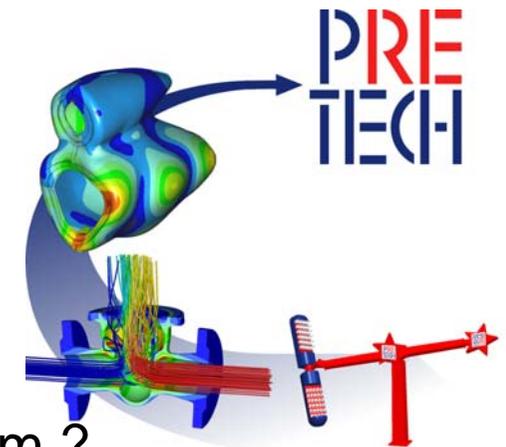


## Finite-Elemente-Analysen an generativen Bauteilen – notwendig oder Spielerei ?

- » Notwendigkeit von Berechnungen
- » Gründe für FEM-Analysen
- » Was sind Finite-Elemente ?
- » Vor- und Nachteile von FEM-Analysen und analytischen Formeln
- » „Tragende“ Teile
- » Wie kommt ein Teil zu seiner geometrischen Form ?
- » Tücken
- » Austauschformate
- » Ausbildung



## Notwendigkeit von Berechnungen

### » Aktuelles Beispiel

- Tagesschau.de vom 15.01.15: 3D-Druck der PKW-Karosserie bei Local Motors (Fahrgestell und Motor aus Stahl/Al)
- Die individuellen Wünsche solle man sich selbst zusammenstellen können



### » Herausforderung

- Für die Straßenzulassung müssen **alle** Varianten vom TÜV abgenommen werden
- Heute ist es in der Automobilindustrie notwendig jedes Teil mit Berechnungen oder Tests auszulegen und nachzuweisen
- Dies gilt besonders für gewichtsoptimierte Teile (also hier RP-Teile)
- Problem: das müsste auch mit individuellen Teilen (maximal Kleinserien) durchgeführt werden -> teuer
- Berechnung immer nach dem Stand der Technik -> FEM

## Gründe für FEM-Analysen (Stand der Technik)

### » FEM-Berechnung

- Die zu berechnenden Teile/Baugruppen werden immer komplexer
- FEM-Berechnungen können feststellen, ob die gewünschten Eigenschaften erreicht werden bzw. es können Optimierungen durchgeführt werden z.B. „geringstmögliche Masse“
- Festigkeitseigenschaften der verbauten Materialien (statisch und Dauer) sollten bekannt sein bzw. zertifiziert sein
- Dito die Lasten und Lagerungen

### » Nachweise

- Nachweise gegenüber z.B. dem TÜV, dass die Teile allen geforderten Eigenschaften entsprechen
- Wichtig für z.B. Zulassungen, Produkthaftung, Produktionsfreigabe, etc.

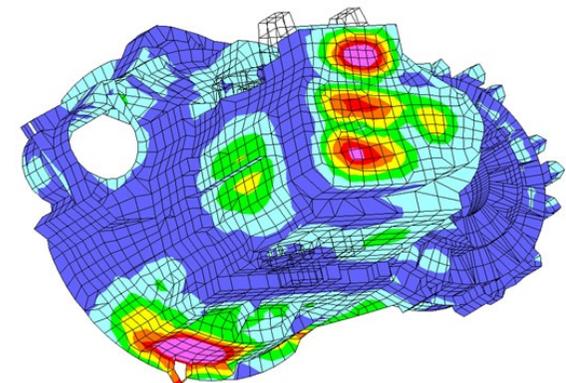
## Was sind Finite-Elemente ?

### » Finite-Elemente Methode (FEM)

- Bei der FEM werden die zu analysierenden Strukturen in viele kleine bekannte Elemente unterteilt; ähnlich wie beim Rapid Prototyping; hier wird die Geometrie aus sehr vielen kleinsten „Tropfen“ zusammen gebaut
- Zweck ist nun alle „Tropfen“ oder Elemente zusammen zu bekommen; beim RP durch z.B. Aufschmelzen und bei der FEM durch Lösung des Zusammenhalt-Gleichungssystems (für die Elemente sind geschlossene Lösungen vorhanden)
- Es wird immer die reale gefertigte 3D-Geometrie berücksichtigt
- Stimmen die Materialeigenschaften, Lagerungsbedingungen und Lasten, so ist das Ergebnis bei genügend kleinen Elementen korrekt

### » Anwendungen der FEM u.a.:

- Strukturmechanik (Statik, Dynamik, Beulen, Crash, ...)
- Strömungsmechanik (CFD)
- Wärmeübertragung (Leitung, Konvektion, Strahlung)
- Elektro-magnetische Felder (-> Maxwell)



## Vor- und Nachteile von FEM-Analysen

### » Vorteile der Finite-Elemente Methode (FEM)

- Es können beliebige komplexe Geometrien (Teile und Baugruppen) untersucht werden mit den Differentialgleichungen der jeweiligen Kontinuums-Theorie
- Der Anwender muss die intern genutzte Mathematik nicht mehr im Detail kennen
- Spezial-Elemente erleichtern die Lösungen (z.B. Schrauben)
- Alle Definitionen werden heute direkt auf der Geometrie durchgeführt (u.a. Materialeigenschaften, Lasten und Lagerungen)
- Man „sieht“ auch was im Inneren der Geometrie an jeder Stelle passiert
- Überlasttests sind völlig ungefährlich
- Nicht-Linearitäten (Material und/oder Geometrie) werden problemlos berücksichtigt

### » Was FEM nicht kann

- Oberflächeneigenschaften sind idealisiert (poliert); es werden maximal Mittelwerte eingesetzt (vereinfacht)
- Alle vereinfachten Elemente wie z.B. Balken können fehlerbehaftet sein
- Aufwändiger als analytische Formeln zu lösen

## Vor- und Nachteile von analytischen Formeln

- » **Eigenschaften von analytischen Formeln**
  - Es werden keine DGL's für Kontinua (3D) aufgestellt, sondern einfache mathematische Formeln, die oft nur punkt- oder linien-förmig gelten (z.B. punktförmige Lager und Lasten, Balken als Linien, ...)
- » **Vorteile**
  - Ergeben Überschlagswerte (Größenordnungen) inkl. Richtungen
  - Können Hinweise für Änderungen geben
  - Schnell lösbar
- » **Nachteile bzw. Schwierigkeiten**
  - Oft sind die Lösungen z.B. an den Enden singulär; z.B. Spannungen an Punkten -> keine Aussage, da Realität immer 3D
  - Führen meist zur Unterdimensionierung -> viele Sicherheitsfaktoren !
  - Ein zuverlässiger Nachweis ist in der Regel nicht möglich, besonders für optimierte komplexe RP-Teile

## „Tragende“ Teile

### » Rapid Prototyping oder generative Fertigungsverfahren

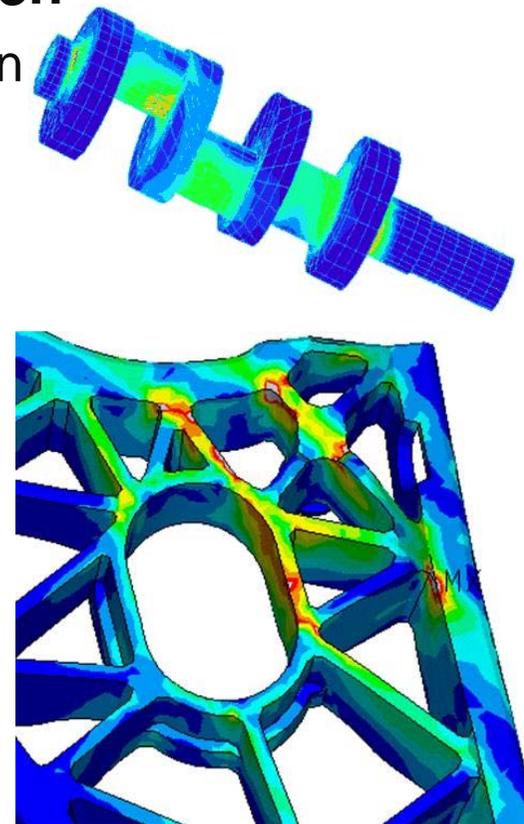
- In den Anfangsjahren konnten keine mechanisch belastbaren Teile gefertigt werden (nur mit empfindlichen Kunststoffen)
- Mehr geometrische und haptische Prüfungen
- Durch generative Fertigung können heute z.B. mechanisch belastbare Teile aus Metallen gefertigt werden (Prototypen, Ersatzteile, kleine Stückzahlen, etc.)

### » Konstruktion

- Geometrie-Erstellung immer in einem 3D-CAD-System
- CAD-Geometrie kann direkt an RP-Maschinen gesendet werden

### » Werkstoffe

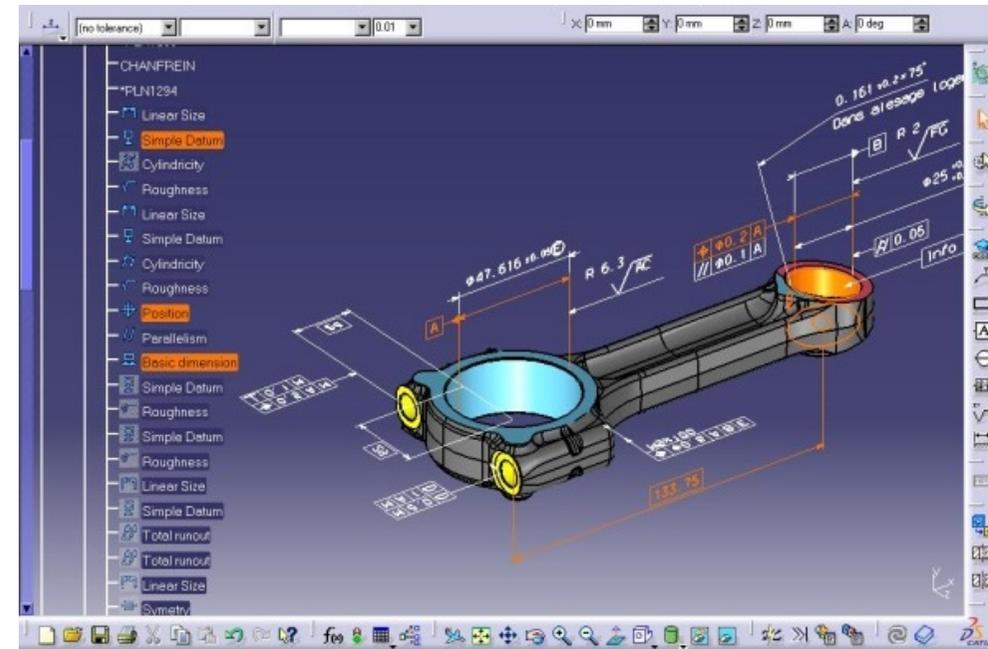
- Sehr wichtig sind relevante Materialeigenschaften
- Diese müssen im Zweifelsfall aufwändig ermittelt werden (z.B. E-Modul, Querkontraktion, Festigkeit, Wärmedehnung, ...)



## Wie kommt ein Teil zu seiner geometrischen Form ?

### » Geometrie-Optimierung

- Eine Konstruktions-Idee wird in einem parametrisierten CAD-System aufgebaut
- Durch wiederholte FEM-Analysen werden wichtige Parameter (hauptsächlich geometrische) so lange variiert, bis eine optimale Gestalt erreicht wird (z.B. mit minimalster Masse, höchsten Eigenfrequenzen, geringster maximaler Temperatur, niedrigsten Spannungen, etc.)
- Oft können mehrere Belastungsfälle gleichzeitig berücksichtigt werden



## Wie kommt ein Teil zu seiner geometrischen Form ?

### » Topologie-Optimierung

- Ausgangspunkt ist immer der maximal zur Verfügung stehende Raum
- Dieser wird mit genügend vielen finiten Elementen gefüllt
- In Laufe der Analysen werden nicht tragende Elemente gelöscht/unterdrückt
- Das Resultat ist eine stufige feingliedrige Geometrie für alle Belastungsfälle
- Diese Geometrie muss dann in einem 3D-CAD-System fertigungsgerecht überarbeitet und geglättet bzw. vereinfacht werden

### Beispiel (z.B. vom LZN)



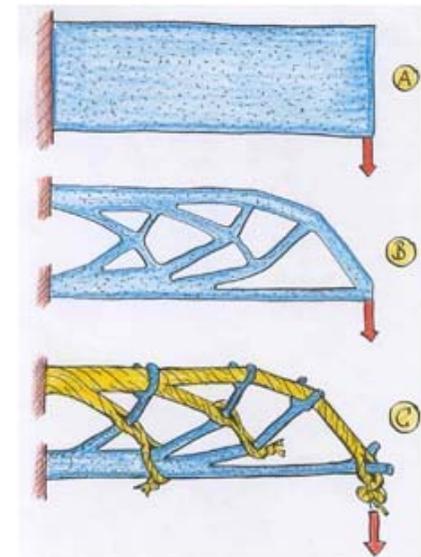
## Tücken

### » Geometrie-Aufbereitung

- Topologie-optimierte Teile weisen kaum Verrundungen auf
- Oftmals ergeben sich viele Freiformflächen (örtlich starke Krümmungen können die Vernetzung verhindern)

### » Numerische Probleme

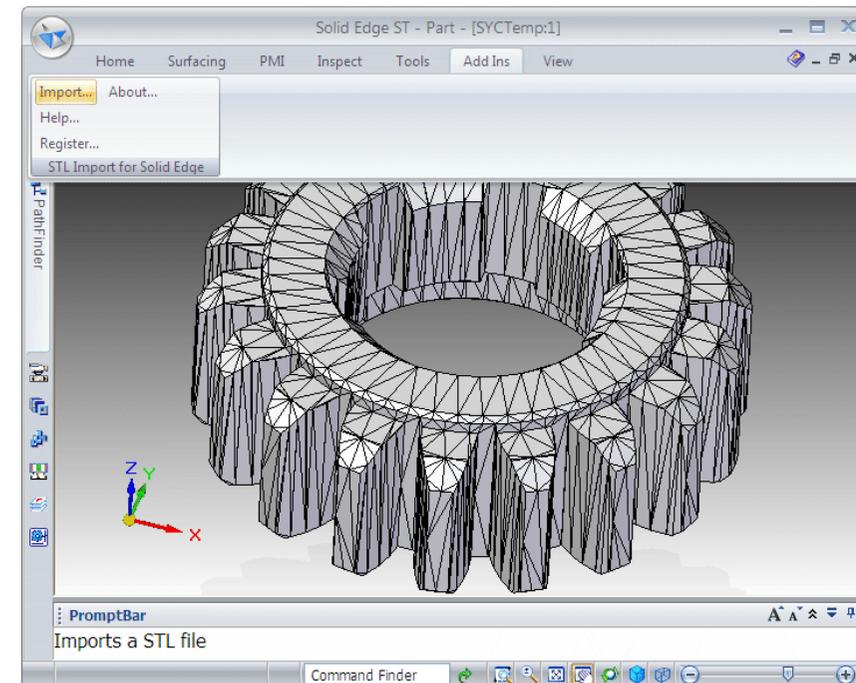
- Nicht verrundete Bereiche können numerische Singularitäten verursachen, die bei automatischen Optimierungen falsche Ergebnisse bewirken -> muss separat untersucht werden
- Messungen (Sensoren) an Bereichen, die gelöscht werden, können verloren gehen
- Zu grobe Vernetzungen ergeben zu geringe Belastungsfähigkeit und somit Unterdimensionierung (z.B. zu geringe Spannungen, zu niedrige Eigenfrequenzen)



## Austauschformate

### » Geometrie-Aufbereitung

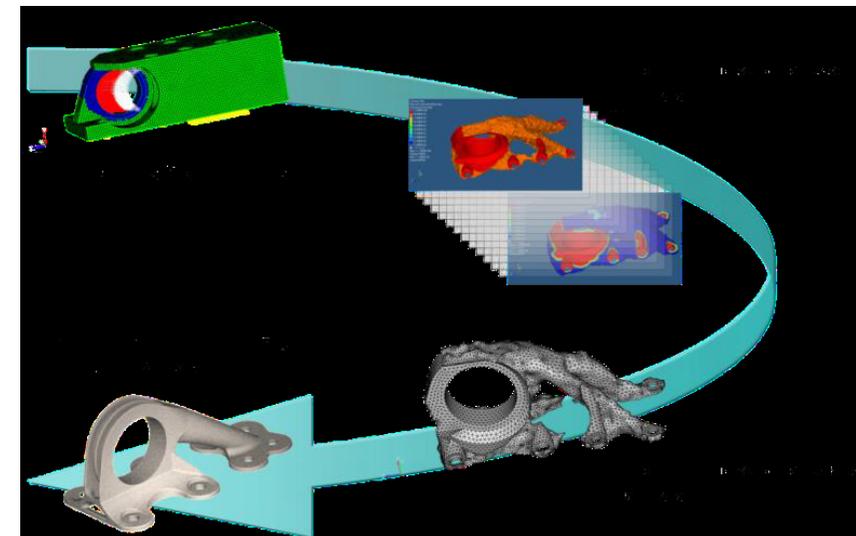
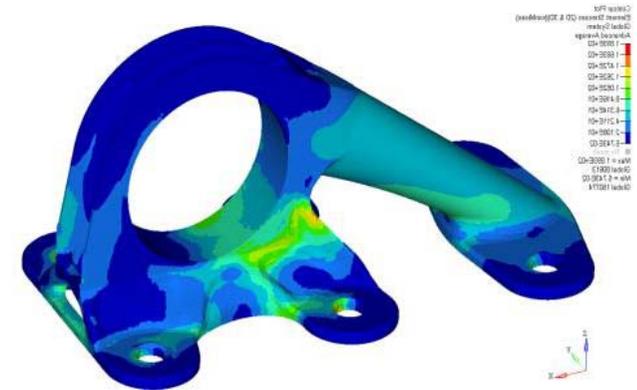
- Meist wird für die RP-Geräte das STL-Format genutzt (triangulierte ebene Oberflächenstücke)
- Solche Geometrien können nur sehr schlecht vernetzt werden, weil die Dreiecksgeometrie der Oberflächen Vernetzungen erschwert (z.B. nur Tetraeder möglich)
- Oft sind die generierten Oberflächen mit Schicht-Absätzen versehen und werden nachträglich geglättet; diese Daten können nicht für die Berechnung herangezogen werden; sie könnten numerische Probleme verursachen
- Besser ist es die originalen CAD-Daten zu nutzen, z.B. SAT-, Parasolid- oder STEP-Formate



## Ausbildung

### » Anforderungen

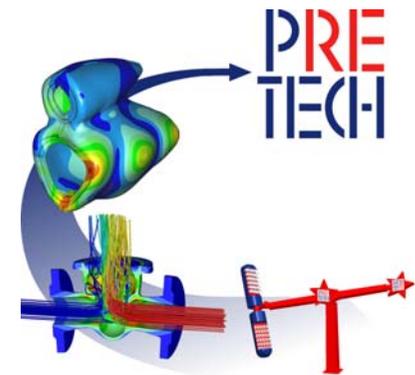
- Ein RP-Konstrukteur/Entwickler sollte die gesamte Prozesskette der generativen Fertigung kennen
- Generative Fertigung ohne FE-Berechnungen ist nicht zuverlässig realisierbar
- Zu beherrschende Schritte:
  - Definition Bauraum und aller Randbedingungen
  - Struktur-Optimierung entsprechend Anforderungsprofil
  - Ergebnisinterpretation
  - Neumodellierung im 3D-CAD
  - Finale FE-Analysen für Nachweis



(Quelle: LZN)

## Danke für Ihre Aufmerksamkeit

Dr. Stefan Reul  
PRETECH GmbH  
Tinsdaler Heideweg 2a  
22559 Hamburg  
[sreul@pretech.de](mailto:sreul@pretech.de)  
Tel. 040-811840



20.03.2015