Onlinefähige automatische Farbmessung an künstlichen Zähnen

Sarah Steinmetz, Thomas Längle, Kai-Uwe Vieth, Matthias Burkhard

Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB
Fraunhoferstraße 1, D-76131 Karlsruhe
eMail: Sarah.Steinmetz@iosb.fraunhofer.de
URL: http://www.iosb.fraunhofer.de

Zusammenfassung Die Farbmessung an künstlichen Zähnen ist ein aktuell verfolgtes Forschungsthema im Bereich der Bildverarbeitung, das eine große industrielle Relevanz in sich birgt. Zur individuellen Zahnfarbenbestimmung sind bereits spektrophotometrische Messgeräte im Einsatz, die lediglich die manuelle und damit langsame Prüfung von künstlichen Zähnen ermöglichen. In diesem Beitrag wird ein System zur automatischen Farbmessung an künstlichen Zähnen vorgestellt, das bereits während der Produktion den Ausschluss von in der Farbe fehlerhaften Zähnen ermöglicht.

1 Aufgabenstellung

Im Gegensatz zur aufwändigen Einzelprüfung ist bei der Herstellung von künstlichen Zähnen ein Farbmess-System gewünscht, das schritthaltend mit den Produktionsprozessen eine Farbbestimmung ermöglicht [3], nachdem in Form oder Größe fehlerhafte Zähne bereits aussortiert wurden [4]. Bei einem industrietauglichen Inspektionssystem ist messtechnisch eine genaue Farbunterscheidung notwendig, damit die unterschiedlichen Farbnuancen diskriminiert werden können. Zudem müssen Farbfehler innerhalb des Zahnes, wie Inhomogenitäten in der Färbung oder im Farbverlauf, zuverlässig erkannt werden.

2 Stand der Technik

In der Dentaltechnik werden zur Farbbestimmung des individuellen Zahnersatzes neben konventionellen Farbschlüsseln (Handmustersatz) bereits Instrumente eingesetzt, die unter den eingeschränkten Bedingungen des Mundraumes eine automatische Farbbestimmung der Zähne ermöglichen. Hierzu werden im einfachsten Fall Dreibereich-Farbmessgeräte (Colorimeter) verwendet, die nur die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau bestimmen. Komplexere Ansätze arbeiten spektrophotometrisch; hierbei wird ein größerer Farbraum abgedeckt, wobei aber meist nur einige punktuelle Messungen erfolgen, sodass die Farbe nur ungenau geschätzt werden kann. Wenn sowohl der behandelnde Zahnarzt als auch der ausgewählte Zahntechniker über ein solches Werkzeug verfügen, ist ein individueller Abgleich der Farbinformation möglich [1] [2]. Dieser Ansatz ist für eine automatisierte

Prüfung mit hohem Durchsatz ungeeignet, da bei den uns bekannten spektrophotometrischen Systemen eine Geschwindigkeit von lediglich mehreren Sekunden pro Zahn erreicht werden kann [7] und somit keine schritthaltende Inspektion mit dem vorgelagerten Produktionsprozess möglich ist.

3 Lösungsansatz

Um die Auswertealgorithmen der Farbbestimmung an die schnellen Umgebungsprozesse anzupassen, ist es notwendig, mehrere künstliche Zähne gleichzeitig zu prüfen. Hierzu müssen die einzelnen Zähne in der Aufnahme segmentiert werden, bevor die eigentliche Farbbestimmung erfolgen kann. Um einen korrekten Farbwert zu erhalten, dürfen zudem bei jedem Zahn nur Bereiche herangezogen werden, die eine zuverlässige Schätzung des Farbwerts ermöglichen. Ein Beispiel für unerwünschte Regionen sind die Randbereiche, die selbst bei optimalen Beleuchtungsverhältnissen dunkler erscheinen. Zudem muss das System robust gegen Störungen, z. B. Reflexionen, ausgelegt werden.

Das Fraunhofer IOSB arbeitet bereits seit Jahren im Bereich der spektralen Farbmessung und hat in diesem Umfeld das System ColorControl zur On-Line Farbmessung an Kunststoffgranulaten entwickelt (Abbildung 1), das bereits mehrfach im industriellen Einsatz ist [5]. Mit der Aufnahmetechnik von ColorControl ist es prinzipiell möglich, spektrale Bilder im sichtbaren Bereich (Frequenzbereich von 400 bis 700 nm) mit einer Auflösung von 5 nm zu gewinnen [6]. Im Folgenden wird beschrieben, wie basierend auf diesen Vorarbeiten eine Farbinspektion von künstlichen Zähnen anhand hyperspektraler Daten erfolgt.

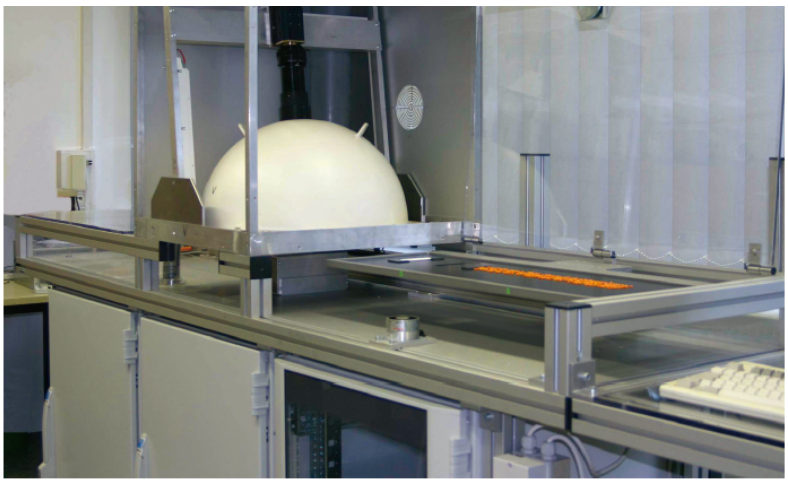

Abbildung 1: Farbmess-System ColorControl

Auf einem Messtisch werden die Zähne automatisch unter der Beleuchtung bewegt. Um die Robustheit des Ansatzes zu erhöhen, wird hierzu eine Ulbrichtkugel verwendet, die diffus und homogen mit breitbandigem Licht beleuchtet, siehe Abbildung 2.

Für jeden der 640 Bildpunkte in Zeilenrichtung wird mithilfe eines bildgebenden Spektrometers und einer Flächenkamera der Spektralbereich des reflektierten sichtbaren Lichtes im 5 nm-Raster abgetastet, um den jeweiligen Energieanteil zu erfassen. Um eine

Verzerrung des Bildes zu vermeiden, erfolgt die Bildaufnahme Zeile für Zeile synchron zu der Bewegung des Messtisches. Vor jedem Messdurchgang wird durch einen Weißabgleich eine Kalibrierung des Systems durchgeführt, um den Einfluss langfristiger Driften in Kamera und Beleuchtung zu kompensieren.

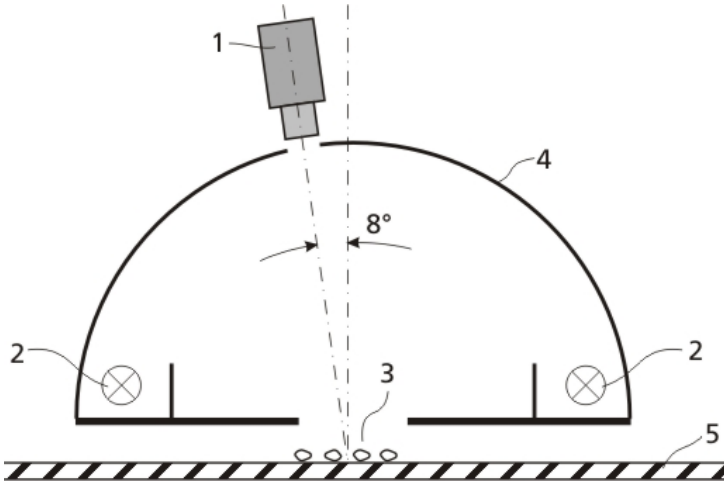

Abbildung 2: Schematischer Aufbau von ColorControl. 1: Bildg. Spektrograph, 2: Lampe, 3: Zähne, 4: Ulbricht-Halbkugel, 5: Messtisch [6]

Nicht alle Bildpunkte im Messfeld gehören zu den Zähnen oder tragen zuverlässige Information über die Farbe des Materials. Die Beispielaufnahme aus Abbildung 3 zeigt das aufgeführte Problem, dass verschiedene Bereiche des Zahnes unterschiedlich wirken.

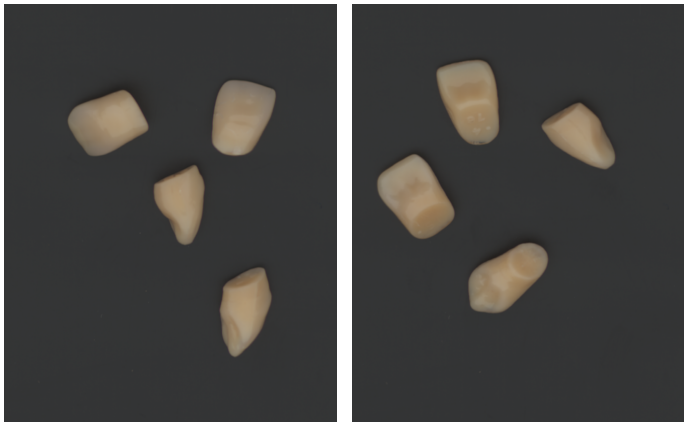

Abbildung 3: Aufnahmen von künstlichen Zähnen mit ColorControl

Zur Segmentierung wird für jeden Bildpunkt das gemessene Spektrum in den entsprechenden XYZ-Farbwert umgerechnet. Anschließend werden Histogramme im XYZ-Farbraum bestimmt, um mit Hilfe von statistischen Verfahren die Bildpunkte zu identifizieren, die die Bestimmung der Farbe negativ beeinflussen. Hierzu gehören der Hintergrund sowie der Randbereich jedes Zahnes. Für jeden Zahn werden die XYZ-Werte der als relevant segmentierten Bildpunkte gemittelt. Unter Verwendung der Normlichtart D65 wird der entsprechende L*a*b*-Wert berechnet. Die Abweichung vom gewünschten L*a*b*-Referenzfarbwert wird als euklidischer Abstand dE im L*a*b*-Farbraum berechnet.

Der L*a*b*-Farbraum wird verwendet, damit der Bediener der Anlage das Messergebnis quantitativ bewerten kann. Auch manuelle Zahnfarbmessgeräte verwenden in der Regel diesen Farbraum, da er die Forderungen der Gleichabständigkeit erfüllt und dem Menschen somit eine intuitive Interpretation von Farbabständen ermöglicht.

4 Experimentelle Ergebnisse

Die erste Teilaufgabe besteht in einer messtechnisch genauen Farbbestimmung, damit die unterschiedlichen Farbnuancen diskriminiert werden können. Die Unterscheidung der verschiedenen Farbnuancen, die Grundlage für ein industriell akzeptiertes Messsystem ist, wurde anhand einer Farbskala (Zahnrechen) geprüft. Hierfür stand ein Zahnrechen der Firma VITA Zahnfabrik zur Verfügung. Die Farbskala VITAPAN® classical verwendet insgesamt sechzehn Farbwerte, die in vier Gruppen (Rötlich-bräunlich, Rötlich-gelblich, Grautöne und Rötlich-grau) aufgeteilt sind. Eine Beispiel-Aufnahme dieses Zahnrechens mit dem ColorControl ist in Abbildung 4 gezeigt.

Abbildung 4: ColorControl-Aufnahme einer VITAPAN® classical A1-D4-Farbskala

Wie im vorigen Abschnitt beschrieben, wurden von jedem Zahn mehrere Messungen durchgeführt, um jeweils den L*a*b*-Wert des Zahns zu berechnen. Ein Beispiel für die Segmentierung der relevanten Pixel eines Zahnes ist aus Abbildung 5 ersichtlich; die zur Farbbestimmung verwendeten Pixel sind eingefärbt.

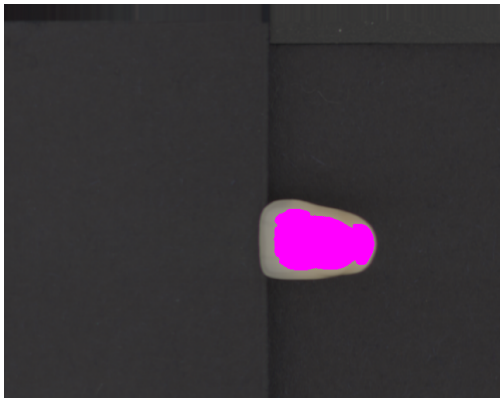

Abbildung 5: Segmentierung der relevanten Pixel des Zahnes A1

Die Ergebnisse des ersten Messdurchgangs sind für jedes der sechzehn Zahnmuster in Tabelle 1 aufgeführt. Nach der Aufnahme der verschiedenen Messreihen wurde eine statistische Auswertung durchgeführt. Hierzu wurden die euklidischen Abstände dE der L*a*b*-Werte aller Messungen berechnet. Die Abstände zwischen verschiedenen Farbklassen sowie die Abstände von Messungen derselben Farbklasse wurden als Maß für die Unterscheidbarkeit der Farben ausgewertet. Die Abstände innerhalb der Farbklassen dienen zudem als Maß für den Messfehler oder die Reproduzierbarkeit der Messungen. Es ergaben sich folgende Resultate:

- Minimaler Abstand zwischen unterschiedlichen Klassen: dE = 0,8733
- Maximaler Abstand von Messungen derselben Klasse: dE = 0,1324
- Mittlerer Abstand zwischen unterschiedlichen Klassen: dE = 6,4703
- Mittlerer Abstand von Messungen derselben Klasse: dE = 0,0315

Der maximale aufgetretene Messfehler liegt bei dE = 0,1324; im Mittel liegt er jedoch bei nur dE = 0,0315. Dies spricht für eine gute Reproduzierbarkeit der Messwerte. Der geringe mittlere Fehler lässt darauf schließen, dass es sich beim maximalen Messfehler um einen Ausreißer handelt. In [6] wurde bereits für die Farbmessung an Kunststoffen nachgewiesen, dass auch über längere Zeitspannen hinweg (Stunden bis mehrere Tage) keine signifikanten Abweichungen (dE < 0,2) auftraten.

Der minimale Abstand unterschiedlicher Klassen von dE = 0,8733 belegt, dass selbst ähnlichste Farbwerte robust unterschieden werden können. Im Mittel liegt der Abstand zwischen verschiedenen Klassen sogar bei dE = 6,4703.

Tabelle 1: L*a*b*-Werte der einzelnen Zähne im ersten Messdurchgang

	L	**a**	**b**
a1_1	76,7092	0,5648	11,8372
a2_1	74,5269	2,5075	15,4493
a3_1	71,9986	2,95	16,7639
a35_1	69,9847	3,5793	18,8802
a4_1	65,7604	4,7437	18,4431
b1_1	76,2275	-0,2954	10,6279
b2_1	74,7477	0,8959	14,8708
b3_1	70,3453	2,8746	19,2489
b4_1	70,6588	3,2863	20,4335
c1_1	71,5153	1,0843	11,1065
c2_1	69,4155	1,931	15,3397
c3_1	66,7757	2,2794	14,5929
c4_1	62,9817	3,6868	16,5727
d2_1	69,9809	1,5267	11,6913
d3_1	69,1382	3,0009	15,3035
d4_1	68,8462	1,5876	17,2991

Eine Unterscheidung der sechzehn Farbklassen ist somit problemlos möglich. Der zweite Teil der Aufgabenstellung, nämlich die Erkennung von Farbfehlern innerhalb eines Zahnes, ist aktuelles Forschungsthema am Fraunhofer IOSB. Ein möglicher Ansatz ist die Berechnung des L*a*b*-Werts für jeden Pixel des segmentierten Zahnes, um die Varianz der L*a*b*-Werte des gesamten Zahnes zu bestimmen. Bei einem homogen gefärbten Zahn ist eine geringe Varianz zu erwarten. Bei einem Zahn mit abweichenden Farbbereichen wird diese Varianz höher sein. Ob dieses Maß statistisch ausreicht, werden die weiteren Untersuchungen zeigen. Eventuell ist ein Vergleich der Spektren notwendig, da die Umrechnung in L*a*b*-Werte mit einem Informationsverlust einhergeht. Außerdem ist eine nötige Helligkeits-Normierung zu erwarten, da aufgrund der Materialbeschaffenheit des Kunstzahnes selbst bei Beleuchtung mit einer Ulbrichtkugel Glanzspiegelungen auftreten. Diese beeinflussen das angesprochene Maß der Varianz. Eine Beispielaufnahme eines defekten Zahnes ist in Abbildung 6 als RGB-Bild sowie als Grauwertdarstellung des Spektralbilds bei 541 nm dargestellt. Der Farbfehler an der Schneide des Zahns ist in der Spektralkanaldarstellung etwas besser zu erkennen, das RGB-Bild zeigt den Effekt einer großflächigen Glanzspiegelung.

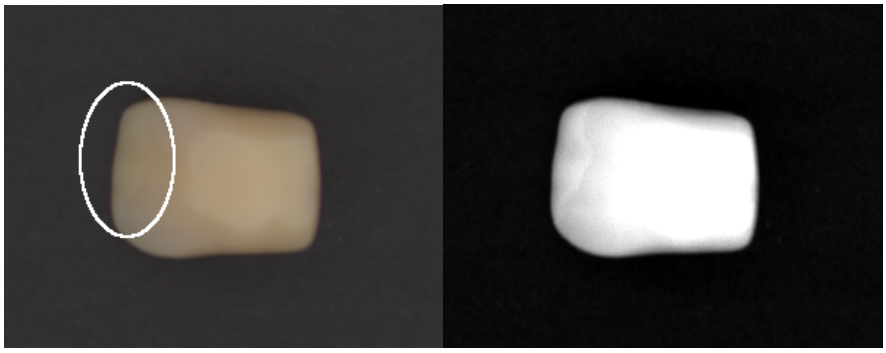

Abbildung 6: Aufnahme eines Zahnes mit Farbfehler. Links: RGB-Darstellung mit markiertem Farbfehler. Rechts: Grauwertdarstellung eines Bands des Spektralbilds bei 541 nm.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in diesem Beitrag präsentierten Voruntersuchungen, die am Multisensorlabor des Fraunhofer IOSB in Karlsruhe durchgeführt wurden, zeigen, dass eine robuste Farbmessung an künstlichen Zähnen mit dem ColorControl möglich ist. Eine robuste Unterscheidung der Farbklassen an einem Farbrechen der Firma VITA Zahnfabrik wurde statistisch belegt. Aktuelles Forschungsthema am Institut ist die Erweiterung des Ansatzes auf die Erkennung von Farbfehlern innerhalb eines Zahnes. Bereits jetzt liegen dem IOSB diverse Anfragen nach einem derartigen System vor, was auf eine große wissenschaftliche und wirtschaftliche Relevanz der Thematik hinweist.

Literatur

[1] Nier, H.; Tatzer, P.; Mudri, R.: *Farbmessung in kleinsten Farbräumen am Beispiel der Zahnfarbenmessung*. 9. Workshop Farbbildverarbeitung, ISBN 1432-3346, 2003.

[2] Baltzer A., Kaufmann-Jinoian, V.: *Digitale Farbmessung der Zähne*. Quintessenz Zahntech, 30 (8), S. 834-858, 2004.

[3] Längle, T.: *Quality Control of Bulk Material in Factories of the Future*. 23rd International Conference on CAD/CAM Robotics and Factories of the Future. In: Proceedings of the CARS/FOF, ISBN 978-958-978-597-3, S. 667-670, August, 2007.
[4] Westcam Dental – Tooth Sorting Machine. http://www.westcam.at/projektmanagement/en/westcam-dental-tooth-sorting.html (Stand: 28.06.2010).
[5] Vieth, K.-U.; Enderle, E.: *Wann ist Grün Grün?* QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Ausgabe 9/2009; S. 58-60, 2009.
[6] Vieth, K.-U.; Enderle, E., Burkhard, M.: *Online Farbmessung mittels bildgebendem Spektrometer*. 15. Workshop Farbbildverarbeitung, ISBN 978-9812158-4-7, S. 71-76, 2009.
[7] Kern, M.; Paul, S. J.: *Können Computer Zahnfarben besser erkennen?* ZWL, S. 22-27, 2003.