

Farbmessung in kleinsten Farbräumen am Beispiel der Zahnfarbenmessung

Harald Nier, Petra Tatzner, Robert Mudri

ARC- Seibersdorf Research GesmbH.

Bereich: Werkstoffe und Produktionstechnik

Geschäftsfeld: Automatisierung in der Qualitätskontrolle

A-2444 Seibersdorf

Tel.: 050550 / 2771

Fax:050550/2725

Harald.Nier@arcs.ac.at, Petra.Tatzner@arcs.ac.at, Robert.Mudri@arcs.ac.at

Zusammenfassung:

Ziel war es, ein bildgebendes System zu entwickeln, welches reproduzierbar Zahnfarben vermisst und auf objektiver Basis eine Klassifizierung zu einem handelsüblichen Zahnschlüssel zulässt. Diese Arbeit beschreibt neben dem Kernproblem der Farbbestimmung in kleinsten Farbräumen die hardware- und softwaretechnischen Realisierungsstufen eines Zahnfarbenmessgerätes.

Einleitung:

In der modernen Dentaltechnik wird die Farbe für den Zahnersatz typischerweise durch einen manuellen Vergleich der Zahnfarbe des Patienten mit einem Set von Vergleichsmustern bestimmt. Es gibt allerdings eine Vielzahl von Vergleichsmustern unterschiedlicher Hersteller.

Solche Vergleichsmuster werden seit Jahrzehnten von den Zahnärzten verwendet. Durch den subjektiven Eindruck des Zahnarztes wird dann die Zahnfarbe durch Auswahl der besten Übereinstimmung bestimmt. Diese Auswahl wird durch viele Faktoren beeinflusst, wie z.B. durch die Umgebungslichtverhältnisse beim Zahnarzt als auch im Dentallabor. Einen weiteren Einflussfaktor stellt die teilweise Sehschwäche beim Farbsehen vieler Menschen dar. Das führt in mehr als 10 % der Zahnersatzfälle zu inakzeptablen Farbbestimmungen, was zu Reklamationen des Patienten führt und ein neuer Zahnersatz gemacht werden muss. Dadurch entstehen zusätzliche Kosten und eine Verärgerung beim Patienten, beim Zahnarzt und / oder beim Zahntechniker.

Subjektive Bestimmung der Zahnfarbe:

Der Zahnarzt vergleicht die Farbe des zu ersetzenden Zahnes visuell mit den Musterprothesen und wählt aus den Musterprothesen das farblich am nächsten beim natürlichen Zahn liegende Muster aus (siehe Abb. 1). Der Zahnarzt oder Zahntechniker weiß nun aufgrund der Angaben des Herstellers, wie die entsprechende Musterprothese aufgebaut wurde und kann nun den künstlichen Zahn in der richtigen Farbe anfertigen. Dieses Vorgehen ist einerseits sehr aufwendig und kann andererseits zu Fehlern in Bezug auf den Farbton des künstlichen Zahnes führen.

Erschwerend kommt für den Zahnarzt dazu, dass die in der Realität auftretenden Zahnfarben oft andere Abstufungen und Farbverläufe als die der Musterprothesen haben.



Abb. 1: Manueller Farbvergleich zur Bestimmung der passenden Zahnfarbe

Objektive Bestimmung der Zahnfarbe mittels optischen Messinstruments:

Der größte Teil der Zahnfarbenmessgeräte basiert auf Spektralphotometer, die eine Detektierung ausschließlich punktförmig zulassen. Dabei kann jedoch keine Information über Zahngeometrie, Nachbarzähne und Farbverläufe erfasst werden.

Die derzeit am Markt erhältlichen bildgebende Zahnfarbenmessgeräte schränken sich teilweise durch die Verwendung von nur einer Musterzahnreihe ein oder sind aufgrund der großen Bauform nur für Zähne im vorderen Schneidenbereich geeignet bzw. sind nicht in der Lage, Panoramabilder aufzunehmen.

Auf Basis dieser Erkenntnisse entschloss man sich für ein bildgebendes Messverfahren in Kombination mit einer herkömmlichen Intraoralkamera, die rein für Panoramaaufnahmen im Dentalbereich Einsatz findet.

Überblick über die Komponenten des Messsystems:

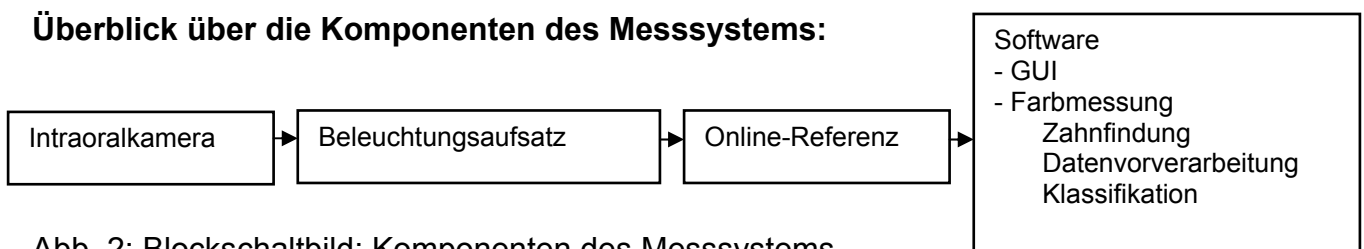


Abb. 2: Blockschaltbild: Komponenten des Messsystems

Die kompakt verpackte Sensorik, die das menschliche Auge nachbildet, befindet sich in einer handelsüblichen Interoralkamera. Mit dieser werden Panoramaaufnahmen des Zahnggebisses aufgenommen. Die Kamera ist mit einer integrierten LED- Beleuchtung ausgestattet, die eine Auflicht- Beleuchtungsanordnung darstellt. Aufgrund der strukturierten Zahnoberfläche, die durch die Eigenschaften vieler Mikroprismen charakterisiert werden kann, und der glänzenden Beschichtung durch Feuchtigkeit im Mundraum führt diese Art der Beleuchtung zu direkten Reflexionen in den optischen Strahlengang und somit zu undefinierten Glanzstellen, in denen keine reproduzierbare Farbe gemessen werden kann.

Daher entwickelte man einen speziellen Beleuchtungsaufsatz, der auch unter den Umgebungsbedingungen im Mundraum reproduzierbare Messungen erlaubt. Einflüsse, bedingt durch unterschiedliche Zahngeometrien, -krümmungen, -oberflächen und – feuchtigkeit werden ausgeschaltet. Das System misst unabhängig von Umgebungslichteinflüssen.

Eine Herausforderung bei der Trennung von Zahnfarben ist der sehr enge Bereich innerhalb des gesamten Farbraumes, in dem sich die zu bestimmenden Zahnfarben befinden, siehe Abbildung 3.

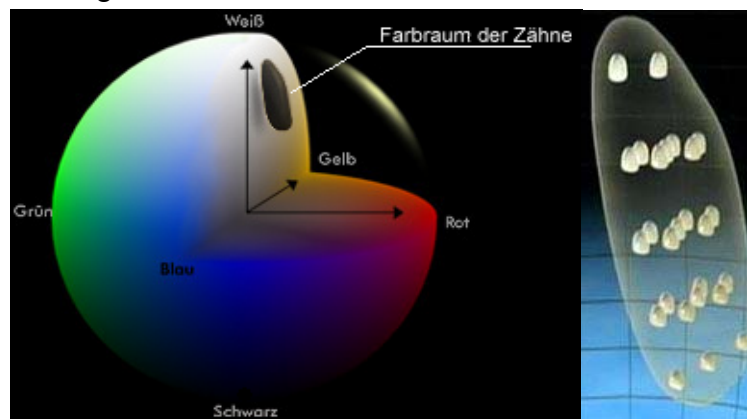


Abb. 3: Der gesamte Farbraum mit dem Farbraum einer Kunstzahnreihe

Aufgrund der Fülle von Einflussfaktoren, die auf eine Absolutmessung einwirken und die sich sehr schwer bis gar nicht kompensieren lassen, entschloss man sich für eine Relativfarbmessung. D.h., eine Online- Referenzierung in Form eines Plättchens, welches aus dem Kunstzahnbasismaterial besteht, macht bei jeder Messung Änderungen der Farbtemperatur und Intensität der Beleuchtung sowie temperatur- und alterungsbedingten Drifterscheinungen der Kamera erkennbar.

Die Software besteht aus einem bedienerfreundlichen Interface, der Bildverarbeitung in Form der Zahnfindung, einer Datenvorverarbeitung und schließlich einer Klassifizierung. Ein intelligenter Konturalgorithmus bestimmt automatisch die exakte Zahnposition und wertet in mehreren Messfenstern vom Zahnhals bis zur Schneide die Farbinformation aus. Dadurch ist auch eine Verlaufsbestimmung der Farbe über den einzelnen Zahn möglich.

Die Klassifizierung und Zuordnung der Zahnfarbe zu den einzelnen Farben der Zahnersatz-Materialien erfolgt mithilfe eines neuronalen Netzes, das vor der Auslieferung für jede Kamera automatisch trainiert wird.

Komponenten des Messsystems:

Kamera:

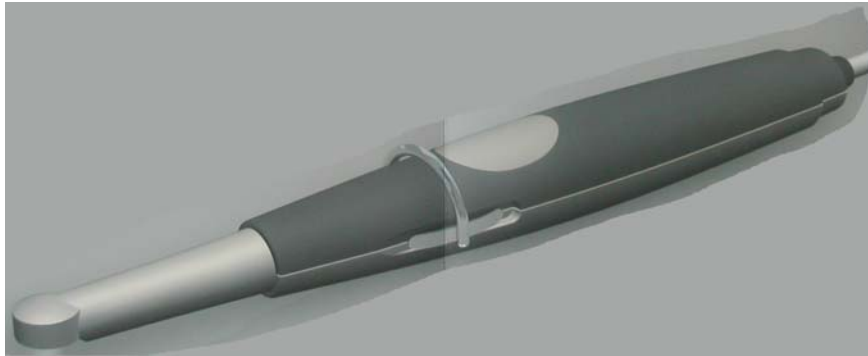


Abb. 4: Symbolfoto der verwendeten Intraoralkamera

Bei der zum Einsatz kommenden Kamera handelt es sich um eine handelsübliche Intraoralkamera der Firma Rodenstock Präzisionsoptik. Die Auflösung des CCD-Chips beträgt 752 x 582. Die Kamera liefert ein analoges S-Video Signal, welches durch einen 8 Bit- Framegrabber digitalisiert wird. Um auch Zähne im Backenbereich aufnehmen zu können, wird der optische Strahlengang über ein Umlenkprisma um 90° abgelenkt. Um das Prisma sind weiße, sehr intensitätsstarke SMD- LEDs angeordnet, die eine Direktbeleuchtung darstellen. Die Kamera verfügt über ein optisches Zoom, welches eine Aufnahme eines Panoramabildes und eines einzelnen Zahnes zulässt.

Beleuchtungsaufsatz:

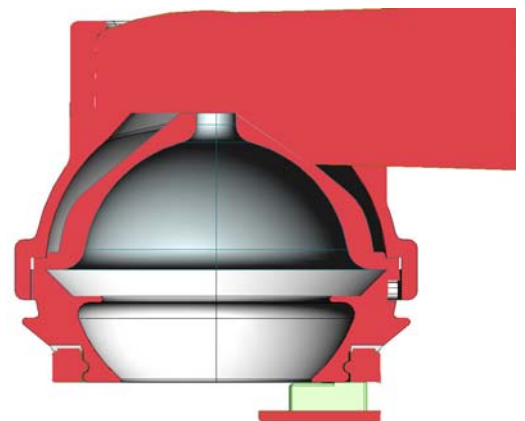
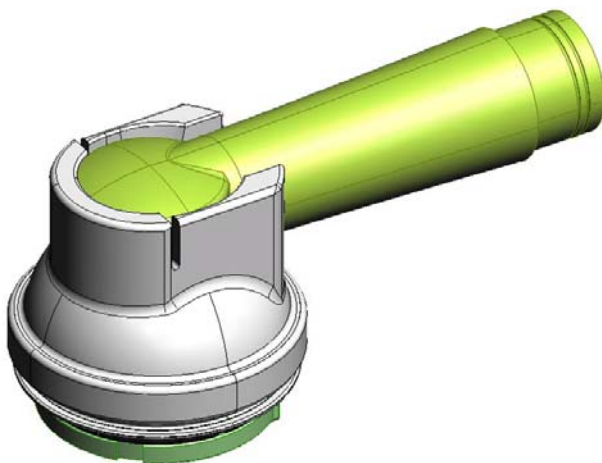


Abb. 5: Auszug aus einem Konstruktions- Assembly des ARC-SR entwickelten Beleuchtungsaufsatzes.

Die Anforderungen an den Beleuchtungsaufsatz für das Zahnfarbenmessgerät können zusammengefasst werden zu: Homogenität in der Ausleuchtung, diffuse Leuchtcharakteristik, keine spektrale Beeinflussung durch das Trägermaterial des Beleuchtungsaufsatzes, desinfektionsfest, Einschränkung in der Baugröße, Nutzung der integrierten Beleuchtungsquellen der Kamera für die Zahnfarbenbestimmung.

In der Farbmessung wird häufig die Messgeometrie der Ulbricht'schen Kugel verwendet. Diese ermöglicht eine optimale diffuse gleichmäßige Beleuchtung des zu vermessenden Objekts. Auch bei der Zahnfarbenmessung fand das Prinzip der Ulbricht'schen Kugel Anwendung.

Das Licht der kamerainternen Beleuchtung wird durch Vielfachreflexionen im Spalt zwischen dem Grundkörper und der Innenschale bis in die Höhe des Kugelmittelpunktes geleitet, und dort in die Kugel eingespiegelt.

Die kugelförmige Innenseite des Oberteils und die Außenseite der Innenschale wurden aluminiumbedampft (Reflexionsgrad ca. 90%) um als Spiegel zu wirken. Ebenso die kegelförmige Fläche des Unterteils, die das Licht in die Kugel einspiegeln soll. Die Blende im Unterteil soll verhindern, dass Licht direkt aus dem Spalt auf den Zahn trifft und so Reflexionen verursacht.

3-geteiltes Referenzstück (Online- Referenzierung):

Das Referenzstück dient zur relativen Zahnfarbenmessung. Dabei werden die gemessenen RGB- Rohwerte des Zahnes auf die RGB- Werte des Referenzstückes normiert. Die Referenzstückfarben wurden definiert durch 3 Stützpunkte durch den kompletten Zahnfarbenraum. Damit können Intensitätsschwankungen und Farbwertverschiebungen durch Temperaturdrifts über den gesamten Zahnfarbenraum kompensiert werden.

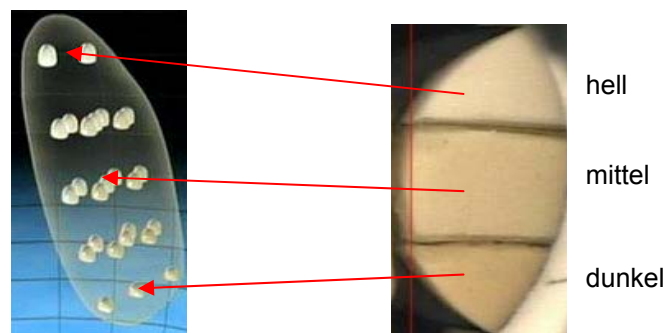


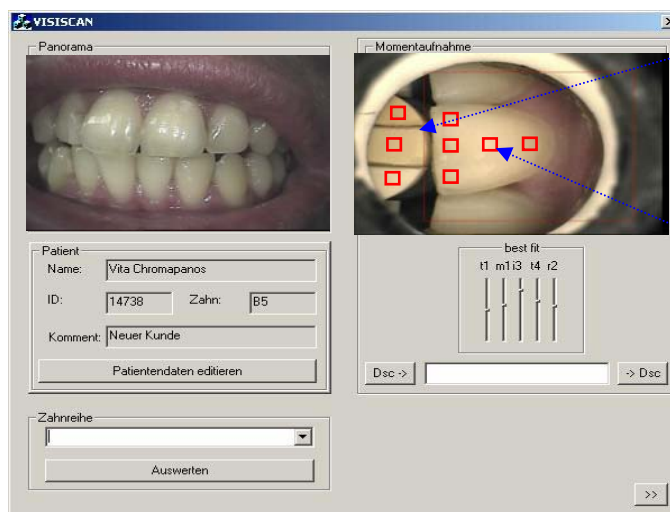
Abb. 6: GUI der Zahnfarbenmesssoftware

Software:

Graphisches User Interface:

Panoramaaufnahme

Momentaufnahme des
zu vermessenden
Zahnes



3-geteiltes
Referenzstück

Farbmessbereiche,
in denen die
Zahnfarbe und die
Farbe des
Referenzstückes
ermittelt werden.

Abb. 7: GUI der Zahnfarbenmesssoftware

Das graphische User Interface wurde sehr bedienerfreundlich und nur mit der notwendigen Funktionalität zur Farbmessung ausgestattet. Der Ablauf besteht aus der Eingabe der Patientendaten. In weiterer Folge kann eine Panoramaaufnahme des gesamten Gebisses gemacht werden. Um eine Farbmessung durchzuführen, wird der Beleuchtungsaufsatz auf die Intraoralkamera aufgesteckt, die Kunstzahnreihe ausgewählt, auf welcher die Klassifizierungsalgorithmen beruhen und per Fußtaster wird das Bild am Bildschirm dargestellt und gleichzeitig ausgewertet. Dabei wird für jedes Messfenster am Zahn ein Klassifizierungsergebnis berechnet. Aus dem bzw. den Bildern inklusive der Klassifizierungsergebnisse wird ein Transferdatensatz erstellt, der per Datenträger dem Zahntechniker übersendet wird. Dieser hat dann die Möglichkeit, anhand der Bilder und der Ergebnisse ein Replica nachzubilden. Der Zahntechniker besitzt selbst auch ein Zahnfarbenmessgerät, um die Qualität des Replicas und somit die Kunstzahnfarbe ständig überprüfen zu können.

Klassifizierungsmodell:

Klassifikationsalgorithmen lassen sich allgemein in folgendes Blockschaltbild einordnen (Abb. 8)

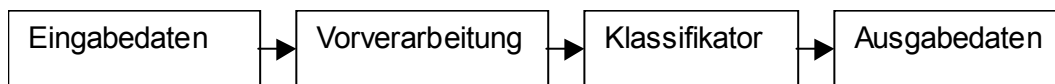


Abb. 8: Blockschaltbild Klassifikation

Die Eingabedaten bestehen aus den gemittelten Rohwerten der Farbmessbereiche (=40 x 40 Pixel² große **Region of Interests**) am Zahn (5 ROIs) und am Referenzstück (3 ROIs) des aufgenommenen RGB- Kamerabildes (siehe Abb. 7).

Vorverarbeitung:

Im ersten Schritt werden die mittleren Helligkeitswerte für den Rot-, Grün- und Blaukanal für den Zahn sowie für das 3-geteilte Referenzstück aus den Eingangsdaten berechnet. Nachdem die Zahnfarben- RGB- Werte auf die Referenzstück- RGB-Werte normiert wurden, kann aus diesen Daten eine normierte Intensität bestimmt werden, mit deren Hilfe eine erste Zuordnung der Zahnfarbe zum entsprechenden Helligkeitsbezeichner durchgeführt werden kann. Der Helligkeitsbezeichner ordnet die Musterzähne nach der Intensität.

Aus Abbildung 9 ist erkennbar, dass eine lineare Trennung anhand der Helligkeitsbezeichner möglich ist.

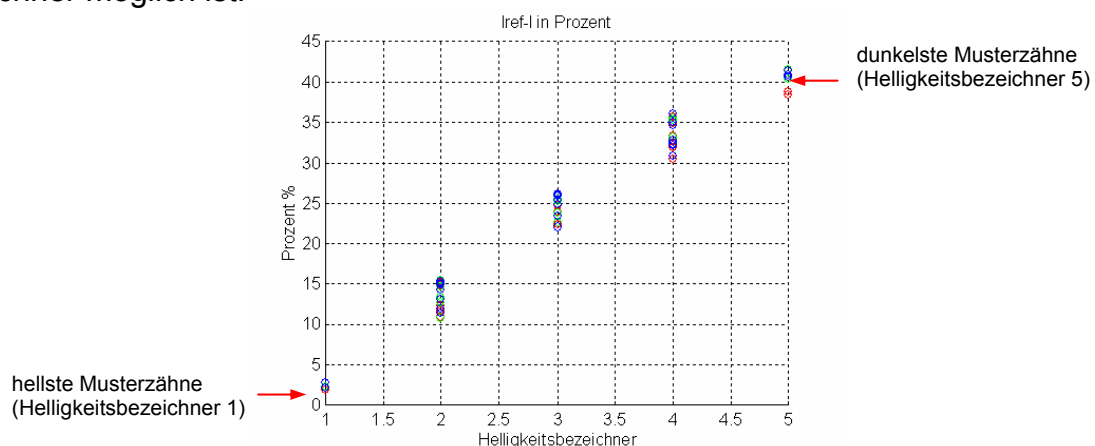


Abb. 9: Lineare Trennung anhand der Helligkeitsbezeichner

Der zweite Schritt dient der Datenaufbereitung innerhalb eines Helligkeitsbezeichners. Hier wurde durch geschickte Rechenalgorithmen eine erste grobe Aufspaltung der Zahnfarbnuancen innerhalb eines Helligkeitsbezeichners erreicht. Bei dieser Grafik handelt es sich um eine Darstellung von jeweils 3 Messungen der Musterzähne (3M1, 3M2, 3M3, 3R1.5, 3R2.5, 3L1.5, 3L2.5) innerhalb des Helligkeitsbezeichners 3. Man kann sehr deutlich erkennen, dass lineare Klassifizierungsmodelle aufgrund der geringen Farbabstände und der Streucharakteristik zwischen den einzelnen Zahnbezeichner, hierbei nicht zum Einsatz kommen können.

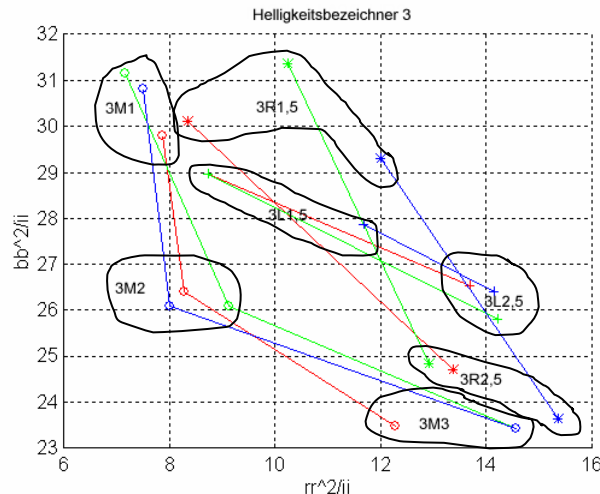


Abb. 10: Aufspaltung innerhalb des Helligkeitsbezeichners 3

Klassifikator:

Eine erste Analyse der Daten ergab, dass komplexere Algorithmen untersucht werden müssen. Da sich eine lineare Trennung innerhalb der Helligkeitsbezeichner als unzureichend herausstellte, wählte man den Ansatz der Künstlichen Neuronalen Netze (KNN), da diese eine nicht lineare Klassifizierung unterstützen. Als zielführendste Netztopologie für die Klassifizierung der Zahnfarben stellten sich die Feedforward Netze (FF) heraus.

Als KNN findet ein zweischichtiges Netz mit 20 Neuronen in der Zwischenschicht Verwendung. Die Anzahl der Eingabeneuronen richtet sich nach der Dimension des Eingabedatenraumes (im gezeigten Beispiel 2) und die Anzahl der Ausgabeneuronen nach der Anzahl der zu klassifizierenden Zähne (im gezeigten Beispiel 7).

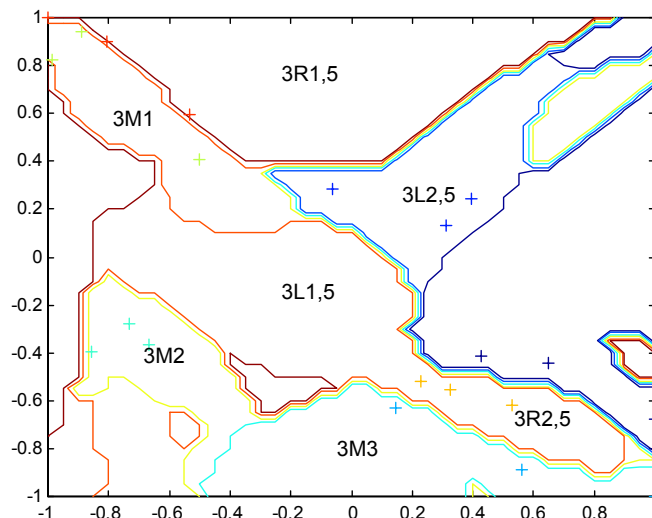


Abb. 11: Klassifikation mittels FF-Netzwerk, Wiedergabephase

Abb. 11 zeigt, dass die Klassifikationsaufgabe gelöst werden konnte, dies trifft auch für die restlichen Zahnreihen zu.

Ausgabedaten:

Die Ausgabedaten entsprechen den Zahnfarben der Reihe Vitapan 3D-Master 1M1 bis 5M3.

Die Entwicklung des Zahnfarbenmessgerätes umfasst von der Aufnahmetechnik, der Beleuchtungstechnik bis hin zur Klassifikation eine komplexe Datenverarbeitungskette. Der Nutzen des Kunden ist gekennzeichnet durch die Kombination einer im Dentalbereich seit einigen Jahren verwendeten Kameratechnik mit einem Farbmessaufsatz und einer Auswertesoftware. Somit können neben dem Aufnehmen von Panoramabildern Farbmessungen an den jeweiligen Zähnen durchgeführt, archiviert und dokumentiert werden. Der Zahntechniker hat eine Vielzahl von Mehrinformationen, wie Zahnfarbenverlauf und Zahngeometrie, über den zu ersetzenden Zahn sowie die angrenzenden Zähne.

Literatur

- [1] Hecht Nielsen, R.: *Neurocomputing*, Addison Wesley, 1991
- [2] Hertz, J., Krogh, A., Palmer, R.G.: *Introduction to the Theory of Neural Computation*, Addison-Wesley, 1991
- [3] Kohonen, T.: *Self-Organization and Assoziative Memory*, 3. Aufl., Springer, 1989
- [4] Rojas, R.: *Theorie der neuronalen Netze*, Springer, 1993
- [5] Zell, A.: *Simulation Neuronaler Netze*, Addison-Wesley, 1994
- [6] Lang, H.: *Farbwiedergabe in den Medien: Fernsehen, Film, Druck*, Muster-Schmidt, 1995
- [7] Vita: *Vitapan 3D-Master: Das Zahnfarbsystem, mit dem Sie einfach genauer treffen*
- [8] Gnan, Ch.: *Color Theory for the Dentist and Dental Technician*, QDT 1996
- [9] Gnan, Ch.: *Farbenlehre II*, QZ 10/95
- [10] Gnan, Ch.: *Farbenlehre III*, Quintessenz der Zahntechnik 1997
- [11] MatLab: *Neuronal Network Toolbox*, Mathworks