

Nutzung eines KI-basierten 3D-Scanverfahrens zur
Generierung einer polymerbasierten EpitheseR. Smeets^{1,2}; S. Fuest^{1,2}; S. Mesgarha³; W. Maison³; T. Sauer⁴; A. Voos⁵; Nguyen, A. M.⁶; M. Gosau¹; N. Wolf²

Einleitung

Patienten mit großen Gesichts- oder Gewebedefekten leiden unter erheblicher körperlicher und psychosozialer Belastung (2,3,7); die plastisch-rekonstruktive Chirurgie stößt hier an ihre Grenzen. Epithesen sind ein wichtiger Bestandteil der rekonstruktiven Versorgung geworden (Abb. 1) (2,3,7), werden bislang aber überwiegend in zeit- und personalintensiver Handarbeit (u. a. mehrfache Anpassung, Aufwachen, Verfügbarkeit von Fachpersonal) gefertigt (2,3,5,6) und müssen bei jeder Defektveränderung (u. a. Größe, Farbe) neu angepasst werden (7).

Das Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines reproduzierbaren, digital gestützten Workflows zur Herstellung patientenspezifischer, polymerbasierter 3D-gedruckter Silikon-Epithesen für den Kopf-Hals-Bereich (2,3,5,6,11) – inklusive der Generierung antibakterieller (7-9), photo- und thermochrome Eigenschaften der Epithese (7,10) und die Testung der Bio- und Zytokompatibilität (1,7).

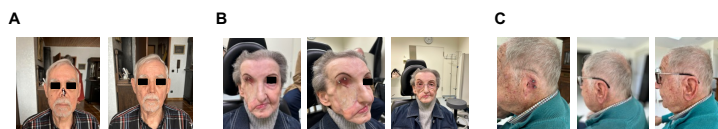


Abb. 1: (A) Nasenepithese; (B) Augenepithese; (C) Ohrschuppe.

Material & Methoden

1 Scan & Datenerfassung

- Standardisierte Positionierung, 360°-Zugang (2,3)
- Definierte Distanz, Raumlicht und Scanpfad (2,3)
- Vergleich zu konventioneller Abformung (2,3,7)
- Endpunkte: Präzision, Dauer, Komfort (Abb. 2) (3,7)

2 Datenaufbereitung & KI

- Artefaktreduktion und Lückenschluss (2,3)
- Rekonstruktion fehlender Geometrien (4)
- Digitale Anpassung an Defektregion (2,3)
- Punktwolke → Polygonnetz (STL/OBJ/PLY) (2,3)

3 Polymerbasierte Fertigung

- Export druckfähiger Epithesenmodelle (2,3)
- Polymer-/Silikonmodelle im 3D-Druck (3,5,6)
- Parameterstudien zu Material und Prozess (3,5-7)
- Endpunkte: Formtreue, Reproduzierbarkeit (3,5,6)

4 Oberfläche & Biologie

- Passive und kontaktaktive Antifoulingstrategien (8)
- Keimreduktion gegen *S. aureus* (ATCC29213) und *E. coli* (ATCC25922) (8,9)
- Bio-/Zytokompatibilität: LDH, XTT, Live/Dead (1,7)
- Auswahl geeigneter Beschichtungsrezepturen (9)

Parameterstudie zum Scanverfahren:

- Untersuchung standardisierter Bedingungen für die 3D-Erfassung von Kopf- und Defektregionen.
- Variation von Patientenpositionierung, Scanner-Patient-Distanz, Umgebungslicht und Scanpfad.
- Bewertung von Datenqualität, Präzision und Reproduzierbarkeit anhand von Oberflächenabweichungen (z. B. RMS-Fehler).
- Analyse von Erfassungsdauer und Patientenkomfort.
- Vergleich mit konventionellen Abformungsverfahren hinsichtlich Genauigkeit, Effizienz und Anwendererfahrung (2,3,7).

Softwareentwicklung – Workflow:

- Entwicklung einer Softwarepipeline in eine normalisierte, matrixbasierte 3D-Repräsentation.
- Generierung synthetischer Defekte zur Erweiterung limitierter Trainingsdatensätze.
- Training eines 3D-Residual-U-Net-Modells zur Segmentierung fehlender Strukturen.
- Evaluation mittels Precision, Recall, Dice Score, Hausdorff-Distanz und Cross-Entropy.
- Übertragung der rekonstruierten Geometrien in die patientenspezifische digitale Epithesenplanung (2-4).

Erforschung von Oberflächenmodifikationen von Silikonem zur Verhinderung des Biofouling mittels Erforschung von passiven (Zwitterionen, PGE, superhydrophobe Kunststoffe) und aktiven Antifoulingstrategien (kovalent-gebundene oder kontaktaktive Biozide, Abb. 2 F).

Die Zytokompatibilität wurde mithilfe von L929-Mausfibroblasten (ECACC, Salisbury, Großbritannien) und MC3T3-Präosteoblasten (ATCC, Manassas, USA) beurteilt. Dabei kamen direkte und indirekte Zellkontakt-Modelle zum Einsatz:

- Direkter Kontakt: Zellen wurden für 24 Stunden auf den Testoberflächen kultiviert und anschließend mittels Live-Dead Färbung und Fluoreszenzmikroskopie analysiert.
- Indirekter Kontakt: Materialextrakte wurden hergestellt und die Zellviabilität nach 72 Stunden mit XTT- und LDH-Assays quantifiziert.

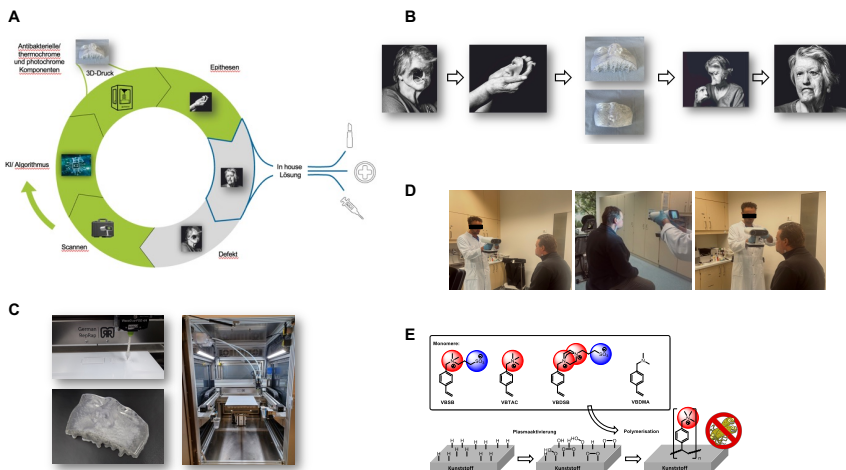


Abb. 2: (A) schematische Darstellung des Projektworkflows; (B) schematischer Workflow der 3D-gedruckten Epithese; (C) 3D-Druckprozess der Silikon-Epithese; (D) Scanvorgang am Patienten; (E) schematische Darstellung der Oberflächenmodifikationen von Kunststoffen zur Verhinderung des Biofouling.

Ergebnisse

ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG NACH DIN EN ISO 10993-5 (ABB. 3A, B):

- Silikon-control: in beiden Zelllinien stark zytotoxisch (XTT, LDH).
- Polyamid pVBDabco SM160: nicht zytotoxisch (beide Assays, beide Zelllinien; bei L929 XTT stark streuend).
- Polyamid-control: MC3T3 unkritisch, L929 deutlich zytotoxisch → Hinweis auf zelllinienspezifische Empfindlichkeit oder extrahierbare Komponenten, die Fibroblasten stärker treffen.

ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DER WIRKSAMKEIT DER OBERFLÄCHEN-MODIFIKATIONEN (ABB. 3C-E):

- Die antimikrobiellen und antiadhäsiven Eigenschaften eines Teils der bisher synthetisierten Materialien wurden bereits mittels mikrobiologischer Untersuchungen gegenüber *S. aureus* und *E. coli* getestet.
- Hierbei konnten für VBTAC (Vinylbenzyltrimethylammoniumchlorid) auf PP (Polypropylen) und PA (Polyamid) gute Keimreduktionen festgestellt werden (Abb. 3C).
- Besonders interessant ist die kontaktbiozide und antiadhäsive Wirkung der kombiniert kationisch/zwitterionischen Materialien (Abb. 3D, E).

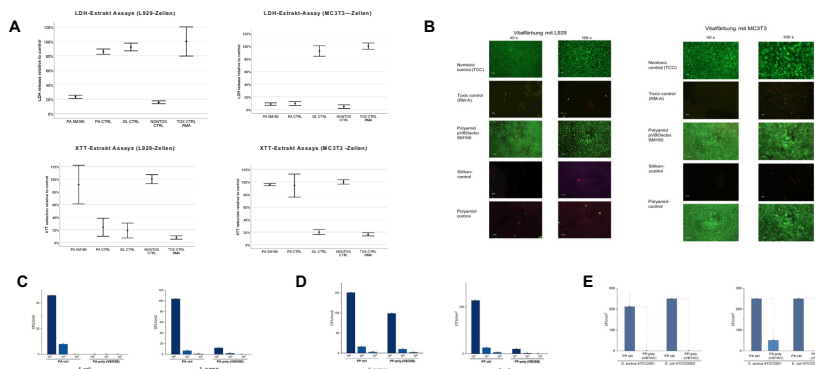


Abb. 3: (A) Biokompatibilitätstest (LDH, XTT) und (B) live dead staining. (C-E) Ergebnisse der Wirksamkeit der Oberflächenmodifikation.

Schlussfolgerung

Der vorgestellte Workflow zeigt, dass 3D-Scanverfahren, digitale Modellierung und polymerbasierte Fertigung grundsätzlich zur Herstellung patientenspezifischer Epithesen kombiniert werden können (5,6). Gegenüber konventionellen Abformmethoden bietet das Scanverfahren das Potenzial einer zeiteffizienten, reproduzierbaren und patientenschonenden Alternative. Erste Untersuchungen zur kontaktaktiven antimikrobiellen Oberflächenmodifikation weisen auf eine Keimreduktion hin (8,9), während Druckparameter, Silikonmaterialien, Biokompatibilität sowie die Integration photo- und thermochrome Gruppen in weiterführenden Studien systematisch validiert werden müssen (1,7,10).

Literatur

Diese Studie wurde vom deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz gefördert (Förderkennzeichen: KK5180710IE3).

Kontakt:

Univ.-Prof. Dr. Dr. Ralf Smeets
Klinik und Poliklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
Sektion für "Regenerative Orofaziale Medizin"
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Tel.: +49 - 40 - 741054001 Fax: +49 - 40 - 741055467
E-mail: r.smeets@uke.de

- Berni F, Kröger N, Zinner M, van Gaalen K, Vaughan T, Yan M, Smeets R, Biza E, Malinov S, Buchanan F, Kopp A. Influence of surface condition on the degradation behaviour and biocompatibility of additively manufactured WE43. Mater Sci Eng C Mater Biol Appl. 2021 May;124:1120.
- Cristache CM, Tudor I, Morari L, Cristache G, Lurba M. Digital Workflow in Maxillofacial Prosthodontics - An Update on Defect Data Acquisition, Editing and Design Using Open-Source and Commercial Available Software. Appl Sci. 2021;11:973.
- Tier G, Cristache MA, Bacia M, Cristache CM, Barbu Vasilescu DE, Cristache L. Advancements in Digital Workflow for 3D-Printed Maxillofacial Soft Prostheses: Exploring Design and Materials in Direct Additive Manufacturing. A Scoping Review. Appl Sci. 2025;15:1701.
- Biselli F, Marchesini K, van Marrewijk N, Lenzini L, Popol V, Frasca E, Vinyshchanskyi S, Grana C. Segmenting Maxillofacial Structures in CBCT Volumes. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2025.
- Ulenkovsky A, Sieradzki S, Bonn J, Huetig F, Kozel C, Sieradzki S. Direct 3D printing of silicone facial prostheses: A preliminary experience in digital workflow. J Prosthet Dent. 2018;120:303-308.
- Ulenkovsky A, Wani E, Huetig F, Kozel C, Sieradzki S. Multistage 3D printing of a definitive silicone auricular prosthesis: An improved technique. J Prosthet Dent. 2021;125:949-959.
- Gadnani A, Pasche C, Sica J, Sienko S, Simeone MM, Jeter AE, Costello VV. Silicones for Maxillofacial Prostheses and Their Modifications in Service. Materials. 2024;17:2597.
- Zom E, Knevez JH, Burmeister N, Schwanig N, Rohlf M, Wichter SG et al. Contact-Bioactive TiO2 Surfaces by Surface-Initiated Atom Transfer Radical Polymerization with Chemically Stable Phosphonate Initiators. Langmuir. 2023;39(31):11063-72.
- Burmeister N, Zom E, Freus L, Tirm D, Schwanig N, Rohlf M et al. Low-Fouling and Antibacterial Polymer Brushes via Surface-Initiated Polymerization of a Mixed Zwitterionic and Cationic Monomer. Langmuir. 2023;39(49):17959-71.
- Seethoth R, Lütjens D, Rühmann R, Mühling O. Thermochromic Polymers - Function by Design. Chem Rev. 2014;114:3037-3068.
- Smeets R, Henningsen A, Zornel D, Stürmer E, Fiedler R, Schaller S, Gosau M, Gaudin R, Stölzer C, Hennel A, Fuest S. New and innovative biomaterials, techniques and therapy concepts: Biologization in maxillofacial surgery: oral surgery and dentistry is in full swing. PRF, PRGF, PRP, blood plasma-stabilized augmentations, supplementation of microelements and vitamins - what opportunities do such "biolog" approaches actually offer? We introduce them here. GMS J Med Sci. 2022;24:511.