrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Beleuchtungsniveau und bevorzugter Lichtfarbe und zur Wahrnehmung von Farbunterschieden bei der Farbsteuerung vorgestellt.

2. Einleitung

Bislang wurde bei der Gestaltung einer Beleuchtung von Arbeitsplätzen davon ausgegangen, dass die Güte der Beleuchtung im wesentlichen von der Qualität des Beleuchtungsniveaus abhängt. Es wurde ein statischer Wert des Beleuchtungsniveaus vorgegeben und die spektrale Qualität (Lichtfarbe und Farbwiedergabe) nur unzureichend berücksichtigt. In jüngster Zeit sind aber entscheidende neue Erkenntnisse zur gesundheitlichen Wirkung des Lichtes bekannt geworden. Diese Lichtwirkung wird über das Lampenspektrum beeinflusst^{1,2,3}. Darüber hinaus verdichten sich die Forderungen an eine dynamische Gestaltung der Beleuchtung und zwar nicht nur in Verbindung mit der Tageslichtnutzung, sondern auch der chronobiologischen Wirkung des Lichtes. Damit kündigt sich ein Paradigmenwechsel in der Beleuchtungsgestaltung an und es gibt Impulse für die Entwicklung von Lichtquellen, die nicht nur eine Änderung des Beleuchtungsniveaus ermöglichen,

¹ Brainard, G.C. u.a.: Action Spectrum für Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, *J. of Neuroscience*, 21 (2001) 16, S. 6405-6412

² Thapan, K.: »An action Spectrum for melatonin suppression: Evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans«, *Journ. Of Physiology* 535 (2001) 1, S. 261-267

³ Gall, D.; Lapuente, V.: »Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums«, *Licht* 54 (2002) 7-8, S. 860-871

sondern auch eine Anpassung der Lichtfarbe und damit der spektralen Wirkung erlauben.

Eine wesentliche Voraussetzung für solche adaptive Beleuchtungssysteme ist die Kenntnis geeigneter Steuerungsprinzipien für die Variation der Lichtfarbe. Im Beitrag werden die Ergebnisse der Untersuchungen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Beleuchtungsniveau und bevorzugter Lichtfarbe, zur Ermittlung von merkbaren Lichtfarbensprüngen und über die Wahrnehmung von Farbunterschieden bei dynamischer Farbsteuerung vorgestellt.

3. Versuchsaufbau

Die Untersuchungen wurden in Lichtsimulatoren⁴ (Abbildung 1) mit einer Fläche von 80 x 130 cm² durchgeführt, in denen als Lichtquellen sechs symmetrisch angeordnete RGB-Leuchtstofflampen verwendet wurden, deren Steuerung digital über das DALI Protokoll (**D**igital **A**ddressable **L**ighting **I**nterface) erfolgte. Auf diese Weise war es möglich, Beleuchtungsniveaus zwischen 300 lx bis 1000 lx auf einer Arbeitsfläche von 60 x 80 cm² mit einer maximalen Abweichung von 2 % zu realisieren und auf definierten Farbkurven zwischen 3000 K und 10000 K mit einem mittleren Farbabstand zwischen dem Ist-Farbtort und dem Soll-Farbtort und $\Delta u'v' = 0,001$ zu variieren⁵.



Abbildung 1: Aufbau des Lichtsimulators

⁴ Blankenhagen, C.: »Adaptives Beleuchtungssystem mit Hybridlampe«, Interner Zwischenbericht zum Verbundprojekt TU Ilmenau, 2004

⁵ Kaltenbach, A.: »Demonstratorentwicklung einer circadianen Beleuchtungssteuerung und Untersuchung zur Farbwahrnehmung von Lichtfarbenänderungen«, Diplomarbeit TU Ilmenau, 2005

4. Ergebnisse

4.1. Lichtfarbenpräferenz

In einem ersten Schritt wurde der Zusammenhang zwischen Beleuchtungsniveau und bevorzugter Lichtfarbe untersucht. Dazu wurden den Probanden für die Beleuchtungsniveaus 300 lx, 500 lx und 1000 lx Lichtfarben im Bereich zwischen 3000 K und 8100 K in Abstufungen von $\Delta\text{CCT} = 300 \text{ K}$ dargeboten. Von den Versuchspersonen wurde jeweils die angenehmste Lichtfarbe auf der Arbeitsfläche ausgewählt. Ausgangsbedingungen waren jeweils Farbtemperaturen von 3000 K und 8100 K, um den Einfluss der Adaptationsbedingungen einschätzen zu können. Die Versuche erfolgten mit 21 Probanden im Alter von 23 bis 73 Jahren und für alle Versuchssituationen wurden drei Versuchsdurchläufe durchgeführt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse.

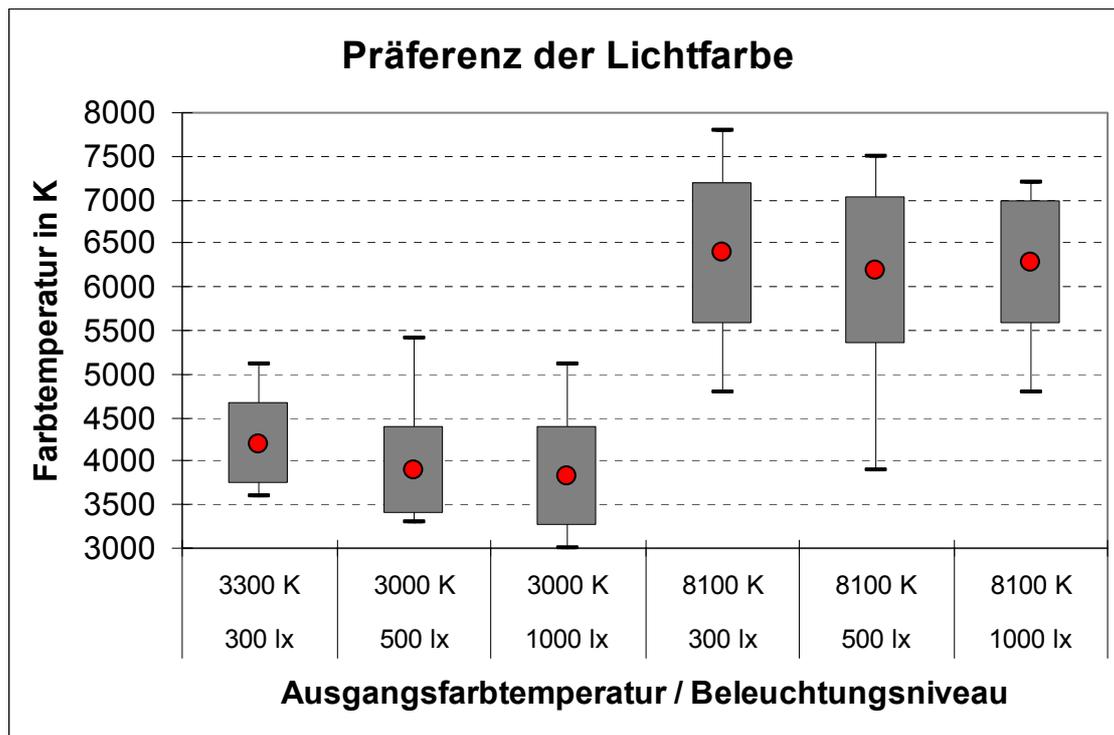


Abbildung 2: Einfluss der Adaptationsbedingungen und des Beleuchtungsniveaus auf die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe (Maximalwert, Mittelwert mit +/- Standardabweichung, Minimalwert)

Die Wahl der bevorzugten Lichtfarbe wird stark von den Ausgangsbedingungen beeinflusst. Für die bevorzugte Lichtfarbe ergab sich unabhängig vom Beleuchtungsniveau ein Bereich zwischen 3800 K bis 6400 K für die Mittelwerte und ein Bereich von 3000 K bis 7800 K für die Extremwerte.

Zur Validierung der von Blankenhagen⁴ durchgeführten Voruntersuchungen wurden für ausgewählte Lichtfarben (Abbildung 3 beispielgebend für 500 lx) ähnliche Versuche durchgeführt. Darüber hinaus wurde nach der 2. und 3. Wahl der bevorzugten Lichtfarbe gefragt, um Hinweise auf bevorzugte Lichtsteuerrichtungen zu erhalten. Die Versuche erfolgten mit dem selben Probandenkollektiv, mit jeweils drei Versuchsdurchläufen für die gleichen Beleuchtungsniveaus.

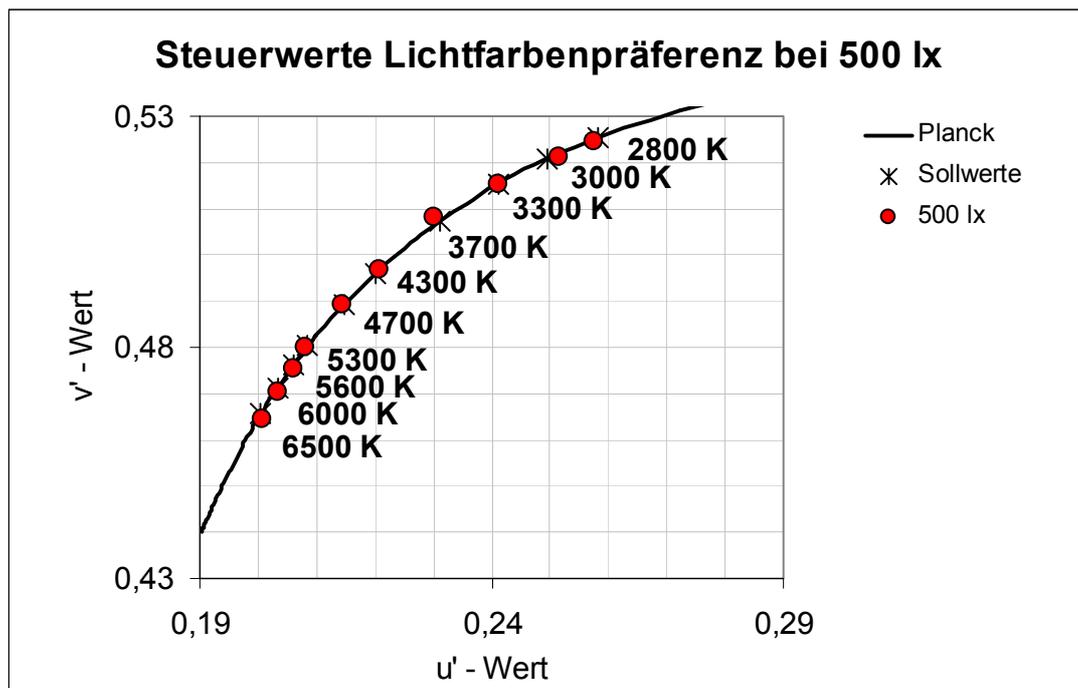


Abbildung 3: Steuerwerte bei der Untersuchung zur Lichtfarbenwahl

Wie in den Versuchen zur bevorzugten Lichtfarbe zeigt sich eine starke Abhängigkeit von den Ausgangsbedingungen, jedoch kein Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die 1. Wahl für die Lichtfarbe (Abbildung 4). Für die gewählte Lichtfarbe ergab sich unabhängig vom Beleuchtungsniveau ein Bereich zwischen 4000 K bis 5200 K für die Mittelwerte und ein Bereich von 3300 K bis 6500 K für die Extremwerte.

Für die 2. und 3. Wahl ergaben sich keine signifikanten Unterschiede, sodass aus den Ergebnissen der Untersuchungen keine Vorzugsrichtung für die Variation der Lichtfarbe abgeleitet werden kann. Für die gewählte Lichtfarbe ergab sich für die 2. und 3. Wahl unabhängig vom Beleuchtungsniveau ein Bereich zwischen 4000 K bis 4400 K für die Mittelwerte und ein Bereich von 3000 K bis 6500 K für die Extremwerte. Ausgehend von den Adaptationsbedingungen werden eher Lichtfarben akzeptiert, die nicht zu große Unterschiede aufweisen. Dies ist wichtig für die lichttechnische Gestaltung innerhalb von Raumbereichen und die Wahl für

angrenzende Räumlichkeiten, wie auch aus den Arbeiten von Gall / Vandahl⁶ hervorgeht.

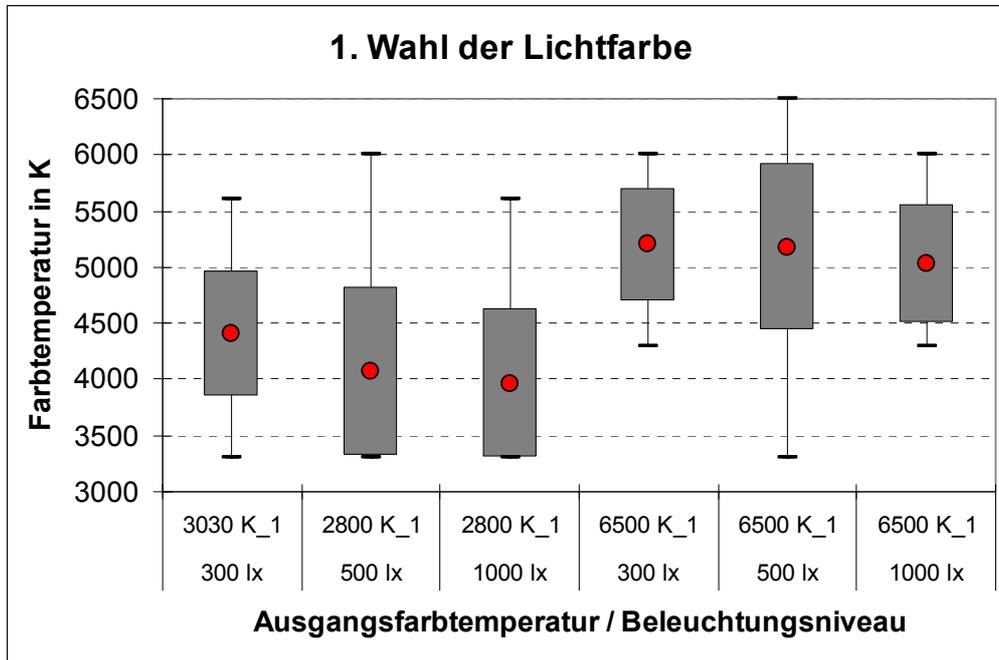


Abbildung 4: Ergebnisse der 1. Wahl für die Lichtfarbe (Minimalwert, Mittelwert mit +/- Standardabweichung, Maximalwert)

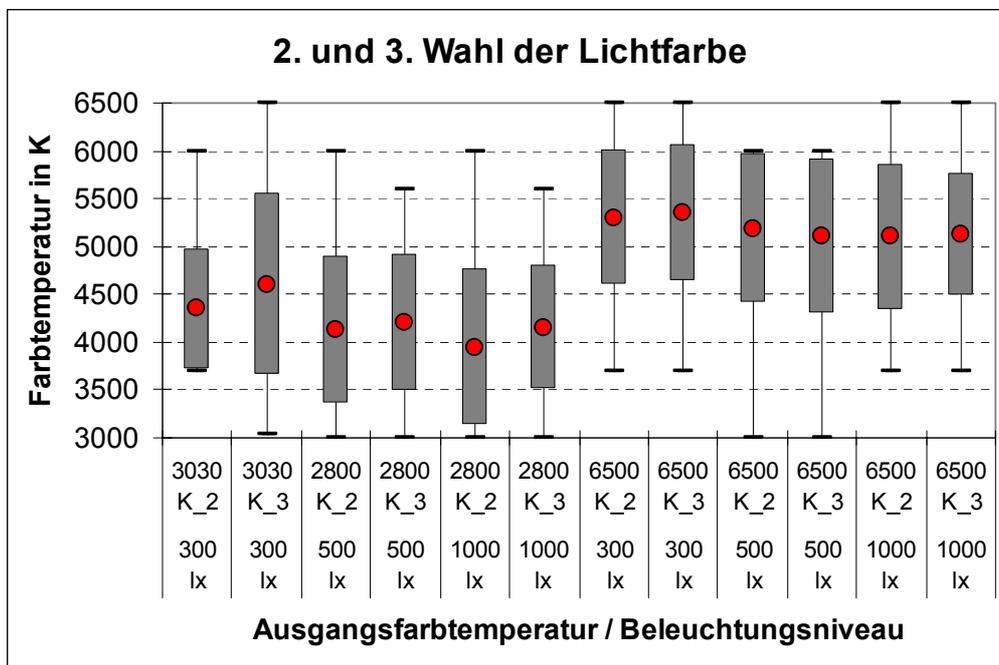


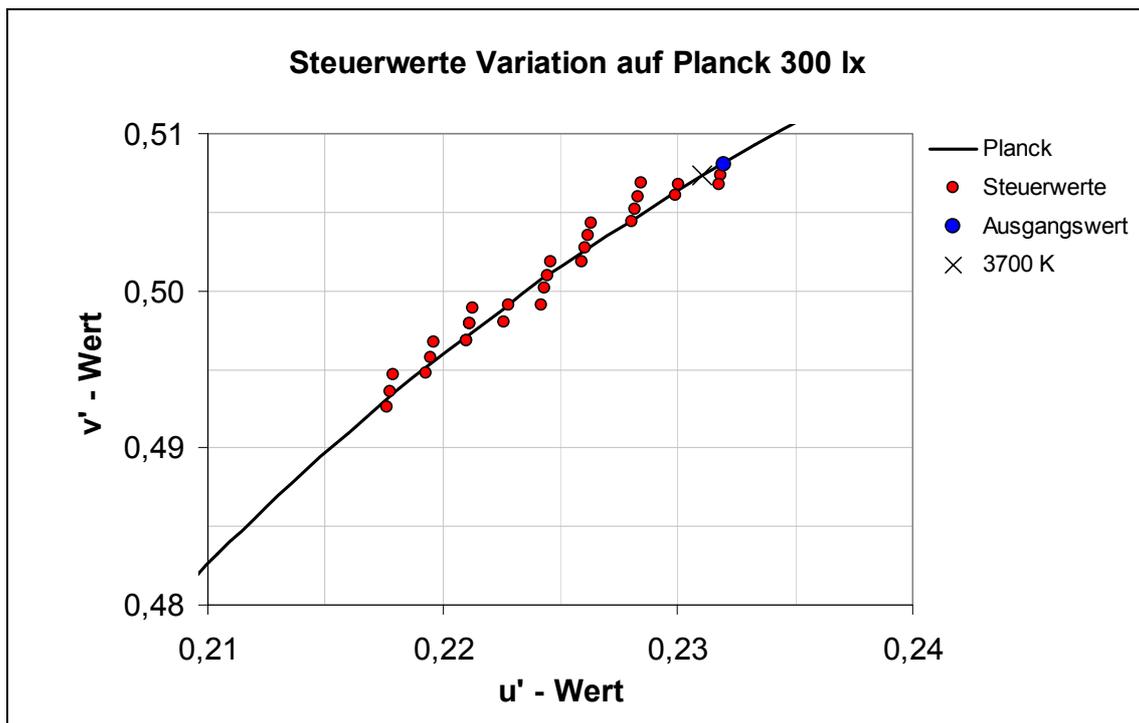
Abbildung 5: Ergebnisse der 2. und 3. Wahl für die Lichtfarbe (Minimalwert, Mittelwert mit +/- Standardabweichung, Maximalwert)

⁶ Gall, D.; Vandahl, C. u.a.: »Einzelplatzbeleuchtung und Allgemeinbeleuchtung am Arbeitsplatz«, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz: Forschung Fb 753, 1996

4.2. Ermittlung von merkbaren Lichtfarbensprüngen

Ziel der Untersuchung war die Bestimmung von merkbaren Änderungen in der Lichtfarbe bei der sprunghaften Variation der Lichtfarbe, ausgehend von gewählten Farborten, entlang des Planckschen Kurvenzuges und der Juddschen Geraden für ausgewählte Farbtemperaturen und verschiedene Beleuchtungsniveaus, die typisch für Bürosituationen sind.

4. 2.1 Untersuchungen auf dem Planckschen Kurvenzug



den Ausgangswert zurückgekehrt wurde. Die Bewertung erfolgte mittig auf einer homogenen Fläche für den Arbeitsbereich 60 x 80 cm². Je Versuchssituation wurden drei Versuchsdurchläufe durchgeführt.

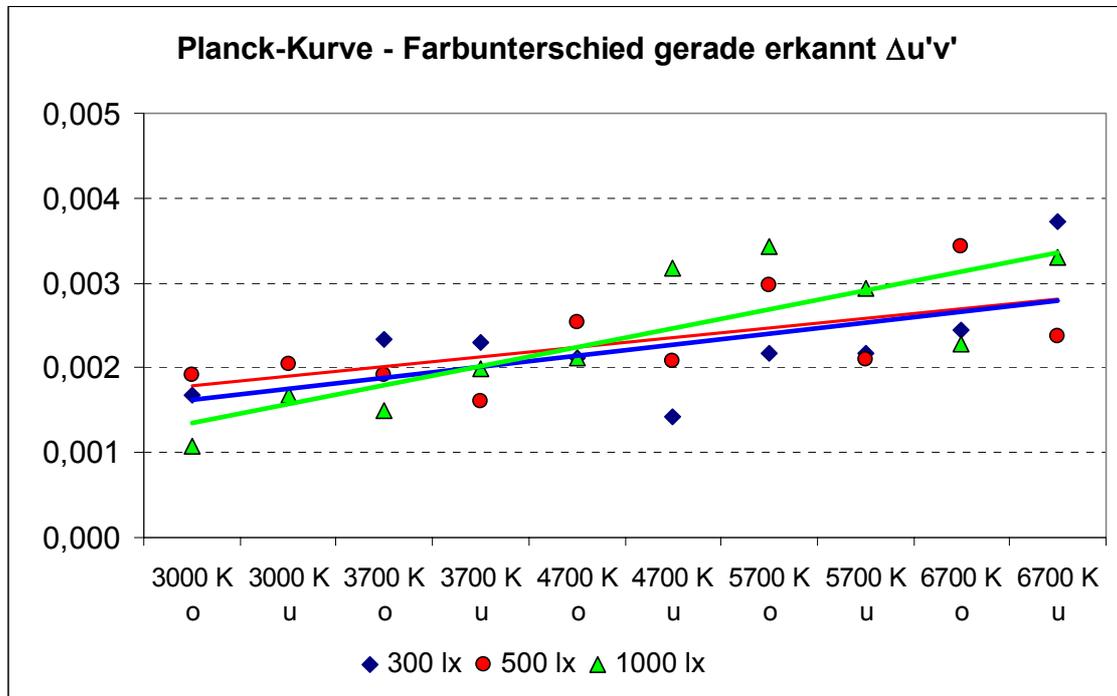


Abbildung 7: Farbunterschied gerade erkannt (Meridiane, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

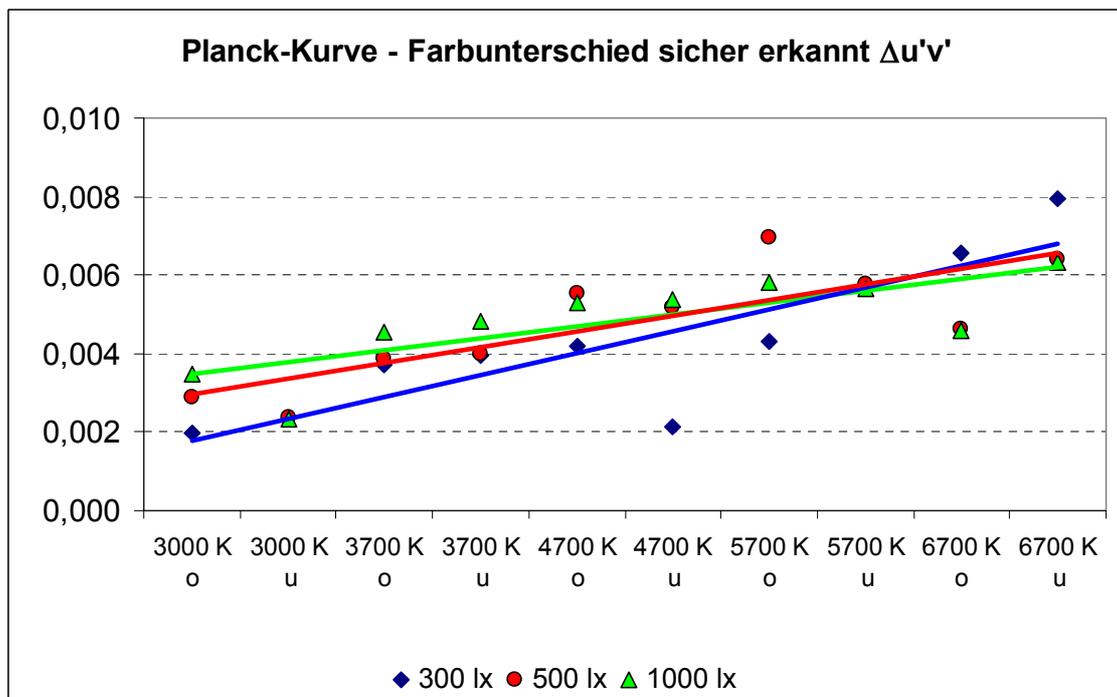


Abbildung 8: Farbunterschied sicher erkannt (Meridiane, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

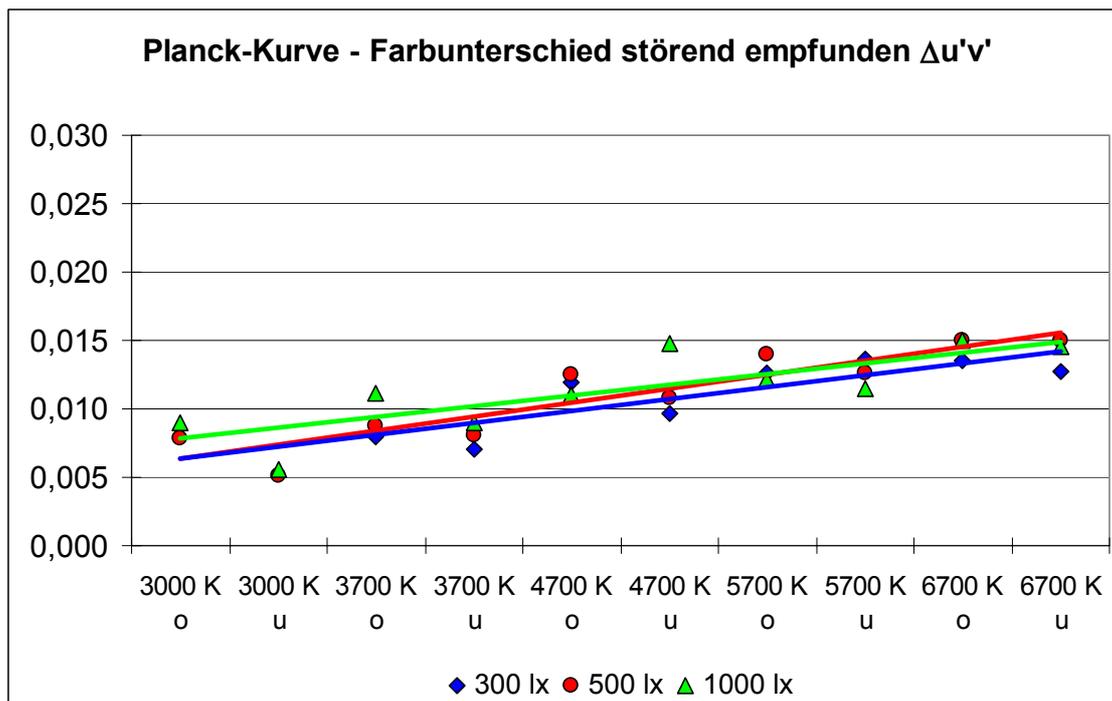


Abbildung 9: Farbunterschied störend empfunden (Meridiane, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

Abbildung 7 bis Abbildung 9 zeigen die Ergebnisse für die Bewertungskriterien gerade erkannt, sicher erkannt und als störend empfunden für die Variation der Lichtfarbe entlang des Planckschen Kurvenzuges. „o“ kennzeichnet die Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, während „u“ die Variation zu niedrigen Farbtemperaturen zeigt. Für die Auswertung wurde der Farbabstand $\Delta u'v'$ nach Gleichung 1 berechnet:

Gleichung 1 $\Delta u'v' = \sqrt{(u'_2 - u'_1)^2 + (v'_2 - v'_1)^2}$ mit

u'_1, v'_1 Farbort der Bezugslichtfarbe

u'_2, v'_2 Farbort der bewerteten Lichtfarbe

Für Beleuchtungsniveaus zwischen 300 lx und 1000 lx ergaben sich dabei keine signifikanten Unterschiede, sodass eine Gesamtbetrachtung möglich ist. Da für höhere Farbtemperaturen die Steuerwerte aufgrund der digitalen Ansteuerung nicht so fein gewählt werden können wie bei niedrigeren Farbtemperaturen, wurden die Schwellwerte leicht nach unten korrigiert. In Abbildung 10 sind die Ergebnisse zur Wahrnehmung von Farbunterschieden bei der Variation der Lichtfarbe entlang des

Planckschen Kurvenzuges für die sprunghafte Änderung von einer Ausgangsfarbttemperatur zusammengefasst.

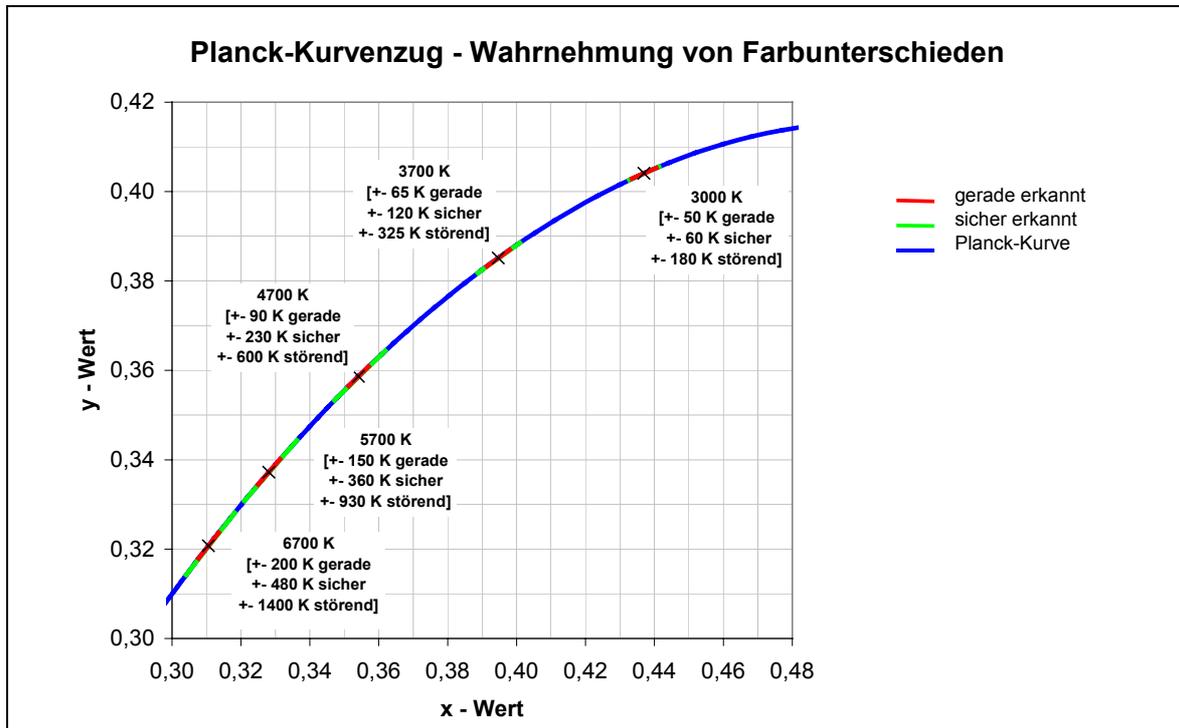


Abbildung 10: Wahrnehmung von Farbunterschieden bei Variation entlang dem Planckschen Kurvenzug (Mediane)

Bei Variationen entlang dem Planckschen Kurvenzug wurden auf einer homogen ausgeleuchteten Fläche Farbunterschiede ab $\Delta u'v' = 0,0016$ gerade erkannt, ab $\Delta u'v' = 0,0024$ sicher erkannt, ab $\Delta u'v' = 0,007$ wirkten sie störend. In den Untersuchungen zeigte sich ein geringer Anstieg der Werte mit zunehmender Farbtemperatur.

4. 2.2 Untersuchungen entlang der Juddschen Geraden

Aufgrund der Untersuchungsergebnisse für den Planckschen Kurvenzug, bei denen sich kein signifikanter Zusammenhang zur Beleuchtungsstärke zeigte, wurden die Schwellen für die Farbwahrnehmung entlang der Juddschen Geraden für die Lichtfarben 3000 K, 3700 K, 4700 K, 5700 K und 6700 K nur für das Beleuchtungsniveau 500 lx durchgeführt. Die Untersuchung erfolgte mit 21 Probanden im Alter von 22 bis 59 Jahren. Abbildung 11 zeigt die möglichen Steuerwerte für die Variation des Farbortes unterhalb des Planckschen Kurvenzuges bei einem Beleuchtungsniveau von 500 lx für die Farbtemperatur 4700 K entlang der Juddschen Geraden beispielgebend.

Nach einer Adaptation auf den Ausgangswert wurde die Sprungweite entlang der Juddschen Geraden bei konstanter dargebotener Helligkeit vergrößert, bis die Lichtfarbenänderung durch den Probanden gerade erkannt werden konnte, sicher erkennbar war oder als störend empfunden wurde, wobei nach jedem Sprung auf den Ausgangswert zurückgekehrt wurde. Die Bewertung erfolgte mittig auf einer homogenen Fläche für den Arbeitsbereich 60 x 80 cm². Die Variation des Farbortes erfolgte oberhalb und unterhalb des Planckschen Kurvenzuges und für jede Versuchssituation wurden drei Versuchsdurchläufe durchgeführt.

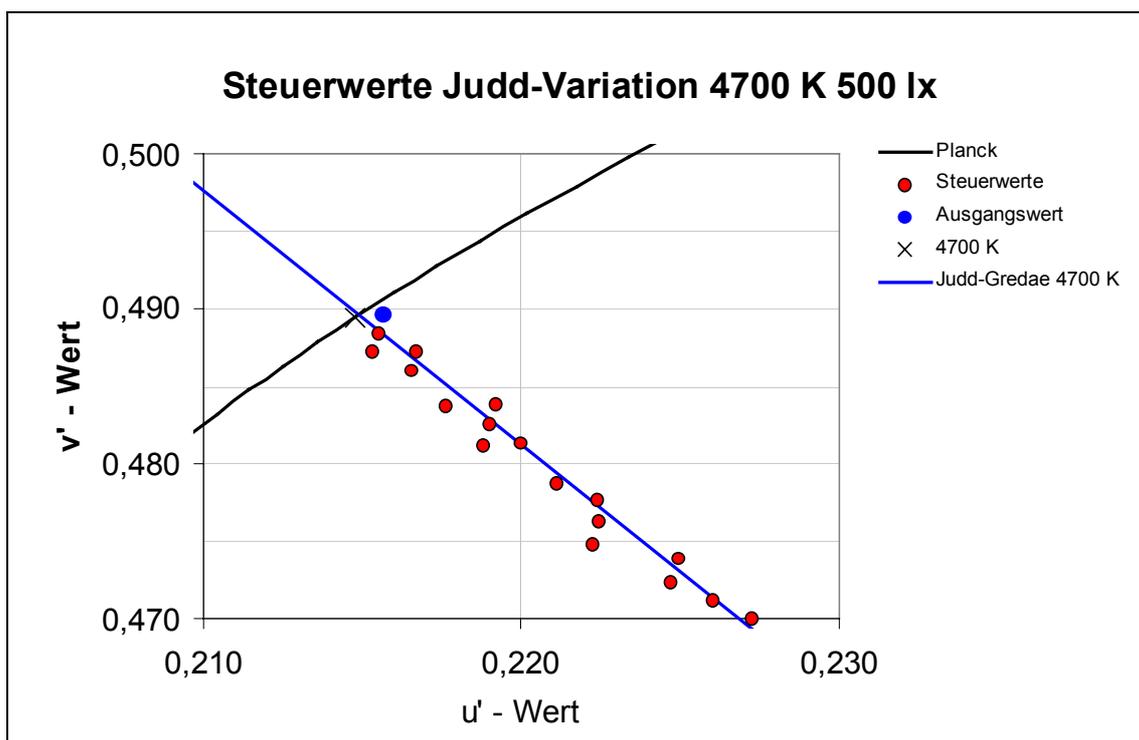


Abbildung 11: Mögliche Steuerwerte für die Variation unterhalb der Planckschen Kurve entlang der Juddschen Gerade bei 4700 K

Abbildung 12 bis Abbildung 14 zeigen die Ergebnisse für die Bewertungskriterien gerade erkannt, sicher erkannt und als störend empfunden für die Variation der Lichtfarbe entlang der Juddschen Geraden. Für die Auswertung wurde der Farbabstand nach Gleichung 1 berechnet.

Bei Variationen entlang der Juddschen Geraden wurden auf einer homogen ausgeleuchteten Fläche Farbunterschiede ab $\Delta u'v' = 0,001$ gerade erkannt, ab $\Delta u'v' = 0,0019$ sicher erkannt, ab $\Delta u'v' = 0,0033$ als störend empfunden. Die Ergebnisse weisen einen Anstieg der Farbabstände hin zu höheren Farbtemperaturen auf, die zum Teil in den Möglichkeiten der digitalen Ansteuerung

für den Lichtsimulator begründet sind. Jedoch legen die Ergebnisse einen geringen Anstieg der Werte mit zunehmender Farbtemperatur nahe.

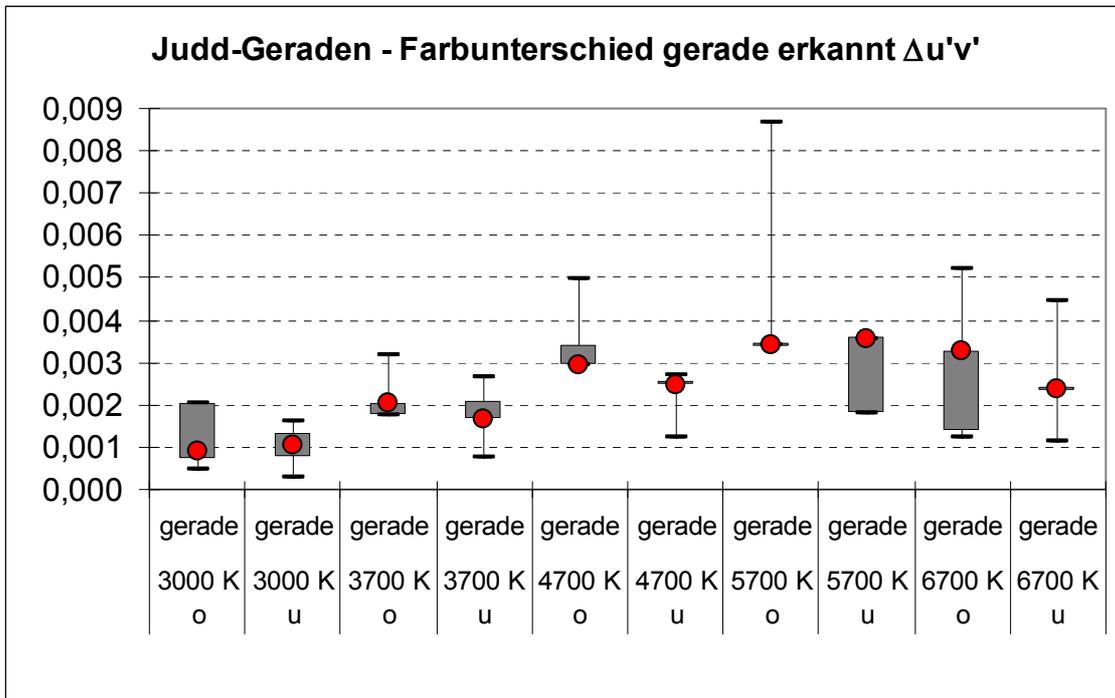


Abbildung 12: Farbunterschied gerade erkannt (Minimalwert, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile, Maximalwert, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

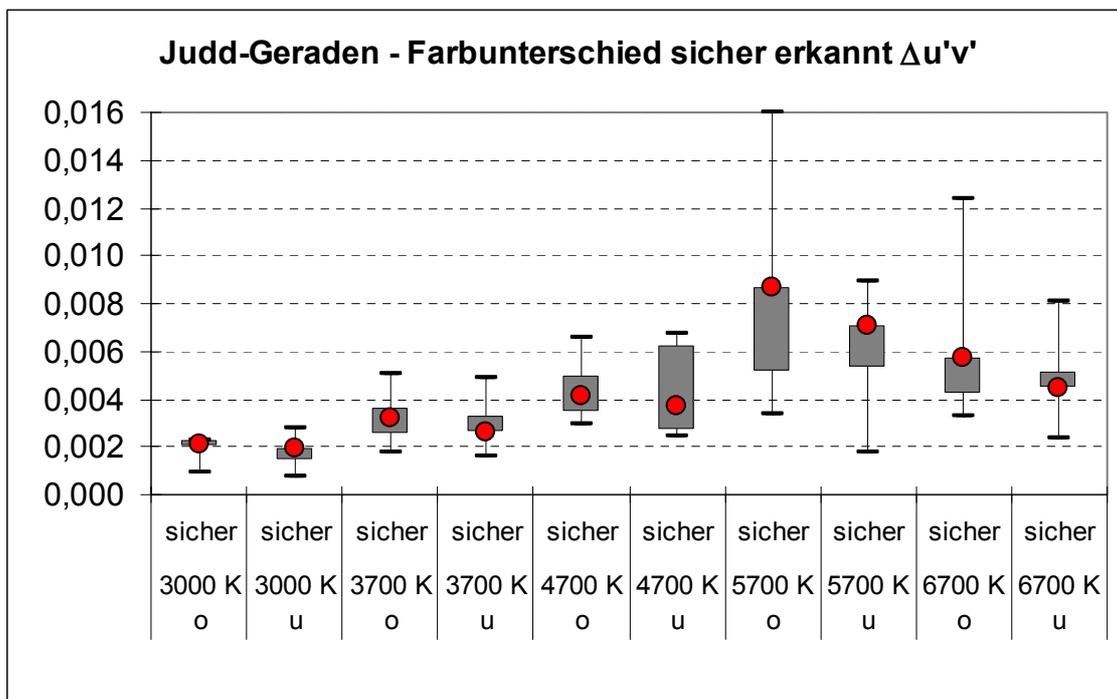


Abbildung 13: Farbunterschied sicher erkannt (Minimalwert, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile, Maximalwert, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

In Abbildung 14 sind die Ergebnisse zur Wahrnehmung von Farbunterschieden bei der Variation der Lichtfarbe entlang der Juddschen Geraden für ausgewählte Lichtfarben bei einer sprunghaften Änderung vom Ausgangsfarbtort mit homogenen Verhältnissen zusammengefasst.

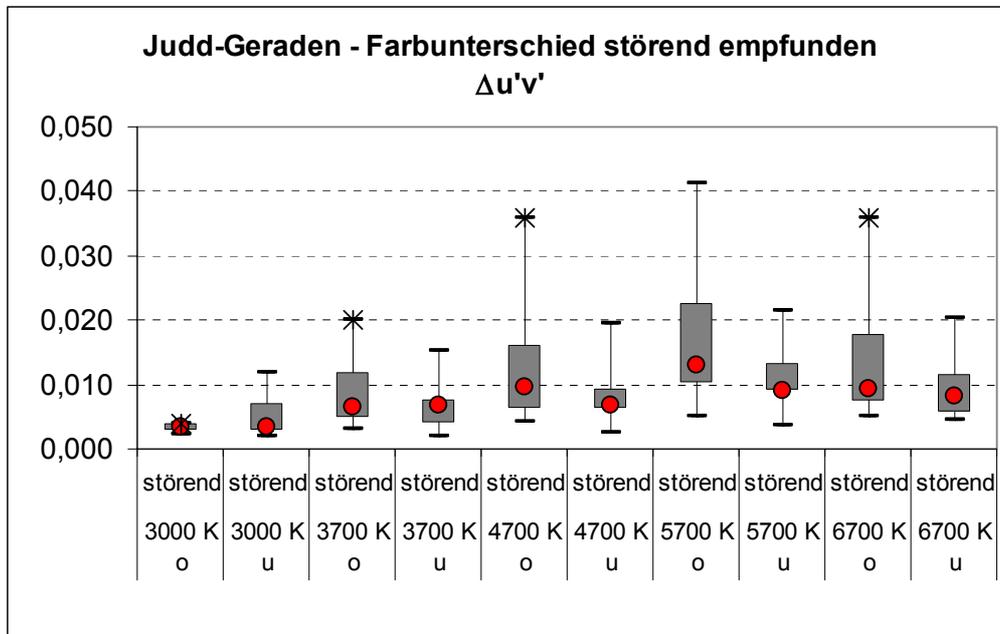


Abbildung 14: Farbunterschied störend empfunden (Minimalwert, 25. Perzentile, Median, 75. Perzentile, Maximalwert, o - Variation vom Ausgangswert hin zu höheren Farbtemperaturen, u - Variation zu niedrigen Farbtemperaturen)

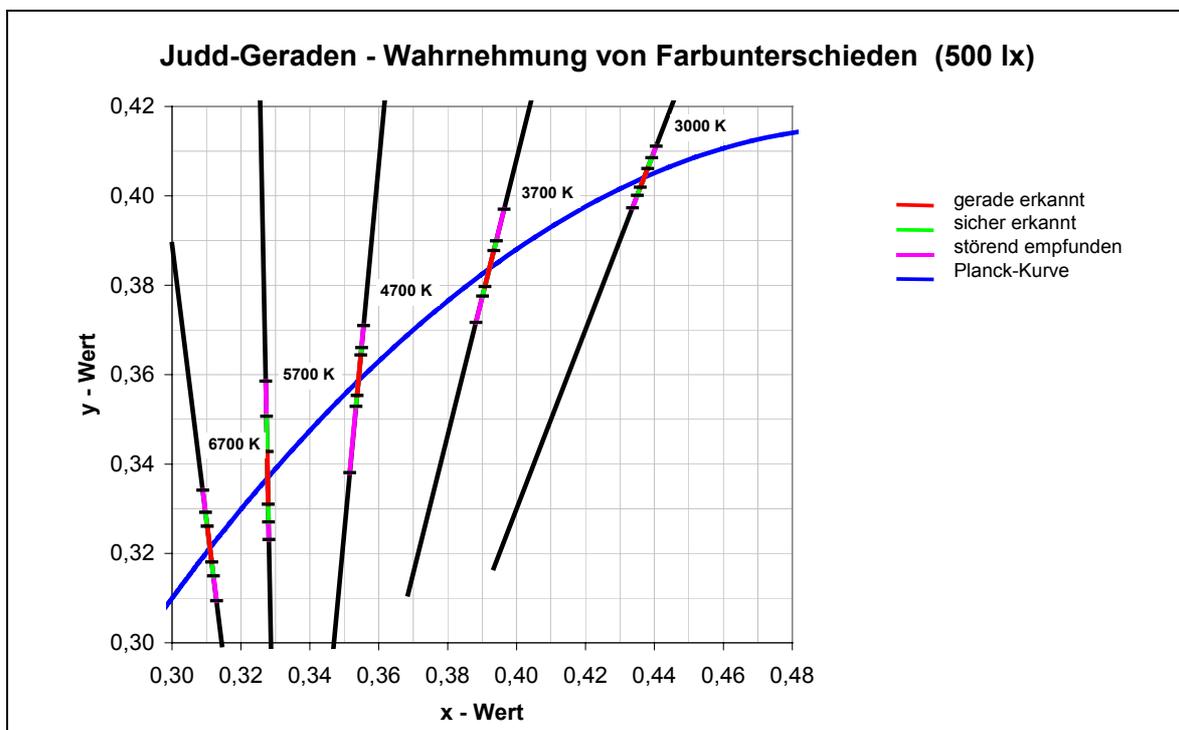


Abbildung 15: Wahrnehmung von Farbunterschieden bei Variation entlang der Juddschen geraden (Mediane)

4.3. Dynamische Lichtfarbenvariation⁷

Mit den Untersuchungen zur dynamischen Lichtfarbenvariation wurden folgende Ziele verfolgt:

- Klärung des Einflusses von Beleuchtungsniveaus bei der Variation der Lichtfarbe
- Untersuchung des Einflusses von Farbabständen bei sprunghaften Farbwechseln
- Bestimmung des Einflusses vom Weg der Lichtfarbenänderung im Farbraum

Für die Untersuchungen wurde ebenfalls der Lichtsimulator nach Abbildung 1 verwendet. Probanden bewerteten die dargebotenen sprunghaften Farbwechsel auf der Arbeitsfläche anhand einer vorgegebenen Bewertungsskala von nicht wahrnehmbar bis unerträglich (Abbildung 16).

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------|------------------------|--------------|
| nicht wahrnehmbar | gerade wahrnehmbar | sicher wahrnehmbar | zunehmend störend | störend | zunehmend unerträglich | unerträglich |

Abbildung 16: Skala zur Bewertung der Empfindung

4.3.1. Einfluss des Beleuchtungsniveaus

Die Darbietung von Farbsprüngen erfolgte randomisiert mit äquidistanter Schrittwerte $\Delta u'v'$ mit Sprungweiten von $\Delta u'v' = 0,0025$ bis $\Delta u'v' = 0,01$ mit einer Stufung von $\Delta u'v' = 0,0005$. Für die Untersuchungen wurde die Lichtfarbe im Bereich zwischen 3000 K und 8000 K variiert, wobei beide Änderungsrichtungen in die Untersuchungen einbezogen wurden. Dabei wurden identische Farbwechsel in umgekehrter Reihenfolge dargeboten. Um eine Beeinflussung der Farbadaptation auf die Ausgangslichtfarbe während der Testreihen möglichst gering zu halten, wurden die Haltezeiten zwischen den Farbwechseln mit konstant 3 s vorgegeben. Die Untersuchungen wurden für die Beleuchtungsniveaus von 300 lx, 500 lx und 1000 lx durchgeführt. Die Variation der Lichtfarbe erfolgte entlang des Planckschen Kurvenzuges. Die Untersuchung erfolgte in der 1. Versuchsreihe mit 10 Probanden (20 bis 59 Jahre).

⁷ Kaltenbach, A.: »Demonstratorentwicklung einer circadianen Beleuchtungssteuerung und Untersuchung zur Farbwahrnehmung von Lichtfarbenänderungen«, Diplomarbeit TU Ilmenau, 2005

Die Untersuchungen zeigten, dass es keinen einfachen Bezug zwischen dem Farbabstand der Sprünge und der Empfindung gibt. Große Farbabstände führen nicht in jedem Fall zu hohen Werten in der Bewertung (Abbildung 17).

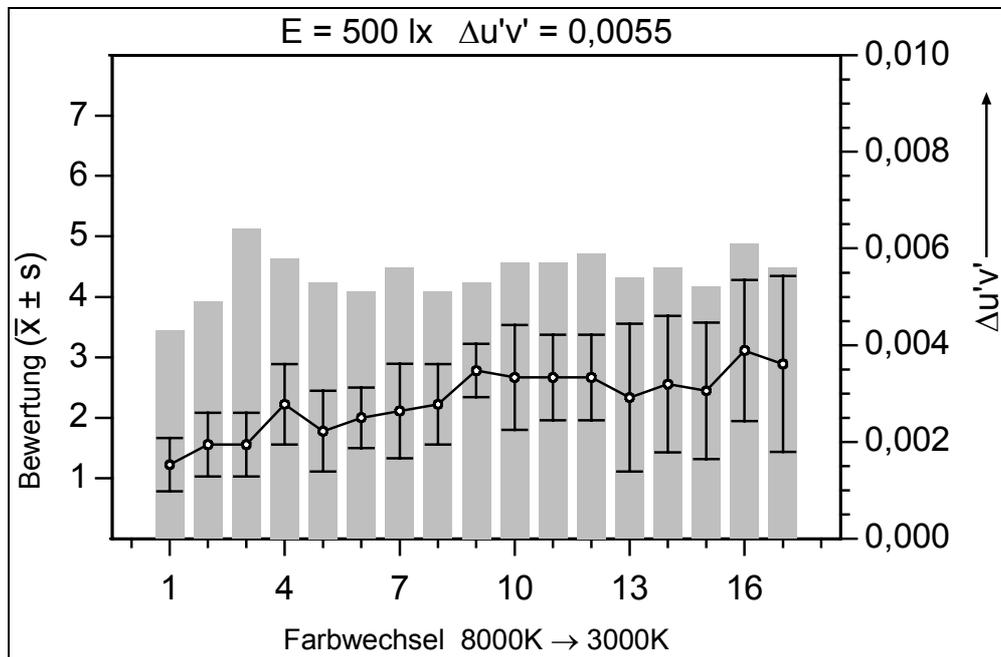


Abbildung 17: Mittlere Bewertung und Farbabstand der Sprünge von 10 Probanden

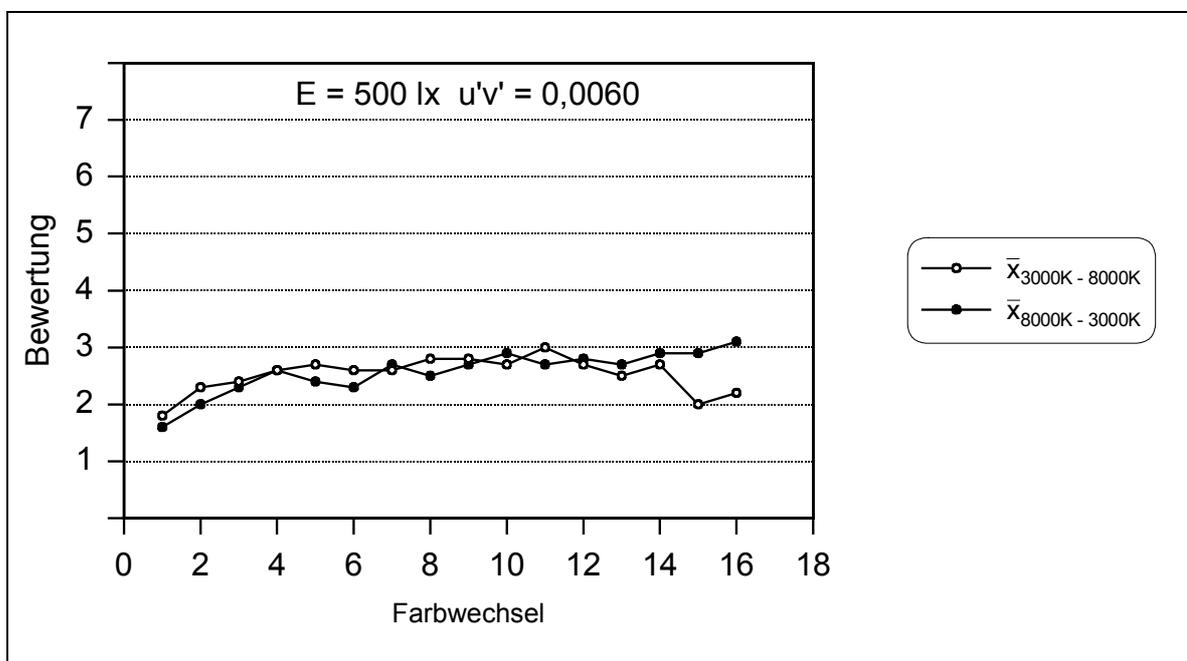


Abbildung 18: Mittlere Bewertung für beide Änderungsrichtungen der Lichtfarbe

Über alle Farbabstände und für beide Änderungsrichtungen zeigten sich nahezu identische Kurvenverläufe (Abbildung 18). Je weiter man sich von der Start-

Farbvalenz entfernt, desto störender wurden Änderungen empfunden. Die Beleuchtungsstärke hat keinen signifikanten Einfluss auf die Farbempfindung (Abbildung 19).

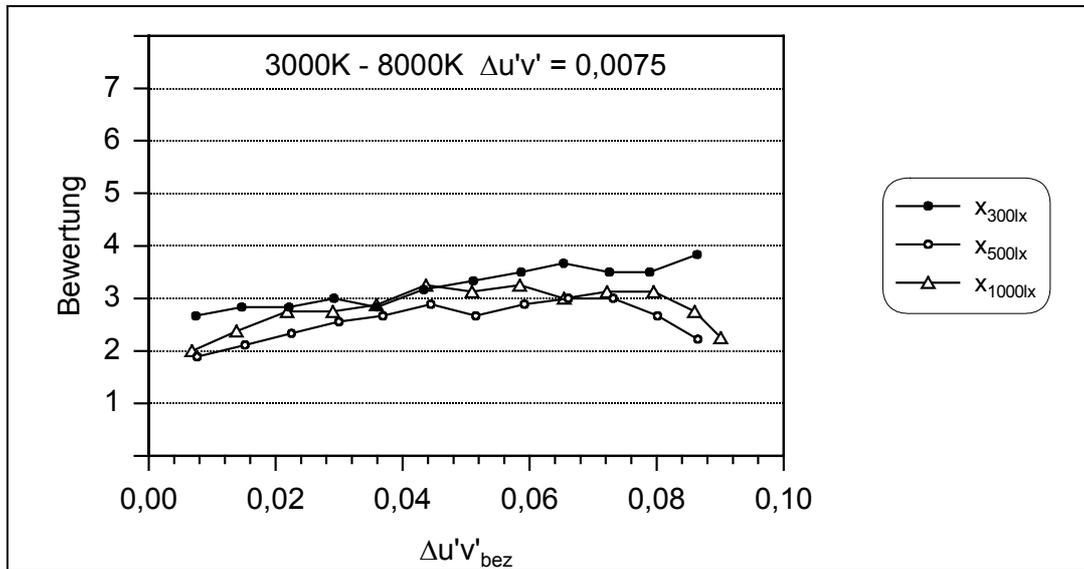


Abbildung 19: Mittlere Bewertungen bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus

Aus den Untersuchungen ergab sich die mittlere Erkennbarkeitsschwelle, unterhalb von $\Delta u'v' = 0,0025$. Der Übergang zu einem störenden Eindruck lag im Bereich von $0,0045 < \Delta u'v' < 0,0055$.

4.3.2 Einfluss des Weges auf die Variation der Lichtfarbe

Die Untersuchung wurde bei einer Beleuchtungsstärke von $E = 500 \text{ lx}$ mit 20 Probanden (20 bis 59 Jahre) durchgeführt. Verglichen wurde die Variation der Lichtfarbe entlang des Planckschen Kurvenzuges mit dem linearen Weg von 3000 K zu 8000 K und ein Polygon 2. Grades, das sich an die Funktion der +5 Schwelleneinheiten anschmiegt (Abbildung 20). Die Haltezeit zwischen den Farbwechseln betrug 3 s und wurde für einen weiteren Test auf 0,1 s verkürzt.

Die mittlere Bewertung der Farbsprünge für die verschiedenen Wege der Lichtfarbenvariation verlaufen sehr ähnlich, unabhängig von der Variationsrichtung. Innerhalb der +/- 5 Schwellenwert-Einheiten um den Planckschen Kurvenzug ist der Gesamtverlauf der Lichtfarbenvariation bei einer Haltezeit von 3 s für die Beurteilung sprunghafter Farbwechsel nicht entscheidend (Abbildung 21).

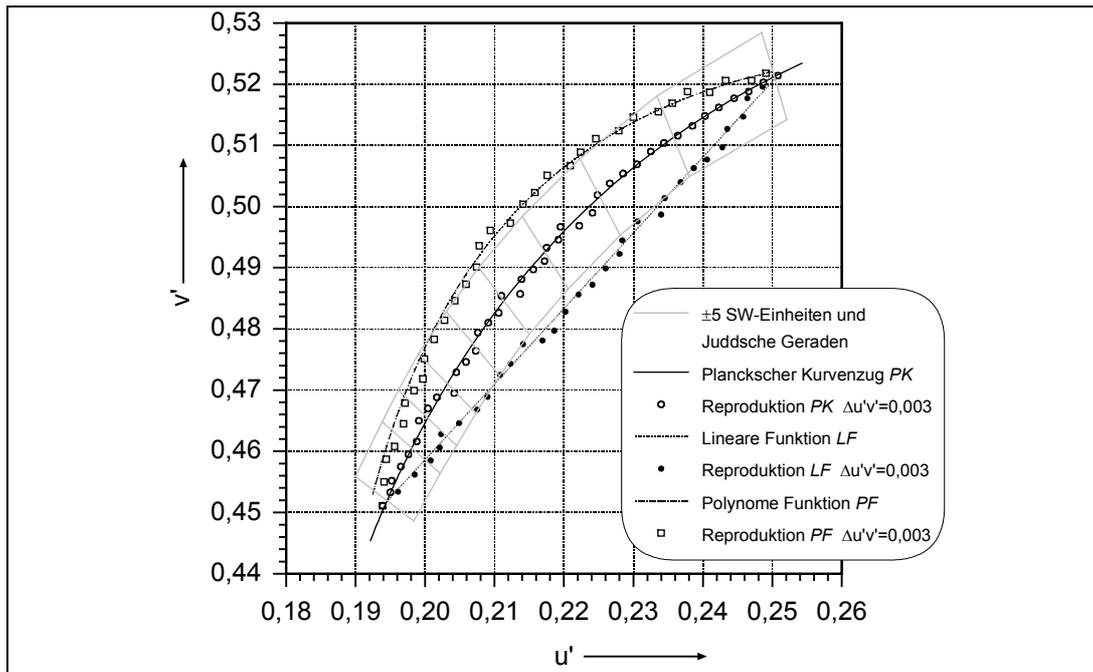


Abbildung 20: Wege zur Variation der Lichtfarbe

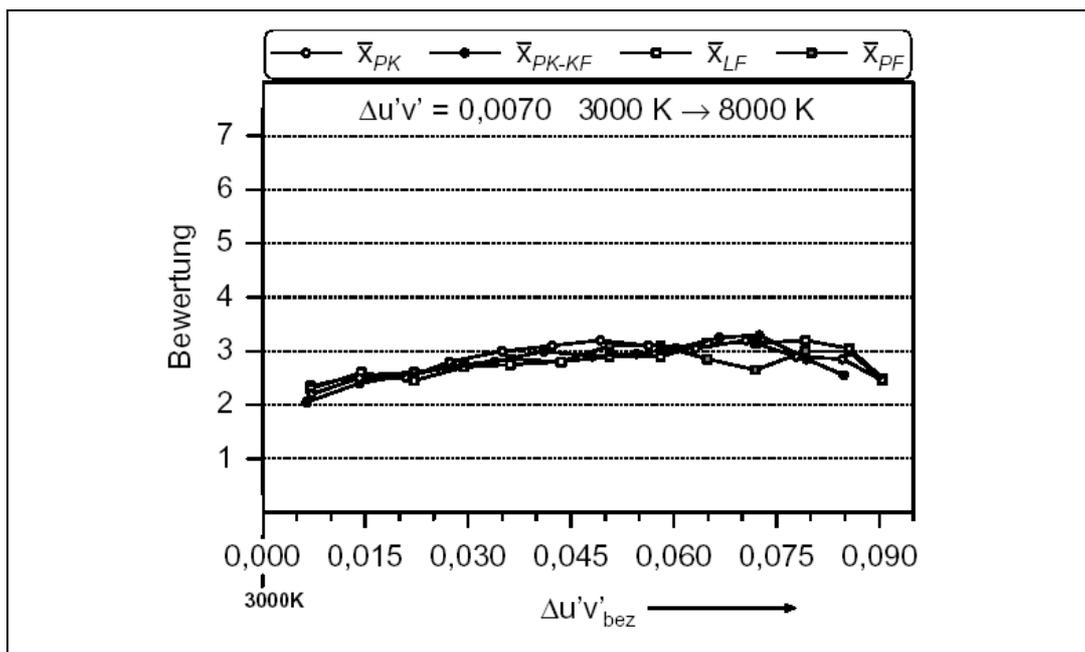


Abbildung 21: Vergleich der mittleren Bewertung für verschiedene Wege der Lichtfarbenvariation

Einzelne Probanden gaben bei der Bewertung von Variationswegen, die vom Planckschen Kurvenzug abweichen, Farbnuancen an. Abbildung 22 zeigt die identifizierte Farbigkeit für die Farbvariation entlang der linearen Funktion (LF) und der Polygonfunktion 2. Grades (PF). Für längere Haltezeiten ist anzunehmen, dass eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Wegen aufgrund der nachlaufenden Farbadaptation unmöglich ist. Bei kurzen Haltezeiten zeigte sich, dass die

Farbigkeit des Gesamtverlaufs erfasst wird. Die Verteilung der gewählten Favoriten der Abbildung 23 zeigt eine deutliche Bevorzugung der Variation über dem Planckschen Kurvenzug. Eine Abweichung vom Planckschen Kurvenzug hat im angegebenen Bereich keinen Einfluss auf die Empfindung der sprunghaften Farbwechsel, allerdings wird bei schnellen Farbwechseln über vom Planckschen Kurvenzug abweichenden Wegen eine Farbigkeit erkannt.

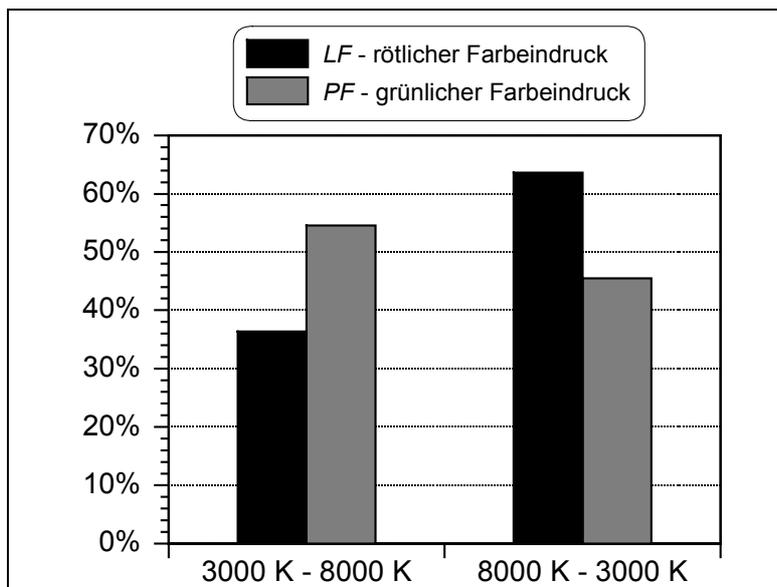


Abbildung 22: Identifizierte Farbigkeiten bei der Variation entlang verschiedener Wege

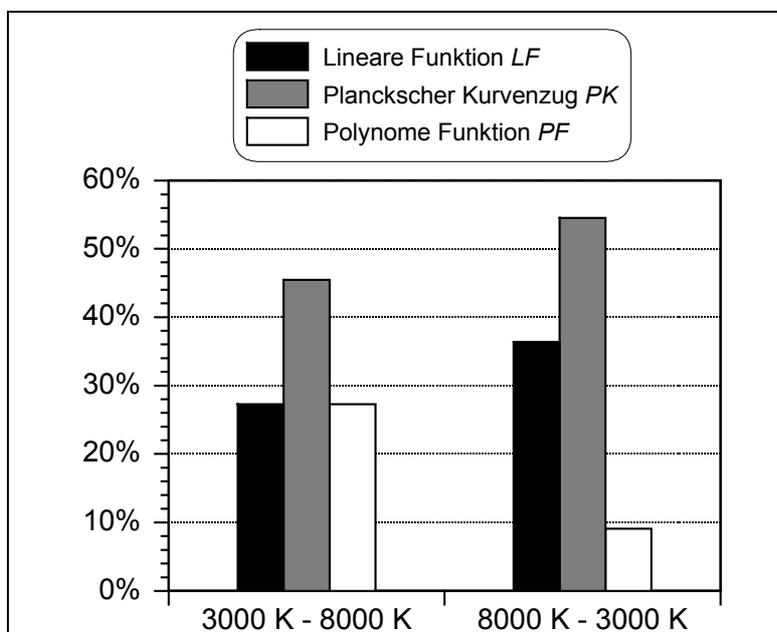


Abbildung 23: Bevorzugter Weg für die Variation der Lichtfarbe

5. Zusammenfassung

Für die Konzeption adaptiver Beleuchtungssysteme konnten wichtige grundlegende Erkenntnisse gewonnen werden. Basierend auf den aufgezeigten Untersuchungsergebnissen kann geschlussfolgert werden, dass ein signifikanter Einfluss der Beleuchtungsstärke auf die subjektive Empfindung von Lichtfarbenänderungen ausgeschlossen werden kann. Für die Variation der Lichtfarbe ist eine Abbildung des Planckschen Kurvenzuges nicht zwingend erforderlich, im Hinblick auf schnelle Variationen jedoch empfehlenswert. Es hat sich gezeigt, dass die gewählte Ausgangslichtfarbe und die bevorzugte Lichtfarbe einen messbaren Einfluss auf die Empfindung von Lichtfarbenvariationen hat. Somit lässt sich schlussfolgern, dass eine Variation der Lichtfarbe in Farbabständen unterhalb der mittleren Erkennbarkeitsschwelle von $\Delta u'v' = 0,0025$ erfolgen sollte. Für die dynamische Lichtfarbenvariation ergibt sich auf Grund der ständigen Farbadaptation eine direkte Verbindung der Haltezeit zwischen den einzelnen Farbsprüngen und der Erkennbarkeit einer Farbigkeit der Variation. Die Laborergebnisse der durchgeführten Untersuchungen können nun als Ausgangsgrößen für Feldversuche herangezogen werden.