

Dr. Andres Baltzer stellt in einer Serie von Beiträgen die aktuelle Studie „Zur Genauigkeit und Konstanz digitaler Farbmessung. Spektrofotometrische und visuelle Zahnfarbbeurteilung im Vergleich“ vor. Die Serie beginnt mit der Vermittlung von theoretischen Background-Informationen wie beispielsweise Erläuterungen zum Farbsystem, Definitionen und Funktionsweisen der spektrofotometrischen Farbmessung, um schließlich ausführlich Ziele, Methodik und Ergebnisse der Studie darzustellen.

Ausgabe Oktober 2007
– Teil I: Farbsystem $L^*a^*b^*/L^*C^*h^*$, Zahnfarbraum, ΔE -Wert, visuelle Bestimmung von Zahnfarben.

Physikalisches Farbsystem und menschlicher Farbeindruck

Farben und Formen aus der Naturbeobachtung dienen seit jeher in allen Kulturen als Ausdrucksmittel zur Formulierung von weltanschaulichen Modellen. Natürliche Phänomene wie der Regenbogen (Abb. 1), der die stets gleiche Farbabfolge Rot-Gelb-Grün-Blau und eine kreisrunde Anordnung im Farbraum aufweist, haben gewiss inspiriert. Eine große Anzahl philosophischer Modelle und metaphysischer Welterklärungen ist im Laufe der Kulturgeschichte entstanden. Ein virtueller Spaziergang durch die verschiedenen Welten der Farben und Formen ist dank des Internets kein Problem und äußerst spannend. Repräsentativ sei beispielsweise auf das Modell der alten islamischen Tradition (Abb. 2) hingewiesen, dessen Vernetzung von Farben, Elementen und Eigenschaften bemerkenswert ist: Die Systematik durch Farbgegenüberstellung von Rot-Grün und Gelb-Blau findet sich noch heute in physikalisch fundierten Farbmodellen.

Das Farbsystem $L^*a^*b^*$ beziehungsweise $L^*C^*h^*$

In den ersten Jahrzehnten des zwanzigsten Jahrhunderts wurde der Ruf nach einer objektiven Farbbestimmung immer lauter. Gesucht wurde ein Farbsystem, das sich zum einen auf den menschlichen Farbeindruck beziehe und zum anderen ein mathematisches Konstrukt darstelle, mit welchem die Position der zu bestimmenden Farbe in Relation zu jeder Primärfarbe berechenbar sei. Der Verzicht auf Farbmuster erschien wünschenswert, da der Vergleich einer zu bestimmenden Farbprobe mit einem Standardmuster stets ein subjektiver Vorgang ist. Farbmuster können zudem im Laufe der Zeit blasser

Dr. Andres Baltzer (Teil 1)



Abb. 1: Regenbogen erscheinen mit der stets gleichen Farbabfolge Rot-Gelb-Grün-Blau.

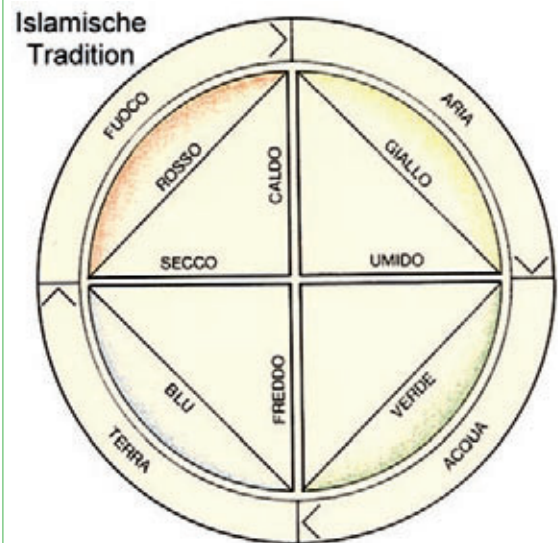


Abb. 2: Bei diesem Teil des alten islamischen Farbsystems stehen sich Blau-Gelb und Rot-Grün wie in aktuellen wissenschaftlichen Farbmodellen gegenüber.

und somit unzuverlässig werden. Die CIE (Commission Internationale d’Eclairage) wurde daher damit beauftragt, eine mathematisch definierte Normfarbtafel zu entwickeln, die den Wünschen nach Präzision und Objektivität gerecht würde.

Im Jahre 1976 wurde auf Basis des CIE-XYZ-Modells aus dem Jahre 1931 das $L^*a^*b^*$ -Farbsystem entwickelt. Es eignet sich sehr gut für die mathematische Lokalisation einer Farbe im Farbraum und für die

Alle Farben, die auf derselben Kreislinie um die L-Achse liegen, weisen die gleiche Farbintensität C (engl. chroma) auf. Alle Farben, die auf demselben Radiusstrahl liegen, weisen den gleichen Farbtone h (engl. hue) auf.

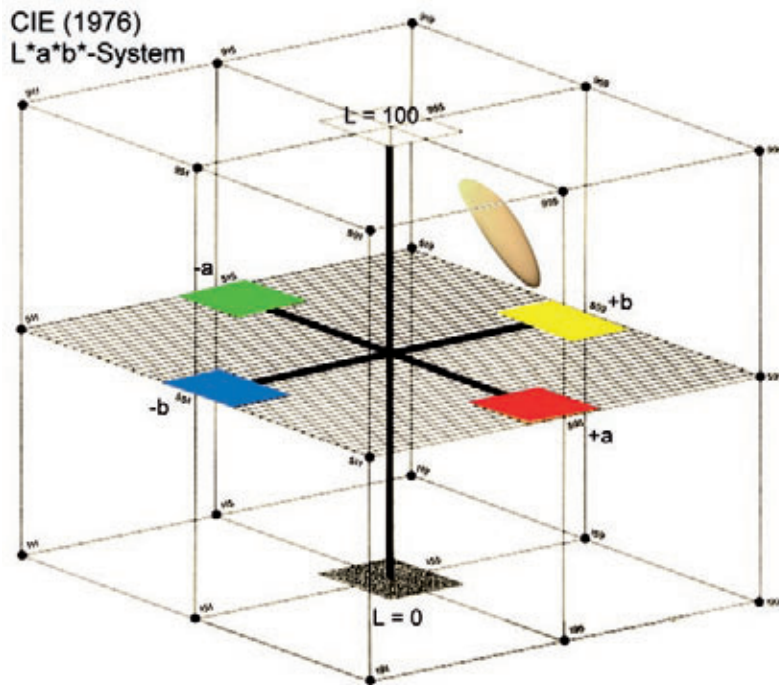


Abb. 3: Der $L^*a^*b^*$ -Farbraum mit der senkrechten Helligkeitsachse L und den waagerechten Farbachsen a und b. Letztere definieren die Farbebene, in der die Farbintensität von der zentralen Farblosigkeit nach außen hin radikal zunimmt. Die Farbtöne auf der Farbebene liegen als Mischfarben von Blau über Rot zu Gelb und Grün rund um die farblose Zentralachse. In höher liegenden Farbebeneen erscheinen die Farben heller, in tiefer liegenden dunkler. Die „Banane“ markiert Lage und Form des Farbraums natürlicher Zähne.

Auf mittlerer Höhe in Bezug auf die senkrechte, zentrale Schwarz-Weiß-Achse ist eine grau gefärbte, horizontale Farbebene zu erkennen, auf der die in die vier Hauptrichtungen weisenden Farben Grün-Rot (a-Achse) und Blau-Gelb (b-Achse) liegen (Abb. 4). Nicht dargestellt sind in dieser Abbildung die Mischfarben, die zwischen den Hauptfarben liegen und die Farbebene vervollständigen. Auf dieser Farbebene entwickeln sich die Farben, ausgehend von der zentralen, farblosen Schwarz-Weiß-Achse, nach außen hin an Farbigkeit (Intensität) gewinnend. Je höher eine Farb-achse in Bezug auf die senkrechte Schwarz-Weiß-Achse zu liegen kommt, desto heller, je tiefer sie liegt, desto dunkler sind die Farben.

Formulierung des Unterschiedes zweier Farben im Farbraum. Das System ist standardisiert, verfolgt das Prinzip der Äquidistanz (gleichmäßige Abstände zwischen den Farben im Farbraum) und berücksichtigt die für den menschlichen Farbeindruck wesentlichen Farbdimensionen.

Das $L^*a^*b^*$ -System (Abb. 3) ist folgendermaßen aufgebaut: Die a- und die b-Achse bilden eine Ebene (Farbebene). Auf der a-Achse liegen alle Grün- und Rottöne. Hierbei repräsentieren negative a-Werte grüne und positive a-Werte rote Farben. Auf der b-Achse befinden sich im negativen Bereich alle Blau- und im positiven Bereich alle Gelbtöne. Vertikal zur a- und b-Ebene verläuft die Helligkeitsachse L (engl. luminance). Ein L-Wert (engl. luminance value) von 0 entspricht Schwarz und ein L-Wert von 100 Weiß.

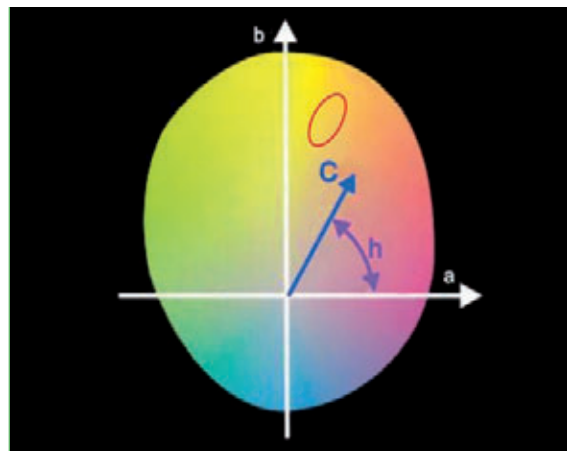


Abb. 4: Das menschliche Auge erkennt nicht alle Farben gleich gut. Im Blau-Bereich ist das Spektrum seiner Wahrnehmungsfähigkeit weitaus kleiner als im Gelb-Bereich. Just in Letzterem befindet sich der Zahnfarbraum (rot eingekreist).

Zwar umfasst das $L^*a^*b^*$ -System alle Farben, allerdings ist der Mensch nicht in der Lage, sämtliche Farben zu erfassen. Der wahrnehmbare Bereich ist je nach Farbgruppe unterschiedlich groß. So kann ein sichtbares Gelb b -Werte von über 100 erreichen, Blau hingegen nur um -50 (Abb. 4). Dadurch ergibt sich eine sehr unregelmäßige Form für den vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Teil des Farbraums. Dieser wird üblicherweise stark vereinfacht als Zylinder oder Kugel wiedergegeben. Fakt ist, dass alle für den Menschen sichtbaren Farben sich in diesem Ausschnitt des $L^*a^*b^*$ -Farbraums befinden.

Der Zahnfarbraum

Das längliche, bananenförmige Gebilde, das in Abbildung 3 räumlich und in Abbildung 4 als Schnittbild beziehungsweise Farbebene dargestellt ist, ist jener Sektor im $L^*a^*b^*$ -Farbraum, in dem sich die natürlichen Zahnfarben befinden. Die Bananenform spiegelt die natürlichen Verhältnisse wider: Die diversen Zahnfarben unterscheiden sich insbesondere in ihrer Farbhelligkeit, weshalb der Zahnfarbenraum senkrecht zur Helligkeitsachse steht und sich einer Banane gleich in die Länge zieht. Oben sind die helleren und unten sind die dunkleren Zahnfarben angesiedelt. Die intensiveren Zahnfarben befinden sich an der von der farblosen Zentralachse L weiter entfernten Außenkrümmung der „Banane“; rötliche Farbtöne liegen der a -Achse, gelbliche Farbtöne der b -Achse zugewandt.

Eine andere Darstellung des CIE- $L^*a^*b^*$ -Systems erfolgt mithilfe der sogenannten $L^*C^*h^*$ -Parameter. Dabei bleibt die Verteilung der Farben im $L^*a^*b^*$ -Farbraum unverändert, lediglich die Berechnung des Farbortes im Farbraum erfolgt auf andere Weise. Bei $L^*a^*b^*$ ist ein Farbort durch die Distanzen auf den Achsen L , a und b definiert. Bei $L^*C^*h^*$ ist ein Farbort mit der Distanz auf der Achse L (Helligkeit – Höhe des Farborts auf der L -Achse), mit dem Maß C (Farbintensität – Abstand von der L -Koordinate zum Farbort) und dem Winkel h (Farbton – Winkel von der Achse $+a$ zum Farbort) definiert. Die beiden Systeme $L^*a^*b^*$ und $L^*C^*h^*$ sind einander in den Abbildungen 5 und 6 vergleichend gegenübergestellt. Für den gleichen Farbort S sind in Abbildung 5 die Parameter $L^*a^*b^*$ und in Abbildung 6 die Parameter $L^*C^*h^*$ eingezeichnet.

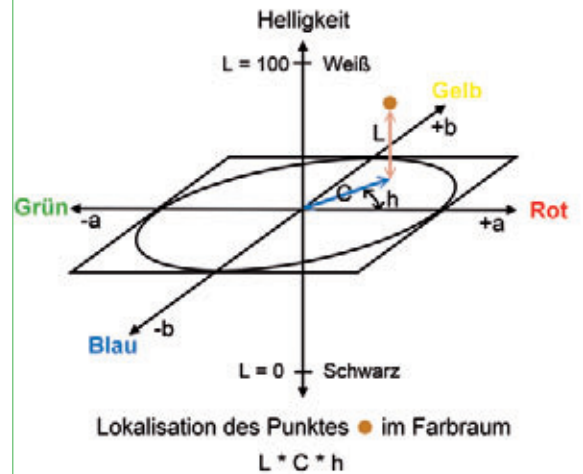
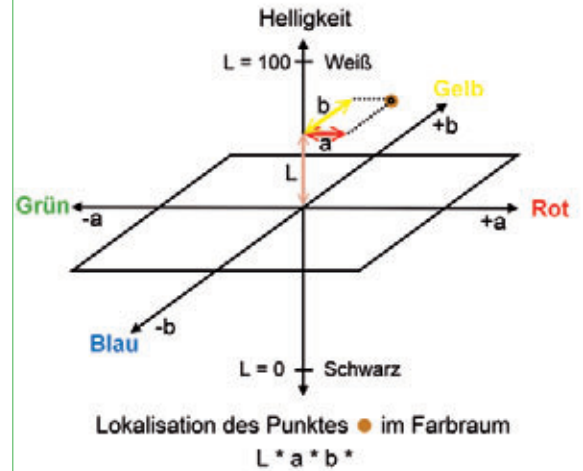


Abb. 5 und 6: Der Farbraum $L^*a^*b^*$ und der Farbraum $L^*C^*h^*$ sind bezüglich der Farbverteilung identisch. Sie unterscheiden sich einzig in der unterschiedlichen Berechnung für die Lokalisation der Farbpunkte.

Die Umrechnung zwischen $L^*a^*b^*$ und $L^*C^*h^*$ erfolgt gemäß folgender Formeln:

$$L = L$$

$$C = \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$h = \arctan(b/a)$$

Bei der Bestimmung der Zahnfarben steht die Beurteilung des Zusammenspiels der Größen Zahn­helligkeit (L), Farbintensität (C) und Farbverschiebung (h) im Vordergrund. Für den Praktiker ist der Umgang mit den $L^*C^*h^*$ -Werten bei der Farbformulierung einfacher, da sich diese Werte direkt auf die für ihn relevanten Farbcharakteristika Helligkeit (L), Chroma (C) und Farbton (h) beziehen. Der Chroma-Wert C wird direkt mit der Größe C ausgedrückt und muss

nicht über die oben erwähnte Formel errechnet werden. Auch der hue-Wert, also die Verschiebung von Rot (+a) in Richtung Gelb (+b), wird mit der Winkelgröße h wesentlich einfacher ausgedrückt (Abb. 7).

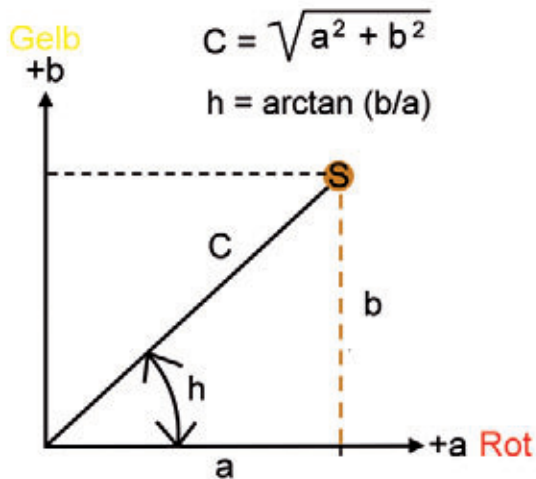


Abb. 7: Lokalisation des Punktes S (Farbmischung Rot-Gelb) in der Farbebene: Im L^*a^*b -System ist er mit a (horizontal) und b (vertikal) definiert, im L^*C^*h -System durch C und den Winkel h .

Der ΔE -Wert

Der wahrnehmbare Unterschied zwischen zwei Farben wird als Distanz zwischen den beiden entsprechenden Farborten im Farbraum sichtbar und mit dem Begriff ΔE benannt. Das Zeichen Δ steht für den Unterschied und das E ist die Abkürzung für Empfindung. ΔE -Werte < 2 sind nur schwer als Farbdifferenz erfassbar. Der Wert $\Delta E = 1$ ist als kleinster Farbunterschied definiert, den das menschliche Auge unter optimalen Bedingungen gerade noch erkennen kann. Die Berechnung von ΔE folgt der Pythagorasformel für die Raumdiagonale:

$$\Delta E = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Abbildung 8 erklärt diese Berechnungsart von ΔE grafisch.

Aus der Berechnungsformel des ΔE -Werts geht hervor, dass ΔE auf die absolute Größe der Farbdistanz zwischen Referenz- und Prüffarbe hinweist. Welche Charakteristik die Abweichung betrifft, wird nicht ausgedrückt. Der ΔE -Wert sagt nichts darüber aus, ob sich die Prüffarbe beispielsweise durch

geringere Helligkeit und größere Farbintensität von der Referenzfarbe unterscheidet. Dies kommt in Abbildung 8 grafisch zur Darstellung: Um die Referenzfarbe P2 gibt es unendlich viele Prüffarben mit

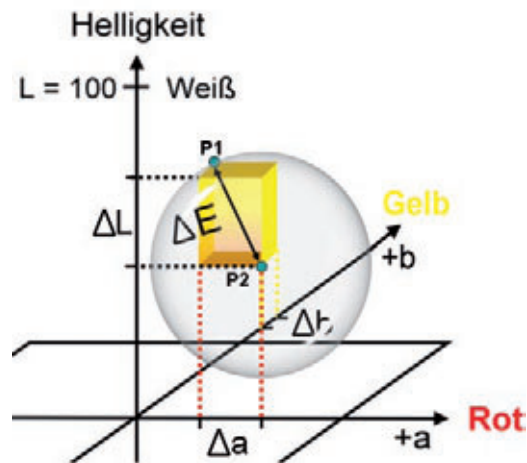


Abb. 8: Die Raumdiagonale zwischen den Punkten P1 und P2 entspricht der Farbdistanz und wird mit ΔE ausgedrückt. ΔE spiegelt die vom menschlichen Auge empfundene Differenz zwischen den Farben der Orte P1 und P2 wider. ΔE -Werte < 2 erkennt das menschliche Auge nur schwer als Farbdifferenz.

identischer ΔE -Abweichung. Sie liegen alle auf der Oberfläche der Kugel mit P2 als Zentrum und ΔE als Radius. Für den Zahnfarbenbereich, in dem die ΔE -Werte recht gering sind, spielt dies eine wichtige Rolle. Oft konstatiert das menschliche Auge unter einer bestimmten Beleuchtung (beispielsweise OP-Lampe am Behandlungsstuhl) eine vermeintlich gute Farbübereinstimmung zwischen zwei Zähnen, obwohl einer der beiden Zähne dunkler und gleichzeitig weniger farbtensiv ist. Außerhalb des Gebäudes bei Tageslicht sind Ernüchterung und Enttäuschung seitens des Patienten daher nicht selten. Wer solches verhindern möchte, behilft sich mit einem digitalen Farbmessgerät, das nicht nur die approximativen ΔE -Werte, sondern auch die genauen Unterschiede der Helligkeits-, Intensitäts- und Farbtonwerte zu registrieren in der Lage ist.

Speziell für die Zahnheilkunde ist die erläuterte ΔE -Berechnung nicht sehr glücklich. Die Gewichtung der Helligkeit sollte stärker sein, da diese das maßgebliche Kriterium der menschlichen Empfindung von Übereinstimmung oder Differenz von Zahnfarben ist. Ist einer Zahnrekonstruktion die richtige Helligkeit

gegeben, so kommt etwaigen Farbfehlern bezüglich Sättigung oder Farbton eine untergeordnete Bedeutung zu.

Visuelle Bestimmung von Zahnfarben

Folgende Aspekte sind bei der visuellen Zahnfarbestimmung zu berücksichtigen, da sie das Ergebnis maßgeblich beeinträchtigen können:

1. Farbskala

Die Schwierigkeit der Zahnfarberkennung besteht in der richtigen Lokalisation der Farbe im bananenförmigen Zahnfarbraum. Hierfür werden die Muster eines Zahnfarbrings (Farbschlüssel) mit dem Referenzzahn im Mund verglichen. Dieser Farbabgleich definiert die Farbe des Referenzzahnes mit dem Code des Farbschlüssels. Das Dilemma bei diesem Farbabgleich liegt in der Anzahl der im Farbschlüssel angebotenen Farbmuster. Je mehr Muster der Farbring anbietet, desto mehr Vergleiche sind anzustellen – bis hin zur Undurchführbarkeit. Denn das menschliche Auge ermüdet beim Farbvergleich sehr schnell und bietet dann keine verlässlichen Eindrücke mehr. Je weniger Muster der Farbring jedoch anbietet, desto mehr Zufälligkeiten beeinflussen die Farbnahme, da bei geringer Anzahl die Differenzen zwischen den Farbmustern (Farbdistanzen im Farbraum) sehr groß sind. Bei fast allen Farbringen sind außerdem die Farbmuster eher willkürlich im Farbraum verteilt, wodurch unnötige Häufungen wie auch überdurchschnittlich große Farbdistanzen auftreten. Gleichzeitig bieten viele Farbringe Muster an, die außerhalb des Zahnfarbraums liegen und den Farbabgleich unnötig erschweren (Abb. 9).

2. Blendlicht

Jeder Gegenstand gibt sich dem menschlichen Auge mit der ihm eigenen Farbinformation zu erkennen. Diese Information kann bei der Wahrnehmung Verfälschungen erleiden, wenn auf den Gegenstand eine zusätzliche, reflektierende Lichtquelle



Abb. 9: Die Farbmuster fast aller Farbskalen sind ungleichmäßig im Zahnfarbraum verteilt. Daraus resultieren Ballungen mit geringen Distanzen zwischen den Farbmustern und Zonen ohne brauchbare Muster. Einzelne Muster liegen gar außerhalb des Farbraums natürlich vorkommender Zahnfarben.

einwirkt. Daher sollte bei jedem Farbabgleich ein solches „Blendlicht“ vermieden werden. Tatsächlich ist dies in praxi schwierig zu bewerkstelligen.

3. Blickfeld

Dem normalsichtigen Betrachter wird die Farbwahrnehmung des sichtbaren Lichts im Wellenbereich von 380 nm bis 720 nm zugeordnet. Die Farbrezeptorzellen des menschlichen Auges sind im zentralen Bereich der Netzhaut (fovea centralis) konzentriert. Für den Farbvergleich ist die Größe des Bereichs um die fovea centralis (Blickfeld) von Bedeutung, da größere Blickfelder andere Farbwahrnehmungen als kleinere ergeben (Abb. 10).

Die Definition des Blickfeldes erfolgt durch die Festlegung des Winkels, den das Blickfeld umfasst. Im Jahre 1964 wurde von der CIE ein Blickfeld von 10° für die standardisierte Farberkennung definiert. Bei der visuellen Beurteilung von Zähnen umfasst das Blickfeld des menschlichen Auges allerdings mehr als

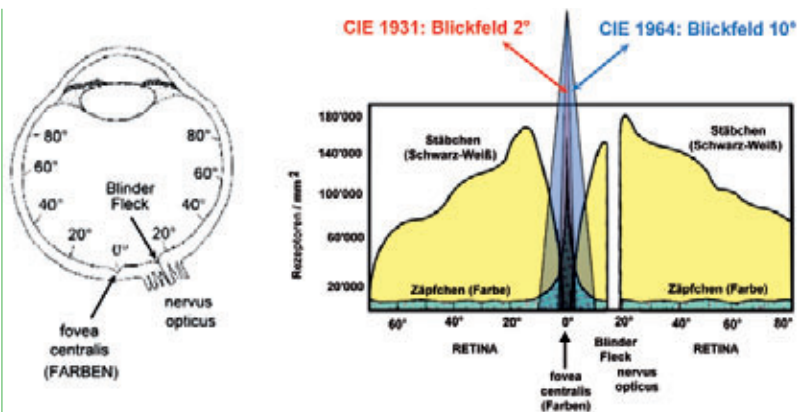


Abb. 10: Farbwahrnehmung: Lichtempfindliche, aber nicht farbempfindliche Zellen liegen außerhalb der fovea centralis und sind auf der ganzen übrigen Netzhaut verteilt. CIE definierte für den Normbetrachter 1931 ein 2°-Blickfeld (2°-Betrachter). 1964 wurde das Norm-Blickfeld auf 10° (10°-Betrachter) erweitert.

nur den zu analysierenden Zahn (Abb. 11). Dies hat zur Folge, dass rund um den Zahn liegende Farbstrukturen die Farbdefinition deutlich beeinflussen. Verkleinert aber der Betrachter das Blickfeld auf Zahngröße, so ergibt sich eine Verschiebung des Verhältnisses zwischen angeregten Farb- beziehungsweise Schwarz-Weiß-Rezeptoren. Die Farberkennung erfolgt demnach nicht mehr nach den Vorgaben der CIE.

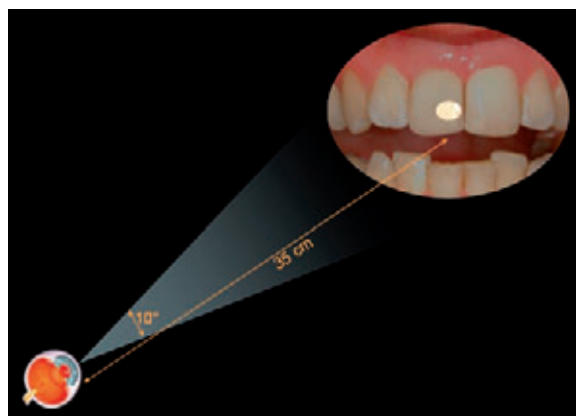


Abb. 11: Bei der Farbeinschätzung eines Zahns muss sich das Auge auf ein Blickfeld von weniger als 10° einstellen. In Bezug auf das Verhältnis der dabei angeregten Farb- beziehungsweise Schwarz-Weiß-Rezeptoren ist aufgrund dessen mit Beurteilungsungenauigkeiten zu rechnen.

4. Sehfehler

Physiologisch bedingte Probleme bei der Farberkennung sind nicht selten. Rund 8 % der Männer und 0,4 % der Frauen weisen Farbsehschwächen auf.

Ausblick

Im zweiten Teil dieses Beitrags wird am Beispiel eines Spektrofotometers die Bedienung eines digitalen Messgeräts bei der Farbmessung natürlicher Zähne sowie keramischer Verblendungen von Restaurationen erläutert. Ausführlich wird über die Funktionsweise der spektrofotometrischen Farbmessung sowie den gerätespezifischen Strahlengang informiert.

Dr. med. dent.
Andres Baltzer
Rheinfelden, Schweiz



■ Promotion an der Universität Basel ■ Zahnärztliche Gemeinschaftspraxis mit Ehefrau Monika Baltzer-Fehr in Rheinfelden, Schweiz ■ Erprober des CAD/CAM-Systems CEREC für das Unternehmen Sirona Dental Systems ■ Berater des Unternehmens VITA Zahnfabrik im Bereich Verblendkeramik und digitale Farbmessung ■ Tätigkeit als Erprober für das Unternehmen Straumann im Bereich CAD/CAM-Technologie

Kontakt
andres@baltzer.ch

Perfekte Ergebnisse ...



... brauchen ein perfektes System

HiScanp

- _Drei Kameras
- _Scanfeld mit 90 mm Durchmesser

Die Konstruktionssoftware

- _Vollautomatische Präparationsgrenzenerfassung
- _Datenbankbasierte vollautomatische Konstruktion

Bearbeitungszentren

- _Mannloser Arbeitsfluss
- _3-4-5-Achs Komplettbearbeitung
- _Freie Materialwahl

Rufen Sie uns an.

Hint-ELs® DentaCAD Systeme

Rübgrund 21 · D-64347 Griesheim
Fon ++49-61 55-89 98 0
Fax ++49-61 55-89 98 11
info@hintel.de · www.hintel.de