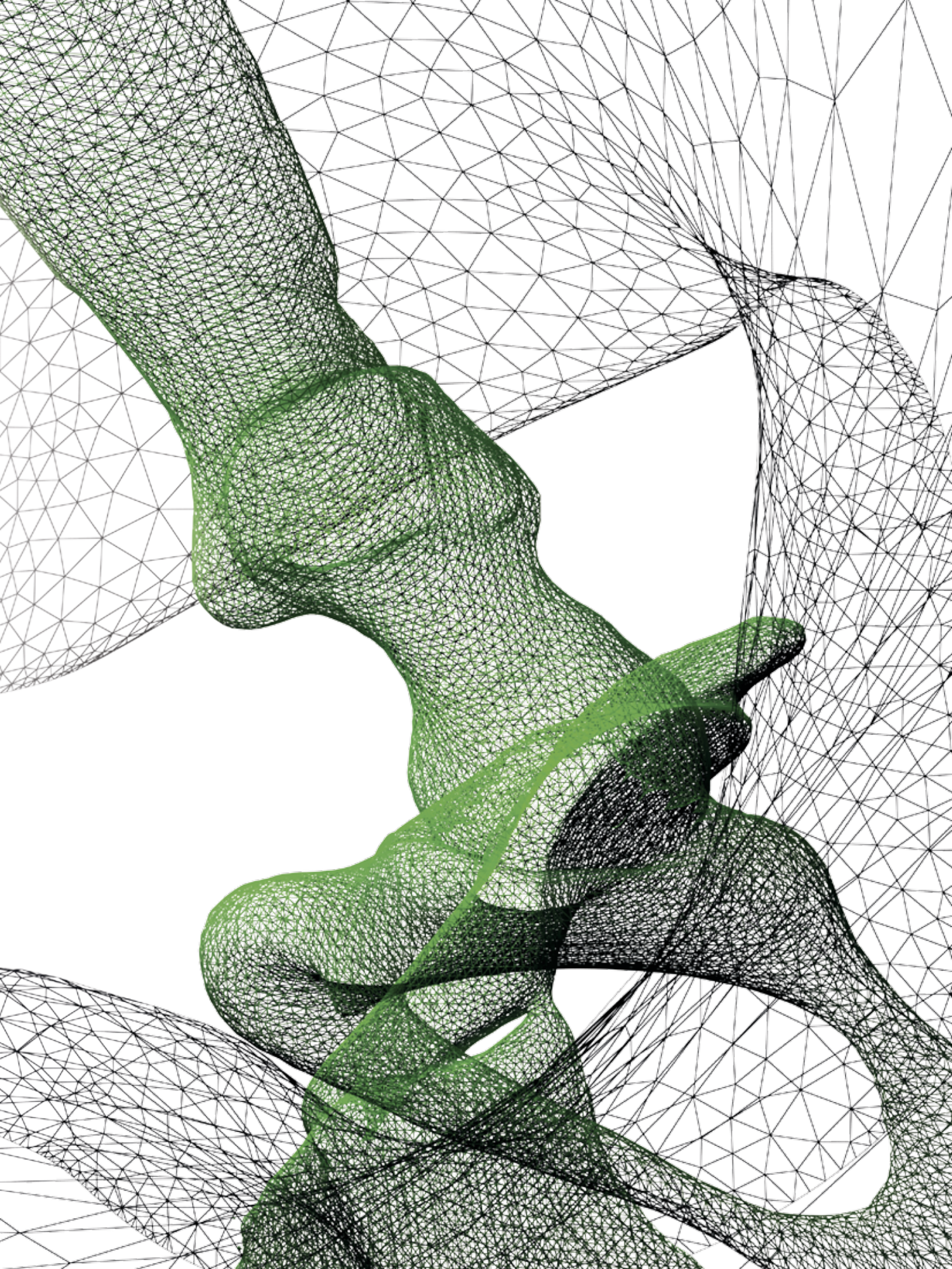
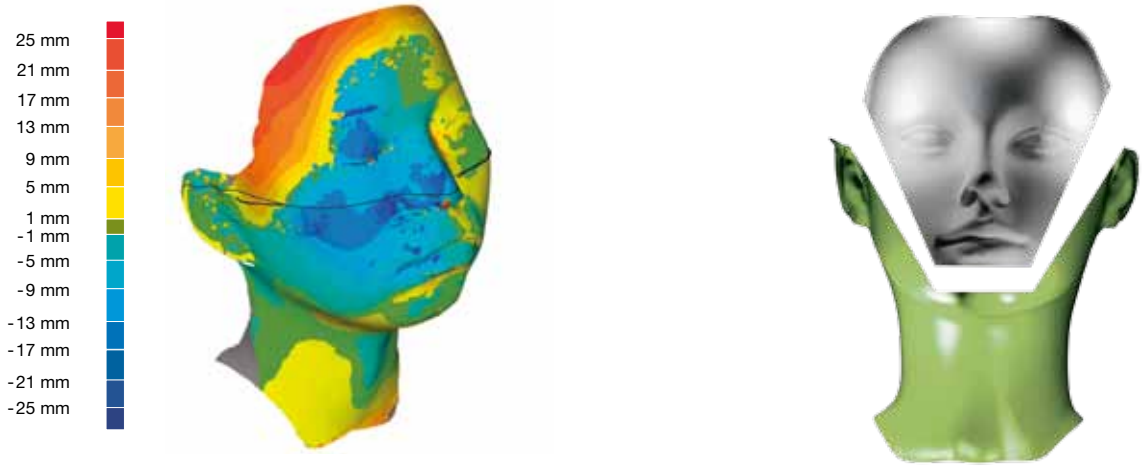
3-D im OP – von der Industrie in die Medizin

Ein Team aus Medizinern, Informatikern, Ingenieuren, Physikern und Computerspezialisten am Klinikum rechts der Isar entwickelt eine Methode, die Plastischen Chirurgen die 3-D-Simulation von Körperoberflächen und Weichteilgewebe erlaubt

Bild: ediundsepp nach CAPS





Die Mediziner machen sich vor der Operation ein genaues Bild von der betroffenen Gesichtsregion und visualisieren die Rekonstruktion. Im Bild links verdeutlicht das Farbschema – ähnlich den Erhebungen und Vertiefungen auf einer Landkarte – die Abweichungen der betroffenen Gesichtshälfte von der gespiegelten gesunden Hälfte. Die virtuelle 3-D-Rekonstruktion (rechts) zeigt die Gesichtsform anhand des eingescannten Gesichts der Mutter der Patientin

Bild links: CAPS; Bild rechts: ediundsepp nach CAPS

Die Nase besteht nur noch aus zwei Löchern, die rechte Kieferhöhle ist zerstört, dort, wo vorher ein Auge war, klafft ein Loch. Xiao Liewen aus Schanghai ist 14 Jahre alt, als sie im Bad ohnmächtig wird und mit dem Gesicht auf einen Heizstrahler fällt. Eine halbe Stunde vergeht, bis die Familie das Mädchen findet und ins Krankenhaus bringt.

Die Ärzte retten Xiao Liewens Leben. Mehr konnten sie für die Schülerin nicht tun. Ihre Augenhöhle ist immer noch offen, der Kopf deformiert. Das war 2003, für eine plastische Operation fehlten das Geld und die Spezialisten. Dank einer Spendenaktion kommt Xiao Liewen drei Jahre später nach München ans TUM-Klinikum rechts der Isar und wird mehrmals operiert. Heute hat die junge Frau wieder ein Gesicht.

Link
www.caps.me.tum.de

Geholfen hat eine Technik, mit der Köperteile dreidimensional dargestellt werden. Bei Xiao Liewen wurde zunächst die intakte linke Gesichtshälfte gespiegelt und die Nase ihrer Mutter eingescannt. Anschließend fertigte der Plastische Chirurg Laszlo Kovacs das entsprechende 3-D-Modell an – als Vorlage für den Operateur. Xiaos Nase formt Letzterer aus einem Hautlappen aus ihrem Unterbauch, er setzt Knorpel ein, modelliert

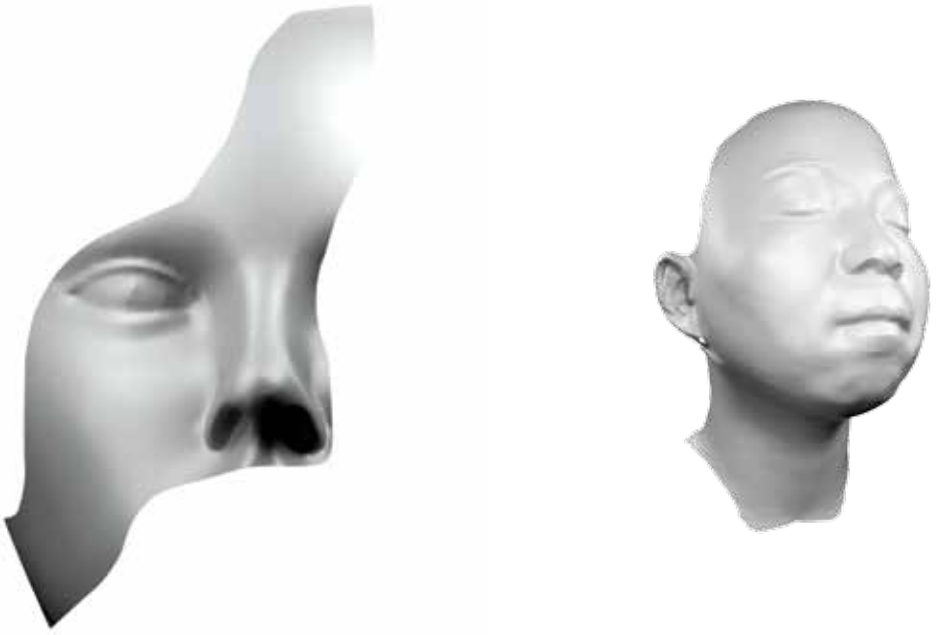


Bild links: ediundsepp nach CAPS; Bild rechts: CAPS

Schon vor der Operation haben die Ärzte ein genaues Modell des Patientengesichtes, das sie wiederherstellen möchten. Dazu gestalten sie ein dreidimensionales Volumenmodell der zerstörten Gesichtsregion (linkes Bild). Zusammen mit dem eingescannten Gesicht der Patientin erstellen die Forscher daraus das virtuelle 3-D-Rekonstruktionsmodell des anzustrebenden Patientengesichtes, so wie es nach der Operation aussehen soll (rechts)

die Nasenlöcher. Dann heißt es warten, bis sich Blutgefäße bilden. Nach vier Wochen wird schließlich die neue Nase transplantiert. Als Nächstes ist das zerstörte Augenlid an der Reihe, später werden noch Kieferhöhle und Wange rekonstruiert.

Dreidimensionale OP-Planung

„Wir beschäftigen uns seit rund zehn Jahren mit 3-D-Technologien, um Körperoberflächen und Weichteilgewebe zu erfassen. Das war der große Pluspunkt für diese Operation. Üblicherweise nutzt der Chirurg bei plastischen Operationen zweidimensionale Vorher-Nachher-Fotos als Grundlage für seine Arbeit, aber das ist zu ungenau“, berichtet Laszlo Kovacs. Der stellvertretende Klinikdirektor für Plastische Chirurgie ▷

Forschungsprojekt Sinus

Das Projekt Sinus wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie mit dem Programm „Förderung von innovativen Netzwerken“ (InnoNet) unterstützt. Dafür stehen 750.000 Euro zur Verfügung. Das Netzwerk bei Sinus besteht aus drei Forschungseinrichtungen und vier Industrieunternehmen: Das ist neben der federführenden Forschungsgruppe CAPS (Computer Aided Plastic Surgery) der Klinik für Plastische Chirurgie und Handchirurgie der TU München auch die Fakultät für Informatik (Computer Graphik & Visualisierung). Ein weiterer Partner ist die Fakultät Life Sciences der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Die industrielle Unterstützung kommt von den Firmen Steinbichler Optotechnik GmbH, CADFEM GmbH, PolyDimensions GmbH und VRLOGIC GmbH. Die Projektkosten übernimmt zu 90 Prozent das Wirtschaftsministerium, die restlichen 10 Prozent finanzieren die Industriepartner.

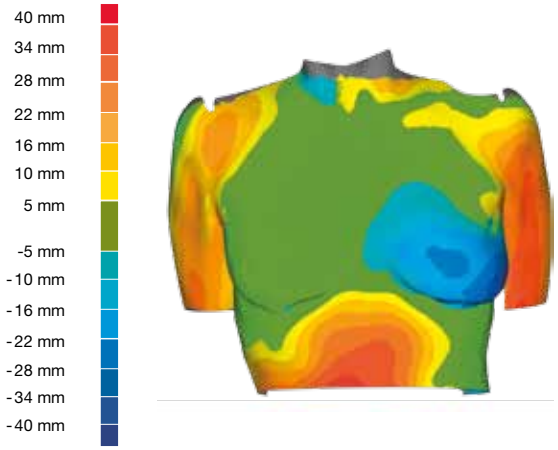
Mit einem 3-D-Laserscanner erfassen die Mediziner die weibliche Brustregion – hier gezeigt am Beispiel einer gesunden Frau. Aus den Daten erstellen sie ein Modell. Es dient zur Operationsplanung, etwa bei einer Wiederherstellungsoperation nach einer Krebserkrankung, vermittelt aber auch der Patientin bereits vor dem Eingriff einen Eindruck vom geplanten Operationsergebnis

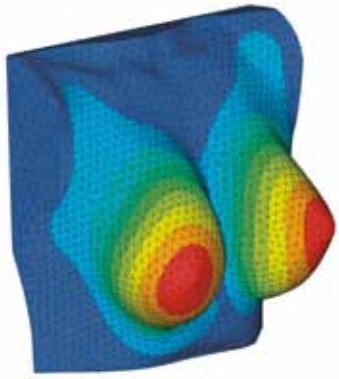
Grafik: ediundsepp nach CAPS

und Handchirugie am Klinikum rechts der Isar hat die Forschungsgruppe Computer Aided Plastic Surgery (CAPS) ins Leben gerufen: Rund zwölf Wissenschaftler aus drei Forschungszentren arbeiten am Projekt Sinus (siehe Kasten), dessen Schwerpunkt eine exakte patientenspezifische 3-D-Operationsplanung und -simulation auf dem Gebiet der Brustchirurgie ist.

Von der Industrie in den OP

„Die Industrie nutzt 3-D-Technologien seit längerer Zeit für die Produktentwicklung. Dieses Prinzip wollen wir auf den menschlichen Körper übertragen. Die Schwierigkeit für uns besteht unter anderem darin, die menschlichen Körperteile in ihrer Komplexität fehlerfrei wiederzugeben. Ein Knochen kennt keine rechten Winkel, keine Ebenen, keine Symmetrien. Der Kotflügel eines Autos hat dagegen eine recht einfache statische Geometrie. Den können Sie in die Ecke stellen, er wird nie seine Position verändern. Der menschliche Körper atmet, er ist immer in Bewegung“, veranschaulicht der Mediziner. Die äußere Form erfassen die Wissenschaftler zunächst mit einer Art Laserlicht-Fotografie. In Sekundenschnelle entsteht dann im Computer ein individuelles, digitales Abbild des Körperteils eines Patienten. Für die Simulation des Gewebes haben die Mediziner gemeinsam mit ihren Kooperationspartnern eine Methodik entwickelt, mit der aus Ultraschall-, CT-, MRT-Bildern und 3-D-Scanaufnahmen je nach Geschlecht, Größe, Gewicht und Alter virtuelle, anatomische 3-D-Patientenmodelle entstehen.





Grafiken: CAPS

Das Farbschema verdeutlicht die abweichende Brustform einer Patientin vor einer Brustwiederherstellungsoperation (links). Die Visualisierung dient der individuellen Planung der Operation

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode berechnen die Forscher Patientenmodelle, die das physikalische Verhalten von Weichteilgewebe - hier der weiblichen Brustregion - simulieren

3-D-Patientenmodelle

„Wenn wir beispielsweise nach einer Krebserkrankung eine weibliche Brust rekonstruieren, können wir anhand der Modelle das Brustvolumen und die Hautoberfläche messen und die Symmetrie vergleichen. Der Chirurg kann bereits vor der Operation berechnen, wie groß das Gewebetransplantat für die Brustwiederherstellung sein sollte“, erläutert Laszlo Kovacs. Auch für die Patientinnen sei die 3-D-Visualisierung ein großes Plus, weil sie bereits vor dem Eingriff einen Eindruck vom operativen Ergebnis erhalten können.

Für die CAPS-Forschungsgruppe ist die 3-D-Visualisierung aber nur ein Etappenziel. Denn damit ist das physikalische Verhalten des biologischen Systems mit seinem Fett- und Drüsengewebe noch nicht erfasst, geschweige denn simuliert. Lebendes Gewebe ist elastisch: Es reagiert auf Druck und verändert seine Form. Die Forscher wollten wissen, wie sich Weichteile unter Belastung verhalten, um ihre Reaktion mathematisch-physikalisch präzise und möglichst realistisch vorauszubestimmen. Die Technologie ihrer Wahl kommt aus dem Ingenieurwesen: die sogenannte Finite-Elemente-Methode (FEM), mit der die Experten das Verhalten von Festkörpern unter Alltagsbelastung vorhersagen. Das numerische Verfahren baut auf der Lösung von Differenzialgleichungen auf, die das Verhalten von Strukturen mathematisch beschreiben.

In der Industrie hat sich FEM schon lange bewährt. Besonders die Produktentwicklung profitiert davon: Entwicklungszeiten und späterer Änderungsaufwand ▷

werden reduziert, die Qualität wird verbessert. Damit lassen sich nicht nur Industrieprodukte, bevor sie gebaut werden, am Bildschirm auf ihre Tauglichkeit überprüfen. Auch in der Plastischen Chirurgie sollen deformierbare FEM-Modelle entstehen, mit denen biomechanische Veränderungen des Gewebes überprüft und simuliert werden. Für einen Patienten, der etwa eine Unterschenkelprothese benötigt, wäre eine vorherige Kontrolle seiner Gehhilfe ein Segen: In der Vergangenheit entstand zunächst ein Modell des Schafts aus Gips, bevor die Prothese hergestellt wurde. Hinterher lässt sich nicht mehr viel anpassen, mit der Folge, dass viele Betroffene unter Gelenkverschleiß, Rückenschäden oder schlecht heilenden Wunden leiden. In einem Verbundprojekt namens C.O.P.K.O. (Computerunterstützte Optimierung der Prothesenschaftkonstruktion in der Orthopädietechnik, siehe Kasten) entwerfen die Wissenschaftler patientenspezifische 3-D-Modelle von Oberschenkelstumpf und Prothesenschaft und überprüfen die Druckverhältnisse mittels FEM. Ist der Druck zu groß, kann die Form des Prothesenschafts noch vor der Herstellung optimiert werden.

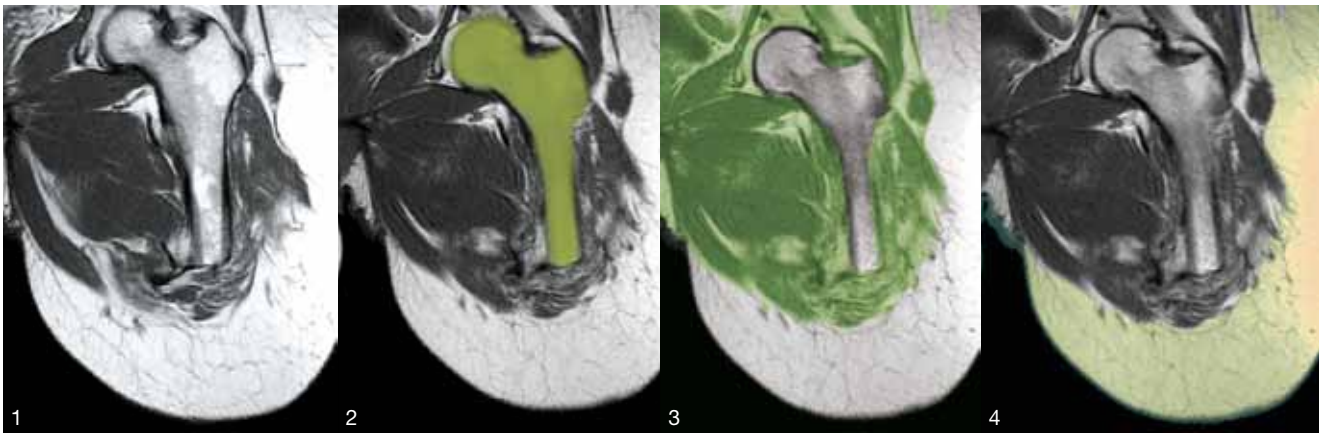
Planungswerkzeuge für Chirurgen

Bis dahin ist es noch ein langer Weg. Für die Forscher heißt es jetzt erst einmal: Ist die Modellierung präzise? Ist sie realistisch? Kann sich der Operateur wirklich damit vorbereiten? Langfristiges Ziel bei CAPS ist es, künftig den Medizinern Planungswerkzeuge an die Hand zu geben. Der Plastische Chirurg kann sich ▷

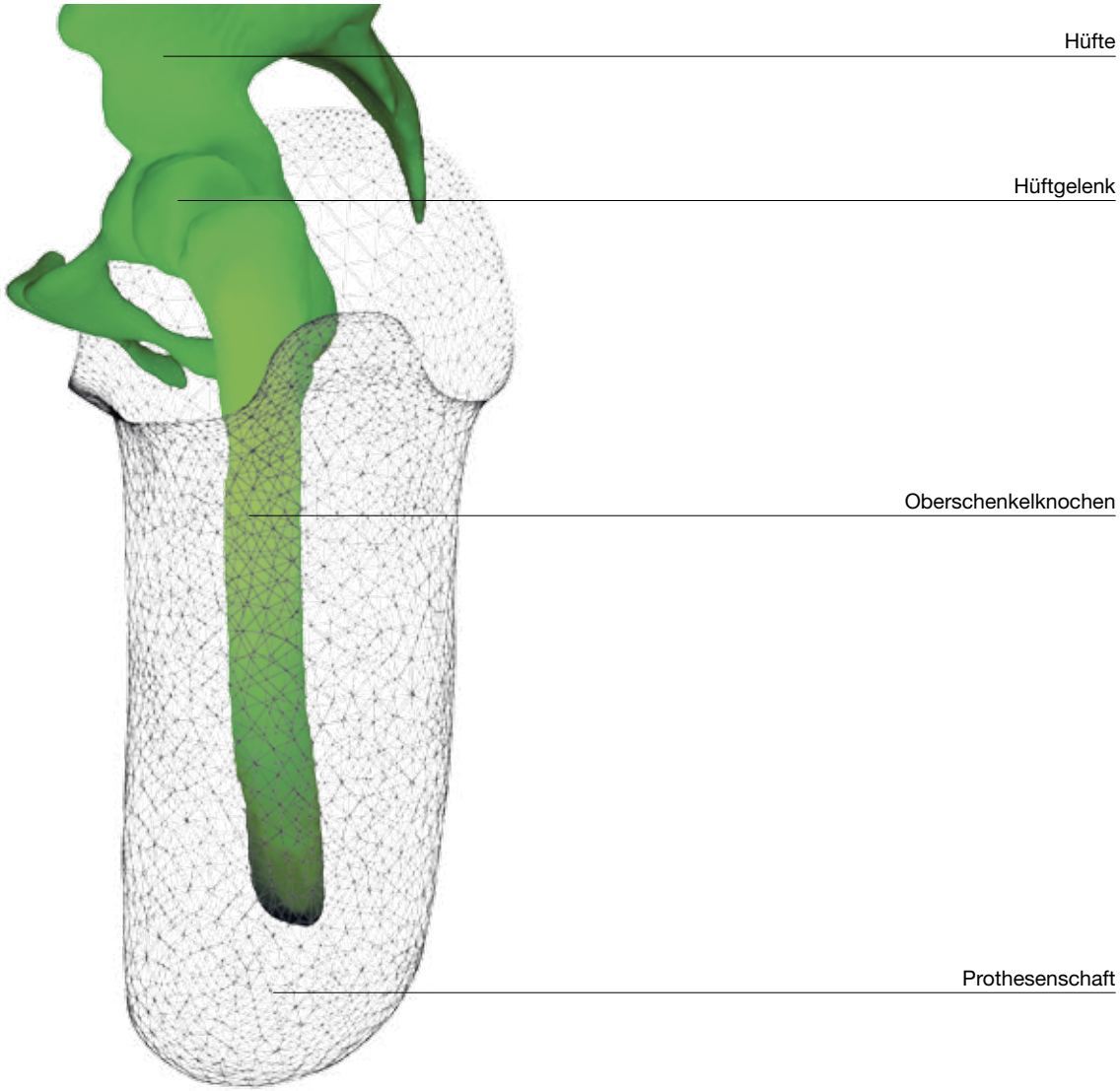
Forschungsprojekt C.O.P.K.O.

An C.O.P.K.O. (Computerunterstützte Optimierung der Prothesenschaftkonstruktion in der Orthopädietechnik) sind neben der Klinik für Plastische Chirurgie und der Klinik für Orthopädie und Unfallchirurgie die Firmen Gottinger Orthopädietechnik GmbH, die CADFEM GmbH und die Materialise GmbH beteiligt. Ziel der Projektpartner ist, die Versorgung mit Prothesen mithilfe moderner Bildgebungsverfahren und computerunterstützter Technologie zu verbessern und die individuellen Besonderheiten der Patienten zu berücksichtigen. Das Projekt wird von der Bayerischen Forschungsstiftung gefördert.

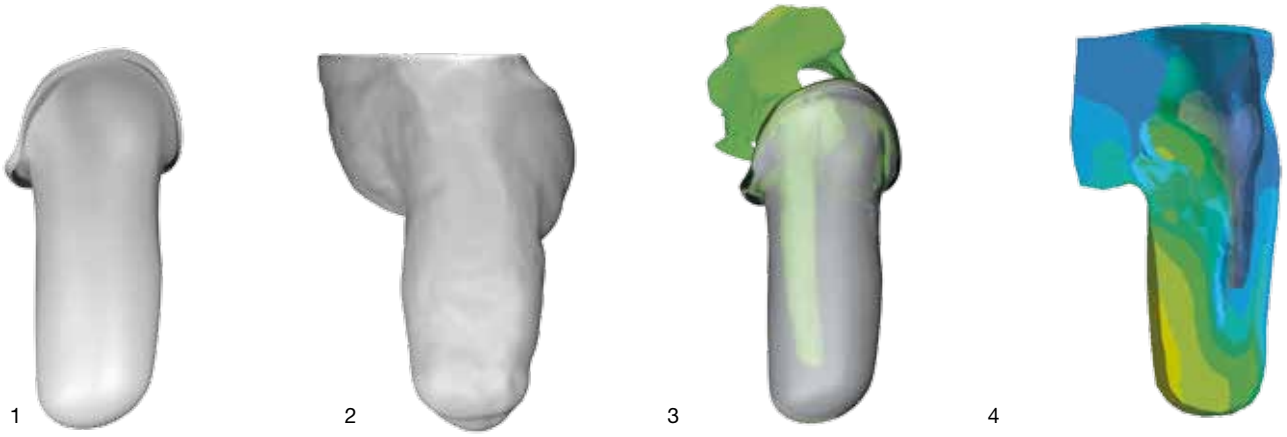
Die Bilder aus dem Kernspintomografen zeigen die anatomischen Bestandteile, hier am Beispiel eines Oberschenkelstumpfes (1). Am Computer markieren die Mediziner Knochen (2), Muskel (3) sowie Fett und Haut (4) einzeln und fügen dann die Daten zu 3-D-Modellen zusammen

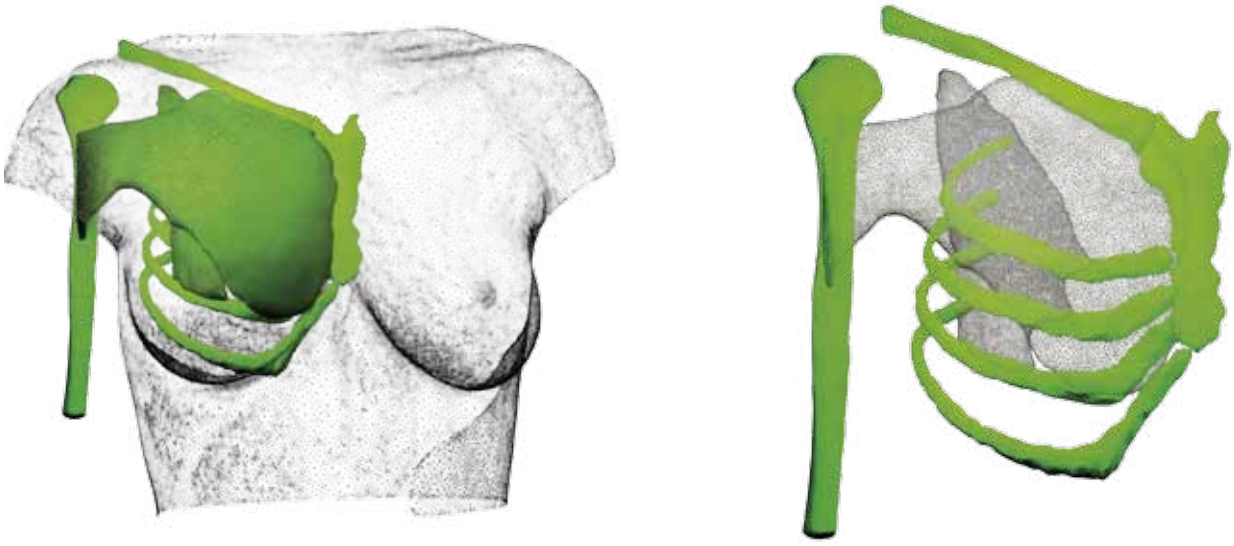


Bilder links: CAPS; Bilder rechts: ediundsepp nach CAPS



Virtuelle Planung einer Oberschenkelprothese anhand patientenspezifischer 3-D-Modelle: Eine neue Prothesenform wird vor der Herstellung auf ihren passgenauen Sitz überprüft. Hierzu wird die Prothese (1) virtuell an den individuellen Oberschenkelstumpf angepasst (2 und 3) und die Druckverhältnisse werden mithilfe der Finite-Elemente-Methode überprüft (4). So kann der Tragekomfort der Prothese optimiert werden





Anhand von Daten aus Kernspin- und Computertomografie erstellen die Mediziner virtuelle Rekonstruktionen komplexer anatomischer Regionen – hier des Oberkörpers. Dies ermöglicht beispielsweise eine bessere Visualisierung von Lagebeziehungen der Weichteilgewebe zum knöchernen Brustkorb

Bilder: ediundsepp nach CAPS

am FEM-Modell auf die Operation vorbereiten und möglichst viele Schritte virtuell durchgehen. Mit dieser Vorbereitung, die ebenso für die Ausbildung der Ärzte geeignet ist, kann er sich während des Eingriffs besser orientieren. Und: Der Erfolg lässt sich dann anhand objektiv messbarer Kriterien bewerten.

Die größte Herausforderung für die CAPS-Forschungsgruppe liegt in der anfallenden Datenmenge. Sie zu verarbeiten, entsprechende Algorithmen zu entwickeln, Optimierungsschleifen zu „fahren“ – dieser Aufwand ist auch für Hochgeschwindigkeitsrechner nicht zu unterschätzen. Und schließlich sollen die einzelnen OP-Planungsschritte in einen klassischen Arbeitsablauf (Workflow) eingebunden werden, um eine patientenspezifische 3-D-Operationsplanung und -simulation zu ermöglichen. Das TUM-Klinikum setzt auf eine Kooperation mit Industriepartnern. Die Beteiligten entwickeln eine Software-Plattform, in der Patientendaten, virtuelle Modelle und Planungswerkzeuge gebündelt werden. Sie soll selbsterklärend und einfach zu handhaben sein. Wenn alles gut geht, ist die erste Version 2011 fertig. Davon profitieren neben der Plastischen Chirurgie auch Orthopäden und Unfallchirurgen.

Laszlo Kovacs erinnert sich noch gut an die Operationen von Xiao Liewen vor vier Jahren. „Mit der neuen FEM-Methode hätten wir die Eingriffe noch präziser planen können“, meint er. Die inzwischen 20-jährige Patientin aber, die ihm immer noch ab und zu schreibt, ist dankbar und zufrieden: „Ich fühle mich glücklich, mir geht es gut!“ *Evdoxía Tsakiridou*