



Quintessenz Zahntechnik

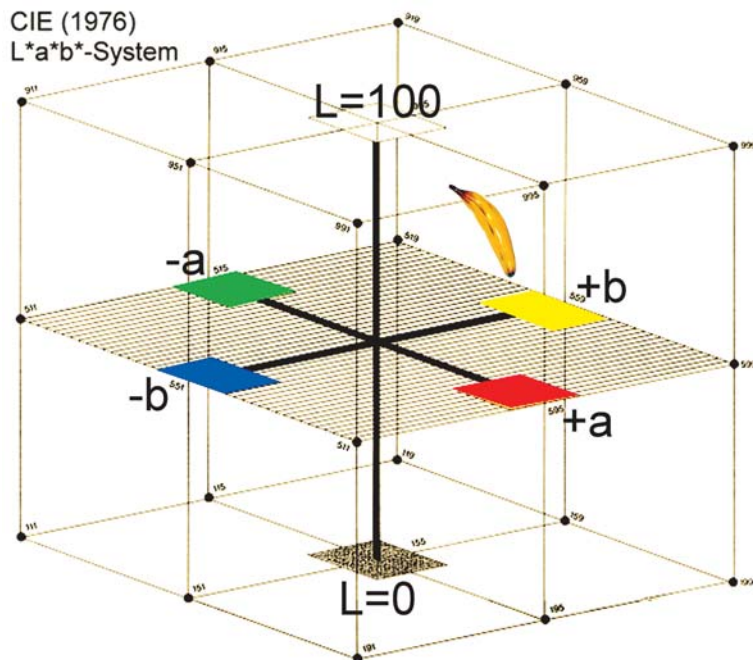
Sonderdruck

## Die Bestimmung der Zahnfarben

Andres Baltzer, Vanik Kaufmann-Jinoian

30. Jahrgang / Juli 2004

**7/2004**



### Zusammenfassung

Um bei der Farbbestimmung der Zähne eine Systematisierung und eine noch höhere Trefferquote zu erreichen, entstand das VITA SYSTEM 3D-MASTER®. Es beruht auf der konsequenten Übernahme der modernen Farbenlehre. Ein Einblick in die Entwicklung eines Farbraums, in welchem die Farbunterschiede numerisch bestimmt werden, erleichtert das Verständnis für den Farbraum, in welchem sich alle in der Natur vorkommenden Zahnfarben finden. Im VITA SYSTEM 3D-MASTER® wird dieser Zahnfarbraum in fünf Helligkeitsgruppen aufgeteilt. Bei der Farbbestimmung wird vorerst die zutreffende Helligkeitsgruppe bestimmt, innerhalb der anschließend die übrigen Farbcharakteristika zugeordnet werden.

### Indizes

CEREC, CAD/CAM, VITA SYSTEM 3D-MASTER®, Zahnfarben, Farbenlehre

## Die Bestimmung der Zahnfarben

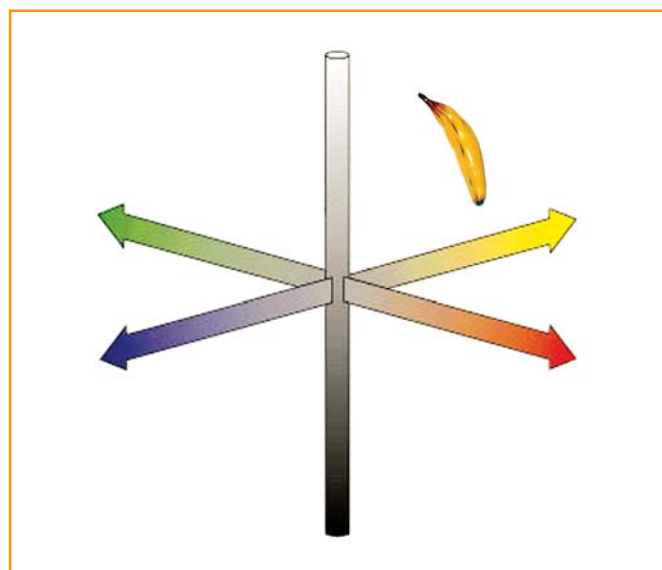
Andres Baltzer, Vanik Kaufmann-Jinoian

Es wird wohl niemandem schwer fallen, unser kleines Bildrätsel in Abbildung 1 zu lösen: Zu sehen sind vier farbige Pfeile an einem senkrechten Stab und eine Banane. Das Konstrukt ist einem Wegweiser vergleichbar.

Blieben wir einen Augenblick beim Bild des Wegweisers. Die Pfeile sind in der Mitte eines nach oben heller werdenden Pfostens angebracht und weisen in verschiedene Farbrichtungen. Die Banane befindet sich auf einer Höhe, in der der Pfosten bereits recht hell ist und sie liegt in Richtung Gelb und Rot. Macht sich ein Wanderer vom Wegweiser aus auf den Weg zur Banane, so wird er etwa in jener Zone ankommen, wo Farben zwischen Hellrot und Hellgelb herrschen.

Abb. 1 Farbwegweiser: An einem nach oben heller werdenden Pfosten weisen vier farbiger werdende Pfeile in den Farben Blau, Rot, Gelb und Grün in die vier Himmelsrichtungen. Die Banane liegt zwischen Rot und Gelb im hellen Bereich des senkrechten Stabs und symbolisiert den Farbraum, der alle natürlich vorkommenden Zahnfarben einschließt.

### Einleitung



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

Abb. 2 (gegenüberliegende Seite)  $L^*a^*b^*$ -Farbenraum mit der senkrechten Helligkeitsachse L (value) und den waagerechten Farbachsen a und b. Letztere definieren die Farbebene, in welcher die Farbintensität (Chroma) von der zentralen Farblosigkeit radial nach außen zunimmt. Die Farben (hue) auf der Farbebene liegen als Mischfarben von Blau über Rot zu Gelb und Grün rund um die farblose Zentralachse. In höher liegenden Farbebenen erscheinen die Farben heller, in weiter unten liegenden dunkler. Die Banane markiert Lage und Form des Farbenraums natürlicher Zähne.

Wer tagtäglich mit Farben zu tun hat, wie beispielsweise der Zahntechniker und der Zahnarzt, sieht im Bild vom Wegweiser mit der Banane einige Zusammenhänge. Er erkennt in den vier Farbrichtungen und in der nach oben hin zunehmenden und nach unten abnehmenden Helligkeit eine fantasierte Variante des dreidimensionalen Farbenraumes, der in der Farbenmetrik als  $L^*a^*b^*$ -System bezeichnet wird (Abb. 2).

In diesem Raum befinden sich alle dem menschlichen Auge sichtbaren Farben. Auf mittlerer Höhe in Bezug auf die senkrechte, zentrale Schwarz-Weiß-Achse, ist eine grau eingefärbte, horizontale Farbebene zu erkennen, in der die in vier Hauptrichtungen weisenden Farben Grün-Rot (a-Achse) und Blau-Gelb (b-Achse) liegen. Im Bild nicht dargestellt sind die Mischfarben, die zwischen den Hauptfarben liegen und die die Farbebene vervollständigen. Auf dieser Farbebene entwickeln sich die Farben, ausgehend von der zentralen, farblosen Schwarz-Weiß-Achse, nach außen hin und gewinnen dabei immer mehr an Farbigkeit (Intensität). Je höher an der senkrechten Schwarz-Weiß-Achse die Farbebene zu liegen kommt, desto heller erscheinen die Farben, je tiefer sie liegt, desto dunkler erscheinen die Farben.

Die Banane stellt jenen Sektor im Farbenraum dar, in welchem sich die natürlichen Zahnfarben befinden. Die Bananenform symbolisiert die natürlichen Verhältnisse: Die diversen Zahnfarben unterscheiden sich weitgehend 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 die dunkleren Zähne zu finden. Die intensiveren Zahnfarben befinden sich an der von der farblosen Zentralachse L weiter entfernten Außenkrümmung der Banane; Zähne mit rötlichem Farbton liegen der a-Achse, jene mit gelblichem Farbton der b-Achse zugewandt.

Die interessante Entstehungsgeschichte des  $L^*a^*b^*$ -Farbsystems ist Teil der europäischen Kulturgeschichte. Groß ist an dieser Stelle die Versuchung, sich in die physikalischen, neurophysiologischen und psychologischen Aspekte der Farblehren und Farbsysteme zu begeben. Unvergesslich ist beispielsweise *Goethes* schroffe Ablehnung der physikalischen Erkenntnisse, die *Newton* 50 Jahre zuvor vorgelegt hatte und die in wissenschaftlichen Kreisen durchaus akzeptiert worden waren. „Wer aber das Licht in Farben will spalten / Den mußst du für einen Affen halten ...“, meinte der Dichterkönig dem visionären Physiker entgegenhalten zu müssen. 200 Jahre lang haben Physiker, Physiologen und Philosophen wenigstens einmal in ihrem Leben einen Aufsatz oder eine Rede über *Goethes* unverständliche Polemik gegen *Isaac Newton* geschrieben. Erst die Erkenntnisse der modernen Forschung haben indes diesen Dauerbrenner des wissenschaftlichen Diskurses zum Erlöschen gebracht. 200 Jahre später wäre *Goethe* kaum mehr in eine solche Auseinandersetzung mit der physikalischen Optik geraten. Die heutigen Kenntnisse schließen den Graben zwischen der Physik einerseits und den Farbwahrnehmungen andererseits. Die Dinge hängen viel dichter zusammen, als man zu *Goethes* Zeit wissen konnte.

In den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts wurde der Wunsch nach einem objektiven Weg der Farbbestimmung immer lauter. Man war auf der Suche nach einem Farbsystem, das sich einerseits auf die Fähigkeit des menschlichen Auges verlassen, die Übereinstimmung von Farben festzustellen, und das andererseits ein mathematisches Konstrukt darstellte, mit welchem die Position der zu bestimmenden Farbe in Relation zu jeder Primärfarbe berechnet werden könne. Man wollte ein Farbsystem, das ohne Muster

## FARBBESTIMMUNG

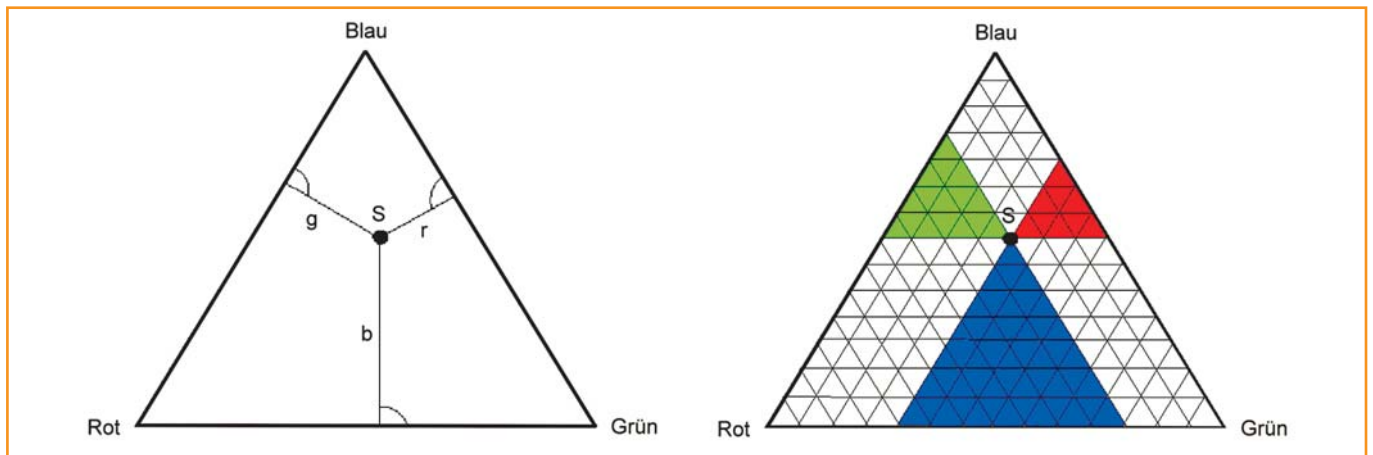


Abb. 3 Links: das Rot-Grün-Blau-(RGB)-Dreieck von Maxwell: jede Mischfarbe liegt im Schwerpunkt der Linie, welche die zusammenzustellenden Farben verbindet. Rechts: Visuelle Darstellung der quantitativen Zusammenstellung der Rot-Grün-Blau-Anteile für die Mischfarbe S.

auskommt, denn der Vergleich einer zu bestimmenden Farbprobe mit einem Standardmuster bleibt immer ein subjektiver Vorgang. Vergleichsproben können zudem im Laufe der Zeit blasser werden, was sie unzuverlässig macht. Die CIE (Commission Internationale d'Eclairage) wurde also damit beauftragt, eine mathematisch definierte Normfarbtafel zu entwickeln, welche den Wünschen nach Präzision und Objektivität gerecht werden sollte.

Die Entwicklung einer solchen Normfarbtafel als mathematisches Konstrukt basiert auf dem Farbdreieck des Physikers *James C. Maxwell*. Im Jahre 1859 legte dieser schottische Physiker seine „Theorie des Farbsehens“ vor, die als Ursprung der quantitativen Farbmessung (Colorimetrie) gilt. Maxwell zeigte darin auf, dass alle Farben durch Mischung der drei Spektralfarben Rot, Grün und Blau zustande kommen. Er ordnete die drei Hauptfarben Rot (R), Grün (G) und Blau (B) in den Eckpunkten eines gleichschenkligen Dreiecks an und stellte dar, dass jede Mischfarbe im Schwerpunkt der Linie liegt, welche die zusammenzustellenden Farben verbindet (Abb. 3 links). Der quantitative Anteil jeder einzelnen Hauptfarbe entspricht der Fläche jenes gleichschenkligen Teildreiecks, welches durch den im Gesamtdreieck liegenden Punkt der Mischfarbe (S in Abb. 3) und dem Farbschenkel des Gesamtdreiecks gegeben ist. Mittels Dreieckraasterung des Gesamtdreiecks lassen sich die Verhältnisse noch verständlicher darstellen (Abb. 3 rechts): Für die Mischfarbe S im Maxwellschen RGB-Dreieck ist der Rotanteil mit 9, der Grünanteil mit 16 und der Blauanteil mit 49 Teildreiecken definiert. Liegt beispielsweise im Maxwellschen RGB-Dreieck der Punkt S ganz oben in der Ecke „Blau“, so ergäbe sich die „Mischfarbe“ reines Blau, da für Rot und Grün keine Anteile übrig blieben.

Die geometrischen Beziehungen und Abstände zwischen den Farben im Maxwellschen RGB-Dreieck haben eine präzise Bedeutung und basieren auf folgenden psycho-physikalischen Messungen: Die Probanden verändern mit Hilfe von standardisierten Lichtquellen die Mischung aus Rot, Grün und Blau so lange, bis der Farbeindruck mit der Probe zusammenpasst. Damit sind für die Farbwahrnehmung drei Faktoren gegeben:

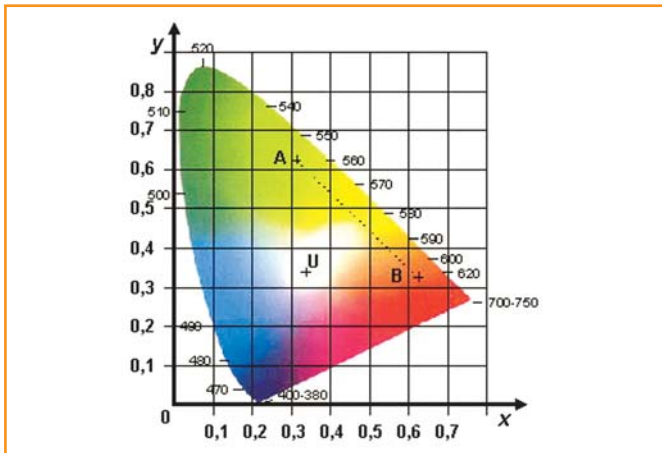


Abb. 4 Normfarbtafel (CIE 1931): Die Farben des Spektrums sind hufeisenförmig um den absoluten Weißpunkt, den so genannten Unbuntpunkt (U) angeordnet. Nach außen hin nimmt der Sättigungsgrad bzw. die Buntheit der Farbe (Chroma) zu. Jeder Punkt innerhalb des Hufeisens stellt eine Farbart dar. Zieht man eine Gerade von der Farbart A zur Farbart B, dann lassen sich durch additive Farbmischung nur jene Farbarten erzeugen, die auf der Geraden liegen. Aus einem blaugrünen und einem roten Licht kann beispielsweise kein gelbes Licht gemischt werden.

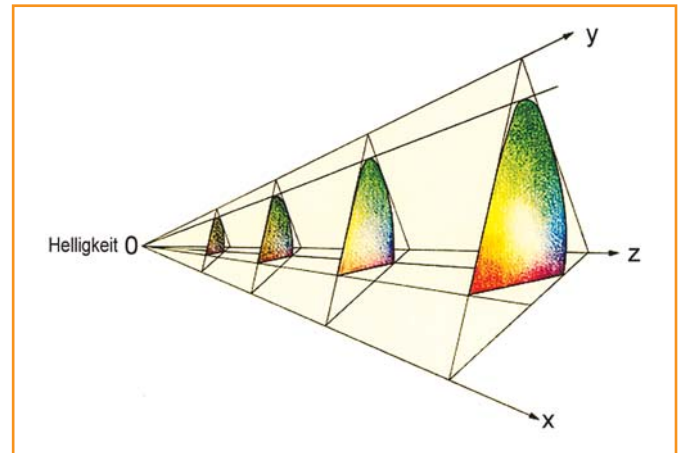


Abb. 5 Normfarbtafeln, die die Ebenen mit abnehmender Helligkeit repräsentieren. Die Diagramme zeigen, wie die Farben aussehen, wenn weniger Licht vorhanden ist. Dieser Farbenraum heißt CIE-1931-System oder sinnvollerweise einfach „Farbtüte“.

- Der Betrachter (definiert als normal sichtiger Mensch)<sup>1</sup>,
- die Lichtquelle (definiert durch die Farbtemperatur in °Kelvin)<sup>2</sup>,
- der Gegenstand (definiert durch seine eigene Farbinformation. Alle Spiegelungen [Reflexionen] von zusätzlichen Lichtquellen [Blendlicht] sind eliminiert)<sup>3</sup>.

Die jeweilige Mischung lässt sich durch die drei Werte R, G und B, bekannt als „Dreifarbenwerte“ (*tristimulus values*), festhalten. Damit sind drei Variablen gegeben, die eine Farbe charakterisieren: der Farbton (engl. hue), die Farbsättigung (engl. chroma) und die Helligkeit (engl. value). Werden die experimentellen Ergebnisse im Dreieck eingetragen, so finden sich in den Ecken des Dreiecks die drei Farben Rot, Grün und Blau und im Innern des Dreiecks Mischfarben in jeglicher Variation. Im Innern des Dreiecks münden diese in einem Punkt für das reine Weiß.

Ausgehend von dieser Grundlage hat 1931 die CIE das Farbdigramm (Normfarbtafel, Standard Valenz System) entwickelt. Die alten, maxwellschen Dreifarbenwerte RGB wurden mathematisch umformuliert und durch drei neue *tristimulus values* x, y und z ersetzt. Im Anhang<sup>4</sup> wird auf die Umformulierung kurz eingegangen. Beim resultierenden Farbdigramm nimmt die waagerechte Achse die Werte für x und die senkrechte Achse die Werte für y auf (Abb. 4).

Auf der z-Achse ist dieses x-y-Diagramm nur eine Ebene im Farbenraum, welche die Lichtempfindung aufnimmt. Ebenen, die auf der z-Achse gegen den Nullpunkt hin liegen, repräsentieren Farben von abnehmender Helligkeit. Das heißt, die entsprechenden Diagramme zeigen, wie die Farben aussehen, wenn weniger Licht vorhanden ist. In der sonst eher nüchternen wissenschaftlichen Terminologie hat dieser Farbenraum CIE-1931-System den hübschen Beinamen „Farbtüte“ erhalten (Abb. 5).

<sup>1</sup> Hochzahlen im Text verweisen auf die betreffende Ziffer im Anhang, S. 739 und 740.

# FARBBESTIMMUNG

Für die industrielle Anwendung ist nicht bloß die Messung der Farben von Bedeutung. Besonders wichtig ist die Möglichkeit, Farbunterschiede genau zu bestimmen. Der Grund dafür liegt auf der Hand: Ein Kunde, der einem Produzenten den Auftrag erteilt, ein gewünschtes Objekt (zum Beispiel einen Wagen) in der gewünschten Farbe (zum Beispiel Eisgrün) zu liefern, erwartet, dass der bestellte Gegenstand eine Farbe trägt, die mit einer zweiten (schon vorhandenen) Farbe zusammenpasst, wobei natürlich eine kleine Toleranz einzuräumen ist.

Leider ist es in der berühmten Farbtüte der Farbmeteriker nicht möglich, Farbunterschiede einfach als Entfernungen im Schaubild zu bestimmen. Kritiker haben deshalb stets auf den Nachteil hingewiesen, dass Grün überrepräsentiert und die roten, violetten und blauen Töne in den Ecken zusammengedrängt sind.

Seit den sechziger Jahren werden in der Literatur zum Thema „Farbunterschiede“ immer wieder praktikable Formeln zur Berechnung von Differenzen vorgeschlagen, die dann mehr oder weniger weite Verbreitung finden. 1976 tauchte unter dem Kürzel CIE-L\*a\*b\* eine von der CIE empfohlene, neue Metrik auf, welche in der Folge umfassend genutzt wurde, und zwar für nicht-selbstleuchtende Objekte, also zum Beispiel Textilien, Malfarben und Plastikgegenstände. Im Anhang<sup>5</sup> ist die Umrechnung kurz skizziert. Das CIE-L\*a\*b\*-System scheint die erwähnten industriellen Bedürfnisse abzudecken. In der Abbildung 2 ist dieses Farbsystem bereits dargestellt worden.

Eine andere Darstellung des CIE L\*a\*b\* - Systems lässt sich mit Hilfe der so genannten L\*C\*h\*-Parameter sehr schön bewerkstelligen. Dabei bleibt die Verteilung der Farben des L\*a\*b\*-Farbenaums unverändert, lediglich die Berechnung des Farbortes im Farbenaum erfolgt auf unterschiedliche Weise. Bei L\*a\*b\* ist ein Farbort mit den Distanzen auf den Koordinaten L, a und b definiert. Bei L\*C\*h\* ist ein Farbort mit der Distanz auf der Koordinate L (Helligkeit, value, Höhe des Farborts bezüglich die L-Koordinate), mit dem Maß C (Farbintensität, Chroma, Abstand von der L-Koordinate zum Farbpunkt) und dem Winkel h (Farbe, hue, Winkel von der Achse +a zum Farbort) definiert. Die beiden Systeme L\*a\*b\* und L\*C\*h\* sind einander in den Abbildungen 6 und 7 vergleichend gegenüber gestellt. Für den gleichen Farbpunkt S sind links die Parameter L\*a\*b\* und rechts die Parameter L\*C\*h\* eingezeichnet.

Die Umrechnung zwischen L\*a\*b\* und L\*C\*h\* erfolgt demnach gemäß folgender Zusammenstellung und ist der Abbildung 8 grafisch dargestellt:

Umrechnung von L\*a\*b\* in L\*C\*h\* (im Quadrant ,+a / +b')<sup>6</sup>

L\*C\*h\* | L (Value) bleibt L | C (Chroma) =  $\sqrt{a^2 + b^2}$  | h (hue) =  $\sin(h) = b/\sqrt{a^2 + b^2}$

Bei der Bestimmung der Zahnfarben steht die Beurteilung des Zusammenspiels der Größen Zahnelligkeit (L), Farbintensität (C) und Farbverschiebung (h) im Vordergrund.

Für den Praktiker ist es bei der Farbformulierung einfacher, mit den L\*C\*h\*-Werten umzugehen, da diese Werte direkt auf die ihn interessierenden Farbcharakteristika Helligkeit (L), Chroma (C) und Farbton (h) Bezug nehmen. 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.

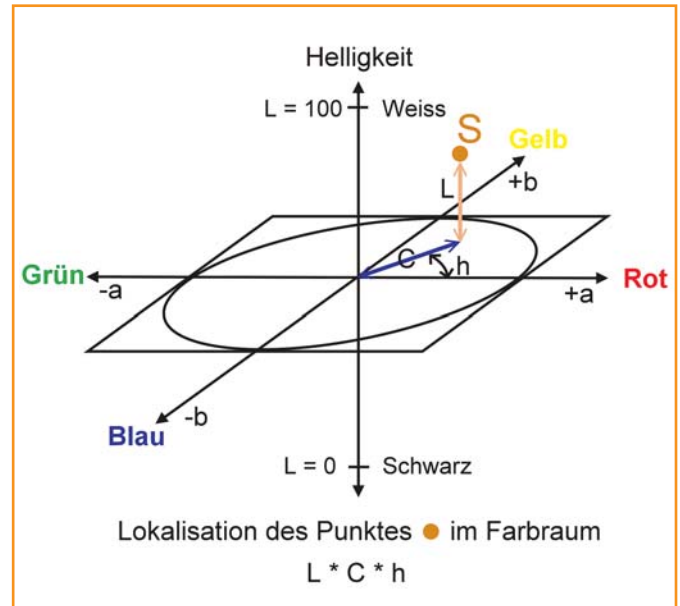
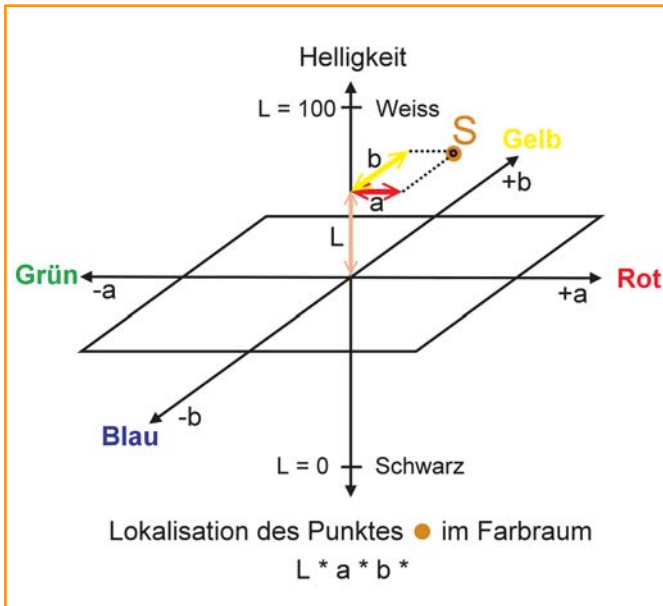


Abb. 6 und 7 Der Farbenraum L\*a\*b\* und der Farbenraum L\*C\*h\* sind bezüglich Farbenverteilung identisch. Einzig die Lokalisation der Farbpunkte ist unterschiedlich berechnet.

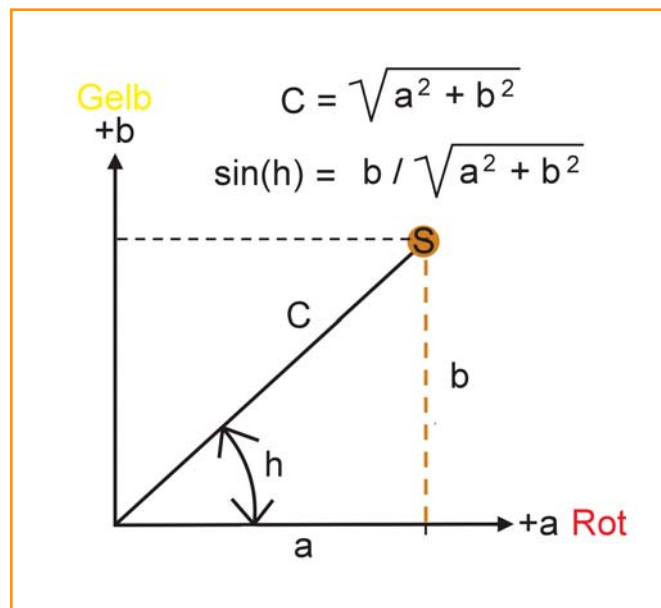


Abb. 8 Lokalisation des Punktes S (Farbmischung Rot-Gelb) in der Farbebene: Im L\*a\*b\*-System ist er mit a (horizontal) und b (vertikal) definiert. Im L\*C\*h\*-System ist er durch C und den Winkel h definiert.

Die Lage des Zahnfarbenraums im Farbraum L\*a\*b\* bzw. L\*C\*h\*

Die Zone der natürlichen Zahnfarben ist eingangs als bananenförmiger Farbraum im L\*a\*b\*- bzw. L\*C\*h\*-System erwähnt worden. Dieser Zahnfarbenraum liegt zwischen Hellrot und Hellgelb und ist der Helligkeitsachse entlang etwas in die Länge gezogen. Vergleicht man die Farb-Werte (also die Ortsbezeichnungen im Farbraum) des hellsten mit denjenigen des dunkelsten in der Natur vorkommenden Zahns, so stehen sich im L\*a\*b\*- System die Eckwerte 78/1/12 und 62/6/31 gegenüber (Abb.10). Im L\*C\*h\*-System sind die Eckwerte 78/12/86 bzw. 62/33/78 (Abb. 9).

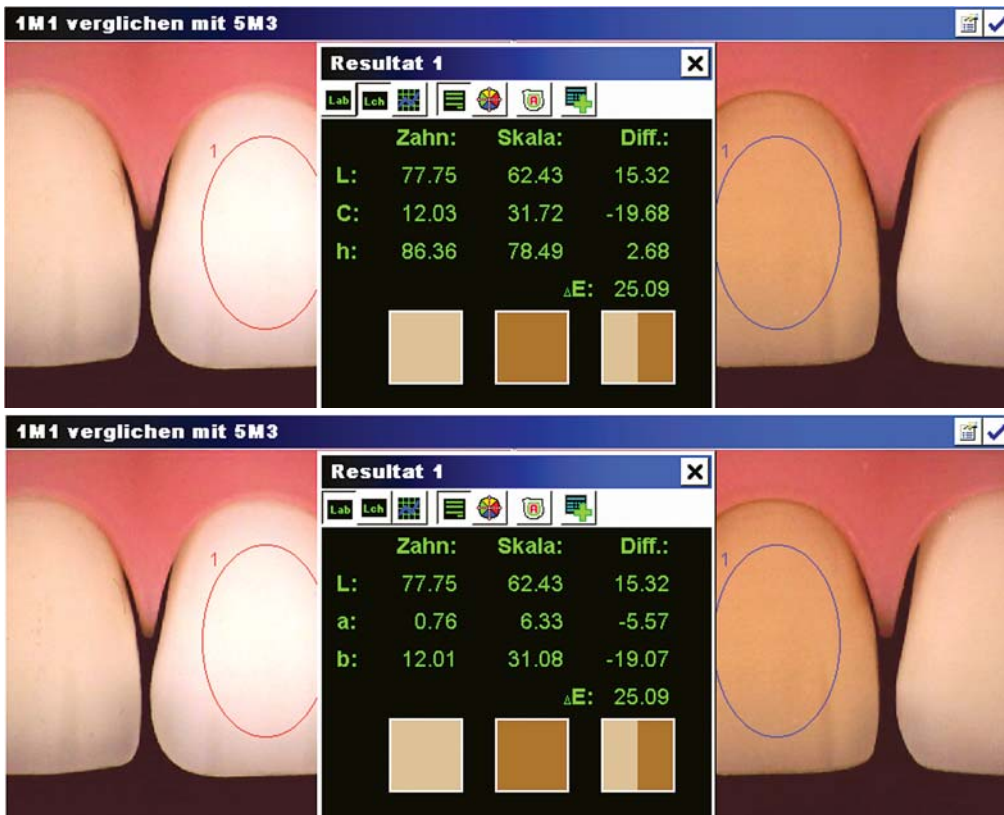


Abb. 9 und 10 L\*C\*h\*-Werte bzw. L\*a\*b\*-Werte des hellsten, natürlichen Zahnes im Vergleich zum dunkelsten, natürlichen Zahn. Die Differenzen der L\*a\*b\*-Werte ergeben die Werte  $\Delta L = 15.32$ ,  $\Delta a = -5.75$  und  $\Delta b = 19.07$ . Der Begriff  $\Delta E$  bezeichnet den empfundenen Farbunterschied zwischen den beiden Farbproben und entspricht der Distanz zwischen den beiden Farborten im Farbenraum.

Mit der Übertragung der L\*C\*h\*-Werte in die grafische Darstellung des Farbenraums wird die Lage des Zahnfarbenraums (Banane) deutlich (Abb. 11).

Die helle Spitze der Banane liegt auf der Helligkeitshöhe  $L = 78$  (value), weist eine geringe Farbigkeit von  $C = 12$  (chroma) auf und liegt mit dem Winkel  $h = 86$  (hue) weit von der Rotachse +a entfernt, nahezu auf der Gelbachse +b. Das dunkle Ende der Banane liegt weiter unten auf der Helligkeitshöhe  $L = 62$  (value), weist mit  $C = 33$  (chroma) eine dreifach höhere Farbigkeit auf und tendiert mit dem Winkel  $h = 78$  (hue) näher zur Rotachse +a hin. Im Farbenraum, wie er in der Abbildung 11 dargestellt ist, steht demnach der bananenförmige Zahnfarbenraum zweifach geneigt auf heller Höhe zwischen 78 und 62. Relativ zur Vertikalen ist die Längsachse mit dem oberen Ende in Richtung Helligkeitsachse geneigt, mit dem unteren Ende in Richtung Gelb.

Ausgehend von der Lage des Zahnfarbenraums im psychometrischen Farbenraum lässt sich demnach auch farbmetrisch festhalten, was jedem Zahntechniker und Zahnarzt längst bekannt ist, nämlich:

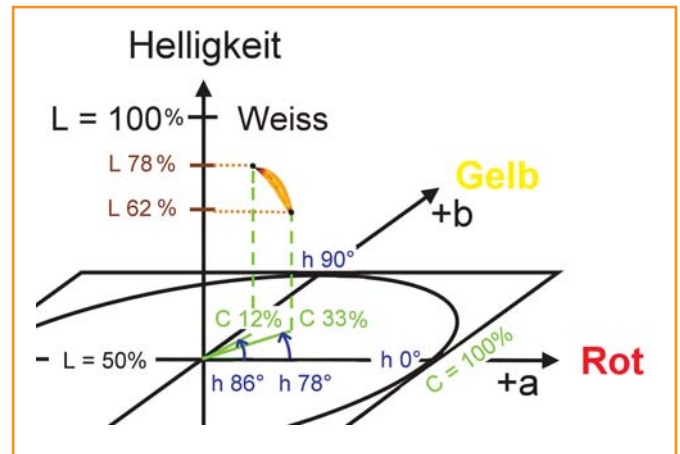


Abb. 11 Die Lage des Zahnfarbenraums im L\*a\*b\*-Farbenraum.



- Hellere Zähne sind weniger farbintensiv und sie weisen mehr Gelbanteile auf.
- Je dunkler die Zähne werden, desto höher sind Farbintensität und Rotanteile.

**Der  $\Delta E$ -Wert** Der wahrnehmbare Unterschied zwischen der hellsten und dunkelsten natürlichen Zahnfarbe ( $L^*a^*b^*$  78/1/12 gegenüber  $L^*a^*b^*$  62/6/31) wird als Distanz zwischen den beiden Farborten im Farbenraum sichtbar und ist mit dem Begriff  $\Delta E$  benannt. Das Zeichen „ $\Delta$ “ steht für den Unterschied und „E“ ist die Abkürzung für die Empfindung. Die Berechnung von  $\Delta E$  folgt der Pythagorasformel für die Raumdiagonale:

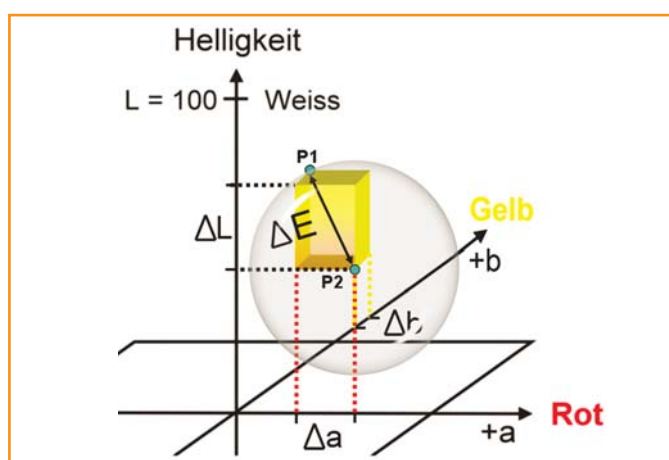


Abb. 12 Die Raumdiagonale zwischen den Punkten P2 und P1 entspricht der Farbdistanz und wird mit  $\Delta E$  ausgedrückt.  $\Delta E$  widerspiegelt die vom menschlichen Auge empfundene Differenz zwischen den Farben der Orte P1 und P2.  $\Delta E$ -Werte unter 2 erkennt das menschliche Auge nur schwer als Farbdifferenz. Die größtmögliche Farbdistanz im  $L^*a^*b^*$ -Farbenraum liegt bei  $\Delta E = 387$ .

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

In Abbildung 12 wird diese Berechnungsart von  $\Delta E$  grafisch erklärt.

Aus der Berechnungsformel des  $\Delta E$ -Wertes geht hervor, dass  $\Delta E$  auf die absolute Größe der Farbdistanz zwischen Referenz- und Prüffarbe hinweist. In welche Richtung die Abweichung der Prüffarbe weist, wird nicht ausgedrückt. Der  $\Delta E$ -Wert sagt nichts darüber aus, ob sich die Prüffarbe beispielsweise durch geringere Helligkeit und größere Farbintensität von der Referenzfarbe unterscheidet. Dies kommt in Abbildung 12 grafisch zur Darstellung. Um die Referenzfarbe P2 gibt es unendlich viele Prüffarben mit gleicher  $\Delta E$ -Abweichung. Sie liegen alle auf der Oberfläche der Kugel mit P2 als Zentrum und  $\Delta E$  als Radius. Im Zahnfarbenbereich, wo die  $\Delta E$ -Werte recht klein sind, spielt dies eine wichtige Rolle. Oft konstatiert das menschliche Auge bei einer bestimmten Beleuchtung (OP-Lampe am Zahnarztstuhl) eine vermeintlich gute Farbübereinstimmung zwischen zwei Zähnen, obwohl einer der beiden Zähne

dunkler und dafür weniger farbintensiv ist. Draußen vor der Haustüre sind Ernüchterung und Enttäuschung nicht selten. Wer solches verhindern möchte, behilft sich mit einem digitalen Farbmessgerät, welches nicht nur die approximativen  $\Delta E$ -Werte, sondern auch die genauen Unterschiede der Helligkeits-, Intensitäts- und Farbwerte zu registrieren in der Lage ist<sup>7</sup>. Ein Bericht über die Funktionsweise solcher Geräte und ihren sinnvollen Einsatz als Ergänzung zur visuellen Bestimmung der Zahnfarben folgt in der nächsten Ausgabe der Quintessenz Zahntechnik.

### Die Farbbestimmung eines Zahnes

Das Problem der Farberkennung eines Zahnes besteht in der richtigen Lokalisation des Zahnes im bananenförmigen Zahnfarbenraum. Hierfür werden die Muster eines Zahnfarberrings (Farbschlüssel) mit dem Referenzzahn im Munde 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, ermüdet doch das menschliche Auge bei solcher Tätigkeit schnell und lässt bald einmal keine verlässlichen Angaben mehr zu. Je weniger

## FARBBESTIMMUNG

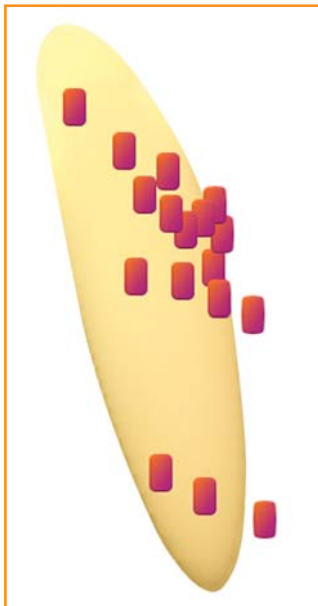


Abb. 13 In den herkömmlichen Farbringen sind die einzelnen Farbmuster meist ungleichmäßig im Zahnfarbenraum verteilt. Folge sind Ballungen mit geringen Farbdistanzen und Zonen ohne brauchbare Muster. Einzelne Muster liegen sogar außerhalb des Farbenraums natürlich vorkommender Zähne.

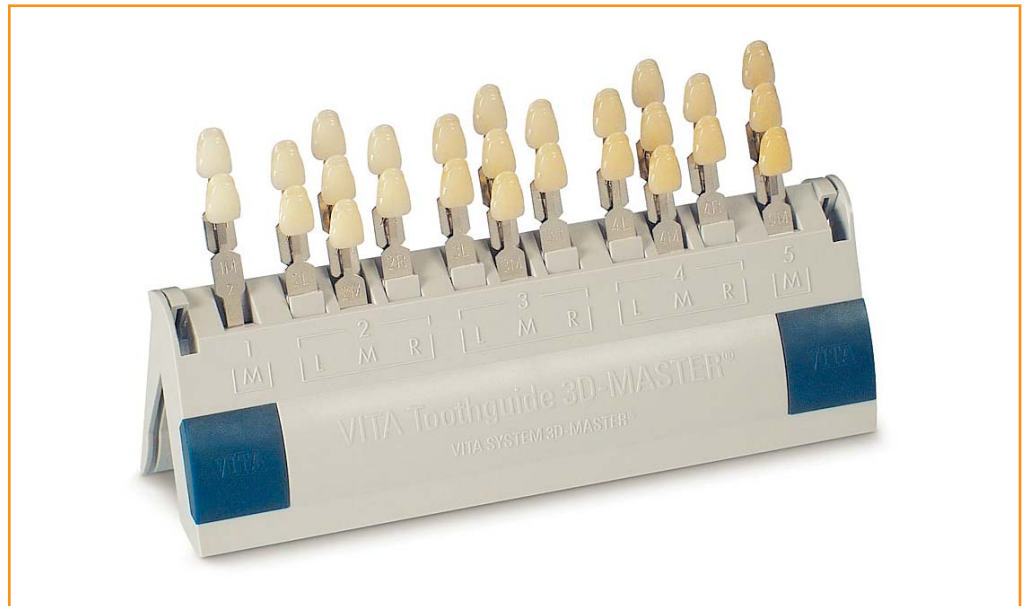


Abb. 14 VITA SYSTEM 3D-MASTER®: Der Farbschlüssel ist in fünf Helligkeitsgruppen aufgeteilt. In jeder Helligkeitsgruppe steht ein zentraler Zahn M2 mit sechs rundum liegenden Zähnen für die Bestimmung der Intensitäts- und Farbabweichungen zur Verfügung.

Muster der Farbring jedoch anbietet, desto mehr Zufälligkeiten beeinflussen die Farbnahme, da zwischen wenigen Farbmustern große Unterschiede (Farbdistanzen im Farbenraum) gegeben sind. Bei fast allen Farbringen sind außerdem die Farbmuster eher willkürlich im Farbenraum verteilt, wodurch unnötige Häufungen wie auch übergroße Farbdistanzen auftreten. Auch bieten viele Farbringe Muster an, die gar außerhalb des Zahnfarbenraums liegen und den Farbgleich unnötig erschweren (Abb. 13).

Im Farbring VITA SYSTEM 3D-MASTER® sind solche Probleme auf ein Minimum reduziert. Die Farbmuster sind nach wissenschaftlichen Prinzipien mit gleich bleibenden Farbdistanzen im Farbenraum verteilt, was die Treffsicherheit bei richtiger Handhabung ganz entscheidend verbessert. Dabei ist das Verständnis des Farbenraums  $L^*a^*b^*$  bzw.  $L^*C^*h^*$  sehr hilfreich. Der Farbschlüssel VITA SYSTEM 3D-MASTER® bietet fünf Helligkeitsgruppen, die im Zahnfarbenraum in regelmäßigem Abstand ( $\Delta L = 4$ ) verteilt sind. Die Musterzähne der einzelnen Helligkeitsgruppen weisen die gleiche Helligkeit (L) auf, unterscheiden sich aber in ihrer Intensität (C) und ihrer Abweichung im Farbton (h) (Abb. 14).

Aus dieser Anordnung im Zahnfarbenraum ergibt sich das Vorgehen zur Bestimmung einer Zahnfarbe.

Die Farbwahl mit dem  
VITA SYSTEM  
3D-MASTER®



Abb. 15 Für die treffsichere Bestimmung des Helligkeitswertes eines Zahnes bietet sich der Vergleich mit den Mittelwerten M2 der fünf Helligkeitsgruppen an.

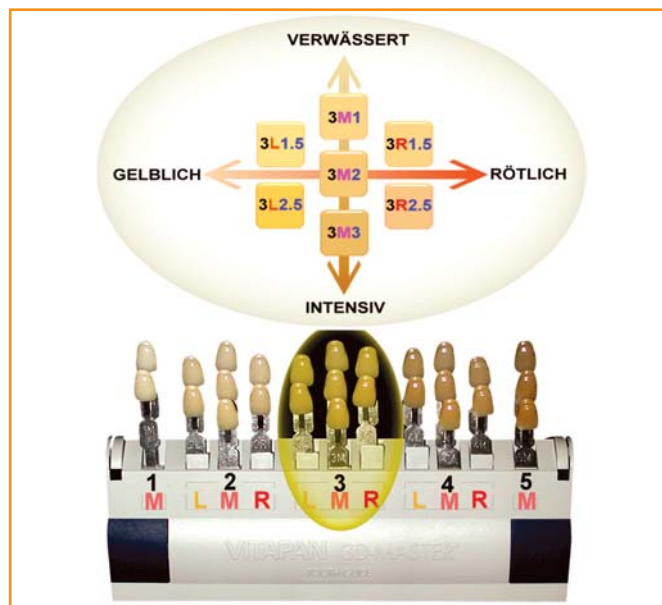


Abb. 16 Aufbau des VITA SYTEM 3D-MASTER®: Zuerst erfolgt die Festlegung der Helligkeitsgruppe (1 bis 5). Anschließend erfolgt die Beurteilung der Farbintensität (blass bis intensiv), abschließend erfolgt die Beurteilung des Farbtons (Tendenz ins Gelb oder Rot).

#### Die Bestimmung der Helligkeit (L)

Zuerst wird die zutreffende Helligkeitsgruppe ausgewählt. In jeder Helligkeitsgruppe steckt ein zentraler Musterzahn M2. Legt man die fünf M2-Zähne in einer Reihe mit abnehmender Helligkeit an und vergleicht diese der Reihe nach und zügig mit dem Referenzzahn, so ist eine Fehlbeurteilung der Helligkeitsbestimmung beinahe auszuschließen. (VITA empfiehlt aus bedenkenswerten Gründen die Helligkeitsbestimmung mit Hilfe der M1-Zähne<sup>8</sup>). Die Treffsicherheit bei der Helligkeitsbestimmung lässt sich verbessern, wenn die fünf zentralen M2-Muster ohne Nebenzähne separat aufgefächert (Abb. 15) und nebeneinander liegend zum Vergleich mit dem Referenzzahn im Munde beigezogen werden. Der Vergleich sollte mit dem mittleren Muster 3M2 beginnen. Die Entscheidung, ob der Referenzzahn heller oder dunkler ist, fällt leichter als die Entscheidung, ob der Zahn dunkler oder noch dunkler ist. Die Ermüdung des Auges innerhalb weniger Augenblicke sollte mit berücksichtigt werden, weshalb Entscheidungen zielgerichtet und ohne Umwege zu treffen sind.

Wer sich für eine Helligkeitsgruppe entschieden hat, ist gut beraten, die nicht in Frage kommenden Helligkeitsgruppen abzudecken oder aus dem Farbring zu entfernen. Die Erfahrung zeigt nämlich, dass beim weiteren Vorgehen auf der Suche nach der richtigen Farbintensität oft Zweifel an der Helligkeitsgruppe aufkommen. Das erinnert an das verbreitete Hin- und Herschieben des ganzen Farbschlüssels vor dem Referenzzahn; die Farbnahme selbst ist in diesem Fall wohl eher mit dem Einrasten des Zeigers im Glücksrad zu vergleichen.

#### Die Bestimmung der Farbintensität (C)

Weitere Entscheidungen sollten also nun innerhalb der gewählten Helligkeitsgruppe erfolgen (Abb. 16).

## FARBBESTIMMUNG

Der Referenzzahn wird vorerst mit dem zentralen Muster M2 der gewählten Helligkeitsgruppe verglichen. Es ist zu entscheiden, ob eine intensivere bzw. gesättigtere Farbe oder eine blässere bzw. verwässerte Farbe vorliegt. Trifft Ersteres zu, so scheiden die drei Muster des unteren Halbkreises aus; trifft die zweiterwähnte Situation zu, so scheiden die drei Muster des oberen Halbkreises aus.

Die dritte und letzte Entscheidung erfolgt einzig auf Grund der verbleibenden vier Muster: Drei obere Muster (Intensitätswerte 1 und 1.5) oder drei untere Muster (Intensitätswerte 2.5 und 3) sowie das weiterhin zur Wahl stehende zentrale Muster (Intensitätswert 2). Mit der Bestimmung des Farbtons wird die Farbwahl abgeschlossen. Es ist festzustellen, ob der Referenzzahn mehr ins Gelbliche (Farbton L, links) oder mehr ins Rötliche (Farbton R, rechts) tendiert. Möglicherweise liegt keine Farbtonverschiebung vor und es bleibt beim Farbton M (Mitte) (Abb. 17).

*Die Bestimmung des Farbtons (h)*

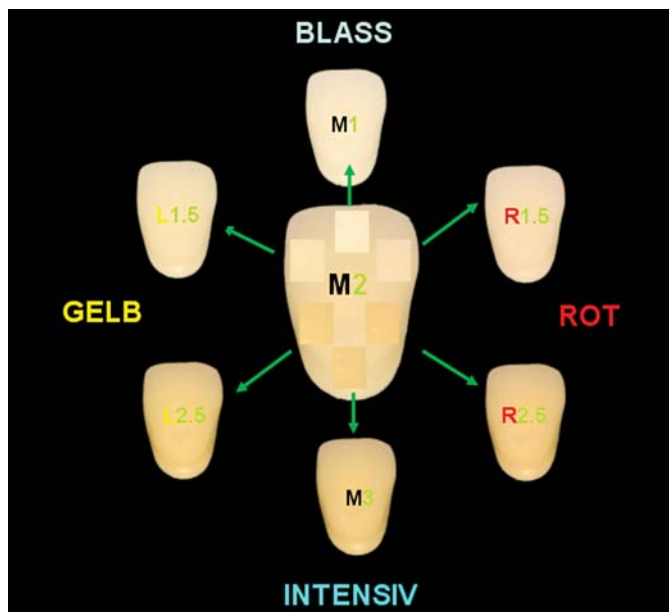


Abb. 17 Das Hexagon um den Mittelwert M2: Im Vergleich zum Mittelwert M2 sind die drei oben liegenden Muster blässer als die drei unten liegenden. Die rechts vom farbneutralen Mittelwert M2 liegenden Muster gehen ins Rötliche, die links vom farbneutralen Mittelwert M2 liegenden Muster gehen ins Gelbliche.

Feststellung	Wahl
<b>1. Bestimmung der Helligkeit (Value):</b> Der Referenzzahn ist weder heller noch dunkler als das zentrale Muster (3M2) in der Helligkeitsgruppe 3	Helligkeitsgruppe 3
<b>2. Bestimmung der Intensität (Chroma):</b> Der Referenzzahn ist etwas blässer als das zentrale Muster (3M2) in der Helligkeitsgruppe 3	Intensität 1 oder 1.5
<b>3. Bestimmung des Farbtons (Hue)</b> Der Referenzzahn ist etwas rötlicher als das zentrale Muster (3M2) in der Helligkeitsgruppe 3	Farbton R

Schema 1 Beispiel einer Farbbestimmung.

Eine Farbbestimmung mit dem VITA SYSTEM 3D-MASTER® könnte demnach ablaufen wie in Schema 1 gezeigt.

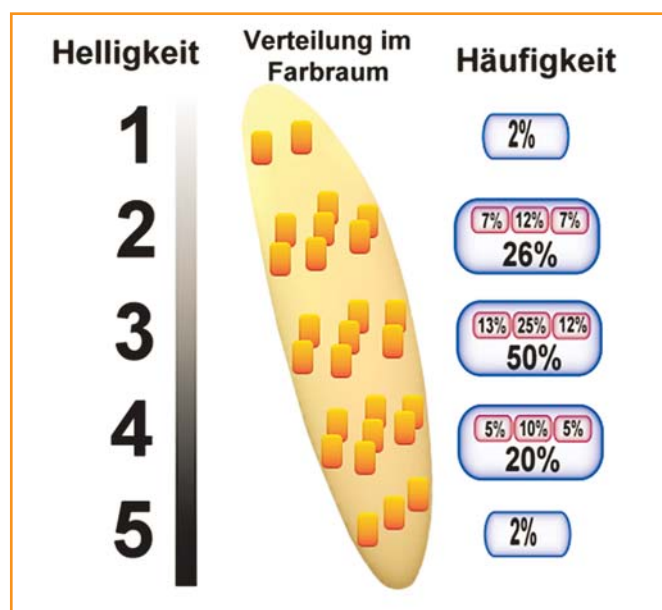
*Beispiel*

Eine exaktere und schnellere Methode der Farbnahme durch das menschliche Auge ist kaum vorstellbar. Der modulare Aufbau und die richtige Farbwahl mittels Ausschlussverfahren erlauben nach kurzem Einüben eine sichere und effiziente Handhabung. Bei extrem hellen sowie extrem dunkeln Zähnen sind kaum Verschiebungen ins Gelb oder Rot zu erwarten, weshalb Farbbestimmungen innerhalb der Helligkeitsgruppen 1 und 5 wohl stets beim mittleren Farbton M zu liegen kommen.

### Die Verteilung der Zahnfarben im Zahnfarbenraum

Ein Blick auf die Häufigkeitsverteilung der Zahnfarben im Zahnfarbenraum ist aufschlussreich. Entsprechend den schmal auslaufenden Enden des bananenförmigen Zahnfarbenraums sind die Farbebenen der endständigen Helligkeitsgruppen 1 und 5 relativ klein. Dem Prinzip der gleichbleibenden Farbdistanzen folgend, haben somit nicht mehr alle sechs Musterzähne in diesen Farbebenen Platz. Zudem sind Zähne der Helligkeitsgruppen 1 und 5 äußerst selten. Etwa die Hälfte aller natürlichen Menschenzähne finden sich in der Mitte, also in der Helligkeitsgruppe 3. Bei der anfänglichen Festlegung der Helligkeitsgruppe ist es demnach aus statistischer Sicht empfehlenswert, von der Mitte auszugehen, um anschließend zu entscheiden, ob der Referenzzahn heller oder dunkler ist oder ob er tatsächlich in der Helligkeitsgruppe 3 liegt (Abb.18)<sup>9</sup>.

Abb. 18 Die quantitative Verteilung der natürlichen Zahnfarben im Zahnfarbenraum. 50% aller in der Natur vorkommenden Zähne liegen in der Farbebene der mittleren Helligkeitsgruppe 3. Bei der Festlegung der Helligkeitsgruppe empfiehlt es sich demnach, mit dem Helligkeitsabgleich von dieser Gruppe ausgehend zu beginnen.



### Die Mischung der 3D-Master-Hauptfarben

In der Zahntechnik sind die vollkeramischen Rekonstruktionen im Vormarsch. Im Vergleich zu anderen Techniken nimmt ihr Anteil rasant zu und es steigen die ästhetischen Ansprüche. Einer möglichst naturgetreuen Nachbildung wird immer mehr Gewicht beigemessen; die neuen Gerüst- und Verblendkeramiken spielen dabei eine Schlüsselrolle. Bei der Farbbestimmung eines Zahns beeinflussen selbstverständlich Glanz, Transluzenz und Opaleszenz die Farbwahrnehmung. Primär ist aber stets die Wahl der richtigen Grundfarbe entscheidend. Frühere Rekonstruktionen mit Farbabweichungen von  $\Delta E$  4 bis  $\Delta E$  6 gelten heute bereits als suboptimale Resultate.  $\Delta E$ -Werte von 1 bis 3 werden gefor-

## FARBBESTIMMUNG

<b>1M1</b>	1.5M1	<b>2M1</b>	2.5M1	<b>3M1</b>	3.5M1	<b>4M1</b>	4.5M1	<b>5M1</b>
1M1.5	1.5M1.5	2M1.5	2.5M1.5	3M1.5	3.5M1.5	4M1.5	4.5M1.5	5M1.5
<b>1M2</b>	1.5M2	<b>2M2</b>	2.5M2	<b>3M2</b>	3.5M2	<b>4M2</b>	4.5M2	<b>5M2</b>
	1.5M2.5	2M2.5	2.5M2.5	3M2.5	3.5M2.5	4M2.5	4.5M2.5	5M2.5
		<b>2M3</b>	2.5M3	<b>3M3</b>	3.5M3	<b>4M3</b>	4.5M3	<b>5M3</b>
Aus den vierzehn Haupt - M-Farben ergeben sich weitere 23, genau definierte Mischfarben.								
		<b>2R1.5</b>	2.5R1.5	<b>3R1.5</b>	3.5R1.5	<b>4R1.5</b>		
		2.5R2	2.5R2	3R2	3.5R2	4R2		
		<b>2R2.5</b>	2.5R2.5	<b>3R2.5</b>	3.5R2.5	4R2.5		
Aus den sechs Haupt-R-Farben ergeben sich weitere neun, genau definierte Mischfarben.								
		<b>2L1.5</b>	2.5L1.5	<b>3L1.5</b>	3.5L1.5	<b>4L1.5</b>		
		2L2	2.5L2	3L2	3.5L2	4L2		
		<b>2L2.5</b>	2.5L2.5	<b>3L2.5</b>	3.5L2.5	<b>4L2.5</b>		
Aus den sechs Haupt-L-Farben ergeben sich weitere neun, genau definierte Mischfarben.								

Schema 2 Die 29 Muster des VITA 3D-MASTER-Farbschlüssels.

dert, Werte, die notabene nur mit vollkeramischen Subkonstruktionen erzielt werden können, wobei eine sorgfältige Farbbestimmung und eine gute Zusammenarbeit zwischen Zahnarzt und Zahntechniker unerlässliche Voraussetzung sind.

Das VITA SYSTEM 3D-MASTER® bietet dazu beste Voraussetzungen. Der farbmessrisch exakte Aufbau des Farbschlüssels erlaubt die Mischung der Farben mit genau voraussagbarem Ergebnis, was beispielsweise bei einer Mischung von A2 und C1 nicht möglich ist. Aus den 29 Mustern des VITA 3D-MASTER-Farbschlüssels lassen sich gemäß den Tabellen in Schema 2 alle gewünschten Mischfarben zusammenstellen.

Außerdem sind unzählige weitere Mischfarben vorstellbar, wenn M-Farben mit L-Farben bzw. mit R-Farben gemischt werden. Hier eröffnen sich ungeahnte Möglichkeiten im Dienste der richtigen Wahl der Grundfarbe eines Zahnes. Die Abweichungen der Grundfarben minimieren sich auf Anrieb und der Zahntechniker hat mehr Spielraum für eine sorgfältige Charakterisierung des Zahns mittels Transparenzen und Effekten. Die  $\Delta E$ -Werte reduzieren sich dabei auf ein Maß, das nahe an der Unauflösbarkeit durch das menschliche Auge liegt. Der begleitende Einsatz von digitalen Farbmessgeräten, vorausgesetzt sie erfassen die gesamten Spektraldaten wie das kürzlich auf den Markt gekommene Gerät „VITA Easyshade“, kann hierbei hilfreich sein. Ein Bericht in dieser Sache folgt in der nächsten Ausgabe der Quintessenz Zahntechnik.

Dr. med. dent. Andres Baltzer  
Gartenweg 12, CH-4310 Rheinfelden, Schweiz  
E-Mail: andres@baltzer.ch

Adresse der Verfasser

ZTM Vanik Kaufmann-Jinoian  
Cera-Tech GmbH, Poststrasse 13, CH-4410 Liestal, Schweiz  
E-Mail: vjinoian@aol.com

**Anhang** <sup>1</sup> 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. Beim Farbvergleich ist die Größe des Bereichs um die *fovea centralis* (Blickfeld) wichtig. Größere Blickfelder ergeben andere Farbwahrnehmungen als kleinere. Die Definition des Blickfeldes des Betrachters erfolgt durch die Festlegung des Winkels, der das Blickfeld erfasst (Abb. 19).

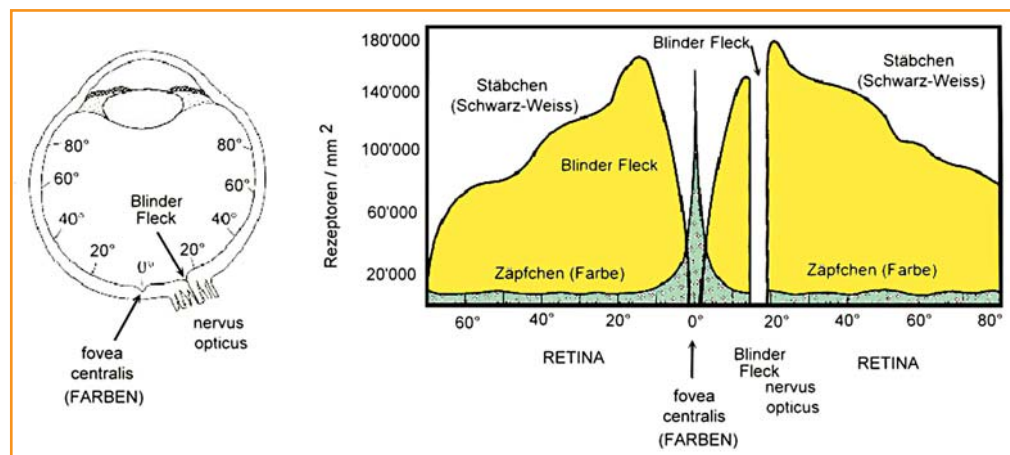


Abb. 19 Farbwahrnehmung an der fovea centralis: lichtempfindliche, aber nicht farbempfindliche Zellen liegen außerhalb der fovea centralis und sind auf der ganzen übrigen Netzhaut verteilt. CIE definierte 1931 den Normbetrachter mit einem 2°-Blickfeld (2°-Betrachter). 1964 wurde das Blickfeld auf 10° erweitert (10°-Betrachter).

<sup>2</sup> Gemäß einem physikalischen Gesetz ist das Licht, das ein schwarzer Körper aussendet, mit seiner Temperatur verknüpft. Wird beispielsweise glühende Kohle heißer, so ändert sich auch ihre Farbe. Farbe kann demnach auch als Farbtemperatur in °Kelvin ausgedrückt werden.

Lichtquelle, Lichtart	Beschreibung	Farbtemperatur (°Kelvin)
A	Wolfram-Lampe	2'856
B	Mittagslicht der Sonne	4'870
	Aufgehende Sonne	~1'800
D65	Normlicht des Spektrophotometers VITA Easyshade oder MHT SpectroShade (durchschnittliches Tageslicht)	6'500

<sup>3</sup> 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 einwirkt. Bei jedem Farbvergleich gilt es demnach, solches „Blendlicht“ auszuschalten. Selbstverständlich beeinflussen auch Glanz, Transluzenz und Opaleszenz eines Zahns die Farbwahrnehmung. Primär ist aber stets die richtige Grundfarbe zu bestimmen. Erst sekundär sollen weitere farbeeinflussende Faktoren berücksichtigt werden.

<sup>4</sup> Beim CIE-1931-System werden die alten maxwellschen Dreifarbenwerte RGB mathematisch umformuliert zu drei neuen *tristimulus values*, nämlich X, Y und Z. Gleiche X-, Y- und Z-Werte ergeben das Weiß. Mittels weiterer Umrechnung werden diese Variablen (Farbgewichte) in x, y und z gewandelt, indem jede Zahl durch die Summe aus allen dividiert wurde. Also  $x = X/(X+Y+Z)$  und

## FARBBESTIMMUNG

so fort. Wichtig an dieser Umformung ist die Tatsache, dass die Summe der Farbgewichte Eins ergibt ( $x+y+z = 1$ ). Damit sind nur noch zwei der neuen Größen unabhängig; man kann sie in einem zweidimensionalen Diagramm zeigen (siehe Abb. 4).

<sup>5</sup> Um zum CIE-  $L^*a^*b^*$  zu kommen, werden die drei farbmetrischen Koordinaten (Farbwerte)  $x$ ,  $y$  und  $z$  der CIE-Normfarbtafel in drei neue Größen überführt, die als  $L$ ,  $a$  und  $b$  bezeichnet werden.  $X$  und  $Y$  werden auf nicht ganz einfache Weise zu  $a$ , aus  $Y$  und  $Z$  entsteht auf ähnliche Weise  $b$ , und  $Y$  allein liefert den Weg zu  $L$ . Der Wert  $L$  (lightness) stellt seinerseits so etwas wie eine „psychometrische Helligkeit“ (oder „Leichtigkeit“) dar, das heißt, er wird durch die geeignete Funktion einer psychophysischen Größe (einem Farbwert) definiert, welche so gewählt ist, dass gleiche Skalenintervalle so eng wie möglich gleiche Unterschiede zwischen Farben wiedergeben, die der „lightness“ nach verwandt sind. Die Werte von  $L$  liegen zwischen 0 für Schwarz und 100 für Weiß.

<sup>6</sup> Der Winkel  $h$  liegt zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  für die Farben zwischen Gelb und Grün. Der Winkel  $h$  liegt zwischen  $90^\circ$  und  $180^\circ$  für die Farben zwischen Grün und Blau. Der Winkel  $h$  liegt zwischen  $180^\circ$  und  $270^\circ$  für die Farben zwischen Blau und Rot. Der Winkel  $h$  liegt zwischen  $270^\circ$  und  $360^\circ$  für die Farben zwischen Grün und Rot. Die hier angegebene Formel für die Berechnung des Winkels  $h$  beruht auf der Trigonometrie des Dreiecks mit  $90^\circ$ -Winkel. Für Farben und Mischfarben außerhalb des Rotschenkels ( $+a$ ) und des Gelbschenkels ( $+b$ ) ist kein rechtwinkliges Dreieck mehr gegeben, weshalb eine komplexere Berechnungsformel für den Winkel  $h$  zum Einsatz kommt.

<sup>7</sup> Die geschilderte Berechnungsart von  $\Delta E$  gewichtet die Faktoren Helligkeit, Intensität und Farbe dergestalt, als dass sie sich nicht besonders gut als Maß für die Größe des wahrgenommenen Farbunterschiedes eignet. Mit diversen Berechnungsänderungen können Verbesserungen des ursprünglichen  $\Delta E$ -Maßes erzielt werden.  $\Delta E_{CMC}$ ,  $\Delta E_{94}$ ,  $\Delta E_{2000}$ ,  $\Delta E_{LC}$ ,  $\Delta E_{MHT}$  etc. stellen ergänzende Korrekturen für die Ungleichmäßigkeit des Farbunterschiedes des  $L^*a^*b^*$ -Farbraums dar. Speziell in der Anwendung im Zahnfach ist die angegebene Wahl der  $\Delta E$ -Berechnung nicht sehr glücklich. Die Gewichtung der Helligkeit sollte stärker sein, da diese den größten Anteil an der empfundenen Übereinstimmung der Zahnfarben hat. Ist einer Zahnrekonstruktion die richtige Helligkeit gegeben, so kommt etwaigen weiteren Farbfehlern untergeordnete Bedeutung zu.

<sup>8</sup> Die hier empfohlene Bestimmung der Helligkeitsgruppe mit den M2-Zähnen entspricht nicht den Anweisungen von VITA. Im VITA SYSTEM 3D-MASTER® ist die Helligkeitsbestimmung mit den M1-Zähnen vorgesehen. Dies erscheint deshalb sinnvoll, weil die M1-Zähne sich oben im Farbschlüssel befinden und ohne Demontage zu applizieren sind. Die Helligkeitsbestimmung mit den M2-Zähnen stellt eine Variante dar, die komplizierter aber nach unseren Erfahrungen Erfolg versprechender ist.

<sup>9</sup> Seit einigen Jahren gewinnt das chemische Aufhellen von Zähnen an Beliebtheit, sei es nun ein Zeichen der ewigen Jungbrunnensuche oder eine kulturelle Variante der Maxime „*citius, altius, fortius*“ – „schneller, höher, weiter“. Solange solche Helligkeitsverschiebungen im natürlichen Zahnfarbenraum stattfinden, ist dieser Mode durchaus ein gewisses Verständnis entgegenzubringen. Fragwürdig wird das Aufhellen, wenn die Helligkeit über die Helligkeitsgruppe 1 hinaus gehen soll bzw. wenn eine unnatürliche Helligkeitsgruppe 0 angestrebt wird. Modischen Trends und extravagantem Wünschen steht man allerdings ziemlich wehrlos gegenüber. Das VITA SYSTEM 3D-MASTER® hat auf solche Tendenzen bereits reagiert und den Farbschlüssel durch eine Helligkeitsgruppe 0 ergänzt. In den Vereinigten Staaten ist dieser Schritt in die Unnatürlichkeit besonders beliebt. Ob solches eine Verschiebung der statistischen Verteilung der Zahnfarben im Zahnfarbenraum zur Folge hat, bleibt abzuwarten.