

Aus der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
der Universität Würzburg
Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Vorstand: *Prof. Dr. med. dent. B. Klaiber*

**Klinische Untersuchung computergestützter Zahnfarbbestimmung
im Vergleich zu visueller Abmusterung durch das menschliche Auge**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät
der
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg

vorgelegt von
Tobias Witzel
aus Würzburg

Würzburg, Juli 2004

Referent: Priv.-Doz. Dr. med. dent. Burkard Hugo
Koreferent: Professor Dr. med. dent. Thomas Holste
Dekan: Professor Dr. med. Stefan Silbernagl

Tag der mündlichen Prüfung: 18. Januar 2005

Der Promovend ist Zahnarzt

Meinen Eltern in Liebe gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Licht und Farbe und ihre Bedeutung in der Zahnmedizin	1
1.2	Grundlagen der Farbwahrnehmung	1
1.2.1	Allgemein.....	1
1.2.2	Lichtquelle: Strahlung, Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex und Intensität.....	2
1.2.3	Farbkörper und ihre spektralen Eigenschaften: Transmission, Streuung, Absorption, Reflexion.....	4
1.2.4	Farbreiz und Farbempfindung.....	5
1.3	Farbmetrik - Versuch einer objektiven Farbbeschreibung	6
1.3.1	Das CIE-Farbsystem - XYZ, Normfarbtafeln und L*a*b*-Werte.....	6
1.3.2	Das Munsell-System - Hue, Value und Chroma.....	9
1.4	Farbbeschreibung in der Zahnheilkunde	11
1.4.1	Farbwerte in Form von Farbringen.....	11
1.4.2	Anforderungen und Grenzen der Farbbeschreibung.....	13
1.5	Farbbestimmung in der Zahnheilkunde	14
1.5.1	Visuelle Farbbestimmung und ihre Grenzen.....	14
1.5.2	Farbbestimmung mit Messgeräten und ihre Anforderungen.....	15
1.6	Messverfahren von Farbmessgeräten	16
1.6.1	Spektralmessverfahren nach DIN 5033, Teil 4.....	16
1.6.2	Dreibereichsmessverfahren nach DIN 5033, Teil 6.....	17
1.6.3	Gleichheitsmessverfahren nach DIN 5033, Teil 5.....	18
1.7	Dental-Farbmessgeräteangebot auf dem Markt	18
1.8	Problemstellung	19
2	Material und Methoden	21
2.1	Die drei untersuchten Messgeräte	21
2.1.1	Das SpectroShade™-System der Fa. MHT - Hard- und Software.....	21
2.1.2	Das ShadeVision™-System der Fa. X-Rite - Hard- und Software.....	24
2.1.3	Das Digital Shade Guide DSG4® der Fa. Rieth - Hard- und Software.....	26

2.2	Klinische Untersuchung am Probanden	30
2.2.1	Die Probanden.....	30
2.2.2	Vorversuche.....	31
2.2.3	Visuelle Abmusterung durch drei Untersucher.....	31
2.2.3.1	<i>Vorbereitung und Umgebungsbedingungen</i>	31
2.2.3.2	<i>Ablauf der visuellen Zahnfarbbestimmung</i>	32
2.2.4	Gerätemessung.....	32
2.2.4.1	<i>Vorbereitung</i>	32
2.2.4.2	<i>Vorgehen bei den Zahnfarbmessungen</i>	33
2.3	Auswertung und Statistik	34
3	Ergebnisse der Auswertung der Zahnfarbdaten	37
3.1	Farbverteilung innerhalb der verschiedenen Methoden	37
3.1.1	Farbverteilung innerhalb der Methoden.....	38
3.1.1.1	<i>Farbverteilung des MHT SpectroShade™</i>	38
3.1.1.2	<i>Farbverteilung des X-Rite ShadeVision™</i>	39
3.1.1.3	<i>Farbverteilung des Rieth DSG4®</i>	39
3.1.1.4	<i>Farbverteilung bei Untersucher „Student“</i>	40
3.1.1.5	<i>Farbverteilung bei Untersucher „Zahntechniker 1“</i>	41
3.1.1.6	<i>Farbverteilung bei Untersucher „Zahntechniker 2“</i>	42
3.1.2	Vergleich der Farbverteilung zwischen den Methoden.....	43
3.2	Reproduzierbarkeit bei Doppelmessungen	44
3.2.1	Reproduzierbarkeit innerhalb der Methoden.....	44
3.2.1.1	<i>Reproduzierbarkeit von Messungen des SpectroShade™</i>	44
3.2.1.2	<i>Reproduzierbarkeit von Messungen des ShadeVision™</i>	45
3.2.1.3	<i>Reproduzierbarkeit von Messungen des DSG4®</i>	45
3.2.1.4	<i>Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Studenten</i>	46
3.2.1.5	<i>Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Zahntechnikers 1</i>	46
3.2.1.6	<i>Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Zahntechnikers 2</i>	46
3.2.2	Vergleich der Reproduzierbarkeit zwischen den Methoden.....	47

3.3	Übereinstimmung der Methoden untereinander	48
3.3.1	Übereinstimmung einer Methode mit den übrigen	49
3.3.1.1	<i>Übereinstimmungen des MHT SpectroShade™</i>	49
3.3.1.2	<i>Übereinstimmungen des X-Rite ShadeVision™</i>	49
3.3.1.3	<i>Übereinstimmungen des Rieth DSG 4</i>	50
3.3.1.4	<i>Übereinstimmungen Student</i>	50
3.3.1.5	<i>Übereinstimmungen Zahntechniker 1</i>	50
3.3.1.6	<i>Übereinstimmungen Zahntechniker 2</i>	50
3.3.2	Übereinstimmungen der verschiedenen Gruppen	52
3.3.2.1	<i>Übereinstimmungen der sechs Methoden mit der Mehrheitsmeinung</i>	52
3.3.2.2	<i>Übereinstimmungen der Geräte mit der Gruppe der Menschen</i>	53
4	Diskussion	55
4.1	Methodenkritik	55
4.2	Diskussion der Ergebnisse	56
4.2.1	Diskussion Farbverteilung	56
4.2.2	Diskussion Reproduzierbarkeit	59
4.2.3	Diskussion Übereinstimmungen der Methoden	61
4.2.3.1	<i>Übereinstimmungen der Methoden mit den übrigen Methoden und der Mehrheitsmeinung</i>	61
4.2.3.2	<i>Übereinstimmungen der Geräte mit der Gruppe der Menschen</i>	63
4.2.3.3	<i>Subjektive Bewertung der Farbkarten von SpectroShade™ und ShadeVision™</i>	64
4.2.4	Schlussfolgerungen	65
5	Zusammenfassung	67
6	Literaturverzeichnis	71
7	Anhang	78

1 Einleitung

1.1 Licht und Farbe und ihre Bedeutung in der Zahnmedizin

„Ästhetik“ ist ein heutzutage oft verwendeter Begriff in der Zahnheilkunde, der auf eine lange philosophische Tradition zurückblicken kann. Der Stellenwert, den die Ästhetik im Berufsalltag des Zahnarztes einnimmt, wächst stetig mit der Verbesserung der Restaurationsmaterialien und den Ansprüchen der Patienten (SHEETS 1987, RAMFJORD 1989, SIM et al. 2001). Daher liegt es im beiderseitigen Interesse, sich mit diesem Thema bzw. einem seiner Teilaspekte - der Zahnfarbe - wissenschaftlich auseinanderzusetzen.

1950 erkannte SCHWAB, dass die ästhetische Wirkung eines Zahnes bzw. seiner Restauration von drei Parametern bestimmt wird: Zum einen von der Zahnform (einschließlich Größe und Stellung), von der Oberflächenstruktur (Textur) und nicht zuletzt von der Zahnfarbe und Transluzenz.

Sind Form und Textur eines Zahnes noch objektiv mit relativ einfachen Mitteln (Worten, Skizzen etc.) beschreibbar, so ist der Sinneseindruck „Farbe“ mit bloßem Auge nur subjektiv, nicht jedoch objektiv oder gar metrisch erfassbar (JEFFRY et al. 1986) und wird daher von jedem Individuum unterschiedlich wahrgenommen und empfunden (CULPEPPER 1970, WYSZECKI und STYLES 1982). Es verwundert daher nicht, dass JOEL und LEON (1982) vielen Zahnärzten und Zahntechnikern noch heute aus der Seele sprechen, wenn sie feststellen: „Matching the color of the natural dentition (...) has been an art rather than a science.“

1.2 Grundlagen der Farbwahrnehmung

1.2.1 Allgemein

Die Subjektivität des Farbensehens wird verständlicher, betrachtet man die Grundlagen der menschlichen Farbwahrnehmung:

BILLMEYER und SALTZMAN (1981) definieren Farbe als „Resultat physikalischer Modifikation von Licht durch Farbmittel, das vom menschlichen Auge empfangen

und durch das Gehirn interpretiert wird“ (Übersetzung). Beim Sehen laufen also verschiedenartigste Vorgänge sowohl physikalischer (Licht und Reflexion), physiologischer (Auge) und psychologischer Art (Gehirn) ab. Jeder einzelne dieser Prozesse implementiert variable Faktoren, die ein einheitliches, objektives Farbensehen nicht zulassen (SPROULL, 1973).

Farbe als solche ist keine Eigenschaft des Gegenstandes allein. Vielmehr findet eine Wechselwirkung von Licht und Gegenstand statt. Aus einer Lichtquelle wird Strahlung verschiedener Wellenlängen emittiert (polychromatisches Licht), die vom Farbkörper je nach Wellenlänge teilweise absorbiert, teilweise reflektiert wird. Der reflektierte Anteil gelangt in das menschliche Auge, wo er auf die Rezeptoren der Netzhaut trifft, die den Reiz in Form elektrischer Potentiale an unser Gehirn weiterleiten und dort den Sinneseindruck „Farbe“ hervorrufen (SCHMITT und THEWS 1997). In den folgenden Abschnitten soll nun näher auf die oben erwähnten Mechanismen und Vorgänge beim Entstehen des Farbeindrucks eingegangen werden.

1.2.2 Lichtquelle: Strahlung, Farbtemperatur, Farbwiedergabeindex und Intensität

Der Engländer ISAAC NEWTON stellte 1666 erstmals fest, dass Licht aus der Kombination verschiedener Wellenlängen zusammengesetzt ist und durch ein Prisma in seine spektralen Bestandteile zerlegt werden kann. Die sichtbare Strahlung (umgangssprachlich „Licht“) ist ein Teilbereich der optischen Strahlung aus dem gesamten elektromagnetischen Wellenlängenbereich, der zwischen 380 nm bis 780 nm normmäßig festgelegt wurde. Strahlung mit kurzen Wellenlängen wird als blau empfunden; wird die Wellenlänge größer, ändert sich die Empfindung kontinuierlich von grün über gelb zu orange und schließlich rot (BERGER-SCHUNN 1994). Die Strahlung natürlicher Quellen (Sonne, glühende Körper) enthält alle Wellenlängen des sichtbaren Spektrums. Dies gilt auch für die meisten künstlichen Lichtquellen wie Glühbirnen oder Leuchtstofflampen. Allerdings ist die Menge/Intensität der Strahlung (Strahlungsleistung) bei den verschiedenen

Lichtquellen bei jeder einzelnen von ihnen abgegebenen Wellenlänge unterschiedlich. Man spricht von der „relativen spektralen Strahlungsverteilung“ einer Quelle. Eine Glühbirne beispielsweise emittiert vor allem Wellenlängen des gelb-roten Spektrums, Leuchtstoffröhren betonen den blauen Anteil und Tageslicht ändert seine Strahlungsverteilung den atmosphärischen Bedingungen entsprechend (ROSENSTIEL et al. 1995). Bei klarem Nord-Himmel am Mittag ist der blaue Anteil deutlich erhöht; bei Sonnenauf- und Untergang steigt der gelb-rote Anteil. An einem bewölkten Tag hingegen wird das Licht als neutral wahrgenommen (SALESKI 1972). Dies zeigt, dass die Lichtquelle und deren spektrale Eigenschaften auf das Farbensehen einen wesentlichen Einfluss ausüben (BÄURLE 1982).

Lichtquellen können weiterhin nicht nur durch ihre spezifische spektrale Strahlungsverteilung charakterisiert werden; ebenfalls kann dies mit dem Begriff der Farbtemperatur geschehen. Die Farbtemperatur kennzeichnet die Farbart einer Lichtquelle. Sie wird auf der Kelvin-Temperaturskala gemessen (Symbol: K). Als Bezugsleuchtkörper wurde der Plancksche (schwarze) Strahler gewählt. Hierbei handelt es sich um einen glühenden Körper, der bei bestimmten Temperaturen definierte Wellenlängen und somit eine definierte „Farbe“ abstrahlt, die zur Definition der Farbe anderer Lichtquellen herangezogen wird (VOGEL 1997). Wenn also eine Lichtquelle eine Farbtemperatur von 5000 K besitzt, entspräche dies dem weißen Farbeindruck, der bei einem Planckschen Strahler bei dieser Temperatur zu beobachten ist. Über die relative spektrale Strahlungsverteilung sagt die Farbtemperatur allerdings nichts aus. Folglich können zwei Lichtquellen mit gleicher Farbtemperatur durchaus verschiedene spektrale Strahlungsverteilungskurven besitzen und so auch unterschiedliche Farbeindrücke hervorrufen.

Ein dritter Parameter, eine Lichtquelle, vor allem in Hinblick auf deren Tauglichkeit zur Farbbestimmung zu charakterisieren, ist der Farbwiedergabedex (color rendition index CRI). Eine Skala von 0 bis 100 zeigt die Farbwiedergabegüte einer Quelle im Vergleich zu einer Bezugslichtquelle (Wärmestrahler, Tageslicht) (BERGER-SCHUNN 1994). Die American Dental Association empfiehlt einen Wert > 90 zur Zahnfarbbestimmung (MILLER 1993).

Die Intensität einer Lichtquelle, umgangssprachlich „Helligkeit“, wird in den Einheiten foot candles oder Lux angegeben (Symbole: fc oder Lx). Entgegen der relativen spektralen Strahlungsverteilung einer Lichtquelle ist die Intensität des zum Auge reflektierten Lichtbündels zumindest für den Farbvergleich von Gegenständen - beispielsweise von Zähnen - zweitrangig, solange sie sich in bestimmten Grenzen (75-300 fc \approx 800-3200 Lx) bewegt, wie BARNA et al. (1981) zeigten.

1.2.3 Farbkörper und ihre spektralen Eigenschaften: Transmission, Streuung, Absorption, Reflexion

Trifft Licht auf einen Körper, kann jede einzelne Wellenlänge des Lichtbündels transmittiert, gestreut, absorbiert und reflektiert werden. Das Verhältnis dieser Lichtmodifikationseigenschaften eines Objekts bestimmt dessen Erscheinungsbild einschließlich der Farbe. Es lassen sich generell unabhängig von der Farbigkeit drei Gruppen von Körpern unterscheiden: transparente, transluzente und opake Körper.

Transparente, durchsichtige Körper erlauben das Durchdringen (Transmission) von Licht. Sie absorbieren nur eine geringe Menge des einfallenden Lichts, fangen es also ein und wandeln die Lichtenergie der Wellen in Wärme um.

Wird zusätzlich ein Teil der einfallenden Strahlung diffus abgelenkt, so spricht man von transluzenten Gegenständen.

Undurchsichtige, opake Proben absorbieren und reflektieren das auftreffende Licht. Transmission und Streuung finden hier nicht statt.

Die Übergänge zwischen den drei Gruppen sind fließend (BERGER-SCHUNN 1994).

Oberflächenmerkmale wie Glanz, Struktur und Krümmung eines Körpers beeinflussen ebenfalls dessen spektrale Eigenschaften und sind somit für seine Erscheinung mit verantwortlich (LEMIRE und BURK 1979).

1.2.4 Farbreiz und Farbempfindung

Das menschliche Auge als eines der fünf Sinnesorgane des Menschen nimmt das direkt vom Farbkörper kommende und von ihm beispielweise durch Absorption veränderte Strahlungsspektrum auf. Die Intensität des Cornea und Linse passierenden, auf die Retina fallenden Lichts wird durch die Pupillenreaktion gesteuert (Adaptation). Je nach Zusammensetzung dieses aus verschiedenen Wellenlängen bestehenden Lichtbündels werden die auf der Netzhaut befindlichen Sinneszellen, die Zapfen (photopisches Sehen) und Stäbchen (skotopisches Sehen), erregt. Young, Maxwell und Helmholtz gehen in ihrer trichromatischen Theorie des Farbsehens davon aus, dass verschiedene Rezeptoren (Zapfentypen) für drei Farbsysteme (Primärfarben rot 700 nm, grün 546 nm, blau 435 nm) im menschlichen Auge vorhanden sind und durch deren unterschiedliche Aktivierung und anschließende Verrechnung der Erregung (Valenz) jeder beliebige Farbeindruck hervorgerufen werden kann.

Eine weitere Theorie, die sog. Gegenfarbentheorie, entwarfen Mach und Hering. So existieren speziell auf die vier Urfarben (rot/grün, gelb/blau) und schwarz/weiß abgestimmte Neurone, die durch antagonistische Erregungs- und Hemmprozesse entsprechende Valenzen an das Sehzentrum im Gehirn weiterleiten und die Farbempfindung hervorrufen.

Die heute in Fachkreisen am meisten favorisierte Farbtheorie ist Johannes von Kries' Zonentheorie. Sie stellt die Synthese beider vorhergehenden Theorien dar, die lange Zeit als unvereinbar galten. J. v. Kries betrachtet die trichromatische Theorie als gültig für alle Prozesse, die auf der Photorezeptorebene ablaufen und wendet die Gegenfarbentheorie für die anschließenden neuronalen Verarbeitungsprozesse im afferenten und zentralen visuellen System an.

Betrachtet man nun die Qualität der Trias Farbreiz, Valenz und Farbempfindung, lassen sich folgende Feststellungen treffen: Es ist möglich, dass durch verschiedenartige auf die Retina treffende Reize eine identische Valenz und somit ein identischer Farbeindruck entsteht. Dennoch lösen gleiche Valenzen nicht zwangsläufig immer

gleiche Farbwahrnehmungen im Gehirn aus, was am Beispiel des Simultankontrastes (s. Abb. 1) deutlich wird (SCHMIDT und THEWS 1997, SCHMIDT 1999).

Beim Sehvorgang handelt es sich also um ein Geschehen, welches stark von der Physiologie des einzelnen Individuums und der Verarbeitung durch das Gehirn bestimmt wird.

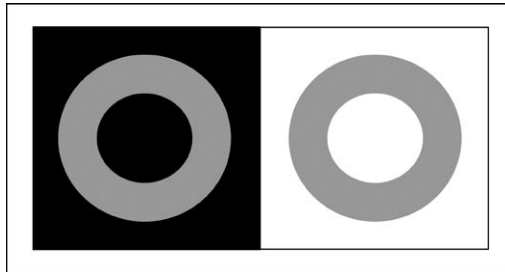


Abb. 1. Simultankontrast. Die Kreise besitzen denselben Farbton, erwecken aber unterschiedliche Eindrücke.

1.3 Farbmeterik - Versuch einer objektiven Farbbeschreibung

1.3.1 Das CIE-Farbsystem - XYZ, Normfarbtafeln und $L^*a^*b^*$ -Werte

Das menschliche Auge kann zwar kleine Farbdifferenzen sehr genau unterscheiden, jedoch niemals numerische Werte für Farbdifferenzen angeben (LEMIRE und BURK 1979). 1931 veröffentlichte die CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) ein System, das es ermöglichen sollte, die variablen psychophysiologischen Vorgänge des Sehens mit Hilfe eines fiktiven Betrachters mit durchschnittlichem Sehvermögen (nach CIE-Nomenklatur: farbmess-technischer Normalbeobachter) zu vereinheitlichen und farbmeterisch berechenbar zu machen. Im CIE-System gibt es einen Normalbeobachter mit 2° Visus (Gesichtsfeldgröße) und einen mit 10° Visus. Für die Abmusterung kleiner Proben wird der 2° Beobachter herangezogen, bei dem der Farbgegenstand innerhalb der Fovea centralis, dem Ort des schärfsten Sehens auf der Netzhaut abgebildet wird. Auch die Art der Lichtquellen wurde standardisiert, indem man Standardlichtquellen/Normlichtarten festlegte, wie beispielsweise die Normlichtarten A (2856 K), C (6800 K), D_{55} (Tageslicht 5500 K) oder D_{65} (Tages-

licht 6500 K) (DIN 5033 TEIL 2). Das CIE-, auch XYZ-System genannt, ist weltweit anerkannt. Sein Grundkonzept besteht darin, dass alle Farbeindrücke einem bestimmten Mischungsverhältnis der drei Primärfarben rot (X), grün (Y) und blau (Z) entsprechen (vgl. Trichromatische Theorie, Kap. 1.2.4). Diese XYZ-Daten, die sogenannten Tristimuluswerte, Normfarbmaßzahlen oder RGB-Spektralwerte, sind messtechnisch bestimmbar, können in die chromatischen Koordinaten x , y und Y konvertiert werden und sich so im dreidimensionalen Farbenraum (RÖSCH 1929) darstellen lassen. Wegen der einfacheren Darstellbarkeit greift die CIE allerdings auf ein zweidimensionales, rechtwinkliges Koordinatensystem (x , y) zurück, das „Normfarbtafel“ (s. Abb. 2) genannt wird.

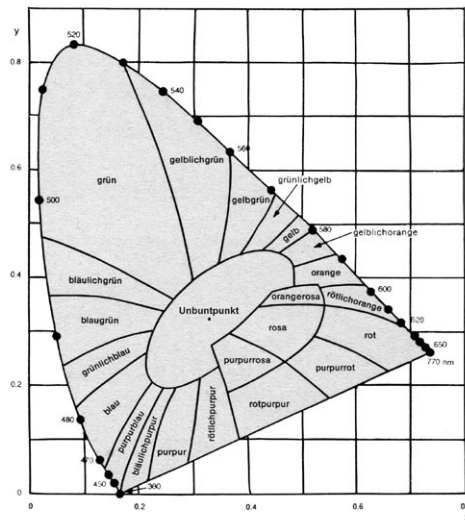


Abb. 2. Normfarbtafel nach CIE 5033

Der Betrag der dritten Dimension (Y) wird neben dem Koordinatenpunkt als Zahlenwert notiert. Ein Punkt auf der Normfarbtafel heißt Farbart und repräsentiert eine bestimmte Spektralfarbe eines bestimmten Sättigungsgrades. Die Helligkeit kommt durch den Y -Wert zum Ausdruck. Das Farbfeld auf der Normfarbtafel enthält an seinem Rand den Spektralfarbenzug, der die reinen Spektralfarben der Wellenlängen von 380-770 nm widerspiegelt. Von der jeweiligen Spektralfarbe zum Unbuntpunkt in der Mitte des Farbfeldes hin nimmt die Sättigung der jeweiligen Farbe ab.

Die subjektiven Sehgewohnheiten werden bei der Umwandlung von XYZ in xyY nicht berücksichtigt und nicht proportional dem Empfindungsabstand in der Normfarbtafel dargestellt. Um den Abstand zweier Farben der Empfindung des Betrachters gemäß - zumindest näherungsweise - geometrisch ausdrücken zu können, wurde 1976 das CIELAB-System von der CIE empfohlen und in DIN 6174 (1979) und DIN 5033 TEIL 3 (1992) übernommen.

Hier werden die Normfarbmaßzahlen X, Y und Z mathematisch in die Werte L^* , a^* und b^* konvertiert°. Bei der grafischen Darstellung benutzt man wiederum ein rechtwinkliges, räumliches Koordinatensystem, wobei die a^* - und b^* -Koordinaten eine Ebene bilden und a^* für die Rot-Grün-Buntheit, b^* für die Gelb-Blau-Buntheit stehen. Der Achsenschnittpunkt stellt den Unbunnton dar. Die Helligkeitsachse L^* steht senkrecht darauf. Geht man radial weiter nach außen, nimmt die Sättigung zu (s. Abb. 3, übernächste Seite). Die $L^*a^*b^*$ -Werte verhalten sich folgendermaßen, wie Tab. 1 zeigt (BERGER-SCHUNN 1994, LOOS 1989):

Tab. 1. Empfindungsgemäße Änderung der CIELAB-Werte.

	positiver	negativer
ΔL^*	heller	dunkler
Δa^*	roter	grüner
Δb^*	gelber	blauer

Will man nun den Unterschied zwischen zwei Farben (korrekte Bezeichnung nach CIE: Farbarten) quantifizieren, bedient man sich des geometrischen Abstandes zwischen den Punkten im CIELAB-System, der durch einen Vektor ΔE_{ab}^* (im Folgenden nur noch ΔE genannt) charakterisiert wird. Die Berechnung ΔE_{ab}^* erfolgt nach folgender Formel (RUSSELL et al. 2000):

Formel 1:
$$\Delta E_{ab}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

Als gerade noch tolerierbarer Farbunterschied im LAB Farbraum wurde bei der Entwicklung der XYZ/ $L^*a^*b^*$ -Umrechnungsformel der ΔE -Wert 1 definiert.

° Das *-Symbol soll die CIELAB-Werte von anderen Farbensystemen wie dem Hunter-LAB System unterscheidbar machen.

Allerdings stellte sich in der Praxis heraus, dass ein visueller Empfindungsunterschied durchaus auch, v.a. beim Zahnfarbvergleich am Patienten, erst bei größeren Werten auftreten kann (KUEHNI und MARCUS 1979, RUYTER et al. 1987, JOHNSTON und KAO 1989, SEGHI et al. 1989, SETZ et al. 1992, GOLDSTEIN und SCHMITT 1993).

1.3.2 Das Munsell-System - Hue, Value und Chroma

Neben dem CIELAB-System ist das Munsell-Farbsystem vermutlich das vor allem in den USA zur Zeit am weitesten verbreitete. Die große Akzeptanz des von Albert Munsell Ende der 20er Jahre des vergangenen Jahrhunderts aufgebauten Systems lässt sich durch seine Ergänzbarkeit, Einfachheit und Ordnung erklären (LEMIRE und BURK 1979). Es definiert die drei Attribute der Farbe als Farbton/Bunton (Hue H), Helligkeit (Value V) und Sättigung (Chroma C).

Jede der 10 Basis-Farbtonfamilien (als Großbuchstabe/Buchstabenkombination, s. Tab. 2) kann bei Bedarf auf Dezimalbasis in 100 oder 1000 verschiedene Farbtöne unterteilt werden.

Der Helligkeitswert Value zeigt die Helligkeit/Dunkelheit einer Farbe auf einer Skala von 0 für absolutes Schwarz bis 10 für absolutes Weiß. Die dritte Dimension im Munsell-System ist die Farbsättigung oder Buntheit (Chroma). Mit dem Munsell-Farbatlas („Munsell Book of Colors“) wird 1929 erstmals eine Sammlung von Farbproben zur Verfügung gestellt, die untereinander visuell gleichabständig sind.

Tab. 2. Abkürzungen für den Bunton (Hue).

R	Red (Rot)	BG	Blue Green (Blaugrün)
YR	Yellow Red (Gelbrot)	B	Blue (Blau)
Y	Yellow (Gelb)	PB	Purple Blue (Purpurblau)
GY	Green Yellow (Grüngelb)	P	Purple (Purpur)
G	Green (Grün)	RP	Red Purple (Purpurrot)

Die Anordnung der Farbproben im Raum erfolgt ähnlich der des CIELAB-Systems (SEGHI et al. 1986). Auf der horizontalen Ebene besitzen die vom Mittelpunkt, dem Unbunton, ausgehenden Radien den gleichen Bunton (Hue). Die Kreisbahnen

um den Unbunton verfügen über das gleiche Chroma. Die Helligkeitsachse steht senkrecht auf dem Unbunton (s. Abb. 4). Die Farbbezeichnung 7,5 YR 5/10 (Schema: H V/C) würde man als gelben, leicht ins rötliche reichenden Farbton (7,5 YR) mittlerer Helligkeit (5) und hoher Sättigung (10) ausdrücken. Da die drei Farbdimensionen Hue, Value und Chroma sehr anschaulich sind, werden sie gerne in der Farbkommunikation, beispielsweise zwischen Zahnarzt und Zahntechniker, genutzt. Es ist möglich, CIELAB-Werte in Munsell-Werte umzurechnen und umgekehrt.

Es existieren neben CIELAB und Munsell noch weitere Farbkennzeichnungssysteme, wie das CIELUV-System, das Hunter-LAB System, das DIN 6164-Farbsystem, das Natural Colour System (NCS) etc., auf die aber an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden soll.

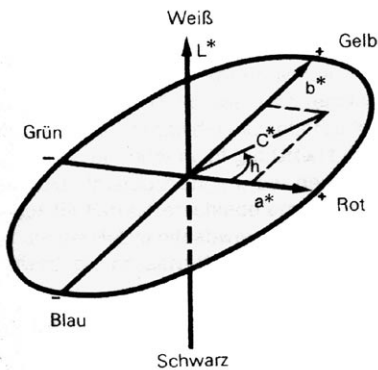


Abb. 3. Das $L^*a^*b^*$ -System.

L^* =Lightness/Helligkeit, a^* =rot/grün-Anteil, b^* =gelb/blau-Anteil, C^* =Chroma/Sättigung, h =Hue/Bunton. Auf der senkrechten Achse liegen die Unbuntöne.

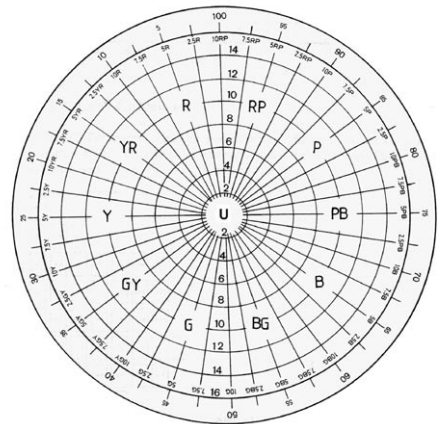


Abb. 4. Der Munsell-Bunton-Kreis.

Die Radien besitzen ähnlich dem $L^*a^*b^*$ -System den gleichen Bunton (Hue), die Kreise die gleiche Sättigung (Chroma), U=Unbunton.

1.4 Farbbeschreibung in der Zahnheilkunde

1.4.1 Farbwerte in Form von Farbringen

Den Fähigkeiten des menschlichen Sehens, der in der Lage ist bereits kleine Farbtonunterschiede im direkten Mustervergleich wahrzunehmen, aber nicht einen Farbton in Zahlenwerten zu beschreiben oder aus dem Gedächtnis exakt zu reproduzieren, trug CLARK 1931 Rechnung, indem er die Farblehre auf die Zahnmedizin anwandte. Er analysierte erstmals den Raum, den Zähne im gesamten Farbenraum einnehmen und entwickelte einen Keramik-Farbring zur Zahnfarbbestimmung. Die in Farbringen repräsentierten Farben dienen den Herstellern von Restaurationsmaterialien oder dem Zahntechniker als Referenz. Heute ist eine Vielzahl von sog. „Shadeguides“ auf dem Markt (vgl. Tab. 3):

Tab. 3. Auswahl an kommerziell erhältlichen Farbringen.

Eigenständige Farbringe	Hersteller	Musterzahl
Chromascop®	Ivoclar Vivadent GmbH, Ellwangen, Deutschland	20
Classical® Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	8
Solarex® Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	6
Trubyte® Bioblend® Blend Selector	Dentsply, Konstanz, Deutschland	36
Trubyte® Bioform® Plastic/Porcelain Shade Guides	Dentsply, Konstanz, Deutschland	24
Trubyte® Biotone® Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	10
Trubyte® Portrait® IPN® Plastic Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	24
Trubyte® New Hue® Plastic Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	6
Trubyte® Trublend® SLM® Plastic Shade Guide	Dentsply, Konstanz, Deutschland	24
Vitapan® Classical (früher Lumin Vacuum)	Vita Zahnfabrik, H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland	16
Vita 3D-Master®	Vita Zahnfabrik, H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland	26
Farbringe Vitapan-Classical-basiert	Hersteller	Musterzahl
Candulor TCR (für Keramik)	Candulor AG, Wangen, Schweiz	20
Durafill® VS (für Komposit)	Kulzer, Friedrichsdorf, Deutschland	23
Dyract® (für Komposit)	Dentsply, Konstanz, Deutschland	9
Esthet-X TruMatch™ (für Komposit)	Dentsply, Konstanz, Deutschland	23
Fuji II LC® (für GIZ)	GC America Inc., Alsip, USA	11
Noritake Tooth Guide (für Keramik)	Noritake Dental Supply Co., Higashiyama, Japan	20
TPH® Spectrum® Shade Guide (für Komposit)	LD Caulk/Dentsply, Milford, USA	19
Vintage Halo (+ Vintage Halo High Value)	Shofu Dental Inc., San Marcos, USA	24+14
Z100™ shade guide (für Komposit)	3M™ Espe™ Dental Products, St. Paul, USA	15

Die verschiedenen Farbringe bestehen aus einer individuell variierenden Anzahl von Farbmusterzähnen aus meist keramischen Materialien, die unterschiedlich geschichtet sind und zu einer inhomogenen Farbverteilung innerhalb eines Musterzahnes führen. Die Muster sind den mittleren Schneidezähnen des Oberkiefers nachempfunden (JORGENSEN und GOODKIND 1979). Jeder der Musterzähne besitzt einen Buchstaben, eine Zahl oder eine Kombination aus beiden, um den Farbton zu identifizieren. Direkte farbmetrische Angaben (z.B. Hue, Value, Chroma) finden sich nicht auf den Mustern. Ein idealer Farbring sollte daher nach einer logischen Ordnung bezüglich der Lage im Farbenraum arrangiert sein (CLARK 1933, WOZNIAK 1987) und der Farbwahrnehmungsphysiologie entgegenkommen (PARAVINA et al. 2001). Dies ist aufgrund der Dreidimensionalität der Farbensysteme erschwert. Die Anordnung der Musterzähne kann laut O'BRIEN et al. (1989) auf zwei verschiedene Arten geschehen:

a) Durch die Bildung einer großen Gruppe (wide-range order), bei der im Regelfall die Helligkeit (Value) das oberste - aber nur eindimensionale - Ordnungskriterium darstellt. Das Auge ist für Helligkeitsunterschiede sensibler als für Sättigungs- oder gar Farbtondifferenzen, die am wenigsten wahrgenommen werden (MILLER 1993, PARAVINA et al. 2001). Ebenfalls ist nach PARAVINA et al. (2001) eine Farbringordnung nach relativen Farbunterschieden (ΔE -Werten) denkbar.

b) Die zweite Ordnungsmöglichkeit ist die „short-range order“, die Anordnung in kleinen Untergruppen nach dem Farbton (Hue) und innerhalb der Gruppen nach Sättigung (Chroma). Die Helligkeit (Value) als dritter deskriptiver Faktor wird bei der Ordnung nicht explizit berücksichtigt. Sie nimmt mit zunehmendem Chroma meist ab, so dass die hellsten Muster zugleich die am wenigsten gesättigten sind. Dieses zweidimensionale Ordnungsprinzip ist für eine schnelle Farbtonbestimmung von Vorteil und aus diesem Grunde bei der überwiegenden Anzahl von Farbringen anzutreffen; so beispielsweise auch beim Vitapan Classical Farbring, dem de facto-Standard in der klinischen Zahnheilkunde (YAP et al. 1998, JAHANGIRI et al. 2002). Mit dem erst im Jahr 1998 vorgestellten Vitapan 3D Master Farbbebestimmungssystem wird die „short-range order“ um die bisher fehlende dritte Dimension, wie sie CLARK

schon vor mehr als 70 Jahren forderte, erweitert. Innerhalb der nach Helligkeit geordneten fünf Gruppen, finden sich in der Vertikalen die Sättigungsvarianten, in der Horizontalen die Farbtonvarianten der jeweiligen Helligkeitsstufe.

1.4.2 Anforderungen und Grenzen der Farbbeschreibung

Zur Beschaffenheit von Farbringen wurden schon viele Untersuchungen getätigt und entsprechende Mängel offengelegt:

- Anders als gefordert, herrscht oft ein unsystematisches Arrangement der Farbmusterzähne (VAN DER BURGT et al. 1990, OKUBO et al. 1998, HASEGAWA et al. 2000).
- Der Zahnfarbenraum wird nur mangelhaft abgedeckt; es existieren Fehlstellen und Häufungen (SPROULL 1973, GOODKIND und SCHWABACHER 1987, MILLER 1987, SCHWABACHER und GOODKIND 1990, DONAHUE et al. 1991, OKUBO et al. 1998).
- Es bestehen oftmals sogar sichtbare Fertigungstoleranzen beim Hersteller durch manuelle Produktion und Schwankungen in den Chargen (SCHWABACHER und GOODKIND 1990, SETZ et al. 1992, MILLER 1993, KOHLMAYER und SCHELLER 2002).
- Unterschiedliche Materialien von Farbring und Restauration erschweren den Farbvergleich (LEON 1982, PARAVINA et al. 2002).
- Mangelhafte Farbübereinstimmung der Farbmuster mit Restaurationsmaterialien sorgt für Probleme (SWIFT et al. 1994, YAP et al. 1995, PARAVINA et al. 2002).
- Die vestibulo-orale Dicke der Muster entspricht nicht der Restaurationsmaterialstärke und erweckt bei der Farbwahl einen anderen optischen Eindruck (LEON 1982, MILLER 1993, SWIFT et al. 1994).

Generell wird für Farbringe gefordert, dass die Musterzähne möglichst Reflexionskurven gleich denen natürlicher Zähnen haben sollten (PARAVINA et al. 2002), weiterhin dass eine Langzeitfarbstabilität gewährleistet ist (JORGENSEN und

GOODKIND 1979) und die Farbringe widerstandsfähig gegen Desinfektionsmittel sind (PARAVINA et al. 2002).

Aber wie SPROULL in seiner Publikation von 1973 feststellt, würden selbst perfekte Farbringe die Probleme bei der Farbbestimmung nicht lösen, denn viele weitere Faktoren beeinflussen die Farbwahl, wie im Folgenden dargelegt wird.

1.5 Farbbestimmung in der Zahnheilkunde

1.5.1 Visuelle Farbbestimmung und ihre Grenzen

Die visuelle Bestimmung der Farbe einer Zahnrestauration durch den Zahnarzt, die Helferin oder den Zahntechniker ist heutzutage die gebräuchlichste Methode in der klinische Zahnheilkunde, wenn sie auch, wie CULPEPPER (1970) belegte, oft unzuverlässig und ungenau ist. Die Ursachen dafür liegen in der Trias Licht - Objekt - Beobachter begründet:

Die Lichtquelle sollte ein tageslichtähnliches Spektrum mit angemessener, gleichbleibender Intensität blendfrei abstrahlen (SALESKI 1972). Eine farbneutrale Umgebung (Raum und Kleidung neutral, kein Makeup am Patienten) vermeidet verfälschende Fremdeinflüsse (YAP et al. 1999, SIM et al. 2001).

Der Farbkörper, der Zahn, ist aus opakem Dentin und dem unterschiedlich starken, transluzenten Schmelzmantel aufgebaut, was zu variierenden Farbtönen innerhalb der Zahnoberfläche (CLARK 1933, O'BRIEN et al. 1997) und einer unterschiedlichen Tiefenwirkung führt (VAN DER BURGT et al. 1990). Erschwerend für den visuellen Vergleich mit dem Farbringmuster wirken die geringe Größe des Zahnes (KOBES 1982), partielle Verfärbungen, variierende Oberflächentextur (Perikymatien, Schmelzeinziehungen), Glanz, Speichelbenetzung und Wölbung (ROBERT und SPROULL 1973, LEMIRE und BURK 1979, OKUBO et al. 1998, Mc CULLOCK 1999). Auch der unterschiedliche Betrachtungswinkel, bedingt durch die abweichenden Positionen von natürlichem Zahn und angehaltenem Farbringmuster führen oft zu Unsicherheiten bei der Farbwahl (EXPOSITE 1977).

Physiologisch betrachtet ist jeder Beobachter ein Unikum und somit ein weiterer Unsicherheitsfaktor. So ist die Verteilung der Photorezeptoren auf der Netzhaut unregelmäßig (Blinder Fleck, Fovea centralis) und Farben werden je nach Projektionsort auf der Retina anders wahrgenommen (SCHMIDT und THEWS 1997). Auch lagern sich ab einem Alter von ca. 35 Jahren vermehrt gelbe Pigmente in der Cornea ab, was zu einer ins Gelbspektrum verschobenen Farbwahrnehmung führt (BRISMAN et al. 1985). Getönte Brillen sollten zur Farbwahl vermieden werden (BRISMAN et al. 1985). Ein nicht geringer Anteil der männlichen Bevölkerung, nämlich etwa 8%, sind von teilweiser oder völliger Farbenfehlsichtigkeit betroffen, bei Frauen nur etwa 0,4% (SALESKI 1972). Organische Störungen an den Zapfen, ob angeboren oder z.B. durch Pharmaka erworben, führen zu diesem Phänomen. MOSER et al. (1985) wiesen eine überdurchschnittliche Zahl von farbenfehlsichtigen Zahnärzten nach, die, sofern ihnen ihr Defizit bekannt ist, auf Hilfe Dritter bei der Farbauswahl angewiesen sind. Der Einfluss des Geschlechts auf die Güte der Zahnfarbwahl ist nicht nachweisbar (DONAHUE 1991). Weitere physiologisch und psychologisch limitierende Faktoren sind die Gesamt-Konstitution des Organismus, die Ermüdung der Augen nach schon ca. 5 Sekunden Farbmusterbetrachtung durch Zerfall des Sehfarbstoffs (PARAVINA et al. 2001) und emotionale Schwankungen (OKUBO et al. 1998, RUSSELL et al. 2000).

1.5.2 Farbbestimmung mit Messgeräten und ihre Anforderungen

Die im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Limitationen der visuellen Farbbestimmung lassen den Wunsch nach einem objektiven, schnellen Verfahren aufkommen. Mit Hilfe der gerätegestützten Farbmessung (Colorimetrie) ist es möglich, die Fehlerquellen Licht, Umgebung und menschlicher Sehsinn auszuschalten und auf diese Weise reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten. Die in der Zahnheilkunde herrschenden besonderen Bedingungen bei Messungen an extrahierten Zähnen oder gar am Patienten stellen allerdings besondere Anforderungen an die Gerätetechnik, was den routinemäßigen Einsatz in der Praxis bisher vereitelt hat. Wie das Auge bei der visuellen Abmusterung eines natürlichen Zahnes, fängt

auch das Farbmessgerät die vom Gegenstand reflektierten Strahlen ein und wertet sie spektral aus. Daher gelten auch für die Colorimetrie die in Absatz 1.5.1 erläuterten Limitationen. In der grafischen Industrie, in der die Farbmessung schon seit Jahrzehnten etabliert ist, haben die Farbmuster eine gewisse Mindestgröße von ca. 1 cm^2 (SETZ et al. 1992), besitzen eine plane Oberfläche, sind homogen gefärbt und meist vollkommen opak. Anders der natürliche Zahn. Oberflächenmerkmale, wie Textur oder Glanz sind messtechnisch nicht erfassbar und beeinflussen das Messergebnis signifikant (MACENTEE und LAKOWSKI 1981, GOODKIND et al. 1985, VAN DER BURGT et al. 1990). Ebenso verhält es sich mit der Speichelbenetzung, der Oberflächenwölbung, dem Messfeldhintergrund, dem umgebenden Gewebe oder der Transluzenz des Zahnes (MACENTEE und LAKOWSKI 1981, LEIBROCK et al. 1995).

1.6 Messverfahren von Farbmessgeräten

1.6.1 Spektralmessverfahren nach DIN 5033, Teil 4

Das Spektralmessverfahren ist das genaueste, aber zugleich komplizierteste Farbmessverfahren, das zwei Arbeitsgänge einschließt: Zum einen die „Spektralphotometrie“, also das Messen der Intensitäten der einzelnen Wellenlängen des reflektierten Lichtes und zum anderen die „valenzmetrische Auswertung“, die Umrechnung in Messwerte der gewünschten Form, die in der Regel von einem Mikroprozessor/Computer übernommen wird.

Im Unterschied zum Auge, das das reflektierte Spektrum mit Hilfe aller Rezeptoren gleichzeitig bewertet, wird in einem Spektralphotometer/Spektrometer das Licht der eingebauten polychromatischen Lichtquelle zerlegt und Wellenlänge für Wellenlänge (meist in 10 nm Intervallen) mit Hilfe von Fotosensoren nach der Reflexion durch den gemessenen Farbkörper in seiner Intensität erfasst und valenzmetrisch ausgewertet. Die Zerlegung der Strahlung kann geschehen bevor oder nachdem die Probe beleuchtet wird (monochromatische bzw. polychromatische Beleuchtung). Die spektrale Aufspaltung geschieht durch Brechung (Prisma), Beugung (Gitter)

oder Filterung. Das Ergebnis ist schließlich eine Remissionskurve (s. *Abb. 5*), die die Strahlungsintensitäten der einzelnen Wellenlängen zeigt und eine Farbe eindeutig charakterisiert (SETZ et al. 1992). Die valenzmetrische Auswertung führt schließlich zu den Normfarbmaßzahlen X, Y, Z und Werten des gewünschten Farbsystems,

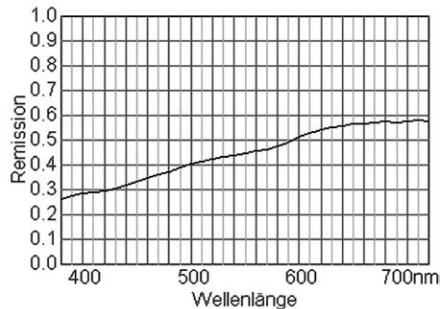


Abb. 5. Remissionskurve eines Zahnes mit dem Farbton A1.

wie z.B. den $L^*a^*b^*$ -Werten (Abschn. 1.3.1). In Abhängigkeit von der Anordnung von Lichtquelle und Messelement zur Farbprobe unterscheidet man verschiedene Messgeometrien, die je nach Oberflächen- und Strukturbeschaffenheit einer Probe angewandt werden und Lichtstreuungen oder Glanz ausschalten können.

1.6.2 Dreibereichsmessverfahren nach DIN 5033, Teil 6

Die zweite, weit verbreitete Messgerätegruppe stellt die der Colorimeter oder Dreifilter-Farbmessgeräte dar. Das Dreibereichsverfahren soll der Vorstellung vom Sehvorgang beim Menschen entsprechen (*Abschn. 1.2.4*), so dass theoretisch die Normfarbwerte X, Y, Z direkt als Messergebnis ermittelt werden können. Polychromatisches Normlicht fällt auf den Gegenstand. Der reflektierte Anteil wird mit einer auf die drei Empfindlichkeitsmaxima des menschlichen Auges abgestimmten Filterkombination im Colorimeter in rote, grüne und blaue (RGB) Strahlung zerlegt und die Intensität mit Fotozellen gemessen. Die erhaltenen RGB-Messwerte liefern keine Absolutwerte, sondern aufgrund der nur schwer der Natur nachzuempfindenden Lichtquellen-Messfilter-Fotozellen-Kombination Relativwerte, die jedoch

beim Vergleich von einem Ist- mit einem Soll-Farbmuster brauchbare Ergebnisse liefern und sogar in CIE-Werte umgerechnet werden können (BANGTSON und GOODKIND 1982). Es ist möglich, verschiedene Normlichtarten und Beobachter, wie auch beim Spektralmessverfahren, nachträglich miteinzuberechnen. So muss die Lichtquelle nicht der im Ergebnis gewünschten Quelle entsprechen. Anders aber beim nun folgenden Gleichheitsmessverfahren...

1.6.3 Gleichheitsmessverfahren nach DIN 5033, Teil 5

Das Gleichheitsmessverfahren spielt in der praktischen Farbmessung nur eine untergeordnete Rolle, da hier der „Messsensor“ das menschliche Auge ist und somit Subjektivität vorhanden ist. Die Farbprobe (Messvalenz) wird mit Hilfe von visueller Farbmischung durch die untersuchende Person (additiv oder subtraktiv, beide Verfahren existieren) nachgestellt, indem im Gerät Filter manuell eingestellt werden, bis das gefilterte Licht der Farbe der Probe entspricht. Das dazu verwendete Licht muss der im Ergebnis gewünschten Normlichtart entsprechen. Nach den vom Beobachter getroffenen Filterungseinstellungen lassen sich die Normfarbwerte X, Y, Z berechnen, die als Ausgangsbasis für weitere Umrechnungen dienen können.

1.7 Dental-Farbmessgeräteangebot auf dem Markt

Seitdem HAGA 1958 extrahierte Zähne erstmals mit einem Spektrophotometer vermessen hatte, folgten viele Studien, die sich mit Farbmessung beschäftigten. Zumeist wurden Spektrophotometer und Colorimeter aus der grafischen Industrie modifiziert und im Dentalbereich verwendet. 1982 kam das erste Farbmessgerät mit speziellem Messkopf für Zähne auf den Markt (Chromascan Tristimulus Colorimeter, Sterdent Corp., Stamford, USA) und war lange Zeit das einzige kommerziell für diesen speziellen Einsatzzweck verfügbare Gerät. Insbesondere seit Ende der 90er Jahre wächst mit dem technischen Fortschritt in der Mikroelektronik die Zahl von Zahnfarbmessgeräten sprunghaft. Einen Überblick gibt Tabelle *Tab. 4*.

Tab. 4. Überblick über Zahnfarbmessgeräte auf dem Markt (Stand 2004).

Gerätebezeichnung	Herstellerfirma	Website	Einführungsjahr
Castor®	Nordmeditech GmbH, Wees, Deutschland	---	1991
ShadeEye-NCC™	Shofu Dental Inc., San Marcos, USA	www.shofu.com	1997
Dental Color Analyzer	Wolf Industries Inc., Vancouver, USA	www.clearlight.com/~aei	1998
PR-650® SpectraScan®	Photo Research Inc., Chatsworth, USA	www.photoresearch.com	1999
ShadeScan™	Cynovad, Montréal, USA	www.cynovad.com	2000
ClearMatch™ (Software)	Clarity Dental Corp., Salt Lake City, USA	www.claritydental.com	2001
Digital ShadeGuide DSG4 (+)®	Rieth, Schwäbisch Gmünd, Deutschland	www.a-rieth.de	2001
Ikam™	Metalor Technologies Dental Div., North Attleboro, USA	www.metalor-dental.com	2001
Shade-Rite™ Dental Vision / ShadeVision™	X-Rite Inc., Grandville, USA	www.shade-rite.com	2001
SpectroShade™	MHT Optic Research AG, Niederhasli, Schweiz	www.mht.ch	2001
Vita Easyshade®	Vident, Brea, USA	www.vident.com	2002

1.8 Problemstellung

Es ist also von besonderem Interesse, die Güte der Farbbestimmung von oben erwähnten speziellen Dental-Farbmessgeräten zu untersuchen und die Frage zu klären, ob speziell unter Alltagsbedingungen messtechnisch durchgeführte Farbbestimmungen gegenüber der seit Jahrzehnten etablierten Methode der visuellen Farbnahme eindeutige Vorteile bringen. Es gilt, die unterschweligen Bedenken, die diesen Geräten gegenüber von einer Vielzahl von Praktikern momentan noch geäußert werden, mit wissenschaftlichen Fakten zu objektivieren. Momentan existieren nur wenige Studien, die sich mit der praktischen Anwendung der neuen Techniken außerhalb eines wissenschaftlichen Labores beschäftigen und die Qualität der Farbbestimmungsmethoden und Messsysteme miteinander vergleichen. Der Interessierte soll sich auf Grundlage von objektiven Daten sein eigenes Urteil bilden können, ob der technische Stand des Jahres 2004 die teilweise nicht unerhebliche Investition in ein solches Farbmesssystem rechtfertigt.

Im Folgenden wurden von drei Farbmessgeräten verschiedener Hersteller und drei menschlichen Untersuchern jeweils die Zahnfarben (Vita Classical-Farbskala) an Probanden bestimmt und zum Untersuchungsgegenstand gemacht. Es sollen die Fragen geklärt werden, wie sich die Ergebnisverteilung der bei den Probanden festgestellten Zahn-Farbtöne innerhalb und zwischen den Methoden gestaltet, welche Reproduzierbarkeitsraten (Doppelmessungen) die einzelnen Methoden in vivo aufweisen und ob Faktoren wie Messort (gemessenes Zahndrittel) oder Zahnart (Morphologie) das Ergebnis signifikant beeinflussen. Weiterhin interessiert die Übereinstimmungsrate zwischen den verschiedenen Methodenkombinationen und Gruppen. Einen Überblick über die Versuchs-Methodik, die im folgenden Kapitel detailliert dargestellt wird gibt *Abbildung 6*:

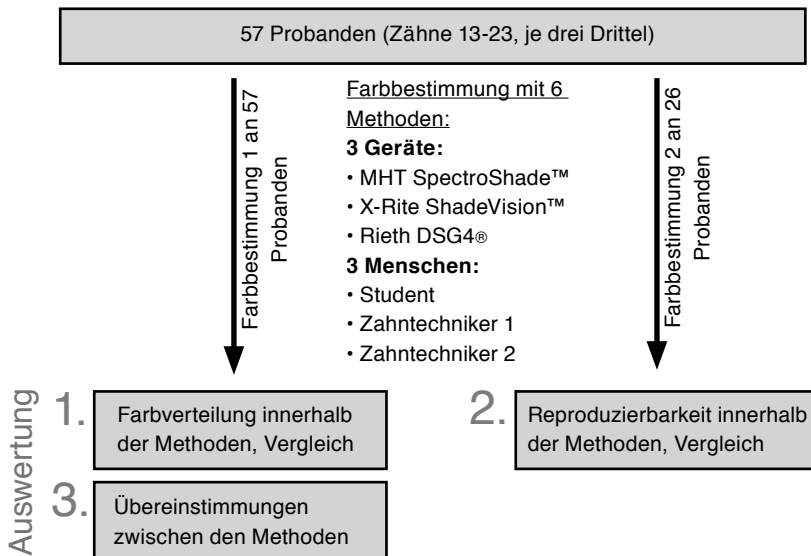


Abb. 6. Überblick über die im folgenden Kapitel erläuterte Versuchs-Methodik.

2 Material und Methoden

2.1 Die drei untersuchten Messgeräte

2.1.1 Das SpectroShade™-System der Fa. MHT - Hard- und Software

Bei allen drei untersuchten Farbmessgeräten handelt es sich um PC-gestützte Systeme. Das technisch am aufwendigsten konstruierte der drei untersuchten Geräte ist das SpectroShade™-System der Fa. MHT (MHT Optic Research AG, Niederhasli, Schweiz, www.mht.ch, vgl. Abb. 7a). Als einziges nutzt es das Spektralmessverfahren zur Farbbestimmung. Hierbei ist der Messkopf über eine Lichtleiter/Daten-/Steuerleitungskombination mit einem Windows-PC verbunden, der in seinem Gehäuse neben der PC-typischen Hardware wie Netzteil, Motherboard, Laufwerken, PCI-Karten für Grafik und Netzwerk noch Baugruppen eines Spektrophotometers enthält.

Das Spektrophotometer des MHT-Systems besteht aus einer Reihe magnetischer Blenden, 2 Lichtquellen und einem speziell beschichtetem Beugungsgitter, das das Licht der Messlicht-Quelle in die Spektralfarben zerlegt. Diese Einheit ist im PC-Gehäuse integriert.

Wenn der am Messkopf befindliche Messknopf betätigt wird, schalten die Blenden von der Beleuchtungslichtquelle für die digitale Kamera, die für die bildliche Darstellung auf dem Monitor verantwortlich ist (Halogenlampe 12 V, 100 Watt), auf die Lichtquelle für die spektrophotometrische Farbmessung um. Das Licht wird am Gitter in 10 nm-Intervallen zerlegt und die einzelnen Wellenlängen zeitlich versetzt durch den Lichtleiter zum Messkopf transportiert. Vor dem Austritt aus dem Messkopf spaltet sich der Lichtleiter, so dass das Objekt von zwei Seiten im 45°-Winkel von monochromatischem, polarisiertem Licht beleuchtet wird. Der vom Messkörper reflektierte Anteil fällt im 0°-Winkel auf den monochromatischen Photosensor (Charge Coupled Device, CCD), der speziell für die Registrierung von Wellenlängen von 400 bis 720 nm optimiert ist. Die Messgeometrie ist also eine 2x45°/0°-Geometrie. Die vom CCD kommenden Daten korrigiert und bereitet

eine in einem der PCI-Slots des PCs befindliche „Leutron Frame Grabber Card“ in 20 nm-Schritten auf und stellt sie dem Computer zur Verfügung, wo sie daraufhin mit der SpectroShade™-Software ausgewertet werden. Das gemessene Areal umfasst ca. 18x14 mm, gemessen in 640x480 Punkten.

Der Messkopf besitzt neben dem monochromatischen CCD-Sensor für die Farbmessung noch einen zweiten polychromatischen CCD-Sensor, wie er auch standardmäßig in digitalen Kameras Verwendung findet (vgl. Abb. 7b). Dieser ist für die bildliche Echtzeit-Farb-Darstellung des Zahnes auf dem Monitor zuständig. Eine im Kopf integrierte Autofokus-Optik liefert scharfe Bilder. Das notwendige Beleuchtungslicht stammt wie oben erwähnt aus der im PC-Gehäuse untergebrachten Halogen-Lichtquelle.

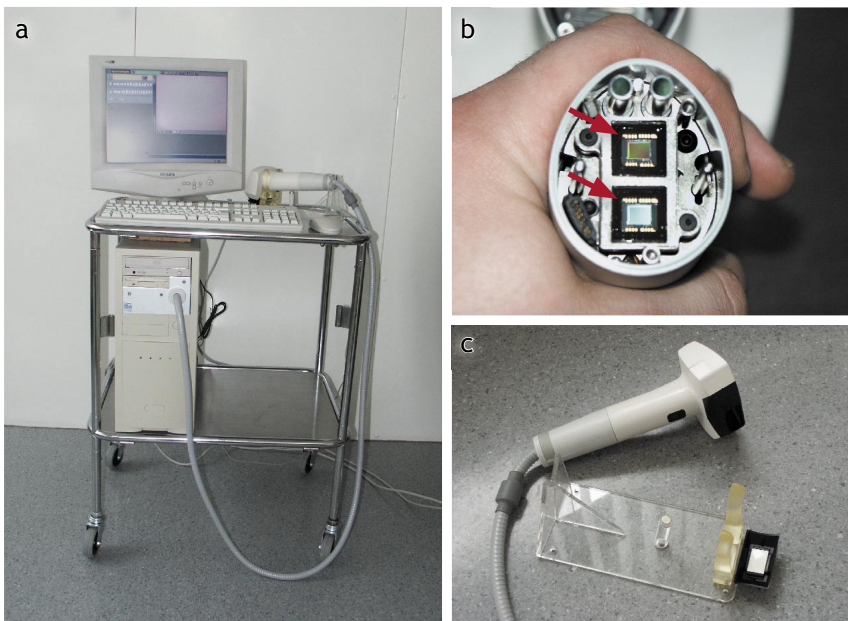


Abb. 7. MHT SpectroShade™.

a System mit im PC-Gehäuse integrierter Spectrophotometerhardware und mit über Lichtleiter/Daten-/Steuerleitung verbundenem Handmesskopf.

b Handstück bei abgenommenem Farbmesskopf; gut zu erkennen sind die zwei untereinander angeordneten CCD-Sensoren (Pfeile).

c Hand-Messkopf mit Ablagehalter und Kalibrierkachel.

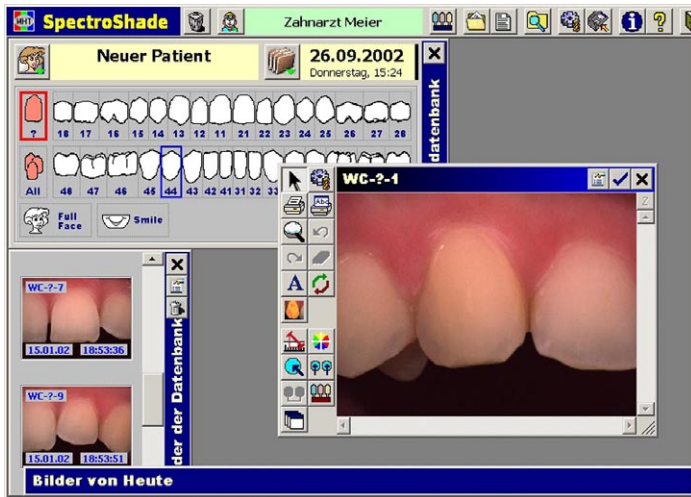


Abb. 8. Bildschirmfoto der MHT SpectroShade™-Software. Zu erkennen am linken Rand des vordersten Fensters sind die zahlreichen Werkzeuge zur Nachbearbeitung.

Der recht große Messkopf (vgl. Abb. 7c) ist wischdesinfizierbar und mit einem wechselbaren, dampf-sterilisierbaren Mundstück versehen. Die Funktionalität des SpectroShade™-Systems kann durch den im Lieferumfang enthaltenen Intraoral-Kamerakopf erweitert werden.

Die Farbdaten werden von der Software wie auch bei den übrigen Geräten mit werksseitig eingelesenen Farbringen verglichen.

Integriert sind hier derzeit Vitapan Classical, Vitapan 3D-Master, Ivoclar Chromascop, Trubyte New Hue, Trubyte Portrait, Trubyte Bioform (Plastic und Porcelain), Candulor TCR, Dentsply Esthet-X, Dentsply Biodent, Shofu Vintage Halo und Noritake Tooth Guide. Diese Farbfächerauswahl wird vom Hersteller ständig ergänzt. Zusätzlich bietet das SpectroShade™-System als einziges der Systeme noch die Möglichkeit der Ausgabe von farbmtrischen Werten wie $L^*a^*b^*$, $L^*c^*h^*$ und ΔE , entweder als Zahlenwert oder grafisch.

Eine Vergleich der sehr leistungsfähigen Software (Bildschirmfoto s. Abb. 8) mit den übrigen Produkten ist aus *Tabelle 5* am Ende des Kapitels ersichtlich.

2.1.2 Das ShadeVision™-System der Fa. X-Rite - Hard- und Software

Das von der Fa. X-Rite (X-Rite Inc., Grandville, USA, <http://www.X-Rite.com>) entwickelte ShadeVision™-System (vgl. Abb. 9a) bedient sich des Dreibereichsmessverfahrens. Als einziges der drei Systeme basiert es nicht auf Lichtleiter-Beleuchtungstechnik, sondern vereint die komplette Messhardware in einem relativ handlichen, mit Display versehenen Gehäuse, das per Docking-Station (USB-Schnittstelle) nach Abschluss der Messungen mit dem PC verbunden wird.

Die Lichtquelle, eine gasgefüllte Niederspannungs-Glühlampe, hat weist eine Farbtemperatur von 2856 K (Lichtart A) auf. Das System der Fa. X-Rite besitzt weiterhin eine 18°/0° Messgeometrie. Die Beleuchtung des zu messenden Objektes erfolgt also im 18°-Winkel, die Erfassung des reflektierten Lichtes im 0°-Winkel. Der Strahlengang ist als sogenannte „Suchlichtbeleuchtung“ konstruiert und soll sicherstellen, dass die Beleuchtungsstärke auf den Zahn im Bereich vor der Tubusöffnung weitgehend unabhängig ist und das Messobjekt vollkommen gleichmäßig beleuchtet wird. Diese beiden Kriterien schließen sich normalerweise aus, wurden aber zu realisieren versucht. Weiterhin sollen durch die Suchlichtbeleuchtung Artefakte durch Glanz ausgeschaltet werden.

Bei der Messung fällt der vom Zahn reflektierte Lichtanteil zeitversetzt durch halbkreisförmig an einer Schrittmotorachse angebrachte Filterelemente und belichtet

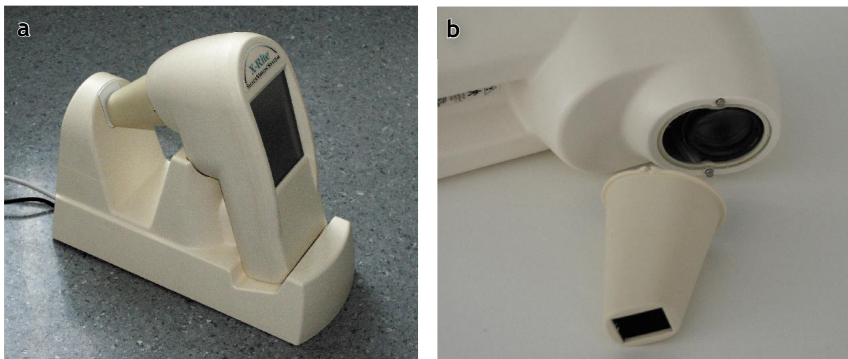


Abb. 9. X-Rite ShadeVision™-System.
a System mit Docking-Station, ohne PC.
b Handgerät mit abgenommenen Einweg-Tubus

einen monochromen CMOS-Fotosensor. Hierbei führt das Gerät für den Nutzer nicht wahrnehmbar für jedes Filterelement zwei Durchgänge aus, deren Ergebnis auf Plausibilität überprüft wird und ggf. eine Fehlermeldung ausgegeben wird. An der Innenseite des wechselbaren Tubus sind über der Messöffnung zwei Farbreferenzmarken integriert, die zu Korrekturzwecken herangezogen werden und so den Messfehler minimieren sollen. Die durch Auslösen des Messvorgangs (Touchscreen) erhaltenen Werte werden im geräteinternen Speicher für bis zu sechs Messungen abgelegt. Das direkt hinter dem Messsensor platzierte und somit auf einer Linie mit der Messachse befindliche drucksensitive Schwarzweiß-LC-Display dient neben der Bedienung des Handgerätes auch als ergonomisch günstige Ausrichtungshilfe beim Anpeilen des zu messenden Objektes. Der Kopf des Untersuchers muss nicht zu einem u.U. ungünstig platzierten Computer-Monitor gedreht werden.

Nach Abschluss der Messungen und Einsetzen des Handgerätes in die mit dem PC über eine USB-Schnittstelle verbundene Docking-Station werden die Messdaten automatisch an die spezielle Windows-kompatible Auswertungssoftware (vgl. Abb. 10) übertragen. Im Rechner werden zunächst aus den monochromen Datensätzen Farbbilder der gemessenen Zähne erzeugt, die die visuelle Darstellung der gemessenen Zähne auf dem Computerbildschirm erlauben. Nachdem nun der Nutzer den farblich zu bestimmenden Zahnbereich mit aus der digitalen Bildbearbeitung bekannten Werkzeugen wie Pinsel oder Zauberstab freigestellt hat, können die Farbmusterwerte für die gespeicherten Farbmusterringe (derzeit Vitapan Classical, Vitapan 3D-Master, Trubyte Bioform, Ivoclar Chromascop, Vintage Halo und Dentsply Esthet-X) angezeigt werden.

Es stehen die Anzeigeeoptionen Zahndurchschnittsfarbe, Zahndrittel (inzisal, mittig, zervikal), feine und grobe Farbkarte zur Verfügung. Ausgegeben werden auch qualitative Mischwerte wie beispielsweise A3-A2. Befindet sich der gemessene Farbton nicht im vom jeweils gewählten Musterring abgedeckten Zahnfarbraum, wird auf diesen Umstand durch eine Meldung verwiesen und das dem eigentlichen Zahnfarbwert am nächsten gelegene Farbmuster gewählt. Der komplette Softwareleistungsumfang ist aus *Tabelle 5* ersichtlich.

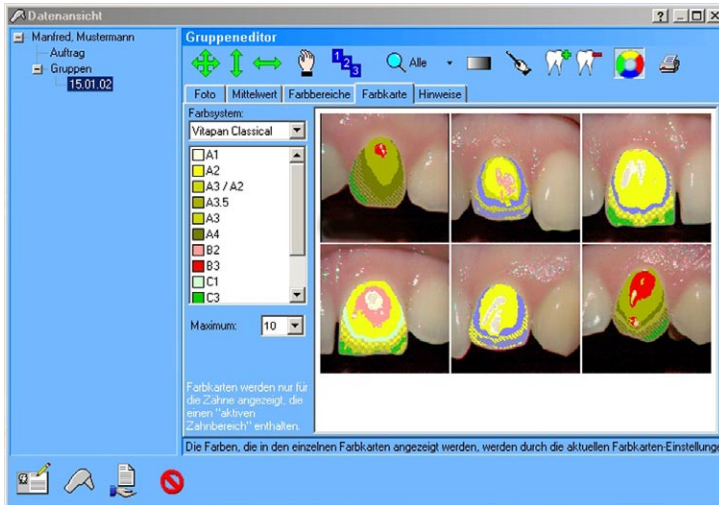


Abb. 10. Bildschirmfoto der X-Rite ShadeVision™-Software. Gezeigt wird hier die Farbkartendarstellung der gemessenen Zähne.

Das ShadeVision™-System besitzt keine schwer zu reinigenden Knöpfe und ist daher sehr gut wischdesinfizierbar. Der wechselbare Messtabus (vgl. Abb. 9b) ist jedoch nicht sterilisierbar und nach jeder Patientenmessung durch einen neuen zu ersetzen (Einwegartikel).

2.1.3 Das Digital Shade Guide DSG4® der Fa. Rieth - Hard- und Software

Die Hardware (vgl. Abb. 11a) des Digital Shade Guide DSG4® der Fa. Rieth (Schwäbisch Gmünd, Deutschland, <http://www.a-rieth.de>) bestimmt die Zahnfarbe ebenfalls mit Hilfe des Dreibereichsmessverfahrens. Die durch eine serielle Schnittstelle (RS-232C, V24) mit dem Personalcomputer verbundene Auswertungseinheit beinhaltet die weiße Halbleiterlichtquelle (white light emitting diode, W-LED) und die Filter-/Auswertungseinheit mit ihren drei Glasfiltern und drei Photosensoren. Eine Modulation der Lichtquelle soll die Unterdrückung von Störeinflüssen durch das Umgebungslicht bewirken. Das Licht wird durch den insgesamt nur ca. 8 mm starken, äußeren Mantel des mehrfach aufgeteilten Glasfaserstranges zur stiftförmigen,

planen Messspitze (vgl. *Abb. 11b*) geleitet, wo es ringförmig austritt (Ringdurchmesser außen ca. 4 mm, innen 2 mm). Nach Passieren des zuvor aufgetragenen Flüssigkeitsfilms aus Wasser, der die Einflüsse der Zahnoberflächenbeschaffenheit auf das Ergebnis minimieren soll, wird es von der Zahnhartsubstanz gestreut und reflektiert. Hierauf tritt der reflektierte Anteil in den dreigeteilten Kern des Glasfaserstrangs ein, der sich innerhalb des kreisförmigen Beleuchtungsaustritts befindet (Messareal-Durchmesser 2 mm). Er wird zu den drei Filtern der Auswerteeinheit geleitet und auf die Photorezeptoren projiziert. Die nun erzeugten elektrischen Signale werden aufbereitet, über die serielle Schnittstelle an den PC übertragen und mit Hilfe der speziell zu diesem Zweck entwickelten Windows-kompatiblen Software (vgl. *Abb. 12*) ausgewertet.

Eine Farbmessung im eigentlichen Sinne findet nicht statt, vielmehr wird die Strahlungsintensität der drei herausgefilterten Wellenlängen mit vorher eingelese- nen Farbmustern verglichen und der Farbeindruck mit dem am besten passenden Wert der Software verglichen. Hinterlegt sind in der momentan aktuellen Version 1.7 die Farbmusterringe Vitapan Classical, Vitapan 3D-Master, Ivoclar Chromascop und Dentsply Biodent (vgl. *Tab. 3*). Hierbei werden von der DSG4®-Software keine reinen Farbwerte wie A1, A2, B1 ausgegeben, sondern Mischwerte aus verschie-

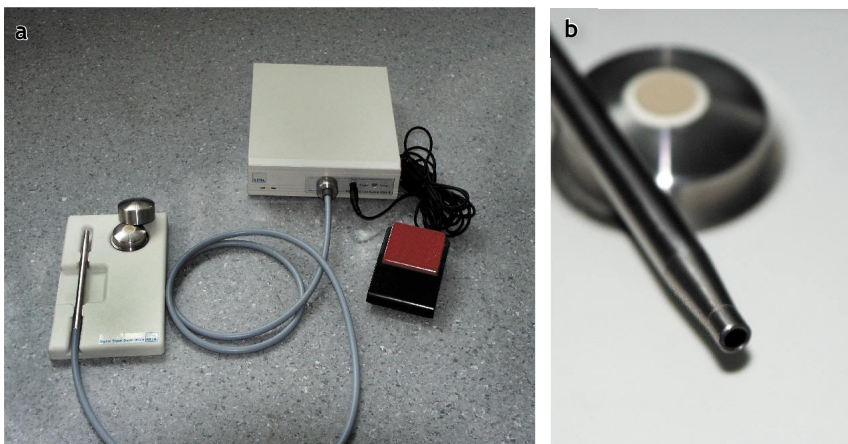


Abb. 11. Das Rieth DSG4-System.

a System ohne PC. **b** Messspitze mit Kalibriermuster im Hintergrund.

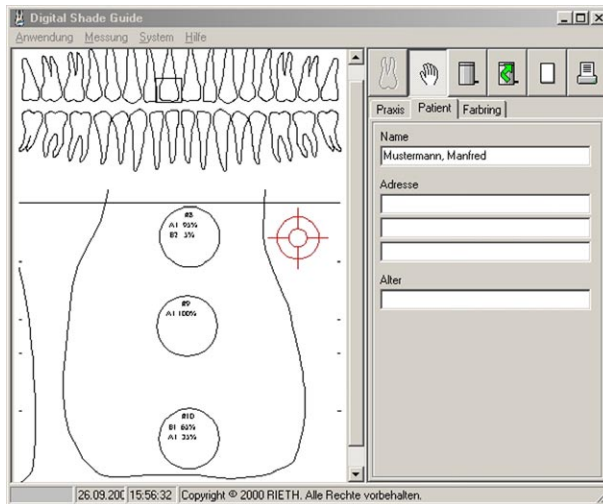


Abb. 12. Bildschirmfoto der DSG4®-Software: Das Fadenkreuz zeigt den Ablageort für die Messungen, die kleinen Markierungen links des Scrollbalkens markieren die Zahndrittel.

denen Farbmustern, wie beispielsweise 60% A1, 40% B1. Zusätzlich angegebene Informationen über Abweichungen in Value und Chroma sollen verdeutlichen, in welche Dimension die Zahnfarbe den vom Farbring abgedeckten Zahnfarbraum verlässt. Die Messwerte werden nach Auslösen der Messung durch einen Fußschalter in einem vom Programm gezeigten Zahnschema abgelegt. Der Ablageort wird vom Benutzer vorher festgelegt und spielt für die Farbmusterzuordnung durch die Software eine wesentliche Rolle, da das Programm für jedes Zahndrittel (inzisal, Mitte, zervikal) andere Vergleichsmusterwerte heranzieht.

Für jeden Patienten muss eine neue Messwertdatei angelegt werden. Verwaltungsfunktionen bietet die Software nicht.

Daten zum übrigen Funktionsumfang der DSG4®-Software, der gegenüber den im Weiteren vorgestellten Produkten weniger umfangreich ist, finden sich in *Tabelle 5*.

Tab. 5. Software und Hardware der getesteten Geräte.

Software-Features	Rieth DSG4®	X-Rite ShadeVision™	MHT SpectroShade™
Versionsnummer	1.7	1.20	2.20
Zahn als fotografische Abbildung	nein (nur Zahnschema)	ja	ja
Ausgabe von colorimetrischen Daten (L*a*b*, L*c*h*, Remission, ΔE)	nein	nein	ja
Ausgabe von Schichtrezepten	nein	nein	nein
Momentan unterstützte Anzahl von Farbringen	4	6	11
Aktualisierung auf neue Farbfächer	ja	ja	ja
Farbe beliebiger Zahnareale nachträglich bestimmbar	nein	nein	ja
Nachträgliches Ändern des Messareals	nein	nein	ja
Ausgabe von Zahnfarbe als Mittelwert, Drittel, Farbkarte	nein (nur Messpunkte in jeweiligen Dritteln)	ja	ja
Darstellung von Transparenzen	nein	nein	ja*
Anzeige mehrerer gemessener Zähne/Ergebnisse in einem Fenster	ja (abh. von Bildschirmgröße)	ja (zu Gebissbild arrangierbar)	ja (nur max. 2 Zähne gleichzeitig)
Automatische Bestimmung des Zahnurisses/Messareal	nein (punktuelle Messung)	nein (manuelles Umfahren)	ja
Rotation/Spiegeln der Bilder	nein	ja	ja
Vergrößerungsfunktion (Lupe)	nein	ja	ja
Visueller Vergleich mit Farbmusterring	nein	ja	ja
Visueller Vergleich Zahn/Restauration	nein	nein (erst ab Vers. 2)	ja
Visuelles Anpassen Zahn/Restauration am Monitor (Hue, Value, Chroma)	nein	nein	ja
Qualitativer Vergleich der Toleranz zwischen Zahn und Restauration	ja (Diagramm)	ja (Diagramm)	ja (sogar quantitativ: Diagramm und ΔE)
Textbemerkungen/Notizen auf dem Foto notierbar	nein	nein (nur als separate Notiz)	ja
Metrische Vermessung eines Zahnes	nein	nein	ja
Programminterne Verwaltung der Messdaten	nein	ja	ja
Speicherungsform der Messdaten	als eine Datei pro Patient	in programmeigener Datenbank	in programmeigener Datenbank
Bildspeicherung mit Datum/Uhrzeit	nein (nur in Win-Dateiinformatio)	ja	ja
Speicherung von Patientendaten	ja (nur Name, Adresse, Alter)	ja (mit Patienten-ID, Allergien, Notizen)	ja (mit Notizen)
mehrere Nutzer/Zahnärzte anlegbar	nein	ja	ja
mehrere Sitzungen speicherbar	nein (nur als neue Datei)	ja	ja
Datenbank-Backup-Funktion	nein (Backup auf Explorer-Ebene nötig)	ja (über mitgeliefertes Zusatzprogramm)	ja (integriert über CD-Brenner)
Druckfunktion der Messergebnisse	ja (aber nur gezeigter Fensterinhalt)	ja	ja
Versenden von Laboraufträgen aus der Anwendung heraus	nein	ja (eMail, Datenträger)	ja (eMail, Datenträger, direkt auf CD)
Import von Patientenfotos in den Datenbankbestand	nein	nein	ja (direkter Kameraanschluss mögl.)
Software-Sprachen	Dt., Engl.	Dt., Engl., Ital., Span., Frz., Port.	Dt., Engl., Ital.
Netzwerktauglichkeit (Datenbank auf zentralem Server verwaltbar)	ja (auf Explorer-Ebene)	ja	ja
Kalibrierungserinnerung	vor jedem neuen Patienten und in Zeitintervall	vor jedem neuen Patienten	nein
Hintereinander ausführbare Messungen	prakt. unbegrenzt	bis zu 6 Zähne	prakt. unbegrenzt

* Die Transparenz eines Zahnes wird nicht wirklich gemessen, sondern aufgrund des initial höheren Value, der durch die höhere Transparenz in diesem Bereich entsteht mit Erfahrungswerten verglichen und abgeschätzt.

Hardware	Rieth DSG4®	X-Rite ShadeVision™	MHT SpectroShade™
Messprinzip	Dreibereichsverfahren	Dreibereichsverfahren	Spektralmessverfahren
Größe des Messkopfes	Stiftgroß, Messkopf ø 6 mm, Messareal ø 2 mm	Messtabus, ø 3 cm	Messfensterbreite ca. 4,5 cm
Mundstücke desinfizierbar	Wischdesinfektion	Einmal-Mundstücke	dampferilisierbar
Dauer des Messvorgangs	< 0,5 s	< 1 s	< 1 s
Aufbau des Systems	Per seriellem Kabel (Com-Port) am PC angeschlossene Einheit	Akkubetriebenes Handgerät mit Dockingstation (USB) am PC	In PC-Gehäuse integriertes Komplettsystem
Verbindung Messkopf zur Auswertungseinheit	Mehrstrang-Lichtleiter ca. 0,8 cm ø	Messkopf direkt an Auswerteeinheit	kombiniertes Lichtleiter-/Datenkabel ca. 1,5 cm ø
Ortsgebundenheit	ja (Netzversorgung)	nein (Akkubetrieb)	ja (Netzversorgung)
Intraoralkamera	nein	nein	ja
Messausslösung	Fußtaster/Software	Touchscreen-Display	Taste am Messkopf/Software
PC-Systemvoraussetzungen	Pentium Prozessor, MS Windows 95, 98, Mill., 2000, XP oder NT 4.0, 16MB RAM, RS 232C Schnittstelle, CD-ROM Laufwerk	Pentium III 1Ghz Prozessor, MS Windows 98, 2000, XP, 128 MB RAM, CD-ROM-Laufwerk, USB-Schnittstelle	System wird komplett geliefert (Pentium III 800Mhz, 128MB RAM, Windows 98, CD-Brenner, USB, Ethernet, Modem etc.)
Preis incl. Mwst.	ca. 4800 Euro + PC	ca. 7200 Euro +PC	ca. 11500 Euro

(Stand 12/2003)

2.2 Klinische Untersuchung am Probanden

2.2.1 Die Probanden

Untersucht wurde die Zahnfarbe bei insgesamt 57 Probanden. Die Zahnfarbbestimmungen wurden hierbei - wie schon erwähnt - von drei menschlichen Untersuchern und den drei Farbbestimmungsgeräten durchgeführt. Die Probandengruppe setzte sich aus 30 Frauen und 27 Männern zusammen. Ihr durchschnittliches Alter betrug 31 Jahre, wobei der jüngste Proband 17 Jahre und der älteste 78 Jahre war. Die Altersverteilung wies zwischen 24 Jahren und 26 Jahren ihren Maximalwert auf. Über die Hälfte der Probanden (54%) fanden sich in dieser Gruppe wieder.

Zur Untersuchung wurden im Oberkiefer-Frontzahnggebiet die mittleren und lateralen Inzisivi und die Eckzähne ausgewählt. Dieser Teil des Gebisses stellt aufgrund seiner visuellen Exposition die höchsten Ansprüche an Restaurationen und deren Ästhetik. Um Fehlmessungen oder Irritationen bei der Abmusterung auszuschließen, waren die obengenannten Zähne der Probanden frei von jeglichen Restaurationen. Potentielle Probanden mit Restaurationen wurden pauschal von der Teilnahme ausgeschlossen. Die letzte professionelle Zahnreinigung lag bei keiner der untersuchten Personen länger als sechs Monate zurück. Zurückzuführen auf die ausnahmslos gute Mundhygiene waren keine exogenen harten Ablagerungen erkennbar.

Die Zahnfarbe wurde für jeden einzelnen Zahn in seinem zervikalen, mittleren und inzisalen Drittel festgestellt. Im Abstand von einer Woche wurden bei 26 (14 weiblichen, 12 männlichen) der 57 Probanden zwei Farbbestimmungen durchgeführt. Diese fanden unter weitgehend gleichen Bedingungen am gleichen Ort und während der gleichen Zeit (16-17 Uhr) statt.

2.2.2 Vorversuche

Zunächst wurden vom Untersucher 20 Probanden mit den drei Geräten gemessen, um sich mit deren Handhabung und den gerätespezifischen Eigenheiten vertraut zu machen. Alle Farbmessungen in dieser Studie führte ausschließlich diese Person durch.

2.2.3 Visuelle Abmusterung durch drei Untersucher

2.2.3.1 Vorbereitung und Umgebungsbedingungen

Die visuelle Farbbestimmung wurde von drei Personen, die zuvor auf Farbfehlsichtigkeit überprüft worden waren (Farnsworth Farbflecklegetest Panel D15 desaturiert), unabhängig voneinander durchgeführt, bevor die Geräte zum Einsatz kamen. Darunter zwei erfahrene Zahntechniker und ein Student der Zahnmedizin im letzten Semester; alle im Alter zwischen 26 und 38 Jahren.

Die Umgebung wies ausschließlich neutrale Farbtöne auf, die Beleuchtung des zu musternden Areals erfolgte durch vier innerhalb der ISO-Norm 3664 befindliche 36 Watt/5000 k Tageslicht-Leuchtstoffröhren für die Farbabmusterung, die in zwei Lampen-Gehäusen eingesetzt waren. Die Beleuchtung der Musterungsareals erfolgte von schräg frontal rechts und links im 45°-Winkel. Der Abstand Lichtquelle-Objekt wurde so verändert, dass als Beleuchtungsstärke 1500 Lux gemessen werden konnten und schwach von vorne einfallendes Tageslicht überlagerte. Die Probanden wurden gebeten, evtl. vorhandene Schminke zu entfernen und sich die Zähne für ca. 1 min mit einer Zahnbürste zu putzen, um weiche Beläge zu

entfernen. Bunte Kleidungsstücke wurden während der Farbbestimmungsprozedur mit einem grauen Tuch bedeckt.

2.2.3.2 Ablauf der visuellen Zahnfarbbestimmung

Jeder Untersucher beurteilte ohne Zeitdruck die Farbtöne der sechs zu bestimmenden Zähne. Die Farbwahl bezog sich auf den gesamten Zahn, in Fällen wo es dem Untersucher sinnvoll erschien notierte er zusätzlich Zervikal- oder Inzisalwerte. Zum individuellen Vorgehen bestanden für die Untersucher keine Vorschriften, so dass jeder Untersucher seine Erfahrungen bei der Farbwahl einbringen konnte. Für die Wahl der Zahnfarben fand immer derselbe Vita Classical Farbmusterring Verwendung. Die Farbmuster wurden nach Reinigung unter fließend Wasser sprühdesinfiziert und abgetrocknet und die festgestellten Farbwerte für die anderen Untersucher verdeckt auf separaten Zetteln notiert.

Das Vita Classical Farbsystem diente aufgrund seiner weiten Verbreitung und der Vertrautheit der Untersucher mit selbigem als Basis für die folgenden Farbuntersuchungen, wenn auch sicherlich, wie eingangs erwähnt, einige Nachteile aufgrund seiner inhomogenen Verteilung im Farbraum und nicht quantifizierbaren Farbabständen bestehen.

2.2.4 Gerätemessung

2.2.4.1 Vorbereitung

Nach einer Aufwärmphase der Geräte von 15 min wurde jedes Gerät mit den mitgelieferten Standards direkt vor dem Messdurchgang nach den jeweiligen Herstellerangaben kalibriert und die Messdatei für den entsprechenden Probanden in der Software angelegt.

Die Probanden erhielten Instruktion, während der anschließenden Messungen ihren Kopf an die Stütze des Behandlungsstuhls zu lehnen, den Mund leicht geöffnet zu halten und ihre Zunge nicht gegen die Oberkieferfront zu pressen, um Fehler aufgrund der v.a. inzisal auftretenden Zahntransluzenz durch durchschimmerndes

Zungengewebe auszuschließen. Die Umgebung für die Farbmessungen entsprach den allgemeingültigen Normen für zahnärztliche Behandlungsplätze. Leuchtstoffröhren und indirektes Tageslicht sorgten für die Beleuchtung. Die Operationsleuchte an der Behandlungseinheit blieb während der Messungen ausgeschaltet.

2.2.4.2 Vorgehen bei den Zahnfarbmessungen

SpectroShade™-System

Beim MHT SpectroShade™-Gerät wurde der Messkopf mit dem Mundstück auf dem Zahnbogen positioniert und die zentrale Lage des zu messenden Zahnes auf dem Computermonitor überprüft und korrigiert. Auch hier sollte die Messung so genau wie möglich senkrecht zur Zahnfläche erfolgen. Besondere Beachtung fanden - wie schon beim vorigen Gerät - die Lippen, die eingeklemmt die Messung unbrauchbar machen würden. Die Messungen führte der Untersucher pro Durchgang zweimal hintereinander durch und verglich sie anschließend, wie von MHT gefordert, um Fehlmessungen auszuschließen.

ShadeVision™-System

Nach dem Entnehmen des X-Rite Handgerätes aus der Docking-Station, wurde der entsprechende Zahn auf dem Display ausgewählt. Die Positionierung des Messtubus erfolgte ebenfalls mit Hilfe des Displays. Der Tubus wurde auf dem zu messenden Zahn aufgesetzt, der Winkel solange verändert, bis die Spitzlichter sich im mittleren, zervikalen Drittel abbildeten (Herstellerausgabe), schließlich der Messvorgang über den Touchscreen ausgelöst und zum nächsten Zahn übergegangen. Am Schluss erfolgten die Datenübertragung zum Computer, die Festlegung des farblich zu bestimmenden Zahnbereichs und die Sicherung des Datensatzes.

Digital Shade Guide DSG4®

Die Platzierung des Rieth DSG4®-Messkopfes wurde beginnend mit Zahn 13 im zervikalen Drittel abgestützt-freihändig möglichst senkrecht auf der Oberfläche durchgeführt. Es folgten mittleres und inzisales Drittel. Wie vom Hersteller gefordert,

wurden Messspitze und Zahn bei jeder Messung befeuchtet, um Einflüsse durch verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten (Mattheit, Glanz) zu unterdrücken.

Die Messwerte wurden softwareseitig im entsprechenden Zahndrittel des jeweiligen Zahnes im Zahnschema abgelegt und gespeichert. Die Markierungsmarken für die einzelnen Drittel müssen unbedingt beachtet werden, um fehlerhafte Ergebnisse zu vermeiden.

2.3 Auswertung und Statistik

Aus Gründen der Vergleichbarkeit der Daten wurden die drei Drittel „zervikal“, „Mitte“, „inzisal“ bei der Auswertung herangezogen, da diese für jede der sechs Methoden vorliegen. Der vom MHT und X-Rite-Gerät ausgegebene Wert für die Durchschnittszahnfarbe des gesamten Zahnes wurde hingegen nicht benutzt, da nur diese zwei Geräte besagte Ausgabe-Option bieten und ferner ausschließlich beim SpectroShade™ eine reale Berechnung der Durchschnittszahnfarbe aus den drei Dritteln stattfindet. Das ShadeVision™-Gerät hingegen zeigt als Durchschnittswert den Messwert des mittleren Drittels an, das DSG4® liefert für jedes Drittel (d.h. jeden vom Untersucher ausgewählten Punkt eines Zahnes) einen Messwert.

Das MHT SpectroShade™ bietet als Option bei der Farbberechnung drei verschiedene Farbabstandsformeln zur ΔE -Bestimmung an. Hier wurde die voreingestellte Formel „dE“ verwendet, da diese dem allgemein gültigen Industriestandard entspricht. Die übrigen optionalen Formeln „dE-MHT“ und „dL“ würden Helligkeitsdifferenzen bei der Farbuordnung stärker gewichten.

In einigen Fällen meldete das X-Rite-Gerät, die gewählte Farbe sei nicht exakt im untersuchten Farbraum enthalten und würde daher durch die am besten passende Farbe ersetzt. Da sich auch die übrigen Methoden für eine der 16 möglichen Vita-Farben entscheiden mussten, wurden diese Meldungen vom Untersucher ignoriert. Auch wenn dieser Hinweis nicht in die Auswertung einbezogen wurde, lassen sich doch für die Praxis hilfreiche Hinweise auf mögliche Probleme bei der Auswahl des Farbtons (Lücken im Farbraum, s. Einleitung) ableiten. In seltenen Fällen gab

das X-Rite ShadeVision™ Mischfarbtöne (z.B. A1-A2) aus, von denen der zuerst genannte Farbton in die Auswertung einging.

Das Rieth-Gerät DSG4® *quantifizierte* darüber hinaus noch die Farbmischwerte, also beispielsweise 80% A1 mit 20% A2. In solchen Fällen wurde der prozentual größere Anteil als Ergebnis verwendet. In seltenen Fällen, bei denen die Farbanteile mit exakt 50% angegeben wurden, zählte - wie eben auch beim X-Rite-Gerät - der vom Gerät zuerst genannte Farbton.

Die am Probanden von den drei Untersuchern und den drei Geräten für jedes Zahndrittel bestimmten Zahnfarben wurden generell im Vita Classical-System festgehalten. Bei der Auswertung fanden sowohl Messort (Zahndrittel), als auch die Zahnart Berücksichtigung. Je nach Fragestellung erfolgte für die sich später anschließende Auswertung eine entsprechende Gruppenbildung. Da - wie eingangs schon erläutert - das Vita Classical System eine allgemeingültige Quantifizierung der Farbabstände nicht erlaubt und die für Farbuntersuchungszwecke sicherlich optimalen $L^*a^*b^*$ -Werte ausschließlich vom MHT-Gerät ausgegeben werden, können bei der Auswertung also nur qualitative Aussagen über Verteilung, Reproduzierbarkeit und Übereinstimmungen getätigt werden. Laut Herstellerfirma wären die vom MHT SpectroShade™ ausgegebenen $L^*a^*b^*$ -Werte auch lediglich zum systeminternen Vergleich brauchbar. Vergleiche mit anderen $L^*a^*b^*$ -Quellen, seien generell nicht statthaft.

Bei der Auswertung der erhaltenen Zahnfarbdaten (s. *Tab. 7a/b, Anhang*) lassen sich also folgende drei Fragestellungskomplexe bilden:

- 1. Wie gestaltet sich die Verteilung der 16 möglichen Ergebnisse/Farbtöne innerhalb der jeweiligen Farbbestimmungsmethode und zwischen den übrigen Methoden?*
- 2. Welche Reproduzierbarkeitsraten (Doppelmessungen) weisen die einzelnen Methoden auf? Unterscheiden sie sich hinsichtlich des gemessenen Zahndrittels (Messort) oder des Zahntypus (Eckzahn, lateraler Schneidezahn, mittlerer Schneidezahn)?*
- 3. Wie oft stimmen die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Methoden überein?*

Zur anschließenden statistischen Auswertung der Messergebnisse diente entsprechende Software (SPSS V.11 für Windows, SPSS GmbH Software, München). Es fand generell der Chi-Quadrat-Test Anwendung. Bei Fragestellungen, in denen die minimal erwartete Häufigkeit < 1 ausgefallen ist, wurde die Exakte Form desselben (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“) benutzt. Als Signifikanzniveau, d.h. dem p-Wert, bei dessen Unterschreiten Effekte und Unterschiede als statistisch signifikant akzeptiert wurden, wurde $p \leq 0,5$ gewählt.

3 Ergebnisse der Auswertung der Zahnfarbdaten

3.1 Farbverteilung innerhalb der verschiedenen Methoden

Eine Übersicht der Farbverteilung für alle untersuchten Methoden (MHT, X-Rite, Rieth, Student, Zahntechniker 1, Zahntechniker 2) liefert *Abbildung 13*. Hier wird die Farbverteilung unabhängig vom Messort (Zahndrittel) und der Zahnart gemittelt dargestellt.

Die nun im Folgenden angegebenen Prozentangaben beziehen sich auf die Gesamtzahl von 1026 Ergebnissen, die durch Farbbestimmungen an den jeweiligen Dritteln der je sechs OK-Front-/Eckzähne an insgesamt 57 Probanden zustande kamen.

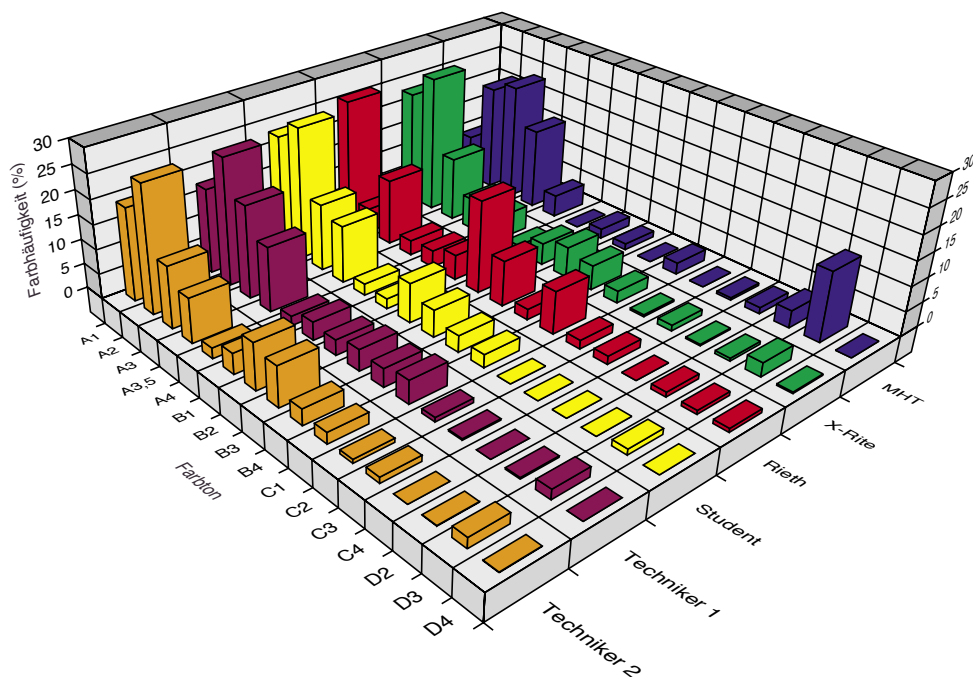


Abb. 13. Farbverteilung innerhalb der verschiedenen Methoden (unabhängig von Zahndrittel und Zahnart).

3.1.1 Farbverteilung innerhalb der Methoden

3.1.1.1 Farbverteilung des MHT SpectroShade™

Wie aus *Abbildung 14* ersichtlich, befindet sich das Verteilungsmaximum der insgesamt 342 Messungen pro Zahndrittel (je 6 Zähne bei 57 Probanden) schwerpunktmäßig fast ausschließlich in der Farbgruppe der A-Töne mittlerer Helligkeit. Die Häufigkeit der A-Töne im 3-Drittel-Durchschnitt liegt bei 75,1%. Der Farbton A1 ist im Vergleich zu den übrigen Methoden unterrepräsentiert. Auffallend häufig vertreten ist Farbton D3 mit im Durchschnitt 14,1% (D-Töne gesamt 17,6%). Die Farbgruppen B und C wurden nur in seltenen Fällen - im Durchschnitt 3,2% bzw. 4,1% - gemessen.

Mit dem Chi-Quadrat-Test wird ein signifikanter (Farb-)Unterschied zwischen den Ergebnissen der drei Drittel offensichtlich ($p < 0,001$).

Beim Vergleich der Farbverteilung für die jeweiligen Zahnarten, stellt sich ein Maximum bei den mittleren Schneidezähnen bei A2, bei den seitlichen Inzisivi bei A2 und A3 ein, lässt man den Farbton D3 außer acht (vgl. oben). Bei den Eckzähnen befindet sich das Maximum bei A3,5 (*Abb. 15*).

Weiterhin zeigt sich unabhängig vom Zahndrittel erwartungsgemäß ein signifikanter Unterschied der Farbverteilung zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“), wobei $p < 0,001$ ist.

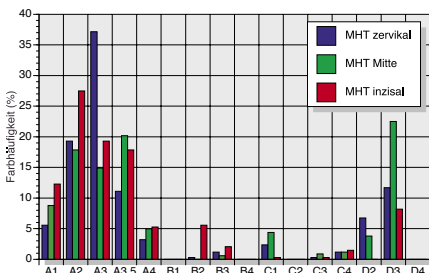


Abb. 14. Farbverteilung MHT abhängig vom Zahndrittel.

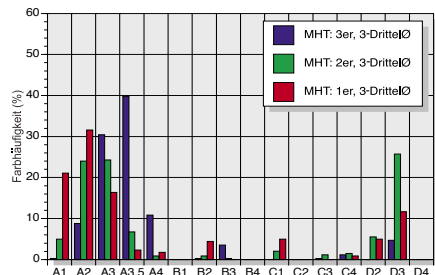


Abb. 15. Farbverteilung MHT abhängig von Zahnart.

3.1.1.2 Farbverteilung des X-Rite ShadeVision™

Aus *Abbildung 16* ist zu entnehmen, dass sich der Schwerpunkt der Verteilung beim ShadeVision™ in der Farbgruppe der vorwiegend hellen A-Töne befindet. Im Durchschnitt ist die Gruppe der A-Töne mit 75,0% vertreten. Es werden mehr B- und C-Töne (im Durchschnitt 17,0% bzw. 4,3%) erfasst, als D-Töne (im Durchschnitt 3,7%).

Mit dem Chi-Quadrat-Test wird auch hier ein signifikanter (Farb-)Unterschied zwischen den Ergebnissen der drei Drittel innerhalb der Methode erkennbar ($p < 0,001$).

Beim Vergleich der Farbverteilung für die jeweiligen Zahnarten, stellt sich ein eindeutiges Maximum bei den mittleren Schneidezähnen bei A1, bei den seitlichen Schneidezähnen bei A2 dar. Weniger deutlich tritt es bei den Eckzähnen bei A2 und dunkleren A-Tönen, sowie den dunkleren B-Tönen auf (*Abb. 17*). Es zeigt sich unabhängig vom Ort mit $p < 0,001$ ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“).

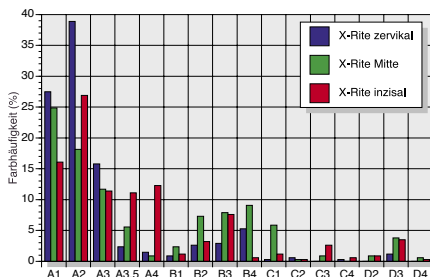


Abb. 16. Farbverteilung X-Rite abhängig vom Zahndrittel.

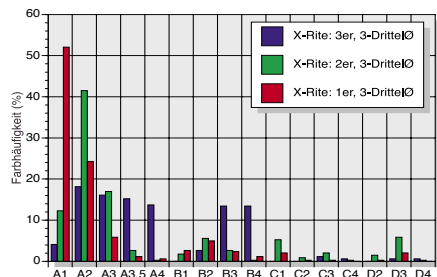


Abb. 17. Farbverteilung X-Rite abhängig von Zahnart.

3.1.1.3 Farbverteilung des Rieth DSG4®

Abbildung 18 lässt erkennen, dass sich der Schwerpunkt der Verteilung beim DSG4® in der Farbgruppe der Töne A1 und A3 (im Durchschnitt Gruppe A 50,4%) und verstärkt bei den hellen bis mittleren B-Tönen (im Durchschnitt Gruppe B 35,1%) findet. Auffällig häufig ist der Ton C1 mit 16,4% im inzisalen Drittel vertreten.

Generell kommen C-Töne durchschnittlich in 12,0%, D-Töne in 2,5% vor, relativ selten der Ton A2 (5,0%).

Ein signifikanter (Farb-)Unterschied zwischen den Ergebnissen der drei Drittel wird mit dem Chi-Quadrat-Test auch hier festgestellt ($p < 0,001$).

Beim Untersuchen der Farbverteilung für die jeweiligen Zahnarten, stellt sich ein eindeutiges Maximum bei den mittleren Inzisivi bei A1 und hellen Tönen (B2, C1) dar. Bei den seitlichen Schneidezähnen ist dies bei B2 und hellen Tönen wie A1 und C1 der Fall. Die Eckzähne weisen ein Maximum bei A3, aber auch bei B3 und C3 auf (Abb. 19). Unabhängig vom Ort existiert ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“, $p < 0,001$).

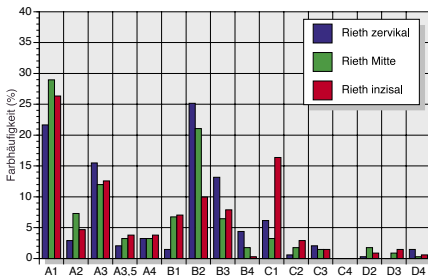


Abb. 18. Farbverteilung Rieth abhängig vom Zahndrittel.

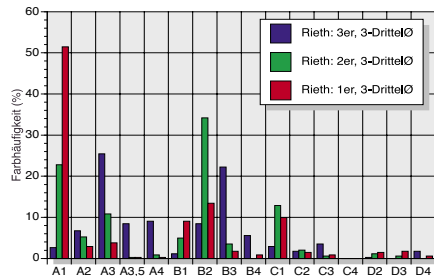


Abb. 19. Farbverteilung Rieth abhängig von Zahnart.

3.1.1.4 Farbverteilung bei Untersucher „Student“

Abbildung 20 zeigt, dass sich schwerpunktmäßig die Verteilung beim Studenten sowohl in der Farbgruppe der A-Töne mit durchschnittlich 77,4% findet, als auch bei den mittleren B-Tönen mit 18,8%. C- und D-Töne wurden selten festgestellt, im Mittel zu 2,6% und 1,2%. Mit dem Chi-Quadrat-Test wird im Gegensatz zu den Geräten kein signifikanter (Farb-)Unterschied ($p < 1,000$) zwischen den Ergebnissen der drei Drittel erkennbar. Dies wird sich weiter unten auch bei den übrigen Untersuchern zeigen.

Der Vergleich der Farbverteilung für die jeweiligen Zahnarten macht deutlich, dass sich ein eindeutiges Maximum bei den mittleren Schneidezähnen bei A1 und hellen

Tönen (B2, C1, bei den seitlichen Schneidezähnen bei A2 und ebenfalls hellen Tönen wie B2 und C1) einstellt. Bei den Eckzähnen existiert ein Maximum bei A3-A3,5, aber auch bei dunkleren B-Tönen (Abb. 21).

Weiterhin offenbart sich unabhängig vom Ort ein signifikanter Unterschied zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“, $p < 0,001$).

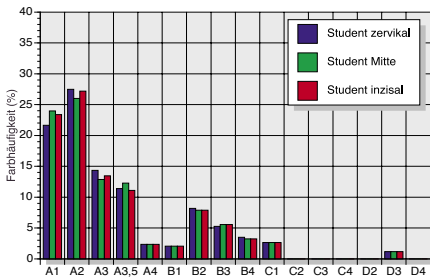


Abb. 20. Farbverteilung Student abhängig vom Zahndrittel.

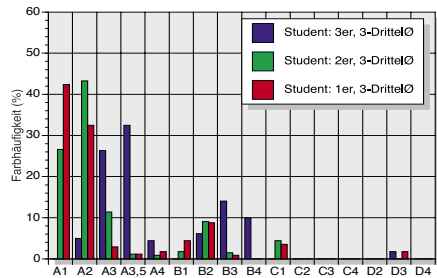


Abb. 21. Farbverteilung Student abhängig von Zahnart.

3.1.1.5 Farbverteilung bei Untersucher „Zahntechniker 1“

Schwerpunktmäßig befindet sich laut Abbildung 22 die Verteilung beim Zahntechniker 1 in der Farbgruppe der A-Töne (im Durchschnitt 77,0%), seltener bei den mittleren B-Tönen (im Durchschnitt 14,8%). C- und D-Töne werden nur selten, aber dennoch häufiger als vom Student bestimmt. Es sind im Durchschnitt 5,9% und 2,2%.

Die Farbverteilung für die jeweiligen Zahnarten lässt ein Maximum bei den mittleren Schneidezähnen bei A1, A2 und hellen Tönen wie B1, C1 erkennen. Ebenso ist dies bei den seitlichen Schneidezähnen bei A2 und C1 und bei den Eckzähnen bei A3,5 sowie auch dunkleren B-Tönen der Fall (Abb. 23). Mit dem Chi-Quadrat-Test kann kein signifikanter (Farb-)Unterschied zwischen den Ergebnissen der drei Drittel festgestellt werden ($p < 1,000$).

Schließlich zeigt sich unabhängig vom Zahndrittel ein statistisch signifikanter Unterschied in der Ergebnisverteilung zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“), $p < 0,001$.

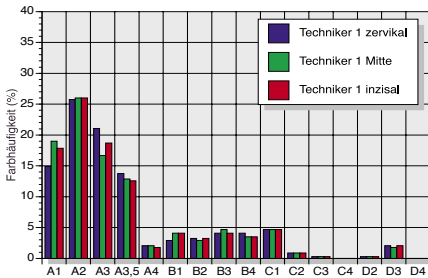


Abb. 22. Farbverteilung Zahntechniker 1 abhängig vom Zahndrittel.

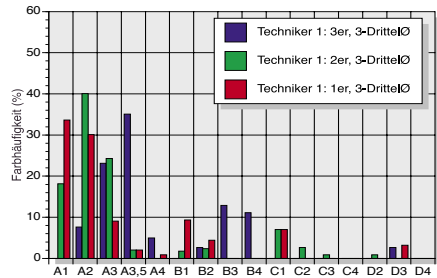


Abb. 23. Farbverteilung Zahntechniker 1 abhängig vom Zahnart.

3.1.1.6 Farbverteilung bei Untersucher „Zahntechniker 2“

Die Farbverteilung beim Zahntechniker 2 wird in *Abbildung 24* dargestellt: Hier befindet sich schwerpunktmäßig die Verteilung in der Farbgruppe der A-Töne (im Durchschnitt 68,7%), hingegen nicht so häufig bei den mittleren B-Tönen (im Durchschnitt 24,9%). Auch C- und D-Töne werden seltener mit im Durchschnitt 4,2% und 2,3% der Ergebnisse bestimmt.

Mit dem Chi-Quadrat-Test wird wie auch bei den beiden vorigen Untersuchern kein signifikanter (Farb-)Unterschied zwischen den Ergebnissen der drei Drittel festgestellt ($p < 1,000$).

Für die jeweiligen Zahnarten, stellt sich hinsichtlich der Farbverteilung ein Maximum bei den mittleren Schneidezähnen bei A1 und weniger ausgeprägt bei B2 dar. Bei den seitlichen Schneidezähnen wurden vermehrt die Werte A2 und B2 bestimmt. Bei den Eckzähnen waren es A3-A3,5, aber auch dunklere B-Töne (*Abb. 25*).

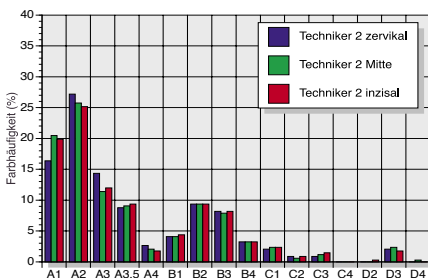


Abb. 24. Farbverteilung Zahntechniker 2 abhängig vom Zahndrittel.

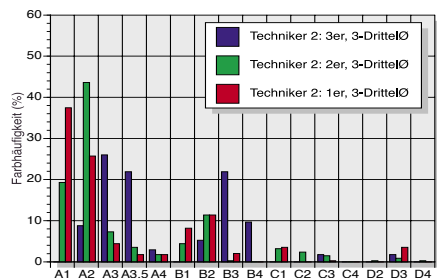


Abb. 25. Farbverteilung Zahntechniker 2 abhängig vom Zahnart.

Unabhängig vom Ort besteht auch hier ein mit $p < 0,001$ signifikanter Unterschied zwischen den drei Zahnarten (Test nach „Exakte Form Monte Carlo Signifikanz“).

3.1.2 Vergleich der Farbverteilung zwischen den Methoden

Beim generellen Vergleich der Farbverteilung aller sechs obigen Methoden sowohl für jedes einzelne Drittel, als auch für jede Zahnart, wurde jeweils ein signifikanter Unterschied festgestellt (jeweils $p < 0,001$). Beim Vergleich der Rechts-/Links-Verteilung der Farbwerte traten erwartungsgemäß bei keiner Methode signifikante Unterschiede zwischen 1. Quadranten und 2. Quadranten auf (Spannweite von $p < 0,108$ bis $p < 0,923$). Da bei diesen Untersuchungen die minimale erwartete Häufigkeit für den statistischen Test < 1 ausgefallen ist, wurde die Exakte Form des Chi-Quadrat-Tests gewählt.

Zum Vergleich der Farbverteilung zwischen den sechs Methoden wurde bei jeder Methode das prozentuale Vorkommen jedes Farbtons mit dem Vorkommen der Farbe im 6-Methoden-Durchschnitt verglichen (Binomial-Vergleich). Hierbei korrelierte das X-Rite-Gerät sehr gut mit der durchschnittlichen Farbverteilung: in 7 von 16 möglichen Fällen stimmte das Farbvorkommen beim ShadeVision™ mit dem durchschnittlichen Vorkommen der einzelnen Farben statistisch überein. Bei den übrigen Geräten traf dies in lediglich 1 (MHT) oder 2 (Rieth) Fällen zu.

Dieser Binomial-Vergleich zeigt ebenso, dass Student, Zahntechniker 1 und Zahntechniker 2 mit jeweils 5, 3 und 6 dem Durchschnitt entsprechenden Farbhäufigkeiten besser mit der durchschnittlichen Farbverteilung übereinstimmen als die Geräte von MHT und Rieth.

Die Streuung der Farbverteilung (Spannweite) zwischen den verschiedenen Dritteln der Zähne lässt sich für die verschiedenen Methoden (Abb. 26) entnehmen. Es besteht ein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Gruppe der Farbbestimmungssysteme mit der der Menschen ($p < 0,001$). Sämtliche Geräte weisen - wie oben bereits erwähnt - signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Drittel auf, sämtliche Untersucher jedoch nicht.

Für die Streuung (Spannweite) der Ergebnisse zwischen den 3 Zahnarten bestehen keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der sechs Methoden (Abb. 27, $p < 1,000$). Sämtliche Methoden weisen erwartungsgemäß signifikante Farbverteilungsunterschiede zwischen den Zahnarten auf (s. oben).

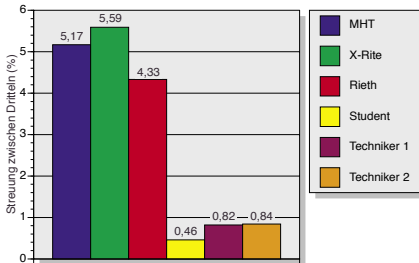


Abb. 26. Spannweite/Streuung zwischen den Dritteln.

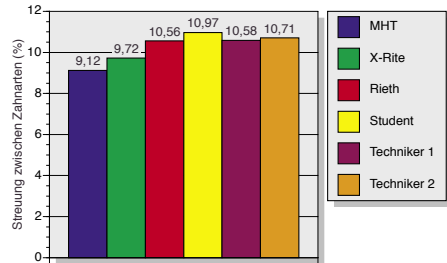


Abb. 27. Spannweite/Streuung zwischen den Zahnarten.

3.2 Reproduzierbarkeit bei Doppelmessungen

3.2.1 Reproduzierbarkeit innerhalb der Methoden

3.2.1.1 Reproduzierbarkeit von Messungen des SpectroShade™

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Doppelmessungen an 26 Probanden mit je 6 Zähnen/3 Dritteln) liegt im Schnitt für das MHT-Gerät bei 72,0%. Aufgeschlüsselt entsprechen dem 65,4%, 79,5% und 71,2% bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel (Abb. 28). Die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln unterscheidet sich bei dieser Methode signifikant, wie der Chi-Quadrat-Test beweist ($p < 0,020$). Dies steht im Gegensatz zu den folgenden Methoden (s. unten).

Bei den mittleren Inzisivi ist eine Messung in 66,0% der Fälle reproduzierbar, bei seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 71,8% und 78,2% (Abb. 29). Vergleicht man hierbei die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den 3 Zahnarten, so stellt man mit dem Chi-Quadrat-Test keine Signifikanz fest ($p < 0,057$).

3.2.1.2 Reproduzierbarkeit von Messungen des ShadeVision™

Im Schnitt liegt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Doppelmessungen) für das X-Rite-Gerät bei 72,0%, d.h. bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel 76,3%, 73,7% und 66,0% (Abb. 28). Die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln weist - mit dem Chi-Quadrat-Test überprüft - keine Signifikanz auf ($p < 0,110$).

Bei den mittleren Inzisivi ist eine Messung in 77,6% der Fälle reproduzierbar, bei seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 69,2% und 69,2% (Abb. 29).

Die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Zahnarten ist nicht signifikant unterschiedlich ($p < 0,167$).

3.2.1.3 Reproduzierbarkeit von Messungen des DSG4®

Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Doppelmessungen) liegt im Schnitt für das Rieth-Gerät bei 66,3%, bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel bei 68,6%, 68,0% und 62,2% (Abb. 28). Beim Vergleich der Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln wird keine Signifikanz offenkundig ($p < 0,383$).

Eine Messung ist bei den mittleren Inzisivi in 71,8% der Fälle reproduzierbar, bei seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 65,4% und 61,5% (Abb. 29).

Die Reproduzierbarkeit (alle drei Drittel) weist keine signifikanten Unterschiede zwischen den Zahnarten auf (Chi-Quadrat-Test, $p < 0,118$).

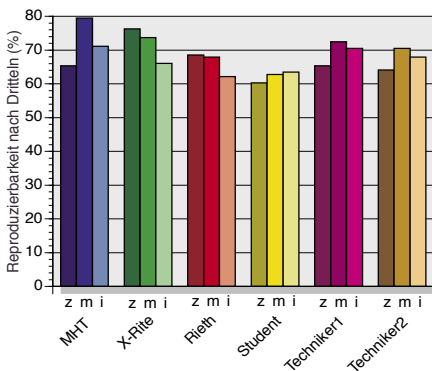


Abb. 28. Reproduzierbarkeit zwischen Zahndritteln. z=zervikal, m=Mitte, i=inzisal.

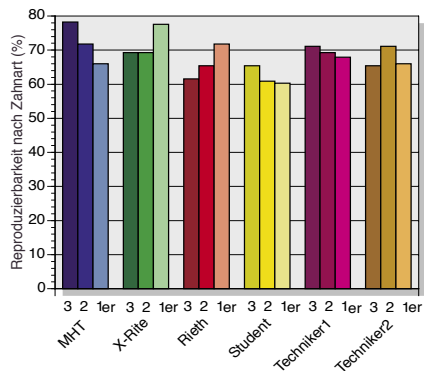


Abb. 29. Reproduzierbarkeit zwischen Zahnarten.

3.2.1.4 Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Studenten

Die Wiederholbarkeit der Ergebnisse (Doppelbestimmungen) liegt für den Studenten bei 62,2% im Mittel. Bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel beträgt sie 60,3%, 62,8% und 63,5% (Abb. 28). Betrachtet man die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln, so stellt der Chi-Quadrat-Test keine Signifikanz fest.

Eine wiederholte Farbabmusterung führt bei den mittleren Inzisivi in 60,2% der Fälle zum selben Ergebnis, bei den seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 60,9% und 65,4% (Abb. 29).

Die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Zahnarten (alle drei Drittel) ist laut Chi-Quadrat-Test nicht signifikant ($p < 0,675$).

3.2.1.5 Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Zahntechnikers 1

Die Duplizierbarkeit der Ergebnisse (Doppelbestimmungen) liegt bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel bei 65,4%, 72,4% und 70,5%, also durchschnittlich 69,4% (Abb. 28). Betrachtet man die Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln, stellt man mit dem Chi-Quadrat-Test keine signifikanten Differenzen fest ($p < 0,754$).

Eine Farbbestimmung ist für Zahntechniker 1 bei den mittleren Inzisivi in 68,0% der Fälle reproduzierbar, bei seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 69,2% und 71,2% (Abb. 29).

Die Reproduzierbarkeitsrate weicht zwischen den verschiedenen Zahnarten (alle drei Drittel) nicht signifikant ab ($p < 0,826$).

3.2.1.6 Reproduzierbarkeit von Farbbestimmungen des Zahntechnikers 2

Für den Zahntechniker 2 liegt die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse (Doppelbestimmungen) durchschnittlich bei 67,5%, bei zervikalem, mittlerem und inzisalem Drittel bei 64,1%, 70,5% und 68,0% (Abb. 28). Die Streuung/Spannweiten durch die verschiedenen Drittel für die sechs Methoden zusammengefasst, zeigt Abbil-

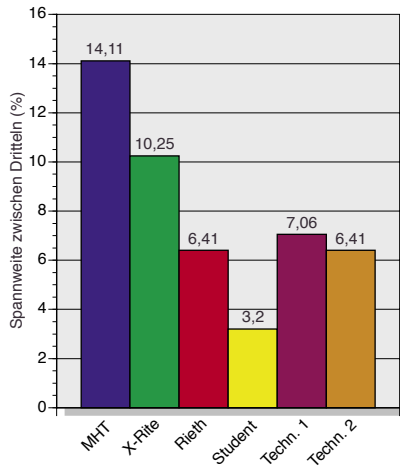


Abb. 30. Spannweite der Reproduzierbarkeit zwischen den Zahndritteln.

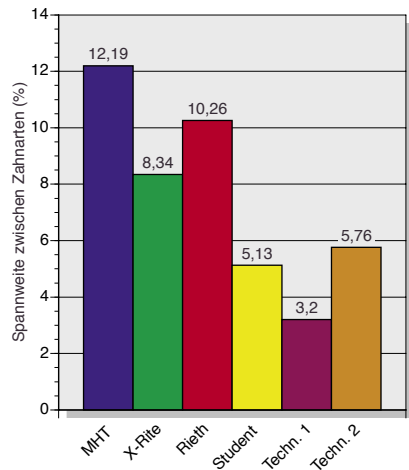


Abb. 31. Spannweite der Reproduzierbarkeit zwischen den Zahnarten.

dung 30. Mit dem Chi-Quadrat-Test stellt man beim Vergleich der Reproduzierbarkeitsrate zwischen den Dritteln keine Signifikanz fest ($p < 0,477$).

Eine Bestimmung des Farbtones ist bei den mittleren Inzisivi in 66,0% der Fälle reproduzierbar, bei seitlichen Schneidezähnen und Eckzähnen in 71,2% und 65,4% (Abb. 29).

Zwischen den Zahnarten (alle drei Drittel) ist laut Chi-Quadrat-Test die Reproduzierbarkeitsrate nicht signifikant unterschiedlich ($p < 0,491$). Die Streuung/ Spannweiten - durch die Zahnarten verursacht - zusammengefasst, zeigt für die sechs Methoden *Abbildung 31*.

3.2.2 Vergleich der Reproduzierbarkeit zwischen den Methoden

Beim generellen Vergleich des Reproduktionsvermögens zwischen den sechs Methoden unabhängig von Ort und Zahnart, besteht ein signifikanter Unterschied ($p < 0,040$). Hierbei liegt die Gruppe der Geräte im Reproduktionsvermögen signifikant höher als die der Menschen (Abb. 32, $p < 0,023$). Die Fehlerbalken im Diagramm kennzeichnen die Spannweite der Ergebnisse zwischen den drei Dritteln.

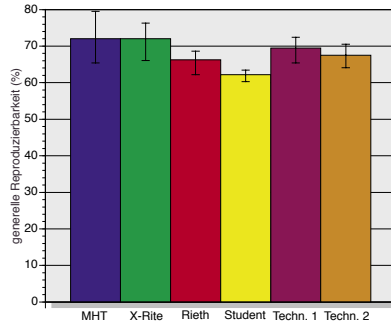


Abb. 32. Gemittelte Ergebnisse aus Abb. 28: Generelle Reproduzierbarkeit der Methoden. Die Fehlerbalken geben die Spannweite (durch versch. Drittel) an.

MHT- und X-Rite-Gerät besitzen eine signifikant höhere Reproduzierbarkeitsrate als die Gruppe der Menschen (jeweils $p < 0,017$). Das Rieth-Gerät unterscheidet sich hingegen nicht signifikant vom menschlichen Reproduktionsvermögen ($p < 0,499$).

3.3 Übereinstimmung der Methoden untereinander

Den letzten Themenkomplex der Auswertung stellt die Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen den Methoden dar. Da es sich bei den untersuchten Zähnen um keine Muster mit bekanntem Vita-Farbtönen handelt und so die wahre Farbe des Probandenzahnes mit keinem Verfahren zweifelsfrei festgestellt werden kann, also kein Goldstandard existiert, wurde für jeden Zahn die Farbe festgelegt, die von der Mehrzahl der sechs Methoden festgestellt wurde und nun im Folgenden „Mehrheitsmeinung“ genannt wird. Zähne, bei denen keine eindeutige Mehrheit zu erhalten war, weil beispielsweise drei Methoden A1 anzeigten und drei Methoden A2, wurden nicht berücksichtigt. Dies war bei 14,8%, also 159 von 1026 Ergebnissen der Fall. Statistische Auswertungen, die die Mehrheitsmeinung als Gegenstand beinhalten, konnten nicht durchgeführt werden, da die Mehrheitsmeinung sich aus den Mengen zusammensetzt, mit denen sie verglichen werden sollte und ein statistischer Vergleich sich daher verbietet.

3.3.1 Übereinstimmung einer Methode mit den übrigen

Einen Überblick der Übereinstimmungen einer Methode mit den übrigen fünf gibt - unabhängig von Zahndrittel und Zahnart - Abbildung 33. Die Fehlerbalken kennzeichnen die je nach Zahndrittel variierende Spannweite der Ergebnisse.

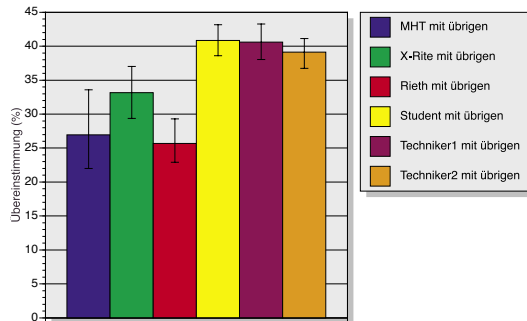


Abb. 33. Generelle Übereinstimmungen mit den übrigen Methoden. Die Fehlerbalken geben die Spannweite (durch versch. Drittel) an.

3.3.1.1 Übereinstimmungen des MHT SpectroShade™

Das MHT-Gerät stimmte mit den übrigen Methoden in 27,0% der Farbbestimmungen überein, unabhängig von Zahnart und -drittel. Mit der Farb-Mehrheitsmeinung stimmte das Messgerät zu 43,9% überein.

Die Übereinstimmungen mit den übrigen Methoden sind *Abbildung 34a* zu entnehmen.

3.3.1.2 Übereinstimmungen des X-Rite ShadeVision™

Mit den übrigen Methoden korrespondierten die Ergebnisse in 33,2% der Fälle, dies unabhängig von Zahnart und -drittel. Mit der Farb-Mehrheitsmeinung stimmte das Messgerät zu 55,9% überein. Siehe hierzu *Abbildung 34b*.

3.3.1.3 Übereinstimmungen des Rieth DSG 4

Unabhängig von Zahnart und -drittel kongruierte das Rieth-Gerät mit den übrigen Methoden in 25,7%. Mit der Farb-Mehrheitsmeinung stimmte dieses Gerät zu 41,1% überein.

Die Übereinstimmungen mit den übrigen Methoden sind aus *Abbildung 34c* abzulesen.

3.3.1.4 Übereinstimmungen Student

Die Farbempfindung des Studenten deckte sich mit den übrigen Methoden in 40,9% der Resultate, unabhängig von Zahnart und -drittel. Mit der Farb-Mehrheitsmeinung korrelierte der Untersucher zu 70,0%.

Korrelationen mit den übrigen Methoden sind aus *Abbildung 34d* ersichtlich.

3.3.1.5 Übereinstimmungen Zahntechniker 1

Die vom Zahntechniker 1 ermittelten Farbwerte entsprachen - unabhängig von Zahnart und -drittel - in 40,6% denen der übrigen Methoden. Mit der Farb-Mehrheitsmeinung stimmte der Untersucher zu 70,1% überein.

Die Übereinstimmungen mit den übrigen Methoden zeigt *Abbildung 34e*.

3.3.1.6 Übereinstimmungen Zahntechniker 2

Der Zahntechniker 2 stimmte mit den übrigen Methoden in 39,1% der Messungen überein, unabhängig von Zahnart und -drittel. Die Farbbestimmungen des Untersuchers deckten sich in 67,7% mit der Farb-Mehrheitsmeinung.

Übereinstimmungen mit den übrigen Methoden sind *Abbildung 34f* zu entnehmen.

Abb. 34a-f, Abb. 35:

Generelle Übereinstimmungen der jeweiligen Methoden mit den übrigen/mit der Mehrheitsmeinung. Die Fehlerbalken geben die Spannweite (durch versch. Drittel) an.

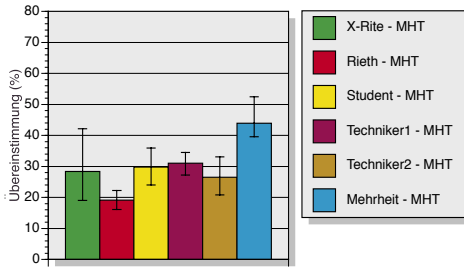


Abb. 34a. Übereinstimmungen MHT.

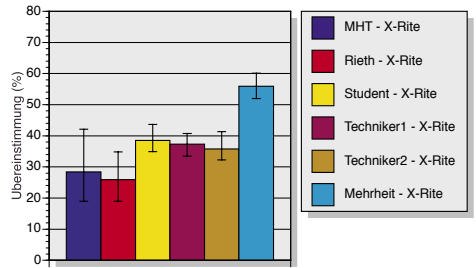


Abb. 34b. Übereinstimmungen X-Rite.

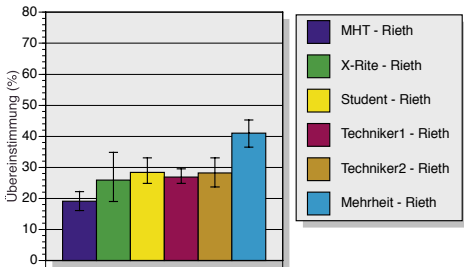


Abb. 34c. Übereinstimmungen Rieth.

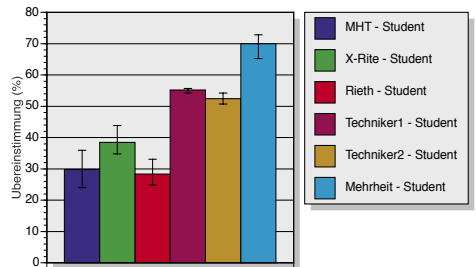


Abb. 34d. Übereinstimmungen Student.

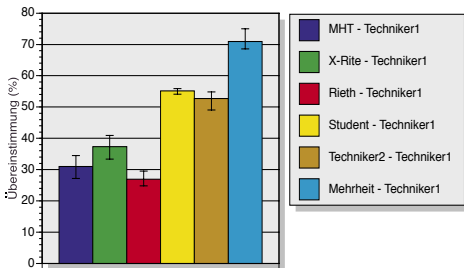


Abb. 34e. Übereinstimmungen Zahntechniker 1.

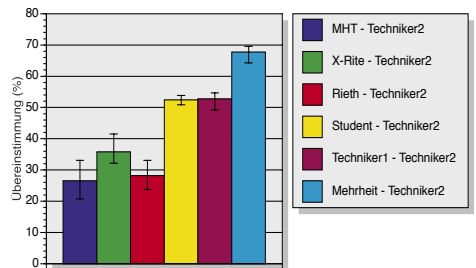


Abb. 34f. Übereinstimmungen Zahntechniker 2.

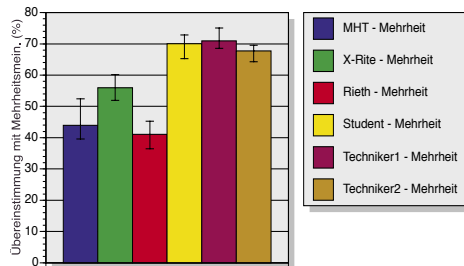


Abb. 35. Übereinstimmungen der Methoden mit der Mehrheitsmeinung (aus Abb. 34a-f zusammengefasst).

3.3.2 Übereinstimmungen der verschiedenen Gruppen

3.3.2.1 Übereinstimmungen der sechs Methoden mit der Mehrheitsmeinung

Abbildung 35 (vorige Seite) zeigt zusammenfassend einen Vergleich der Übereinstimmungen der Methoden mit der Mehrheitsmeinung. Die Werte hierfür wurden aus Abbildungen 34a-f extrahiert. X-Rite nimmt unter den Geräten mit 55,9% den ersten Platz ein, MHT mit 43,9% den zweiten Platz und Rieth mit 41,1% den dritten. Die Untersucher Student, Zahntechniker 1 und Zahntechniker 2 weisen in 70,0%, 70,1% und 67,7% Übereinstimmungen auf.

Die Gruppe der Geräte korrelierte untereinander im Schnitt in 28,6%, die Gruppe der menschlichen Begutachter immerhin in 40,2%.

Alle drei Geräte kamen in 9,9%, alle drei Betrachter in 36,7% und alle sechs Methoden in 3,3% zum gleichen Ergebnis, d.h. Sie waren ausnahmslos einer Meinung (Abb. 36).

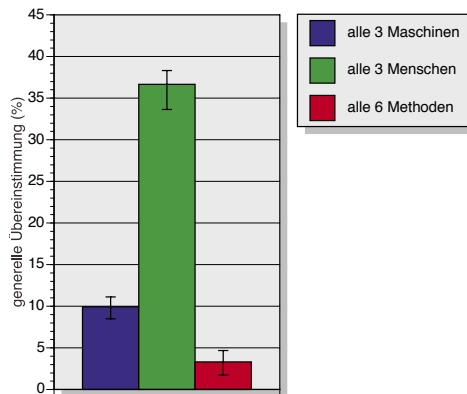


Abb. 36. Übereinstimmungen aller Geräte, Menschen, aller 6 Methoden.

Abbildung 37 visualisiert die nach Größe geordneten Übereinstimmungsraten der 21 denkbaren Methodenkombinationen.

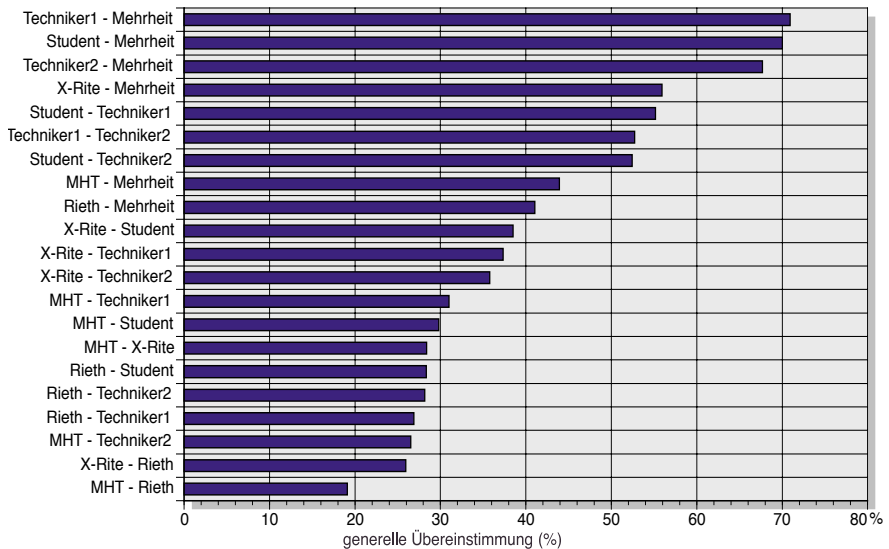


Abb. 37. Übereinstimmungen aller Kombinationen.

3.3.2.2 Übereinstimmungen der Geräte mit der Gruppe der Menschen

Die Übereinstimmungsraten von einzelnen Farbbestimmungssystemen mit der Gruppe der Menschen betragen für das MHT-Gerät 29,1%, das X-Rite-Gerät 37,1% und das Rieth-Gerät 27,8% (bezogen auf 3078 Ergebnisse). Die Paar-Übereinstimmungsrate der drei Menschen untereinander liegt bei 52,9% (Abb. 38 und Abb. 39).

Die Übereinstimmungsrate jedes einzelnen Gerätes mit der Gruppe der Menschen ist signifikant niedriger als die der Menschen untereinander (jeweils $p < 0,001$).

Dies gilt auch für das Drittel „Mitte“ separat betrachtet ($p < 0,001$).

Untereinander unterscheiden sich die Übereinstimmungsrate von Maschinen mit Untersuchern (s. oben) ebenfalls signifikant (Chi-Quadrat-Test nach Pearson mit Alpha-Adjustierung nach Bonferroni auf $p = 5/3 = 1,67$): Das X-Rite-Gerät weist eine signifikant höhere Rate auf als MHT und Rieth (jeweils $p < 0,001$). MHT und Rieth unterscheiden sich hingegen nicht signifikant ($p < 0,259$).

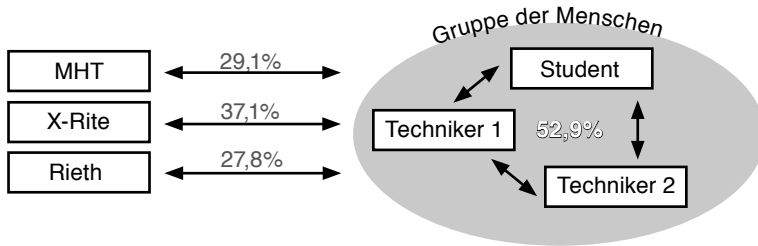


Abb. 38. Diagramm Übereinstimmungen der einzelnen Geräte mit der Gruppe der Menschen.

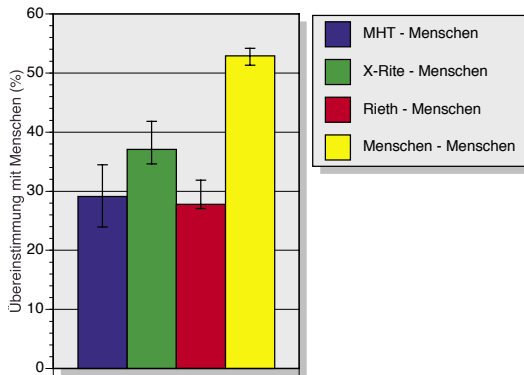


Abb. 39. Übereinstimmungen der Geräte mit der Gruppe der Menschen.

4 Diskussion

4.1 Methodenkritik

Bei der Versuchsdurchführung wurde insbesondere auf möglichst praxisnahe Bedingungen Wert gelegt, um die Farbmess-Einheiten objektiv im klinischen Einsatz, für den sie schließlich auch konstruiert wurden, beurteilen zu können. Generell hätten Laborversuche mit Messstativen (LEIBROCK et al. 1995), Schablonen (DOUGLAS 1997, KOHLMAYER und SCHELLER 2002), künstlichen Zähnen (FABER und SCHLEGEL 1995, KOHLMAYER und SCHELLER 2002) u.ä. sicher bessere Ergebnisse erzielt, repräsentieren aber nach Meinung des Verfassers die Alltagstauglichkeit nur unzureichend, da u.a. der Aufwand für die tägliche Anwendung überproportional groß und somit unpraktikabel wäre.

Hieraus resultieren folglich gewisse Ungenauigkeiten, wie unterschiedliche Messwinkel und Messorte (v.a. beim DSG4®), innerhalb des Messzeitraums minimal sich verändernde Zahnfarben, unterschiedliche Speichelbenetzung, leicht veränderte Lichtverhältnisse trotz überstrahlender Tageslicht-Lampen etc.

Um Handhabungstoleranzen der Geräte zu minimieren, wurden von der messenden Person wie beschrieben umfangreiche Vorversuche durchgeführt.

Für diese Studie fand für sämtliche visuellen Farbbestimmungen ausschließlich der mit dem DSG4® gelieferte Vita Classical-Farbfächer Anwendung. Dieser Fächer ist von der Firma Rieth speziell in das hier benutzte DSG4® eingelezen worden, während die anderen zwei Geräte eine Farbfächerdatenbank besitzen, die auf einem Mittelwert mehrerer vom jeweiligen Hersteller eingelezener Farbringe basieren. Das Vita Classical-Farbmustersystem weist sicher wie erläutert gewisse Nachteile auf, ist aber de facto Standard und wurde hier gewählt, zumal auch keine L*a*b*-Werte zur Auswertung dienen konnten.

Bei der im Wochenabstand zweimaligen visuellen Abmusterung zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit wurde keine Blindstudie durchgeführt, weshalb eine höhere Reproduzierbarkeitsrate bei den menschlichen Begutachtern wegen unterbewusst gemerkter Probanden/Farbsonkombinationen nicht ausgeschlossen werden kann.

Es ist anzumerken, dass die hier festgestellten Farbverteilungen der Probandenzähne nicht repräsentativ für die Bevölkerung sind, da über 50% der Untersuchten in der Altersgruppe zwischen 24 und 26 Jahren lagen und so die spezifischen Zahnfarben der jüngeren und älteren Menschen (vgl. HASSAN 2000, MAYEKAR 2001) unterrepräsentiert sind.

Die Grundlage für die Auswertung war zumeist die Mittelung der Ergebnisse aus den einzelnen Dritteln. Es wurden aber ebenfalls die Auswertungen mit ausschließlich dem mittleren Zahndrittel durchgeführt. Dies brachte aber generell keine signifikanten Unterschiede hervor.

Die von YAP et al. (1997, 1999) getroffene Feststellung, dass die Qualität der Farbbestimmung durch das menschliche Auge und computergestützte Colorimetrie farbtönenabhängig sei, konnte in dieser Studie leider nicht überprüft werden, da die statistischen Häufigkeiten bestimmter seltener Farbtöne nicht ausreichten, um verlässliche Aussagen treffen zu können.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Diskussion Farbverteilung

Die Farbverteilung innerhalb der Methoden (Abb. 13) weist hinsichtlich der Zahndrittel bei sämtlichen Geräten signifikante Unterschiede auf, wie auch bei O'BRIEN's Versuchen (O'BRIEN et al. 1997). Nicht so jedoch bei den drei menschlichen Untersuchern (Abb. 26). Dies deutet darauf hin, dass der Mensch an seine physiologischen Grenzen stößt und meist nicht in der Lage ist, einer sehr kleinen Teilfläche am Patientenzahn eine entsprechende Teilfläche der Musterzahnfläche zuzuordnen. Die computergestützte Colorimetrie weist hier einen eindeutigen Vorteil auf.

Auch die Feststellung von SCHWABACHER und GOODKIND (1990), dass aufgrund guter Übereinstimmung mit den natürlichen Zahnfarben vor allem A-Töne (A2, A3, A3,5) gehäuft vorkommen, findet ihre Bestätigung.

Bei jeder einzelnen Methode ist die Farbverteilung bezüglich der Zahnart signifikant unterschiedlich, was die Tatsache unterstreicht, dass Eckzähne im Vergleich zu den Inzisivi generell dunklere Farbtöne aufweisen. Dies deckt sich ebenfalls mit klinischen Beobachtungen und den Ergebnissen von GOODKIND et al. (1987).

MHT SpectroShade™

Beim Betrachten der Häufigkeit der festgestellten Farbtöne ist augenfällig, dass beim MHT-Gerät - immer unabhängig von Zahndrittel und Zahnart betrachtet - die mittleren A-Töne mit 75,1%* sehr stark vertreten sind und ein vermehrtes Vorkommen von Ton D3 (14,1%) zu beobachten ist. Wenn das Gerät D3 zeigt, geben X-Rite, Student, Zahntechniker 1 und Zahntechniker 2 zu 51,9%, 75,3%, 75,3% und 74% A-Töne an, überwiegend A1-A3. Das DSG4® dagegen in dieser Situation mit 53,2% (77 von 144 Fällen) bevorzugt helle B-Töne (B1-B2), die übrigens von diesem Gerät überdurchschnittlich oft wiedergegeben werden (s. unten). Die Häufung des Farbtönen D3 beim SpectroShade™ kann nur schwer erklärt werden, zumal die farbempfindungsmäßig nächstgelegenen Töne C2 und D4 (kleinste ΔE -Werte, s. Tab. 6, Anhang) beim MHT-Gerät keine auffälligen Abweichungen vom Durchschnitt zeigen.

X-Rite ShadeVision™

Das X-Rite-Gerät stimmt von seiner Farbverteilung am besten mit den übrigen Methoden überein, insbesondere mit den drei menschlichen Untersuchern. Es zeigt im Vergleich mit diesen keine auffälligen Häufungen oder Fehlstellen. Dies bestätigt sich auch im Binomial-Vergleich der einzelnen Farbhäufigkeiten des ShadeVision™ mit dem durchschnittlichen Farbvorkommen aller sechs Methoden: Bei 7 von 16 möglichen Farben weist dieses Gerät keine signifikanten Abweichungen vom durchschnittlichen Farbvorkommen auf (s. oben) und liegt somit deutlich über dem Durchschnitt von nur 3,4 Farben der übrigen fünf Methoden.

* Die im Folgenden genannten Prozentzahlen sind immer auf die Gesamtzahl von 1026 Ergebnissen bezogen, wenn nicht anders beschrieben.

Rieth DSG4®

Das Rieth DSG4® misst auffällig viele helle Farbtöne. Beispielsweise beträgt der Anteil von A1, B2 und C1 17,6%, dem ein Anteil von 8,8% bei den restlichen 5 Methoden gegenübersteht. A2 hingegen kommt mit 5% im Vergleich zu den übrigen Methoden mit 25,7% im Mittel seltener vor.

Zeigt das MHT-Gerät auffällig häufig D3, so sticht beim Rieth-Gerät v.a. die Verteilung von B2 ins Auge. Die übrigen Methoden stellen an diesen Zähnen helle A-Töne fest, die bei den eben genannten Geräten unterrepräsentiert sind. Bei MHT sind dies A1, bei Rieth A2, was den Verdacht nahelegt, das fälschlicherweise D3 (MHT) bzw. B2 (Rieth) anstelle von hellen A-Farben bestimmt wird.

Diese gerätespezifischen Schwerpunkte in der Farbverteilung lassen sich eventuell mit Schwankungen bei den eingelesenen Farbmusterzähnen (s. Einleitung) oder unterschiedlichen Farbberechnungsalgorithmen der jeweiligen Geräte erklären, die die Grenze der Entscheidung für die eine oder die andere Farbe unterschiedlich ziehen und die Parameter Farbton, Sättigung und Helligkeit unterschiedlich gewichten. Ein Einfluss der Farbe, also des reflektierten Spektrums, ist von der Messphysik her bei fehlerhafter Abstimmung der Hardware/Filterkombination theoretisch ebenfalls denkbar. Nicht zuletzt könnte man aber auch in einer ungünstigen Zahnfarbe der Probanden, die im Farbraum genau zwischen den Shade-Tabs liegt und so eine eindeutige Zuordnung erschwert, den Fehler suchen. Letztere Vermutung würde allerdings eher auf das DSG4® mit den Farben B2 und A2 zutreffen, als auf das SpectroShade™, da beim SpectroShade™ die Verteilung der D3 empfindungsgemäß nächstgelegenen Farbtöne C2 und D4 keine Auffälligkeiten aufweisen. Anders beim DSG4®: Studien von OKUBO et al. (1998) und GEARY und KINIRONS (1999) zeigten, dass auch beim Abmustern durch Menschen das Farbpaar B2-A2 oft nicht eindeutig unterscheidbar und daher problematisch ist.

Es lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die menschlichen Untersucher untereinander ein sehr homogenes Verteilungsmuster aufweisen, wie es so bei der Gerätegruppe nicht zu finden ist (s. oben und *Abb. 13*). Besondere Abweichungen

von den durchschnittlichen Farbwerten sind nur bei den Geräten der Firmen MHT und Rieth auffällig geworden.

4.2.2 Diskussion Reproduzierbarkeit

Bei der Reproduzierbarkeit von Messungen gibt es zwischen den sechs Methoden statistisch signifikante Unterschiede (Abb. 31). Hierbei liegen die Geräte mit je 72% (mit Ausnahme des Rieth DSG4®: 66,2%) deutlich über der Gruppe der menschlichen Untersucher mit 66,4% im Durchschnitt. Hierbei war die Reproduzierbarkeitsrate des unerfahreneren Studenten mit 62,2% tendenziell unterdurchschnittlich, was die Ergebnisse von CULPEPPER (1970), FABER und SCHLEGEL (1995) und O'BRIEN und NILSSON (1997) bestätigen kann, dass die Farbbestimmung durchaus von der Erfahrung des Begutachtenden beeinflusst wird. Eine Studie von HAMMAD (2003) stellte unter vergleichbaren Bedingungen für den Vita Classical-Fächer für ungeübte Personen eine Reproduzierbarkeit von 35% und für geübte Personen von 62% fest, was im Grundsatz durch die Ergebnisse dieser Studie bestätigt wird. CULPEPPER (1970) ermittelte hierbei in seinen Untersuchungen von zahnmedizinischem Personal und Musterzähnen lediglich Raten von 22% bis 58%.

Das vergleichsweise ungünstige Abschneiden des DSG4® in dieser Disziplin ist wohl auf freihändige Farbbestimmung ohne fixierbare Position des Messkopfes mit Hilfe einer Schablone zurückzuführen.

Es ließ sich beim Vergleich bei fünf der sechs Methoden kein signifikanter Einfluss von Zahndrittel (Abb. 28) und Zahnart (Abb. 29) auf die Fähigkeit zur Reproduktion erkennen. Die Ausnahme bildet das MHT SpectroShade™:

Als einziges Gerät weist es signifikante Unterschiede in der Reproduzierbarkeit in den einzelnen Dritteln auf (Abb. 28), die nicht eindeutig erklärt werden können. Im mittleren Drittel ist die Reproduzierbarkeitsrate mit 79,5% überraschend hoch (zervikal 65,4%, inzisal 71,2%). Als beeinflussende Faktoren könnten im zervikalen Drittel Gingivareflexionen und im inzisalen Drittel Transluzenzen der Schneidekante diskutiert werden, die bei der Zweitmessung aufgrund geringfügig

anderer Messwinkel auftreten. PAUL et al. (2002) stellten in ihren Untersuchungen des MHT-SpectroShade™ neben einem Messfehler von übrigens $\Delta E=0,48$ eine Reproduzierbarkeit zweier Messungen von sehr hohen 96,7% fest (hier 72,0%), für Menschen eine Wiederholbarkeit von durchschnittlichen 73,3% (hier 66,4%). Die Fallzahlen waren bei dieser Studie aber mit 30 Zähnen/Probanden deutlich geringer, zudem wurde nur ein kreisförmiger Bereich im mittleren Zahndrittel zur Auswertung herangezogen, die Doppelmessungen wurden unmittelbar hintereinander durchgeführt und der für die visuelle Abmusterung verwendete Fächer wurde speziell vorher eingelesen. Die vom Hersteller vorgegebene Musterdatenbank fand also keine Anwendung.

Bei den angewendeten Methoden spielen die Platzierung des Zahnes im Zahnbogen (Erreichbarkeit mit dem Messkopf), Wölbung der Zahnoberfläche, Gingivareflexion und Transluzenz der Inzisalkante im Allgemeinen keine signifikante Rolle. Eine Ausnahme bildet wie erläutert das SpectroShade™.

Die Streuungen (Spannweite) der einzelnen Methoden bezüglich der Reproduzierbarkeitsunterschiede zwischen den Dritteln (Abb. 30) verdeutlichen, dass die menschlichen Untersucher unter dem Durchschnitt der Geräte liegen, was wohl im Unvermögen, die Farben in den einzelnen Dritteln eines Zahnes unterscheiden zu können, begründet ist und so zu erwähnter niedrigerer Streuung beim Vergleich der drei Zahnregionen führt. Die Methode mit dem niedrigsten Wert (3,2%) ist der farbunerfahrenere Student, was in diesem Kontext so auch naheliegend erscheint.

Bemerkenswert ist ferner der niedrige Wert der Spannweite des Rieth-Gerätes von 6,4%, welcher sich der Größenordnung nach im Bereich der beiden Zahntechniker bewegt (7,1% und 6,4%). Als Folgerung ist das DSG4® also das Gerät, welches vom Messort auf einem Zahn am wenigsten beeinflusst wird. Vermutlich ist dies auf das Messprinzip zurückzuführen. Im Umkehrschluss muss man festhalten, dass bei den übrigen Systemen wohl prinzipbedingt doch ein gewisser Einfluss des Zahndrittels auf das Ergebnis besteht. Beim SpectroShade™ führte dies, wie oben bereits erwähnt, zu signifikanten Unterschieden, beim ShadeVision™ waren die Einflüsse nicht so groß, dass sich eine Signifikanz ergeben hätte.

Die Streuung (Spannweite) zwischen den Zahnarten (*Abb. 31*), macht deutlich, dass die drei Geräte mit durchschnittlich 10,3% über den Untersuchern mit durchschnittlich 4,7% liegen. Wahrscheinlich besteht also doch ein - wenn auch nicht signifikanter - Einfluss der Zahnart auf die Messergebnisse.

In vitro von KOHLMAYER und SCHELLER (2002) festgestellte Abweichungen des Rieth DSG4® im Inzisalbereich konnten so in vivo nicht nachvollzogen werden.

Die in vielen Publikationen nachgewiesene gute Reproduzierbarkeit bei Colorimetern und Spectrophotometern (SEGHI et al. 1989, SEGHI 1990, ISHIKAWA et al. 1994, DOUGLAS 1997, YAP et al. 1999) kann hingegen bestätigt werden, auch wenn die Wiederholbarkeit unter klinischen Bedingungen niedriger als im Labor ausfällt und nur wenig signifikant über der von Menschen liegt (*Abb. 32*).

4.2.3 Diskussion Übereinstimmungen der Methoden

4.2.3.1 Übereinstimmungen der Methoden mit den übrigen Methoden und der Mehrheitsmeinung

Bei der generellen Übereinstimmung der Methoden mit den übrigen weisen die menschlichen Untersucher mit durchschnittlich 40,2% (entspricht 2062 Übereinstimmungen von möglichen 5130) einen höheren Wert auf, als die Geräte mit 28,6% (1467 Übereinstimmungen von möglichen 5130). Dies zeigt *Abbildung 33*. Eine statistische Auswertung auf Signifikanzen ist in diesem Zusammenhang nicht möglich, da identische Methoden in beiden Vergleichspaaren enthalten wären.

Die Streuung (Spannweite) die durch die unterschiedlichen Drittel bedingt ist, beträgt für die drei Geräte 6,2% und 3,0% für die Menschen. Der niedrigere Wert von 3,0% lässt also eine niedrigere Streubreite der Übereinstimmung bei den Menschen erkennen.

Fälle, in denen die Gruppe der drei Geräte ausnahmslos einer Meinung war (Ergebnis MHT = Ergebnis X-Rite = Ergebnis Rieth), belaufen sich mit 9,9% (102 Fälle von möglichen 1026) auf deutlich weniger, als in der Gruppe der menschlichen Untersucher mit 36,7% (entspricht 377 Fällen von möglichen 1026). Alle

sechs Methoden schließlich waren sich beim Farbton in nur 3,3% der 1026 Fälle (entspricht 34 mal) einig (Abb. 36). Auch hier ist eine statistische Auswertung aus oben erläuterten Gründen nicht möglich. Dieses Ergebnis verdeutlicht eindrücklich die Unzulänglichkeiten bei der Farbbestimmung, ob nun von Menschen oder Geräten durchgeführt. Sind sich die Untersucher noch bei rund nur jedem dritten Zahn ausnahmslos einig, so ist es bei den Farbbestimmungssystemen nur rund jeder zehnte Zahn!

Interessant ist bei der Auswertung der Übereinstimmungen (Abb. 34), dass sämtliche Methoden immer mit der Mehrheitsmeinung am besten übereinstimmen. Das bedeutet, es gibt keine „Methode“, die die wahre Farbe eines Zahnes besser wiedergibt, als die Mehrheitsmeinung. Dennoch kann die Mehrheitsmeinung nicht als Goldstandard herangezogen werden, da die sie kein unabhängig von den Methoden zustandegekommener Wert und daher statistisch nicht verwertbar ist.

Unter den drei möglichen Kombinationen der Geräte ist die Übereinstimmung MHT mit X-Rite (28,4%, 291 Fälle von 1026 möglichen) besser als X-Rite mit Rieth (25,9%, 266 von 1026 möglichen Fällen) und besser als MHT mit Rieth (19,1%, 196 von 1026 möglichen Fällen).

Diese Rangfolge setzt sich beim Vergleich der Übereinstimmungen der einzelnen Methoden mit der Mehrheitsmeinung fort (Abb. 35: *Excerpt aus Abb. 34a-f*): Die menschlichen Untersucher mit 69,6% Übereinstimmung mit der Mehrheitsmeinung (Student: 70,0%, Zahntechniker 1: 70,93%, Zahntechniker 2: 67,7%) sind in dieser Disziplin deutlich stärker als die Geräte. Unter den Geräten bildet das ShadeVision™ von X-Rite mit 55,9% (entspricht 485 von möglichen 867 Übereinstimmungen) die Spitze, gefolgt von MHT's SpectroShade™ und Rieth's DSG4® mit 43,9% (entspricht 381 Fällen von möglichen 867) und 41,1% (entspricht 356 von möglichen 867 Fällen) Übereinstimmungsrate. Die Unterschiede in der Übereinstimmung zwischen MHT- und Rieth-Gerät fallen also deutlich geringer aus, als die zur X-Rite-Einheit. Auch hier ist wiederum eine statistische Auswertung aus oben erläuterten Gründen nicht möglich.

Die Ergebnisse für die Gruppe der Menschen liegen auch innerhalb der von FABER und SCHLEGEL (1999) festgestellten Häufigkeiten von 52% bis 80%. In deren Versuch sollten 188 Probanden verschiedener Farberfahrung unter Laborbedingungen gleiche Vita-Farbmuster einander visuell zuordnen. HORN et al. (1998) stellten mit nur sechs Tabs bei der Vita-Farbmusterzuordnung zu extrahierten Zähnen bei Ihren Probanden eine Übereinstimmung mit der Mehrheitsmeinung in 50%-65% der Fälle fest.

4.2.3.2 Übereinstimmung der Geräte mit der Gruppe der Menschen

Vergleicht man nun noch statistisch die Übereinstimmungsrate jedes einzelnen Gerätes mit der Gruppe der Menschen (vgl. *Abb. 38 und Abb. 39*) mit der durchschnittlichen Übereinstimmungsrate der drei Menschen untereinander, so lassen sich folgende Feststellungen treffen:

Die Übereinstimmungsrate jeder der drei Geräte mit den Untersuchern (MHT 29,1%, X-Rite 37,1%, Rieth 27,8% bezogen auf 3078 Ergebnisse) ist signifikant niedriger als die der Menschen untereinander (52,9%). Obige Signifikanzen gelten übrigens auch für das Drittel „Mitte“ separat betrachtet. Das Vermögen der Menschen, untereinander übereinzustimmen ist so erwiesenermaßen größer, als das zwischen Geräten und Untersuchern.

Die drei Farbbestimmungssysteme untereinander weisen bezüglich Ihrer Übereinstimmungsrate ebenfalls signifikante Unterschiede auf: Das X-Rite-Gerät besitzt eine signifikant höhere Übereinstimmungsrate mit der Gruppe der Menschen, als MHT und Rieth. Beide letztgenannten Geräte unterscheiden sich hierin nicht signifikant.

ALVIN et al. (2000) stellten in ihren in vitro-Versuchen bei der visuellen Überprüfung eine 46,7%ige Übereinstimmung zwischen extrahierten Zähnen und Farbmustern, die mit Hilfe eines Farbmessgerätes (ShadeEye-EX, Shofu Dental Inc., San Marcos, USA) angefertigt wurden, fest. Dieses Ergebnis beinhaltet zwar - anders als hier - auch noch den Laborproduktionsprozess, ist aber unter Laborbedingungen und mit anderer Methodik zustande gekommen. So erstaunt es nicht, dass dort der

Wert mit 46,7% höher ausfällt, als die in der vorliegenden Studie ermittelten Werte von 27,8% bis 37,1%.

Die Übereinstimmung der Geräte mit dem menschlichen Farbempfinden ist nach Meinung des Autors in einem solchen Maße nicht gegeben, dass im klinischen Einsatz wohl gehäuft mit Farbfehlbestimmungen gerechnet werden muss, obwohl laut Versprechen der Hersteller die Reklamationsrate beim Dentallabor gegen Null tendieren sollte. Allerdings berichten CHU und TARNOW (2001) und CHU (2002) entgegen den hier vorgetragenen Bedenken, für das MHT-Gerät und das hier nicht untersuchte Shofu ShadeEye-EX in Musterfällen befriedigende Ergebnisse bei der Kronenherstellung in der täglichen Praxis.

4.2.3.3 Subjektive Bewertung der Farbkarten von SpectroShade™ und ShadeVision™

Begutachtet werden die Darstellungen der Geräte SpectroShade™ und ShadeVision™. Die Farbkarten (feine Version) von drei zufällig ausgewählten Probanden (je 6 Zähne), für die eine Doppelmessung vorliegt, wurden begutachtet (Abb. 40, Anhang).

Beide Methoden zeigen auf den ersten Blick recht unterschiedliche Kartendarstellungen mit nicht korrelierenden Farbflächenumrissen.

Bei den vom MHT SpectroShade™ ausgegebenen Karten ist im Gegensatz zu den X-Rite ShadeVision™-Karten kein bestimmtes Muster bei der Farbverteilung auf der Zahnoberfläche wahrnehmbar. Das ShadeVision™ dagegen lässt auf seinen Karten eine schicht-/streifenartige (idealisierte?) Anordnung der Farben erkennen, wie sie beispielsweise auch der Zahntechniker von der Keramikschichtung her kennt. Die Reproduzierbarkeit der Form der „Farbinseln“ ist bei beiden Geräten durchweg gegeben. Das MHT trifft in den stichprobenartig herausgegriffenen Probanden-Zahnfarbkarten bei der zweiten Messung fast ausnahmslos den in der ersten Messung bestimmten Farbton der jeweiligen Inseln. Das X-Rite dagegen weist in mehreren Fällen einzelnen Zonen einen anderen Farbton zu, als in der ersten Messung; es ist also in dieser Hinsicht scheinbar inkonstanter als das MHT-Gerät, was sich aber bei der statistischen Auswertung nicht niederschlug. Farben werden

in der Kartenansicht des ShadeVision™ auch durchaus als Zwischenfarben ausgegeben, indem Schraffurflächen angezeigt werden.

4.2.4 Schlussfolgerungen

Im Vergleich der Farbmessgeräte mit menschlichen Untersuchern lassen sich also zusammenfassend hinsichtlich ihrer Farbverteilung, Reproduzierbarkeit und Übereinstimmung folgende Feststellungen treffen:

- Bei MHT SpectroShade™ und Rieth DSG4® ist die Farbtonverteilung im Vergleich zum Durchschnitt inhomogen: D3 bzw. B2 kamen vermehrt vor, A2 bzw. A1 unterdurchschnittlich.
- Das X-Rite ShadeVision™ stimmt von den Geräten am besten mit der durchschnittlichen Farbverteilung und der der Menschen überein.
- Die Menschen weisen untereinander eine größere Homogenität in der Farbtonverteilung auf, als die Farbbestimmungssysteme untereinander.
- Zahndrittel und Zahnart haben bei den untersuchten Geräten keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis. Eine Ausnahme macht das MHT bei Zahndritteln. Das DSG4® wird vom Messort (Zahndrittel) am wenigsten beeinflusst.
- Bei der Farbbestimmung von kleinen Teilflächen am Patientenzahn bietet Messtechnik den Vorteil einer detaillierteren Bestimmung, als mit dem menschlichen Auge.
- Die Reproduzierbarkeit liegt bei den Geräten von MHT und X-Rite signifikant über der der menschlichen Untersucher; nicht so beim Rieth-Gerät.
- Bei der Übereinstimmung mit den übrigen Methoden weisen die Menschen einen signifikant höheren Wert auf, als die Farbbestimmungssysteme. Das X-Rite-Gerät liegt in der Übereinstimmungsrate deutlich höher, als seine Konkurrenten.
- Die ausnahmslose Übereinstimmung der Gruppe der drei Geräte, der der Menschen und aller sechs Methoden fällt mit rund 10%, 37% und 3% sehr niedrig aus und verdeutlicht, dass sich die Methoden untereinander doch recht „uneinig“ über die jeweilige Zahnfarbe sind, insbesondere die Farbmessgeräte.

Die Unzulänglichkeiten der Farbbestimmung werden hier offenkundig, sei es bei den Geräten oder den Menschen.

- Die beste Übereinstimmungsrate - generell und mit den menschlichen Untersuchern - erzielte unter den Geräten das X-Rite ShadeVision™, mit signifikantem Abstand gefolgt von MHT SpectroShade™ und Rieth DSG4®.
- Die Übereinstimmungsrate der Menschen untereinander ist signifikant größer, als die der einzelnen Geräte mit den Menschen.

Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen: Farbbestimmung und deren Umsetzung sind komplex. Die untersuchten Geräte zeigen, dass es durchaus möglich ist, Systeme zu entwickeln, die messtechnisch dem menschlichen Sehsinn ebenbürtig oder gar überlegen sind. Aber dennoch ist ein Defizit bei der Umsetzung der colorimetrischen Daten in empfindungsgemäße Farbtöne gegeben. Diese Feststellung mussten auch schon FABER und SCHLEGEL (1995) bei der Untersuchung des Farbmessgerätes Castor, sowie YAP et al. (1999) bei Untersuchungen mit einem Minolta Colorimeter treffen.

Durch Weiterentwicklung der Software, Anpassungen und Formelkorrekturen ist sicherlich noch großes Potential in der Zahnfarbbestimmung vorhanden. Interessant wären daher weiterführende Studien, die sich beispielsweise speziell mit der in die MHT-Software integrierten Möglichkeit, verschiedene Farbformeln (ΔL , ΔE -MHT) anwenden zu können, beschäftigen.

Am Schluss muss aber trotzdem noch die kritische Frage aufgeworfen werden, ob selbst bei einer optimalen Software die komplexen Schichten, Strukturen und Transluzenzen eines Zahnes durch colorimetrische Techniken überhaupt eindeutig erfassbar sind oder ob die Messtechnik nicht generell an ihre physikalischen Grenzen stößt. „Shades Of A Color, Illusion Or Reality ?“...dieser Titel MAYEKAR's Publikation (2001) verdeutlicht die vielschichtige Problematik: Zahnfarbe ist vielleicht doch mehr, als nur ein $L^*a^*b^*$ -Wert.

5 Zusammenfassung

In dieser Studie wurden unter klinischen Bedingungen computergestützt und visuell Zahnfarben an 1026 Dritteln von insgesamt 342 OK-Front- und Eckzähnen an 57 Probanden untersucht. An 26 der 57 Probanden wurden Doppelmessungen durchgeführt. Im Vergleich der Geräte MHT SpectroShade™, X-Rite ShadeVision™ und Rieth DSG4® mit drei menschlichen Untersuchern konnte festgestellt werden, dass die Farbverteilung beim X-Rite Gerät im Vergleich zur durchschnittlichen Verteilung und zur Verteilung bei den Menschen die geringsten Abweichungen aufwies. MHT und Rieth dagegen ließen bei bestimmten Farbtönen Häufungen und Fehlstellen erkennen.

Die Reproduzierbarkeit bei Doppelmessungen zeigte bei MHT und X-Rite Werte, die über dem menschlichen Vermögen lagen, identische Ergebnisse wiederholt zu ermitteln. Das Rieth DSG4® lag mit den Untersuchern ungefähr gleich auf. Diese vergleichsweise niedrige Reproduzierbarkeitsrate des DSG4® ist aber wohl darauf zurückzuführen, dass ohne Hilfsmittel nicht exakt der selbe Bereich des Zahnes wiederholt gemessen werden kann. Signifikante Einflüsse von Messort und Zahnart auf das Ergebnis waren generell bis auf die Ausnahme des MHT, das bei verschiedenen Dritteln eine signifikant unterschiedliche Reproduzierbarkeitsrate zeigte, nicht vorhanden.

Beim Vergleich der Übereinstimmung der Geräte mit den übrigen Methoden, der Mehrheitsmeinung und der Gruppe der Menschen wiesen die Maschinen gegenüber den Untersuchern deutliche Defizite auf. Auch hier zeigt das X-Rite im Vergleich zu seinen Mitstreitern signifikant bessere Werte.

Farbmessung ist auf farbmetrischer Ebene zumindest vordergründig einer visuellen Farbabmusterung überlegen, wie die bessere Unterscheidbarkeit der Drittel und die zumeist überlegene Reproduzierbarkeit verdeutlichen.

Ob die Komplexität einer Zahnfarbe jedoch durch einen farbmetrischen Wert eindeutig charakterisiert werden kann bleibt offen. So führen die Diskrepanzen zwischen der Bewertung der Farbdaten natürlicher Zähne durch die Geräte

und die visuelle Empfindung des Betrachters nach Meinung des Verfassers zu unbefriedigenden Ergebnissen, die den Versprechen der Hersteller nicht gerecht werden können. Der Einsatz von computergestützter Farbbestimmungstechnik stellt also bislang nur eine sinnvolle Ergänzung zur visuellen Abmusterung dar. Bis das unstrittig vorhandene Potential in der Zahnfarbmessung ausgeschöpft ist, bleibt es wohl bei der eingangs zitierten Aussage von JOEL und LEON (1982): „Matching the color of the natural dentition (...) has been an art rather than a science.“

Literaturverzeichnis

- Ahmad, I.: Three-dimensional shade analysis: perspectives of color--Part I. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 11, 789-796; quiz 798 (1999).
- Ahmad, I.: Three-dimensional shade analysis: perspectives of color--Part II. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 12, 557-564; quiz 566 (2000).
- Bangtson, L.K., Goodkind, R.J.: The conversion of Chromascan designations to CIE tristimulus values. *J Prosthet Dent* 48, 610-617 (1982).
- Barna, G.J., Taylor, J.W., King, G.E., Pelleu, G.B. Jr.: The influence of selected light intensities on color perception within the color range of natural teeth. *J Prosthet Dent* 46, 450-453 (1981).
- Bäurle, T.: Effect of Light on Shade Selection. *Quintessenz Int* 10/1982, 1115-1121 (1982).
- Behle, C.: Shade selection techniques: Part One--tools for effective communication. *Pract Proced Aesthet Dent* 13, 536 (2001).
- Behle, C.: Shade selection techniques: Part Two--Dimensions of color. *Pract Proced Aesthet Dent* 13, 652-654 (2001).
- Behle, C.: Shade selection techniques: Part Three--principles for stratification. *Pract Proced Aesthet Dent* 13, 717-720 (2001).
- Bentley, C., Leonard, R.H., Nelson, C.F., Bentley, S.A.: Quantitation of vital bleaching by computer analysis of photographic images. *J Am Dent Assoc* 130, 809-816 (1999).
- Berger-Schunn, A.: *Praktische Farbmessung: ein Buch für Anfänger, eine Gedächtnisstütze für Könner.* 2. Auflage Muster-Schmidt Göttingen Zürich 1994.
- Billmeyer, F.W., Saltzman, M.: *Principles of color Technology.* 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York (1981).
- Boenke, K.M., Linger, J.B., O'Brien, W.J.: The accuracy of color measurements with three colorimeters *J Dent Res* 75, 380 (1996).
- Brisman, A., Hirsch, S.M., Paige, H., Hamburg, M., Gelb, M.: Tooth shade preferences in older patients. *Gerodontology* 1, 130-133 (1985).
- Campbell, C.A.: Shade verification action in Florida and a clarification of South Carolina's registration requirement. *J Dent Technol* 17, 27-28 (2000).
- Chu, S.J., Tarnow, D.P.: Digital shade analysis and verification: a case report and discussion. *Pract Proced Aesthet Dent* 13, 129-36; quiz 138 (2001).

- Chu, S.J.: Precision shade technology: contemporary strategies in shade selection. *Pract Proced Aesthet Dent* 14, 79-83; quiz 84 (2002).
- Clark, E.B.: The color problem in dentistry. *Dent Digest* 1931, 499-509 (1931).
- Clark, E.B.: An analysis of tooth color. *J Am Dent Assoc* 18, 2093-2103 (1931).
- Clark, E.B.: Tooth color selection. *J Am Dent Assoc* 20, 1065-1073 (1933).
- Clark, E.B.: The Clark tooth color system. *Den Mag and Oral Topics* 50, 139-152 (1933).
- Culpepper, W.D.: A comparative study of shade-matching procedures. *J Prosthet Dent* 24, 166-73 (1970).
- Davis, L.G., Ashworth, P.D., Spriggs, L.S.: Psychological effects of aesthetic dental treatment. *J Dent* 26, 547-554 (1998).
- Derbabian, K., Marzola, R., Donovan, T.E., Arcidiacono, A.: The science of communicating the art of esthetic dentistry. Part III: precise shade communication. *J Esthet Restor Dent* 13, 154-162 (2001).
- Dietschi, D.: Schichtkonzepte für Kompositrestaurationen im Frontzahnbereich. *Quintessenz* 52, 669-678 (2001).
- DIN 5033-1, Ausgabe 1979-03: Farbmessung; Grundbegriffe der Farbmatrik. Beuth Berlin Wien Zürich 1979
- DIN 5033-2, Ausgabe 1992-05: Farbmessung; Normvalenz-Systeme. Beuth Berlin Wien Zürich 1992
- DIN 5033-3, Ausgabe 1992-07: Farbmessung; Farbmaßzahlen. Beuth Berlin Wien Zürich 1992
- DIN 6174, Ausgabe 1979-01: Farbmétrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel. Beuth Berlin Wien Zürich 1979
- Donahue, J.L., Goodkind, R.J., Schwabacher, W.B., Aeppli, D.P.: Shade color discrimination by men and women. *J Prosthet Dent* 65, 699-703 (1991).
- Douglas RD.: Precision of in vivo colorimetric assessments of teeth. *J Prosthet Dent* 77, 464-470 (1997).
- Eves, M.G.: Shade selection and value control. *J Dent Technol* 17, 11-17 (2000).
- Exposite, E.: Color perception and the color of teeth *Dent Labor (Munch)* 25,1836-1840 (1977).
- Faber, F.-J., Schlegel, G.: Visuelle und meßtechnische Zuordnung der Zahnfarbe. *Dtsch Zahnärztl Z* 1995/9, 661-663 (1995).

Faber, F.J., Schlegel, G.: Einfluß von Farbtüchtigkeit, Geschlecht und Beruf auf die Zahnfarbauswahl. Dtsch Zahnärztl Z. 54, 281-283 (1999).

Fallschüssel, G.K.H.: Die Lichtfarbe zahnärztlicher Leuchten: I. Zahnärztliche Operationsleuchten. Dtsch Zahnärztl Z 40, 416-428 (1985).

Fallschüssel, G.K.H.: Das Licht der Spezialleuchte Color-i-Dent (Waldmann-Leuchte). Dtsch Zahnärztl Z 40, 496-500 (1985).

Ferreira, D., Monard, L.A.: Measurement of spectral reflectance and colorimetric properties of Vita shade guides. J Dent Assoc S Afr 46, 63-65 (1991).

Geary, J.L., Kinirons, M.J.: Use of a common shade guide to test the perception of differences in the shades and value by members of the dental team. Prim Dent Care 6, 107-110 (1999).

Goldstein, G.R., Schmitt, G.W.: Repeatability of a specially designed intraoral colorimeter. J Prosthet Dent 69, 616-619 (1993).

Goldstep, F.: The intuitive guide to shade selection. Dent Today 20, 72-75 (2001).

Goodkind, R.J., Keenan, K.M., Schwabacher W.B.: A comparison of Chromascan and spectrophotometric color measurements of 100 natural teeth. J Prosthet Dent 53, 105-109 (1985).

Goodkind, R.J., Schwabacher, W.B.: Use of a fiber-optic colorimeter for in vivo color measurements of 2830 anterior teeth. J Prosthet Dent 58, 535-542 (1987).

Hall, N.R.: Tooth colour selection: the application of colour science to dental colour matching. Aust Prosthodont J 5, 41-46 (1991).

Hammad, I.A.: Intrarater repeatability of shade selections with two shade guides. J Prosthet Dent. 89, 50-53 (2003).

Hasegawa, A., Ikeda, I., Kawaguchi, S.: Color and translucency of in vivo natural central incisors. J Prosthet Dent 83, 418-423 (2000).

Hassan, A.K.: Effect of age on colour of dentition of Baghdad patients. East Mediterr Health J 6, 511-513 (2000).

Horn, D.J., Bulan-Brady, J., Hicks, M.L.: Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. J Endod 24, 786-790 (1998).

Hovden, K.: Computerized shade selection and the complex Class IV composite. Dent Today 21, 62-65 (2002).

Ishikawa-Nagai, S., Sato, R.R., Shiraishi, A., Ishibashi, K.: Using a computer color-matching system in color reproduction of porcelain restorations. Part 3: A newly developed spectrophotometer designed for clinical application. Int J Prosthodont 7, 50-55 (1994).

- Jahangiri, L., Reinhardt, S.B., Mehra, R.V., Matheson, P.B.: Relationship between tooth shade value and skin color: an observational study. *J Prosthet Dent* 87, 149-152 (2002).
- Johnston, W.M., Kao, E.C.: Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetric. *J Dent Res* 68, 819-822 (1989).
- Jorgenson, M.W., Goodkind, R.J.: Spectrophotometric study of five porcelain shades relative to the dimensions of color, porcelain thickness, and repeated firings. *J Prosthet Dent* 42, 96-105 (1979).
- Kobes, L.: Photo-optical study of the color range of artificial anterior teeth. *Dtsch Zahnärztl Z* 37, 204-207 (1982).
- Kohlmeyer, B., Scheller, H.: Zahnfarbenbestimmung mit dem PC-gestützten Messgerät „Digital Shade Guide“. *Dtsch Zahnärztl Z* 57, 172-175 (2002).
- Kuehni, R.G., Marcus, R.T.: An Experiment in visual scaling of small colour differences. *Colour Research and Applications* 4, 83 (1979).
- Leibrock, A., Rosentritt, M., Behr, M., Güray, N., Handel, G.: Einflüsse unterschiedlicher Meßparameter auf die metrische Farbbestimmung mit dem Spektralfarbmeßgerät Castor™. *DZZ* 1995/9, 664-667 (1995).
- Lemire, P.A., Burk, B.: Farbe und Zahnersatz. Die Quintessenz, Berlin, Chicago, Rio de Janeiro, Tokio 1979
- Leon, J.M.: Shade selection - the art and science of color matching. *Quintessence Int* 13, 851-859 (1982).
- Lichter, J.A., Solomowitz, B.H., Sher, M.: Shade selection. Communicating with the laboratory technician. *N Y State Dent J* 66, 42-46 (2000).
- Loos, H.: Farbmessung, Grundlagen der Farbmatrik und Ihre Anwendungsbereiche in der Druckindustrie. *Beruf + Schule Itzehoe* 1989.
- Macentee, M., Lakowski, R.: Instrumental colour measurement of vital and extracted human teeth. *J Oral Rehabil* 8, 203-208 (1981).
- Mayekar, S.M.: Shades of a color. Illusion or reality? *Dent Clin North Am* 45, 155-172 (2001).
- McCulloch, A.J., McCulloch, R.M.: Communicating shades: a clinical and technical perspective. *Dent Update* 26, 247-250, 252 (1999).
- Miller, L.: Organizing color in dentistry. *J Am Dent Assoc* 115, 26e-40e (1987).
- Miller, L.L.: Shade matching. *J Esthet Dent* 5, 143-153 (1993).
- Newton, I.: New Theory about Light and Colors. *Philosophical Transactions* 80, 3075-3087 (1671) In: Lampert, T. (Hrsg.): *Zur Wissenschaftstheorie der Farblehre - Aufgaben, Texte, Lösungen*. Timm Lampert, Bern 2000.

- O'Brien, W.J., Boenke, K.M., Groh, C.L.: Coverage errors of two shade guides. *Int J Prosthodont* 4, 45-50 (1991).
- O'Brien, W.J., Groh, C.L., Boenke, K.M.: One-dimensional color order system for dental shade guides. *Dent Mater* 5, 371-374 (1989).
- O'Brien, W.J., Groh, C.L., Boenke, K.M.: A new, small-color-difference equation for dental shades. *J Dent Res* 69, 1762-1764 (1990).
- O'Brien, W.J., Hemmendinger, H., Boenke, K.M., Linger, J.B., Groh, C.L.: Color distribution of three regions of extracted human teeth. *Dent Mater* 13, 179-185 (1997).
- O'Keefe, K.L., Strickler, E.R., Kerrin, H.K.: Color and shade matching: the weak link in esthetic dentistry. *Compendium* 11, 116-120 (1990).
- Okubo, S.R., Kanawati, A., Richards, M.W., Childress, S.: Evaluation of visual and instrument shade matching. *J Prosthet Dent* 80, 642-648 (1998).
- Paravina, R.D., Powers, J.M., Fay, R.M.: Dental color standards: shade tab arrangement. *J Esthet Restor Dent* 13, 254-263 (2001).
- Paravina, R.D., Powers, J.M., Fay, R.M.: Color comparison of two shade guides. *Int J Prosthodont* 15, 73-78 (2002).
- Paravina, R.D.: Evaluation of a newly developed visual shade-matching apparatus. *Int J Prosthodont* 15, 528-534 (2002).
- Paul, S., Peter, A., Pietrobon, N., Hammerle, C.H.: Visual and spectrophotometric shade analysis of human teeth. *J Dent Res* 81, 578-582 (2002).
- Pensler, A.V.: Shade selection: problems and solutions. *Compend Contin Educ Dent* 19, 387-396; quiz 398 (1998).
- Priest, G., Lindke, L.: Tooth color selection and characterization accomplished with optical mapping. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 12, 497-503; quiz 504 (2000).
- Ramfjord, S.P.: Dentistry in the 21st century. *Quintessence Int* 20, 167-171 (1989).
- Rosenstiel, S.F., Land, M.F., Fujimoto, J.: Color science and shade selection. In: Rosenstiel, S.F., Land, M.F., Fujimoto, J. (Hrsg.): *Contemporary fixed Prosthodontics*. Year Book Medical Pub St. Louis Mosby 1995: 488-496 (1995).
- Russell, M.D., Gulfranz, M., Moss, B.W.: In vivo measurement of colour changes in natural teeth. *J Oral Rehabil* 27, 786-792 (2000).
- Ruyter, I.E., Nilner, K., Moller, B.: Color stability of dental composite resin materials for crown and bridge veneers. *Dent Mater* 3, 256-251 (1987).
- Saleski, C.G.: Color, light, and shade matching. *J Prosthet Dent* 27, 263-268 (1972).

Satoh, Y., Ichiwata, T., Ohki, K., Tsunoda, S.: Study of color in prosthodontics. Part I. On measuring instruments. *J Nihon Univ Sch Dent* 27, 105-113 (1985).

Schmidt, R.F.: *Physiologie kompakt*. 3. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York 1999.

Schmitt, R.F., Thews, G.: *Physiologie des Menschen*. 27. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York 1997.

Schwabacher, W.B., Goodkind, R.J., Lua, M.J.: Interdependence of the hue, value, and chroma in the middle site of anterior human teeth. *J Prosthodont* 3, 188-192 (1994).

Schwabacher, W.B., Goodkind, R.J.: Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides. *J Prosthet Dent* 64, 425-431 (1990).

Seghi, R.R., Hewlett, E.R., Kim, J.: Visual and instrumental colorimetric assesment of small color differences on translucent dental porcelain. *J Dent Res* 68, 1760-1764 (1989).

Seghi, R.R., Johnston, W.M., O'Brien, W.J.: Spectrophotometric analysis of color differences between porcelain systems. *J Prosthet Dent* 56, 35-40 (1986).

Setz, J., Geis-Gerstorfer, J., Weber, H.: Objective tooth color determination. Error source elimination. *Dent Labor (Munch)* 40, 667-668, 670 (1992).

Sheets, C.G.: Modern dentistry and the esthetically aware patient. *J Am Dent Assoc* 1987 (Spec Iss), 103E-105E (1987).

Shotwell, J.L., Johnston, W.M., Swarts, R.G.: Color comparisons of denture teeth and shade guides. *J Prosthet Dent* 56, 31-34 (1986).

Sim, C.P., Yap, A.U., Teo, J.: Color perception among different dental personnel. *Oper Dent* 26, 435-439 (2001).

Sorensen, J.A., Torres, T.J.: Improved color matching of metal-ceramic restorations. Part I: A systematic method for shade determination. *J Prosthet Dent* 1987 58(2), 133-139 (1987).

Sorensen, J.A., Torres, T.J.: Improved color matching of metal ceramic restorations. Part II: Procedures for visual communication. *J Prosthet Dent* 58, 669-677 (1987).

Sproull, R.C.: Color matching in Dentistry. Part III. Color control. *J Prosthet Dent* 31(2),146-154 (1974).

Sproull, R.C.: Color matching in dentistry. Part I. The three-dimensional nature of color. 1973. *J Prosthet Dent* 86, 453-457 (2001).

- Sproull, R.C.: Color matching in dentistry. Part II. Practical applications of the organization of color. 1973. *J Prosthet Dent* 86, 458-464 (2001).
- Swift, E.J. Jr., Hammel, S.A., Lund, P.S.: Colorimetric evaluation of vita shade resin composites. *Int J Prosthodont* 7, 356-361 (1994).
- van der Burgt, T.P., Bosch J.J., Borsboom, P.C., Kortsmit, W.J.: A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *J Prosthet Dent* 63, 155-162 (1990).
- Vogel, H.: *Gerthsen Physik*. 19. Auflage Springer Berlin Heidelberg 1997.
- Wasson, W., Schuman, N.: Color vision and dentistry. *Quintessence Int* 23, 349-353 (1992).
- Wee, A.G., Kang, E.Y., Johnston, W.M., Seghi, R.R.: Evaluating porcelain color match of different porcelain shade-matching systems. *J Esthet Dent* 12, 271-280 (2000).
- Wild, W.: *Funktionelle Prothetik*. Schwabe, Basel (1950).
- Wozniak, W.T.: *Proposed Guidelines for the Acceptance Program for Dental Shade Guides*. Am Dent Assoc Chicago 1987.
- Wyszeki, G., Stiles, W.S.: *Color Science*. 2. Auflage Wiley New York 1982.
- Yap, A.U., Bhole, S., Tan, K.B.: Shade match of tooth-colored restorative materials based on a commercial shade guide. *Quintessence Int* 26, 697-702 (1995).
- Yap, A.U., Sim, C.P., Loh, W.L., Teo, J.H.: Human-eye versus computerized color matching. *Oper Dent* 24, 358-363 (1999).
- Yap, A.U., Tan, K.B., Bhole, S.: Comparison of aesthetic properties of tooth-colored restorative materials. *Oper Dent* 22, 167-172 (1997).
- Yap, A.U.: Color attributes and accuracy of Vita-based manufacturers' shade guides. *Oper Dent* 23, 266-271 (1998).
- Young, L. Jr., Glaros, A.G., Moore, D.J., Collins, J.F.: Assessing shade differences in acrylic resin denture and natural teeth. *J Prosthet Dent* 71, 575-580 (1994).
- Zyman, P., Etienne, J.M.: Recording and communicating shade with digital photography: concepts and considerations. *Pract Proced Aesthet Dent* 14, 49-53 (2002).

Der Verfasser erklärt hiermit, dass diese Studie neutral und völlig unabhängig durchgeführt wurde und Einflüsse seitens der Hersteller oder Dritter nicht ausgeübt wurden.

Typen, Seriennummern und Software der verwendeten Geräte:

Fa. A. Rieth (73614 Schorndorf, Deutschland): DSG4®
 Seriennummer 0007/0024
 Softwareversion 1.7

Fa. MHT Optic Research AG (8155 Niederhasli, Schweiz): SpectroShade™
 Seriennummer LUA-171-171-171
 Stations-ID 762319609
 Softwareversion 2.20 D Build 1010

Fa. X-Rite (51149 Köln, Deutschlandvertretung): ShadeVision™ Modell DVS
 Seriennummer 194
 Softwareversion 1.20
 Firmwareversion B913

weitere Materialien:

- Farbring: Vita Classical, der dem DSG4 der Fa. Rieth beigelegt war (Kalibriermuster für das Gerät). Hersteller: Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland
- Leuchtstoffröhren 36 Watt/5000 k: Fa. Just Normlicht, Weilheim/Teck, Deutschland
- Lampengehäuse: Fa. Kaiser, Modell RB 5004, Buchen, Deutschland
- Einmalzahnbürsten: Hager & Werken GmbH & Co KG, Duisburg, Deutschland
- Sprühdeseinfektionsmittel: Antifect® Liquid, Schülke&Mayr, Norderstedt, Deutschland

Warenzeichen:

DSG4 plus ist geschütztes Warenzeichen der Firma A. Rieth, 73614 Schorndorf, Ger
 ClearMatch ist geschütztes Warenzeichen der Firma Clarity Systems Inc., Texas, USA
 Classical, Dyract, Esthet-X TruMatch, Portrait, Trubyte, Trublend, SLM, IPN, New Hue sind geschützte Warenzeichen der Firma Dentsply, 78467 Konstanz, Ger
 3M, Z100 sind Warenzeichen der Firma Espe, 82229 Seefeld, Ger
 Vitapan, Vita 3D-Master, Easyshade sind geschützte Warenzeichen der Firma H. Rauter GmbH & Co. KG, 79713 Bad Säckingen, Ger
 Pentium ist geschütztes Warenzeichen der Firma Intel, Kalifornien, USA
 Chromascope ist geschütztes Warenzeichen der Firma Ivoclar Vivadent AG, FL-9494 Schaan, Liechtenstein
 Durafill ist geschütztes Warenzeichen der Firma Heraeus Kulzer GmbH & Co. KG, 63450 Hanau, Ger
 Ikam ist Warenzeichen der Firma Metalor Technologies GmbH, 70178 Stuttgart, Ger
 SpectroShade ist Warenzeichen der Firma MHT Optic Research AG, 8155 Niederhasli, Schweiz
 Windows 95, Windows 98, Windows 2000, Windows XP sind geschützte Warenzeichen der Firma Microsoft Corp., Kalifornien, USA
 Castor ist Warenzeichen der Firma Nordmeditech GmbH, 24999 Wees, Ger
 PR-650, Spectrascan sind geschützte Warenzeichen der Firma Photo Research Inc., Kalifornien, USA
 Antifect ist geschütztes Warenzeichen der Firma Schülke&Mayr GmbH, 22851 Norderstedt, Ger
 ShadeEye-NCC ist Warenzeichen der Firma Shofu Dental Corp., Kalifornien, USA
 ShadeVision, Shade-Rite sind Warenzeichen der Firma X-Rite GmbH, Grandville, USA

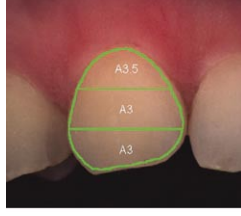
Abb. 40. Auf den folgenden Seiten sind Farbkarten der Geräte MHT SpectroShade™ und X-Rite ShadeVision™ dargestellt. Es wurden zufällig drei Probanden aus der Gruppe mit Doppelmessungen herausgegriffen:

Proband 1, Zahn 13

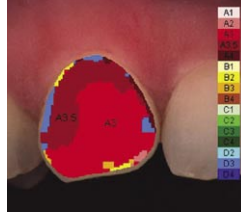
MHT SpectroShade A3



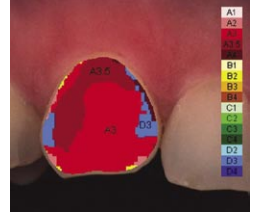
Drittel



Messung 1



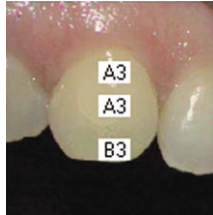
Messung 2



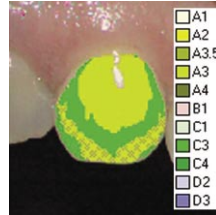
X-Rite ShadeVision A3



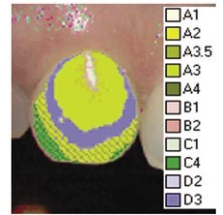
Drittel



Messung 1



Messung 2

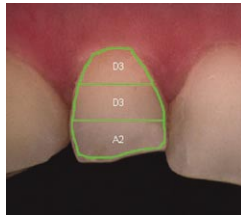


Proband 1, Zahn 12

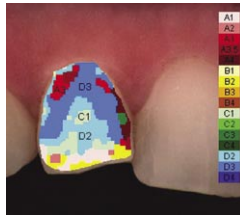
MHT SpectroShade D3



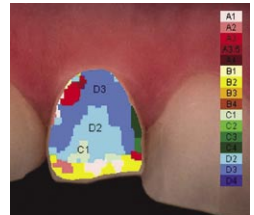
Drittel



Messung 1



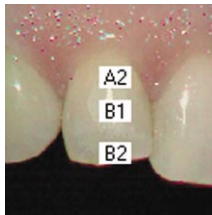
Messung 2



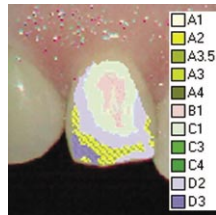
X-Rite ShadeVision B1



Drittel



Messung 1



Messung 2

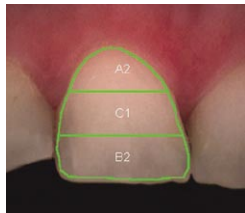


Proband 1, Zahn 11

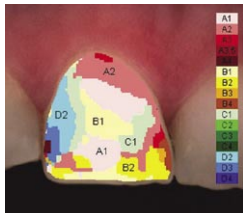
MHT SpectroShade C1



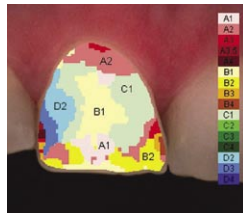
Drittel



Messung 1



Messung 2



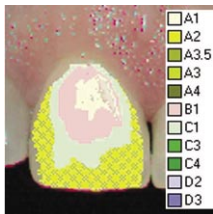
X-Rite ShadeVision B1



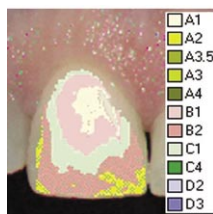
Drittel



Messung 1



Messung 2

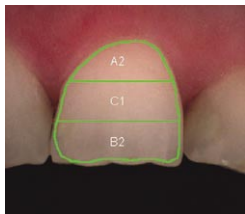


Proband 1, Zahn 21

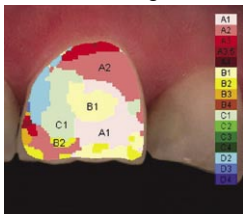
MHT SpectroShade A1



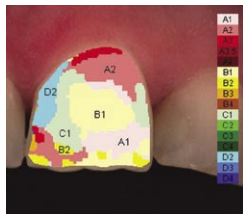
Drittel



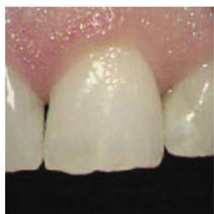
Messung 1



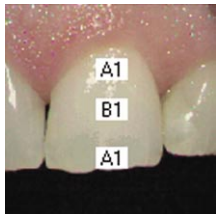
Messung 2



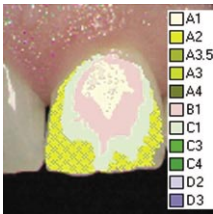
X-Rite ShadeVision B1



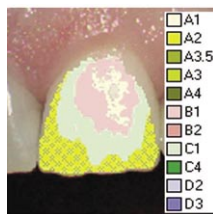
Drittel



Messung 1



Messung 2

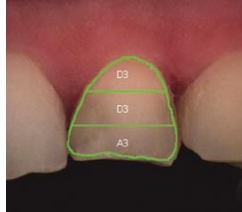


Proband 1, Zahn 22

MHT SpectroShade D3



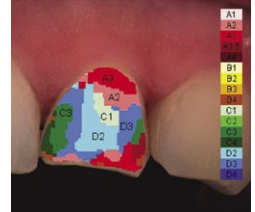
Drittel



Messung 1



Messung 2



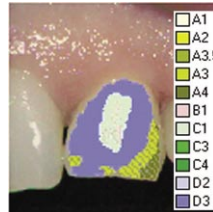
X-Rite ShadeVision A1



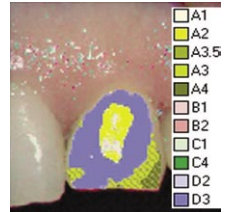
Drittel



Messung 1



Messung 2

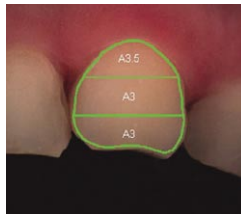


Proband 1, Zahn 23

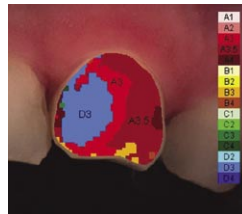
MHT SpectroShade A3



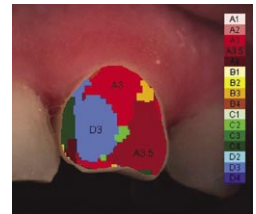
Drittel



Messung 1



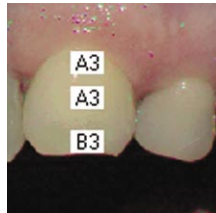
Messung 2



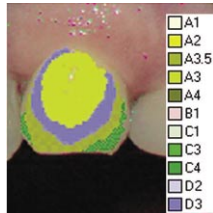
X-Rite ShadeVision A3



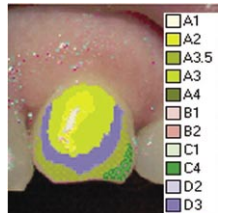
Drittel



Messung 1



Messung 2

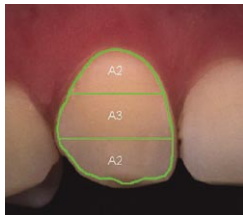


Proband 2, Zahn 13

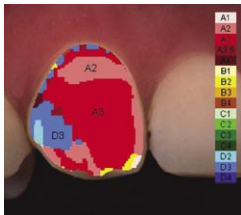
MHT SpectroShade A3



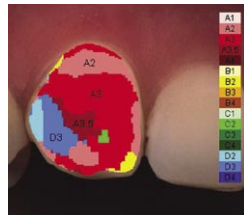
Drittel



Messung 1



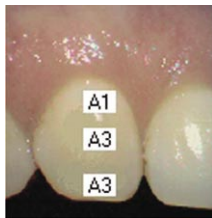
Messung 2



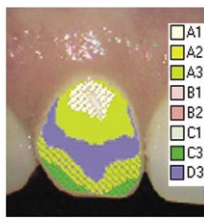
X-Rite ShadeVision A3



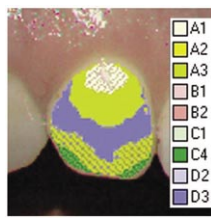
Drittel



Messung 1



Messung 2

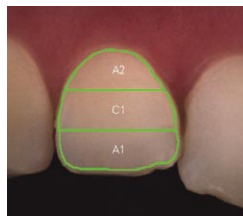


Proband 2, Zahn 12

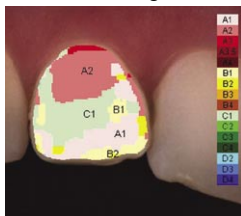
MHT SpectroShade C1



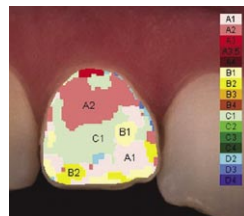
Drittel



Messung 1



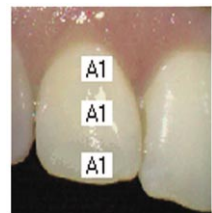
Messung 2



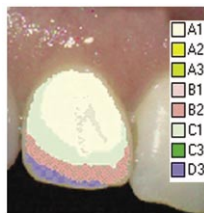
X-Rite ShadeVision A1



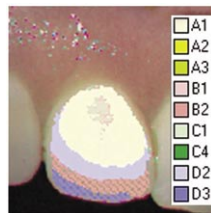
Drittel



Messung 1



Messung 2

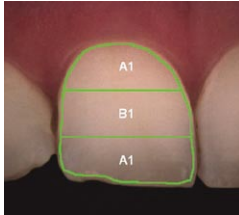


Proband 2, Zahn 11

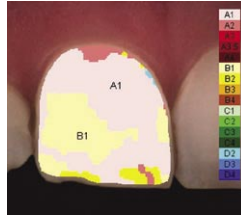
MHT SpectroShade A1



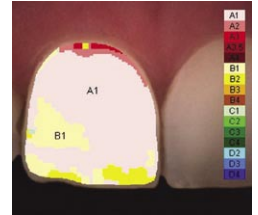
Drittel



Messung 1



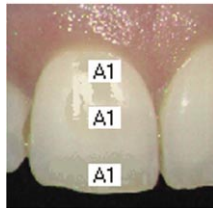
Messung 2



X-Rite ShadeVision A1



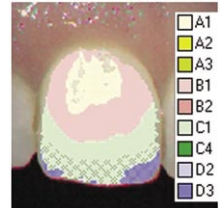
Drittel



Messung 1



Messung 2

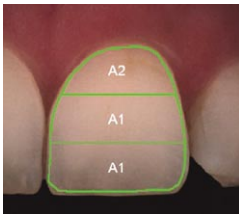


Proband 2, Zahn 21

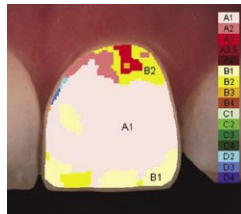
MHT SpectroShade A1



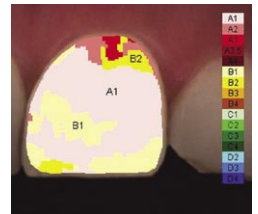
Drittel



Messung 1



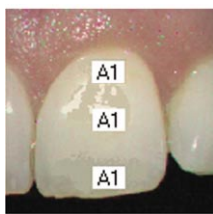
Messung 2



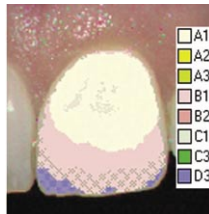
X-Rite ShadeVision A1



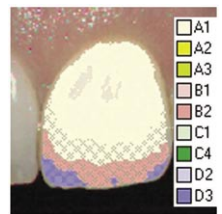
Drittel



Messung 1



Messung 2

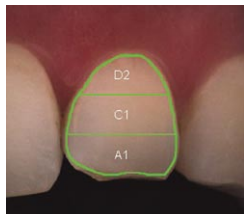


Proband 2, Zahn 22

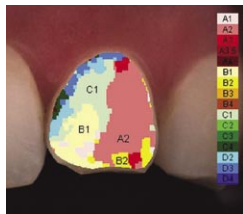
MHT SpectroShade C1



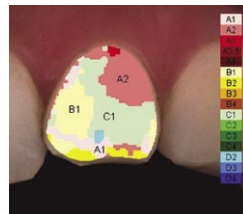
Drittel



Messung 1



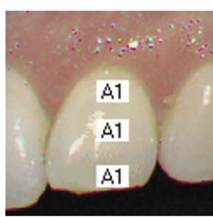
Messung 2



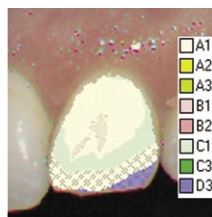
X-Rite ShadeVision A1



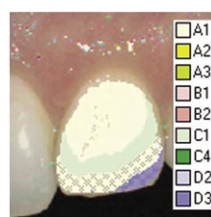
Drittel



Messung 1



Messung 2

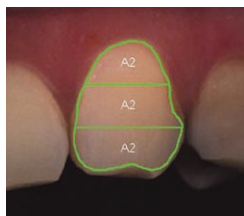


Proband 2, Zahn 23

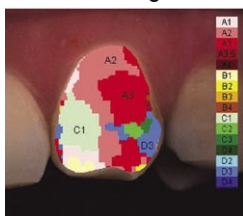
MHT SpectroShade A2



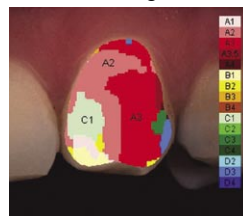
Drittel



Messung 1



Messung 2



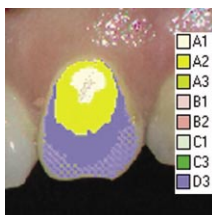
X-Rite ShadeVision A2



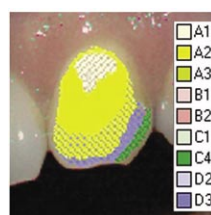
Drittel



Messung 1



Messung 2

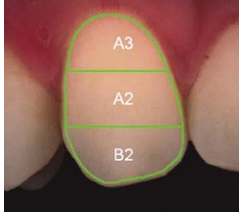


Proband 3, Zahn 13

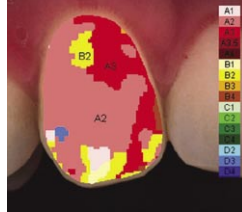
MHT SpectroShade A2



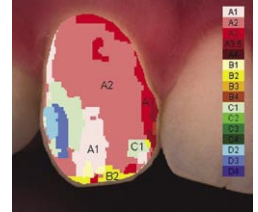
Drittel



Messung 1



Messung 2



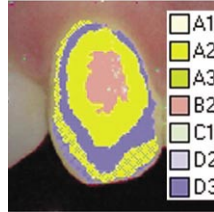
X-Rite ShadeVision A1



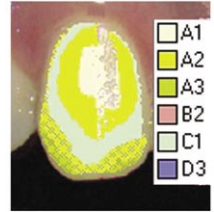
Drittel



Messung 1



Messung 2

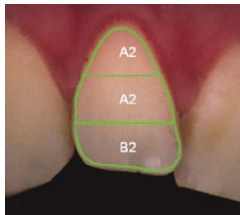


Proband 3, Zahn 12

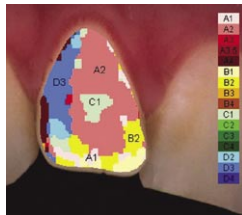
MHT SpectroShade A2



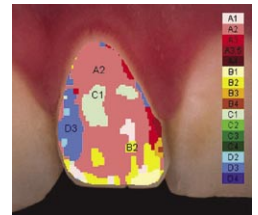
Drittel



Messung 1



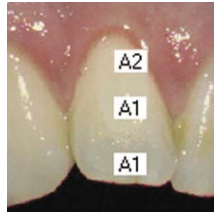
Messung 2



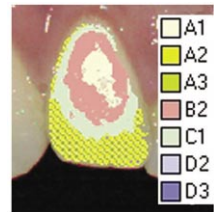
X-Rite ShadeVision A1



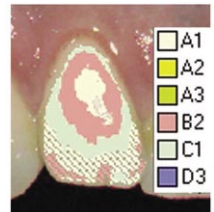
Drittel



Messung 1



Messung 2

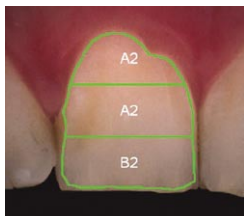


Proband 3, Zahn 11

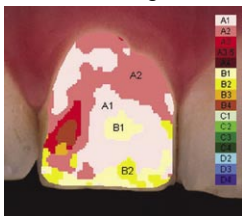
MHT SpectroShade A1



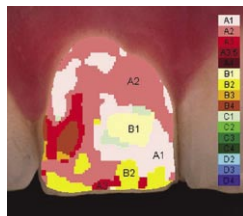
Drittel



Messung 1



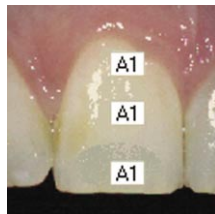
Messung 2



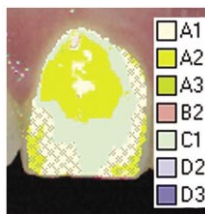
X-Rite ShadeVision A1



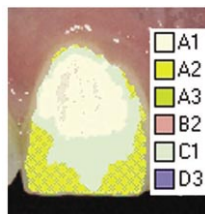
Drittel



Messung 1



Messung 2

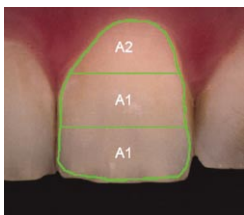


Proband 3, Zahn 21

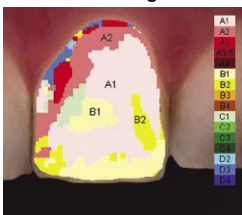
MHT SpectroShade A1



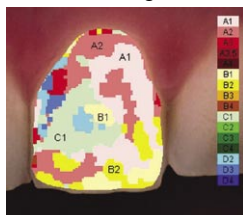
Drittel



Messung 1



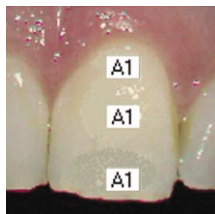
Messung 2



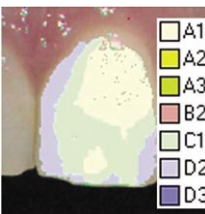
X-Rite ShadeVision A1



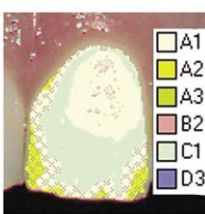
Drittel



Messung 1



Messung 2

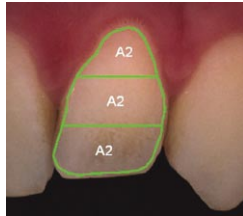


Proband 3, Zahn 22

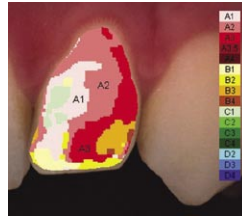
MHT SpectroShade A2



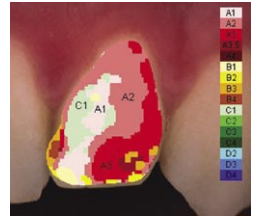
Drittel



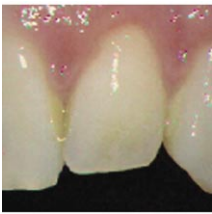
Messung 1



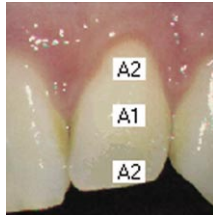
Messung 2



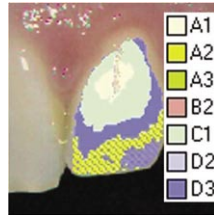
X-Rite ShadeVision A1



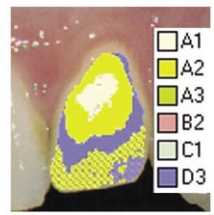
Drittel



Messung 1



Messung 2

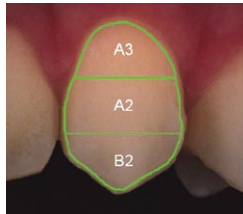


Proband 3, Zahn 23

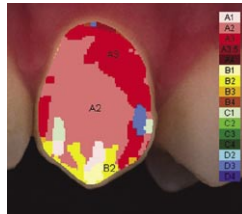
MHT SpectroShade A2



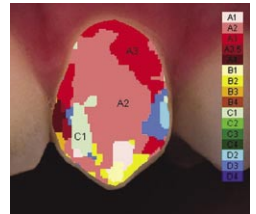
Drittel



Messung 1



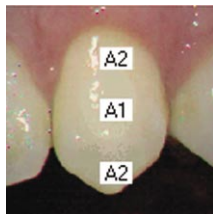
Messung 2



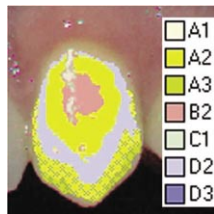
X-Rite ShadeVision A1



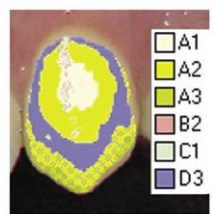
Drittel



Messung 1



Messung 2



Tab. 6a. ΔE -Werte basierend auf Vita-L*a*b*-Werten nach O'Brien:

ΔE	A1	A2	A3	A3,5	A4	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D2	D3	D4
A1	0,00	5,32	8,34	11,79	13,95	0,99	4,61	10,96	12,14	5,31	9,47	11,45	16,14	4,45	7,99	9,06
A2	5,32	0,00	3,29	6,49	8,77	5,51	1,66	5,95	6,90	4,67	5,09	7,21	11,55	3,38	3,61	4,41
A3	8,34	3,29	0,00	3,76	6,94	8,68	4,42	3,12	4,45	7,60	5,50	7,29	10,63	6,43	4,53	4,62
A3,5	11,79	6,49	3,76	0,00	3,84	11,99	7,45	2,15	1,15	9,85	5,54	6,38	8,16	9,08	5,74	4,78
A4	13,95	8,77	6,94	3,84	0,00	13,90	9,75	5,84	3,61	10,59	5,22	4,61	4,45	10,31	6,36	5,30
B1	0,99	5,51	8,68	11,99	13,90	0,00	4,84	11,31	12,32	4,64	9,21	11,11	15,83	4,00	7,78	8,93
B2	4,61	1,66	4,42	7,45	9,75	4,84	0,00	6,59	7,65	4,71	5,88	7,99	12,47	3,61	4,71	4,97
B3	10,96	5,95	3,12	2,15	5,84	11,31	6,59	0,00	2,33	9,93	6,49	7,77	10,11	9,00	6,40	5,32
B4	12,14	6,90	4,45	1,15	3,61	12,32	7,65	2,33	0,00	10,06	5,54	6,25	7,92	9,40	6,06	4,64
C1	5,31	4,67	7,60	9,85	10,59	4,64	4,71	9,93	10,06	0,00	5,44	6,95	11,65	1,52	4,40	5,75
C2	9,47	5,09	5,50	5,54	5,22	9,21	5,88	6,49	5,54	5,44	0,00	2,13	6,72	5,42	1,90	1,61
C3	11,45	7,21	7,29	6,38	4,61	11,11	7,99	7,77	6,25	6,95	2,13	0,00	4,78	7,22	3,81	3,38
C4	16,14	11,55	10,63	8,16	4,45	15,83	12,47	10,11	7,92	11,65	6,72	4,78	0,00	11,90	8,23	7,60
D2	4,45	3,38	6,43	9,08	10,31	4,00	3,61	9,00	9,40	1,52	5,42	7,22	11,90	0,00	3,98	5,51
D3	7,99	3,61	4,53	5,74	6,36	7,78	4,71	6,40	6,06	4,40	1,90	3,81	8,23	3,98	0,00	2,42
D4	9,06	4,41	4,62	4,78	5,30	8,93	4,97	5,32	4,64	5,75	1,61	3,38	7,60	5,51	2,42	0,00

ΔE wurde berechnet nach der Formel: $\Delta E = \sqrt{(\Delta L^* \Delta L + \Delta a^* \Delta a + \Delta b^* \Delta b)}$.

Werte ΔE kleiner 4, die also mit dem Auge nicht eindeutig unterscheidbar sind, sind fettgedruckt.

Tab. 6b. Vita-L*a*b*-Werte nach O'Brien et al. (1991):

	L*	a*	b*
A1	79,57	-1,61	13,05
A2	76,04	-0,08	16,73
A3	75,36	1,36	19,61
A3,5	72,31	1,48	21,81
A4	68,56	1,58	21
B1	78,9	-1,76	12,33
B2	76,66	-1,62	16,62
B3	74,13	0,47	22,34
B4	71,81	0,5	22,15
C1	74,29	-1,26	12,56
C2	70,95	-0,22	16,72
C3	68,83	-0,01	16,68
C4	64,78	1,59	18,66
D2	75,27	-0,54	13,47
D3	72,55	0,62	16,14
D4	71,86	-1,03	17,77

Tab. 7a. Datentabelle Messung 1 an 57 Probanden

Probandnr.	Methode	13 durch	13 zerv	13 mitt	13 inn	12 durch	12 zerv	12 mitt	12 inn	11 durch	11 zerv	11 mitt	11 inn	21 durch	21 zerv	21 mitt	21 inn	22 durch	22 zerv	22 mitt	22 inn	23 durch	23 zerv	23 mitt	23 inn
1	MHT	A3,5	A3,5	A3	D3	D3	D3	D3	D3	A2	A2	A2	A2	A2	D3	A2	B2	A3	D3	A3	A3	A3	A3	A3	
1	X-Rite	B3	B4	B3	B3	B3	B3	B3	A3	A2	A1	A1	A3	A1	A1	A1	A1	A3	A3	D3	A3	B3	B3	C4	
1	Rerth	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	B3	A3	
1	vs Student	A3	B3	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	B2	A1	A1	A1	A1	B2	A1	A1	A2	A2	A2	B3	B2	B2	
1	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A2	A2	A2	B3	B2	B2	
1	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B2	B2	B2	
1	Mehrhreit	B3	B3	#	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A2	A2	A2	B2	B2	B2	
2	MHT	A3,5	A3	A3,5	A4	A3	A3	A3,5	D3	D3	D3	D3	A3,5	A3	D3	A3	D3	A3,5	D3	A3,5	A3	A3	A3	A3,5	
2	X-Rite	B3	B4	B3	B3	B3	B3	B3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	D3	D3	D3	A2	A2	A2	A3	B3	B3	A3,5	
2	Rerth	B4	B4	B4	B4	B4	B4	B4	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	D3	C2	A2	A2	A2	A2	B4	B4	B4	
2	vs Student	B4	B4	B4	B4	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	B4	B4	
2	vs 1. Techn.	B4	B4	B4	B4	A3	A3	A3	A3	B2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	B4	B4	B4	
2	vs 2. Techn.	B4	B4	B4	B4	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	B4	B4	B4	
3	MHT	A2	A2	A2	A1	D2	D2	B2	D2	A2	C1	C1	A2	C1	C1	C1	D2	A3	A2	A1	B4	B2	A2	A2	
3	X-Rite	A2	A1	A2	B2	C1	B1	C1	D3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	
3	Rerth	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	
3	vs Student	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
3	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
3	vs 2. Techn.	A3	A3	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
3	Mehrhreit	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	
4	MHT	A3,5	A3	A3,5	A3,5	D3	D3	D3	D3	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A2	D2	D2	A2	A2	A3	A3	A3	A3,5	
4	X-Rite	B4	A2	B4	A4	A3	A3	A3	D3	A1	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	A2	A2	A2	A2	B3	A2	B3	
4	Rerth	A3	A3	A3	A3	B2	B2	A2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B1	B2	B2	B2	C1	A3	C3	A3	
4	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	
4	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	
4	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	
4	Mehrhreit	A3,5	A3,5	#	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	
5	MHT	A3,5	A3,5	D3	A3,5	D3	D3	D3	A2	A3	D3	A3	D3	A4	A4	A3	D3	D3	D3	D3	A3	A3	A3,5	A3,5	
5	X-Rite	A2	A2	A3,5	A4	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	D3	B3	B3	B3	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3,5	
5	Rerth	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	
5	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	
5	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	
5	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	
5	Mehrhreit	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	#	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	
6	X-Rite	B2	B3	A2	B2	B2	A2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B2	B3	B3	B2	B2	B2	A3	A3	A3	A3,5	
6	Rerth	B1	B2	B1	A2	B1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	A1	B2	B1	B2	A1	A1	A1	B1	A2	A3	A3,5	
6	vs Student	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
6	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
6	vs 2. Techn.	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
6	Mehrhreit	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	
7	MHT	A3,5	B3	A3,5	B3	A3	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	
7	X-Rite	B4	B4	B4	A3,5	A3	A2	A3	A2	B2	A1	B2	A2	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	B4	B4	A4	
7	Rerth	A3,5	B3	A3,5	B3	A3	A3	A3	C1	A1	B2	A1	C1	A1	B2	A1	C1	A2	A3	A2	B2	B3	B4	A3,5	
7	vs Student	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B3	
7	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B3	
7	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B3	
7	Mehrhreit	#	#	#	B3	B3	A3	A3	B2	B2	B2	B2	B2	#	B2	B2	B2	#	#	#	#	B3	B3	#	
8	MHT	A3	A2	A3	A2	C1	A2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	C1	D2	C1	A2	A2	D3	A2	
8	X-Rite	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
8	Rerth	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
8	vs Student	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
8	vs 1. Techn.	B2	B2	B2	B2	A2	A2	A2	A2	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	
8	vs 2. Techn.	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
8	Mehrhreit	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	
9	MHT	A3,5	A3,5	A3,5	B2	D3	D3	D3	D3	A1	D2	C1	A1	D2	A1	D2	A1	A2	A3	D3	A1	A3	A3	A3,5	
9	X-Rite	A3	A2	A3	A3,5	B2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A3,5	

Prüfandenr.	Methode	13 durch	13 zerv	13 mitt	13 inz	12 durch	12 zerv	12 mitt	12 inz	11 durch	11 zerv	11 mitt	11 inz	21 durch	21 zerv	21 mitt	21 inz	22 durch	22 zerv	22 mitt	22 inz	23 durch	23 zerv	23 mitt	23 inz	
25	Reith	A2	A2	A1	A2	A2	A2	A2	A1	A3	A2	A1	B1	A2	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A1	A3	A3	A3	A3
26	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
26	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
26	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
27	Mehrfach	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
27	X-Rite	B3	D3	B3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3,5
27	Reith	A3	B3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	B2	B2	B2	C3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	A4
27	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
27	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
27	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
28	MfT	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
28	X-Rite	B2	B2	B2	B2	C1	B1	C1	B1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	B1	C1	B1	A1	B2	A2	B2	B3
28	vs Student	A3	A3	A3	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	A1	C1
28	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	A1	C1
28	vs 2. Techn.	B2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	A2	A2
28	Mehrfach	A3	A3	A2	A2	B1	B1	B1	B1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2
29	MfT	A3	A3	A3	A3	D2	D2	D3	A3	A2	A3	A2	D3	A4	A3	D3	A4	D3	A3	D3	A3	D3	A3	A2	A3	A3
29	X-Rite	A3	A2	A3	B3	D2	D2	D2	A2,5	C1	A2	A3,5	C1	A2	B2	C1	A2	C1	B2	C1	B2	C1	A2	B2	A1	B2
29	Reith	A5	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2,5
29	vs Student	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
29	vs 1. Techn.	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
29	vs 2. Techn.	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
30	Mehrfach	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
30	X-Rite	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	
30	Reith	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	C1	B2	C1	B2	A3	A3	B3	
30	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	C1	B2	C1	B2	A3	A3	B3	
30	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	C1	B2	C1	B2	A3	A3	B3	
30	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	C1	B2	C1	B2	A3	A3	B3	
30	Mehrfach	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	
31	MfT	A4	A3,5	A4	A4	A3	A3	D3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	A3,5	
31	X-Rite	A3,5	A3,5	A3,5	A4	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
31	Reith	A3,5	B3	A3,5	A4	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
31	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
31	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
31	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
31	Mehrfach	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A3	B1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	C1	A1	A3	A3	D3	A2	A4	D3	A4	
32	MfT	A3,5	A3	A3,5	A4	D3	D3	D3	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	
32	X-Rite	B4	B4	B4	A4	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3,5	A3,5	
32	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B3	B3	
32	vs 1. Techn.	A4	A4	A4	A4	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B3	B3	
32	vs 2. Techn.	A4	A4	A4	A4	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B3	B3	
32	Mehrfach	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
33	MfT	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
33	X-Rite	A3	A3	A3	A2	C1	D3	D3	A3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	
33	Reith	A3	B3	A3	B2	C1	C1	C1	A1	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	B1	B2	C1	D2	B3	B3	A3	A3	
33	vs Student	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
33	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
33	vs 2. Techn.	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
33	Mehrfach	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	
34	MfT	A4	A4	A4	A3,5	D1	A4	C3	D3	D3	D3	D3	A3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A4	A3,5	A4	
34	X-Rite	A3,5	B4	A3,5	A3,5	D3	A3,5	D3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A4	A3,5	A4	
34	Reith	A4	A3,5	A3,5	B3	C1	B3	C1	A2	B3	A2	C1	B3	B2	A2	C1	B3	B2	A2	C1	B3	B2	A2	C3	A3,5	
34	vs Student	A4	A3,5	A3,5	A4	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	
34	vs 1. Techn.	A4	A3,5	A3,5	A4	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	
34	vs 2. Techn.	A3,5	A4	A3,5	A4	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	

Probandenr.	Methode	13 durch A3.5	13 mitt A4	13 zerv A3.5	13 inz A3	12 durch A3	12 mitt A3	12 zerv A3	12 inz A3	11 durch A3	11 mitt A3	11 zerv A3	11 inz A3	21 durch A3	21 zerv A3	21 mitt A3	21 inz A3	22 durch A3	22 zerv A3	22 mitt A3	22 inz A3	23 durch A4	23 zerv A3.5	23 mitt A4	23 inz A3.5	
35	MfH	A3	A3	A3	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A2	A1	A3	A2	A2	A3
35	Behr	B2	B2	B1	A1	A1	A1	B1	A1	B1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B1	A1	A1	B2	B2	B2	B2	B2	B2
35	vs Student	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
35	vs 1. Techn.	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2
35	vs 2. Techn.	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2
36	MfH	A3	A3	A3	A2	A2	C1	A2	A3	D2	A3	A1	A1	A1	C1	A2	A1	A3	D1	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5
36	X-Rite	A3	A3	B3	C1	A2	B2	A2	B2	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	B2	A2	B2	A2	A3	A2	A3	B3.5
36	Behr	A2	A3	A2	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	A1	C1	A3	B2	A3	A3	A3	D4
36	vs Student	A3	A3	A3	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
36	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
36	vs 2. Techn.	A3	A3	A3	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A4	A4	A4	A4	A4
37	MfH	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
37	X-Rite	A3	A3	A3	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A1	A3	A3	A3	A3
37	Behr	A3	A3	A3	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2
37	vs Student	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
37	vs 1. Techn.	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
37	vs 2. Techn.	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
38	MfH	A3.5	B3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
38	X-Rite	A3.5	A3	A3.5	A3.5	A3	A3.5	A3	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
38	Behr	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
38	vs Student	A3.5	A3.5	A3.5	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3
38	vs 1. Techn.	A3	A3	A3	A3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	C3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
38	vs 2. Techn.	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A1	A1	A2	A1	A2	A2	A1	A2	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
39	MfH	A3	A3	A3.5	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
39	X-Rite	B3	B3	B3	C3	B1	B2	B1	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B1	B2	A2	B2	A2	B3	B3	B4	B3	B3
39	Behr	B4	B4	B4	B4	B4	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	B4	B4	B4	B4	B4
39	vs Student	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
39	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
39	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3
40	MfH	B3	A3	A3	B3	A3	D5	A3	A2	A3	D3	A2	A3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
40	X-Rite	B2	B3	B4	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A2	A2	A3	A2	A3	A3	B4	A4	A4
40	Behr	B4	B4	B4	A4	A3.5	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B4	B4	B4	B4
40	vs Student	B4	B4	B4	B4	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A4	A4	A4	A4
40	vs 1. Techn.	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A4	A4	A4	A4
40	vs 2. Techn.	B4	B4	B4	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A4	A4	A4	A4
41	MfH	A3.5	A3	B4	A4	A3	A3	A3	A2	A2	A3	A2	A2	A3	A2	A2	A2	A3	A3	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3
41	X-Rite	B4	A3	B4	A4	A3	A2	A2	A1	B2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	B2	A2	B2	A2	B4	B4	B4	B4
41	Behr	A4	A4	A4	B4	A2	A3	B2	A1	A1	B2	A3	B2	A2	A3	B2	A3	B2	A3	B2	A3	A2	A4	A4	A4	A4
41	vs Student	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
41	vs 1. Techn.	A3.5	A3.5	A3.5	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
41	vs 2. Techn.	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
42	MfH	A3	A2	B3	A3.5	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A2	A2	A3	B3	B3	B3
42	X-Rite	B3	A1	B3	A3.5	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	B2	A1	A1	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B3	B3	B3
42	Behr	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	B3	B3	B3
42	vs Student	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	B3	B3	B3
42	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	B3	B3	B3
42	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3
43	MfH	A3.5	A3	A3.5	A3	A2	A2	A3	A2	A2	D3	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A3	D3	A3	A3	B3	B3	B3	B3
43	X-Rite	A3.5	B4	A3.5	A4	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A1	A2	A2	A3	D3	A3	A3	B3	B3	B3	B3

Prüfandauer, Methode	13. durch 13. zenv		13. mitt		12. durch 12. zenv		12. mitt		11. durch 11. zenv		11. mitt		21. durch 21. zenv		21. mitt		22. durch 22. zenv		22. mitt		23. durch 23. zenv		23. mitt		23. zent	
	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B1	B2	B1	C1	A1	A1	A1	A1	B2	B3	B3	B2	C1	A3	B3	A3	B3	A3
43	Reih	B3	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B1	B2	B1	C1	A1	A1	A1	B2	B3	B3	B2	C1	A3	B3	A3	B3	A3	B3
43	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
43	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
43	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
44	MHT	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A4	A4	A4	A3	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
44	X-Rite	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A4	A4	A4	C3	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
44	vs Student	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
44	vs 1. Techn.	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
44	vs 2. Techn.	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
44	Mehrheit:	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
45	MHT	A3	B3	D3	A3	D3	C3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A3,5	A3,5	D3	A3	A3	B3	D3	D3	D3
45	X-Rite	B3	A2	B3	A3	D2	B3	D2	B3	D3	D3	A3,5	D3	D3	D3	A4	C1	A2	C1	A2	A3	B3	A2	B3	A3	A3
45	Reih	A3	A3	C1	C1	B2	C1	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D2	B2	D2	C1	A3	A3	A3	A3	C1	C1
45	vs Student	D3	D3	D3	D3	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3
45	vs 1. Techn.	D3	D3	D3	D3	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3
45	vs 2. Techn.	D3	D3	D3	D3	D2	D2	D2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3
46	MHT	D3	D3	D3	D3	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2	D2
46	X-Rite	A3	A4	A4	A3,5	A3	A3	A3,5	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A3	A4	A4	A4
46	Reih	A3,5	A4	A4	B3	A2	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A2	A3	A2	A3	A2	A3	A4	A4	A4	A4	A4
46	vs Student	A3,5	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
46	vs 1. Techn.	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
46	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
47	MHT	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
47	X-Rite	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4	A4
47	Reih	B4	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	C1	A1	B1	A1	A1	A1	B1	B2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
47	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	B4	A3,5	A3,5	A3,5
47	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3	B3
47	vs 2. Techn.	B3	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3	B3
48	MHT	A2	A2	D3	A2	B2	C1	B2	C1	B2	C1	D2	A2	C1	D2	A3	D3	D2	D3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
48	X-Rite	A2	A2	A2	A2	B2	C1	B2	C1	B2	C1	D2	A2	C1	D2	A3	D3	D2	D3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
48	Reih	C1	B2	C1	B2	A1	A1	B2	A1	A1	A1	B1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B1	B1	A1	B1	B1
48	vs Student	B2	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	C1	C1	C1	C1
48	vs 1. Techn.	D2	D2	D2	D2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
48	vs 2. Techn.	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
48	Mehrheit:	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
49	MHT	A3	A3	A3,5	B3	A2	A2	D3	A2	A2	A1	C1	A2	A1	A2	A2	A3	A3	A2	A2	A2	A3,5	A3	A3,5	A3,5	A3,5
49	X-Rite	B3	A3	B3	A2	B2	A2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3	A3,5	B3	B3
49	Reih	A3	A3	A3	A3	B2	B2	B2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	B2	B2	B2	B2	B2	A3	A3	D4	A3	B3
49	vs Student	B3	B3	B3	B3	B3	B3	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3
49	vs 1. Techn.	B3	B3	B3	B3	B2	B2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3
49	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
49	Mehrheit:	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1
50	MHT	A3	A3	A3	B3	A2	A2	D3	A2	A2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A2	A2	A3	A3	A3,5	B3	B3
50	X-Rite	A2	A2	B3	B2	B2	B2	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	B2	B2	B2	A1	A2	A3	A3	A3,5	B3	B3
50	Reih	A3	A3	A3	A3	A3	B2	B2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	B2	B2	B2	A1	A2	A3	A3	D4	A3	B3
50	vs Student	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B3	B3
50	vs 1. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B3	B3
50	vs 2. Techn.	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B3	B3
50	Mehrheit:	A3	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	B3	B3
51	MHT	A3	A3	A3	B3	A2	A2	D3	A2	A2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A2	A2	A3	A3	A3,5	B3	B3
51	X-Rite	A2	A2	B3	B2	B2	B2	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2	B2	B2	B2	A1	A2	A3	A3	A3,5	B3	B3
51	Reih	B4	B4	A4	A4	A4	A4	D3	C3	A1	A3	A1	B1	A1	A1	A3	A4	A4	A3	A3	A3	A4	A4	A4	A4	A4
51	vs Student	B4	B4	B4	B4	B4	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B4	B4	B4
51	vs 1. Techn.	B4	B4	B4	B4	B4	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B4	B4	B4
51	vs 2. Techn.	B4	B4	B4	B4	B4	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B4	B4	B4
51	Mehrheit:	B4	B4	B4	B4	B4	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B4	B4	B4

Prüfungsnummer	Methode	13. durch.	13. cerv.	13. inz.	12. durch.	12. cerv.	12. inz.	11. durch.	11. cerv.	11. inz.	21. durch.	21. cerv.	21. inz.	22. durch.	22. cerv.	22. mitt.	23. durch.	23. cerv.	23. mitt.	23. inz.
8	vs 1. Techn. 2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	B2
8	vs 2. Techn. 2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2
9	Mehrbreit	A2	A2	A2	A1	A1	A1	#	#	#	#	#	#	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2
9	X-Rite 2	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
9	Boeth 2	A3	A3	A3	B2	C1	B2	C1	B1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	C1	B2	A3	A2	A2
9	vs Student 2	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
9	vs 1. Techn. 2	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
9	vs 2. Techn. 2	B3	B3	B3	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3
10	Mehrbreit	A3	A3	A3	A2	A2	#	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
10	MHT 2	A4	A4	A3,5	A3,5	D3	D3	A3	A3	A3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
10	X-Rite 2	A4	A4	A4	C4	A3	A2	B3	A2	A2	B3	A2	B3	D3	A3,5	D3	C3	B4	B4	B4
10	Boeth 2	B3	B3	B3	B2	B2	C1	B2	C1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	C1	B3	B4	B4	B4
10	vs Student 2	B3,5	B3,5	B3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
10	vs 1. Techn. 2	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3
10	vs 2. Techn. 2	B3	B3	B3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3
11	MHT 2	A3	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	#	B3	B3	B3
11	X-Rite 2	B3	B3	B3	A4	B2	A2	D3	D2	D3	D2	D2	D2	A3	A3	D3	D3	D3	D3	A3,5
11	Boeth 2	A2	A2	A3	A1	B2	A1	C1	D2	B1	D2	B1	D2	B2	A2	A3	A3	A3	B2	C1
11	vs Student 2	A3,5	A3,5	A3,5	B2	B2	B2	B2	D2	D2	D2	D2	D2	B2	B2	B2	A3	A3	A3	A3
11	vs 1. Techn. 2	A3	A3	A3	C1	A2	C1	C1	C1	C1	C1	C1	C1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
11	vs 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A1	A3	A3	A3	A3
12	Mehrbreit	A3	A3	A3	#	A2	A1	#	C1	#	D2	C1	#	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
12	X-Rite 2	A2	A2	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
12	Boeth 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
12	vs Student 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
12	vs 1. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	B1	B1	B1	B1	B1	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
12	vs 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
13	Mehrbreit	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3
13	X-Rite 2	B4	B4	A3,5	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
13	Boeth 2	A4	B4	A4	B2	D4	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B4	B4	B4	B4
13	vs Student 2	B3	B3	B3	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B4	B4	B4	B4
13	vs 1. Techn. 2	B3	B3	B3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B4	B4	B4	B4
13	vs 2. Techn. 2	B3	B3	B3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B3	B3	B3	B3
14	MHT 2	#	#	#	#	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	#	A2	A2	B4	B4	B4	#
14	X-Rite 2	A3	A3,5	D3	D2	D3	A2	A1	B2	A1	A2	A1	A2	A2	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
14	Boeth 2	A3	A3	A4	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	A1	B2	A2	B3	A2	B3
14	vs Student 2	A3,5	A3,5	A3,5	B2	C1	B2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	A1	B2	B3	B3	B3	A3
14	vs 1. Techn. 2	C3	C3	C3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
14	vs 2. Techn. 2	A3	A3	A3	C1	C1	C1	C1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	C1	C1	A3	A3	A3	A3
15	Mehrbreit	A3	A3	A3	A2	D2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	C1	C1	A3	A3	A3	A3
15	X-Rite 2	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	#	A2	A2	B3	B3	A3	A3
15	Boeth 2	B3	B3	B3	B2	B2	B2	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	B4	B4	B4	B4
15	vs Student 2	B4	B4	B4	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	A1	A3	A3	A3	A3
15	vs 1. Techn. 2	A3	A3	A3	C1	C1	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	B4	B4	B4	B4
15	vs 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
16	Mehrbreit	#	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3
16	X-Rite 2	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A3	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
		A3,5	A3,5	A3,5	C4	C4	C4	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3

Probandumnr.	Methode	13. durchl.	13. env.	13. mtz.	12. durchl.	12. env.	12. mtz.	11. durchl.	11. env.	11. mtz.	11. inz.	21. durchl.	21. env.	21. mtz.	21. inz.	22. durchl.	22. env.	22. mtz.	22. inz.	23. durchl.	23. env.	23. mtz.	23. inz.	
16	Rieth 2	A3	B3	A3	A2	B2	A2	A1	B2	A1	A1	A1	B2	A1	A1	B2	A3	B2	B2	A3	C3	A3	A3	A3
16	vis Student 2	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	B3	B3	B3	B3	B3
16	vis 1. Techn. 2	A3	A3	A3	A2	A1	A2	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	A2	A2	A1	A1	A3	A3	A3	A3	A3
16	vis 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
17	Mehrheit	A3.5	A4	A3.5	B2	B2	B2	A2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
17	X-Rite 2	A3	B3	A3	B2	B3	B2	A2	B1	B2	A1	B2	B2	B2	B2	A3	D3	D3	D3	A3.5	B4	A3.5	A3.5	A3.5
17	Rieth 2	A3	B3	A3	B2	B2	B2	A1	B2	A1	B2	A3	B2	A1	B2	A3	D3	D3	D3	A3.5	B3	B3	B3	B3
17	vis Student 2	A3.5	A3.5	A3.5	C3	C3	C3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	D3	D3	D3	D3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
17	vis 1. Techn. 2	A3.5	A3.5	A3.5	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
17	vis 2. Techn. 2	A3.5	A3.5	A3.5	A3	A3	A3	A2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
18	Mehrheit	A3.5	A3.5	A3.5	A3	A3	A3	A2	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	D3	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
18	MHT 2	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A3	A2	D2	A2	D2	A2	A2	A2	D3	A2	D2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3.5
18	X-Rite 2	A3.5	A2	A3.5	A2	B3	A1	A1	A2	B2	A1	A2	B2	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A2	A3	A3	A3.5
18	Rieth 2	A3	A3	A3	A2	B2	A2	B3	A1	C1	A1	A1	C1	A1	A1	C1	A2	C1	A2	A3.5	A2	A3	A3	A3
18	vis Student 2	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
18	vis 1. Techn. 2	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
18	vis 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3
19	MHT 2	A3.5	A3	A3.5	D3	D3	D2	A2	D3	D2	A2	A2	A3	A2	B2	D3	D3	D2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
19	X-Rite 2	B4	B4	A4	A2	A2	A2	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3.5	A2	B4	A2	B4
19	Rieth 2	A3.5	B3	A3.5	C1	A1	B2	A1	C1	A1	C1	A1	C1	A1	A1	B2	B2	B2	B2	B3	C3	B3	B3	A3.5
19	vis Student 2	B4	B4	B4	B2	B2	B2	B1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B4	B4	B4	B4	B4
19	vis 1. Techn. 2	A3.5	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
19	vis 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A3	A3	A3	A3
20	MHT 2	A3	A3.5	A3.5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
20	X-Rite 2	B3	B3	A2	B1	B1	B1	A2	A1	A1	A1	A2	A2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A3	A3	A3	A3	A3
20	Rieth 2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3	A2	A3	A3	A3
20	vis Student 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A3	A3	A3	A3
20	vis 1. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A3	A3	A3	A3
20	vis 2. Techn. 2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2
21	MHT 2	A3.5	A3.5	A3.5	D3	D3	D3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	D2	D2	D3	A3	A3	D3	D3	D3	D3
21	X-Rite 2	A3.5	A3.5	A4	D3	A3	D3	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	C2	A3	B3	A3	A3	A3	A3.5
21	Rieth 2	C2	C2	B2	B2	B2	C2	A1	A1	A1	C1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2
21	vis Student 2	B3	B3	B3	D3	D3	D3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	B2	B2
21	vis 1. Techn. 2	A3.5	A3.5	A3.5	D3	D3	D3	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
21	vis 2. Techn. 2	A3.5	A3.5	A3.5	C2	C2	C2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
22	MHT 2	A3.5	A3.5	A3.5	B2	B2	B2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
22	X-Rite 2	B3	A2	B3	A1	A2	A2	B1	A1	B1	DE	A1	B2	A1	B2	A1	A3	A2	A2	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
22	Rieth 2	A3	A3	A3	A1	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	C1	B2	C1	B2	A3	A3	A3	A3	A3
22	vis Student 2	B3	B3	B3	B1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5	A3.5
22	vis 1. Techn. 2	B3	B3	B3	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B3	B3	B3	B3	B3
22	vis 2. Techn. 2	B2	B2	B2	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	B2	B2	B2
23	MHT 2	B3	B3	B3	A1	A2	A1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B1	B2	C1	#	#	#	#	#	#
23	X-Rite 2	A3	A3	A3.5	A3	A2	A3	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3.5
23	Rieth 2	A3	A3	A3	B2	A3	B2	A2	B2	A2	A1	A2	B2	A2	A2	B2	A2	B2	A2	B3	B3	B3	B3	B3
23	vis Student 2	A3	A3	A3	B2	A3	B2	A1	B2	A1	A1	A1	B2	A1	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A3	C3	A3	A3
23	vis 1. Techn. 2	A3	A3	A3	B2	A3	B2	A1	B2	A1	A1	A1	B2	A1	A1	B2	A1	B2	A1	B2	A3	C3	A3	A3
23	vis 2. Techn. 2	A3	A3	A3	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3

Probierdennr.	Methodik	13. durch.	13. serv.	13. mitt.	13. inz.	12. durch.	12. mitt.	12. inz.	11. durch.	11. serv.	11. mitt.	11. inz.	21. durch.	21. serv.	21. mitt.	21. inz.	22. durch.	22. serv.	22. mitt.	22. inz.	23. durch.	23. serv.	23. mitt.	23. inz.
24	MHT 2	A3,5	A3	A3,5	A3,5	A2	A3	A2	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A3	A2	A2	A3,5	A3	A3,5	A4
24	X-Ritec 2	B4	A2	B4	A4	B2	A2	B2	A1	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	B4	B4	A4
24	Reeth 2	A3	A3,5	A3,5	A3,5	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
24	vis Student 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	C2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	C2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
24	vis 1. Techn. 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
24	vis 2. Techn. 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A1	A2	A1	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
24	Mehrfreit	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2	A2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5
25	MHT 2	A2	A2	A2	A2	D2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A1	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2
25	X-Ritec 2	A2	A2	A2	A2	A1	A2	A1	B2	A1	B2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A1	A3	B2	B2	B2	A2
25	Reeth 2	B1	B2	B1	B1	C1	A1	B2	B1	A1	B1	B2	B1	A1	B2	B1	A1	B2	A1	B2	B2	B2	B2	B1
25	vis Student 2	A2	A2	A2	A2	A1	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2
25	vis 1. Techn. 2	A2	A3	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2
25	vis 2. Techn. 2	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2
25	Mehrfreit	A2	A2	A2	A2	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A2	A2	A2
26	MHT 2	A2	A3	A3,5	A3,5	D2	D3	D3	C4	A2	D2	D3	A2	A2	D2	D2	D2	A3	D3	D3	A3,5	A3	A3,5	B2
26	X-Ritec 2	B3	B4	B3	A3,5	A2	A2	A2	A3	C1	A2	A3	C1	A2	A3	C1	A3	A3	A3	A3	A3	B3	A3	A3,5
26	Reeth 2	A3	C3	A3	A2,5	A1	B2	A1	C1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	A1	B2	B2	B2	C1	A3	A2	A3	A3,5
26	vis Student 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3
26	vis 1. Techn. 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	B2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5
26	vis 2. Techn. 2	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5
26	Mehrfreit	A3,5	A3,5	A3,5	A3,5	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A2	A3	A3	A3	A3	A3	A3,5	A3,5	A3,5

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Priv.-Doz. Dr. med. dent. B. Hugo, ZMK-Klinik Würzburg, der mich für die Erarbeitung des von ihm gestellten Themas motivierte, mir das Erlernen der vielfältigen Methoden wissenschaftlichen Arbeitens ermöglichte und mir jederzeit mit wertvollen Ratschlägen und konstruktiver Kritik zur Seite stand.

Meine Anerkennung will ich auch den Probanden gegenüber ausdrücken, die Ihre Zeit geopfert haben und ohne die diese Studie so nicht durchführbar gewesen wäre.

Prof. Dr. med. dent T. Holste erklärte sich dankenswerter Weise bereit, meine Arbeit als Koreferent zu begutachten.

Die Firmen GDF Schütz Dental (Rosbach), X-Rite GmbH (Köln) und Dentaldepot Anton Kern (Würzburg) stellten freundlicherweise die Messtechnik zur Verfügung und waren kompetente Ansprechpartner bei technischen Fragen. Insbesondere Herr Dipl.-Ing. D. Exner von der X-Rite GmbH war sehr bemüht, offene Fragen zu klären und meine Arbeit zu unterstützen.

Unverzichtbare Hilfe bei der statistischen Auswertung des umfangreichen Materials war mir Herr Alois Spahn, Rechenzentrum der Universität Würzburg, Leiter "Beratung, Information und Ausbildung". Die Ratschläge, seine Geduld und Bereitschaft sich mit der Materie zu beschäftigen will ich an dieser Stelle lobend anerkennen.

Nicht zuletzt sage ich auch meinen Eltern dank, die mir wertvolle Unterstützung während Studium und Promotion waren und denen ich somit viel zu verdanken habe.

Lebenslauf

Name: Tobias Jochen Witzel
Wohnort: Gartenstraße 1, 97072 Würzburg
Geburtsdatum: 23. April 1977 in Würzburg
Familienstand: ledig

Schulausbildung:

Besuch der Max-Dauthendey Grundschule in Würzburg von 1983 bis 1987
Besuch des Humanistischen Wirsberg-Gymnasiums in Würzburg von
September 1987 bis Juni 1996 mit abschließender Hochschulreifeprüfung

Zivildienst:

Ableisten des Zivildienstes im Studienseminar Julianum Würzburg von
Oktober 1996 bis November 1997

Hochschulstudium:

Studium der Zahnmedizin an der Julius-Maximilians-Universität Würzburg
von November 1997 bis Juni 2003
Abschluss mit dem Staatsexamen, approbierter Zahnarzt seit Juli 2003

Berufstätigkeit:

Seit Dez. 2003 Vorbereitungsassistent bei Dr. Hahn
in Möckmühl bei Heilbronn

Würzburg, 20.01.2005

T. Witzel

