

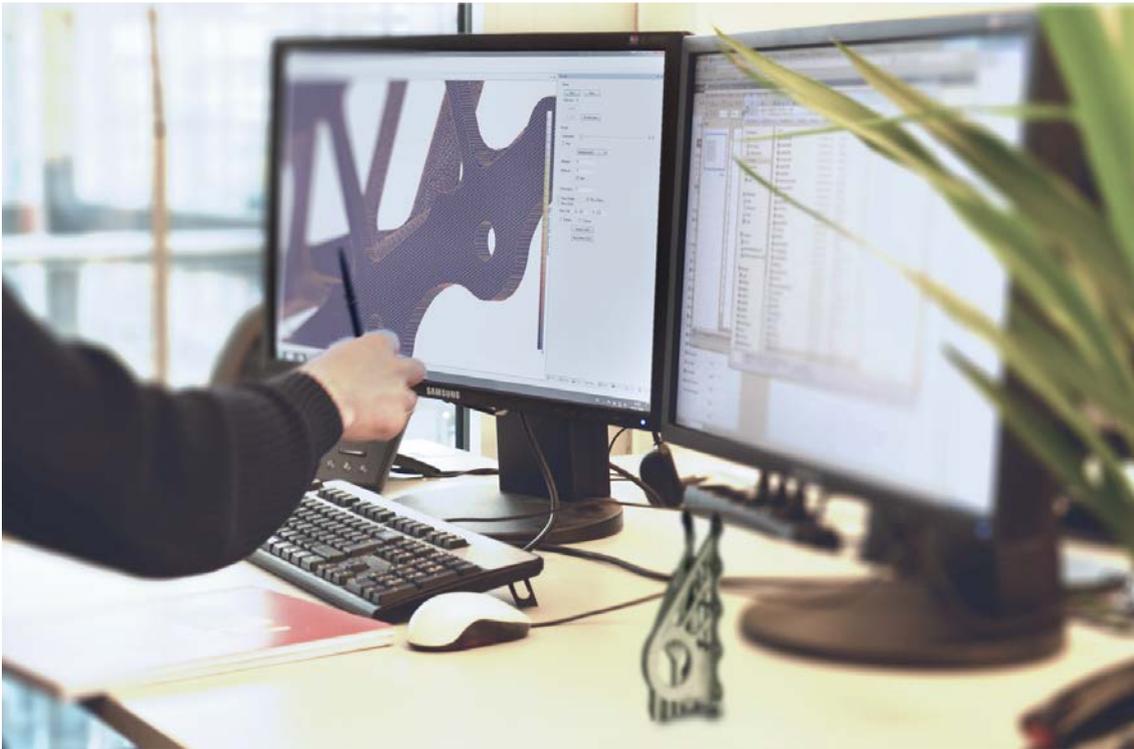
FP 29 AM

3D Druck Prozesssimulation – Verzug eines additiv gefertigten Bauteils aus Metall

Betreuer:

Christian Kober,
Oliver Illies,
Jan-Patrick Jürgens

Bremen, den 5. April 2017



Termine und Zeiten

Dauer: ca. 30 min Vorbesprechung
ca. 20 min Einführung in die
verwendeten Programme
ca. 5 Std Durchführung

Beginn: 10 Uhr (st)

Ort: BCCMS / ISEMP (TAB-Gebäude)

Ansprechpartner

Christian Kober, kober@isemp.de,
Tel.: 218 62327, TAB-Gebäude, Raum 3.40

Jan-Patrick Jürgens, juergens@isemp.de,
Tel.: 218 62320, TAB-Gebäude, Raum 3.28



Inhalt

Inhalt	1
Einleitung	3
1.1 Abstract	3
1.2 Motivation und Zielsetzung	3
Theoretischer Hintergrund	5
2.1 Laser Beam Melting Verfahren	5
2.2 Materialverhalten	6
2.2.1 Plastizität	6
2.2.2 Eigenspannung und Verzug	7
2.3 Mechanisches Prozessäquivalent	8
Aufgabenstellung	11
3.1 Aufgaben	11
3.1.1 Kalibrierung des Simulationsmodells (optional)	11
3.1.2 Simulation von industrierelevanten Bauteilen	11
Durchführung	13
4.1 AMWorks	13
4.1.1 Importieren von .stl-Dateien	13
4.1.2 Slicen und Vernetzen	14
4.1.3 Betrachten und Speichern des zu simulierenden Netzes	15
4.1.4 Starten der Simulation	16
4.1.5 Weitere Tipps zur Verwendung von AMWorks:	20
4.2 Makroskop	21
4.2.1 Bedienung und Vorbereitung der Vermessung	21
4.2.2 Vermessung	24
4.2.3 Exportieren der Ergebnisse	29
4.3 GOM Inspect	30
4.3.1 Importieren von .stl-Dateien	30

4.3.2	Importieren von .stp-Dateien	32
4.3.3	Vergleich der Modelle	33
4.3.4	Auswertung	38
4.3.5	Dokumentation der Ergebnisse	49
	Auswertung	53
5.1	Eigenspannungen und Bauteilverzug	53
5.2	3D Vermessung	53
5.3	Simulationsmethode	54
	Anhang	55
6.1	Stichpunkte zum Vorbereiten	55
6.2	Literatur	55



Einleitung

1.1 Abstract

Das Praktikum vermittelt aktuelle Grundlagen der Simulationspraxis des 3D Drucks am Beispiel eines additiv gefertigten Metallbauteils. Mit der Methode der finiten Elemente (FEM) werden charakteristische Verzugerscheinungen auf der Meso- / Makroskala in einem "virtuellen Experiment" untersucht. Ziel ist es einen Überblick über den generativen Prozess und problematisches Werkstoffverhalten zu erlangen.

In dem Versuch soll der additive Fertigungsprozess eines 3D gedruckten Bauteils aus Metall mechanisch simuliert, und u. a. Eigenspannungen und Verzug in Abhängigkeit von verschiedenen Aufbaurichtungen ermittelt werden. Die Prozesssimulation soll anhand von einfachen Kantilever-Proben kalibriert werden. Zum Vergleich der Simulationsergebnisse mit real gebauten Bauteilen sollen verschiedene Proben im 3D Scanner (Makroskop) vermessen werden. Abschließend soll eine Verzugarme Aufbaustrategie ermittelt und beschrieben werden.

1.2 Motivation und Zielsetzung

Die schichtweise Generierung metallischer Bauteile durch das Laserstrahlschmelzverfahren, engl. Laser Beam Melting (LBM), ist eine der zukunftsweisenden Technologien des 21. Jahrhunderts. Aufgrund der hohen Konstruktionsfreiheit lassen sich einfach Bauteile generieren, die sich mit klassischen Herstellungsverfahren nicht, oder nur schwierig herstellen lassen. Dies führt zu vielfältigen Einsatzmöglichkeiten gedruckter Bauteile u. a. im Werkzeugbau, Medizin- und Dentaltechnik, in der Automobilbranche sowie der Luft- und Raumfahrt.

Eine grundlegende Herausforderung beim Laserstrahlschmelzen von Metallen ist die Entwicklung von Eigenspannungen. Durch die Aneinanderreihung von zahlreichen Schweißnähten im Prozess und die dadurch entstehenden mechanischen Belastungen, weicht das Resultat oft von dem gewünschten Ergebnis ab. Aufgrund der hohen thermischen Dehnungen während der Fertigung kommt es zur plastischen Verformung im generierten Bauteil, welche die Ursache für Schweiß eigenspannungen sind.

Dies kann zu unterschiedlichen Problemen während des Prozesses wie Rissbildung, Verzug und Prozessabbrüchen oder zu schlechteren mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Ermüdungsfestigkeit führen. Da der Prozess in Bezug auf die wechselwirkenden Parameter sehr komplex und die Durchführung von experimentellen Untersuchungen sehr teuer ist, ist die numerische Simulation zu einem wichtigen Instrument geworden, um Eigenspannungen und deren Auswirkungen auf den Bauteilverzug zu analysieren.

Ziel ist es die Simulationsparameter mittels einfacher Probengeometrien zu kalibrieren, Prozesseigenspannungen sowie resultierende Bauteilverzüge verschiedener Bauteile vorherzusagen und u. a. Prozessparameter wie eine geeignete Aufbaurichtung zu bestimmen.



Theoretischer Hintergrund

Es gibt zahlreiche 3D Druck Verfahren, die sich nach verwendetem Material (z. B. Kunststoff, Metalle oder Keramiken) oder der Werkstoffbeschaffenheit des Ausgangsmaterials (u. a. Pulver- oder Drahtbasiert) sowie der Strahlquelle (z. B. Laser- oder Elektronenstrahl) unterscheiden: SLM, PBF, DMLS, etc. Eine Übersicht der Verfahren ist der Literatur zu entnehmen [1]. Dieser Versuch behandelt den LBM-Prozess (Laser Beam Melting) stellvertretend für die metallischen pulverbasierten Prozesse.

2.1 Laser Beam Melting Verfahren

Mit einem Schieber, Rakel oder ähnlichem wird eine neue Pulverschicht aus einer Pulverkammer auf dem Pulverbett verteilt, welche ein Laser so belichtet, dass die Form des entsprechenden Querschnitts des zu generierenden Werkstücks erwärmt wird. Die in die Pulverschicht eindringende Laserstrahlung bewirkt dabei ein Aufschmelzen der Pulverpartikel im Bereich des Laserfokus. Beim Erstarren verbinden sich diese mit der Bauplattform bzw. den zuvor aufgebauten Schichten. Dies wird so lange wiederholt, bis am Ende das fertige Bauteil entsprechend der CAD-Geometrie vorliegt. Das restliche, nicht aufgeschmolzene Pulver kann dann entfernt und teilweise für den nächsten Bauprozess aufbereitet und wiederverwendet werden [2].

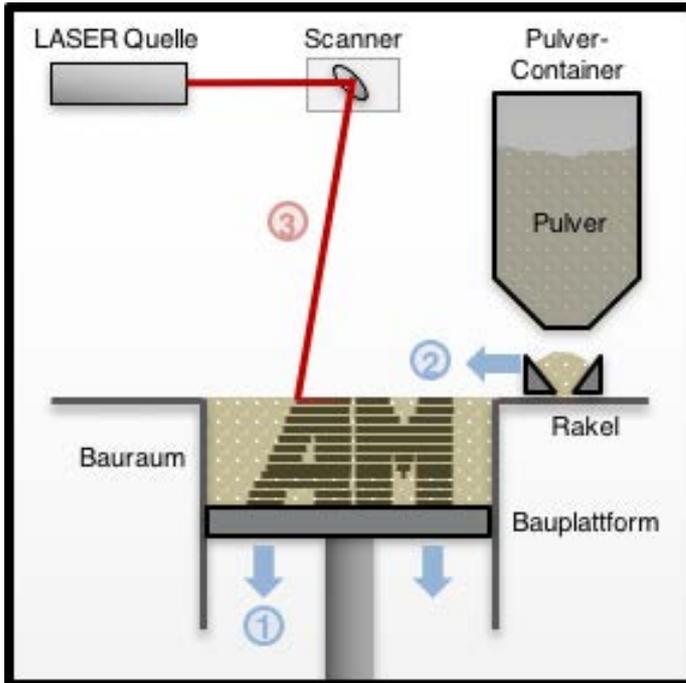


Abbildung 1: Schematische Darstellung des LBM-Verfahrens. Zu Beginn jeder Schicht wird die Bauplattform um genau eine Schichthöhe abgesenkt. (2) Mit Hilfe eines Schiebers oder Rakel wird das Pulver aus der Pulverkammer auf die tiefer liegende Baukammer übertragen. (3) Ein Scanner-System lenkt den Laserstrahl entsprechend des zu belichtenden Bauteilquerschnitts ab, sodass dieser Bereich aufgeschmolzen wird. (4) Abschließend kühlt der aufgeschmolzene Bereich ab, erstarrt und die neue Schicht ist vollständig mit dem zuvor aufgebauten Bauteil verbunden.

Da der LBM-Prozess schichtbasiert ist, muss die Bauteilgeometrie inklusive notwendiger Stützstellen (diese dienen sowohl zur mechanischen Fixierung als auch zur Wärmeabfuhr) als erstes in einen Stapel zweidimensionaler Schichten zerlegt werden. Das übliche Dateiformat für die generative Fertigung ist das Standard Triangulation Language Format (STL), in welchem fast ausschließlich die Oberfläche des Objektes in Form von Dreiecken beschrieben wird.

2.2 Materialverhalten

2.2.1 Plastizität

Das Verhalten realer Festkörper ist im Allgemeinen nicht rein elastisch. Bei zu starker Verformung eines Körpers durch eine Last entstehen irreversible Dehnungen, welche sich vom belasteten zum freien Zustand nicht weiter verändern. In dem Modell der idealen Plastizität wird angenommen, dass ab einem bestimmten Grenzwert keine weiteren elastischen Dehnungen entstehen und sämtliche weitere Verformung plastische Dehnung verursacht. Die Gesamtdeh-

nung setzt sich dann aus dem elastischen und einem plastischen Anteil zusammen.

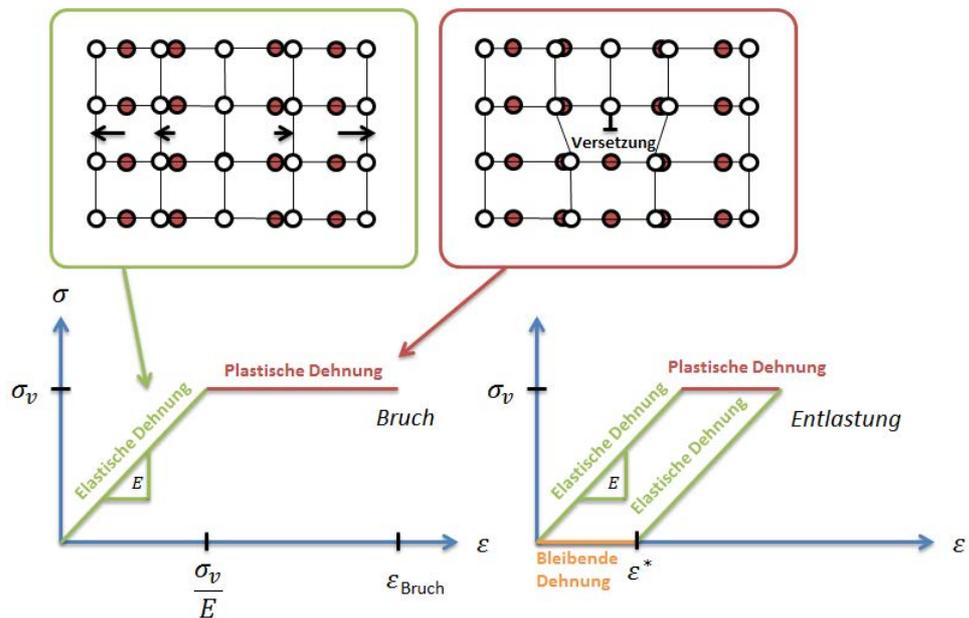


Abbildung 2: Darstellung eines exemplarischen Spannungs-Dehnungs-Diagramms für ein ideal-elasto-plastisches Materialmodell und beispielhafte Darstellung der Atomgitter im Festkörper: reversible Verzerrung des Gitters (weiß) von der ursprünglichen Gitterposition (rot) im elastischen Bereich und irreversible Bewegung von Versetzungen durch den Festkörper im plastischen Bereich.

2.2.2 Eigenspannung und Verzug

Bei thermischen Fügeprozessen wie Schweißen ist die thermische Beanspruchung des Materials häufig sehr hoch. Durch die Unterschiede in den Materialeigenschaften bei verschiedenen Temperaturen führt ein inhomogenes Temperaturfeld bzw. Temperaturgradienten zu Eigenspannung in der Wärmeinflusszone (WEZ, engl. heat-affected zone, HAZ).

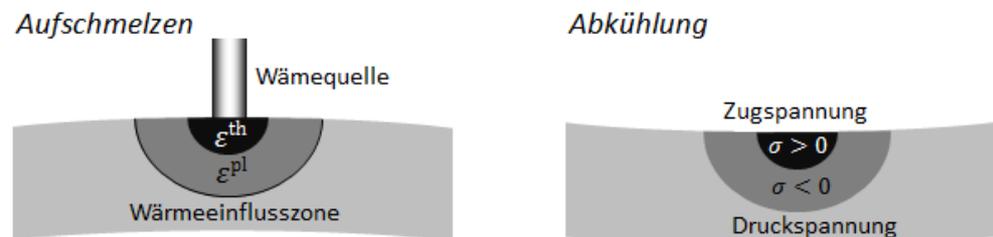


Abbildung 3: Schematische Darstellung des „Temperature Gradient Effect“.

Tabelle 1: Materialkennwerte.

Material		1.4404	Ti64
Elastizitätsmodul	E [GPa]	200	110
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	α [$10^{-6}/^{\circ}\text{C}$]	16	8,6
Dichte	ρ [g/cm^3]	8,0	4,4

2.3 Mechanisches Prozessäquivalent

Die numerische Berechnung thermo-mechanischer Vorgänge führt je nach Komplexität des Simulations- und Materialmodells zu extrem hohen Rechenzeiten.

Um eine Vorhersage des Endverzugs machen zu können, müssen die Resteigenspannung nach Prozessende bekannt sein, die dann durch die Entfernung der Randbedingungen oder Geometrieänderung relaxieren können und zur Enddeformation führen. Im Gegensatz zur aufwändigen Prozesssimulation zur Ermittlung der Resteigenspannung ist hierfür nur ein einzelner rein mechanisch-elastischer Rechenschritt erforderlich. Aufgrund der Schweißprozesseigenschaft, dass die Dehnungssituation in jedem Querschnitt der Schweißnaht aufgrund ähnlicher Temperaturhistorie nahezu gleich ist, so fern dieser weit genug von Rand entfernt ist, kann die „Methode der bleibenden Dehnungen“ (engl. inherent strain) angewandt werden. Dieser Methode liegt die Annahme zugrunde, dass die bleibenden Dehnungen die Ursache für residuale Schweißspannungen sind.

Unter der Annahme eines elasto-plastischen Materialmodells sind für den Dehnungsanteil aus viskoplastischen Vorgängen keine Kriechdehnung vorhanden ($\epsilon^{cr} = 0$), sodass sich die Gleichung schreiben lässt als

$$\vec{\epsilon} = \vec{\epsilon}^{el} + \vec{\epsilon}^{pl} + \vec{\epsilon}^{th} =: \vec{\epsilon}^*$$

wobei ϵ^* die bleibende oder inhärente Dehnung bezeichnet, welche sich hier aus thermischer und plastischer Dehnung zusammensetzt. Ist das Vektorfeld der inhärenten Dehnungen $\epsilon^* = \epsilon^*(\vec{r})$ bekannt, kann die Eigenspannungssituation ermittelt werden. Hierbei ist die bleibende Dehnung als Kraft-Randbedingung zu verstehen, auf welche das System (entsprechend dem Hooke'schen Gesetz) mit der Steifigkeitsmatrix C reagiert.

$$\vec{\sigma} = C \vec{\epsilon}^{el} = C \vec{\epsilon}^*$$

Als Reaktion auf diese Einwirkung ergibt sich eine Verteilung $\vec{\varepsilon}(\vec{r})$ bzw. $\vec{\sigma}(\vec{r})$, welche durch Veränderung der Geometrie oder Randbedingungen zum Endverzug führt.

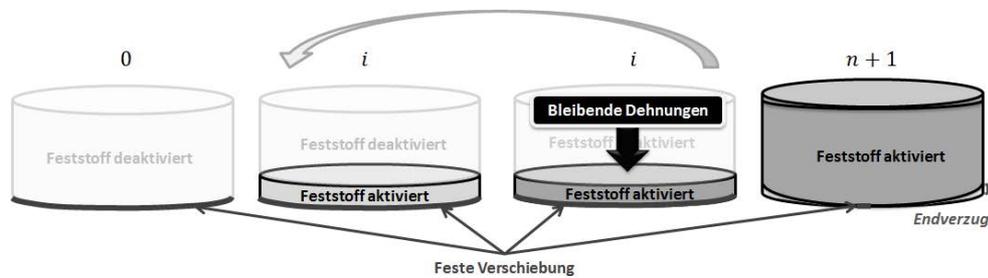


Abbildung 4: Schematische Darstellung des mechanischen Schicht-Simulationsmodells: In eine neu aufgetragene Schicht werden die bleibenden Dehnungen eingebracht.

Für die Anwendung der Methode der bleibenden Dehnungen im Schicht-Simulationsmodell soll für jede Schicht auf Basis der Scanstrategie eine Verteilung von Dehnungen definiert werden. Diese Verteilung kann als eine Volumenkraft verstanden werden, welche repräsentativ für das mechanische Verhalten der jeweiligen Schicht ist. Dieses Tensorfeld wird als „Mechanisches Schicht- oder Prozess-äquivalent“ bezeichnet.



Aufgabenstellung

3.1 Aufgaben

Grundsätzlich ist die Reihenfolge der Abarbeitung der Teilaufgaben (Simulation, Messung) freigestellt. Es empfiehlt sich allerdings eine längere Berechnung zu starten und währenddessen die Vermessung der Proben vorzunehmen.

3.1.1 Kalibrierung des Simulationsmodells (optional)

- Simulation von Kantilever Proben
- Scannen von Probengeometrien
- Kalibrieren des mechanischen Schichtäquivalents

Da das Simulationsmodell Material- und FE-Netzabhängige Ergebnisse liefern kann soll ein passendes mechanisches Schichtäquivalent über vorhandene Kantilever Proben ermittelt werden, sodass der Endverzug zwischen Simulation und Messung übereinstimmt.

3.1.2 Simulation von industrierelevanten Bauteilen

- Verzugssimulation von Bauteilen mit verschiedenen Prozessparametern
- Scannen von Metallbauteilen
- Vergleich der Messergebnisse mit Computersimulationen

Mit einem am Bauteil validierten Simulationsmodell soll eine Verbesserung einfacher Prozessparameter vorgenommen werden. Welche Ausrichtung und Scanstrategie ist für das Bauteil empfehlenswert?



Durchführung

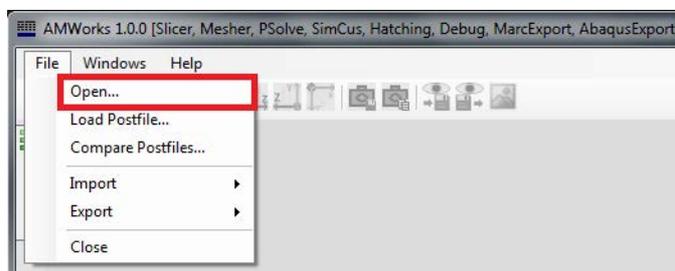
Bitte beachten: Die Abbildungen in der Durchführung entsprechen nicht zwingenderweise den einzustellenden Werten sondern dienen lediglich zum Zurechtfinden in den Applikationen! Bitte lesen sie die Anleitung aufmerksam durch!

4.1 AMWorks

AMWorks ist ein Programm zur Durchführung von Simulationen von Bauteilen bei der generativen Fertigung. Es arbeitet mit der Finite-Elemente-Methode (Grundlagen hierzu werden ausführlich in der Literatur erläutert [3]).

4.1.1 Importieren von .stl-Dateien

Zunächst muss AMWorks gestartet werden. Im sich nun öffnenden Fenster kann per Doppelklick auf die graue Fläche, oder per *File > Open*, ein CAD-Modell geladen werden:



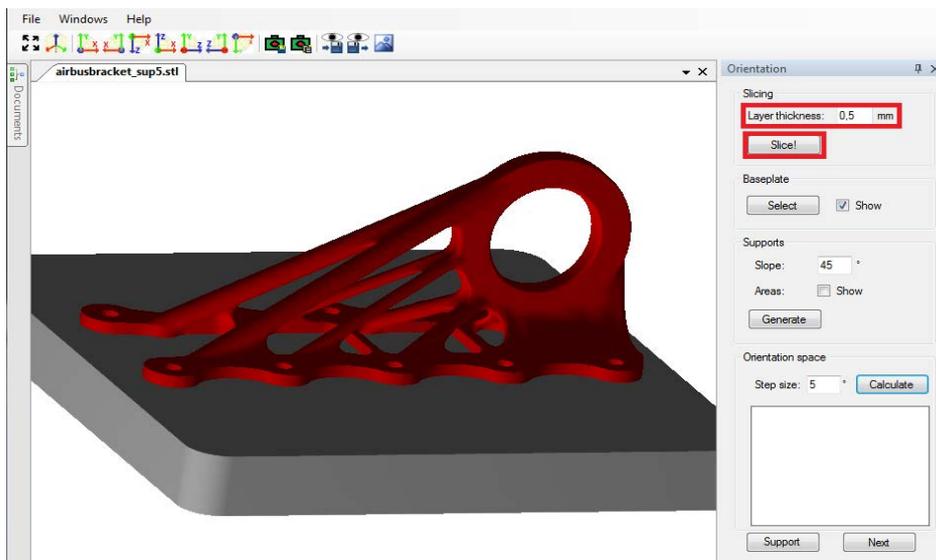
Die Supportstrukturen können, wenn vorhanden, mitgeladen werden.

4.1.2 Slicen und Vernetzen

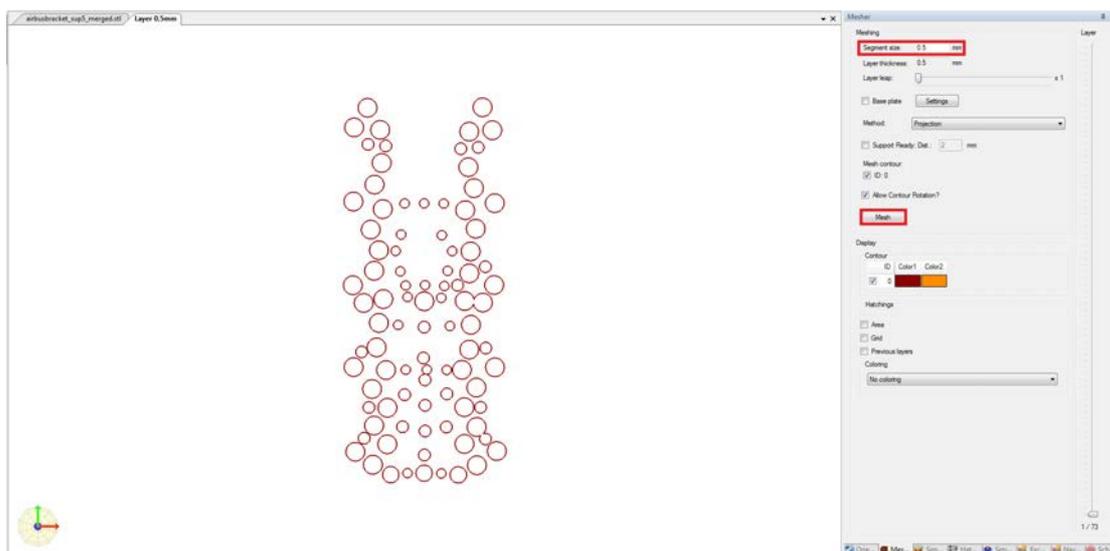
Um eine Simulation der generativen Herstellung des Bauteils durchzuführen, muss das Modell als erstes in finite Elemente unterteilt werden. Die Höhe der einzelnen Elemente, und damit die Schichtdicke, kann als *layer thickness* eingetragen werden.

Bestätigt wird mit einem Klick auf „Slice!“:

Das „Slicen“ ist ein für den wirklichen Prozess notwendiger Schritt. Bei der generativen Fertigung sind Schichtdicken von 25µm bis 60µm üblich. Das bedeutet, bei einer layer thickness von 0,2mm fassen wir drei bis sechs Schichten in einem Simulationsschritt zusammen.



Um ein vollständiges Gitter („Mesh“) zu erzeugen, muss auch die Größe der Segmente in x- und y-Richtung angegeben werden. Dazu muss unter *Segment size* die gewünschte Segmentgröße eingetragen werden. Das Gitter wird dann per Klick auf „Mesh“ erzeugt:

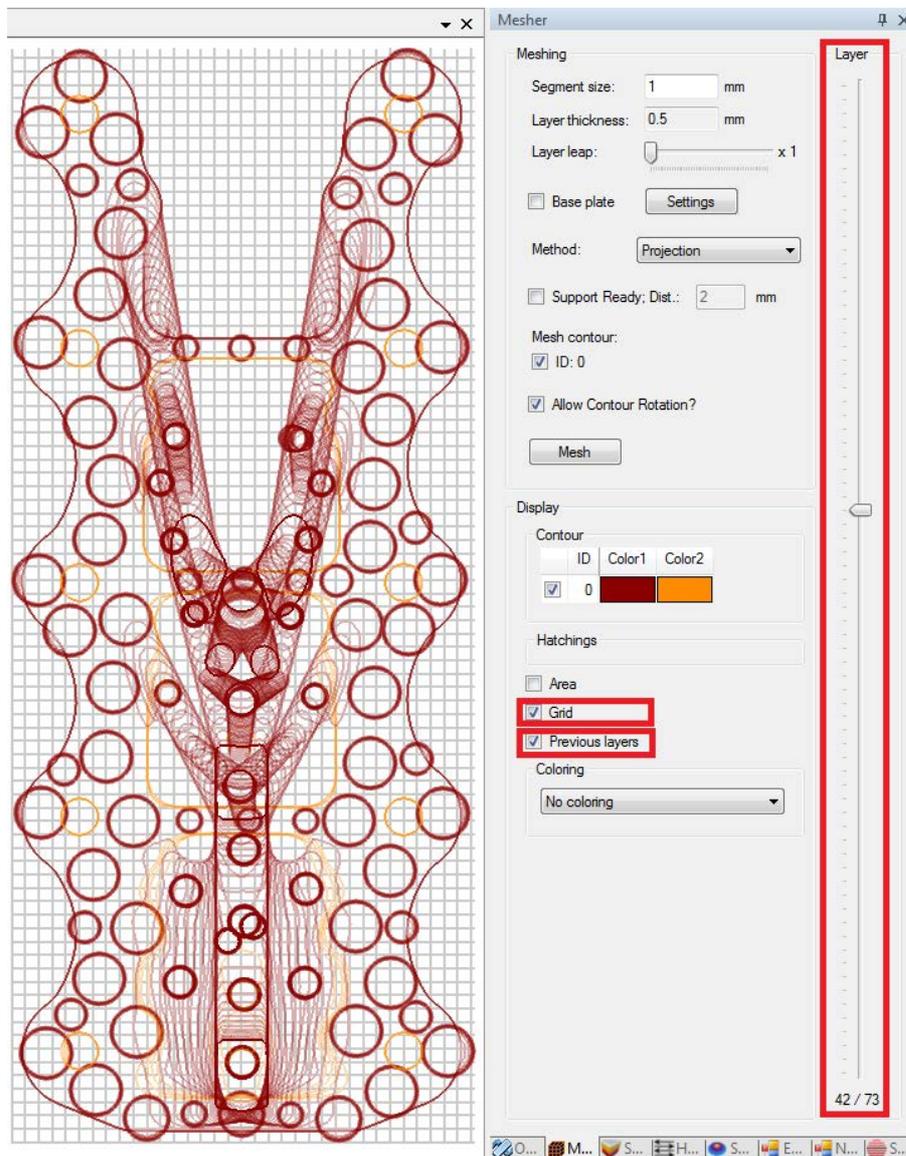


4.1.3 Betrachten und Speichern des zu simulierenden Netzes

Um abzuschätzen, ob die gewählte Netzdichte möglicherweise zu grob oder zu fein eingestellt ist, kann man das erstellte Netz näher betrachten. Dazu bietet AMWorks einige Funktionen. Zunächst kann per Klick auf die verschiedenen Reiter der Bildschirminhalt gewechselt werden:



Im *Layer*-Fenster lässt sich beispielsweise mit einem Häkchen bei *Grid* ein Gitter mit der gewählten Segmentgröße anzeigen, *Previous Layers* blendet alle Schichten ein, die unter der rechts per Schieberegler ausgewählten Schicht liegen:



AMWorks bietet die Möglichkeit, eine Betrachtungsperspektive zu speichern und später wieder zu laden, um beispielsweise den Verzug vor und nach einer Simulation in einem interessanten Bereich vergleichen zu können. Dies ist möglich per Klick auf *Save View*, bzw. *Load View* im oberen Bildschirmbereich:

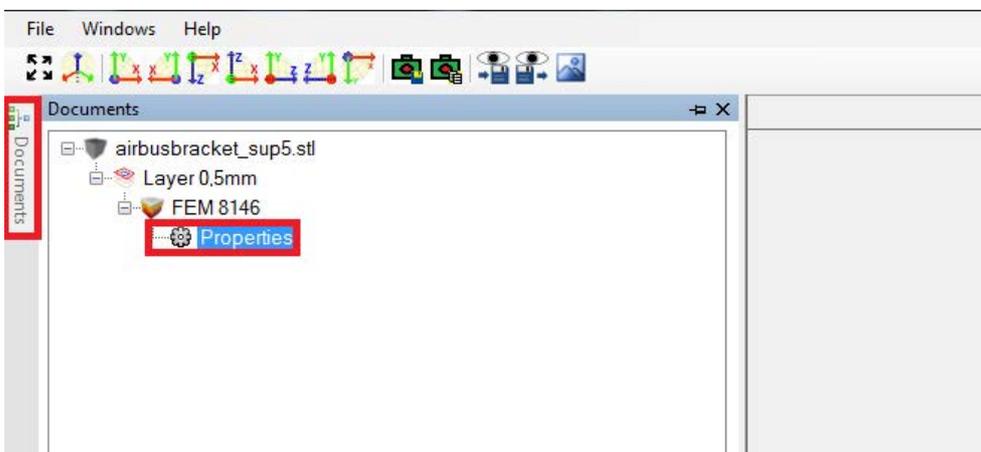


Möchte man den sichtbaren Bildausschnitt exportieren, lässt er sich entweder per Klick auf *Screenshot to File* als Datei, oder per Klick auf *Screenshot to Clipboard* in die Systemzwischenablage speichern:

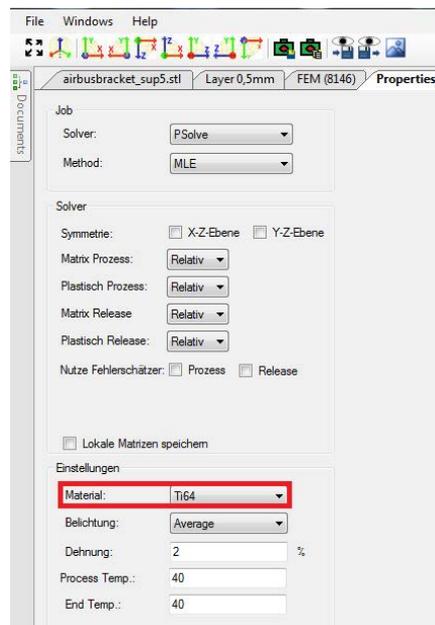


4.1.4 Starten der Simulation

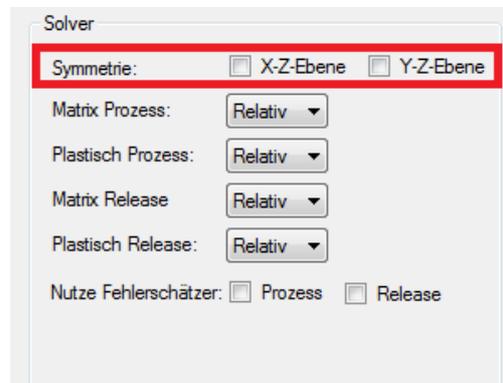
Nun muss AMWorks noch mitgeteilt werden, aus welchem Material das Bauteil besteht. Hierzu öffnet man per Linksklick auf *Documents* und Doppelklick auf *Properties* die Einstellungen. Damit sich der *Documents*-Reiter schließt, muss einmal rechts ins graue Feld linksgeklickt werden.



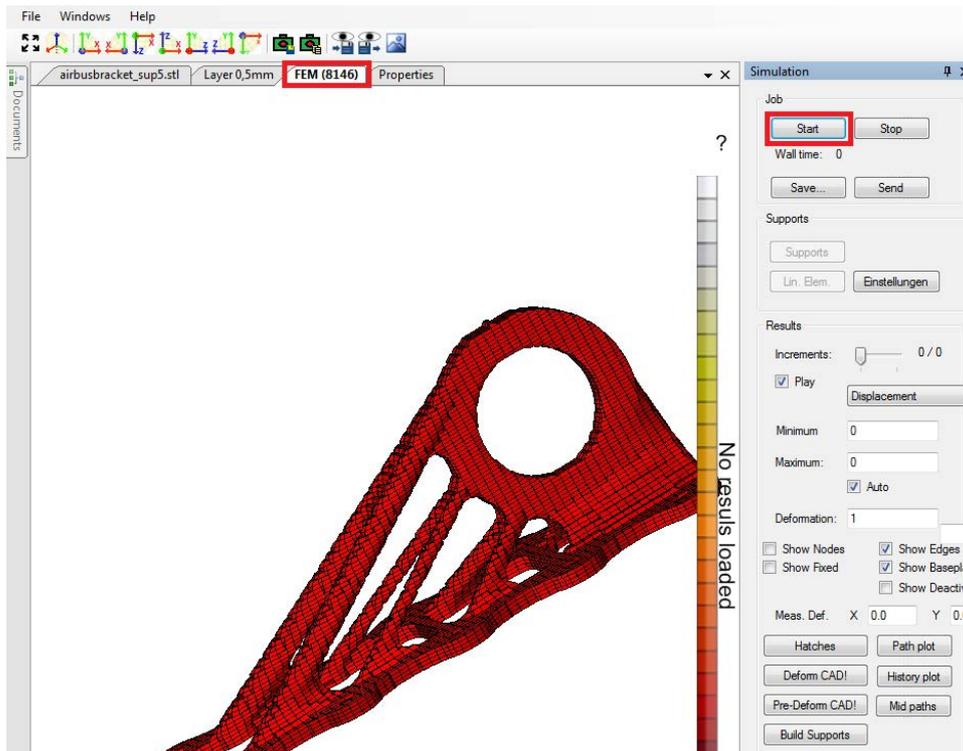
Nun kann das verwendete Material ausgewählt werden, wir verwenden hier Titan:



Wenn das verwendete CAD-Modell nur die Hälfte eines symmetrischen Körpers darstellt, kann hier auch die Symmetrieebene eingegeben werden. Sofern die Symmetrieebene exakt parallel zur x-z-Ebene oder y-z-Ebene liegt, muss nur betreffender Haken gesetzt und nichts weiter beachtet werden:

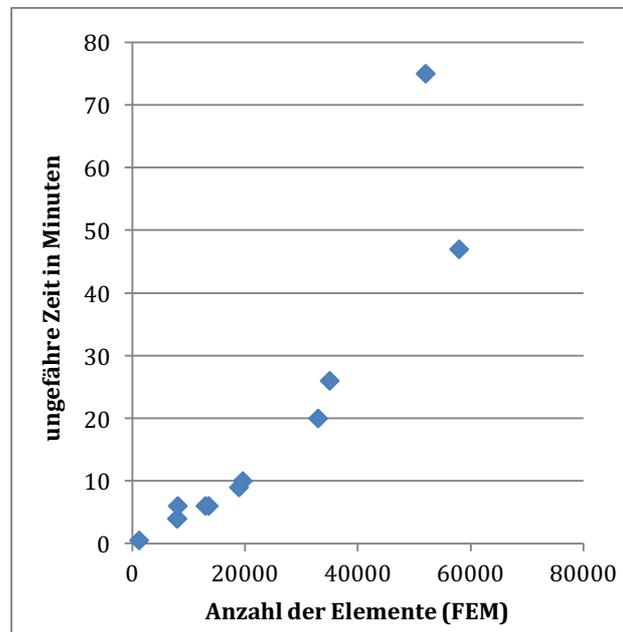


Die für die Simulation benötigte Zeit hängt von der Anzahl der ertellten Knoten ab, welche sich i.d.R. etwa linear zur Anzahl Elemente verhält. Um zu prüfen wie viele Elemente erzeugt wurden, genügt ein Blick auf den Mesh-Reiter. Die Zahl in Klammern entspricht der Anzahl der finiten Elemente:



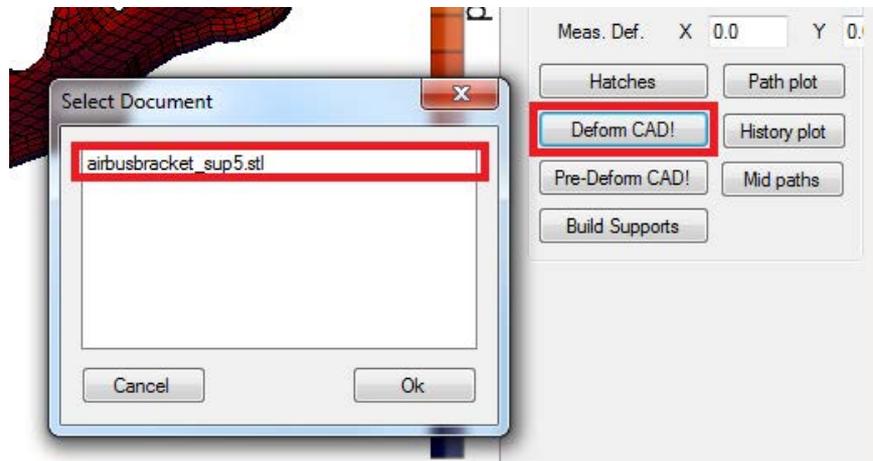
Ist man sich sicher, dass diese Anzahl an Elementen in annehmbarer Zeit simuliert werden kann, startet ein Klick auf „Start“ die Simulation.

Die benötigte Zeit hängt neben der Anzahl der Elemente stark von der verwendeten Hardware, der Anzahl anderer laufender Prozesse etc. ab. Deshalb ist es sinnvoll, zunächst mit einem groben Netz (weniger als 10000 Elemente) die benötigte Zeit relativ zur Beispielkurve der Maschine „Student 04“ (rechts) zu betrachten, um dann anhand des Verlaufs der Kurve grob abschätzen zu können, wieviel Zeit eine Simulation mit mehr Elementen brauchen könnte.

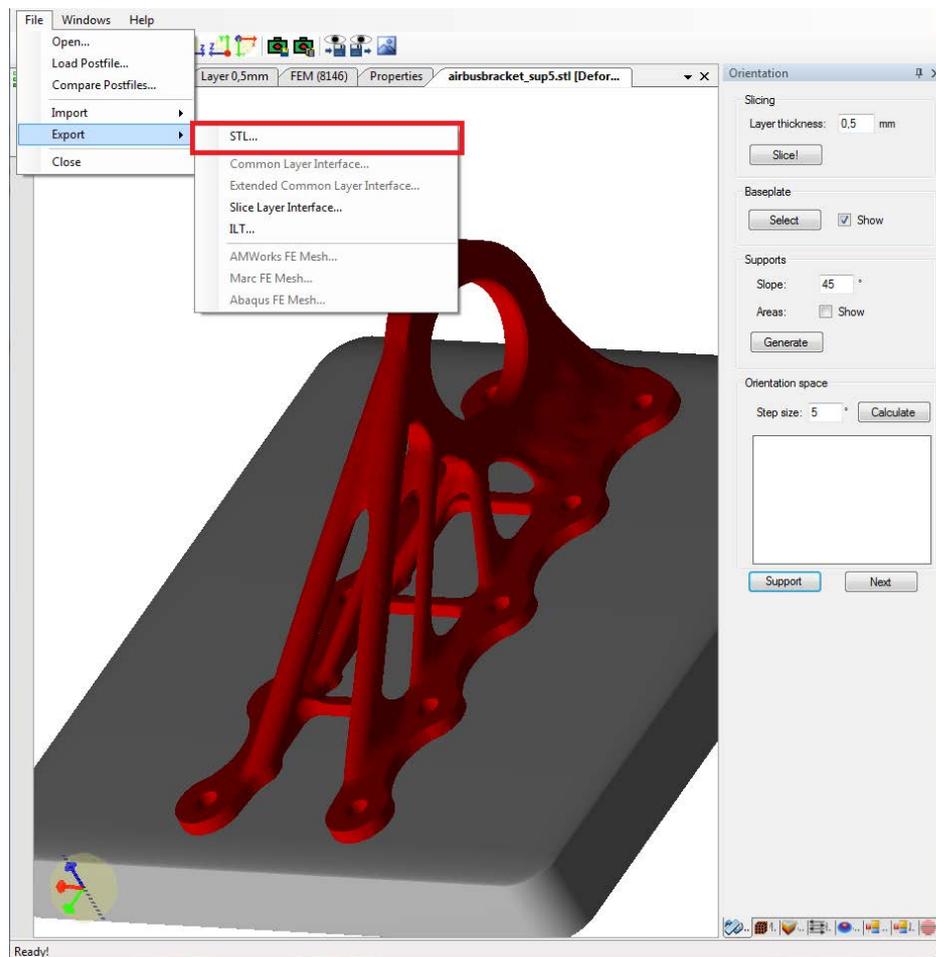


Der Fortschrittsbalken im unteren Bildschirmbereich ist nur bedingt zur Abschätzung der weiteren Rechenzeit geeignet, da die letzten paar Prozent sehr viel mehr Zeit in Anspruch nehmen, als die vorigen, da in diesem Bereich das Abtrennen von der (virtuellen) Basisplatte simuliert wird.

Das Ergebnis der Simulation kann nun genutzt werden, um das Modell des Bauteils zu verformen. Dazu klickt man zunächst auf „Deform CAD!“ und wählt die verwendete .stl-Datei aus:

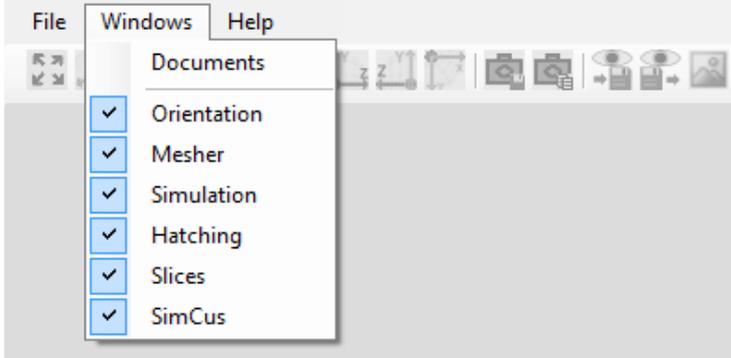


AMWorks erzeugt daraufhin ein CAD-Modell des verformten Bauteils, welches per Klick auf *File > Export > STL...* benannt und zur weiteren Bearbeitung in einen gewünschten Ordner exportiert werden kann:



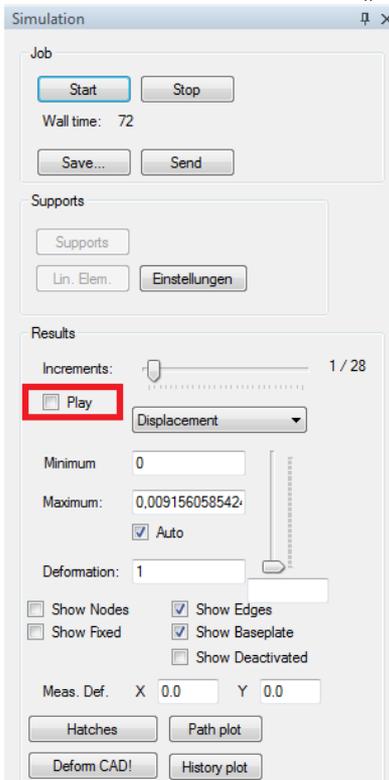
4.1.5 Weitere Tipps zur Verwendung von AMWorks:

Sollte einer der verwendeten Reiter wie *Documents* oder *Properties* nicht mehr sichtbar sein, lässt es sich per Klick auf *Windows* wieder sichtbar machen:



Sollte die Arbeit in AMWorks unterbrochen werden, kann die beim Starten der Simulation erzeugte .amp-Datei einfach per *File > Load Post-file* geladen werden. Zu beachten ist, dass für eine korrekte Darstellung einmal der Schieberegler „*Increments*“ bewegt werden muss.

Es kann passieren, dass AMWorks bei kürzeren Simulationen eine Fehlermeldung „*AMWorks funktioniert nicht mehr*“ produziert. In diesem Fall ist es notwendig, AMWorks neu zu starten und vor dem Starten der Simulation den Haken bei „*Play*“ zu entfernen:

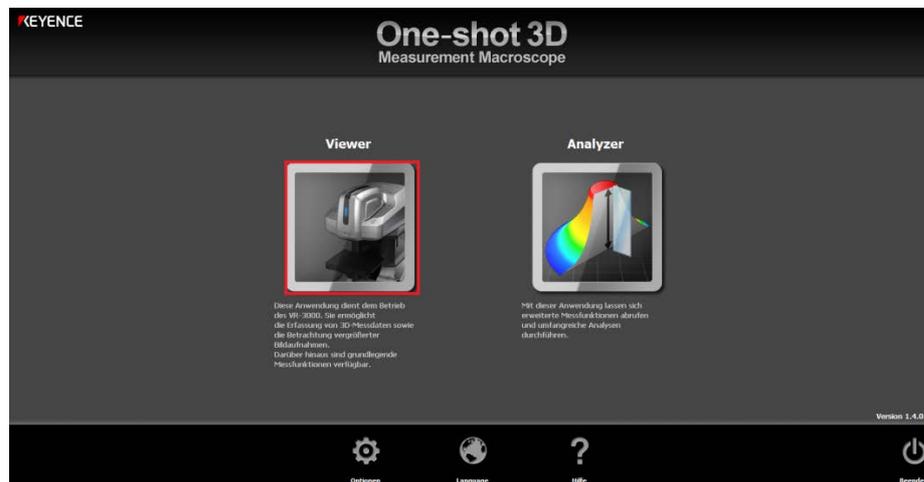


4.2 Makroskop

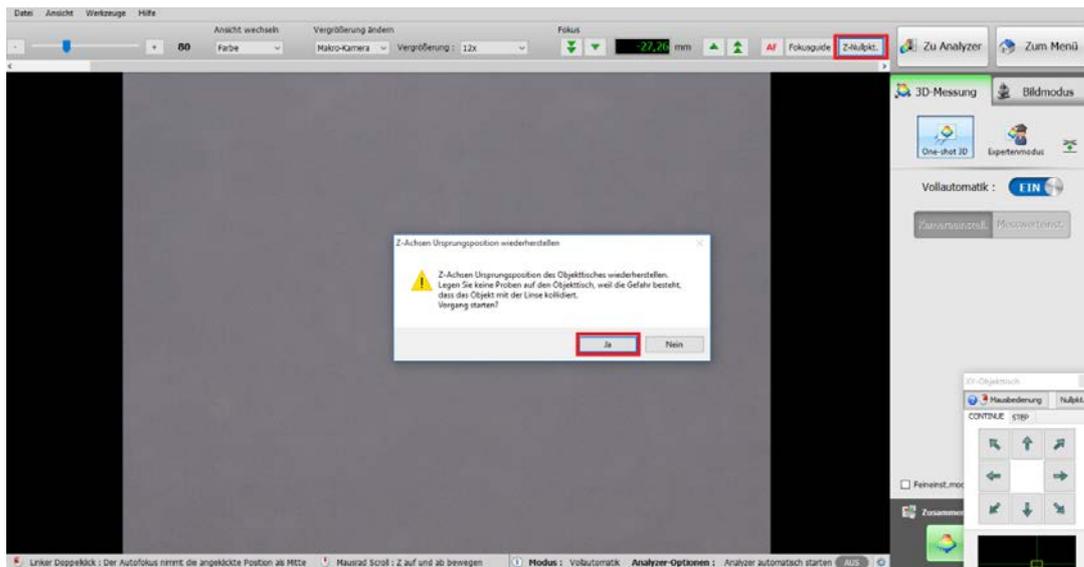
Zum Vermessen von dreidimensionalen Objekten ist das Makroskop VR-3200 der Firma KEYENCE vorhanden.

4.2.1 Bedienung und Vorbereitung der Vermessung

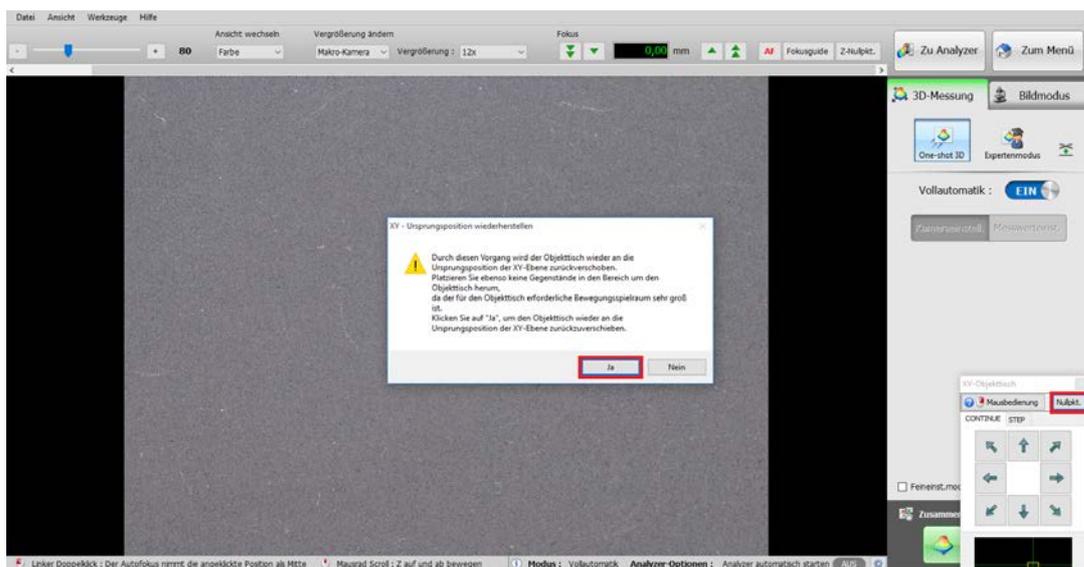
Zunächst muss das Makroskop durch Drücken des Ein-/Ausschalters an der oberen Vorderseite des Gerätes eingeschaltet werden. Nach dem Verbinden des Makroskops mit dem Laptop per USB-Schnittstelle startet die *VR-3000 Serie Software* automatisch. Falls nicht kann sie einfach per Doppelklick auf das gleichnamige Icon auf dem Desktop manuell gestartet werden. Im sich öffnenden Fenster lässt sich die Aufnahme-Software per Klick auf das *Viewer*-Bild öffnen:



Nun muss der Objektisch in die Ursprungsposition versetzt werden. Sollte das Programm dies beim Start von selbst anbieten, kann mit Klick auf *Ja* bestätigt werden. Ansonsten muss die Ursprungsausrichtung manuell durchgeführt werden. Dazu klickt man auf *Z-Nullpkt.* und bestätigt mit Klick auf *Ja*:

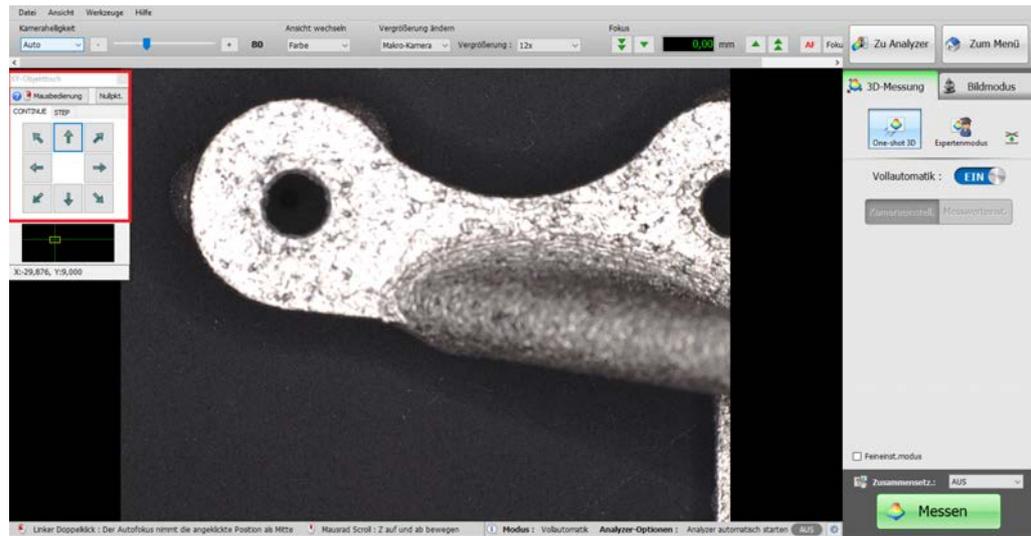


Um den Objektisch in der XY-Ebene in die Ursprungsposition zu versetzen, klickt man im Fenster des XY-Objektisches auf *Nullpkt.* und bestätigt im sich öffnenden Fenster mit Klick auf *Ja*:

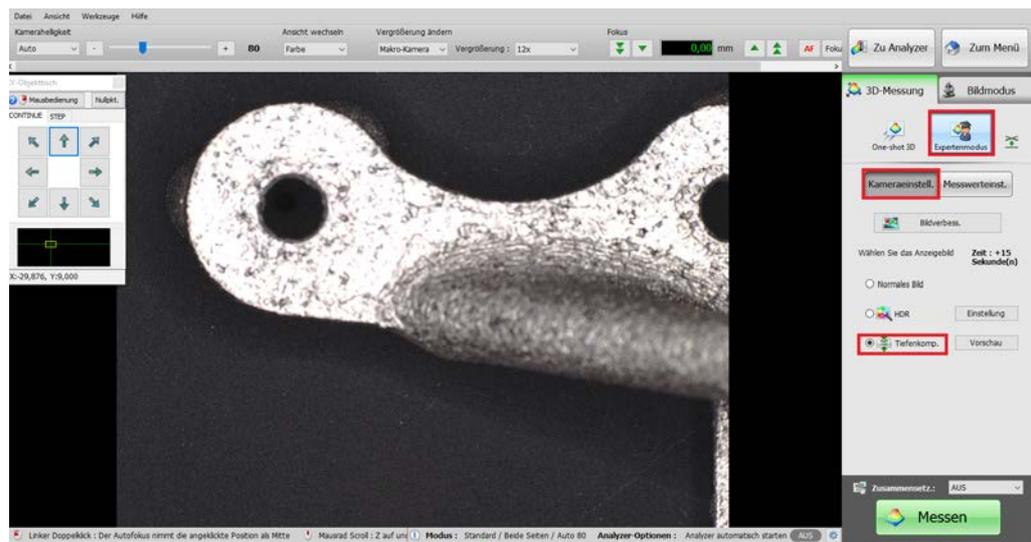


Nun kann das Bauteil längs oder quer auf dem Objektisch platziert werden. Theoretisch sind auch alle anderen Ausrichtungen möglich; diese sind nur weniger zeiteffizient.

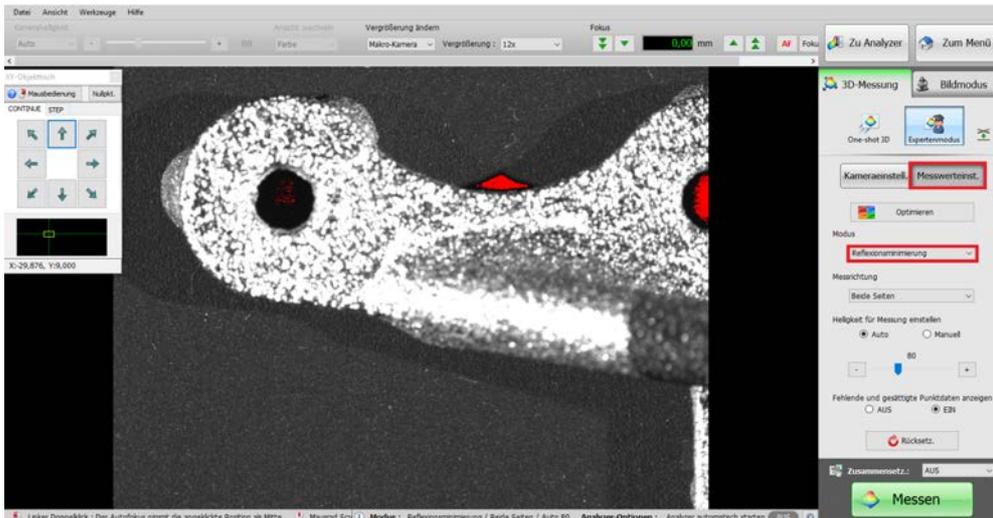
Ist das Bauteil platziert, kann der Objektisch mit dem Bauteil per Klick auf die Pfeile im XY-Objektisch-Fenster so gesteuert werden, dass ein gewünschter Ausschnitt des Bauteils auf dem Monitor zu sehen ist:



Das Fenster zur Steuerung des Objektisches ist frei verschiebbar.
Um die Aufnahmeeigenschaften zu verbessern, muss im *Expertenmodus* unter *Kameraeinstell.* die Option *Tiefenkomposition* ausgewählt werden:



Außerdem muss im Reiter *Messwerteinst.* der Modus *Reflexionsminimierung* ausgewählt werden:



Bei schlechten Messergebnissen kann es sich lohnen, diese beiden Einstellungen zu variieren. Dies ist in der Regel allerdings nicht erforderlich.

4.2.2 Vermessung

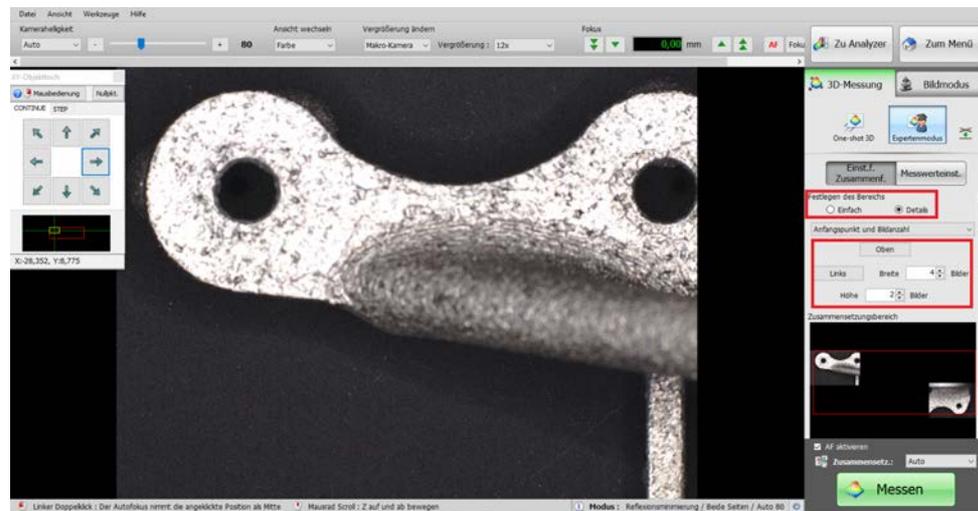
Nachdem der Autofokus (AF) aktiviert wurde, muss dem Programm der gesamte Messbereich übermittelt werden. Hierzu wählt man als Zusammensetzungsverfahren *Auto* an. Per Klick auf *Hinzufügen* wird der aktuelle Bildausschnitt zum Messbereich hinzugefügt:

Um den kompletten Messbereich zu definieren, muss nun die gegenüberliegende Ecke des Bauteils angesteuert werden und als Bildausschnitt groß zu sehen sein. Ein Klick auf *Hinzufügen* zeigt den gewählten Ausschnitt im Zusammensetzungsbereichsfenster:

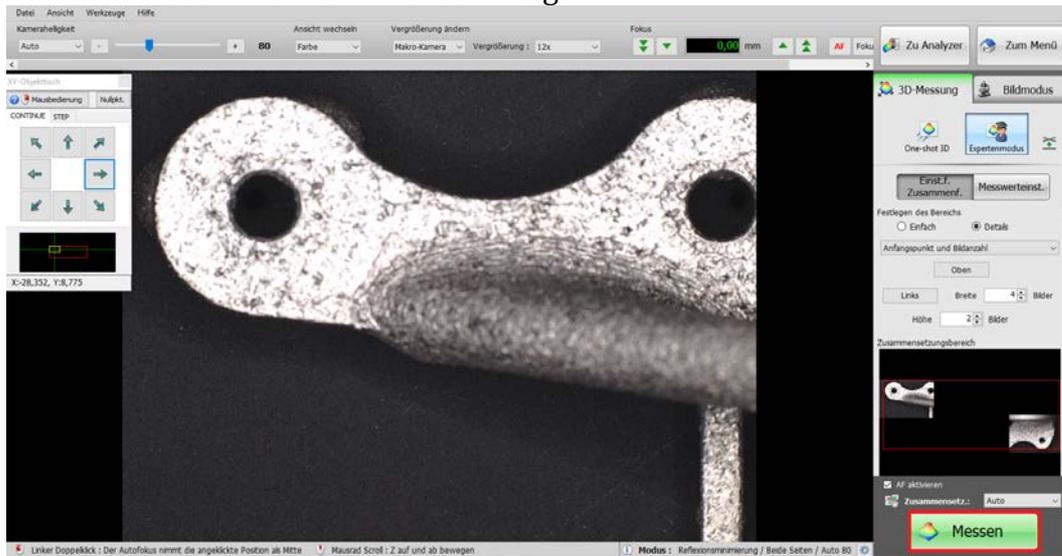




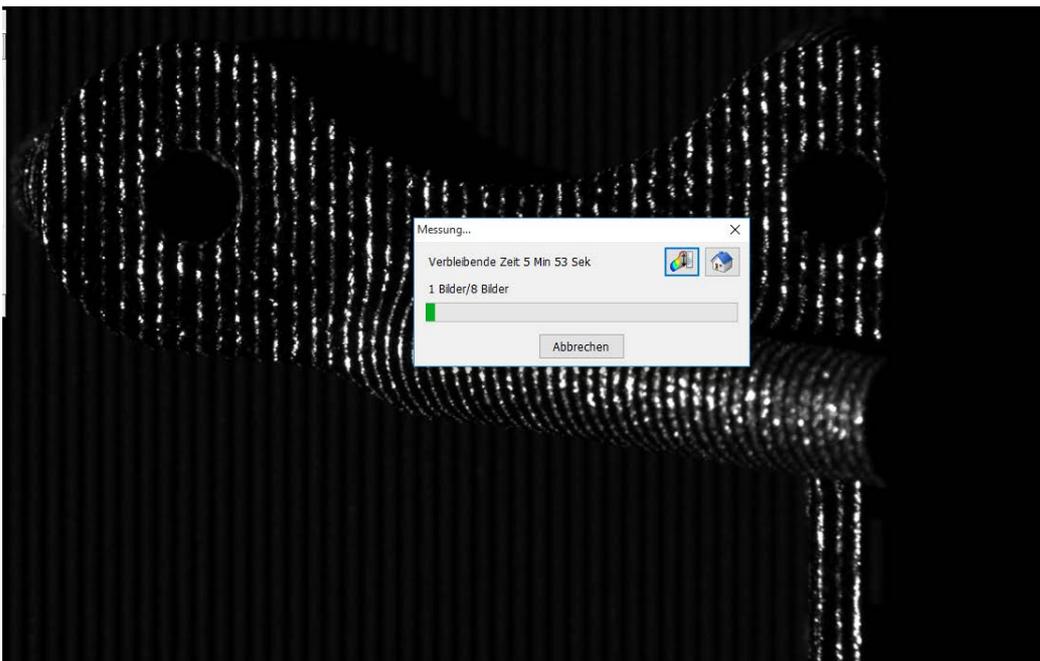
Um nicht jeden Bildausschnitt manuell hinzufügen zu müssen, kann unter *Festlegen des Bereichs* die Option *Details* ausgewählt werden. Nun lassen sich die obere und die linke Kante des angezeigten Bildausschnittes per Klick auf *Oben* oder *Links* zur oberen bzw. linken Kante des Messbereichs machen. Für die Höhe und Breite müssen Werte eingegeben werden, bei denen der rote Kasten im Zusammensetzungsbereich das gesamte Bauteil umschließt:



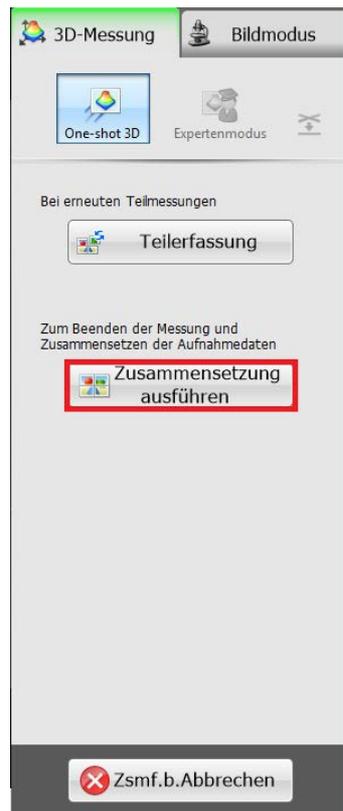
Ein Klick auf *Messen* startet die Messung:



Nun sollte die Messung starten und die geschätzte verbleibende Zeit angezeigt werden:



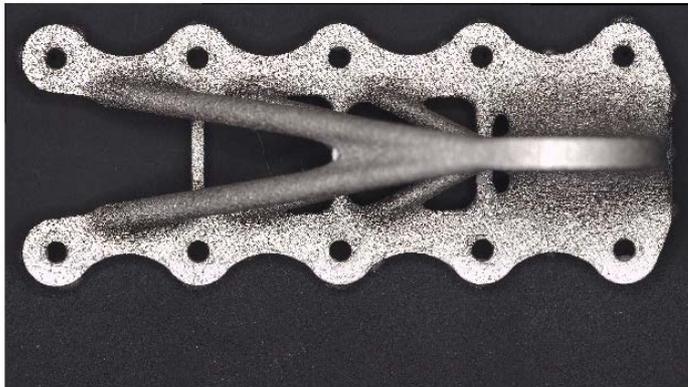
Sobald die Messung durchgelaufen ist, öffnet sich die Analysesoftware, falls nicht kann sie manuell geöffnet werden, indem in der Viewer Software auf Zusammensetzung ausführen geklickt wird:



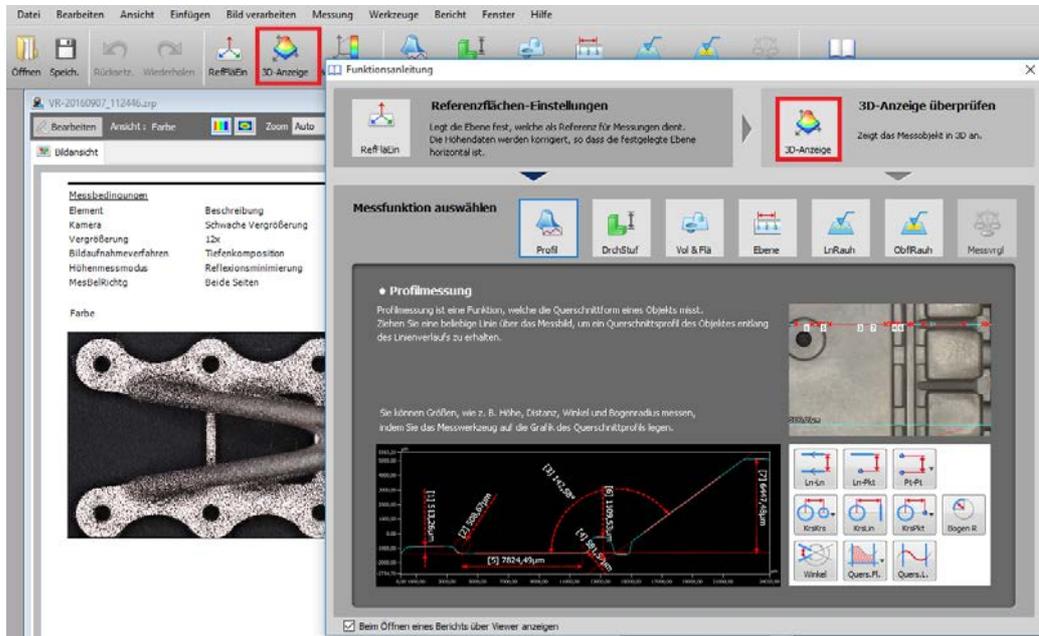
In der Analyse-Software sollte zunächst überprüft werden, ob mit korrekten Einstellungen für Bildaufnahmeverfahren (Tiefenkomposition) und Höhenmessmodus (Reflexionsminimierung) vermessen wurde. Falls nicht, muss die Messung wiederholt werden:

Messbedingungen	
Element	Beschreibung
Kamera	Schwache Vergrößerung
Vergrößerung	12x
Bildaufnahmeverfahren	Normal (1 Element)
Höhenmessmodus	Standard
MesBelRichtg	Beide Seiten

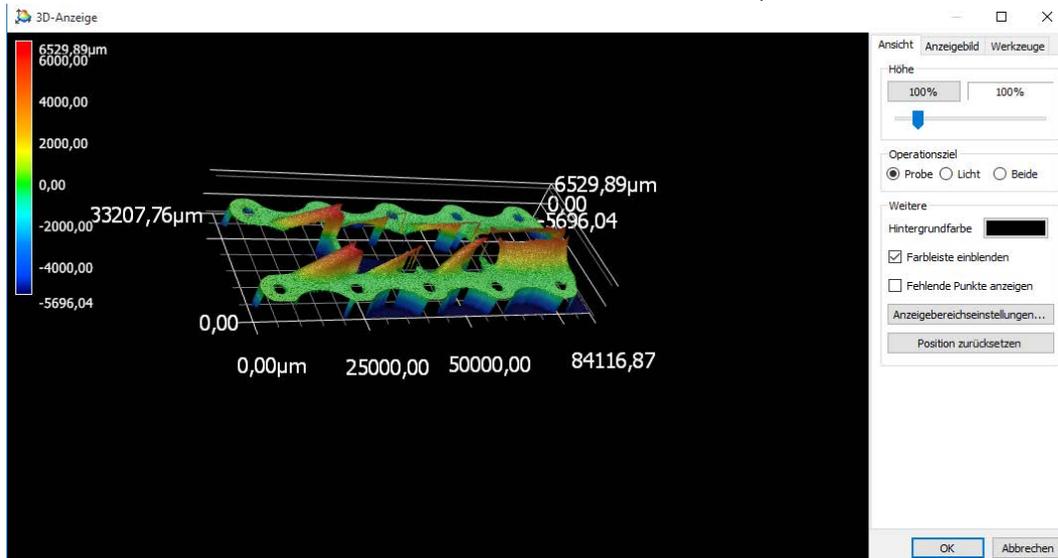
Farbe



Außerdem können unterschiedliche Auswertung durchgeführt werden, zum Beispiel die Betrachtung des 3D-Modells. Dazu genügt ein Klick auf **3D-Anzeige**:

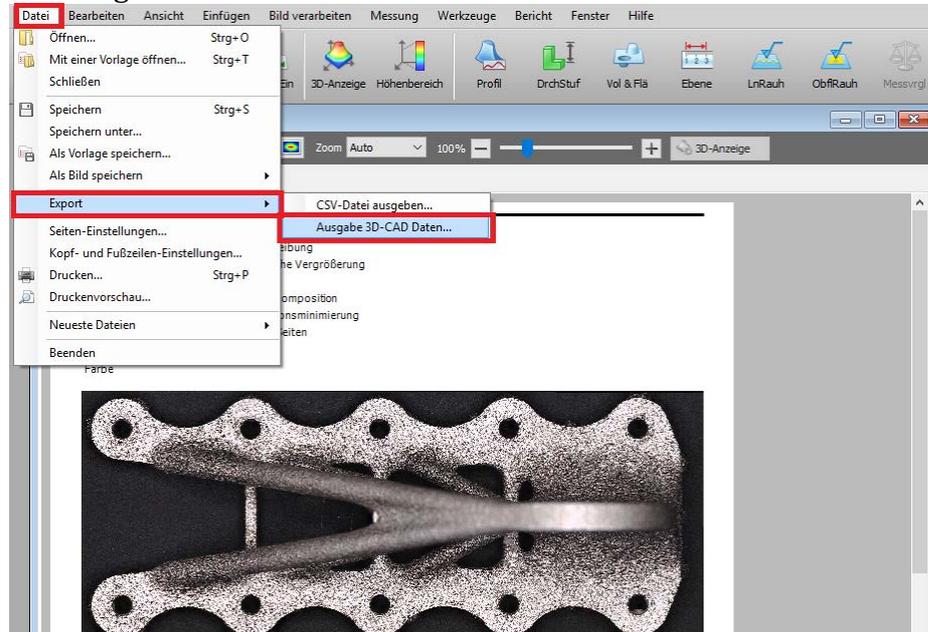


Da das Makroskop nur eine geringe Tiefenauflösung hat, können Teile des Bauteils möglicherweise nicht korrekt gemessen werden. In diesem Fall genügt es, in der Auswertung nur den Verzug der „Bodenplatte“, also den Bereich mit den zehn kleineren Löchern, zu betrachten:

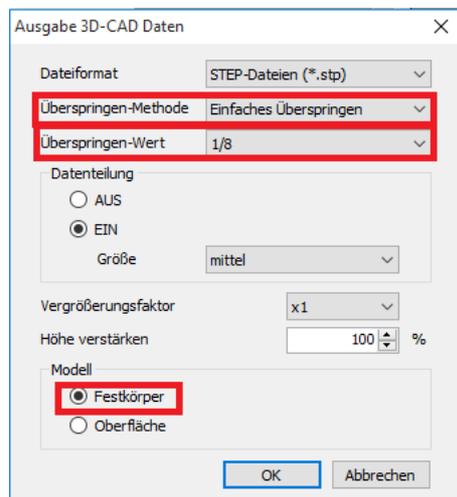


4.2.3 Exportieren der Ergebnisse

Um ein dreidimensionales Modell der Messung zu exportieren, muss zunächst über *Datei > Export > Ausgabe 3D-CAD-Daten...* das Exportfenster geöffnet werden:



Im sich öffnenden Fenster sollte die *Überspringen-Methode* auf *Einfaches Überspringen* und der *Überspringen-Wert* auf $1/8$ gestellt werden. Außerdem ist darauf zu achten, dass ein *Festkörper* exportiert wird:



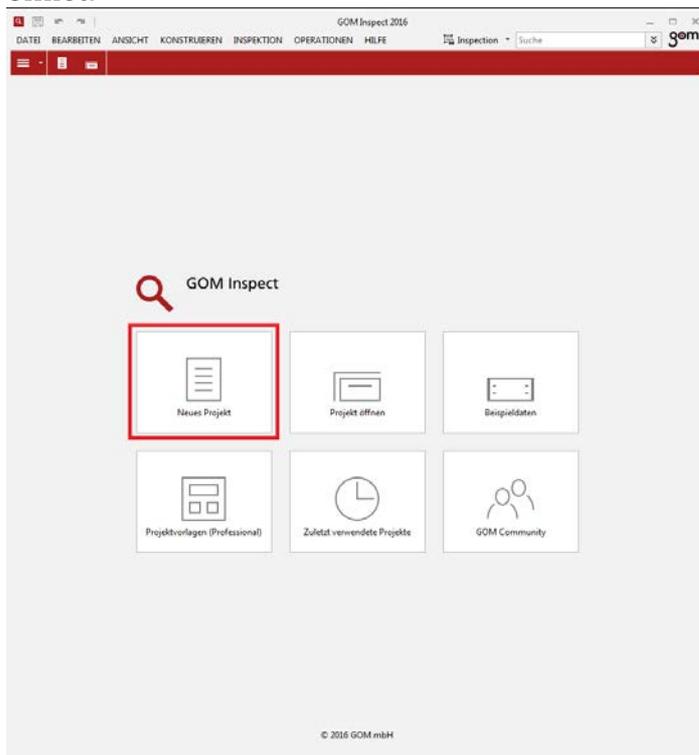
Mit *einfachem Überspringen* wird beim Export ohne Rücksicht auf die Geometrie des Bauteils nur eine gewisse Anzahl an Elementen für die CAD-Erstellung verwendet, zum Beispiel jedes achte. Mit der *Profilbetrachtungsmethode* als *Überspringen-Methode* wird die Geometrie des Bauteils berücksichtigt. Dies ist jedoch bei unserem Bauteil nicht nötig.

4.3 GOM Inspect

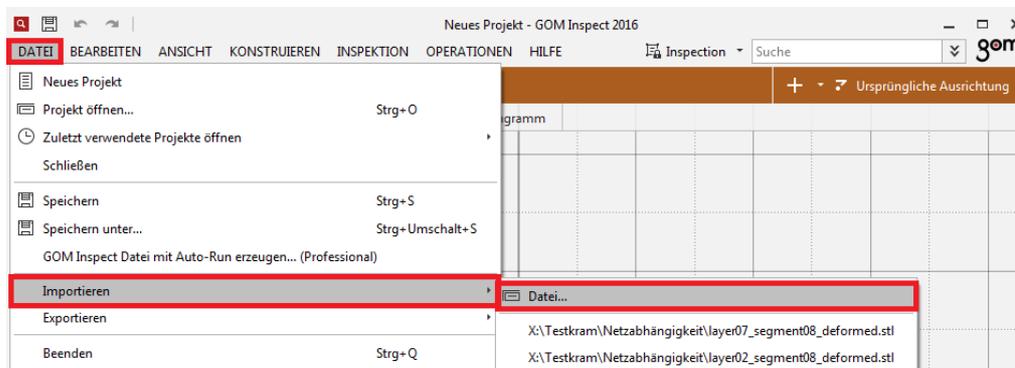
GOM Inspect ist ein Programm zum Vergleichen von CAD-Modellen und der qualitativen Analyse von Simulationen.

4.3.1 Importieren von .stl-Dateien

Nach dem Start von GOM Inspect wird zunächst ein neues Projekt geöffnet:



Dann wird über *Datei > Importieren > Datei* das nicht-verformte Originalmodell geladen:



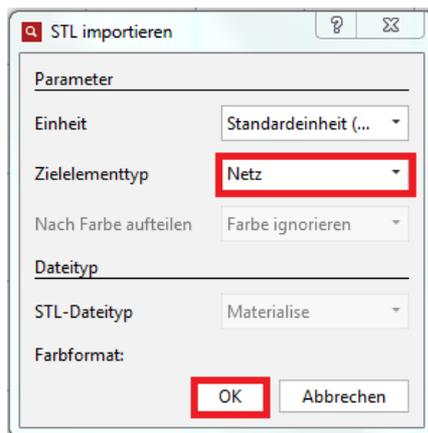
GOM Inspect kann die .stl-Datei sowohl als Körper, als auch als über den Körper zu legendes Netz importieren. Es ist jedoch erforderlich, jeweils

ein Netz und einen Körper zu laden, da nur so ein Vergleich möglich ist. Zwei Netze oder zwei Körper sind mit GOM nicht vergleichbar. Im Folgenden soll das **Originalmodell als CAD-Körper** geladen werden:

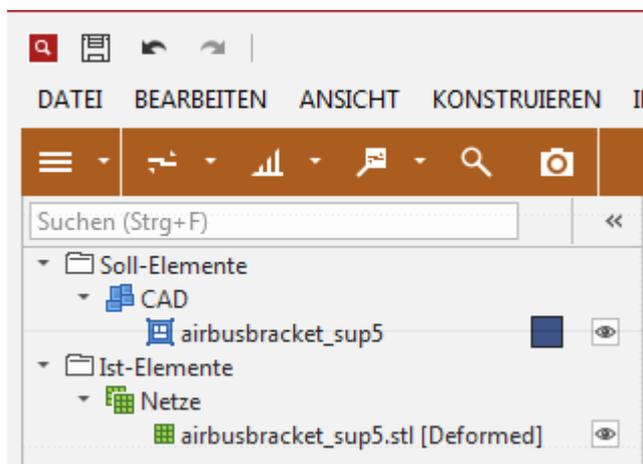


Mit Klick auf *OK* kann bestätigt werden.

Als nächstes muss die **.stl-Datei des verformten Bauteils als Netz** geladen und mit Klick auf *OK* bestätigt werden:

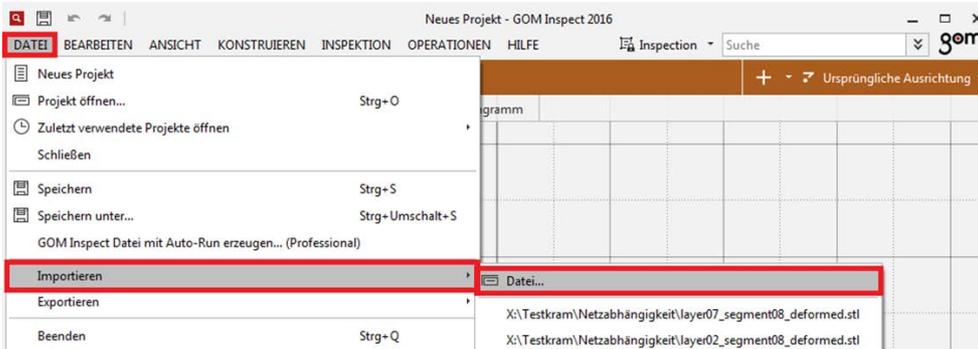


In den Menüs werden CAD-Körper (unter Soll-Elemente) blau und Netze (unter Ist-Elemente) grün dargestellt:

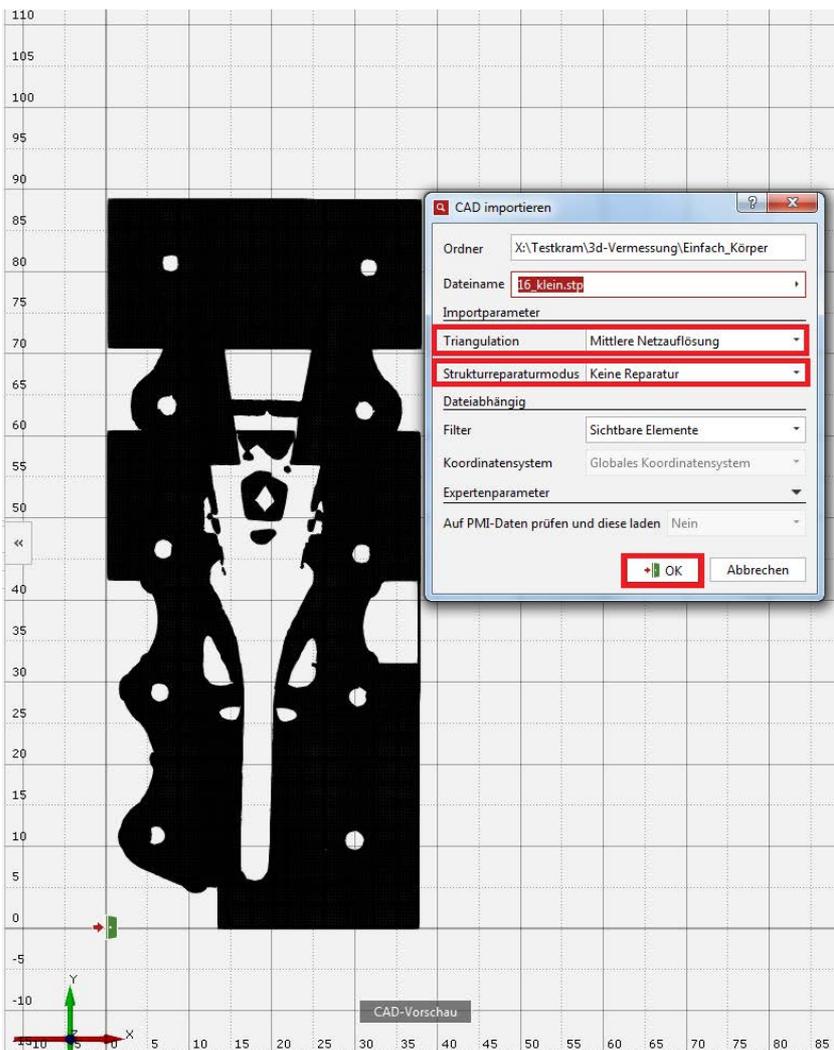


4.3.2 Importieren von .stp-Dateien

Um die vom Makroskop als step-Dateien (.stp) exportierten CAD-Körper zu importieren, kann ähnlich vorgegangen werden. Zunächst wird über *Datei > Importieren > Datei* die gewünschte Datei ausgewählt:



Im sich öffnenden Fenster für die *Triangulation Mittlere Netzauflösung* und für den *Strukturreparaturmodus Keine Reparatur* auswählen und mit Klick auf *OK* bestätigen:



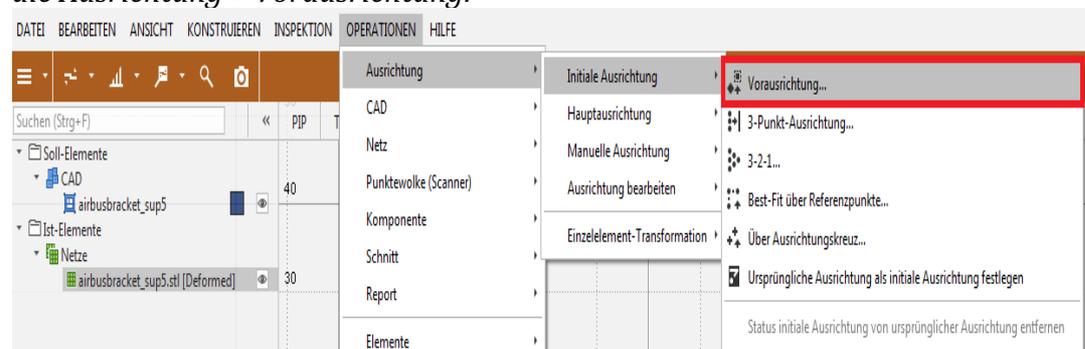
Zu beachten ist, dass *GOM Inspect* die .stp-Dateien nur als CAD-Körper, also als Soll-Elemente laden kann. Außerdem kann der Vorgang je nach Komplexität der Daten mehrere Minuten in Anspruch nehmen.

4.3.3 Vergleich der Modelle

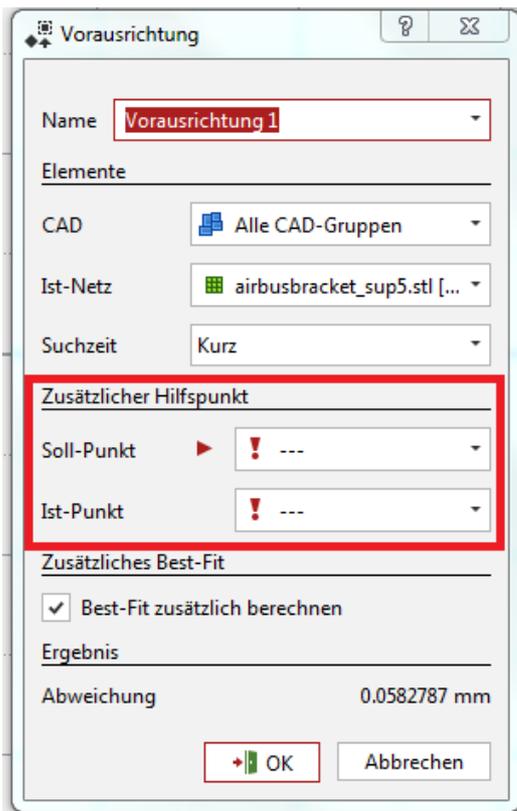
Das Netz und der Körper müssen im nächsten Schritt zueinander ausgerichtet, bzw. aufeinandergelegt werden. Dazu gibt es zwei Möglichkeiten, einen globalen Best-Fit, bei dem die Abstände der ganzen Körper minimiert werden, und einen lokalen Best-Fit, bei dem nur ein bestimmter Bereich minimale Abweichungen aufweisen soll.

Globaler Best-Fit

Ein globaler Best-Fit ist möglich über *Operationen > Ausrichtung > Initiale Ausrichtung > Vorausrichtung*:



Sollte GOM Inspect nicht schon bei geöffnetem Dialogfenster eine passende Vorschau anzeigen, kann ein charakteristischer Punkt des Bauteils als zusätzlicher Hilfspunkt angegeben werden:



Dies ist außer bei sehr symmetrischen und/oder runden Bauteilen, oder bei Vergleich mit einem Vermessungsergebnis in der Regel nicht erforderlich, oft reicht ein wenig Geduld.

Sobald GOM Inspect beide Modelle übereinandergelegt hat mit *OK* bestätigen.

Lokaler Best-Fit

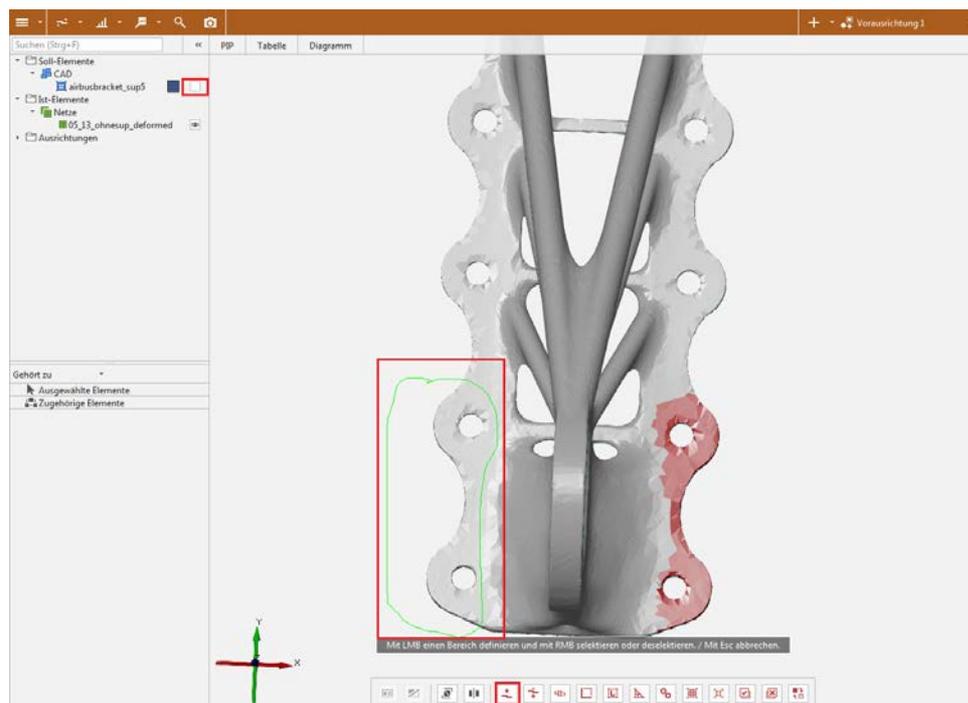
Es kann sinnvoll sein, einen Bereich vorzugeben, in dem das Netz und der Körper besonders gut aufeinanderpassen sollen, zum Beispiel wenn man sich hauptsächlich für den Verzug einer Fläche interessiert:



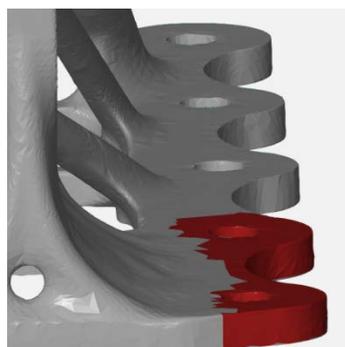
Würde nach dem oberen Bild aufeinandergelegt werden, so gäbe es Bereiche mit positiver und solche mit negativer Abweichung. Wird wie auf

dem unteren Bild aufeinandergelegt, so lässt sich leicht ein Maß für den gesamten Verzug der Platte finden.

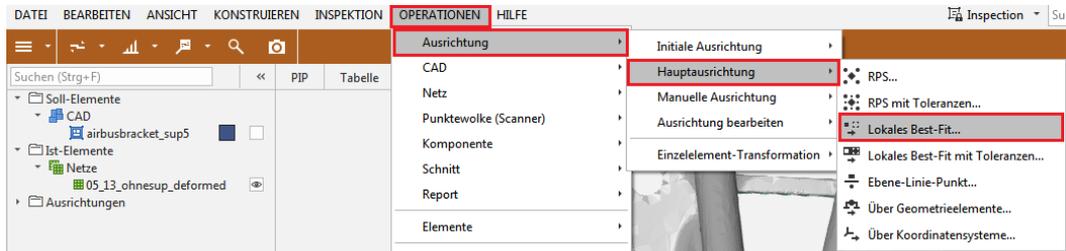
Mit *GOM Inspect* lässt sich dies durch einen *lokalen Best-Fit* realisieren. Dazu muss zunächst wie oben beschrieben ein globaler Best-Fit durchgeführt werden. Danach muss per *Schaltfläche Auf Oberfläche selektieren/deselektieren* im unteren Bildschirmbereich oder per *Strg+Leertaste* ein geeigneter Bereich auf dem *IST-Netz* per Umrandung mit der Maus selektiert werden. Sollte das *IST-Netz* vom Körper überdeckt sein, lässt er sich per Klick auf *Sichtbarkeit umstellen* im linken Menü ausblenden:



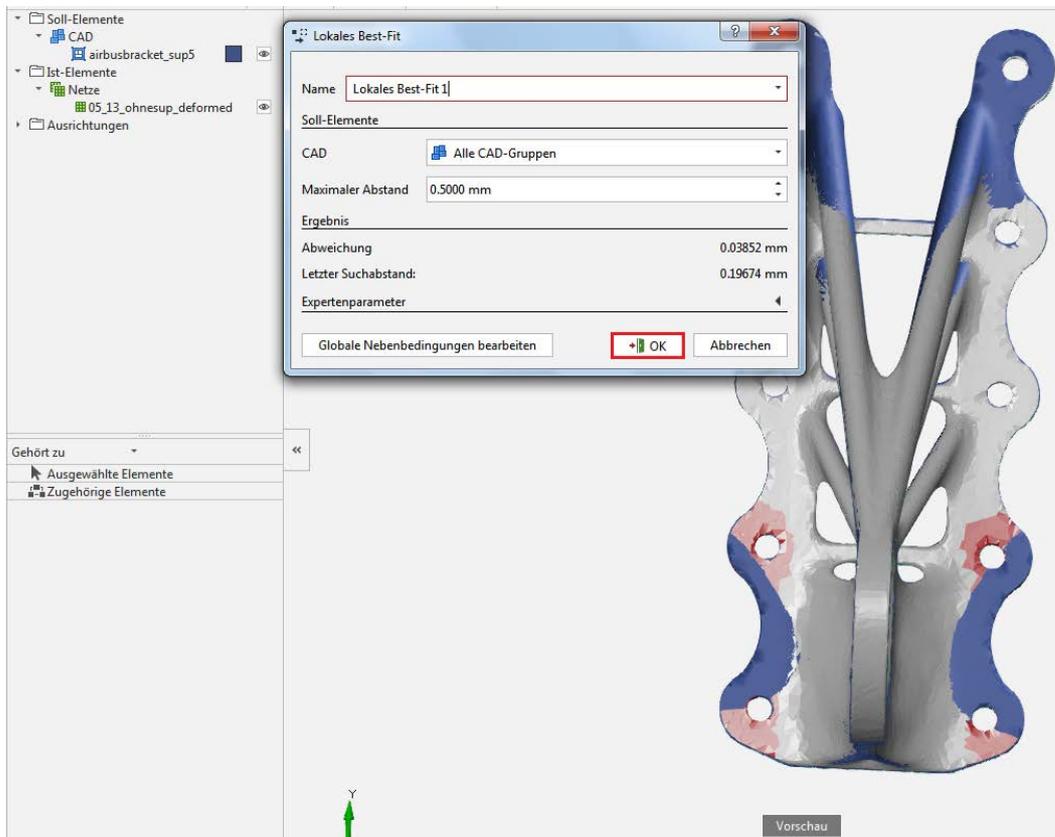
Wichtig: Um brauchbare Ergebnisse zu erhalten, ist es erforderlich, nur die geraden Flächen zu selektieren. Die zum Ring hinführende Steigung darf nicht mitselektiert werden! Außerdem unterscheiden sich die einzelnen Best-Fits teilweise stark. Deshalb sollte für eine aussagekräftige Messung der Best-Fit und die folgende Auswertung mehrmals durchgeführt werden, um aus den Einzelergebnissen einen Mittelwert bilden zu können.



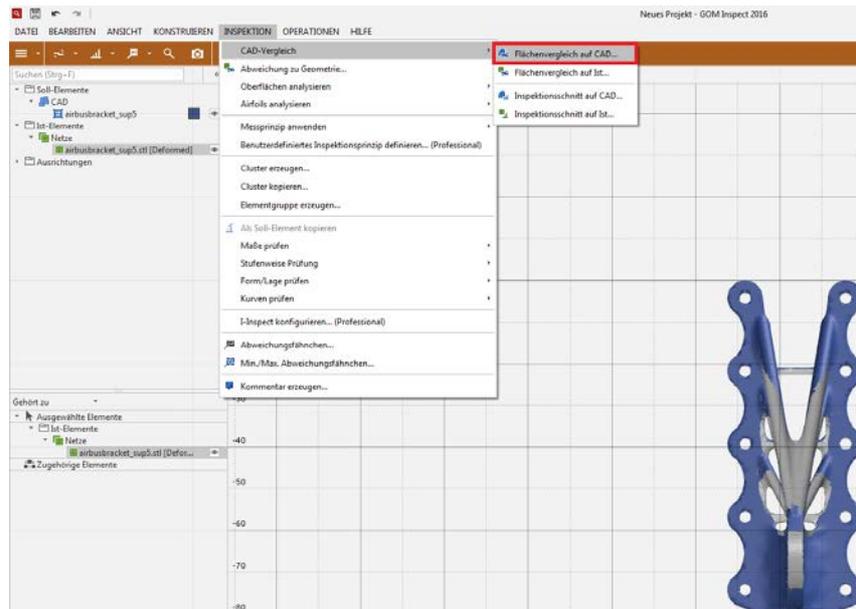
Um nun ein lokales Best-Fit durchzuführen, muss das entsprechende Fenster per Klick auf *Operationen > Ausrichtung > Hauptausrichtung > Lokales Best-Fit...* geöffnet werden:



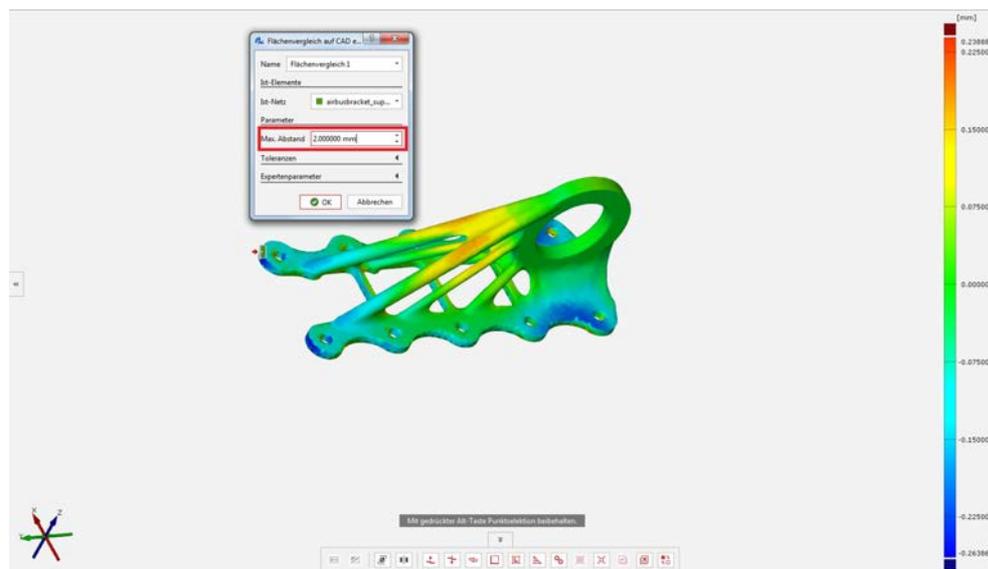
Das Best-Fit wird per Klick auf OK durchgeführt:



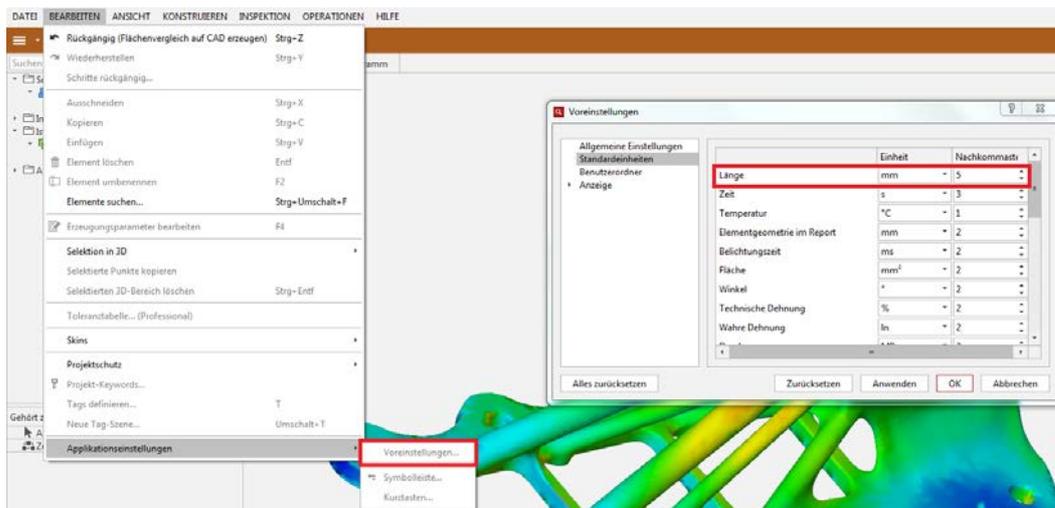
Ein Flächenvergleich kann mithilfe von *Inspektion > CAD-Vergleich > Flächenvergleich auf CAD...* durchgeführt werden:



Nun muss unter *Parameter* der *Max. Abstand* so eingestellt werden, dass die Unterschiede zwischen beiden Modellen gut sichtbar sind:



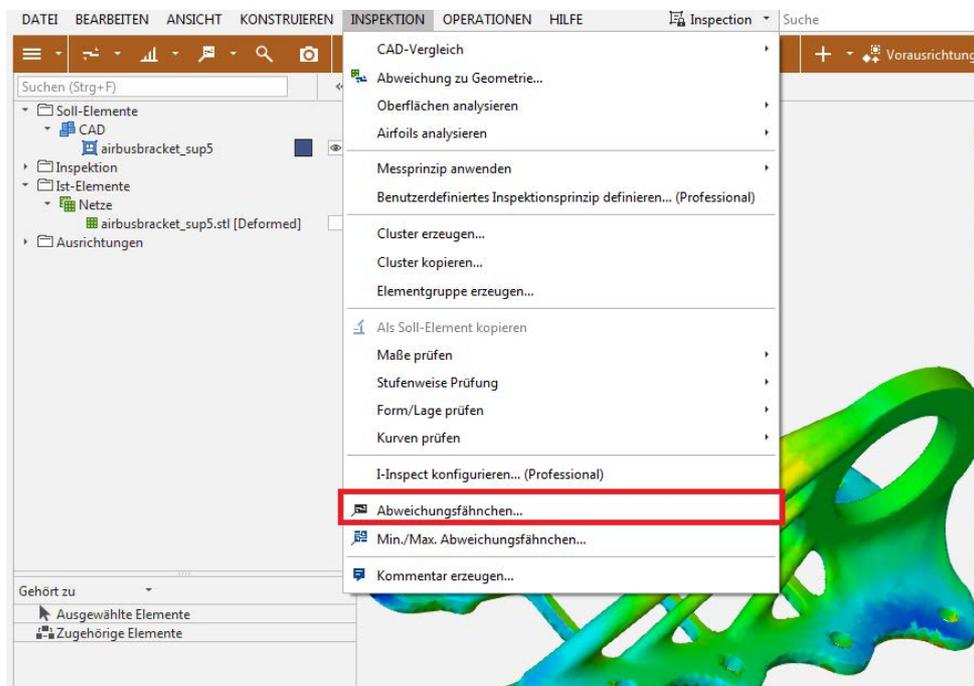
Mit einem Klick auf *OK* bestätigen.
Die Anzahl der dargestellten Nachkommastellen lässt sich ändern über *Bearbeiten > Applikationseinstellungen > Voreinstellungen...* im Reiter *Standardseinheiten*:



4.3.4 Auswertung

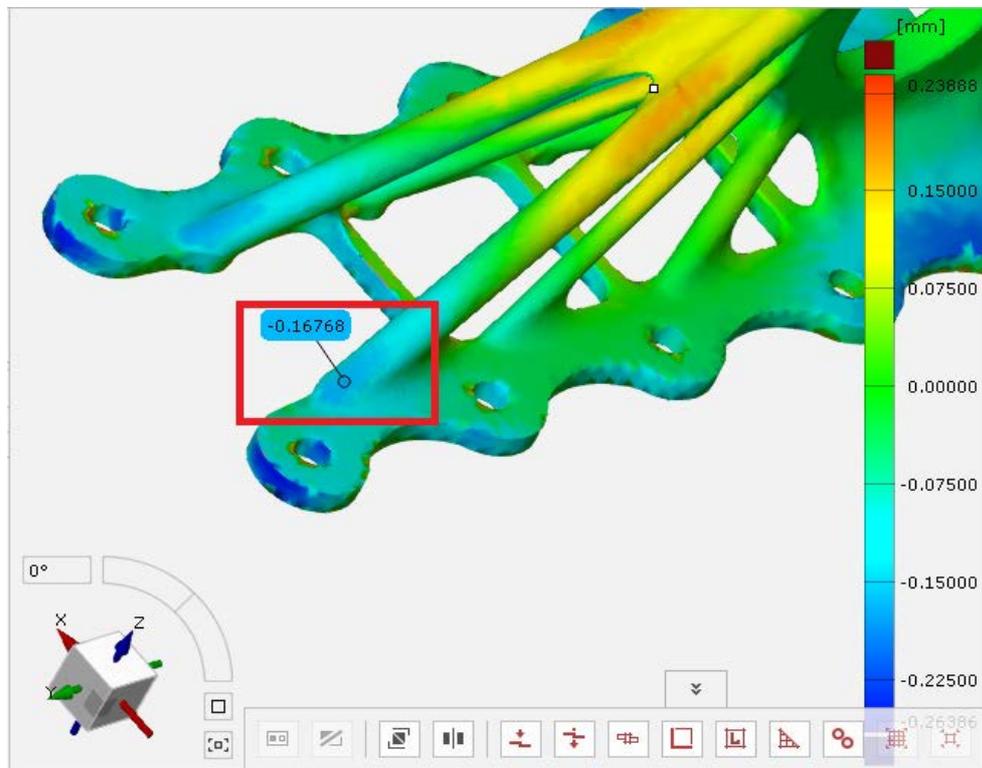
Abweichungsfähnchen

Zur Auswertung können sogenannte Abweichungsfähnchen genutzt werden. Diese zeigen den Wert der Abweichung an einem gewünschten Ort an. Um ein Abweichungsfähnchen zu setzen, muss zunächst *auf Inspektion > Abweichungsfähnchen...* geklickt werden:



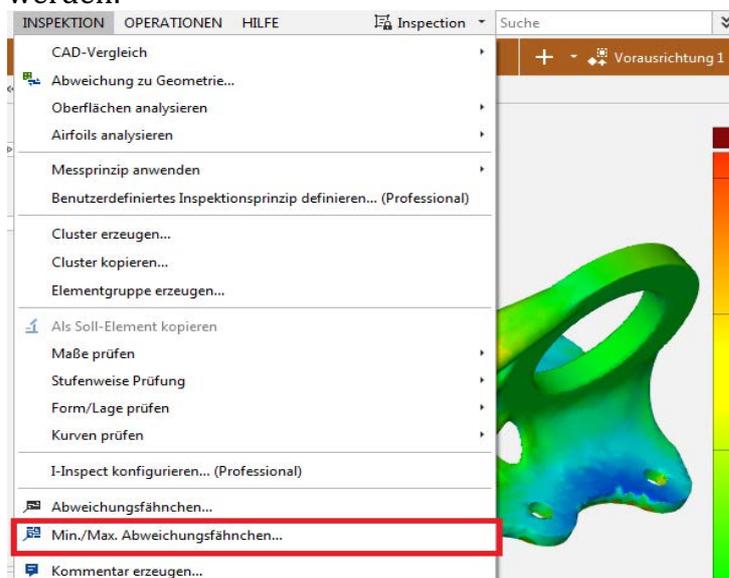
Hält man nun *Strg* gedrückt während man das Modell mit der Maus abfährt, sieht man eine Vorschau des Abweichungsfähnchens. Um einen interessanten Punkt zu markieren, muss mit gedrückter *Strg*-Taste

linksgeklickt werden. Sollen keine weiteren Fähnchen gesetzt werden genügt ein Klick mit der rechten Maustaste.
Beispiel für ein Abweichungsfähnchen:

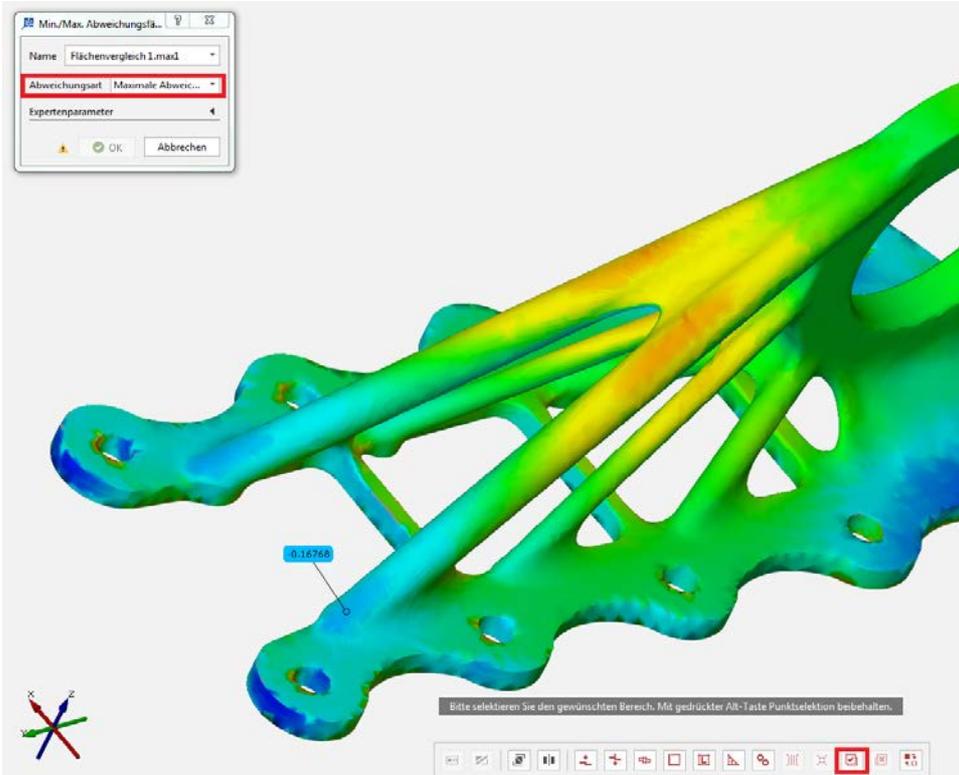


Um quantitativ sinnvolle Ergebnisse zu erhalten ist es sinnvoll, in einem Bereich per Hand vier oder fünf Fähnchen zu setzen und den Mittelwert zu bilden.

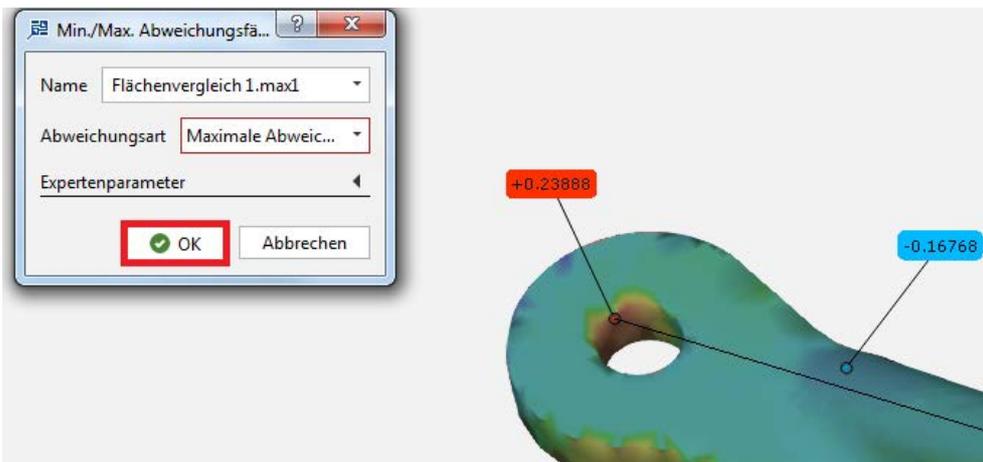
Interessiert man sich für die betragsmäßig größten Abweichungen ist es praktischer, *Min./Max. Abweichungsfähnchen* zu setzen. Dazu muss zunächst auf *Inspektion > Min./Max. Abweichungsfähnchen* geklickt werden:



Für die größte Abweichung in positiver Richtung wird als *Abweichungsart* „Maximale Abweichung“ ausgewählt:

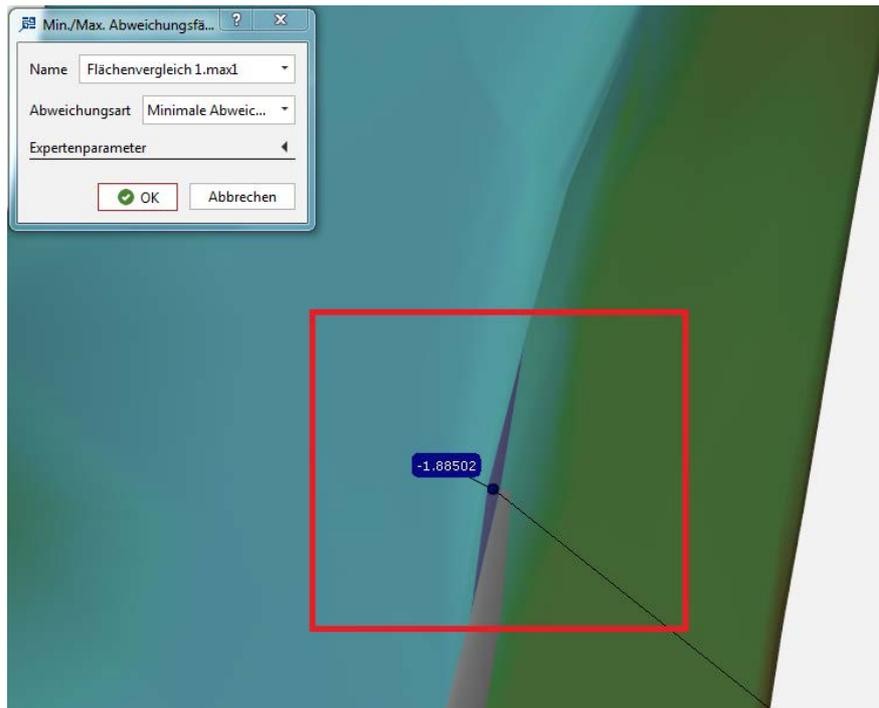


Um das ganze Modell als Bereich zu markieren genügt ein Klick auf *Alles selektieren* in der unteren Leiste, oder *Strg+A*.
Mit *OK* kann das Abweichungsfähnchen gesetzt werden:

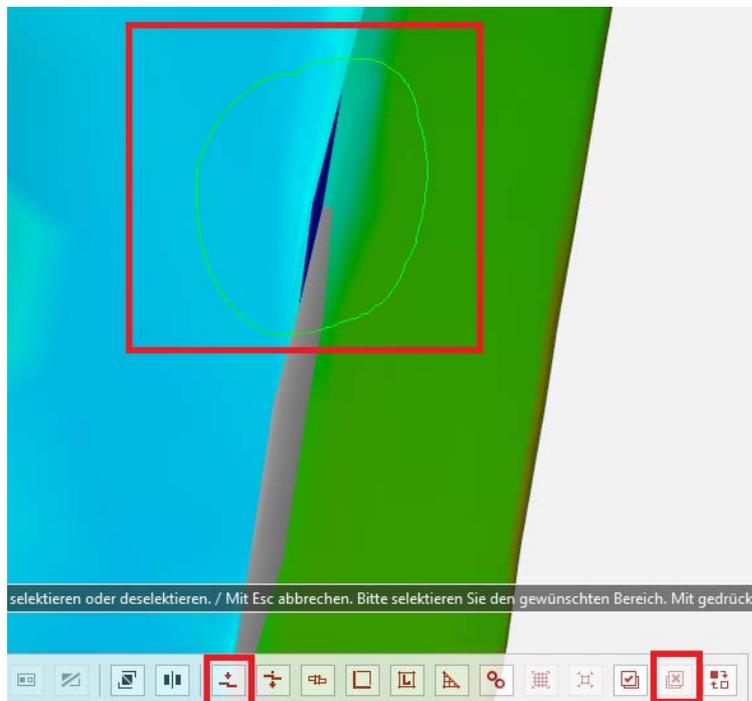


Um die maximale Abweichung in negativer Richtung zu markieren wird ebenso verfahren, nur wird als *Abweichungsart* *Minimale Abweichung* gewählt.

Ist das ganze Modell als Bereich ausgewählt kann es passieren, dass einzelne Fehlerstellen als Punkte maximaler Abweichung angegeben werden:

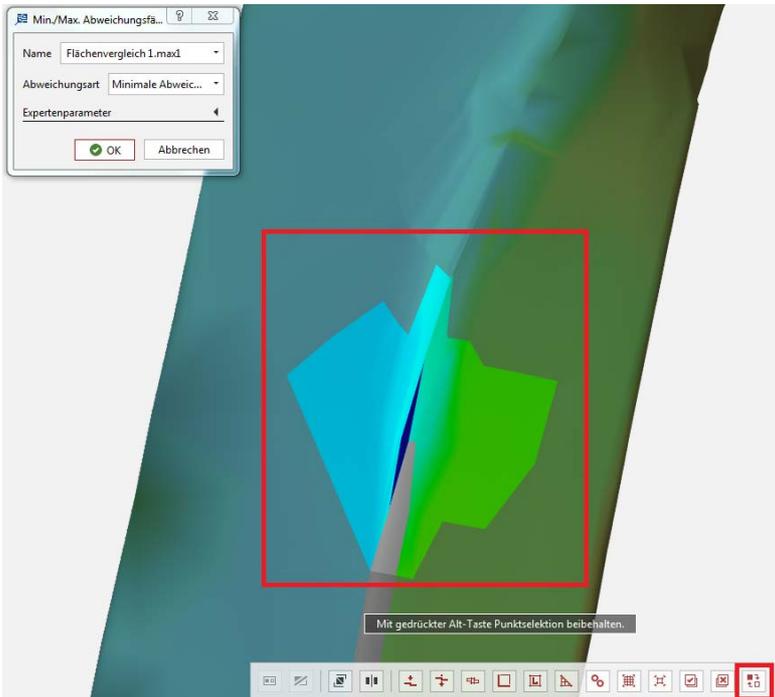


Diese Fehlerstellen sollen bei der Auswertung nicht betrachtet werden. Um eine solche Stelle zu deselektieren, geht man wie folgt vor:
Zunächst wird der gesamte Bereich mithilfe der Schaltfläche „*Alles deselektieren*“ oder *Strg+N* deselektiert. Dann kann mithilfe der *Schaltfläche Auf Oberfläche selektieren/deselektieren* oder per *Strg+Leertaste* die Fehlerstelle umzeichnet und selektiert werden:



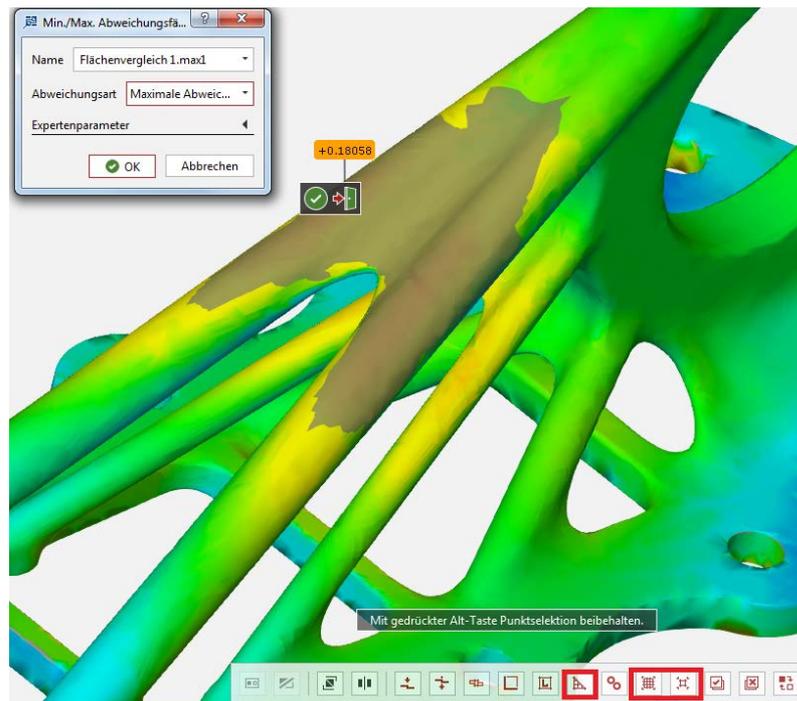
Der Bereich lässt sich mit der rechten Maustaste bestätigen. Es ist darauf zu achten, dass wirklich der gesamte Fehlerbereich selektiert ist.

Nun kann per Klick auf *Selektion invertieren* oder *Strg+I* der ganze Rest des Modells außer der Fehlstelle selektiert werden:

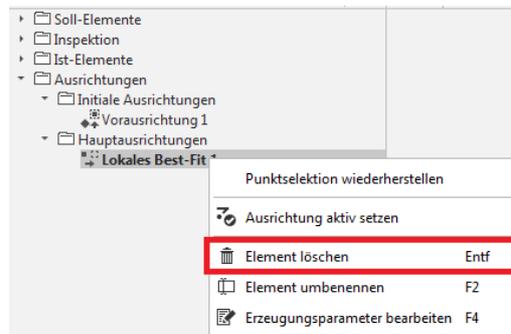


Der Vorgang muss wiederholt werden, bis keine Fehlstelle mehr selektiert ist. Dabei ist darauf zu achten, dass die anderen gefundenen Fehlerstellen markiert bleiben.

Soll das arithmetische Mittel oder der Min./Max. Wert der Abweichung in einem Bereich bestimmt werden, erfolgt die Auswertung wieder über *Inspektion > Min./Max. Abweichungsfähnchen*. Um einen gewünschten Bereich zu selektieren sind außerdem die Schaltflächen *Dreieck selektieren*, *Selektion verkleinern* und *Selektion vergrößern* hilfreich:

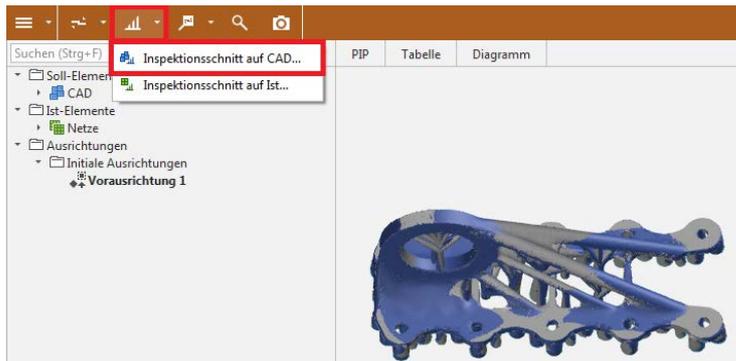


Eine mehrmalige Durchführung des Vergleichs, angefangen bei der Ausrichtung, liefert die Möglichkeit, die Unsicherheit des Vorganges abzuschätzen und Mittelwerte der einzelnen Messungen herauszufinden. Nach der Dokumentation können per *Rechtsklick > Element löschen* die bisherige Inspektion und die Hauptausrichtung gelöscht und dann wiederholt werden:

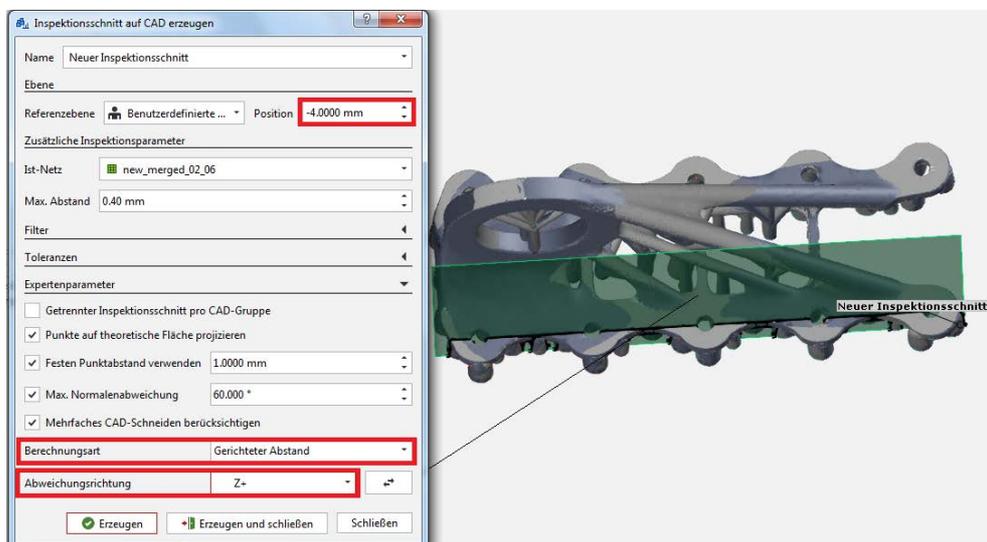


Inspektionsschnitte

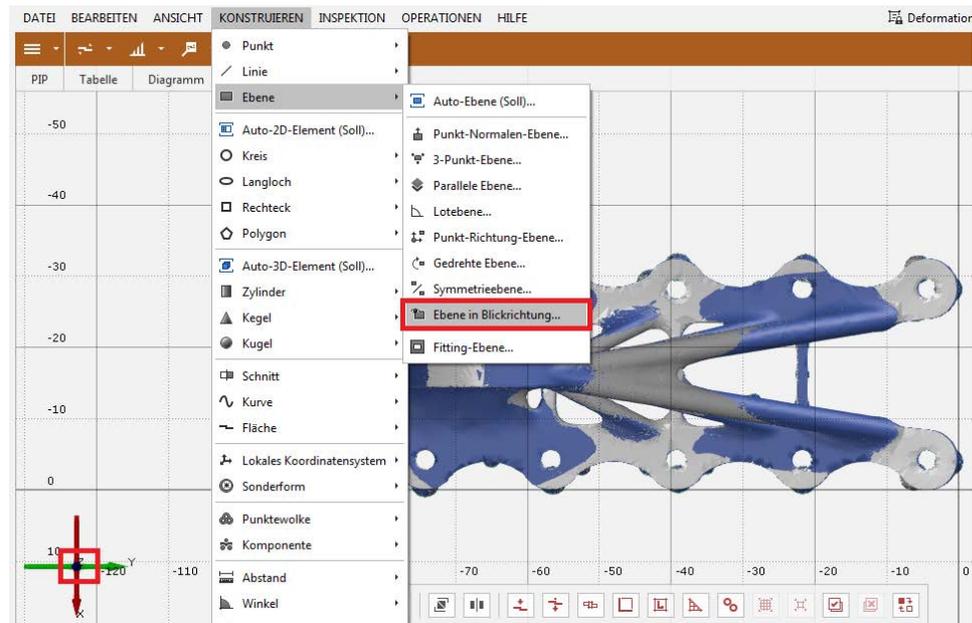
Ein sogenannter Inspektionsschnitt ermöglicht es, Querschnitte des Modells anstatt von Flächen zu vergleichen. Dies kann zur Analyse des Verlaufs des Verzuges hilfreich sein. Um mit Inspektionsschnitten zu analysieren genügt eine Ausrichtung mit globalem Best-Fit. Sind beide Modelle ausgerichtet, muss auf *Inspektionsschnitt > Inspektionsschnitt auf CAD...* geklickt werden, um gleichnamiges Fenster zu öffnen:



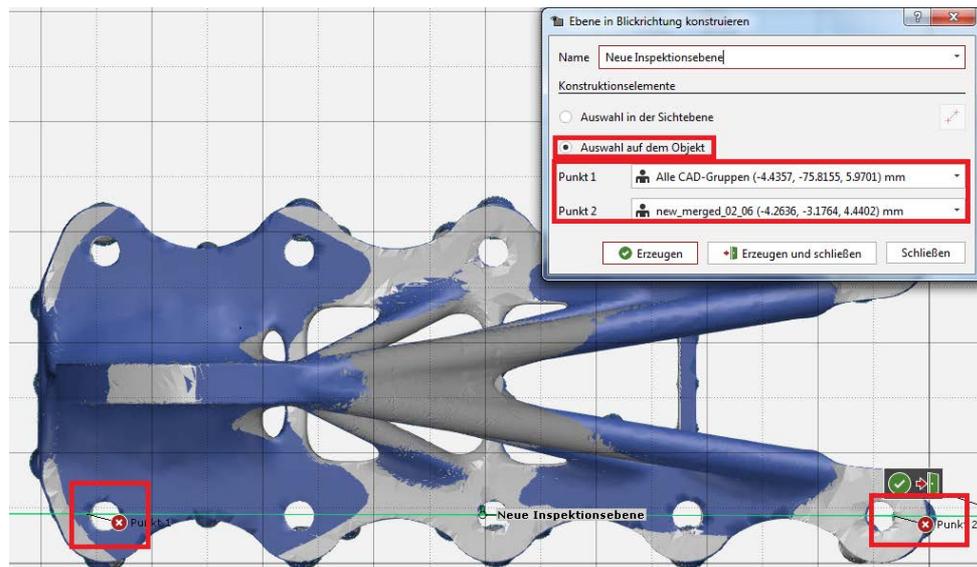
Im nächsten Fenster ist es sinnvoll, als Berechnungsart *Gerichteter Abstand* und als Abweichungsrichtung *Z+* ausgewählt werden. Ist die gewünschte Schnittebene bereits parallel zu einer vorhandenen Ebene, genügt es, die Position als Verschiebung in mm anzugeben:



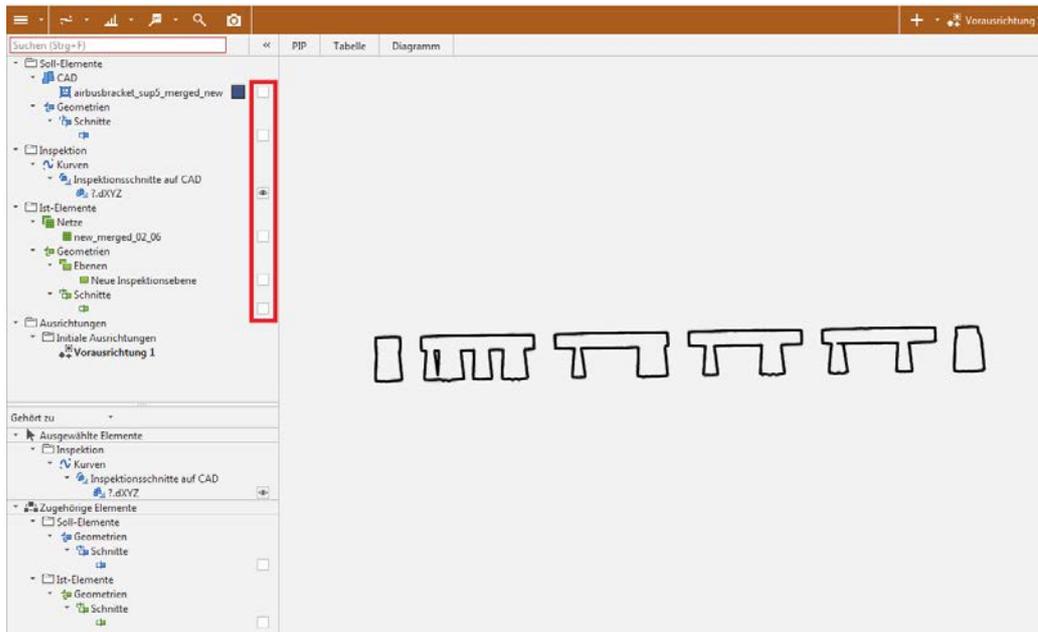
Sollte eine Schnittebene gewünscht sein, die nicht parallel zu einer vorhandenen liegt, so muss sie per Hand erzeugt werden. Dazu muss zunächst unten links im Koordinatensystem auf den blauen Pfeil für die z-Achse geklickt werden. Anschließend kann eine Ebene in Blickrichtung durch Klick auf *Konstruieren > Ebene > Ebene in Blickrichtung...* konstruiert werden:



Um nun eine Ebene zu erzeugen, muss mithilfe zweier Punkte die Ebene definiert werden:



Danach kann diese Ebene als Referenzebene zur Erzeugung des Inspektionsschnittes verwendet werden. Ist dieser erzeugt können alle anderen Darstellungen ausgeblendet werden:



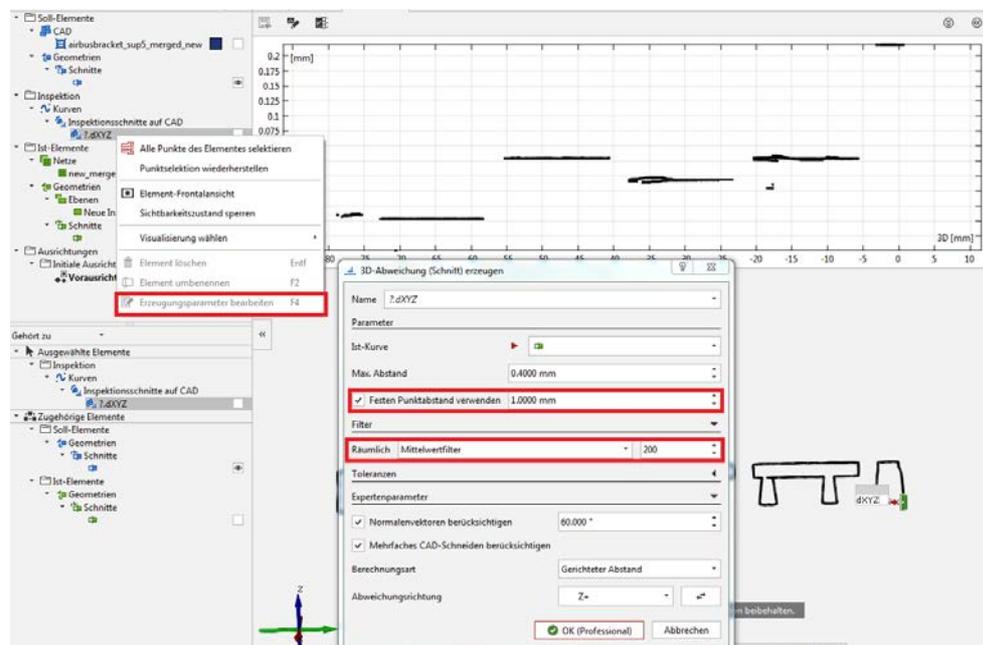
Um den Verzugsverlauf zu betrachten, muss nun zunächst auf *Diagramm* geklickt werden, gefolgt von *Horizontal maximieren*:



Nach einem Klick auf *Diagrammeinstellungen* > *Kurven* > *Optimierte Visualisierung* lässt sich der Verzugsverlauf schon erkennen:



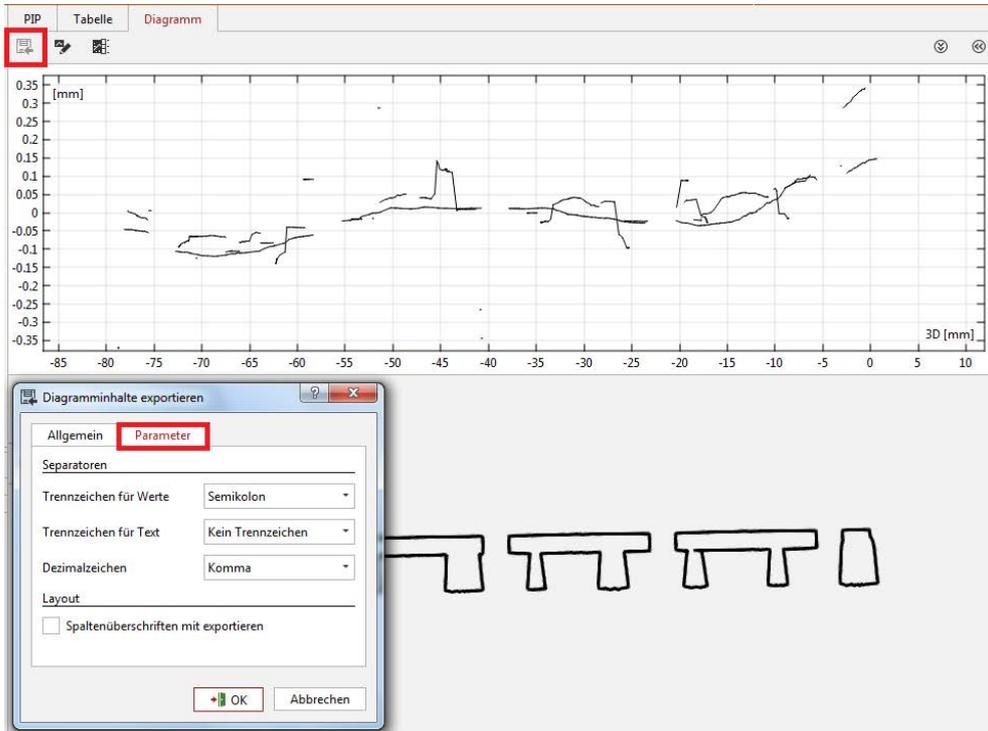
Sollte die Darstellung noch nicht hinreichend auswertbar sein, lassen sich Filter setzen. Dazu muss zunächst per Rechtsklick auf den Inspektionsschnitt auf *Erzeugungparameter bearbeiten* geklickt werden. Im sich öffnenden Fenster gibt es die Möglichkeit, verschiedene Punktabstände oder Filter einzustellen:



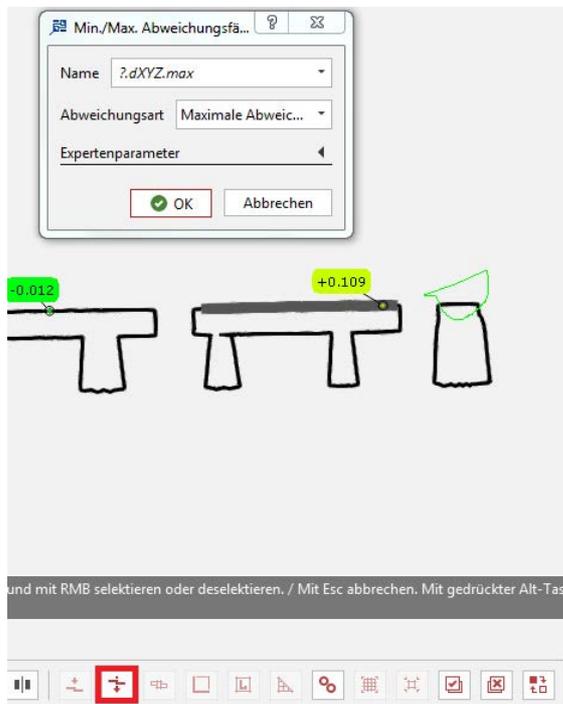
Es ist darauf zu achten, dass keine zu hohen Werte eingetragen werden, welche die Auswertung des Verlaufes schwieriger machen würden. Da nicht auf OK geklickt werden kann, muss der Inspektionsschnitt gelöscht, und ein neuer mit betreffenden Parametern erzeugt werden.

Wurde eine geeignete Darstellung gefunden, können die Diagramminhalte exportiert werden. Die

genauen Parameter für die Art der Separierung lassen sich unter Parameter einstellen:



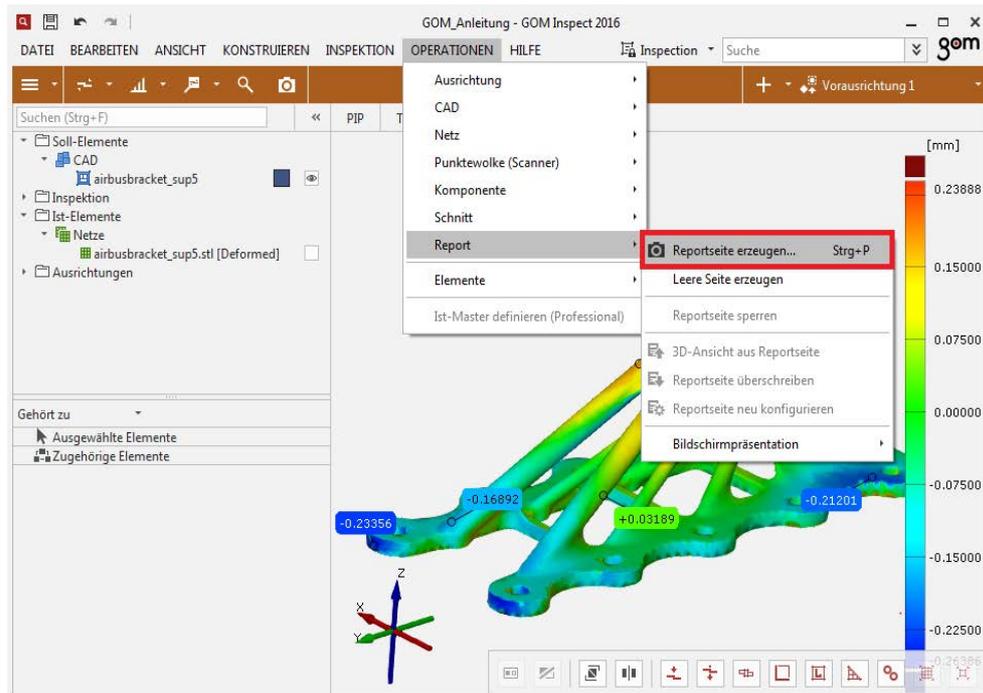
Im Übrigen lassen sich auch im Inspektionsschnittmodus alle Arten von Inspektionsfähnchen setzen, beispielsweise um die einzelnen Abschnitte besser untereinander vergleichen zu können:



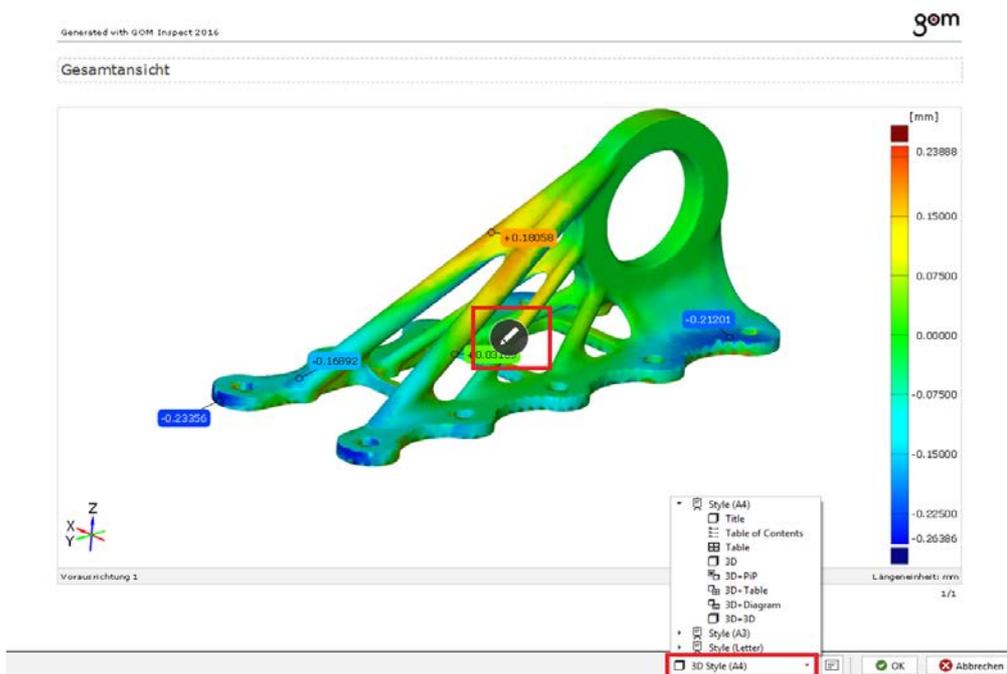
4.3.5 Dokumentation der Ergebnisse

Um die Ergebnisse zu exportieren, bietet GOM Inspect die Möglichkeit, einen sogenannten Report zu erstellen. Dieser sollte erst angefangen werden, wenn alle gewünschten Abweichungsfähnchen gesetzt sind, da ansonsten bei nachträglicher Veränderung der Fähnchen einige Reportseiten als *Nicht aktuell* exportiert würden.

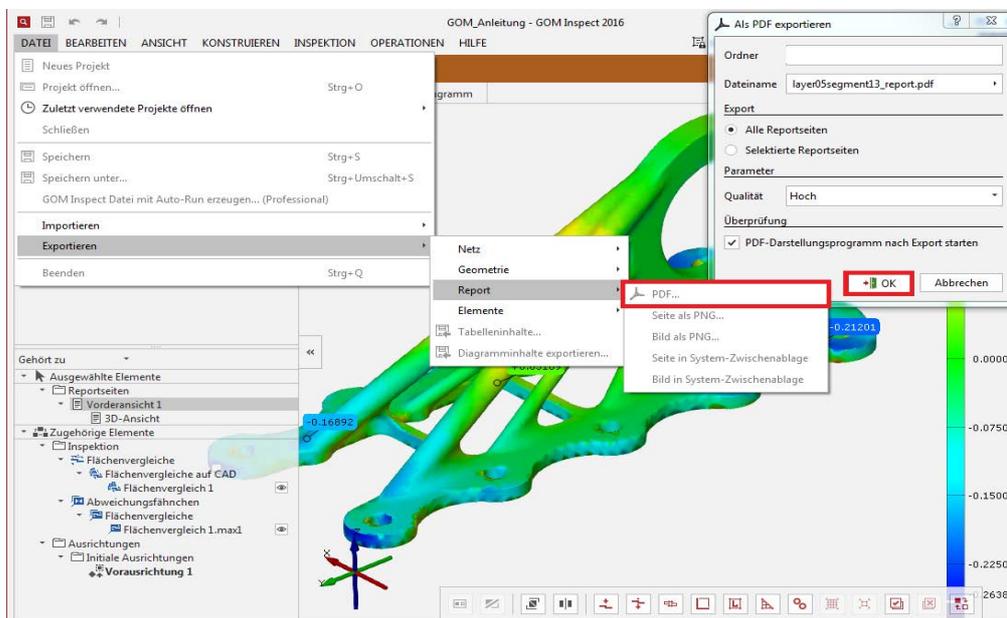
Eine Reportseite lässt sich per *Operationen > Report > Reportseite erzeugen...* erzeugen:



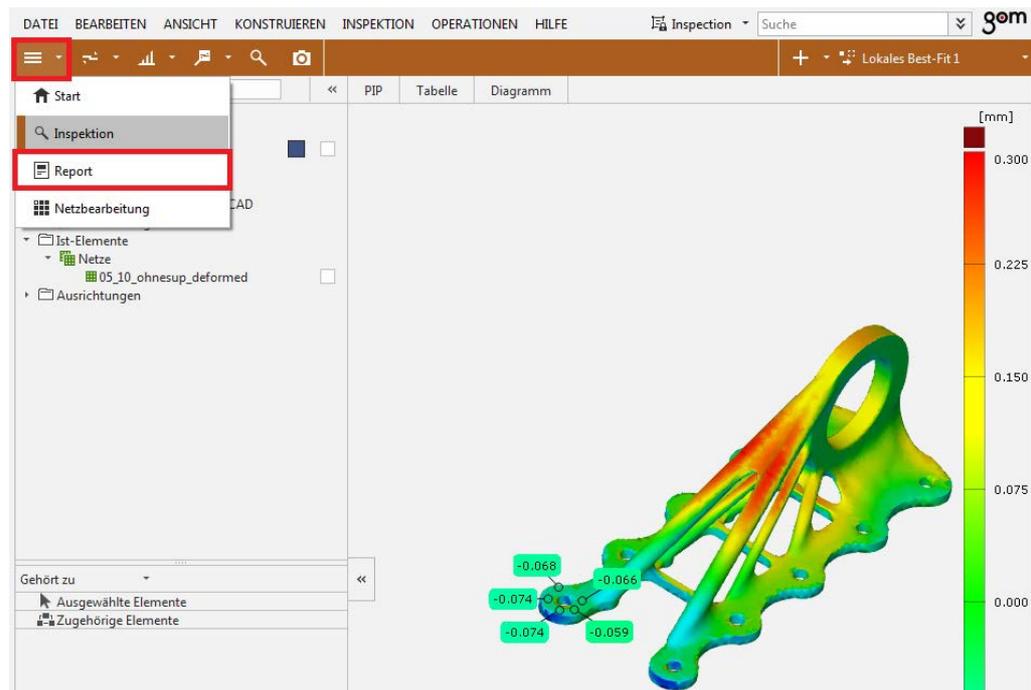
Im folgenden Fenster kann das Layout der Reportseite geändert werden. Außerdem lässt sich durch Klick auf das mittige Stift-Symbol der Bildausschnitt verändern:



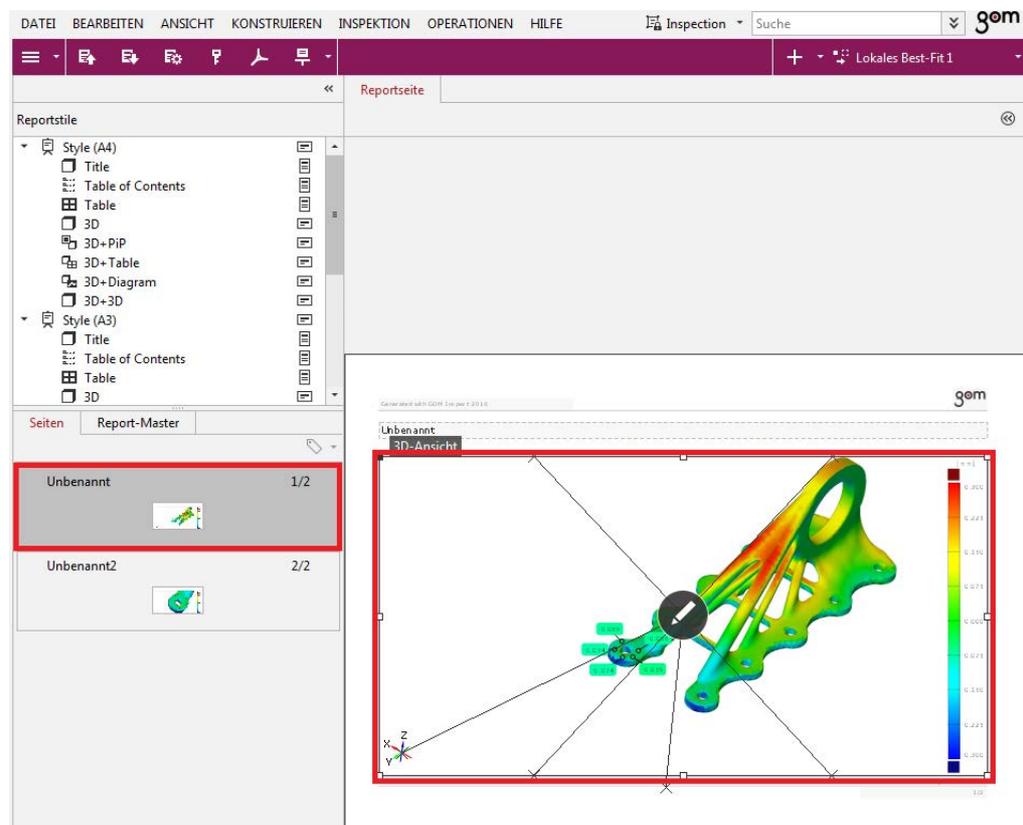
Wurden alle gewünschten Reportseiten erstellt, lässt sich der Report als .pdf-Datei per *Datei > Exportieren > Report > PDF* nach Eingabe des Zielordners per Klick auf *OK* erstellen:



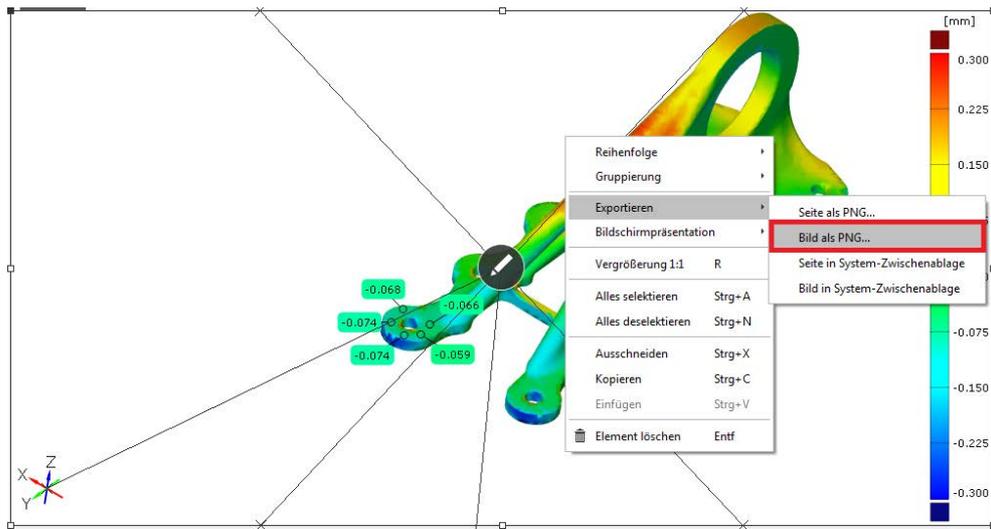
Möchte man ein Bild in einen Fließtext einbinden, kann es sinnvoller sein, nur das benötigte Bild ohne Überschrift von GOM zu exportieren. Dazu muss zunächst ebenfalls wie zuvor eine Reportseite erstellt werden. Dann muss als Arbeitsbereich *Report* ausgewählt werden:



Nachdem man nun links die gewünschte Reportseite ausgewählt hat, muss das Bild per Linksklick ausgewählt werden:



Nun kann das Bild *per Rechtsklick > Exportieren > Bild als PNG...* als .png-Datei in einen gewünschten Ordner exportiert werden:



A dark blue vertical bar on the left side of the page contains a white, pixelated number '5'.

Auswertung

Im Folgenden einige Hinweise zur Auswertung. Um das Protokoll auch für Außenstehende verständlich zu machen sollten die Randbedingungen des „virtuellen Experiments“ immer anschaulich skizziert werden.

5.1 Eigenspannungen und Bauteilverzug

- Es sollen die durch den Fertigungsprozess entstandenen Eigenspannungen qualitativ beschrieben werden.
- Es sollen die Orte mit besonders hohen Eigenspannungen identifiziert werden.
- Es sollen relevante Abweichungen von der CAD Geometrie sowohl qualitativ beschrieben als auch quantitativ bestimmt werden.
- Welche Rolle spielen die Randbedingungen, Scanstrategie und Aufbaurichtung?
- Wie sind die Abhängigkeiten der Eigenspannungen und des Bauteilverzugs von der Modelltopologie?

5.2 3D Vermessung

- Was ist zu beachten, um verlässliche Messdaten des 3D Scan zu erzeugen?
- Bewerten Sie die Genauigkeit der Messung?
- Welche Eigenheiten bringt ein Flächenvergleich mit sich?

5.3 Simulationsmethode

- Was ist zu beachten, um verlässliche Simulationsergebnisse zu erhalten?
- Was sind die Grenzen der Methode?
- Wie lässt sich das „virtuelle Experiment“ nutzen um das Prozessergebnis zu verbessern?



Anhang

6.1 Stichpunkte zum Vorbereiten

- 3D Druckverfahren von Metallen (u. a. SLM, LBM, PBF, DLMS, EBM)
- Thermische und mechanische Materialeigenschaften, Spannungs-Dehnungs-Diagramm
- Zusammenhang Eigenspannungen und Verzug
- Methode der finiten Elemente (Grundlegendes Prinzip, Anwendungsgebiete, Vernetzung, Anfangs- und Randbedingungen)

6.2 Literatur

- [1] Gibson I, Stucker B, Rosen DW. Additive manufacturing technologies. Rapid prototyping to direct digital manufacturing. N Y Springer 2010.
- [2] Keller N. Verzugsminimierung bei selektiven Laserschmelzverfahren durch Multi-Skalen-Simulation. Universität Bremen, 2016.
- [3] Petersson H, Ottosen NS. Introduction to the finite element method. New York: Prentice Hall; 1992.