

Optische Messung und numerische Simulation der Deformation von Kiefermodellen durch Dentalimplantate

Markus Dekiff*, Philipp Berssenbrügge*, Björn Kemper**, Cornelia Denz***, Dieter Dirksen*

*Poliklinik für Prothetische Zahnmedizin und Biomaterialien, Universitätsklinikum Münster

**Centrum für Biomedizinische Optik und Photonik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

***Institut für Angewandte Physik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster

<mailto:markus.dekiff@uni-muenster.de>

Ein Verfahren zur Validierung von Finite Elemente Analysen auf der Basis optisch erfasster Oberflächendaten wird vorgestellt. Die Beschreibung erfolgt anhand eines Anwendungsbeispiels, der Bestimmung der Deformation eines Kiefermodells infolge der Belastung eines eingebrachten Dentalimplantats.

1 Einführung

Die Stabilität der Verankerung eines Dentalimplantats im Kieferknochen hängt von der Osseointegration ab, d.h. der Entstehung und dem Erhalt einer direkten Verbindung zwischen Implantatoberfläche und Knochen. Diese wird ihrerseits von belastungsbedingten Verformungen des Knochens beeinflusst, auf die sich die Implantatgeometrie auswirkt. Eine diesbezügliche Optimierung von Parametern wie Form, Länge und Durchmesser des Implantats kann mittels numerischer Simulationen erfolgen. Zur Validierung und Optimierung solcher Simulationen setzen wir ein Messverfahren ein, das die folgenden Speckle-Messtechniken kombiniert: fotogrammetrische 3D-Formerfassung mittels Korrelation eines projizierten Specklemusters [1], Digitale Speckle-Fotografie (DSP) und Elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI) [2]. Das Messsystem erlaubt somit die gleichzeitige Erfassung der makroskopischen 3D-Form sowie mikro- und makroskopischer 3D-Deformationen.

2 Messverfahren

Abb. 1 zeigt den Aufbau des Messsystems für die simultane Messung mittels ESPI, DSP und 3D-Formerfassung. Er entspricht einem „out-of-plane“-messenden räumlich phasenschiebenden ESPI-System, das um Linsen und eine Streuscheibe zur Specklemuster-Projektion sowie zwei Kameras für die fotogrammetrische 3D-Formerfassung erweitert ist. Die Berechnung der Phase und Intensität der rückgestreuten Objektwelle aus den aufgezeichneten Interferogrammen erfolgt mittels Fouriertransformation (FTM). Für die Korrespondenzanalyse bei der 3D-Formerfassung und die Bestimmung der Verschiebung des (subjektiven) Specklemusters bei der DSP werden digitale Bildkorrelationsalgorithmen verwendet.

Ergänzend zu vorherigen Arbeiten [3] wurde der Einfluss des projizierten Specklemusters und der Intensitätsrekonstruktion mittels FTM auf die DSP untersucht.

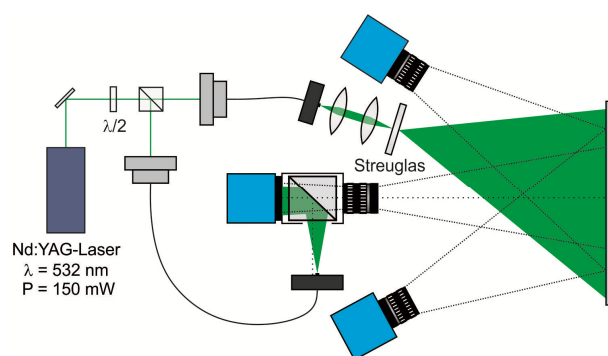


Abb. 1 Aufbau des Messsystems

Es zeigt sich, dass der Einfluss der Intensitätsrekonstruktion vernachlässigbar ist. Bei gleichzeitiger Speckleprojektion ist die Standardabweichung der gemessenen Werte für homogene Verschiebungen aber ca. zwei- bis dreimal so groß und der Messbereich verkleinert sich mit abnehmender mittlerer Größe der projizierten Speckle (Abb. 2).

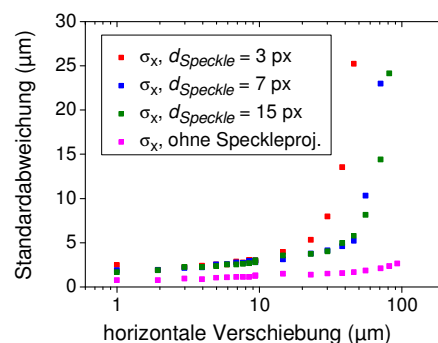


Abb. 2 Standardabweichung mittels DSP bestimmter Verschiebungen für verschiedene mittlere Größen der projizierten Speckle

3 Messung der Verformung eines Kiefermodells

In ein Oberkiefermodell aus PLA (E-Modul: ca. 2 GPa), das mit einem 3D-Drucker hergestellt wurde, wird ein zylindrisches Dentalimplantat aus Titan geschraubt (E-Modul: 105 GPa, Durchmesser: 3,5 mm, Länge: 12 mm). Das Modell ist auf einem Kraftmessständer montiert (Abb. 3). Mit einem daran befestigten Kraftmessgerät wird mit einer

Kraft von ca. 80 N vertikal auf das Implantat gedrückt. Für den Vergleich mit einer Simulation werden die Form und die „out-of-plane“-Deformation des Modells gemessen.

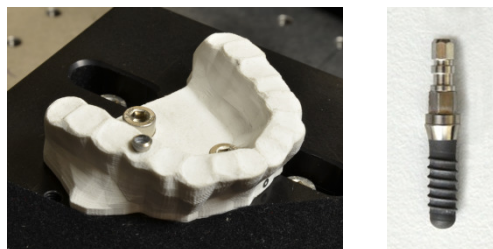


Abb. 3 links: Oberkiefermodell mit eingeschraubtem Dentalimplantat auf Kraftmessständer; rechts: Dentalimplantat (mit Einschraubhilfe)

4 Finite Elemente Analyse

Die numerische Simulation der Deformation des Kiefermodells erfolgt mittels Finite Elemente Analyse (FEA). Dazu wird die Form des Modells durch eine Rundumvermessung mit der Streifenprojektionstechnik erfasst. Anstelle des Implantats wird dabei ein Stahlstift in der Bohrung platziert, um die Lage des Implantats im Kiefermodell über die Bestimmung eines Best-Fit-Zylinders ermitteln zu können. Die Form des Implantats wird durch einen Zylinder mit runder Spitze genähert. Für einen einfacheren Vergleich mit den Messdaten werden das Kiefermodell und das darin eingesetzte Implantat über eine Best-Fit-Registrierung an die mittels Speckleprojektionstechnik erfasste Oberfläche in das Koordinatensystem der Messung transformiert.

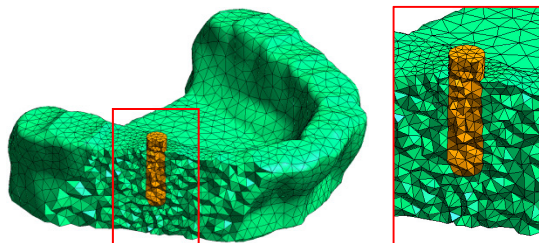


Abb. 4 Tetraedernetz für FEA (Ansicht angeschnitten)

Mit der freien Software GMSH [4] wird dann aus den Oberflächen-Dreiecksnetzen von Implantat und Kiefermodell ein Netz aus Tetraederelementen zweiter Ordnung (Eck- und Kantenmittelpunkte als Knoten) erzeugt (Abb. 4). Die Deformationsberechnung erfolgt schließlich mit der freien FEA-Software Calculix [5]. Als Randbedingung wird dabei angenommen, dass die Knoten auf der Unterseite des Modells keine Verschiebung erfahren. Die Richtung der Kraft, die mit einem Gesamtbeitrag von 80 N auf die Implantatoberseite wirkt, ergibt sich aus der fotogrammetrisch bestimmten Verschieberichtung des Kraftmessgerätes.

Für den direkten Vergleich mit den ESPI-Messergebnissen werden die Knoten auf der Oberfläche des Tetraedernetzes in die Bildebene

der ESPI-Kamera und die zugehörigen Deformationsvektoren auf die Richtung der optischen Achse des ESPI-Systems projiziert. Durch Interpolation lässt sich so jedem Messwert ein mittels FEA berechneter Vergleichswert zuordnen.

5 Vergleich der Ergebnisse

Es zeigen sich zunächst deutliche quantitative Abweichungen. So beträgt die maximale Deformation bei der Messung ca. 2,8 μm , bei der Simulation hingegen nur ca. 1,8 μm . Eine Anpassung des E-Moduls des Kiefermodells und der Richtung des Kraftvektors in einem numerischen Optimierungsverfahren liefert Ergebnisse, die wesentlich besser mit den Messdaten übereinstimmen (Abb. 5).

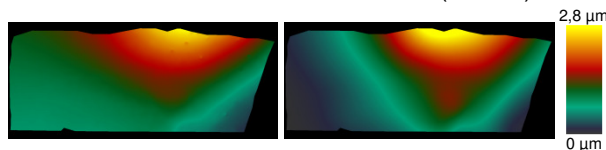


Abb. 5 Gemessene (links) und simulierte (rechts) Deformation nach Optimierung

Der ermittelte E-Modul des Kiefermodells (PLA) liegt jedoch mit ca. 1,25 GPa deutlich unter dem in einem Zugversuch bestimmten Wert. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob mit der herstellungsbedingten Anisotropie und Inhomogenität des Modells tatsächlich eine Verringerung seines E-Moduls einhergeht oder ob andere Fehlerquellen für die Abweichungen verantwortlich sind. So wäre es z. B. denkbar, dass die experimentelle Realisierung der Randbedingungen des FE-Modells nicht ausreichend gewährleistet ist oder die Bestimmung der Lage der Implantatachse zu ungenau erfolgt.

6 Fazit

Das vorgestellte Verfahren erlaubt einen flächigen quantitativen Vergleich gemessener Deformationen mit FEA-Ergebnissen. Die beobachteten Abweichungen belegen die Notwendigkeit, zur Abschätzung der Aussagekraft von Simulationen Vergleichsmessungen durchzuführen.

Literatur

- [1] M. Dekiff, P. Berssenbrügge, B. Kemper, C. Denz, D. Dirksen, „Three-dimensional data acquisition by digital correlation of projected speckle patterns“ in: *Appl. Phys. B-Lasers O.* **99**(3), 449-456 (2010)
- [2] T. Fricke-Begemann, J. Burke, „Speckle Interferometry: Three-Dimensional Deformation Field Measurement with a Single Interferogram“ in: *Appl. Optics* **40**(28), 5011-5022 (2001)
- [3] M. Dekiff, P. Berssenbrügge, B. Kemper, C. Denz, D. Dirksen, „An optical 3D shape and deformation measurement system for the analysis of dental biomaterials“ in: *DGaO-Proceedings 2012*, P21 (2012)
- [4] <http://www.geuz.org/gmsh/>
- [5] <http://www.calculix.de/>