

# Neue Wege in der zahntechnischen Aus- und Weiterbildung

Im Gespräch mit dem Team des LeSoDent-Forschungsprojektes

Derzeit arbeitet ein interdisziplinäres Projektteam an der Entwicklung einer interaktiven Lernsoftware für die zahntechnische Aus- und Weiterbildung. Die LeSoDent – LernSoftwareDental – soll das manuelle Schichten von keramischen Frontzahnkronen durch Simulationen und Computergrafiken lehren sowie werkstoffkundliche Grundlagen vermitteln und somit Ausbildungsbetriebe unterstützen. Im Interview spricht Annett Kieschnick mit den involvierten Projektteams.

LeSoDent vereint als interdisziplinäres IGF-Vorhaben (Industrielle Gemeinschaftsforschung) die Disziplinen Dentaltechnologie, Informatik sowie Physik. Ins Leben gerufen wurde das Forschungsprojekt durch die Werkstoffkunde der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik des Klinikums der Universität München (LMU), das Institut für Lasertechnologie in der Medizin und Messtechnik (ILM) und die Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI). Es wird u.a. durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und von Partnern aus der Industrie unterstützt.

## Was genau ist LeSoDent?

LeSoDent ist eine interaktive Lernsoftware, mit der das manuelle keramische Verblenden von Frontzahnkronen gelehrt wird. Auszubildende erarbeiten sich – angepasst an den individuellen Kenntnisstand – eigenständig und nach didaktisch sinnvollem Konzept theoretisches und vor allem praktisches Wissen. Ziel ist es, optimale sowie reproduzierbare keramisch verblendete Kronen auf unterschiedlichen Gerüstwerkstoffen herstellen zu können. Mit der Software werden also die komplexen Fertigungsabläufe des manuellen Verblendens trainiert und digital kontrolliert.

## Wie kann eine Software einen manuellen Arbeitsprozess (Schichttechnik) lehren?

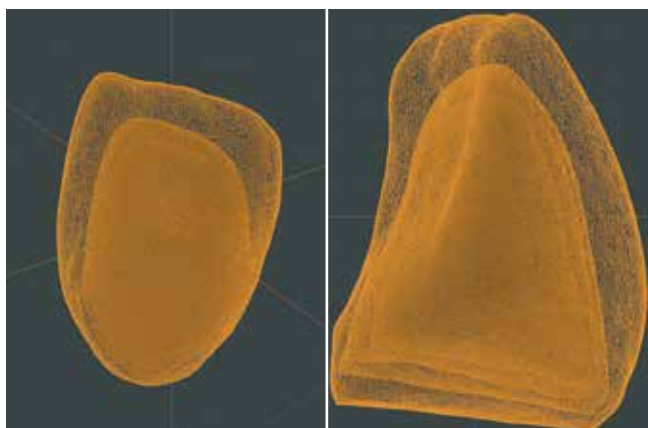
Jeder Zahntechniker kennt die Herausforderungen beim Verblenden einer Frontzahnkrone. Es benötigt Übung, individuelle Betreuung und viel Arbeitszeit seitens des Lehrenden und des Lernenden. Teils kann dies in der Ausbildung nicht immer im nötigen Maß gestemmt werden. Schichten zu lernen, erfordert viele Wiederholungen, gezielte Anweisungen und bewusste Wahrnehmung von Zahnform und -farbe. Zudem be-

darf es der Kenntnis über die Auswirkung von Brandführung, Werkstoffen etc. Bislang gibt es keine Messmethodik, mit der das Resultat (bezogen auf Form und Farbe der Krone) objektiv bewertet wird. Mit LeSoDent soll erstmals ein manueller Prozess messtechnisch objektiv erfasst und ausgewertet werden. Der Lernende übt interaktiv das manuelle Verblenden – inkl. Theorie sowie handwerklicher Tipps und Tricks.

## Welche Lern- und Arbeitsbereiche wird LeSoDent enthalten und wie erfolgt die Wissensvermittlung?

Die Software vermittelt theoretisches Grundwissen aus Zahntechnik, Werkstoffwissenschaft, Mineralogie, Physik und Informatik. Im Fokus steht die praktische Arbeit. Unterrichtet wird das Verblenden von Frontzahnkronen auf unterschiedlichen Gerüstmaterialien. Der Lernende scannt die von ihm verblendete Krone ein und erhält von der Software ein objektives Feedback zu Form- und Farbabweichungen im Vergleich zur Referenzkrone. Das heißt er schichtet – ganz real und manuell – die Krone, während die Software durch Anweisungen und Tipps den Prozess anleitet und unterstützt. Es ist also kein rein virtueller Ansatz, sondern ein Hybrid-Prozess aus manuell und virtuell. Die Software bietet dabei Anleitung, Kontrolle und Feedback auf Basis der objektiven Infos aus Scans bzw. Renderings zu den lichteoptischen Eigenschaften (**Abb. 1a und b**).

Die Wissensvermittlung erfolgt anhand des didaktischen Konzepts AVIVA (Ausrichten, Vorwissen aktivieren, Informieren, Verarbeiten, Abfragen) per Lehrvideos, Text, Bild sowie Abfrage- und Ergebnisauswertung. Die Videos selbst werden ebenfalls im Rahmen des LeSoDent-Projekts erstellt.



**Abb. 1a und b:** Aus Einzelscans ineinander geschachteltes Dreiecksnetz. Scan des Zahnstumpfes als innerste Oberfläche; Scan des darüberliegenden Käppchens als zweite Schicht und das Käppchen mit aufgebrachtem Liner als dritte Schicht (hauchdünn). Die äußere Schicht (dicke Schichtstärke) wurde aus dem Scan, bei dem die aufgetragene Dentin-Schmelz-Schicht nach dem Brand vermessen wurde, erzeugt.

### *Ist das manuelle Verblenden in Zeiten monolithischer Restaurationen überhaupt noch relevant?*

Das Wissen um den farblichen Aufbau und die Struktur des natürlichen Zahnes bzw. das Schichtmuster sowie dessen Nachahmung mit Verblendwerkstoffen ist und bleibt grundlegend. Trotz aller hervorragenden keramischen Werkstoffe lassen sich höchästhetische Restaurationen (insbesondere im Frontzahnbereich) auch heute nur mit der manuellen Verblendung erzielen. Bei einem rein digitalen Ansatz wird die Krone konstruiert, von der CAM-Maschine monolithisch gefräst/geschliffen und gegebenenfalls individualisiert. Dieses Vorgehen ist vergleichsweise einfach, führt aber oft nur zu einem passablen Ergebnis. Die charakteristischen Verläufe der Zahnfarben und lichteoptischen Eigenschaften natürlicher Zähne sind bei monolithisch hergestelltem Zahnersatz in der Regel nicht ausgeprägt vorhanden. Es gibt geschichtete keramische Restaurationswerkstoffe in Form von Blocks/Discs, mit denen die Farbschichten eines Zahnes naturgetreuer abgebildet werden können. Jedoch sind diese Blöcke in „angrenzenden“ Schichten aufgebaut, sodass hier – vor allem im Frontzahnbereich – mangels fließender Farbverläufe keine vollkommen zufriedenstellende Ästhetik erreicht werden kann.

### *Ein wesentlicher Bestandteil von LeSoDent ist das optische Messsystem. Wie lassen sich denn die lichteoptischen Eigenschaften der Zähne sowie die Lichtstreuung visualisieren und vermessen?*

Will man die Lichtausbreitung in einem Objekt verstehen, muss man dessen optische und strukturelle Eigen-

schaften kennen. Dabei interessiert insbesondere, welche Absorber das auftreffende Licht im sichtbaren Bereich in welchem Maß absorbieren und an welchen Strukturen das Licht in besonderem Maße gestreut wird. Zudem ist es wichtig zu wissen, wo sich diese Absorber und streuenden Strukturen befinden.

Bei einem natürlichen Zahn bildet die Pulpa den innersten Kern des Zahnes, in dem sich Blutgefäße und Nerven konzentrieren. Hämoglobin als Biomarker ist in diesem Bereich z.B. für die Absorption des Lichtes in einem bestimmten Wellenlängenbereich entscheidend. Umgeben wird die Pulpa von Dentin mit den Tubuli als markante Strukturen. Hier wird das Licht in besonderer Weise gestreut. Der Zahnschmelz ist das Material, welches die Schnittstelle zur Außenwelt sowie zum umgebenden Licht bildet. An den dicht gepackten, kleinen Streuzentren im Zahnschmelz wird es charakteristisch gestreut. Der Schmelz ist zusammen mit dem Dentin entscheidend für das Erscheinungsbild des Zahnes.

Um eine Zahnrestauration realistisch zu rendern\*, wird das 3D-Modell eines Zahnes benötigt. Dieses bildet die optischen Eigenschaften, den strukturellen Aufbau und die Geometrie des Zahnes möglichst realistisch ab. Zudem bedarf es einer physikbasierten theoretischen Beschreibung der Lichtausbreitung im Modell (z.B. im Zahn). Dafür entwickeln wir am ILM eine numerische Lösung der Strahlungstransportgleichung – die Monte-Carlo-Simulation. Sind die optischen Eigenschaften der involvierten Materialien und das Modell eines Zahnes verfügbar, kann der Zahn – unter Berücksichtigung einer vorherrschenden Beleuchtungssituation – realistisch gerendert werden (**Abb. 2**).



**Abb. 2:** Gerenderte Restauration. Aus den Dreiecksnetzen wurde ein Tetraeder-Volumen erzeugt, das für das Rendering in der Monte-Carlo-Simulation verwendet wurde. Den 4 durch die Schichtung der verschiedenen Zahnersatz-Materialien entstandenen Volumina wurden unterschiedliche optische Eigenschaften zugewiesen, die bei der Berechnung der Lichtausbreitung berücksichtigt worden sind.

Zur Vermessung wird bei LeSoDent ein Messaufbau verwendet, bei dem mit einem Projektor nacheinander verschiedene 2D-Streifenmuster auf das Objekt (z.B. Zahn, Restauration) projiziert werden. Zur Bestimmung der Objektfarbe wird vorher die spektrale Übertragungsfunktion des Messsystems bestimmt. Ist diese bekannt und wird bei der Vermessung des Objektes ein Weißstandard in das Beobachtungsfeld platziert, kann die Farbe bestimmt werden. Wird das Objekt aus verschiedenen Winkeln beleuchtet, lässt sich zudem eine 3D-Form des Objektes bestimmen.

### *Und wie unterscheidet sich diese Art der Farbbestimmung von den bekannten dentalen Messtechniken für Zahnfarbe?*

Zielstellung im LeSoDent-Projekt ist die Beantwortung der Frage: Wie muss die Restauration aufgebaut sein und welche Zahnersatzmaterialien sollten verwendet werden, um das Erscheinen des jeweiligen natürlichen Referenzzahnes abzubilden. Für diese Charakterisierung reicht es nicht aus, nur die Farbe zu bestimmen; der Farbeindruck hängt von vielen Faktoren ab. Ein wirklich zufriedenstellendes Ergebnis entsteht nur, wenn die Streu- und Absorptionseigenschaften des Restaurationsmaterials denen des natürlichen Zahns nahekommen. Dies ist eine Kernaufgabe unseres Projektes. Entscheidend sind die Kenntnis der Lichtausbreitung und das Verständnis dafür, wie die Zahnersatzmaterialien und Schichtung die Lichtausbreitung beeinflussen. Mit der Monte-Carlo-Simulation können wir dies für ein definiertes Messszenario berechnen. Das Berücksichtigen der Lichtausbreitung bei der Bestimmung der Farbe stellt somit einen wesentlichen Unterschied zu bisherigen Messtechniken der Zahnfarbbestimmung dar.

### *Die nächste Frage geht an den Informatiker. In welcher Form werden die vermessenen Daten in der Software dargestellt? Sieht der Betrachter eine Art holografisches 3D-Objekt?*

Zunächst konzentrieren wir uns auf die zum Teil interaktive 2D-/3D-Darstellung. Wichtig ist, dass sie realitätsnah ist, um möglichst genau die Unterschiede zwischen einer „gut“ und einer „schlecht“ geschichteten Krone erkennbar zu machen. Darauf basierend ist es unser Ziel, aus den aufgenommenen und synthetisch erstellten Daten einen autostereoskopischen\*\* 3D-Monitor anzu-steuern. Hierbei kann ohne weitere technische Hilfsmittel eine 3D-Darstellung erfolgen. Wie hoch der Nutzen dessen ist, werden wir im Laufe des Projektes gemeinsam erarbeiten. Eine echte Hologramm-Darstellung, wie

sie viele vielleicht aus Star Wars kennen, ist hier technisch allerdings nicht umsetzbar.

### **Welche Informationen erhält der Lernende aus der 3D-Farbvermessung?**

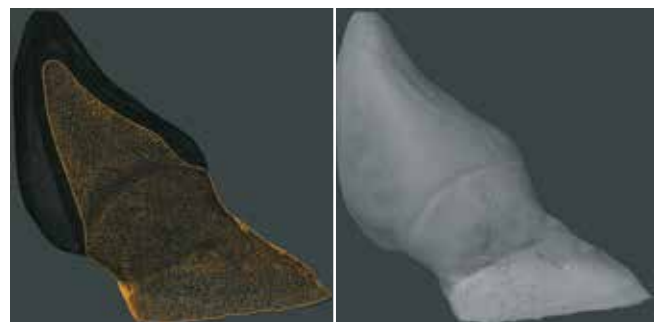
Die praktischen Ausführungen werden durch Feedback zu Farb- und Formabweichung (Vergleich Masterkrone = Referenzkrone) sowie Hinweise zu Korrekturen (Schleifen) vermittelt. Angezeigt werden u.a. Abweichungen von Farbe und Schichtstärken der Verblendung. Die Farbmessung in streuenden Medien inklusive der 3D-Formmessung wird mittels eines speziellen Scanners mit strukturierter Einstrahlung ausgewertet (**Abb. 3 und 4**). Die LeSoDent-Software ermöglicht den Auszubildenden somit nach jedem Verblendschritt einen Farb- und Formvergleich zur Referenzkrone.

### *Und was passiert auf Basis dieser Informationen? Wird die Krone manuell nachgeschichtet und eine 3D-Messung vorgenommen?*

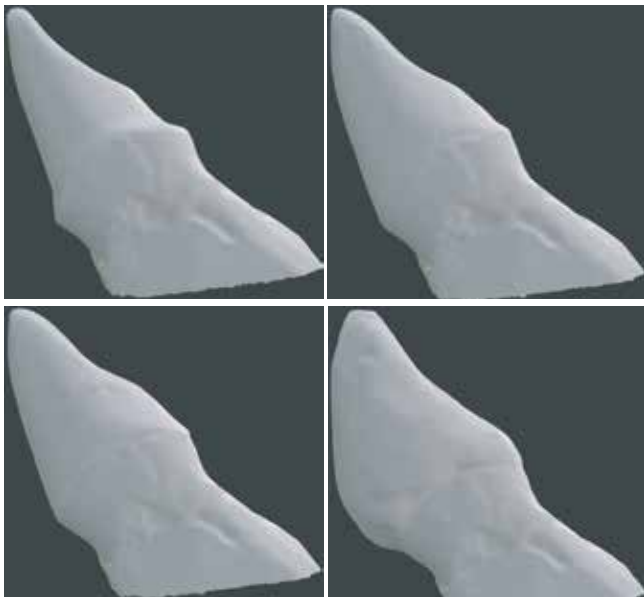
Der Lernende erhält nach jedem Scannen eine Handlungsempfehlung, um etwaige Farb- und Formabweichungen zu korrigieren. Sind die angestrebte Form und Farbe nicht mehr zu erzielen, kann mit einem neuen Gerüstkäppchen das Verblendtraining erneut begonnen werden. Die Erkenntnisse aus den vorherigen Versuchen sind Teil des Trainings und tragen zu einem besseren Verständnis des Schichtaufbaus bei (**Abb. 5 bis 8**).

### *Lässt sich auf Basis der 3D-Farbvermessung das Potenzial der Zahnersatzmaterialien beurteilen, z.B. des monolithischen Zirkonoxids?*

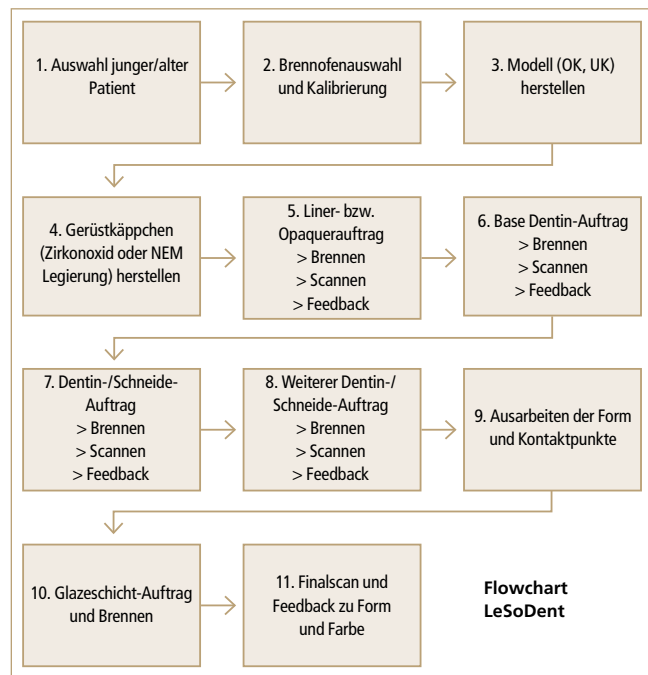
Theoretisch kann ein Vergleich zwischen der definierten, in der Software hinterlegten Referenzkrone und einer monolithischen Krone (in gleicher Form) erfolgen. Es wäre denkbar, eine Datenbank von Werkstoffen



**Abb. 3 und 4:** Geschichtete Dreiecksnetze, die nach jedem Arbeitsschritt eines Schichtvorgangs aus Scans mit einem an der LMU verfügbaren Scanner erstellt wurden. Orange markiert ist das Dreiecksnetz des Stumpfes, darüberliegend als erste Schicht das Käppchen, als zweite Schicht der Liner und als äußere Schicht Dentin/Schneide. Rechts die Situation als transparentes Objekt dargestellt.



**Abb. 5 bis 8:** Die Einzelscans der verschiedenen Arbeitsschritte. Von links: Einzelstumpf, Stumpf und Kronengerüst/Käppchen, Gerüst mit Liner abgedeckt und die Dentin-/Schneideschichtung.



(Gerüst, Verblendkeramik, monolithische Werkstoffe) und definierten Restorationsgeometrien zu hinterlegen, um das optische Erscheinungsbild verschiedener Zahnersatzmaterialien, bezogen auf eine definierte Geometrie, beurteilen bzw. vergleichen zu können.

**Was ist aus Sicht der Physik/Optik die größte Herausforderung bei der Entwicklung von LeSoDent?**

Die einzelnen Komponenten unseres Arbeitsteils zusammenzuführen und in die Lernumgebung zu integrieren, ist in jedem Fall herausfordernd. Die optische Charakterisierung der Zahnersatzmaterialien, die 3D-Vermessung der einzelnen Schichtungen innerhalb des Lernprozesses und die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation für das Rendering fließen dabei in die Lernumgebung ein. Die Interaktion an den Schnittstellen zu den Inhalten der Projektpartner LMU und GFal ist dabei von besonderer Bedeutung. Wird mühelos durch den Lernprozess geführt und greift die Vernetzung wissenschaftlicher Inhalte reibungslos ineinander, erhält der Lernende eine innovative Möglichkeit, den manuell geprägten Vorgang „keramische Verblendung“ während der Zahntechnik-Ausbildung digital zu erlernen.

**Und aus Sicht der Informatik? Wo liegen hier die größten Herausforderungen?**

Herausfordernd ist u.a. das Schaffen eines umfangreichen Modells für den Gesamtprozess, sodass Veränderungen flexibel simuliert und Ergebnisse in geeigneter

Weise dargestellt werden. Module und Wissen der interdisziplinär kooperierenden Forschungseinrichtungen in einer Software zu integrieren und flexibel für Adaptationen sowie neue Erkenntnisse zu bleiben, ist eine schwierige Aufgabe. Und zu alledem soll die Software weniger technisch, sondern vielmehr nutzerfreundlich, intuitiv, ja fast schon spielerisch gestaltet sein.

**Was macht das Projekt aus Perspektive der dentalen Werkstoffkundeforschung so interessant?**

Interessant ist, dass die ohnehin bereits – teils aufgrund der aktuellen Lage – digitale Vermittlung von theoretischem Wissen um den praktischen Prozess des Verblendens ergänzt wird. Das manuelle Verblenden wird unter Anleitung rein digital vermittelt. Das in LeSoDent erlernte theoretische Wissen zu Werkstoffen und Herstellungsprozessen erfolgt dann bei den einzelnen Schritten des Verblendens sehr bewusst. Dies führt zu einem hohen Lerneffekt und zu nachvollziehbaren, reproduzierbaren Ergebnissen.

Spannend ist auch, dass die Zusammenhänge zwischen Werkstoffen, Verarbeitung und physikalischen Eigenschaften parallel vermittelt werden. Dies entspricht einem didaktisch sinnvollen Konzept und ist ein völlig neuer, innovativer Ansatz in der zahntechnischen Ausbildung. Messen, Auswerten und Visualisieren der manuell erarbeiteten Ergebnisse erfolgen digital und basierend auf Fakten – Simulation (Rendering) der geschichteten

Kronen im Vergleich zur Referenzkrone. Eine Lernsoftware für das Training keramischer Verblendungen ist in dieser Weise kommerziell noch nicht verfügbar. Die Umsetzung eines manuellen Prozesses in einer interaktiven Software macht das Projekt LeSoDent zu einer wirklich interessanten Herausforderung.

- \* Rendern bezeichnet in der Computergrafik das Erzeugen eines Objektes aus Rohdaten.
- \*\* Autostereoskopie („3D-Sehen auf dem Monitor ohne 3D-Brille“) bezeichnet ein Verfahren zur Darstellung dreidimensionaler Bilder und dient einer plastischen 3D-Wahrnehmung ohne zusätzliche Hilfsmittel.

*Vielen Dank für den Einblick in das Forschungsprojekt!* ■

Bilder: LeSoDent Forschungsteam



**ZT Annett Kieschnick**  
 Freie Fachjournalistin  
 Helmholtzstr. 27  
 10587 Berlin  
 ak@annettkieschnick.de  
 www.annettkieschnick.de



### Über LeSoDent

Gefördert wird das Projekt LeSoDent über die AiF (Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie zahlreichen Projektpartnern aus der Dentalbranche. Der Umsetzungszeitraum des Forschungsprojektes ist geplant bis Ende 2023. Das interdisziplinäre IGF-Vorhaben vereint die Disziplinen Dentaltechnologie, Informatik sowie Physik. Ins Leben gerufen wurde das Forschungsprojekt durch die Werkstoffkunde der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik des Klinikums der Universität München (LMU), das Institut für Lasertechnologie in der Medizin und Messtechnik (ILM) und die Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. (GFaI).

