

**Autor**

Entwickler

**Status**

Fundamental

**Kategorie**

Grundlagen

# Optische 3D-Messtechnik im Dentalbereich

**Im Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) (D-Jena) werden Entwicklungen zu optischen Systemen in Zusammenarbeit mit Industrieunternehmen getätigt. Im Folgenden sollen die Grundprinzipien moderner Digitalisierungssysteme aufgezeigt werden. Neben der reinen Messtechnik wird die mechanische Auslegung von Scannern beziehungsweise von optischen 3D-Messsystemen erörtert.**

Anhand des Gerätekonzeptes des hiScanµ, einer Gemeinschaftsentwicklung des IOF mit dem Hersteller von dentalen CAD/CAM-Systemen Hint-ELS (D-Griesheim), werden die möglichen Auslegungsvarianten in Bezug auf den Anwendungsbereich sowie deren Einfluss dargelegt. Darüber hinaus werden die messtechnischen Anforderungen bei intraoralen Messsystemen erläutert und technische Lösungswege beschrieben. Besonderes Augenmerk fällt dabei auf die Komplexität der Anforderungen der dentalen Anwendung optischer Messsysteme.

## Verfahren

Nachdem in den Anfängen der dentalen Digitalisierungstechnik mechanische Digitalisierer eingesetzt wurden, setzten sich, bedingt durch die Möglichkeiten der erhöhten Rechenleistung von Computersystemen, bald die optischen Messsysteme durch (Abb. 1). Aufgrund der kurzen Messzeiten und des vollautomatischen Ablaufs waren diese den damals noch handgeführten duktilen Systemen hinsichtlich ihrer Produktivität und Handhabung überlegen. Durch die rasanten Weiterentwicklungen, die in der Chip-, Display-, Software- sowie CCD (Charge-coupled Device)-Kamera-Entwicklung erfolgten, haben die optischen Messsysteme diesen Vorsprung bis heute beibehalten oder sogar noch weiter ausgebaut. Auch in der

**Dr. Peter Kühmstedt, Josef Hintersehr**

industriellen Digitalisierung werden immer häufiger optische Sensoren eingesetzt, um Prozesszeiten zu reduzieren und um flexibler auf Messanforderungen reagieren zu können. Derzeit sind verschiedene optische und mechanische Sensorprinzipien – je nach Anwendungszweck und Erfordernissen – im Einsatz.

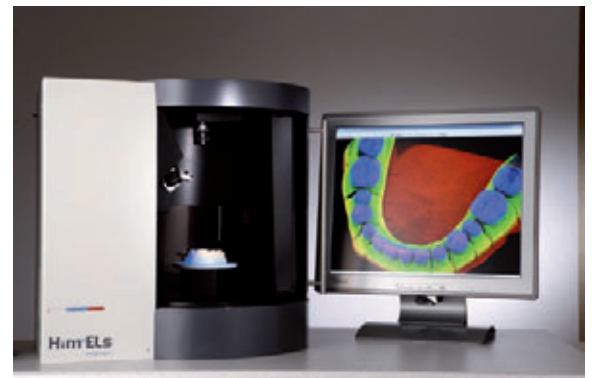


Abb. 1: Das optische 3D-Messsystem hiScanµ.

Angewandte Messprinzipien in der industriellen Digitalisierung sind

- Triangulationsbasierte Verfahren
  - Streifenprojektion
  - Fotogrammetrie / Stereofotografie
  - Lichtschnittverfahren / Laserlinie
  - Laserpunkttriangulierung
- Konoskopie
- Kohärenzradar (Weißlichtinterferometrie)
- Konfokale Sensoren
- Autofokussensoren
- Mechanische Abtastung

Diese Prinzipien bilden ebenso die Grundlage für die Verfahren, die in der dentalen Digitalisierung eingesetzt werden können. Aus Sicht der Applikation Dentatechnik müssen unter anderem folgende Parameter für die Auswahl der Messtechnik Beachtung finden

- Anzahl der Messpunkte pro Sekunde (Messzeit)

- Erfassbarer Objektneigungsbereich ohne Objektbewegung oder Sensorneigung
- Notwendige Bedingungen zur Rundumvermessung
- Notwendige Bedingung zur Realisierung eines Messfeldes mit einem Durchmesser von 90 mm
- Verfahrenstypische Messunsicherheit

Obwohl sich das Aufgabengebiet im Bereich der dentalen Anwendung klar spezifizieren lässt, werden auch hier verschiedene Verfahren eingesetzt.

Derzeitige Messprinzipien in der Dentaltechnik sind

- Streifenprojektion
- Lichtschnittverfahren
- Laserpunkttriangulation
- Farbcodierte Musterprojektion
- Konoskopie
- Mechanische Abtastung

Von diesen sechs eingesetzten Messprinzipien gehören vier dem triangulationsbasierten Verfahren an. Somit ist dieses Verfahren das gegenwärtig meist genutzte in der 3D-Digitalisierung der Dentaltechnik.

## Optische Sensoren

Prinzipiell besteht ein optischer Sensor immer aus einer das Lichtsignal aussendenden Sendeeinheit (z. B. ein Streifenprojektor), dem das Lichtsignal verändernden Objekt und einer das Lichtsignal aufzeichnenden Empfangseinheit (z. B. eine CCD-Kamera) (Abb. 2 und 3).

Das eingesetzte optische Signal wird durch das Objekt verändert. Diese Veränderung kann in der Amplitude, Phase, Polarisation oder Richtung des optischen Signals liegen. Durch eine anschließende Auswertung dieser Änderung kann die 3D-Information / Oberflächenstruktur des Objektes abgeleitet werden (Abb. 4).

## Projektionsmuster

Bei der digitalen Streifenprojektion kommen typischerweise zwei Projektionsmuster, die von der Sen-

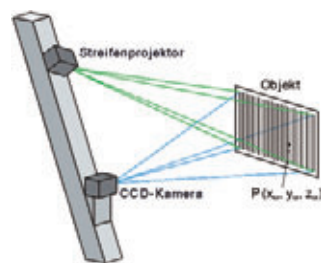


Abb. 2: Grundanordnung der optischen Antastung. Flächenhafte Triangulation mit strukturierter Beleuchtung.

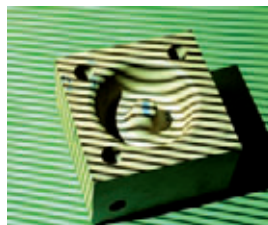


Abb. 3: Verformung / Modulation der Streifenabstände durch die Oberflächenform.

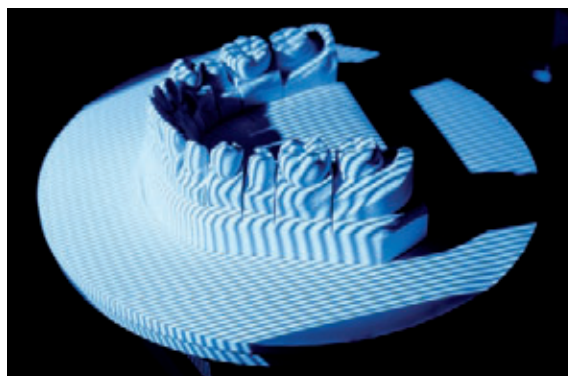


Abb. 4: Streifenprojektion auf einem Zahnmodell.

deinheit ausgesendet werden, zur Anwendung. Dies ist zum einen ein Sinusmuster, das phasenverschoben wird, und zum anderen das so genannte Gray-Code-Verfahren. Bei dem phasenverschobenen Sinusmuster wird eine Bildsequenz aus Gittern mit sinusförmigem Intensitätsverlauf, die eine einheitliche Breite aufweisen, allerdings zueinander verschoben sind, auf das Objekt projiziert (Abb. 5). Der Grundgedanke des

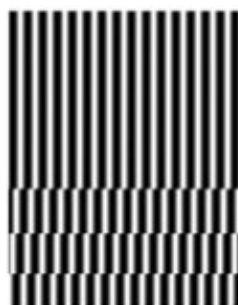


Abb. 5: Digitale Streifenprojektion: Bildsequenz Sinusmuster (phasenverschoben).

Gray-Code-Verfahrens ist, die einzelnen Streifen im Sinusmuster mit einer eindeutigen Nummerierung zu versehen. Hierzu erfolgt eine Beleuchtung des Objektes mit einer Sequenz von Rechteckgittern, wobei die Streifendichte von Bild zu Bild verdoppelt wird (Abb. 6). Vorteile gegenüber einfacher Phasenmessverfahren sind, dass erstens keine Nachbarschaftsbeziehungen zwischen verschiedenen Messpunkten Verwendung finden. Zweitens findet keine Fernwirkung von Phasenfehlern an einem Pixel auf ein anderes Pixel statt. Nachteil dieses Verfahrens gegenüber den Sinusmustern ist die Notwendigkeit, mehr Muster zu projizieren. Hiermit erhöht sich sowohl die Messdauer als auch die gewonnene Datenmenge.

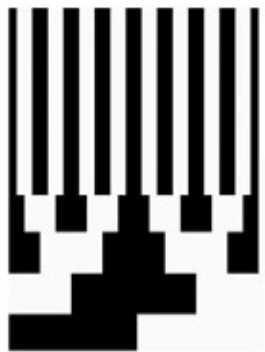


Abb. 6: Digitale Streifenprojektion: Bildsequenz Gray-Code-Verfahren.

## Vermessung

Um ein Objekt rundum zu vermessen, benötigt ein Messsystem mehrere Einzelansichten dieses Objektes aus verschiedenen Positionen. Bedingt durch die konstruktiv unterschiedliche Positionierung der Kamera (Empfänger) zu der Belichtungseinheit (Sender) können pro Ansicht nicht die gesamten 180° einer Halbraummessung realisiert werden. Zumeist kann eine qualitativ hochwertige Messung im Bereich von circa 120° pro Ansicht erfolgen (Abb. 7). Aus dieser Einschränkung resultieren die Parameter für die Häufigkeit der Objektdrehung, die erzielt werden muss, um ein Zahnmodell komplett vermessen zu können (Abb. 8). Die nächste Einschränkung für eine Komplettvermessung ist die Geometrie des Objektes. Zumeist unproblematisch sind Außenkonturen, die einer schulmäßigen Stumpfpräparation entsprechen.

Die Problematik beginnt allerdings, wenn einzelne Stümpfe oder Stümpfe im Verbund untereinander

unter sich gehende Bereiche (Hinterschnitte) aufweisen. Ebenso problematisch ist die Präparation für Inlays oder ein unterhalb der Gingiva verlaufendes Implantat-Interface (Abb. 9).

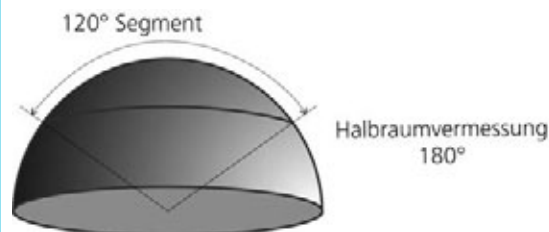


Abb. 7: Rundumvermessung geometrischer Objekte.

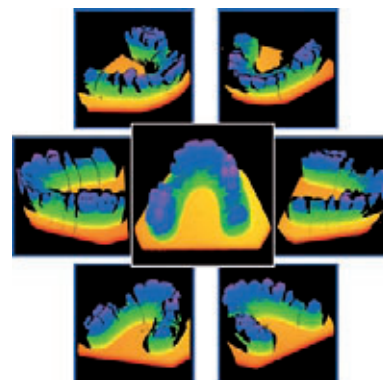


Abb. 8: Multi-View-Messung am Beispiel eines Zahnmodells.

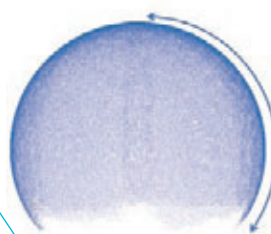


Abb. 9: Möglichkeiten der Außenkonturvermessung unterhalb des Äquators - Beispiel Kugel.

Aus Sicht der Messtechnik sind dies gänzlich unterschiedliche Anforderungen: Zum einen bedürfen die Außenkonturen von Stümpfen oder der Restbeziehung sowohl einer Belichtungs- als auch der Aufnahmeorientierung von oben, seitlich schräg zur Zahnachse. Je größer die unter sich gehenden Bereiche sind, desto stärker horizontal wird diese Ausrichtung zur Zahnachse.

Zum anderen bedarf die Messung von Innenflächen, beispielsweise bei Inlays, einer Ausrichtung

sowohl der Aufnahme- als auch der Projektionsrichtung nahezu senkrecht zur Zahnachse. Rein messtechnisch sind diese Diskrepanzen nur durch die Kombination von Aufnahmen und Belichtung aus verschiedenen Richtungen (Multi-View-Technik) zu lösen.

## Gerätetechnik

Zum Auflösen dieser Widersprüche spielt nun die Gerätetechnik eine entscheidende Rolle. Ist im Messsystem nur eine Kamera zur Aufnahme integriert, müssen die unterschiedlichen Betrachtungsrichtungen über eine Schwenkung des Objektes durch den Objektträger erfolgen. Die Schwierigkeit hierbei ist, dass Problembereiche immer an unterschiedlichen Positionen am Modell / Stumpf auftreten. Um viele auftretende Möglichkeiten abzudecken, wird die Anzahl der benötigten Aufnahmepositionen erhöht oder aber ein manuelles Nachscannen einzelner Positionen erforderlich. Dies geht immer mit einem erheblichen Zeitaufwand einher. Einen weiteren Aspekt stellt die Anzahl beweglicher Achsen dar. Je mehr bewegliche Achsen in einem Messsystem vorhanden sind, desto stärker nehmen Empfindlichkeit des Systems und Messgenauigkeit zu. Ein anderer Lösungsansatz wurde vom IOF für das Scansystem hiScan $\mu$  entwickelt. Zur Realisierung einer möglichst hohen Messgenauigkeit sollte das zu messende Objekt starr auf dem Objektträger befestigt sein und nur eine Rotationsachse aufweisen. Um jedoch der Problematik der benötigten verschiedenen Aufnahmerichtungen zur Rundumvermessung Rechnung zu tragen, wurden drei CCD-Kamerasysteme integriert (Abb. 10). Eine Kamera beobachtet das Messobjekt direkt von oben und dient hauptsächlich der Selbstkalibrierung. Zwei weitere CCD-Kameras dienen der Datenerfassung schräg von der Seite. Damit diese CCD-Kameras neben der Rundumvermessung auch die unterschiedlichen Anforderungen an eine Außenkontur- sowie eine Innenkonturvermessung erfüllen, werden sie über Spiegelsysteme umgelenkt (Abb. 11 und 12). Neben der Änderung des Beobachtungswinkels (CCD-Kamera) durch die Klappspiegelgruppe wird ebenso der Beleuchtungswinkel (Streifenprojektor), entsprechend der Aufnahme- richtung über einen zusätzlichen Spiegel, synchronisiert. Somit geht die Aufnahme immer einher mit der optimalen Belichtungsrichtung und mit möglichst wenigen Bereichen,



Abb. 10: Integration von drei Kameras im System.

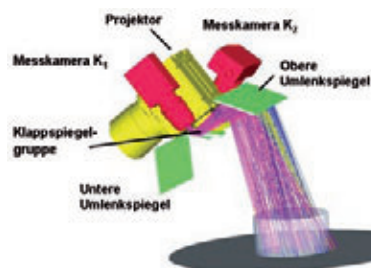


Abb. 11: Beobachtungs- und Beleuchtungswinkel von okklusal.

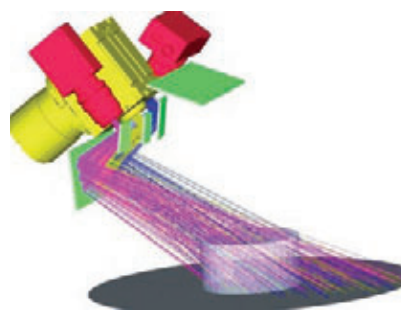


Abb. 12: Beobachtungs- und Beleuchtungswinkel von horizontal.

die abgeschattet beziehungsweise nicht messbar wären (Abb. 13 und 14).



Abb. 13: Vermessung eines kompletten Zahnmodells (Außenkontur).



Abb. 14: Vermessenes Inlay (Innenkontur).

## Intraorales Messen

Durch die messtechnischen und mechanischen Möglichkeiten von stationären 3D-Messsystemen, wie es die Modellscanner im Dentalbereich sind, können Messzeiten für ein komplettes Modell von unter zwei Minuten mit Messgenauigkeiten von bis zu 10 µm realisiert werden. Wird diese Technik allerdings auf Geräte transferiert, die eine Digitalisierung von Zähnen / Zahnstümpfen im Mund übernehmen sollen, sind neue Aspekte zu berücksichtigen. Die starre Fixierung des zu scannenden Objektes ist nicht durchführbar. Die Übernahmen von gerätespezifischen Parametern / Koordinatensystemen sind nur mittelbar möglich. Die Aufnahme darf nur wenige Millisekunden dauern, um Verwacklungen zu vermeiden. Aufgrund dieser kurzen Aufnahmezeiten können wiederum nur wenige Bildsequenzen projiziert werden. Der Systemaufbau ist viel kompakter, da der Mundraum nur eine begrenzte Größe aufweist (Abb. 15). Eine Komplettaufnahme mit einer Ansicht ist aufgrund des geringen Platzes sowie des benötigten Abstandes vom Scanner zum Messobjekt nicht möglich.



Abb. 15: Konstruktive Auslegung des Intraoralscanners directScan.

Damit ein kompletter Kiefer gemessen werden kann, müssen einzelne Teilaufnahmen zu einem Gesamtmodell zusammengeführt werden (Abb. 16 und 17). Um das Zusammenlegen umsetzen zu können, müssen die benachbarten Einzelansichten untereinander eine Überlappung aufweisen. Anwenderfreundlich und reproduzierbar ist diese Überlappung im Alltag, da der Intraoralscanner directScan (Hint-ELs) ein Aufnahmefeld von 20 mm x 15 mm aufweist. Die Aufnahmeeinheit besteht aus einer CCD-Kamera sowie einer Beleuchtungseinheit. Durch den Einsatz der neu entwickelten Scanmethode unter Verwendung eines schnellen Algorithmus zur Phasenberechnung

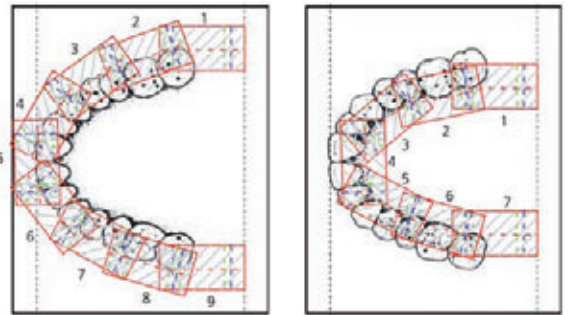


Abb. 16: Schematische Darstellung der Aufnahmepositionen / Überlappungszonen einzelner Ansichten.



Abb. 17: Zusammengesetztes Gesamtgebiss.

wird die Aufnahmezeit der Bildsequenzen gering gehalten. Die komplette Aufnahmezeit pro Messposition beträgt weniger als 200 Millisekunden. Auch für den Bereich des intraoralen Digitalisierens lassen sich existierende Messmethoden anwenden. Allerdings müssen die Gerätekonzepte entsprechend der geänderten Aufgabenstellung angepasst beziehungsweise erweitert werden.

## Zusammenfassung

Die Messaufgaben in der Dentaltechnik sind komplex und bedürfen neben der Messmethode auch einer ausgefeilten Gerätemechanik, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Je universeller ein optisches Digitalisierungssystem eingesetzt werden soll, desto aufwendiger ist seine Konstruktion. Neben den heute schon etablierten Modellscannern werden zukünftig auch immer stärker intraorale Messsysteme in den Fokus der Anwender treten (Abb. 18). Die technischen Grundlagen sind geschaffen, allerdings bedarf es einer Neuauslegung der Gerätekonzepte. Unterschiedliche Umgebungsbedingungen beeinflussen das Messergebnis ebenso wie das Messverfahren an sich. Aber neben aller technischer Machbarkeit entscheiden vor allem die einfache Handhabung und die mögliche Kostenreduzierung in der Zahnarztpraxis, ob sich solche intraoralen Messsysteme auf dem Markt etablieren können oder eher Randerscheinungen bleiben. ■

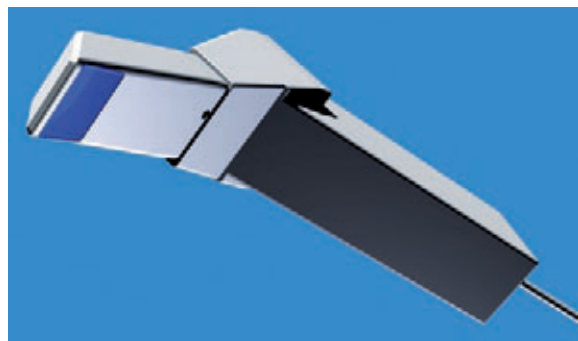


Abb. 18: Prototyp des Intraoralscanners directScan.

## Kontakt

Dr. Peter Kühmstedt  
Fraunhofer IOF  
Albert-Einstein-Straße 7 • 07745 Jena  
peter.kuehmstedt@iof.fraunhofer.de

### Dr. Peter Kühmstedt

Jena, Deutschland



- 1986-1990 Physikstudium an der Friedrich-Schiller-Universität Jena
- 1990-1991 Studium am Institut für Optik und Quantenelektronik, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- 1992-1996 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IOF
- 1997-1998 Entwicklungsleiter bei IVB GmbH Jena
- seit 1998 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IOF
- seit 01.01.2000 Leiter der Gruppe „3D-Messtechnik“ am IOF
- 2001 Thüringer Forschungspreis
- 2003 Promotion an der Ernst-Moritz-Arndt Universität Greifswald – „Untersuchungen zur Messunsicherheit bei 3D-Formmessverfahren mit strukturierter Beleuchtung“

### Josef Hintersehr

Griesheim, Deutschland



- 1986 Meisterprüfung und Gründung eines Dentallabors
- 1993 Erste Arbeiten aus Zirkoniumdioxid, Einreichen der Patente zur Zirkoniumdioxid-HIP-Bearbeitung und zur Halterung von Rohlingen
- 1995-1996 Scannerentwicklung mit der Fraunhofer Gesellschaft Jena
- 1996 Innovationspreis des Ministeriums für Wirtschaft in Thüringen für die Entwicklung eines 3D-Digitalisierers
- 1996-1997 Entwicklung eines CAD/CAM-Systems
- 2000 Gründung Hint-ELs GmbH
- 2000-2002 Entwicklung einer vollautomatischen CNC-Maschine mit KERN Micro- und Feinwerktechnik GmbH & Co. KG
- 2003 Entwicklung einer Software zur Generierung wasserdichter Körper für die Lasersinter-technologie
- 2004-2005 Entwicklung einer neuen Scannergeneration und einer 5-Achs-Fräsmaschine
- 2006 Nominiert für den europäischen Innovationspreis mit der 3D-Konstruktionssoftware viäus.
- 2007 Entwicklung eines Intraoralscanners