

Können Computer Zahnfarben besser erkennen?

*Farbmessung mit dem Spektralphotometer. Bericht vom Keramik-Symposium 2002 zum Thema „Digitale Farbbestimmung“, vorge-
tragen von Privatdozent Dr. Stefan J. Paul, Universität Zürich.*

▶ Manfred Kern, AG Keramik; Priv.-Doz. Dr. Stefan J. Paul, Zürich

Im vergangenen Jahr wurden ca. 8 Millionen Metallkronen und -brücken aufbrennkeramisch verblendet. Ebenso

wurden 1,6 Millionen Restaurationen aus Silikat, Oxid- und CAD/CAM-Keramik gefertigt. Alle diese Versorgungen haben



Abb. 1: Priv.-Doz. Dr. Paul führte die Teilnehmer des Keramik-Symposiums in Leipzig der Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e. V. in die Technologie der digitalisierten Farberkennung ein.

Foto: AG Keramik



Abb. 2: Der Mundsimulator vergleicht die Farben der im Labor hergestellten Keramikrestauration mit dem natürlichen Zahn. Links die natürliche Zahnfarbe (grüner Ring), rechts die vom SpectraShade definierte Zahnfarbe (roter Ring). Mit der Spotmessung lassen sich alle Zahnflächen auf Farbidentität mit dem Naturzahn überprüfen.

Foto: Dr. Paul/ZTM Pietrobon/AG Keramik



Abb. 3: Elektronische Farbbestimmung der Frontzähne mit dem Spektralphotometer. Die Lichtquelle sendet fraktionierte Anteile im sichtbaren Spektrum auf die Schmelzoberfläche. Der Zahn reflektiert das Licht, das von photosensorischen Dioden in die Spektralfarben zerlegt wird. Der Mikroprozessor errechnet charakteristische Farbkoordinaten und vergleicht diese mit Farbschlüsseln. Damit wird der Farbwert nach gängigen Colour-Indices bestimmt. Foto: AG Keramik/Priv.-Doz. Dr. Paul (Zürich)

gemein, dass sie zahnfarben, lichtbrechend und dadurch neben dem Naturzahn fast unsichtbar sind. Fast – oder nur annähernd? Es ist immer ärgerlich, wenn sich nach dem aufbrennkeramischen Verblenden einer Krone oder Brücke herausstellt, dass die zuvor bestimmte Zahnfarbe nicht mit den Nachbarzähnen übereinstimmt. Der Zahnarzt ist verärgert, der Patient muss getröstet werden, und das Umbrennen auf die korrekte Farbe kostet Zeit. Niemand wagt bisher, dieses Problem offen anzusprechen, das sich tagtäglich tausendfach wiederholt und zu erheblichen Meinungsverschiedenheiten führen kann, weil die Betroffenen in Praxis und Labor keine Lösung hatten, das individuelle Farbempfinden zu objektivieren. Traditionell gibt es vom Zahnarzt für den Zahntechniker zumindest zwei konkrete Informationen als Unterlage für die auszuführende Arbeit: die Abformung der Präparation und die Nennung der Zahnfarbe. Bei der Farbbestimmung kann es durch unterschiedliche Lichtverhältnisse in Praxis und Labor zu Differenzen kommen, ganz zu Schweigen von subjektiven Wahrnehmungsleistungen und Farbempfindungen. Die visuelle Farbermittlung für indirekt hergestellte Restaurationen geschieht weltweit mit standardisierten, industriell vorgegebenen Mustern auf Farbringen aus Keramik oder Kunststoff. Diese Muster werden mit der Zahnfarbe des Patienten verglichen. Im Idealfall wird die Farbinformation für das Labor mit grafischen und fotooptischen Hilfsmitteln, die Aussagen zur Farbverteilung, Textur, Zahnform und zum Glanz enthalten, unterstützt. In der Industrie, die Farben für viele Bereiche unseres Lebens verarbeitet, wäre ein solches Vorgehen nicht vorstellbar. Dort sind Farben in valenzmetrische Systeme eingeordnet, die es ermöglichen, jeden Farbton mit Koordinaten zu definieren und nach Helligkeit, Farbwert und Sättigung zu unterscheiden. Die Farbindizes in der Dentalwelt unterliegen nicht dieser Ord-

nung; die definierten Zahnfarben wurden ursprünglich in ein willkürlich angelegtes System gestellt und die Abstände zwischen den einzelnen Farben sind nicht gleichmäßig. Sie dienen der Bestimmung einer Grundfarbe, die meistens noch individuell modifiziert werden muss. Einen Fortschritt bietet das 3D-Master-System (VITA), das Farbabstufungen nach Helligkeit und Sättigung bietet. Allerdings ist allgemein bekannt, dass die praxisüblichen Farbschlüssel variieren bzw. Farbabweichungen enthalten. Herstellungsbedingte Eigenheiten sind dafür verantwortlich, dass Farbringe nicht identisch sind und von Charge zu Charge kleine „Farbsprünge“ aufweisen. Trotz dieser Schwierigkeiten und der fehlenden Standardisierung sind derartige Farbringe der einzige „Standard“, auf dem die Farbbestimmung in der Zahnmedizin beruht. Tatsache aber bleibt, dass Menschen ein unterschiedliches Farbempfinden haben. Die Augen können besser zwischen zwei Farbtönen unterscheiden, aber eine Farbbestimmung kann von Person zu Person stark differieren. Junge Leute sind farbtüchtiger als Ältere; Frauen unterliegen weniger Farbtäuschungen als Männer. Aufenthalt unter Kunstlicht beeinflusst das Farbempfinden. Gefordert ist jedoch eine Konstanzleistung der Sinnesreize für eine Farbbestimmung, die nicht von der Tagesform abhängen darf, sondern reproduzierbare Ergebnisse liefern soll.

Wir sehen mit Stäbchen und Zapfen

Verantwortlich für unser Sehen sind die 125 Millionen Sehzellen als Photorezeptoren im Pigmentepithel der Netzhaut, die die Licht- und Farbreize in Nervenimpulse umwandeln. Für die Hell-Dunkel-Empfindlichkeit sind Stäbchen verantwortlich, die die Anzahl der farbempfindlichen Zapfen um das 20fache übertreffen. Die Stäbchen sind auch um ein Mehrfaches lichtempfindlicher als die Farbstäbchen und sind deshalb auch für das Sehen in der Dämmerung zustän-

dig. Deshalb reagiert unser Auge zuerst auf Helligkeitsunterschiede, bevor es die Farben zuordnet. Warum können wir am Tag die Sterne nicht sehen? Das liegt nicht an den Sternen, sondern an der Arbeitsweise unserer Augen. Sie sind spezialisiert, Unterschiede zu registrieren. Dadurch ist das Auge auch sehr effizient bei der Unterscheidung selbst kleinster Unterschiede zwischen zwei Objekten, die sich zuerst im Helligkeitswert manifestieren. Der Farbeindruck wird von den Zapfen auf der Netzhaut bestimmt; davon gibt es drei Arten, die unterschiedlich auf den kurzwelligen, den mittleren oder den langwelligen Teil des Lichtspektrums reagieren. Das einfallende Licht hat ein Wellen-

drei Zapfentypen ist durch additive Farbmischung die Vielfalt der ca. 500.000 Farbempfindungen erklärbar. Wenn Lichtstrahlen auf die Netzhaut fallen, werden die Photorezeptoren (Stäbchen, Zapfen) erregt. Es zerfallen lichtempfindliche Stoffe (Photopigmente). Das Photopigment der farbempfindlichen Stäbchen ist der Sehpurpur (Rhodopsin), der aus dem Vitamin A gebildet wird. Rhodopsin wird durch Licht zersetzt und löst einen Nervenimpuls aus.

Bei Dunkelheit findet ein Wiederaufbau zu Rhodopsin statt, wobei das Vitamin A dem Blut entnommen wird. Fällt jedoch viel Licht auf die Netzhaut (Sonne, OP-Lampe), zerfällt mehr Rhodopsin, als auf-



Abb. 4: Das Spektralphotometer (Typ MHT SpectroShade) analysiert die Helligkeitswerte, Intensitäts- und Farbwerte des Zahns mit exakten Angaben ganzheitlich und regional. Das Ergebnis wird dem Muster des industriellen Farbschlüssels gegenübergestellt und Abweichungen angegeben. Die Übereinstimmung bei Wiederholungsmessungen zeigt eine hohe Verlässlichkeit des Systems. Foto: AG Keramik/MHT

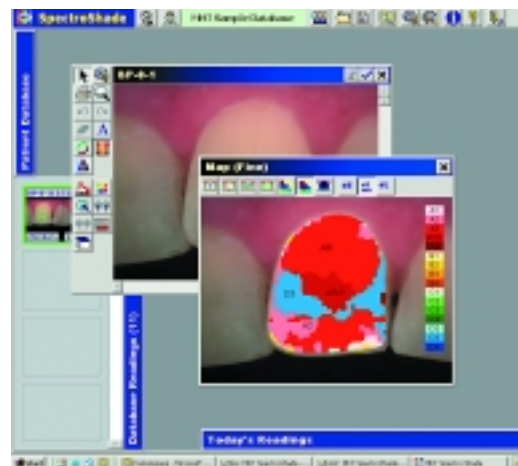


Abb. 5: Als Farbinformation erhält der Zahntechniker eine Farbkarte zur Schichtung der Keramik – hier im VITA Classic Standard. Foto: AG Keramik/MHT

längen-Spektrum von 380 bis 750 Nanometer. Wir haben die Fähigkeit, Farben unabhängig vom Helligkeitswert auf Grund der Wellenlänge des Lichts zu unterscheiden. Die Zapfen für Rot reagieren auf Wellen mit 590–750 nm, für Grün 487–566 nm und für Blau 440–485 nm. Damit kann das Auge bzw. das Gehirn 160 Farbtöne unterscheiden. Im Rot- und Grünbereich ist die Unterscheidungsfähigkeit am besten entwickelt. Der Mensch sieht trichromatisch – alle Farbeindrücke entstehen entsprechend dem Erregungszustand der drei Zapfentypen. Aus der Mischerregung zweier oder aller

gebaut werden kann. Da nur wenig Sehfärbstoff zur Verfügung steht, sind die Zapfen kaum aktiv. Auch die Stäbchen sind bei großer Helligkeit am Sehvorgang minimal beteiligt. Die Anpassung der Stäbchen an veränderte Lichtverhältnisse kann bis zu 30 Minuten dauern. Die Helligkeitsempfindung bei Körperfarben – und diese enthält unser Zahn – wird vom Auge stets relativ zu den Helligkeiten gleichzeitig gesehener anderer Flächen beurteilt. Deshalb ist es wichtig, dass die Zahnfarbbestimmung vor neutralem, nicht farbkräftigem Hintergrund vorgenommen wird, die die Photorezeptoren nicht „vorprogrammieren“. So ist das Abschminken der Patientin während der Farbbestimmung zu empfehlen. Auch das Umgebungslicht nimmt Einfluss auf unser

literatur:

Journal of Dental Research 80, 2001 (Special Issue): Clinical Comparison of a Spectrophotometric Shade Matching System with conventional Shade Matching. Informationen: SpectroShade MHT Optic Research AG Zürich – www.mht.ch

Farbempfinden. Bei Farbtemperaturen unter 6.500 Kelvin ausgesandter Strahlung tritt eine Rotverschiebung ein. Deshalb sollte die Abmusterung unter diffusem Nordlicht zur Mittagszeit mit einer Beleuchtungsintensität von 2.000 Lux vorgenommen werden.

Die Komplexität der Vorgänge in der Farbwahrnehmung wächst dadurch, weil nach der Anregung der Photorezeptoren auf der Netzhaut eine Interpretation der Reizsignale im Gehirn stattfindet. So spielt die Erfahrung bei der Farbbestimmung eine Rolle, das Alter des Evaluierenden, Müdigkeit und physiologische Variablen wie Fehlsichtigkeit; sie alle führen zu Ungenauigkeiten. Deshalb



Abb. 6: Neben der Tätigkeit der Photorezeptoren auf der Netzhaut wird die Farbwahrnehmung auch von der Erfahrung bei der Farbbestimmung und vom Alter des Evaluierenden beeinflusst.
Foto: AG Keramik/Dr. Paul

führt die visuelle Farbbestimmung an Zähnen zu sehr subjektiven Bewertungen. Zudem existiert keine zuverlässige, standardisierte Terminologie für die Kommunikation zwischen Zahnarzt und Zahn-techniker zu visuell erfassten Farbmerkmalen.

Farberkennung mit Digitaltechnik

Das Thema „Farbbestimmung für Keramik“ war Gegenstand des Referates von Privatdozent Dr. Stefan J. Paul, DDS (Universität Zürich), der auf dem Keramik-Symposium 2002 der Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V. über die Erfahrungen mit einem digitalen Farbmesscomputer – dem Spektralphotometer (MHT Spectro-Shade) – berichtete. Grundsätzlich ermöglicht die digitale Farbanalyse eine bessere Kontrolle der äußeren Lichtbedingungen; das System

misst mit einer Farbtemperatur von 6.000 Kelvin. Die fotooptische Messung erlaubt die Quantifizierung der Farbe gemäß dem Koordinatensystem der internationalen Beleuchtungskommission CIE (Commission Internationale d'Eclairage), die den Helligkeitswert, die Farbwerte auf der Rot-Grün-Achse und auf der Gelb-Blau-Achse misst und in ein Koordinatennetz stellt. Die Messung von exakten Koordinaten ermöglicht einen objektiven, mathematischen Vergleich zwischen Zahnfarben unter Angabe des Farbabstandes in Delta-E-Einheiten (DE).

Das Spektralphotometer misst die Intensität der für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlängen. Daraus werden die CIE-

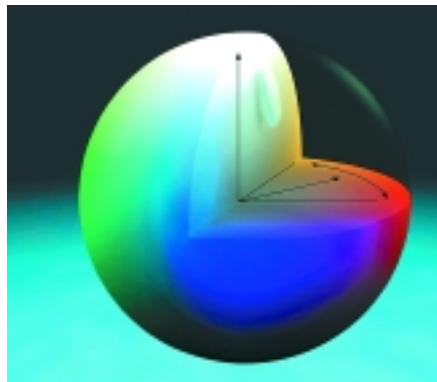


Abb. 7: Der dentale Farbraum als Index der internationalen Beleuchtungskommission CIE. 3 Koordinaten-Achsen lokalisieren insgesamt 208 Dentinfarben.
Foto: AG Keramik/VITA Zahnfabrik

Koordinaten errechnet. Im Gegensatz zum Kolorimeter als Vergleichssystem (ShadeEye NCC) – das mit aufwändigen Farbfiltern bestückte Wellenlängen mit Absorptions-Maxima durchlässt, die die retinellen Zapfen anregen – kommt das Spektralphotometer ohne diese Farbfilter aus. Deshalb kann mit relativ einfachem technischen Aufwand gearbeitet werden, das zu exakten Messergebnissen führt. Aus diesem Grund werden in der optischen Physik primär Spektralphotometer als Referenzgeräte für die Farbmessung eingesetzt. „Farbe A 3,5 und etwas mehr Rot ...“ – eine solche Arbeitsanweisung des Zahnarztes an den Zahn-techniker ist stets eine Herausforderung an das subjektive Farbempfinden aller Beteiligten, aber ständige Praxis im Alltag. Diese Farbinformation wird im Ergebnis eine Streuung aufweisen, weil das menschliche Farbemp-

kontakt:

Manfred Kern
Arbeitsgemeinschaft für Keramik in
der Zahnheilkunde e.V.

Privatdozent Dr. Stefan J. Paul,
DDS
Universität Zürich
E-Mail: kern.ag-keramik@t-online.de

finden naturgemäß variiert. Deshalb war es an der Zeit, der Farbkommunikation zwischen Praxis und Labor zu einem besseren Standard zu verhelfen. Dazu zählt auch die Objektivierung, inwieweit die digitale Farbmessung zu exakteren Ergebnissen im Vergleich zur konventionellen Farbbestimmung mit dem menschlichen Auge führt. Zwei klinische Studien zur Überprüfung der praktischen Anwendbarkeit des Spektralphotometers wurden an der Universität Zürich mit zuverlässigen Ergebnissen abgeschlossen. Die Resultate der ersten Studie bestätigten, dass die Ge-

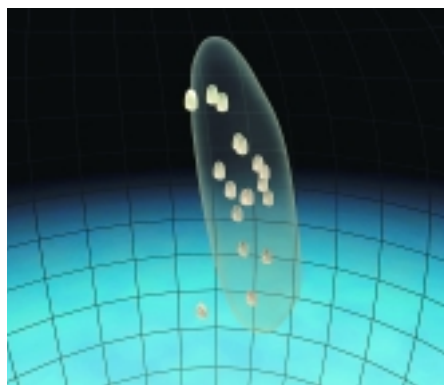


Abb. 8: Das klassische VITA-Farbsystem enthält die wichtigsten Zahnfarben, eingeordnet nach Farbintensität und Farbsättigung. So ist die A 1 eine helle Farbe, die A 4 eine dunkle braun-rötliche Farbe. Die Farbintensität nimmt mit der Helligkeit ab.

Foto: AG Keramik/VITA Zahnfabrik

nauigkeit und Reproduzierbarkeit des Spektralphotometers bei der Bestimmung der Körperfarbe von Zähnen das menschliche Auge signifikant übertraf. In einer zweiten Studie wurden bei 10 Patienten VMK-Restaurationen verglichen, die mit konventioneller Farbbestimmung und unter Einsatz der spektralphotometrischen Farbkommunikation hergestellt worden sind. In neun von zehn Fällen wurde die spektralphotometrisch farbbestimmte Restauration von den Patienten für die definitive Eingliederung ausgewählt.

Das Spektralphotometer

Das System (Typ MHT SpectroShade) ist ein PC mit Modem, um die ermittelten Farbwerte und Videobilder des Zahns ins Labor zu versenden. Das Handstück mit PC-Verbindung und Mundstück für den Patienten enthält eine Lichtquelle mit rotierendem Beugungsgitter zur Spektralmessung und zwei Aufnahmekameras;

eine für die Farbmessung und eine zweite für das Live-Bild. Polarisationsfilter eliminieren Glanzlichter. Eine Messung läuft wie folgt ab: Die Optik des Handstücks wird vor dem zu messenden Zahn im Patientenmund positioniert. Die Live-Kamera zeigt auf dem Monitor die exakte Situation im Mund. Der Bildausschnitt wird fokussiert. Die auszuwertende Zahnregion kann mit dem Mauszeiger bestimmt werden oder der Zahnumriss wird automatisch erfasst. Mit der Messtaste am Handstück wird die Messung gestartet. Die Beleuchtung schaltet von Weißlicht auf Spektral-



Abb. 9: Rechts die Keramikkrone in der Gingivamaske des Mundsimulators bei der Vergleichsmessung gegen den Naturzahn (links). Der Zahntechniker hatte den Patienten nicht gesehen; die Farbmessung am Behandlungsstuhl und die Kontrollmessung an der Krone im Labor ergaben identische Farbwerte. Foto: Dr. Paul/ZTM Pietrobon/AG Keramik

licht um. Alle Wellenlängen des sichtbaren Lichts werden nacheinander auf den Zahn projiziert und von der Messkamera innerhalb 0,7 Sekunden erfasst. Nach 4 Sekunden sind alle Messungen beendet. Von jedem Bildpunkt des gemessenen Zahns liegen nun die Spektraldaten der Wellenlängen von 400 bis 720 nm vor, in Abständen von 20 nm gespeichert. Die Messwerte werden in Farbkoordinaten umgewandelt. Im System sind die Farben aller Industriekeramiken hinterlegt (z.B. VITA Classic, 3D-Master) und werden nun mit den Messdaten des Zahns verglichen. Das Ergebnis ist eine Farbkarte mit der Transparenz des Zahns mit exakten Farbdefinitionen und Abweichungen zum Industriefarbschlüssel. Die zu verwendende Farbmischung der Keramikmassen wird automatisch bestimmt. Die Angabe der Mischungsverhältnisse orientiert sich an gewohnten Farbangaben, z.B. 80 Prozent A 3 mit 20 Prozent C 3. Das Labor über-

Punkt-Messgeräte	Hersteller	Messtechnik	Eichmessung	Quantitative Messung (Darstellung Lab-Werte)	Farbkarte Gesamtzahl	Angabe Totaler Messfehler
ShadeEye-EX	Shofu.com	kolorimetrisch	ja	nein	nein	nein
Pikkio	MHT.com	spektrophotometrisch	ja	ja	nein	nein
Flächen-Messgeräte						
ShadeScan	Cynovad.com	kolorimetrisch	ja	nein	ja	nein
X-Rite	Shaderite.com	kolorimetrisch	ja	nein	ja	nein
SpectroShade	MHT.com	spektrophotometrisch	ja	ja	ja	ja

Übersicht kommerziell erhältlicher Farbmessgeräte (Stand Juni 2002).

nimmt per Modem die Informationen und erhält ein Videobild mit Aussagen zur Zahnform, zur Textur, zum Gingivaverlauf. Die angefertigte Keramik-Restauration kann im Labor mit einem Mundsimulator digital vermessen und die farbliche Übereinstimmung mit den Ausgangsdaten kontrolliert werden. Das Spektralphotometer interpretiert die Zahnfarbe in gleicher Weise wie das menschliche Auge.

Die exakte Erfassung der Farbdaten, die Unempfindlichkeit der Sensoren, der Optik und der Lichtquelle hinsichtlich Alterung gewährleisten eine hohe Reproduzierbarkeit der Messdaten. Die glanzfreie Messung schließt Farbfehler durch Feuchtigkeit aus; es können Kronen vor und nach der Glasierung gemessen werden. Das System arbeitet mit einer Farbtoleranz, die kleiner ist als Delta E 2. Dieser Toleranzwert wird vom Auge nicht als Unterschied erkannt. Das Spektralphotometer ist geeignet zur Farbbestimmung für keramische Kronen und Brücken, zur farblichen Feinabstimmung von Veneers, für die Integration neuer Zähne in bestehende Teilprothesen, für die Dokumentation bei Bleachingbehandlungen, für die Überwachung möglicher Farbveränderungen bei jugendlichen Unfallzähnen, als Kontrollmessung laborgefertigter Arbeiten vor dem Eingliedern. Seitenzähne können noch nicht gemessen werden. Für eine Kosten-Nutzen-Rechnung ist zu bedenken, dass viele Servicebesuche zur Zahnfarbbestimmung in der Praxis entfallen können, ebenso werden weniger Kulanzarbeiten mit Farbumbrennen anfallen. Intraoral-aufnahmen können ebenfalls hergestellt werden. Die fotooptische Farberfassung und digitale Farbkommunikation steht sicherlich noch am Anfang der Entwicklung und kann bis auf weiteres das menschliche

Auge bei der Herstellung laborgefertigter Restaurationen nicht vollständig ersetzen. Die bisher an der Universität Zürich mit der spektralphotometrischen Farberfassung gewonnenen Erfahrungen sind jedoch sehr ermutigend; sie sind ein Meilenstein auf dem Weg zu einer besseren Standardisierung der Farbkommunikation in der Zahnmedizin. Die DGZMK bewertete jüngst (ZM 92, Nr. 16/2002, 1896), dass das digitale Messgerät der visuellen Farbbestimmung mehr Sicherheit gibt. ◀