

Über den Autor

André Hoffmann hat die Entstehung der Zahnfarbe systematisch und höchstpräzise u. a. an menschlichen Zähnen und dentalen Farbringen mit Hochpräzisionsmesssystemen und mit eigens entwickelten Hochpräzisionspositionierungssystemen erforscht und insbesondere im Jahre 2000 seine neuen Erkenntnisse vorgelegt und veröffentlicht und in den Folgejahren konkretisiert. Der Pionier im Bereich der optischen Technologien dürfte im Zuge seiner wissenschaftlichen Grundlagenforschung die wesentlichen Einflussfaktoren isoliert und eindeutig quantifiziert haben. Dazu gehören beispielsweise das Licht bzw. Messlicht und die Lichtarten verschiedener Farbtemperaturen, die Strahlengänge des Lichtes bzw. die Messgeometrien (Orte von Lichtquellen und Sensoren in Relation zur Messprobe), der Beobachtungswinkel (2° , 10°), die Größe der Messfläche und Messöffnung, die Glanzwirkung, der Flüssigkeitsgehalt (mit wissenschaftlichem Beweis des Zusammenhanges zwischen Flüssigkeitsgehalt und Zahnfarbe), Wirkung von Trocknung und Flüssigkeitswiederaufnahme (Dehydratation, Rehydrierung), der Anteil des Flüssigkeitsgehaltes an der Glanzwirkung, die Subjektivität von visueller Bestimmung, Kronenkrümmung, Systemart (Spektralphotometer, Dreibereichsfarbmesssystem), Messmodus (Kontakt oder Non-kontakt-Modus), Messsystem-Objekt-Relation, Positionierung, Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit. Zudem wurden subjektiv-visuelle Bestimmungen und objektivierte Messungen in Subjektiv-objektiv-Vergleichen über Wertevergleiche nachgegangen. Alle diese Einflussfaktoren sind nicht nur an feuchten, sondern auch an trockeneren (verschiedene bestimmte Trocknungs- bzw. Rehydrierungszustände) und trockenen Zähnen anhand u. a. der Helligkeit (L^*), von Farbmesswerten, wie beispielsweise a^* , b^* , C^* , h , ΔE , des Metamerieindex, von Spektralwerten, von Zahnfarbproben und von Zahnfarbräumen analysiert.



Im Rahmen dieser Erkundung konnten Phänomene (beispielsweise Änderungen und Brüche im Verhalten sowie hochindividuelle Entwicklungen der Farbwerte, Paradoxes zwischen den Werten subjektiver Bestimmung mittels Zahnfarbproben und den Werten objektivierender Messungen) aufgedeckt und Einblick in die Farbdynamik durch De- und Rehydratation gewährt werden. Die Entwicklung der einzelnen Farbmesswerte ließ beispielsweise Rückschlüsse über den Flüssigkeitsfluss durch den Zahn und seine Gewebe insbesondere bei Trocknung und Flüssigkeitswiederaufnahme zu und gab Auskunft über das zeitliche Ausmaß dieser Prozesse.

Auf Basis dieser Datenlage hatte Hoffmann mehrere Verfahren für die Forschung und Anwendung in der Praxis entwickelt, Innovationen vorgeschlagen und für machbar eingestuft, wie beispielsweise das trockenungsprotektive Monitoring zur Vermeidung von Devitalisierung bei zahnmedizinischer Behandlung, eine Rekonstruktion der Farbe von natürlich feuchten Zähnen an bereits angetrockneten, die Identifizierung von Lebenden und Toten über den „dentalen Fingerabdruck“ und für die Rechtsmedizin eine neue Methode zur Todeszeitbestimmung. Zudem beschrieb er eine zeitliche Trocknungsgrenze, bis zu der noch relativ natürliche, passende Farbwerte zu erhalten sind und nach der keine Farbestimmung mehr erfolgen sollte, und er legte die Flüssigkeitswiederaufnahmezeit nach Ende der Trocknung fest, die gewartet werden muss, um wieder eine natürliche Zahnfarbe zu erhalten.

Seine Erkenntnisse sind u. a. auch, dass Zähne in der Lage sind, Informationen beispielsweise zum Zustand (Flüssigkeitsgehalt, Farbwerte) und zur Zeit innerhalb der Trocknungs- und Flüssigkeitswiederaufnahmekronologie zu speichern. Der Autor artikuliert einen „dentalen Datenspeicher“ und ein „dentales Gedächtnis“ und ist der Meinung, dass wesentlicher Fortschritt auf diesem Gebiet u. a. über ein neuronales Netz für Farbmessapparaturen erzielt werden könnte.

Aus den Hoffmann-Studien 2000: Schichtungsphänomen, Paradoxon und weitere Phänomene aufgedeckt durch Trocknung und Flüssigkeitswiederaufnahme an menschlichen Zähnen und absolute Vergleiche der Farbwerte aus visueller und messtechnischer Zahnfarberfassung

Hoffmann, A., Institut für interdisziplinäre wissenschaftliche Forschung und Entwicklung, Dinslaken, Deutschland, info@iifwfe.de

Einleitung

Farbe bestimmt unser aller Leben. Sie weckt Emotionen und beeinflusst Gefühle. Emotionen und Gefühle beeinflussen ihrerseits aber auch die Farberfassung und Farbwahrnehmung. Und Farbe besitzt eine eigene Ästhetik. In der Zahnmedizin stellt Zahnfarbästhetik – eine Wortschöpfung aus Zahnfarbe und Ästhetik (vgl. Hoffmann-Studien) – eine von zwei Säulen der dentalen Ästhetik und zugleich die entscheidendere für eine gelungene Restauration. Denn Abweichungen in der Farbe werden noch vor Abweichungen in der Form wahrgenommen und gegebenenfalls als störend empfunden. Die Zahnmedizin insgesamt hingegen lässt sich in Funktion (Kaufunktion, Gesundheit) und Ästhetik gliedern. Nichts lag mir näher, als die Entstehung der Zahnfarbe insgesamt – als System aus mannigfaltig zusammenwirkenden Einflussfaktoren – verstehen zu wollen. Lediglich einen einzelnen Aspekt zu behandeln oder einer einzelnen Fragestellung nachzugehen, war nicht zielführend. Ich musste die Zahnfarbe systematisch analysieren und mit Hochpräzisionsmesssystemen erforschen, um ihr das Geheimnis des orchestralen Zusammenspiels der sie ausmachenden Faktoren zu entlocken.

Ein Faktor korrespondiert mit der Frage nach dem Grad der Übereinstimmung von subjektiv-visuell ermittelter Zahnfarbe mittels Zahnfarbproben und objektivierender Messung. Eines der Ziele der Hoffmann-Studien war es, auch absolut Unterschiede zwischen den subjektiv-visuellen und objektiviert-messtechnischen Methoden in Farbmesswerten darzustellen und zu quantifizieren. Dazu bedurfte es im Vorfeld Farbringanalysen und Quantifizierungen aller Auswahlproben von zwei sehr allseits fachlich bekannten Zahnfarbringen (VITA), um an feuchten, trocknenden und trockenen Zähnen subjektiv ausgewählte Proben in Werten darzustellen und den Messwerten, die jeweils zeitentsprechend an diese Zähnen erfolgten, gegenüberzustellen und gegen die Zeit der Trocknungs- und Rehydrierungschronologie aufzutragen. Dabei wurden die vorausgehenden Zahnfarbringanalysen sowie die späteren Hauptstudien und Erfassungen der Trocknungs- und Rehydrierungschronologie jeweils mit allen Systemen durchgeführt und mannigfaltige Vergleiche zwischen visueller und apparativer Farberfassung (Spektralphotometer, Dreibereichsmesssystem) angestellt und über Diagramme dargestellt.

Bei Abschluss des größten Teils der Hoffmann-Studien im Jahr 2000 gab es im Wesentlichen 44 [1–44] messtechnische Studien. Davon basierten 19 auf Spektrophotometermessungen (s. Referenzen in *Kursiv-Schrift* am Ende dieser Einleitung) und 25 wurden mit einem einfacheren Kolorimeter durchgeführt. Sie befassten sich zumeist mit der Farbe von zahntechnischem Material oder spezifischen Fragestellungen, wie beispielsweise der Auswirkungen von Zahnpasta und Bleichen oder dem Einfluss bestimmter Stoffe, wie Chlorhexidin, Fluoridgele, Kaffee und Tee.

Es ist ein weithin beobachtetes Phänomen, dass Zähne, die mit Kofferdam oder Watterollen trockengelegt oder die extrahiert sind, heller erscheinen. Eine Reihe von Lehrbüchern hat dieses Phänomen indirekt im Zusammenhang mit Zahnfarbbestimmung erwähnt. Einen wissenschaftlichen Beweis gab es hierfür nicht. Es war nicht mehr als eine Erfahrung nach dem gesunden Menschenverstand. Ein wissenschaftlicher Beweis hingegen wäre nur möglich, wenn sowohl die

Helligkeit oder Farbe bzw. Farbwerte sowie das Gewicht bzw. der Gewichtsverlust als Ausdruck der Trocknung gemessen und die resultierenden Kurven zur Deckung gebrachte werden könnten. Genau das war weiteres Ziel der Hoffmann-Studien.

Während es im Laufe des 20. Jahrhunderts zahlreiche Veröffentlichungen zum Wasser und Wassergehalt in Zähnen und in ihren Hartgeweben gab, ist es erstaunlich, dass bis zu den Hoffmann-Studien keine Untersuchung dieses grundlegende Thema der Helligkeit oder Zahnfarbe und Zahnfarbwerten (z. B. $L^*a^*b^*$) in Abhängigkeit vom Flüssigkeitsgehalt, der Flüssigkeitsaufnahme- und der Flüssigkeitsfreisetzungprozesse behandelt hatte. Ziel meiner Untersuchungen war es daher, den Zusammenhang zwischen Flüssigkeitsgehalt, Flüssigkeitsverlust (Trocknung), Flüssigkeitsabsorption (Rehydrierung) und Zahnfarbe herzustellen. Diese Grundlagenforschung wurde auch entwickelt, um Informationen über diverse Farbeinflussfaktoren, den Flüssigkeitsfluss im Zahn und die Rolle der Zahnflüssigkeit im Zahngewebe zu liefern, Informationen, auf denen weiterreichende Schlussfolgerungen basieren werden.

Die Präzision in vitro mit Jig (vgl. [3] und Hoffmann-Studien), also einem intraoralen Positionierungssystem, war bereits gut, aber nicht ausreichend für eine Grundlagenforschung mit höchster Präzision, sodass die Entscheidung zugunsten der vorliegenden In-vitro-Studien mit Hochleistungspräzisionssystemen (High-End-Systeme¹ für diesen speziellen Zweck – Zahnfarbmessung mit Hochpräzisionspositionierung) und neuartigen hochpräzisen Positionierungssystemen getroffen wurde.

Die Präzision und Wiederholbarkeit (siehe [3, 6]) konnte somit in den Hoffmann-Studien sehr deutlich erhöht werden. Das war eine der Voraussetzungen für die Isolierung einzelner Einflussfaktoren. Ein weiterer Schlüssel in den Hoffmann-Studien war die Auswahl der Systeme. Zwei Messsysteme waren baugleich, vom selben Hersteller und unterschieden sich lediglich in der Messgeometrie. Die eine der Messgeometrien arbeitete mit Glanzeinschluss und die andere mit Glanzausschluss. So konnten die Unterschiede zwischen Werten und Kurven dieser Systeme den Glanzeinfluss auf die Farbkoordinaten bei feuchten, trockeneren und trockenen Zähnen bestimmen lassen. Zugleich war es in den Hoffmann-Studien gelungen, den Anteil der Flüssigkeit am dentalen Glanz zu ermitteln und die Fragen zu beantworten: Welchen Einfluss hat der Zahn und welchen Einfluss hat Zahnflüssigkeit am dentalen Glanz? Und welchen Einfluss hat der Glanz an der Zahnfarbe und den Farbkoordinaten?

Eine Analyse und auch ein Beweis sind dadurch charakterisiert, einen Einflussfaktor nicht nur zu vermuten, sondern auch zu isolieren, im Ausmaß zu erkennen und zu quantifizieren. Es muss also irgendwie gelingen, weitere Einflussfaktoren auszuschalten, auf ein unwesentliches Niveau zu reduzieren oder herausrechnen zu können. Übrig bleiben muss für eine eindeutige Analyse der jeweils einzelne Einflussfaktor – überlagerungsfrei.

Eine Analyse gelingt nicht ohne Isolierung. Ohne reale oder rechnerische Überlagerungsfreiheit der Einflussfaktoren bliebe eine Ausführung nur eine Hypothese. Eine Untersuchung, die Apparaturen verschiedener Messgeometrien, verschiedener Hersteller, damit auch verschiedener Gerätekonzeptionen, -Kompositionen und -Abstimmungen und ggf. noch weiterer überlagernder Einflussfaktoren nutzt, wird nicht den Beweis antreten können, dass beispielsweise die Messgeometrie eine mögliche Einflussquelle darstellt und sie wird erst recht nicht das Ausmaß eines denkbaren Einflusses bestimmen können. Hingegen wurde in den Hoffmann-Studien das Ausmaß isoliert und damit zudem Beweis geführt, dass die Messgeometrie tatsächlich Einfluss hat auf die Farbe und alle Farbkoordinaten, indem baugleiche Systeme vom selben Hersteller eingesetzt wurden, die sich lediglich in der Messgeometrie unterschieden.

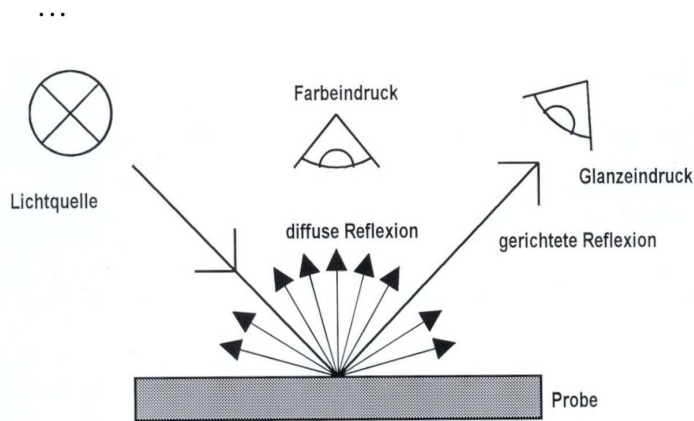
In gegenwärtiger Ausgabe sind von ursprünglich mehr als 1000 Seiten der systematischen Erforschung ein paar Auszüge zur Erforschung der Unterschiede hinsichtlich subjektiv-objektiv bzw. visuell-messtechnisch und entsprechender Einflüsse in Bezug auf die Zahnfarbe wiedergegeben. Aufgrund des Umfangs und des vernetzenden Ineinandergreifens verschiedener Aspekte

¹ CM-503c, CM-503i, CR-241 (Minolta, Osaka, Japan)

können diese Auszüge nur einen ersten Eindruck zu dieser Thematik gewähren und wird zur weiteren Vertiefung die Originalpublikation des gegenwärtigen Autors empfohlen.

1. Belli S, Tanriverdi FF, Belli E. Colour stability of three esthetic laminate materials against to different staining agents. *J Marmara Univ Dent Fac.* 1997 Sep;2(4):643-8.
2. Bolt RA, Bosch JJ, Coops JC. Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Phys Med Biol.* 1994 Jul;39(7):1133-42.
3. Douglas RD. Precision of in vivo colorimetric assessments of teeth. *J Prosthet Dent.* 1997 May;77(5):464-70.
4. el-Sayed SM, Shereif AH, Farghaly A. Effect of fluoride application on specular reflectance and stain potential of unfilled and photocured microfilled resin veneering materials. *Egypt Dent J.* 1994 Jul;40(3):813-22.
5. Fay RM, Servos T, Powers JM. Color of restorative materials after staining and bleaching. *Oper Dent.* 1999 Sep-Oct;24(5):292-6.
6. Goldstein GR, Schmitt GW. Repeatability of a specially designed intraoral colorimeter. *J Prosthet Dent.* 1993 Jun;69(6):616-9.
7. Goodkind RJ, Schwabacher WB. Use of a fiber-optic colorimeter for in vivo color measurements of 2830 anterior teeth. *J Prosthet Dent.* 1987 Nov;58(5):535-42.
8. Groh CL, O'Brien WJ, Boenke KM. Differences in color between fired porcelain and shade guides. *Int J Prosthodont.* 1992 Nov-Dec;5(6):510-4.
9. Horn DJ, Bulan-Brady J, Hicks ML. Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *J Endod.* 1998 Dec;24(12):786-90.
10. Horn DJ, Hicks ML, Bulan-Brady J. Effect of smear layer removal on bleaching of human teeth in vitro. *J Endod.* 1998 Dec;24(12):791-5.
11. Ichescu WR, Ellison RL, Corcoran JF, Krause DC. A spectrophotometric analysis of dentinal leakage in the resected root. *J Endod.* 1991 Oct;17(10):503-7.
12. Ishikawa-Nagai S, Sato R, Furukawa K, Ishibashi K. Using a computer color-matching system in color reproduction of porcelain restorations. Part 1: Application of CCM to the opaque layer. *Int J Prosthodont.* 1992 Nov-Dec;5(6):495-502.
13. Ishikawa-Nagai S, Sato RR, 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.* 1994 Jan-Feb;7(1):50-5.
14. Johnston WM, Kao EC. Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. *J Dent Res.* 1989 May;68(5):819-22.
15. Kleber CJ, Moore MH, Nelson BJ. Laboratory assessment of tooth whitening by sodium bicarbonate dentifrices. *J Clin Dent.* 1998;9(3):72-5. Erratum in: *J Clin Dent* 1998;9(4):inside front cov.
16. Koertge TE, Brooks CN, Sarbin AG, Powers D, Gunsolley JC. A longitudinal comparison of tooth whitening resulting from dentifrice use. *J Clin Dent.* 1998;9(3):67-71.
17. Kowitz GM, Nathoo SA, Rustogi KN, Chmielewski MB, Liang LJ, Wong R. Clinical comparison of Colgate Platinum Toothwhitening System and Rembrandt Gel Plus. *Compend Suppl.* 1994;(17):S646-51.
18. Leard A, Addy M. The propensity of different brands of tea and coffee to cause staining associated with chlorhexidine. *J Clin Periodontol.* 1997 Feb;24(2):115-8.
19. Lenhard M. Assessing tooth color change after repeated bleaching in vitro with a 10 percent carbamide peroxide gel. *J Am Dent Assoc.* 1996 Nov;127(11):1618-24; quiz 1665.
20. Lu Z, Zhao Y. [Study on the color modification buring surface staining of PLAT castable ceramic restorations]. *Hua Xi Yi Ke Da Xue Xue Bao.* 1993 Mar;24(1):75-7. Chinese.
21. Ma T, Johnson GH, Gordon GE. Effects of chemical disinfectants on surface characteristics and color of three fixed prosthodontic crown materials. *J Prosthet Dent.* 1999 Nov;82(5):600-7.
22. Manly RS. Tristimulus photoelectric colorimetry of human incisors. *J Dent Res.* 1947c;26(6):459.
23. Matis BA, Cochran MA, Eckert G, Carlson TJ. The efficacy and safety of a 10% carbamide peroxide bleaching gel. *Quintessence Int.* 1998 Sep;29(9):555-63.
24. Matis BA. Dentifrice whitening after professional bleaching. *J Indiana Dent Assoc.* 1998 Fall;77(3):27-32.
25. Millstein PL, Harlan J, Nathanson D. Colour effect of denture base on denture tooth materials. *J Oral Rehabil.* 1988 Mar;15(2):173-9.
26. Nakamura T, Nakajima H, Salimce P, Hino T, Maruyama T. Effect of bleaching on vital discoloured teeth – a colorimetric evaluation in three patients. *Asian J Aesthet Dent.* 1993 Jan;1(1):25-8.
27. Nathoo SA, Chmielewski MB, Rustogi KN. Clinical evaluation of Colgate Platinum Professional Toothwhitening System and Rembrandt Lighten Bleaching Gel. *Compend Suppl.* 1994;(17):S640-5.
28. Nissan R, Trope M, Zhang CD, Chance B. Dual wavelength spectrophotometry as a diagnostic test of the pulp chamber contents. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol.* 1992 Oct;74(4):508-14.
29. O'Brien WJ, Groh CL, Boenke KM. A new, small-color-difference equation for dental shades. *J Dent Res.* 1990 Nov;69(11):1762-4.
30. O'Brien WJ, Groh CL, Boenke KM. One-dimensional color order system for dental shade guides. *Dent Mater.* 1989 Nov;5(6):371-4.
31. O'Brien WJ, Hemmendinger H, Boenke KM, Linger JB, Groh CL. Color distribution of three regions of extracted human teeth. *Dent Mater.* 1997 May;13(3):179-85.
32. O'Brien WJ, Vazquez L, Johnston WM. The detection of incipient caries with tracer dyes. *J Dent Res.* 1989 Feb;68(2):157-8.
33. Okubo SR, Kanawati A, Richards MW, Childress S. Evaluation of visual and instrument shade matching. *J Prosthet Dent.* 1998 Dec;80(6):642-8.
34. Ouellet D, Los S, Case H, Healy R. Double-blind whitening Night-Guard study using ten percent carbamide peroxide. *J Esthet Dent.* 1992 May-Jun;4(3):79-83.
35. Rosenstiel SF, Gegauff AG, Johnston WM. Duration of tooth color change after bleaching. *J Am Dent Assoc.* 1991 Apr;122(4):54-9.
36. Rosenstiel SF, Gegauff AG, Johnston WM. Randomized clinical trial of the efficacy and safety of a home bleaching procedure. *Quintessence Int.* 1996 Jun;27(6):413-24.
37. Rosenstiel SF, Porter SS, Johnston WM. Colour measurements of all ceramic crown systems. *J Oral Rehabil.* 1989 Sep;16(5):491-501.
38. Rustogi KN, Curtis J. Development of a quantitative measurement to assess the whitening effects of two different oxygenating agents on teeth in vivo. *Compend Suppl.* 1994;(17):S631-4.
39. Seghi RR, Gritz MD, Kim J. Colorimetric changes in composites resulting from visible-light-initiated polymerization. *Dent Mater.* 1990 Apr;6(2):133-7.
40. Seghi RR, Johnston WM, O'Brien WJ. Performance assessment of colorimetric devices on dental porcelains. *J Dent Res.* 1989 Dec;68(12):1755-9.
41. Takeda T, Ishigami K, Shimada A, Ohki K. A study of discoloration of the gingiva by artificial crowns. *Int J Prosthodont.* 1996 Mar-Apr;9(2):197-202.
42. van der Burgt TP, ten Bosch JJ, Borsboom PC, Kortsmid WJ. A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *J Prosthet Dent.* 1990 Feb;63(2):155-62.
43. White JM, O'Brien WJ. The colors of mixtures of dental opaque porcelains. *J Dent Res.* 1989 Sep;68(9):1319-22.
44. Zhu J, Zhao Y, Zhu H. [In vivo color measurement of 410 healthy maxillary anterior teeth]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 1998 Sep;33(5):297-9.

Auszüge



Die Farbe eines nicht-selbstleuchtenden Körpers entsteht durch die von ihm reflektierten Spektralanteile des auf ihn einstrahlenden Lichts. Die Reflexion kann diffus und ungerichtet oder gerichtet im Sinne einer Spiegelreflexion erfolgen (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

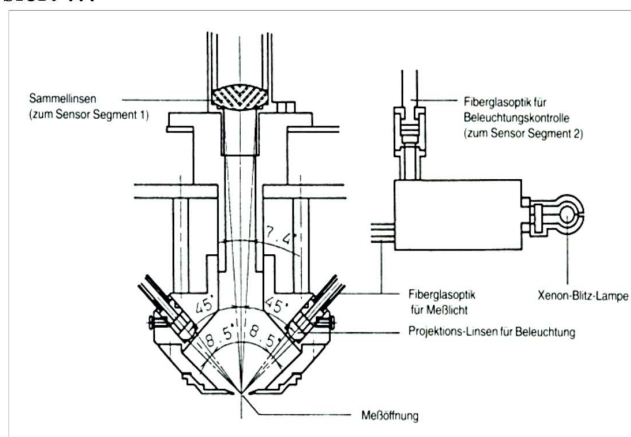
...

Material und Methodik²

...

Spektralphotometer CM-503c

Messprinzip, Beleuchtungs- und Betrachtungssystem. Das Beleuchtungs-/Betrachtungssystem des CM-503c (Minolta, Osaka/Japan) ist in der untenstehenden Abbildung dargestellt. Bei diesem Messverfahren wird die Probe unter 45° beleuchtet und senkrecht unter 0° betrachtet (Glanzausschluss). Abgekürzt wird dieses Messverfahren als $45/0^\circ$ -Messgeometrie bezeichnet. Der Öffnungswinkel des Empfängers beträgt $7,4^\circ$. Diese Geometrie entspricht den Spezifikationen der ISO 7724/1, der DIN 5033, der CIE-Empfehlung 15,2 sowie der ASTM E 1164. Als Lichtquelle wird eine Xenon-Blitzlampe verwendet. Das von der Lampe abgestrahlte Licht wird über 12 Lichtleitkabel auf die Probe geleitet und beleuchtet die zu messende Probe zirkular unter einem Winkel von 45° . Das CM-503c arbeitet nach dem Prinzip des Zweistahlverfahrens. Der Monochromator des Spektralphotometers ist in zwei Segmente aufgeteilt. Das von der Probe reflektierte Licht gelangt direkt zum Segment 1 (Messlicht), gleichzeitig wird Licht aus der Mischkammer zum Segment 2 (Beleuchtungskontrolle) geleitet. Durch den Einsatz des Zweistahlverfahrens werden auch geringste Schwankungen in der spektralen Zusammensetzung und der Intensität des von der Xenon-Lampe abgestrahlten Lichtes erkannt und automatisch kompensiert ...



... Messgeometrie $45/0^\circ$ des Spektralphotometers CM-503c. Hierbei wird Licht im 45° -Winkel von der Apparaturachse emittiert und das vom Objekt veränderte und reflektierte Licht unter 0° von den Sensoren des Spektralphotometers detektiert (Bildquelle: Bedienungsanleitung von Minolta).

² Allgemeiner Teil