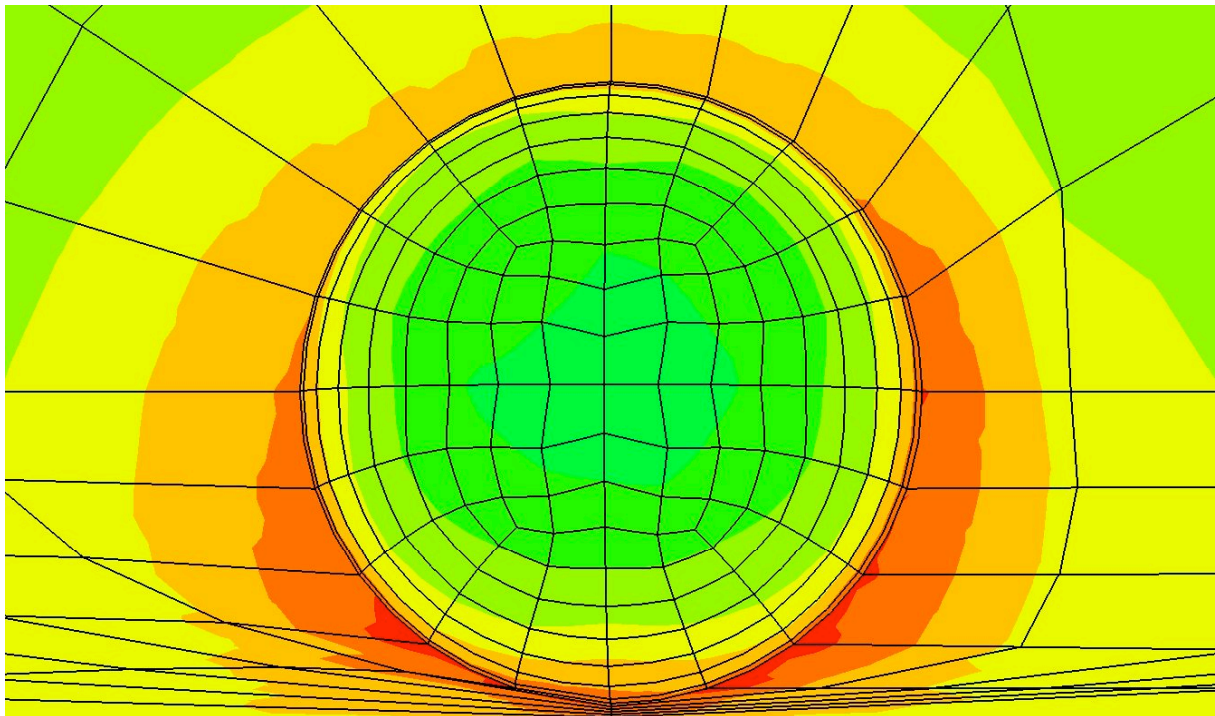


Projektarbeit

Visualisierung der mikrostrukturbedingten Werkstoffeigenschaften an 3D-Mikro/Nanofokus-CT-Daten keramischer Modellproben

Gefördert durch das Karl-Steinbuch-Stipendium
der MFG-Stiftung Baden-Württemberg



Bearbeitet von Sebastian Fuchs im Studiengang Werkstoffkunde und
Oberflächentechnik an der Hochschule Aalen

Stuttgart 8. Januar 2008

Betreut durch: Dipl.-Ing. Timo Bernthaler¹

¹ Hochschule Aalen, Fakultät Maschinenbau und Werkstoffkunde

Abkürzungen und Glossar

CAD	Computer Aided Design: Konstruktion und Design am Computer.
CT	Computertomographie: Verfahren zum Erstellen räumlicher Röntgenaufnahmen.
FEM	Finite-Elemente-Methode: Eine Struktur wird in eine endliche Anzahl Elemente unterteilt um an komplexen Strukturen physikalische Berechnungen durchzuführen.
Artefakte (Ringartefakte)	Technisch bedingte Strukturen, die dem Röntgenbild überlagert sind.
Rapid Prototyping	Bezeichnet den schnellen Bau von Prototypen z.B. mittels Stereolithographie.
Reverse Engineering	Umgekehrte Entwicklung. Ein fertiges System/Produkt wird untersucht und auf einen Plan zurückgeführt.
Mesh	Engl. für Netz. Die in eine endliche Anzahl Elemente unterteilte Struktur wird durch ein Netzwerk aus Knoten, welche die Eckpunkte der jeweiligen Elemente darstellen, gebildet.
vernetzen	Manuelles oder automatisches Unterteilen einer Struktur in einzelne Elemente mit geeigneten Eigenschaften.

Projektverlauf

FEM

Das Projekt verbindet drei relativ junge Disziplinen der Werkstoffwissenschaften und des Maschinenbaus miteinander. Die Finite-Elemente-Methode (FEM), hochauflösende Computertomographie und als Verbindungsglied, Arbeitsschritte aus dem Rapid Prototyping. Diese Arbeitsgebiete erfordern jeweils ein intensives Einarbeiten und im Idealfall, jahrelange Erfahrung. Das Einarbeiten in diese Disziplinen musste angesichts der kurzen Projektlaufzeit, sehr zielgerichtet erfolgen.

Die Einarbeitung in die Grundlagen der FEM erfolgte über die Teilnahmen an einem im Studiengang Maschinenbau angebotene Vorlesung, das Bearbeiten von Tutorials und autodidaktisch mittels vorlesungsbegleitender Literatur. Simulationen, die mittels FEM durchgeführt werden verfügen über ein immenses Fehlerpotential, dass vom unerfahrenen Benutzer nur schwer einzuschätzen ist. Um den Fehler bei der Simulation möglichst gering zu halten, wurde das Modell mehrmals mit Mitarbeitern aus dem Simulationsteam der Arbeitsgruppe Werkstoffprüfung und Bauteilauslegung (CR/ARM1) der Robert Bosch GmbH besprochen, welche über einen großen Erfahrungsschatz auf diesem Gebiet verfügen.

Im Anschluss an die Einarbeitungsphase wird zunächst ein 4-Punkt-Biege-Modell mit einer idealen (nicht mit Fehlern behafteten Probe) aufgebaut. Dieses Modell wurde analytisch überprüft.

Um die qualitative Aussagefähigkeit des FEM-Modells einer mit Fehlern behafteten 4-Punkt-Biege-Probe zu überprüfen und etwaige Fehlereinflüsse aufzeigen, wurde eine Probe, die an einer künstlich eingebrachten Pore gebrochen ist, als FEM Modell 1:1 nachgebaut. Die Bruchfläche wurde Lichtmikroskopisch vermessen um die genaue Lage der Pore zu bestimmen. Aus der Bruchspannung (die Spannung die zum Bruch geführt hat) wurde die zum Zeitpunkt des Bruchs an der Probe herrschende Last analytisch errechnet. Das FEM-Modell wurde eben dieser Last ausgesetzt. Auf die Ergebnisse wird im Abschnitt Ergebnisse eingegangen.

Probenanfertigung

Während der Einarbeitungsphase wurden aus einem Al₂O₃ ready-to-press Pulver (SPA-RTP-SB) Proben hergestellt und mit Retentionsperlen aus Kunststoff vermischt (0,1 Vol.%). Die Proben wurden axial gepresst und anschließend in oxidierender Atmosphäre gesintert. Die Retentionsperlen verdampfen beim Sinterprozeß und hinterlassen an ihrer vorherigen Position eine kugelförmige Pore. Die so gebrannten Proben müssen vor den Untersuchungen noch geschliffen werden, um Fehler (Kratzer, Kerben) an der Oberfläche zu eliminieren, welche das Ergebnis negativ beeinflussen würden.

Computertomographie und Konvertierung der Daten

Die Computertomographie ist während des Studiums der Werkstoffkunde und Oberflächentechnik Vorlesungsgegenstand und es erfolgte zudem ein Praxistag am Wallischmiller CT der Hochschule. Zu Projektbeginn erfolgten erste Messungen an Modellproben an diesem CT, durchgeführt vom Geräteverantwortlichen. Hier könnten erste Erfahrungen im Umgang mit der Computertomographie gesammelt werden. Der v|tome|x s 3D Mikro/Nanofokus-CT der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH wurde zu Beginn Juli 2007 installiert und im August 2008 in Betrieb genommen. Im Anschluss daran erfolgte eine erste Schulung zur Bedienung (20.08.07). Parallel dazu wurde unterschiedliche Software zur Weiterverarbeitung von CT-Daten untersucht. Während sich erste Aufnahmen relativ einfach durchführen lassen, kommt es bis über den Projektabschluss hinaus zu maßgeblichen Problemen bei den vorliegenden Modellproben.

Zur Konvertierung der Oberflächendaten in ein für die FEM lesbares Format wurde Software erprobt, wie sie für Rapid Prototyping benötigt wird. Lediglich Software-Lösungen aus diesem speziellen Bereich bieten derzeit die Funktionalität aus Iso-Surfaces, IGES oder STEP Daten zu generieren.

Im September wurden die ersten Stitching-Aufnahmen zur Vermessung einer ersten Modellprobe durchgeführt. Hierbei zeigen sich einige, sehr spezifische Probleme die eine Weiterverarbeitung der Daten erschweren, oder gar unmöglich machen.

Einige dieser Probleme bestehen bis zu heutigen Tag, und es konnte auch in Zusammenarbeit mit der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH bislang keine Lösung gefunden werden. Im Abschnitt Ergebnisse werden diese Probleme sowie dessen mögliche Ursachen und Folgen für das Stipendiumsprojekt beschrieben.

Ergebnisse

Um aus dem direkten Weg von einer CT-Aufnahme zu einer FEM Aufnahme zu kommen, sind mindestens drei Schritte notwendig:

1. Aufnahme der Probe mit dem CT (Volumengrafik)
2. Export der Oberflächen aus der Volumengrafik (STL -Surfaces)
3. Konvertierung der STL-Daten in ein von FEM-Software lesbares Format (IGES/STEP)

Anschließend können die Daten in einer FEM oder CAD Umgebung importiert werden. Derzeit existiert noch keine Software, die zwei oder sogar drei dieser Schritte kombiniert. Der erste Arbeitsschritt ist hierbei als der am kritischsten einzustufende Arbeitsschritt anzusehen. Die im Rahmen dieses Projektes vorrangig verwendete Software zur Darstellung und Bearbeitung von Volumengrafiken (Volume Graphics VGStudio Max 1.2) verfügt als einzige der evaluierten Software über die Funktion zum Oberflächenexport in das STL-Format. Als Kriterium zum erkennen einer Oberfläche die innerhalb der Software die Abweichung von einem definierten Grauwert. Dieser Oberflächenerkennungsalgorithmus erfordert eine sehr gute CT-Aufnahme. Artefakte in der CT-Aufnahme erzeugen Phantom-Oberflächen und können Abstürze der Software verursachen.

Bei den CT-Aufnahmen im Rahmen der Projektarbeit treten immer wieder derartige Probleme auf. Die wesentlichen Probleme sind:

- Ringartefakte (Durch die Rotation der Probe um die eigene Achse)
- Verzerrung des Volumens (Bedingt durch die Geometrie)
- Grauwertsprünge bei Stitching-Aufnahmen

Die sog. Ringartefakte kommen bei der Computertomographie immer vor. Die resultieren aus der Rotation der Probe um die eigene Achse. Bei den "normalen" Aufgabestellungen der Computertomographie stören diese Artefakte nicht. Bei der die automatisierten Bildanalyse, Beispielsweise zum Auffinden von Grenzflächen, stellen diese Artefakte sehr wohl ein Problem dar. Für dieses Problem existieren Grundsätzlich zwei Lösungen. Am elegantesten, jedoch sehr kostenintensiv ist eine hardwareseitige Lösung bei der der Röntgendetektor zwischen den einzelnen Aufnahmen geringfügig verschoben wird. Diese Verschiebung wird anschließend, bei der Volumenrekonstruktion wieder ausgeglichen. Die Hochschule Aalen ist derzeit mit der phoenix|x-ray Systems + Services GmbH in Kontakt, um so eine Funktion eventuell nachzurüsten. Innerhalb des Stipendiums-Projektes wurde das Problem mittels digitaler Bildbearbeitung gelöst. Allerdings wurde nicht die Filteralgorithmen der Software VGStudio MAX genutzt. Stattdessen wurden die einzelnen Projektionen mit der Open Source Software ImageJ mit einem Medianfilter gefiltert. Dadurch ließ sich der Einfluss durch die Ringartefakte auf nahezu null reduzieren.

Die Verzerrung der Geometrie ließ sich durch eine Anpassung der Röntgenparameter nahezu total eliminieren. Die drastischen Unterschiede in der Wandstärke des zu durchstrahlenden Volumens verursachen aber nach wie vor Schwierigkeiten bei der Untersuchung von Volumina mit großen unterschieden im Querschnitt.

Das größte, bislang ungelöste Problem in der vorliegenden Arbeit ist ebenfalls durch die Probengeometrie bedingt. Die Biegebruchstäbchen weisen ein ungünstiges Kantenverhältnis auf. Bei geringem Querschnitt sind die Proben sehr lang (3mm x 4mm x 50mm). Die Auflösung eines mittels CT gewonnen Volumens errechnet sich über geometrische Größen (siehe Abb.1).

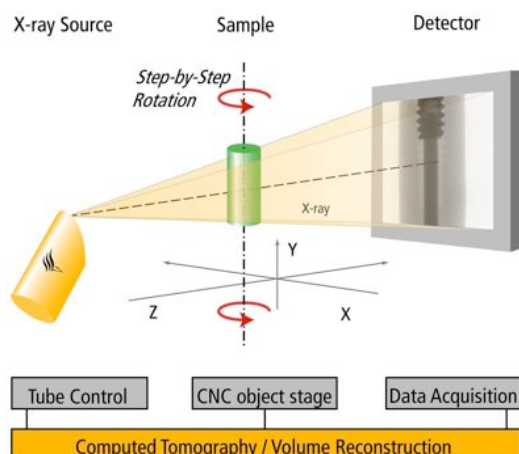


Abb.1a: Schematischer Aufbau eines Computertomographen (Quelle: phoenix|x-ray)

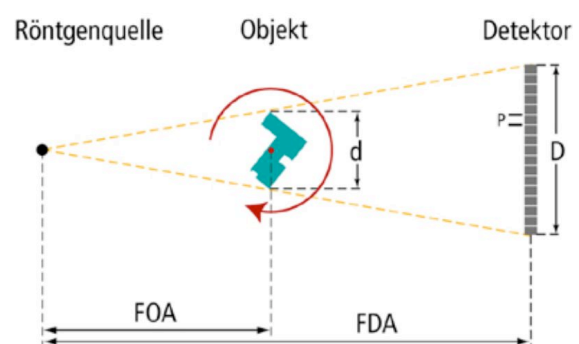


Abb.1a: Abhängigkeiten zwischen Objektgröße, Position und Vergrößerung bei der Computertomographie (Quelle: phoenix|x-ray)

Die Vergrößerung M kann über den Strahlensatz wie folgt berechnet werden:

$$M = s_{FOA} / s_{FDA}$$

(s_{FOA} = Distanz zw. Objekt u. Röntgenquelle)

(s_{FDA} = Distanz zw. Röntgenquelle u. -detektor)

Um die komplette Probe mit einer Aufnahme zu erfassen, müsste die Probe im Stahlgang des CT sehr nahe an der Detektorfläche und weit entfernt von der Röntgenquelle positioniert werden. Die so erreichte Vergrößerung würde nicht genügen, um die Poren, mit denen die Modellprobe versehen wurde in ausreichender Auflösung darzustellen. Um das komplette Volumen in ausreichender Auflösung zu erhalten, wird ein sog. Stitching durchgeführt. Hierbei werden zunächst Teilbereiche der Probe aufgenommen und anschließend zusammengefügt. Diese Vorgehensweise ist durchaus üblich und bereitete am Wallischmiller CT der HTW-Aalen auch keine Probleme. Bei Aufnahmen mit dem v|tome|x s besitzen in den Teilaufnahmen der Modellproben unterschiedliche Grauwerte. Beim zusammensetzen der Proben äußert sich das durch einen Grauwertsprung an der "Naht" der beiden Teilaufnahmen. Dieser Grauwertsprung führte bei der Bearbeitung des Projektes immer wieder zu Abstürzen oder immensen Rechenzeiten mit unbrauchbaren Ergebnissen durch die Software VGStudio MAX. Der erfolgreiche Export einer Stitching-Aufnahme war bedauerlicherweise bis zu letzt nicht möglich. Die Herstellerfirma des Computertomographen phoenix|x-ray Systems + Services GmbH hat momentan noch keine Erklärung zu diesen Graustufensprüngen. phoenix|x-ray und die HTW-Aalen versuchen derzeit das Problem zu lösen.

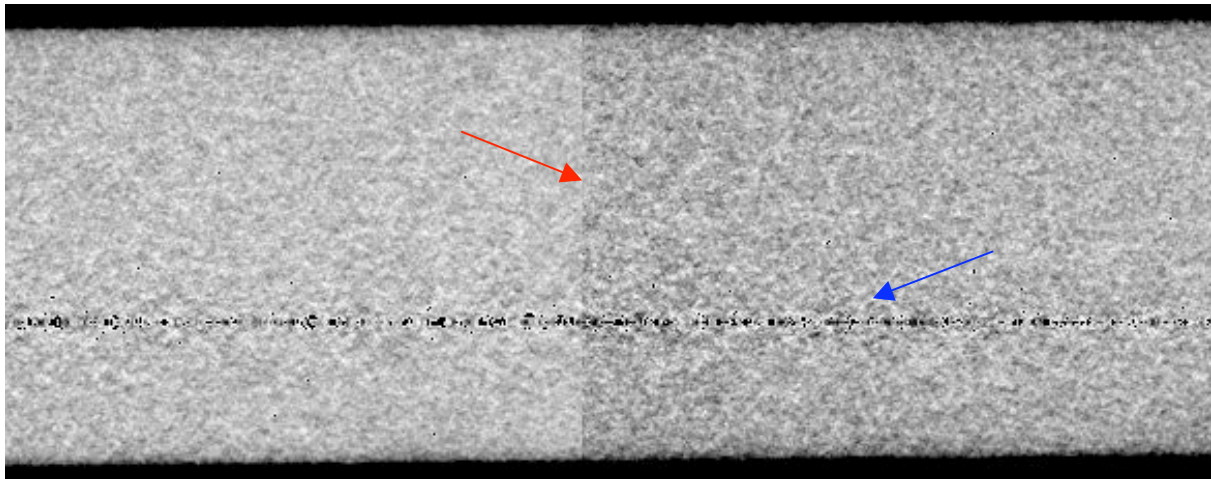


Abb.2: Schnitt durch eine Stitching-Aufnahme. An der Naht ist der Grauwertsprung zu erkennen (roter Pfeil). Auf der Rotationsachse der Probe sind Fehler durch Ringartefakte zu erkennen (blauer Pfeil).

Der Export und die Weiterbearbeitung von Teilvolumina ließen sich mit der Software VGStudio MAX problemlos realisieren. Der STL Datensatz kann mit beliebigen STL-Viewern betrachtet werden. Um aus diesem Datensatz ein von FEM oder CAD Programmen lesbares Format zu erzeugen, kommt nur speziell für solche Aufgaben zugeschnittene Software in Frage. Es wird eine Software benötigt, welche aus einer STL-Oberfläche in Form eines Mesh in eine Fläche im IGES oder STEP Format rekonstruiert. Bei der Bearbeitung des Stipendiumsprojekts kommt hierbei die Software Rapidform (XOS2) zum Einsatz. Normalerweise wird diese Software eingesetzt um die Daten von 3D-Scannern CAD-Software zugänglich zu machen. Die Firma Rapidform hat sich auf Anwendungen aus dem Gebiet Rapid Prototyping und Reverse Engineering spezialisiert. Software von Rapidform wird bereits für derartige Anwendungen an der Hochschule Aalen genutzt (z.B. Stereolithographie).

Die so erzeugten Daten im IGES- oder STEP-Format konnten mit der FEM-Software (ABAQUS CAE) importiert werden. Die Qualität der CT-Aufnahmen zeigt an dieser Stelle noch einmal deutlich ihren Einfluss. Oberflächen die durch das CT-Volumen nur unzureichend, oder mit Fehler wiedergegeben werden oder etwaige Artefakte können nur mit sehr viel Aufwand manuell vernetzt werden und verfälschen die Ergebnisse der FEM-Rechnung signifikant. Eine automatische Vernetzung ist unter Umständen nicht mehr möglich während eine manuelle unverhältnismäßig viel Zeit in Anspruch nehmen würde. Im schlechtesten Fall können keine Simulationen mit dem Volumen durchgeführt werden.

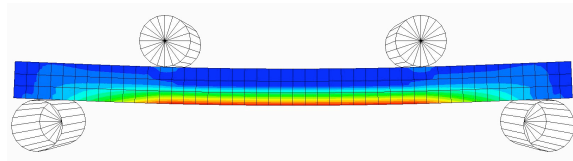


Abb.3a: Ideale Biegebruchprobe von der Seite betrachtet. Rot = maximale Hauptnormalspannung (Mises)

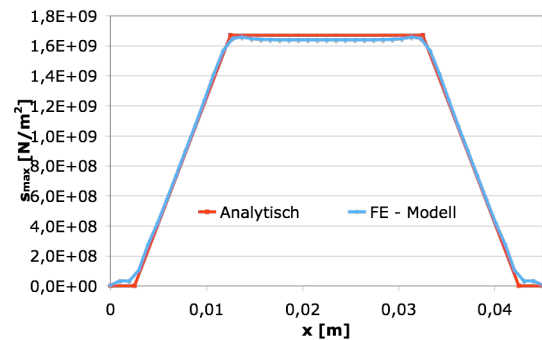


Abb.3b: Vergleich der analytisch und mittels FEM berechneten Hauptnormalspannung (Mises) an der Zugseite der idealen Biegebruchprobe

Die Überprüfung der qualitativen Aussagefähigkeit des FEM-Modells einer mit keinem Fehler behafteten, idealen Probe (Abb.3a) und der nachmodellierten Probe mit Fehler (Abb.4) hat die Aussagefähigkeit einer solchen Simulation bestätigt. Einige Fehlerpotentiale konnten eliminiert werden und Einflüsse der Vernetzung wurden sichtbar. Für die mit keinem Fehler behaftete Probe könnte mit geringem Rechenaufwand ein sehr genaues Ergebnis erzielt werden (Abb.3b). Das einer realen Probe nachempfundene Modell zeigt erste Probleme der FEM auf. Als wichtigste Erkenntnis ist hierbei festzuhalten, dass sich komplizierte, aus einem realen Bauteil gewonnene, Geometrien innerhalb der Software ABAQUS nur mit TET-Elementen automatisch vernetzen lassen. Diese Elemente liefern im Gegensatz zu den übrigen Elementtypen Ergebnisse die mit einem größeren Fehler behaftet sind. Die Qualität einer FEM-Simulation hängt maßgeblich von der Qualität der Vernetzung ab und eben diese gestaltet sich bei realen Geometrien sehr schwierig und stellt den zeit- und arbeitsintensivsten Teil der Simulationsarbeit dar.

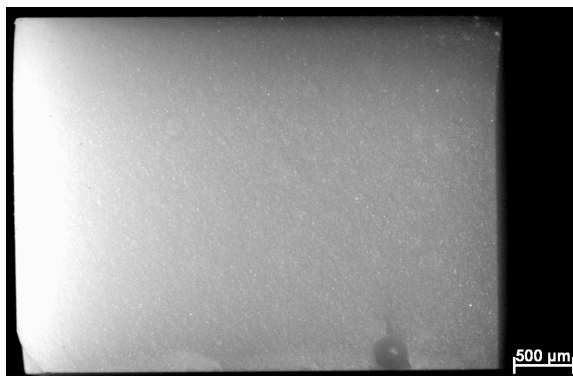


Abb.4a: Lichtmikroskopische Aufnahme einer gebrochenen Probe mit Pore

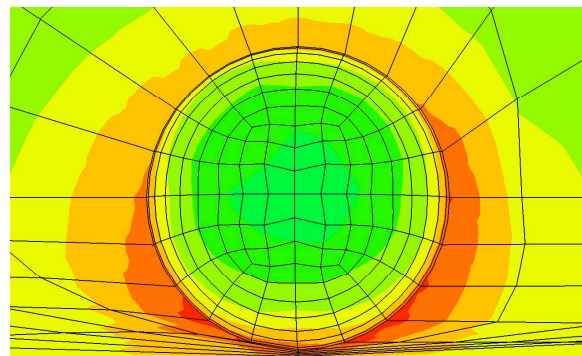


Abb.4b: Simulation der Spannungsverteilung zum Zeitpunkt des Bruchs. Rot = max. Hauptnormalspannung (Mises)

Kosten

Bei der zur Bearbeitung des Projektes verwendeten Software, handelt es sich fast durchweg um sehr teure Spezialanwendungen. Die Kosten für Einzelplatzlizenzen der Software VGStudio MAX oder Rapidform XOS2 liegen jeweils bei ca. 10.000 €. Um diese Kosten zu vermeiden, kamen zu Bearbeitung des Projekts zum einen, Open Source Software zum Einsatz (OsiriX, ImageJ, STL-Viewer) zum anderen wurden Software eingesetzt die an der Hochschule bereits vorhanden ist. In einigen Fällen wurden Evaluations-Versionen bei den Unternehmen angefordert (VGStudio MAX, Rhinoceros, Rapidform XOS2). Hier zeigten sich

die Softwareanbieter weitestgehend hilfreich, indem sie Evaluations-Versionen anboten, die entweder zeitlich oder hinsichtlich der Summe an Speichervorgängen limitiert waren. Funktionelle Einschränkungen mussten hier nicht in Kauf genommen werden. Die Studentenlizenz der Software ABAQUS hingegen weist große Einschränkungen hinsichtlich der Funktionalität auf. So können hier nur Modellen mit maximal 100 Konten erzeugt werden. Aus diesem Grund wurde vom Kauf der aktuellen Version abgesehen.

Ausblick

Das Projekt hat gezeigt, dass es grundsätzlich möglich ist, aus den hochauflösenden Computertomographiedaten v|tome|x s 3D Mikro/Nanofokus-CT, FEM-Modelle zu erzeugen. Es wird deutlich, wie wichtig dabei eine artefaktfreie Aufnahme des Objektes ist, wo die Grenzen bei diesem Vorgehen liegen und welcher Aufwand dazu getrieben werden muss.

Wie bereits Eingang erwähnt, erfordert der Umgang mit der Computertomographie sehr viel Erfahrung. Die für anspruchsvollere Aufgaben, wie die den Oberflächenexport oder digitale Bildanalyse notwendigen Kompetenzen müssen in weiteren Arbeiten tiefergehend erarbeitet werden. Hierzu laufen derzeit intern mit dem Studiengang Mechatronik und Maschinenbau unter Mithilfe von Studenten und in Zusammenarbeit mit phoenix|x-ray einige Projekte an der HTW-Aalen.

Mit zunehmender Qualität der CT-Aufnahmen lassen sich der zeitliche Aufwand und der Bedarf an Rechenleistung beim Oberflächenexport drastisch reduzieren. Diese zwei Faktoren stehen dem momentanen Einsatz dieses Verfahrens noch entgegen. Mit zunehmender Erfahrung auf diesem Gebiet und den kontinuierlichen Anstieg der Leistungsfähigkeit der digitalen Datenverarbeitung wird ein derartiges Vorgehen in den nächsten Jahren, gerade für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben an Bedeutung gewinnen wird.