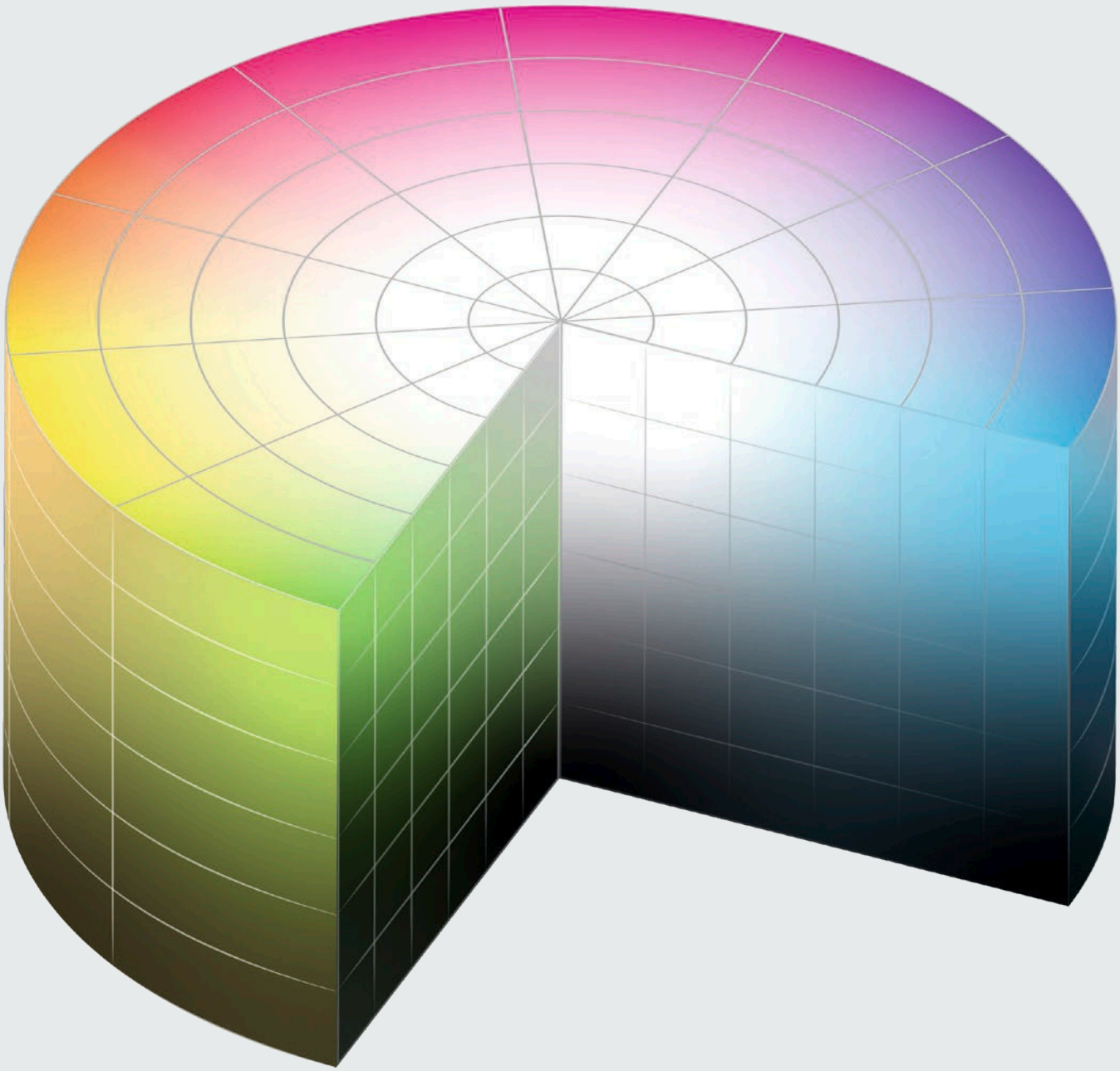
ERFAHRUNGSBERICHT

copyright by
all rights reserved
Quintessenz

Die Farbmessung mit einer Digitalkamera

SASCHA HEIN, STEPHEN WESTLAND



Zusammenfassung
Farbmessungen an Zähnen sind ein wichtiger Bestandteil der zahnmedizinischen Versorgung von Patienten, allerdings sind diese auch mit vielen Schwierigkeiten und Uneindeutigkeiten behaftet. Die Autoren beschreiben das Zusammenspiel der Farbmessung mit der Digitalkamera mit dem CIELAB Farbraum und die visuellen Schwellenwerte in der Zahnmedizin. Eine instrumentelle Farbmessung bedarf ihrer Ansicht nach einigen theoretischen Wissens, sollte aber dennoch genutzt werden.

Indizes
Dentalfotografie, Farbempfindung, Farbmessung, Farbunterschiede, CIELAB-Farbraum

Einleitung

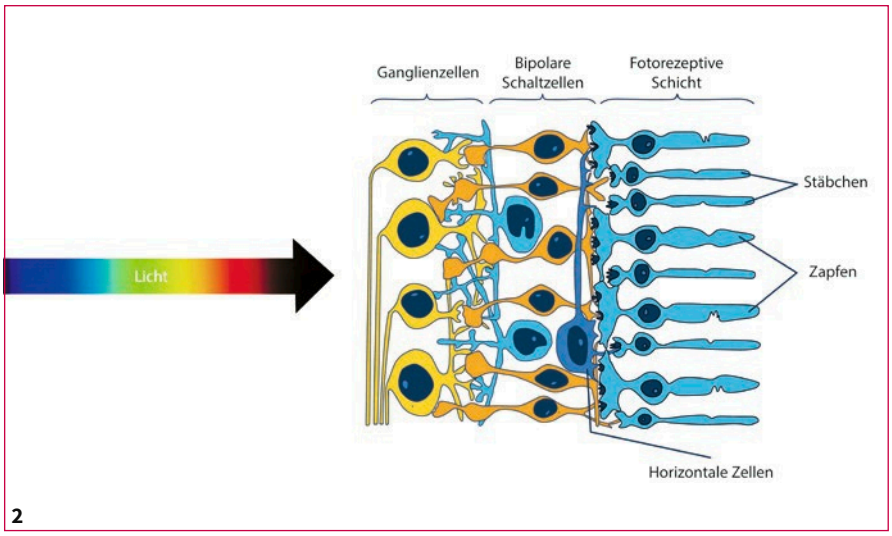
Die dentale Farbmessung ist ein wichtiger Bestandteil der Zahnmedizin, bei dem die Farbe eines Zahnes bestimmt wird, um ein möglichst natürliches Ergebnis bei restaurativen Behandlungen wie Veneers, Kronen und Brücken zu erzielen. Es gibt verschiedene Methoden der dentalen Farbmessung, darunter visuelle Vergleichsmethoden und elektronische Farbmessgeräte. Neuen Schwung erfuhr die instrumentelle Farbmessung mit der Verbreitung der digitalen Dentalfotografie und mit der Möglichkeit, auf diesem Wege Zahnfarben messen zu können[9]. So können moderne Farbmanagementsysteme mehr als nur Farbe messen. Durch die Unterstützung von künstlicher Intelligenz können sie ebenfalls Mischungsrezepte generieren oder automatisch digitale Einproben erstellen[7] (eLAB_prime, Fa. Emulation, Freiburg) (Abb. 1).

Farbwahrnehmung

Das in das Auge einfallende Licht wird gebündelt und auf die Retina projiziert. Dort sind die fotoempfindlichen Zellen des Wahrnehmungssystems angesiedelt. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau des Retinagewebes. Es besteht aus mehreren Schichten neuronaler Zellen, angefangen von der Ganglienzellenschicht, gefolgt von einer Schicht von bi-

Abb. 1 Moderne Farbmanagementsysteme können mehr als nur Farbe messen. Durch die Unterstützung von künstlicher Intelligenz können sie **a** Mischungsrezepte generieren, **b** automatisch digitale Einproben erstellen und **c** das mit hoher Vorhersehbarkeit. (Klinischer Fall. ZTM Matthias Weisshaar, Zahnwerkstatt, Freiburg).

copyright by all rights reserved



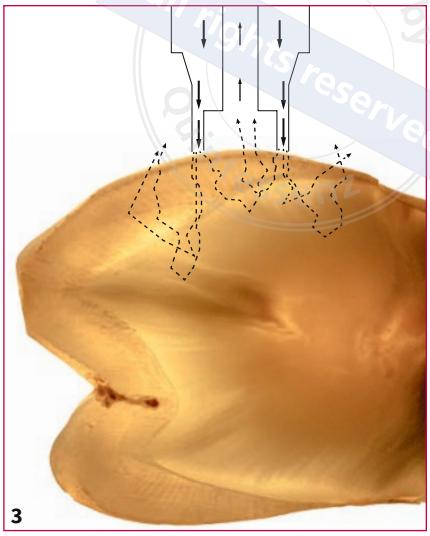


Abb. 2 Schematischer Aufbau des Retinagewebes, das in etwa so dick ist wie ein Blatt Papier. Die Fotorezeptoren sind mit den bipolaren Zellen und diese wiederum mit den Ganglienzellen verknüpft, die zusammen den Sehnerv bilden. Die Anordnung der verschiedenen Schichten ist „verkehrt herum", das heißt das einfallende Licht muss zuerst die neuronalen Schaltkreise durchdringen, bevor es an die Fotorezeptoren gelangt. Dies ist nur möglich, weil diese Schichten fast vollständig transparent sind. **Abb. 3** Der Kantenverlust beschreibt das Phänomen, wenn Licht, das während der Messung in einen Zahn eindringt, aufgrund der vielen im Dentin vorkommenden Lichtpfade umgeleitet wird und somit lateral entweichen kann. Das so verloren gegangene Licht wird nicht in die Quantifizierung mit einbezogen, was zu einer systematischen Unterschätzung der Helligkeitswerte führt.

polaren Schaltzellen. Beide zusammen bilden den Sehnerv. Der Mensch und manche Primatenarten gehören zu der Gruppe der Trichromaten. Das liegt daran, dass die Sehzapfen in drei Arten und mit jeweils unterschiedlichen Absorptionsmaxima angelegt sind. Dazu zählen die S-Zapfen für kurzwelliges (bläuliches) Licht, die M-Zapfen für mittelwelliges (grünliches) Licht und die L-Zapfen für langwelliges (rötliches) Licht[4].

Die Psychophysik ist ein Forschungszweig der Psychologie, der sich unter anderem mit der menschlichen Farbwahrnehmung beschäftigt und versucht, diese mathematisch zu beschreiben[2]. Sie bildet bis heute den Grundstein der modernen Farbwissenschaft. Hier findet sie regelmäßig Anwendung im Rahmen psychophysikalischer Experimente, die ebenfalls in der dentalen Forschung angewendet werden[13].

Farbmessung an Zähnen

Die Farbmessung an Zähnen stellt eine besondere Herausforderung dar, und das hat prinzipiell drei Ursachen:

- Zähne gehören zu der Gruppe der diffus streuenden Medien, weil sie nicht opak, sondern transluzent sind.
- Zähne sind keine flachen Objekte, sondern sie besitzen eine gekrümmte Oberfläche.
- Zähne befinden sich zumeist in der Mundhöhle, was den Zugang für Messzwecke erheblich erschwert.

Kantenverlust oder „edge loss"

Aufgrund dieser Limitationen wurden spezielle Spektralphotometer für die In-vivo-Farbmessung von Zähnen entwickelt. Um den Zugang in der Mundhöhle zu erleichtern, haben diese Geräte oft einen fiberoptischen Aufbau und sind mit einer Messspitze ausgestattet, welche die Zahnoberfläche berührt. Wenn das zur Messung benötigte Licht in den Zahn eindringt, breitet sich die elektromagnetische Welle entlang einer Vielzahl von Lichtpfaden schneller aus als in den Bereichen, wo diese nicht vorhanden sind und sie von kleineren Partikeln diffus gestreut wird. Die größten dieser Lichtpfade sind die Dentinkanälchen, die außerdem eine strukturierte Orientierung aufweisen (Anisotropie)[14,19]. Auf diese Weise kann ein großer Teil des Lichtes lateral (entlang der Kante) entweichen und dieses Phänomen nennt man Kantenverlust (EN: edge loss)[1]. Das verloren gegangene Licht kann somit nicht für die Messung verwendet werden (Abb. 3). Dentale Spektralphotometer, die auf diesem Prinzip aufbauen, weisen eine systematische

copyright by all rights reserved Quintessenz

Unterschätzung der gemessenen Helligkeit von Zähnen auf[12,15,16].

Farbmessung mit einer Digitalkamera

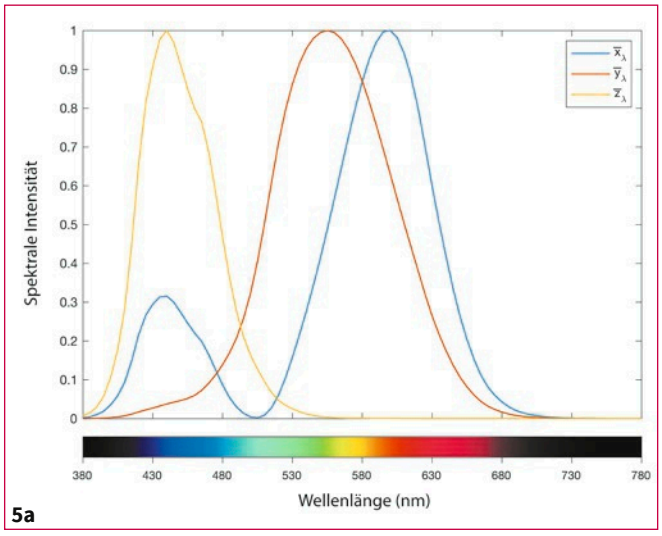
Zahnfarben können auch mit einer Digitalkamera gemessen werden (Abb. 4). Voraussetzung dafür ist, dass man die Spektralfunktionen des Kamerasensors kennt, da dieser sozusagen das Wahrnehmungsorgan der Kamera ist (Abb. 5). Für die Bildkalibration sind jedoch RAW-Bilder erforderlich sowie eine graues Referenzobjekt, das in der Nähe des zu messenden Zahnes platziert werden muss[8]. Jedoch misst die Digitalkamera lediglich RGB-Werte (rot, grün und blau) und keine spektralen Reflexionsfaktoren.

Zu den Vorteilen der Farbmessung mit einer Digitalkamera zählen die Vermeidung von Kantenverlust bei der Zahnfarbmessung und dass der Zahntechniker bei der Umsetzung auf die Vorzüge der Dentalfotografie zurückgreifen kann, das heißt der gesamte visuelle Kontext der intraoralen Situation steht als Bezugspunkt zur Verfügung, anstatt lediglich eine numerische Beschreibung zu erhalten. Vor allem aber ist die Dentalfotografie heute in der Zahnarztpraxis sowie im Dentallabor weit verbreitet und somit entfallen die Anschaffungskosten für die oft teuren Farbmessgeräte.

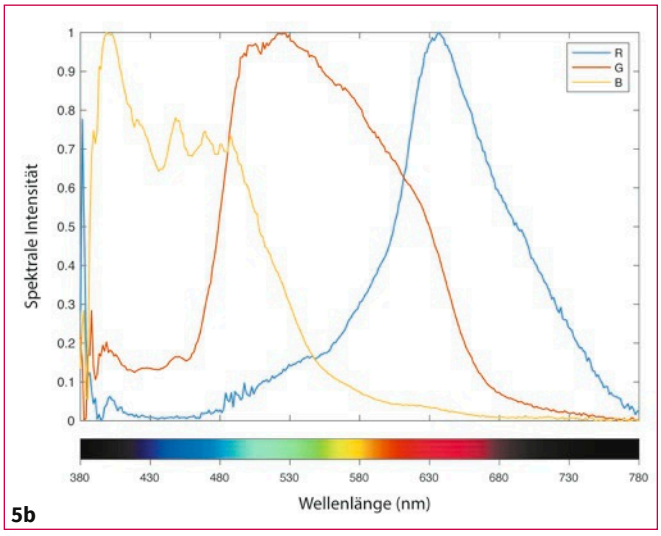
Umwandlung in den CIELAB Farbraum

Die Commission internationale de l'éclairage, kurz CIE genannt, empfiehlt Standards für alle Aspekte der Farbmessung und veröffentlicht diese in Form von technischen Berichten. Diese werden regelmäßig von einer Expertenkommis-

4



5a



5b

Abb. 4 Zahnfarben können auch mit Digitalkameras gemessen werden. Dafür empfiehlt sich der Einsatz eines Polfilters, um die Oberflächenspiegelungen der Zähne zu eliminieren. **Abb. 5a** Die Spektralfunktionen der menschlichen Farbwahrnehmung und **b** die Spektralfunktion des Sensors einer Canon ESO70D im Vergleich.

copyright by Quintessenz all rights reserved

sion erstellt[3]. Um zu bestimmen, welche wahrgenommene Farbe zwei Objekte haben, oder noch viel wichtiger, wie groß ihr Farbunterschied ist, müssen die gemessenen RGB-Werte in einen Farbraum mathematisch abgebildet (umgerechnet) werden. Zu diesem Zweck entwickelte die CIE 1976 das CIELAB-System. Ziel war, damit visuelle Uniformität in Form eines kartesischen Koordinatensystems zu erreichen, unter Berücksichtigung der Gegenfarbentheorie von Hering (Abb. 6).

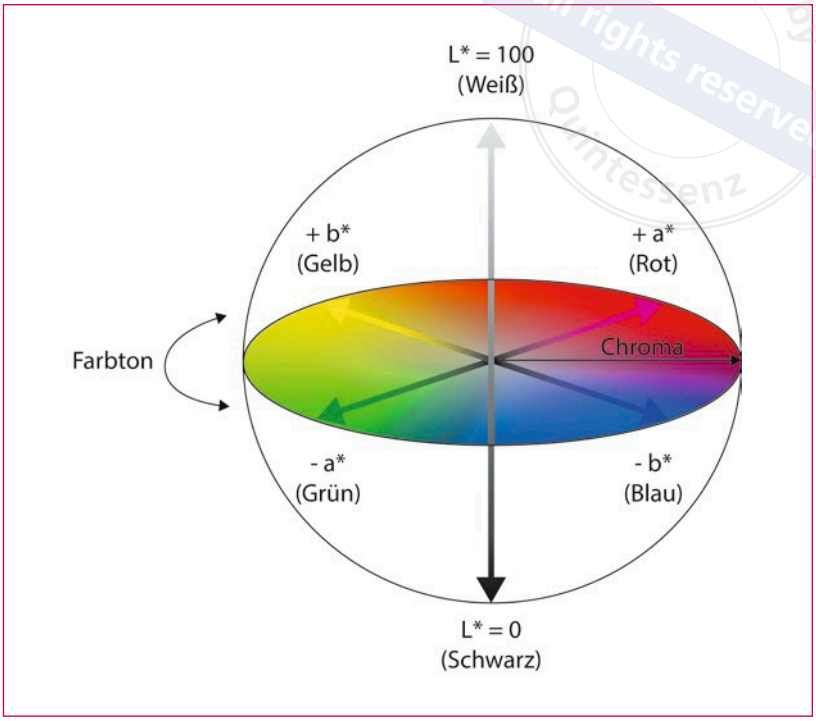


Abb. 6 Das CIELAB System ist ein kartesisches Koordinatensystem. Es besitzt eine vertikale Helligkeitsachse, die mit L* abgekürzt wird (EN luminosity), mit einer Reichweite von 0 (komplett schwarz) bis 100 (komplett weiß). Die verschiedenen Farbtöne sind zirkulär um die L*-Achse angelegt und folgen der Gegenfarbentheorie nach Hering. Das Chroma (Farbintensität) nimmt vom Zentrum zur Peripherie hin zu.

Berechnung von Farbunterschieden

Die Einführung des CIELAB Farbraums war einen Meilenstein für die CIE und er erfreute sich schnell großer Beliebtheit in Industrie und Wissenschaft. Zum ersten Mal war es möglich, Farbunterschiede zwischen zwei Objekten zu berechnen mithilfe des Satz des Pythagoras:

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}$$

Der griechische Buchstabe Δ (Delta) beschreibt in der Physik eine Veränderung und der Großbuchstabe „E“ kürzt das deutsche Wort „Empfindung“ ab. Die im Index vermerkten Buchstaben „ab“ geben an, um welche Formel es sich handelt, in diesem Fall die ΔE* Formel aus dem Jahr 1976.

Es dauerte jedoch nicht lange, bis erste Zweifel aufkamen, inwieweit es der CIE tatsächlich gelungen war, einen visuell einheitlichen Farbraum zu schaffen. Aus diesem Grund schlug die CIE im Jahr 2000 eine neue, deutlich komplexere Farbabstandsformel vor, die CIEDE2000 Gleichung:

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \cdot \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}$$

Wie man unschwer erkennen kann, nahm die Komplexität erheblich zu im Vergleich zu der ΔE^*_{ab} Formel und dafür wurde die CIEDE2000 (ΔE_{00}) Formel häufig kritisiert.

Visuelle Schwellwerte in der Zahnmedizin

Trotz aller Kritik wurde die Verwendung der CIEDE2000 Formel für den Gebrauch in der Zahnmedizin untersucht und als besser befunden als die ältere ΔE^*_{ab} Formel[5]. Trotz aller Bemühungen ist der CIELAB-Farbraum nicht wirklich perfekt gleichmäßig. Dieser Umstand macht es notwendig, industriespezifische Schwellwerte für Farbunterschiede mithilfe von psychophysikalischen Experimenten zu ermitteln, also mit der Hilfe von visuellen Betrachtern[11]. Es gelang letztendlich, derartige Schwellwerte für die Zahnmedizin zu empfehlen[18], die auch von der ISO übernommen wurden[10] (Tab. 1) (Abb. 7). Mit diesem System lassen sich zum Teil verblüffende Phänomene entlarven, die das Auge verwirren können (Abb. 8).

Limitationen

Das CIELAB System ist eine Erfolgsgeschichte, die sich über 45 Jahren erstreckt. Es erfreut sich großer Popularität in Industrie und Wissenschaft. Der CIELAB-Farbraum ist de facto zum globalen Standard geworden ist[6]. Das liegt

copyright by Quintessenz all rights reserved

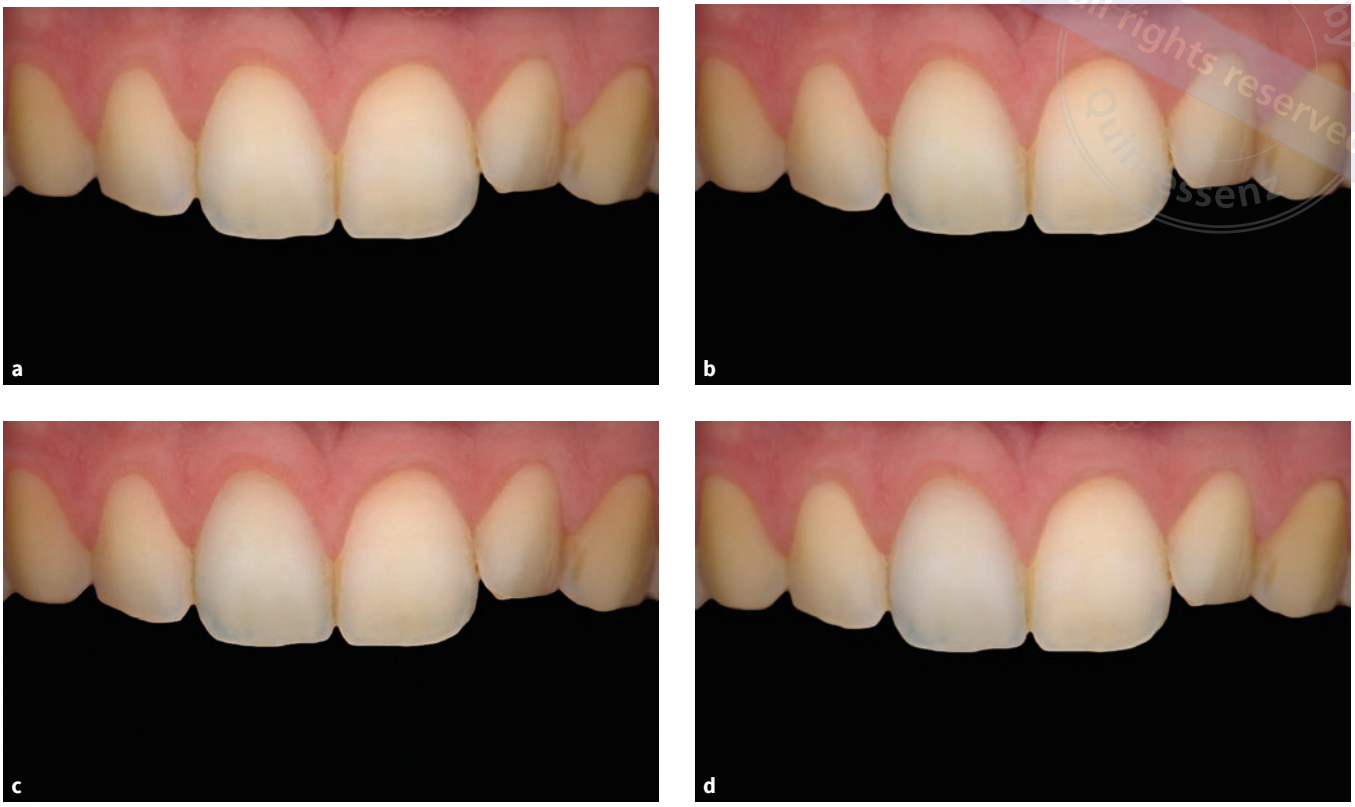


Abb. 7 Diese Simulation verdeutlicht, wie eng die visuellen Schwellwerte nach Paravina et al. gesteckt sind. **a** Klinisch nicht wahrnehmbarer Unterschied. **b** Klinisch akzeptabler Unterschied. **c** Klinisch moderat unakzeptabler Unterschied. **d** Klinisch unakzeptabler Unterschied.

Tab. 1 Die visuellen Schwellwerte für klinische Farbunterschiede nach Paravina et al.

ΔE_{00}	Bewertung
0,0–0,8	klinisch nicht wahrnehmbarer Unterschied
0,8–1,8	klinisch akzeptabler Unterschied
1,8–3,6	klinisch moderat unakzeptabler Unterschied
3,6–5,4	klinisch deutlich unakzeptabler Unterschied
> 5,4	klinisch extrem unakzeptabler Unterschied

nicht zuletzt am logischen Aufbau und der einfachen Nachvollziehbarkeit des Systems.

Es gibt jedoch auch Limitationen. Ein profundes Problem bei der Bestimmung von Farbunterschieden ist, dass die Farbe der relevanten Referenzmuster, also Zähne, Restaurationen oder Farbringe, nicht bekannt ist. Das mag zuerst einmal paradox klingen, aber es ist in der Tat wahr. Das liegt daran, dass Zähne, wie bereits erörtert, diffus streuende Medien sind und dass die farbmetrischen Umrechnungsprozesse der CIE zahlreiche kleinere und größere Fehler beinhaltet. Zum Beispiel kann es deutliche Unterschiede geben zwischen verschiedenen Betrachtern, die wiederum von den spektralen Funktionsgleichungen der CIE abweichen.

Ähnlich verhält es sich beim Einfluss einer tatsächlichen Lichtquelle, deren spektrale Energieverteilung erheblich abweichen kann von den angenommenen Funktionen der CIE. Auch die Tatsache, dass der CIELAB-Farbraum eben nur ungefähr visuell einheitlich ist, birgt so manches Problem. Es gibt zum Beispiel zahlreiche Beweise dafür, dass er nicht sonderlich gut dafür geeignet ist, kleine Farbunterschiede ($\Delta E^* < 5$) zu bestimmen[17]. Das ist relevant in der dentalen Farbmessung, da die klinischen Schwellwerte hier sehr eng gesteckt sind (Tab. 1). Hinzu kommt noch, dass CIELAB-Koordinaten berechnet werden für die Betrachtung unter einer Beleuchtung mit 1000 lx, wobei das Objekt vor einem perfekt grauen Hintergrund mit 50 L*-Punkten plaziert ist[20].

copyright by Quintessenz all rights reserved

Abb. 8 Es gibt zum Teil verblüffende Phänomene, die das Auge verwirren können. Diese lassen sich jedoch durch die Kenntnis des CIELAB-Systems einfach entlarven. Im Vergleich zu Zahn 11 wirkt der Zahn 21 etwas heller. In Wirklichkeit ist er aber um 3.5 CIE-Punkte weniger gelb als der Zahn 11. Dies macht ihn achromatischer und lässt ihn so heller erscheinen. Dieses Problem würde sich mit dem Auftragen von ein wenig gelber Malfarbe einfach beheben lassen, wenn man die Ursache dafür kennt.

Fazit

Die dentale Farbmessung ist ein sowohl faszinierendes als auch komplexes Thema. Die Farbmessung von natürlichen Zähnen und von Zahnersatzmaterialien stellt Forscher vor besondere Herausforderungen. Der CIELAB-Farbraum folgt einem einfach verständlichen, intuitiven Aufbau, der trotz seiner Mängel zum weltweiten Standard in Wissenschaft und Forschung geworden ist. Hauptzweck der Farbmessung bleibt, Farbunterschiede zu bestimmen, und zwar so, wie sie das Auge wahrnehmen würde.

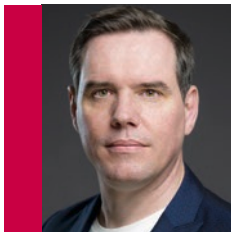
Dieses Ziel ist mit den Methoden der CIE-Farbmetrik allein nicht immer zu bewältigen. Deshalb ist die Überprüfung durch visuelle Betrachter für die dentale Farbforschung empfehlenswert. Man kann sich zwar nicht blind auf die Schwellenwerte für klinische Farbunterschiede verlassen, jedoch stellen sie im Alltag einen zuverlässigen Kompass dar. In jedem Fall ist die instrumentelle Farbmessung, wenn sie richtig verstanden ist, eine klare Bereicherung im Alltag und sollte genutzt werden.

Literatur

1. Bolt R, Ten Bosch J, Coops JC. Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. Phys Med Biol 1994;39:1133.
2. Braddick O. Visual psychophysics. Curr Biol 1997;7:R209–R211.
3. CIE. Colorimetry. 2018.
4. Dartnall HJA, Bowmaker JK, Mollon JD. Human Visual Pigments: Microspectrophotometric results from the eyes of seven persons. Proceedings of the Royal Society of London Series B, Biological Sciences 1983;220:115–130.
5. del Mar Perez M, Ghinea R, Herrera LJ, et al. Dental ceramics: a CIEDE2000 acceptability thresholds for lightness, chroma and hue differences. J Dent 2011;39:e37–e44.
6. Fairchild M. Color Appearance Phenomena. Color Appearance Models 2013:115–141.
7. Hein S, Modrić D, Westland S, Tomeček M. Objective shade matching, communication, and reproduction by combining dental photography and numeric shade quantification. J Esthet Restor Dent 2021;33:107–117.
8. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor_aid: a new approach to digital shade management. Int J Esthet Dent 2017; 12:186–202.
9. Hein S, Zangl M. The use of a standardized gray reference card in dental photography to correct the effects of five commonly used diffusers on the color of 40 extracted human teeth. Int J Esthet Dent 2016;11:246–259.
10. ISO. Dentistry – Guidance on colour measurement. ISO/TR 28642:2016. Vernier, Geneva, Switzerland: ISO copyrigh office 2016.
11. Johnston WM. Color measurement in dentistry. J Dent 2009;37:e2-e6.

copyright by
all rights reserved
Quintessenz

12. Johnston W, Hesse N, Davis B, Seghi R. Analysis of edge-losses in reflectance measurements of pigmented maxillofacial elastomer. J Dent Res 1996;75:752–760.
13. Joiner A, Luo W. Tooth colour and whiteness: A review. J Dent 2017;67:S3-S10.
14. Kienle A, Forster FK, Diebolder R, Hibst R. Light propagation in dentin: influence of microstructure on anisotropy. Phys Med Biol 2002;48:N7.
15. Khashayar G, Dozic A, Kleverlaan C, Feilzer A. Data comparison between two dental spectrophotometers. Oper Dent 2012;37:12–20.
16. Lehmann KM, Igiel C, Schmidtmann I, Scheller H. Four color-measuring devices compared with a spectrophotometric reference system. J Dent 2010;38:e65–e70.
17. Luo MR, Xu Q, Pointer M, et al. A comprehensive test of colour-difference formulae and uniform colour spaces using available visual datasets. Color Research & Application 2023;1–16.
18. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, et al. Color difference thresholds in dentistry. J Esthet Restor Dent 2015;27:S1–S9.
19. Vaarkamp J, Ten Bosch J, Verdonschot E. Propagation of light through human dental enamel and dentine. Caries Res 1995;29:8–13.
20. Xu Q, Shi K, Luo MR. Parametric effects in color-difference evaluation. Opt Express 2022;30:33302–33319.



Sascha Hein
ZTM
School of Design
University of Leeds
Korrespondenzadresse: Sascha Hein, School of Design,
University of Leeds, LS2 9JT, Großbritannien
E-Mail: sdsch@leeds.ac.uk

Stephen Westland
Prof.
School of Design
University of Leeds
Korrespondenzadresse: Stephen Westland, School of Design,
University of Leeds, LS2 9JT, Großbritannien
E-Mail: s.westland@leeds.ac.uk