

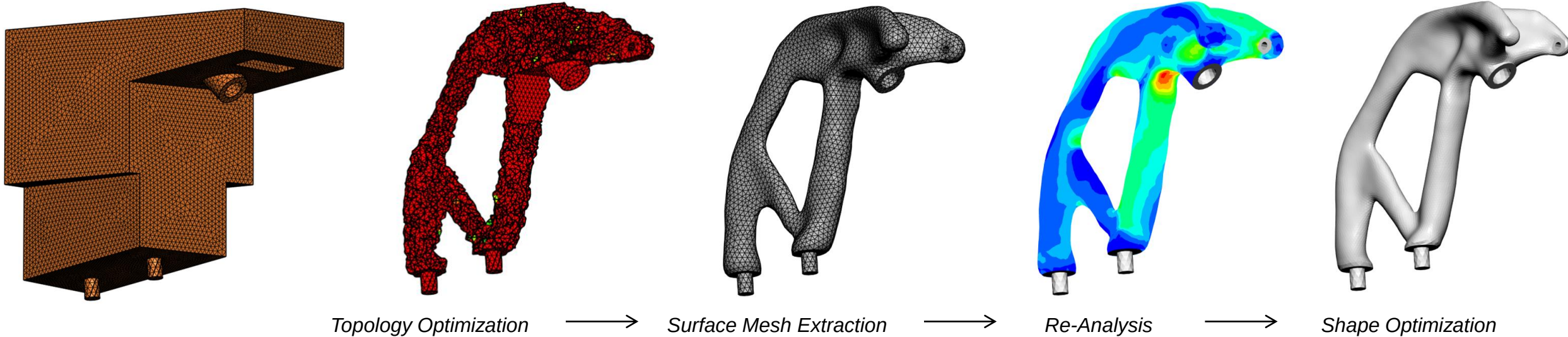
# Generative Design for Hybrid Additive Manufacturing

Nils Wagner, Christian Wulf  
INTES GmbH Stuttgart  
[nils.wagner@intes.de](mailto:nils.wagner@intes.de)

23. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag 14.09.2022



- Motivation
- Datenmodell für Geometrien
- Geometrievernetzung
- Postprocessing für Optimierung
- Anwendungsfall – Geometrievernetzung
- Zusammenfassung
- PERMAS4EDU

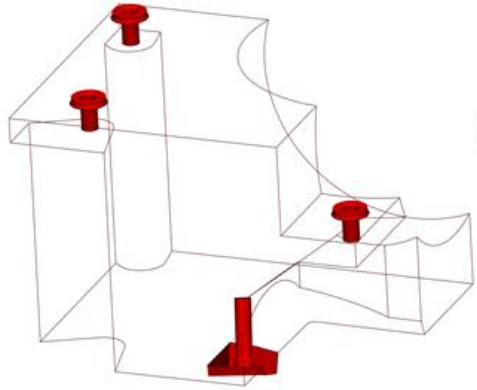


- Beginnt mit dem FE-Netz eines Entwurfsraums
- Umfasst Topologieoptimierung, Extraktion von Oberflächennetzen, Re-Analyse und Formoptimierung
- Endet mit einem glatten Oberflächennetz, das den optimierten Entwurfsvorschlag darstellt (wird normalerweise als STL-Datei exportiert)

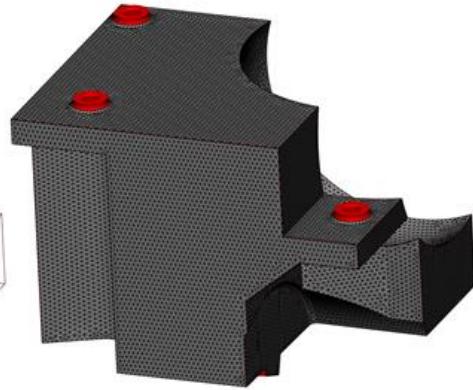
# Entwurf durch Simulation

- Hochentwickelte Optimierungsmethoden einschließlich umfassender Fertigungsbedingungen
- Vollständige Integration in den FE-Solver PERMAS mit seinen HPC-Fähigkeiten und seinem breiten Spektrum an Analysemöglichkeiten
- Vollständige Abdeckung des Workflows durch die GUI-Software VisPER (Visual PERMAS)
- FE-Netz für den Designraum muss durch eine zusätzliche Preprozessor-Software bereitgestellt werden
- Die Flächennetzdarstellung des Ergebnisses ist
  - ungeeignet für Funktionsflächen
  - tolerierbar für Freiformflächen, aber parametrische CAD-Flächen bevorzugt (z.B. um editierbar zu sein)
- In der Regel ist eine manuelle Rekonstruktion des Entwurfsvorschlags als CAD-Geometrie erforderlich!

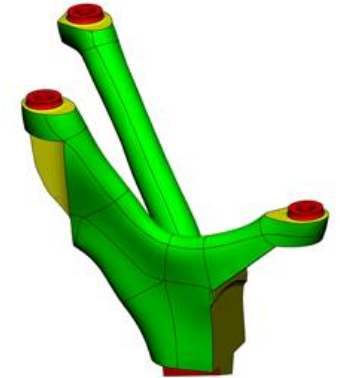
# Entwurf durch Simulation – CAD Integration



*CAD geometry of design space  
(red: functional surfaces)*



*„Design by Simulation“ (here: Topology Optimization)*



*CAD geometry of part design  
(red: reused faces)*

- Eine CAD-Integration des ‚Design by Simulation‘-Workflows - oder dessen Erweiterung zu ‚Generative Design‘ - überwindet diese Einschränkungen:
- Die Optimierung beginnt mit einer CAD-Geometrie des Designraums (Topologieoptimierung) oder des zu optimierenden Bauteildesigns (Formoptimierung)
- Ein FE-Modell für die Optimierung wird erstellt, das mit dieser CAD-Geometrie verknüpft ist
- Die optimierte Bauteilkonstruktion wird als CAD-Geometrie zurückgegeben, wobei
  - Wiederverwendung der unveränderten Flächen der Eingangsgeometrie (insbesondere Funktionsflächen) und
  - Umwandlung der neuen oder geänderten Teile des Flächennetzes in eine editierbare (also parametrische CAD-Fläche) Darstellung

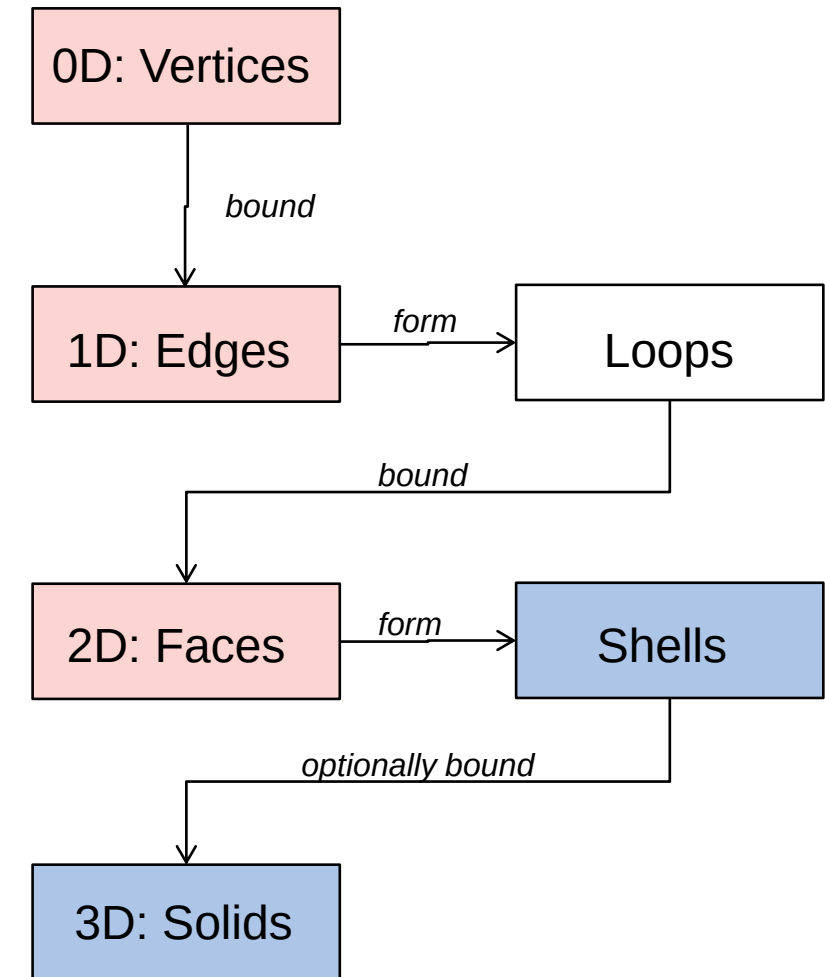
# CAD-Integration - Voraussetzungen

- Die CAD-Integration des ,Design by Simulation'-Workflows motiviert alle Entwicklungen zur Geometrieverarbeitung in PERMAS/VisPER V19 für Optimierung.
- Die Realisierung umfasst die folgenden Voraussetzungen:
  - Erweiterung der FE-Modelldaten in PERMAS um ein Datenmodell für Geometrien
  - Geometry Meshing-Fähigkeiten in VisPER einschließlich der Generierung einer Verknüpfung zwischen FE-Modell und Geometriedaten
- Eine Erweiterung des Postprocessing für Optimierung im VisPER DesignWizard zur Erzeugung von CAD-Geometrien

# Datenmodell für Geometrien

Randdarstellung (BRep) von 3D-Formen:

- Übliche Praxis für CAD-Systeme und Datenaustausch
- Punkte, Kanten und Flächen sind die grundlegenden topologischen Komponenten
- Flächen werden als Schalen gruppiert und geschlossene Schalen werden verwendet, um Solid Strukturen zu definieren
- Geometrische Daten werden als Punktkoordinaten für Punkte und Kurven-/Flächenfunktionen für Kanten/Flächen definiert
- Die Darstellung kann
  - exakt durch geeignete parametrische Kurven und Oberflächenfunktionen oder
  - angenähert durch gerade Kanten und ebene Flächen (in der Regel Dreiecke) erfolgen



Relation of topological entities in a BRep geometry



# High Level Data Bracket

```

$ENTER GEOMETRY NAME = DFLT_GEOM
!-----
$SHAPE
$VERTEX
1 1.3500000000000000E+01 -2.8391136856242836E-03 2.5590000187491757E+02 : 1.2226092167321178E-02

$EDGE TYPE = PARAMETRIC
1 1286 : 1, 0.0000000000000000E+00 2, 1.0000000000000000E+00 : 1.0811267949633677E-05

$FACE TYPE = PARAMETRIC
1 1502 :
& 1, 854, 0.0000000000000000E+00, 1.0000000000000000E+00
& 2, 855, 0.0000000000000000E+00, 4.0000000000000000E+00
& 3, 856, 0.0000000000000000E+00, 1.0000000000000000E+00
& 4, 857, 0.0000000000000000E+00, 4.0000000000000000E+00

$SHELL
...

$END SHAPE
!-----
$EXIT GEOMETRY
!-----
$FIN

$ENTER COMPONENT NAME = DFLT_COMP

$SITUATION NAME = STEP_1
DFLT_COMP SYSTEM = BAS CONSTRAINTS = C_STEP_1 LOADING = L_STEP_1
$END SITUATION

$STRUCTURE
! Nodes, elements, sets, etc.
$END STRUCTURE

$SYSTEM NAME = BAS
!
! Assign materials to element sets (parts) etc.
!
$ELPROP
PART MATERIAL = STEEL

$END SYSTEM

$CONSTRAINTS NAME = C_STEP_1
! Define suitable boundary conditions here
$END CONSTRAINTS

$LOADING NAME = L_STEP_1
! Define appropriate loads here
$END LOADING

$EXIT COMPONENT
$FIN

$ENTER MATERIAL

$MATERIAL NAME = STEEL

$ELASTIC GENERAL
2.1E+05 0.3

$DENSITY
7.85E-09

$END MATERIAL

$EXIT MATERIAL
$FIN

$ENTER FUNCTION
!
$FUNCTION CURVE2D ! Definition of a parametric plane curve
$FUNCTION CURVE3D ! Definition of a parametric space curve
$FUNCTION SURFACE ! Definition of a parametric surface
!
$EXIT FUNCTION
$FIN

```

- \$ENTER GEOMETRIE & \$ENTER FUNCTION vervollständigen das FE Modell (\$ENTER COMPONENT) und die Material Beschreibung (\$ENTER MATERIAL)
- Die Beziehung des FE-Modells zu einer Geometrie ist vergleichbar mit seiner Beziehung zu einem Material
- Benannte Geometrien ermöglichen unterschiedliche Geometrievarianten (z.B. original und optimiert)

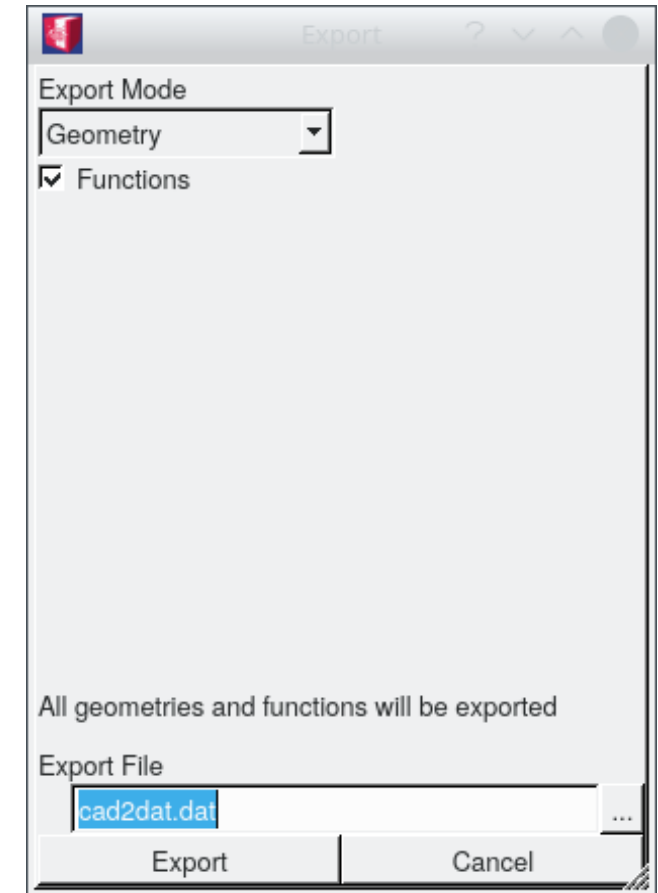


- Medium Level Bracket **\$SHAPE**, **\$END SHAPE**
- Enthält topologische Grundformen **\$VERTEX**, **\$EDGE**, **\$FACE** sowie ihre Gruppierungen als **\$SHELL**, **\$SOLID** Definitionen
- Geometrische Daten für Punkte werden direkt als Punktkoordinaten zugewiesen
- Geometrische Daten für Kanten/Flächen sind entweder
  - zugewiesen durch Bezugnahme auf **\$FUNCTION CURVE3D**, **\$FUNCTION SURFACE** Definitionen
  - implizit definiert als gerade LINE / TRIANGLE
- Schleifen werden implizit in Datenzeilen von Flächen definiert

```
1 $ENTER GEOMETRY NAME = DFLT_GEOM
2
3 $SHAPE
4 $VERTEX
5 1 1.3500000000000000E+01 -2.8391136856242836E-03 2.5590000187491757E+02 : 1.2226092167321178E-02
6 2 4.5000000000000000E+00 3.0632180323735267E-03 2.5589999866960293E+02 : 1.2220660301353611E-02
7
8 $EDGE TYPE = PARAMETRIC
9 1 1286 : 1, 0.0000000000000000E+00 2, 1.0000000000000000E+00 : 1.0811267949633677E-05
10 2 1287 : 1, 0.0000000000000000E+00 3, 4.0000000000000000E+00 : 1.2226092167321178E-02
11
12 $FACE TYPE = PARAMETRIC
13 1 1502 :
14 & 1, 854, 0.0000000000000000E+00, 1.0000000000000000E+00
15 & 2, 855, 0.0000000000000000E+00, 4.0000000000000000E+00
16 & 3, 856, 0.0000000000000000E+00, 1.0000000000000000E+00
17 & 4, 857, 0.0000000000000000E+00, 4.0000000000000000E+00
18
19 $SHELL
20 1 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
21 & 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25
22 & 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38
23 & 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51
24 & 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64
25 & 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77
26 & 78 79
27 $END SHAPE
28
29 $EXIT GEOMETRY
30
31 $ENTER FUNCTION
32
33 $FUNCTION CURVE2D FID = 854 TYPE = BSPLINE
34 2 1 2: 3.142404E+00 9.000000E+00 1.000000E+00: 3.140718E+00 7.105427E-15 1.000000E+00: 0.000000E+00, 2 1.000000E+00, 2
35
36 $FUNCTION SURFACE FID = 1548 TYPE = BSPLINE
37 2, 2 1, 1 2, 2: 1.433222E+01 -2.206396E+01 2.625858E+02 1.000000E+00: 1.887889E+01 -2.206396E+01 2.625858E+02 1.000000E+00: 1.433222E+01
38 & -2.418254E+01 2.827461E+02 1.000000E+00: 1.887889E+01 -2.418254E+01 2.827461E+02 1.000000E+00: 0.000000E+00, 2 1.000000E+00, 2:
39 & 0.000000E+00, 2 1.000000E+00, 2
40
41 $EXIT FUNCTION
42
43 $FIN
```

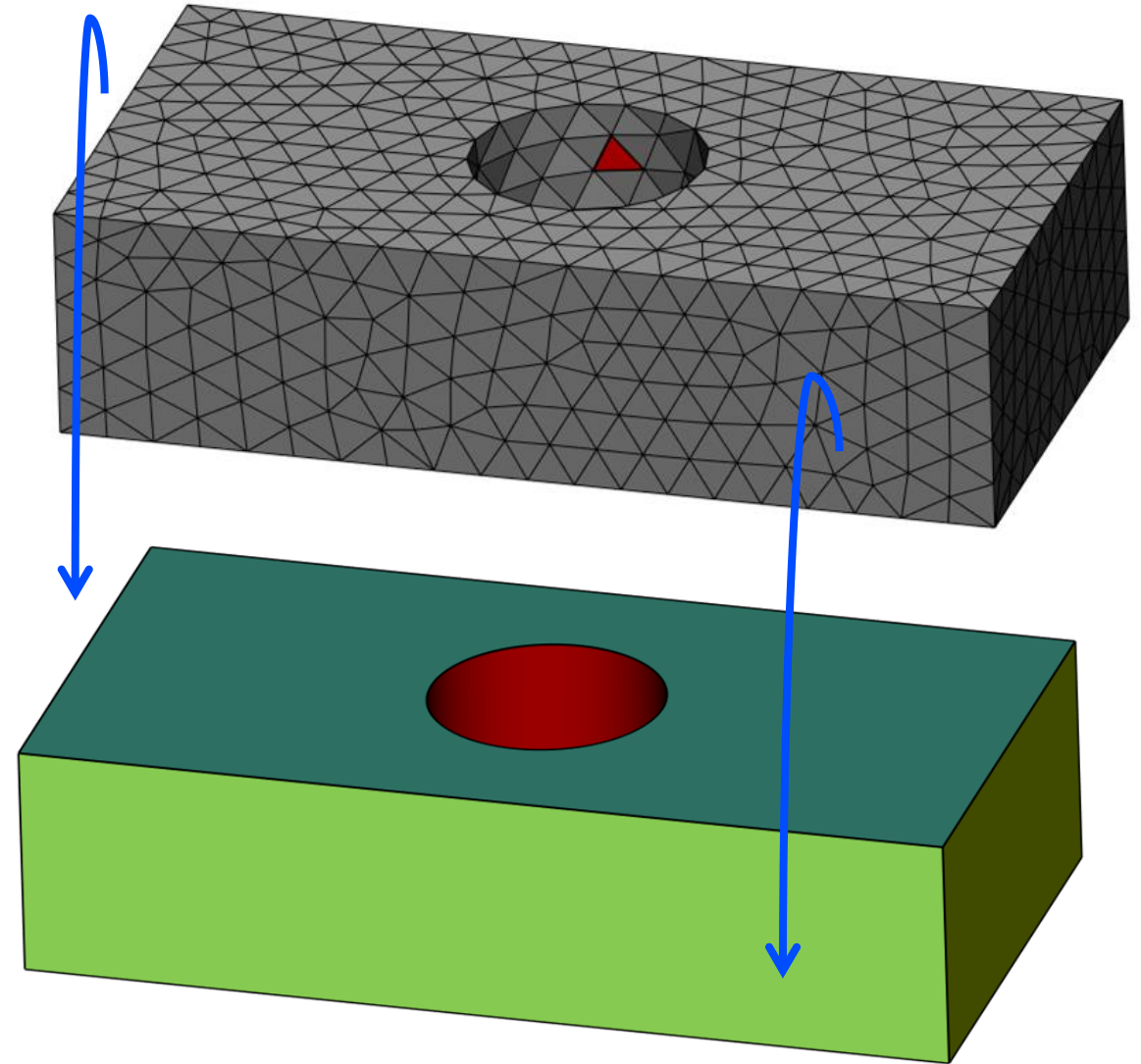
# Bemerkungen

- Das PERMAS-Datenmodell für Geometrien ist konform mit ISO 10300-42 (STEP)
- VisPER importiert und exportiert Geometriedaten in STEP and STL format
- ASCII und binary .stl werden unterstützt (numpy-stl)
- „Hybride“ Geometrien, d.h. teilweise durch exakte parametrische Kurven und Flächen dargestellt und teilweise als Dreiecksfläche angenähert, sind möglich
- Die Integration eines eigenen Datenmodells für Geometrie in PERMAS ermöglicht es, FE-Modelldaten über Shape-Referenzen \$SHAPEREF auf dessen Inhalt zu verweisen
- Ein Schlüsselement für die CAD-Integration des "Design by Simulation"-Workflows



# Form Referenzen

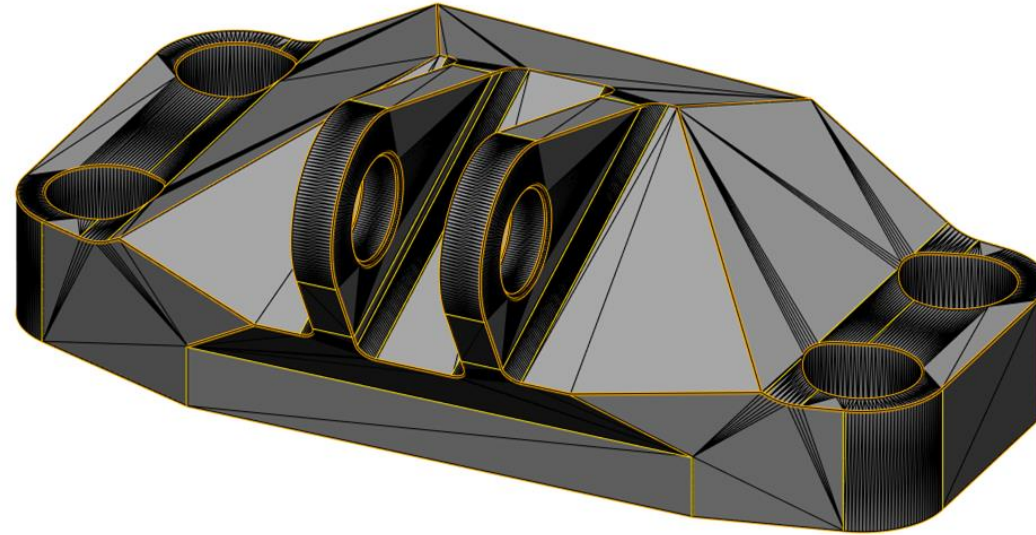
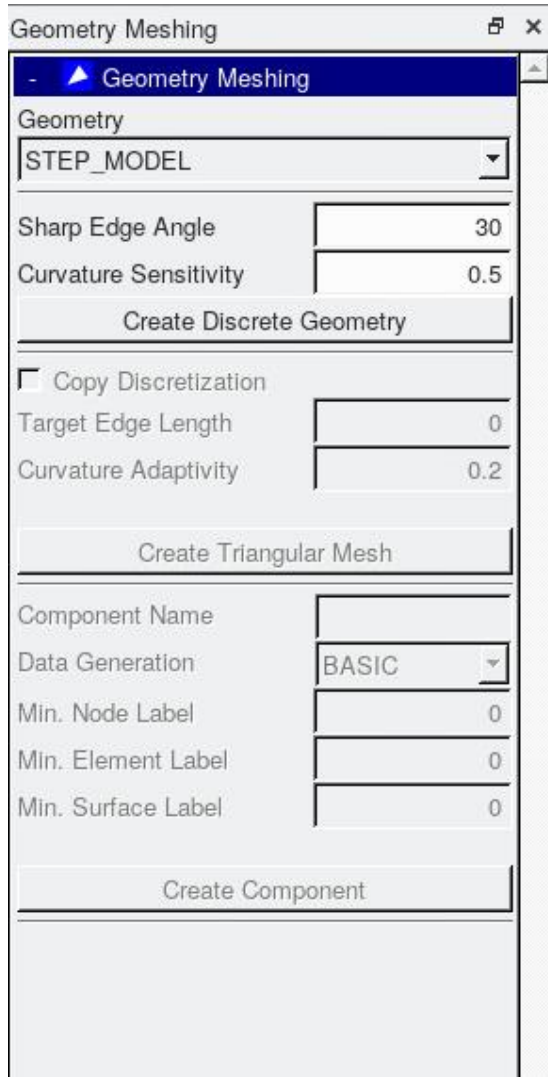
- *Shape-Referenzen* werden in der `$STRUCTURE`-Klammer der Komponente definiert.
- Es gibt zwei Arten von Referenzen:
  - `$SHAPEREF NODES`: Verknüpft Knoten des FE-Modells mit parametrischen Positionen auf Geometrieflächen und optional Kanten sowie mit Punkten
  - `$SHAPEREF ELEMENTS`: Verknüpft Elemente (2D) oder Elementflächen (3D) mit Flächen (oder 'Flächenclustern') der Geometrie
- *Shape-Referenzen* sollen nicht vom Benutzer definiert werden, sondern werden **automatisch** während der Geometrievernetzung mit VisPER generiert!



# Geometrie Vernetzung

- Zweck: Vernetzung von CAD-Geometrien von Konstruktionsräumen zur Topologieoptimierung oder von Bauteilkonstruktionen zur Formoptimierung
- Einzelteile, Solid Strukturen
- Dreiecksvernetzung der Oberfläche als erster Schritt:
  - Eigene Implementierung eines Vernetzungsalgorithmus für unstrukturierte Dreiecksnetze auf der Grundlage einer isotropen, inkrementellen Neuvernetzung
  - Umfasst die automatische Generierung von Formreferenzen
- Zahlreiche Optionen zur Überprüfung und Korrektur des resultierenden Oberflächennetzes → **CheckMesh**
- Nachfolgende TET-Vernetzung auf der Grundlage der externen Vernetzungswerkzeuge **TETGEN** oder **NETGEN**
- Übertragung von Formreferenzen (und anderen zusätzlichen Daten) vom Oberflächennetz auf die Oberfläche des TET-Netzes
- <https://www.berlios.de/software/tetgen/>
- <https://ngsolve.org/downloads>

# Diskrete Geometrie I

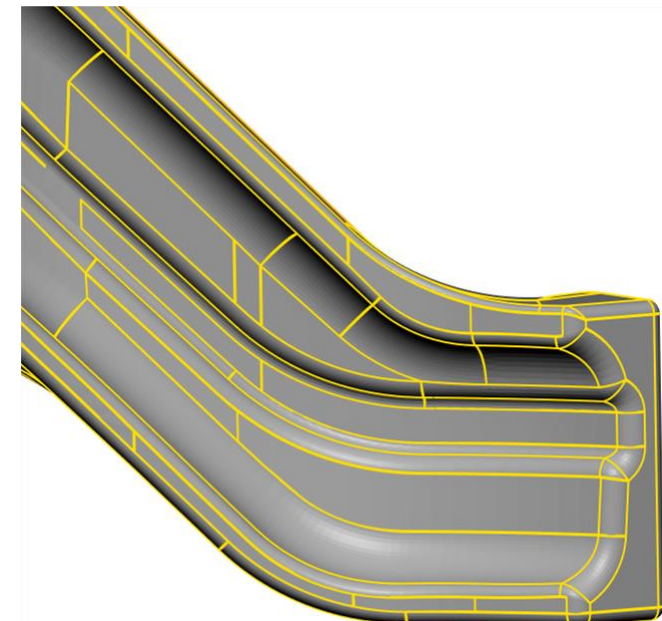
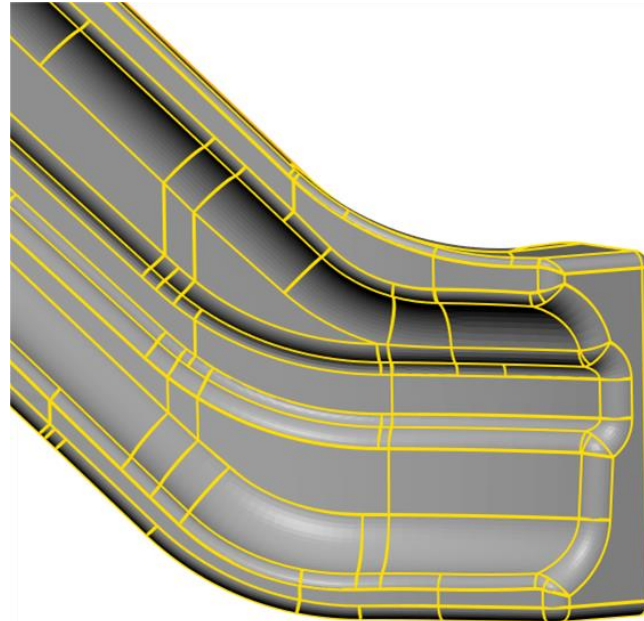
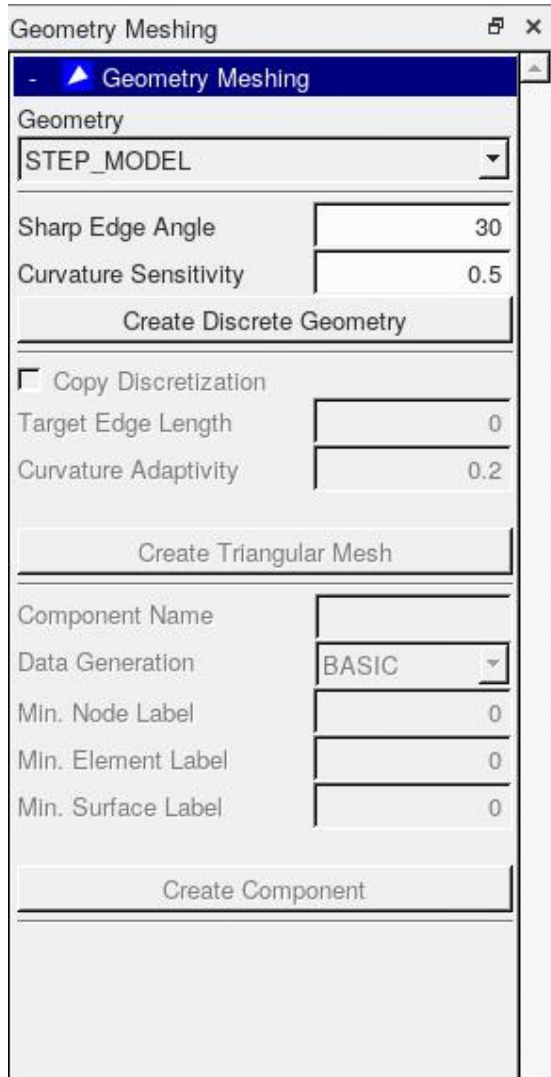


<https://grabcad.com/challenges/ge-jet-engine-bracket-challenge>

- Hohe Auflösung, jede Geometriefläche ist aufgelöst und mit Referenzen zu Geometrieformdaten versehen
- Erkennung von Merkmalen zur Kennzeichnung der Kanten von Geometrieflächen, die bei der Vernetzung erhalten bleiben sollen (oder auch nicht: a priori Modellvereinfachung)

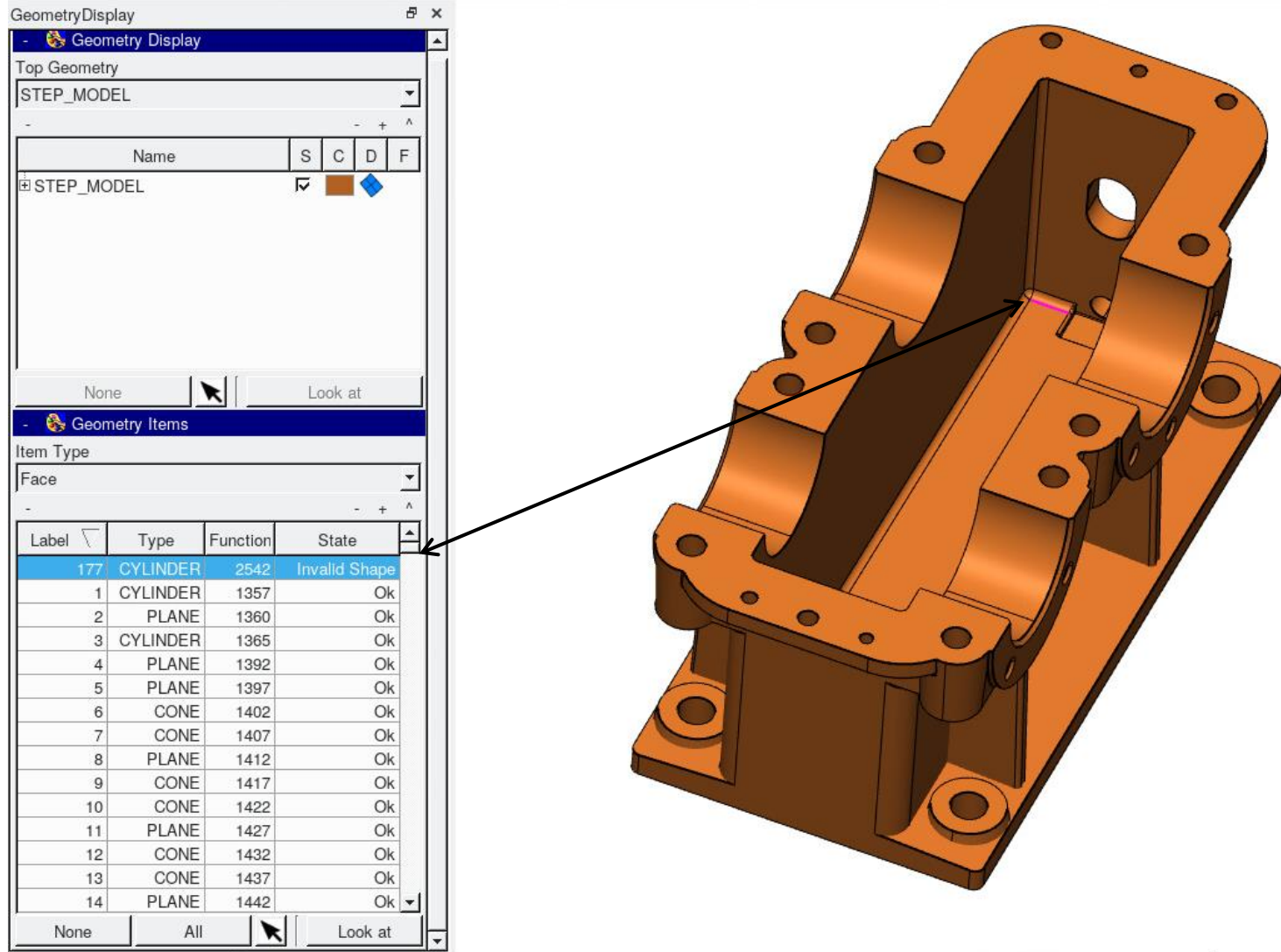


# Diskrete Geometrie II

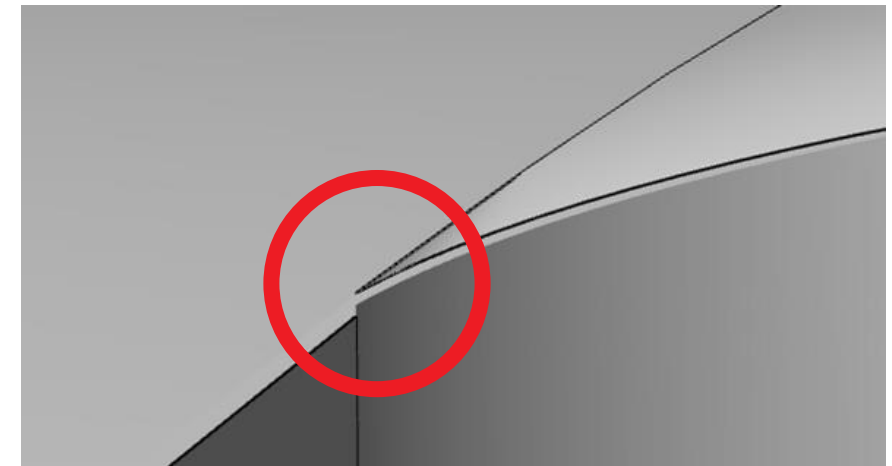


- Diskrete Geometrie: Ein geschlossenes, gut orientiertes und partitioniertes Referenznetz
- Hohe Auflösung, jede Geometriefläche wird aufgelöst, Referenzen zu Geometriedaten werden gespeichert
- Merkmalerkennung, um zu entscheiden, ob die Kanten der Geometrieflächen bei der Vernetzung erhalten bleiben sollen oder nicht (a priori Modellvereinfachung)

# Geometrie Darstellung

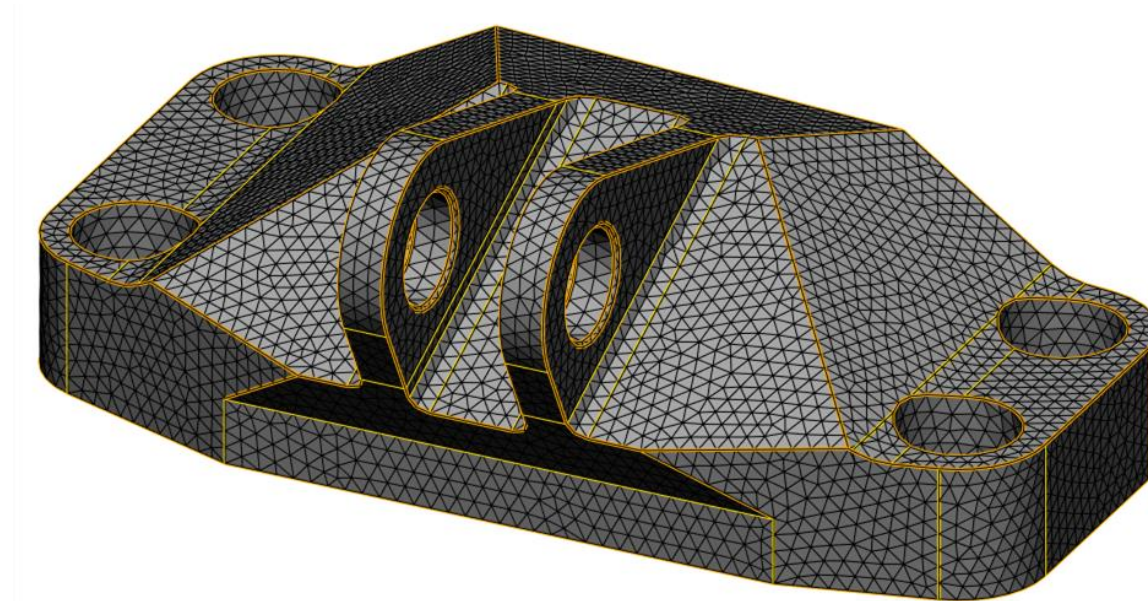
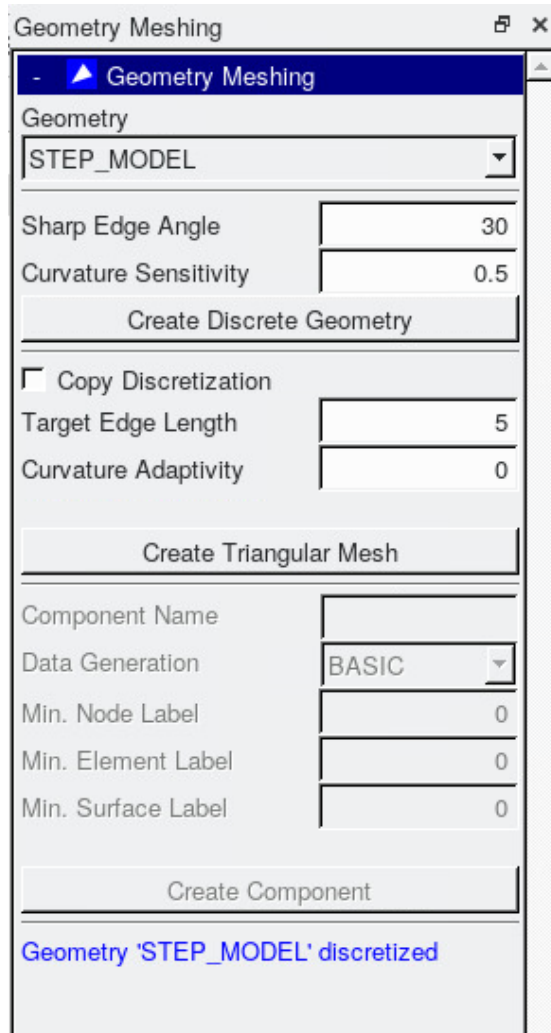


- Schattierte, Drahtgitter- oder schattierte / Drahtgitter-Darstellung, wie von FE-Modellen bekannt
- Tabellen listen Formdatenelemente auf, einschließlich Informationen über ungültige Elemente, z.B. degenerierte Flächen
- Zeigt das Modell 'wie es ist', also auch geometrische Abweichungen von topologischen Elementen:



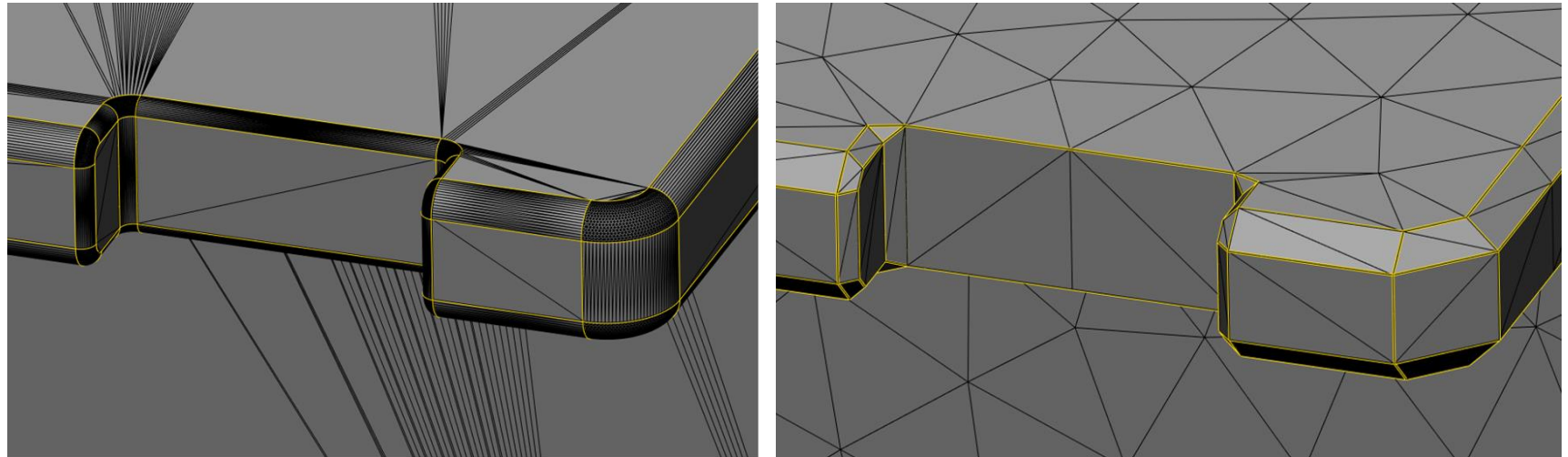
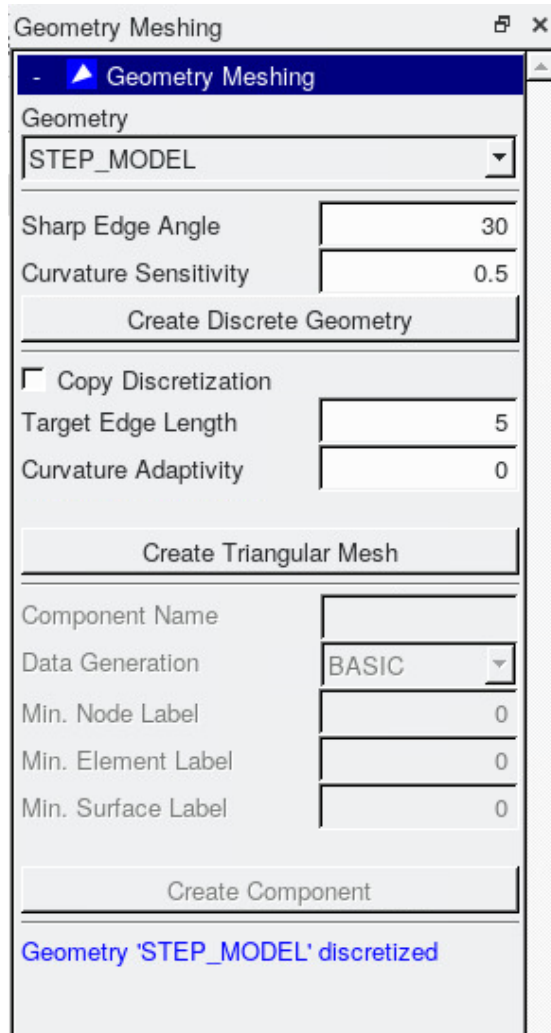


# Dreiecksnetz I



- Dreiecksnetz: Neu vernetztes Dreiecksnetz, das die angestrebte Kantenlänge und die für die FE-Analyse geeigneten Dreiecksformen anstrebt
- Lockerung der Merkmalsbeschränkungen, wo erforderlich (a posteriori-Modellvereinfachung)
- Optionale Netzverfeinerung in Regionen mit starker Krümmung

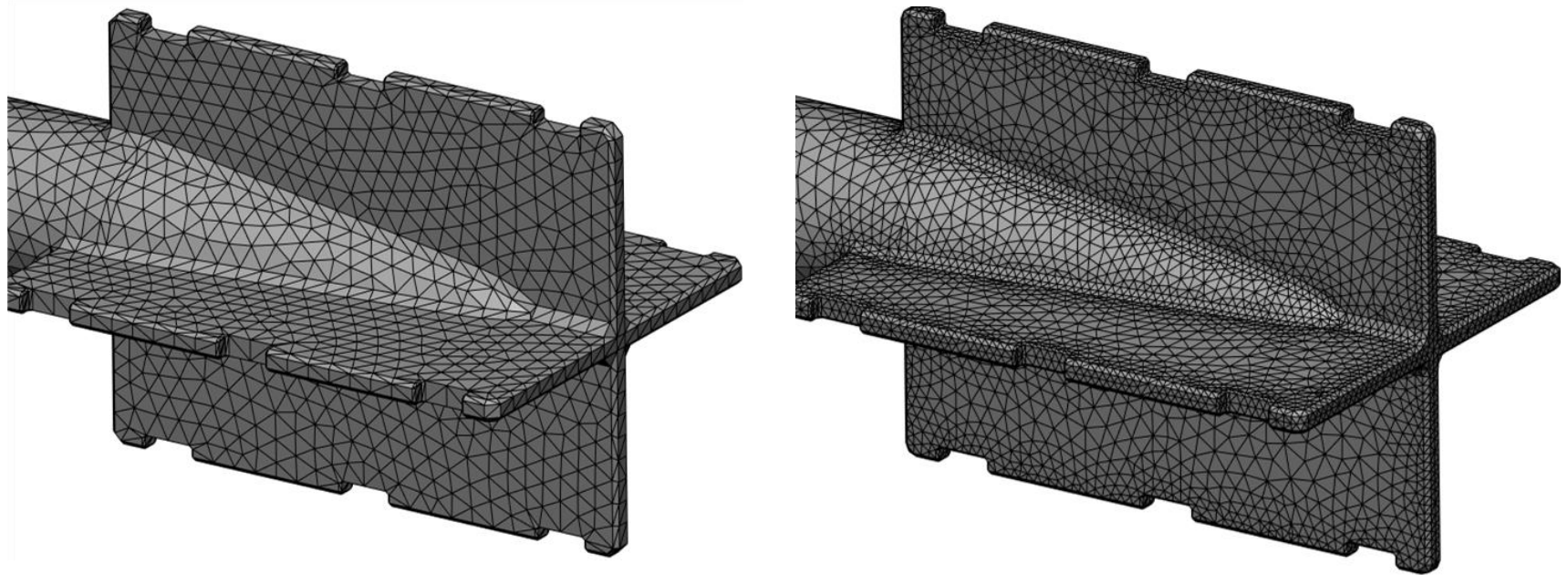
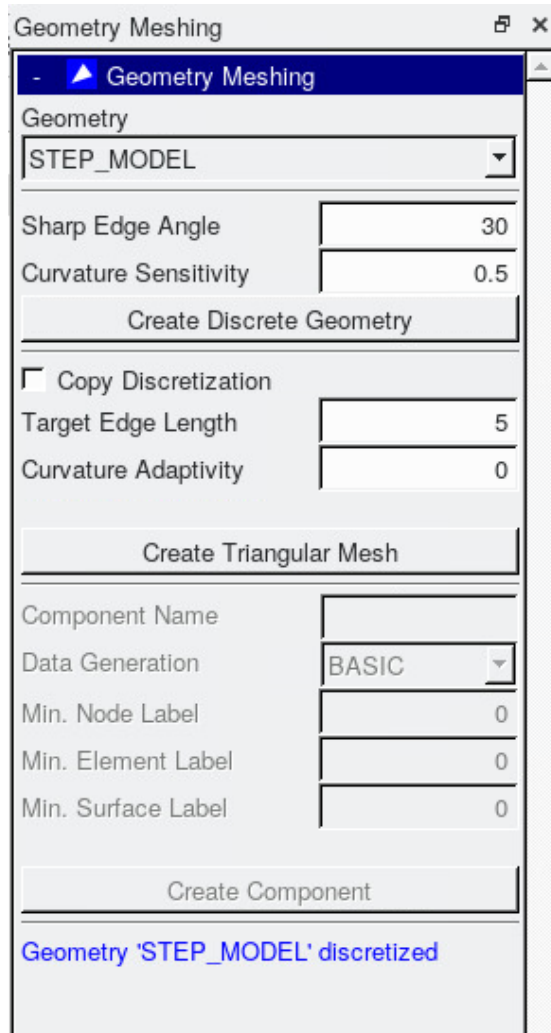
# Dreiecksnetz II



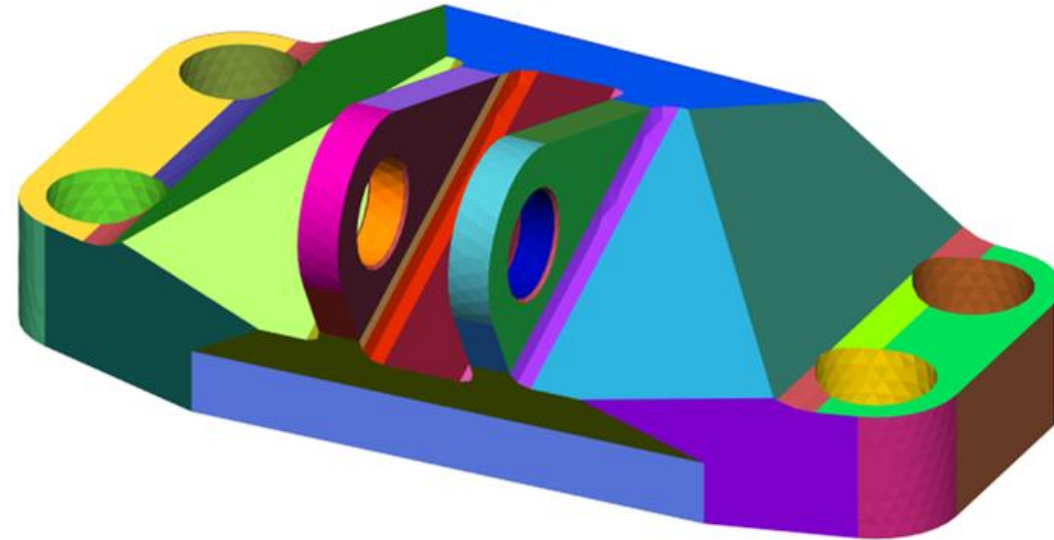
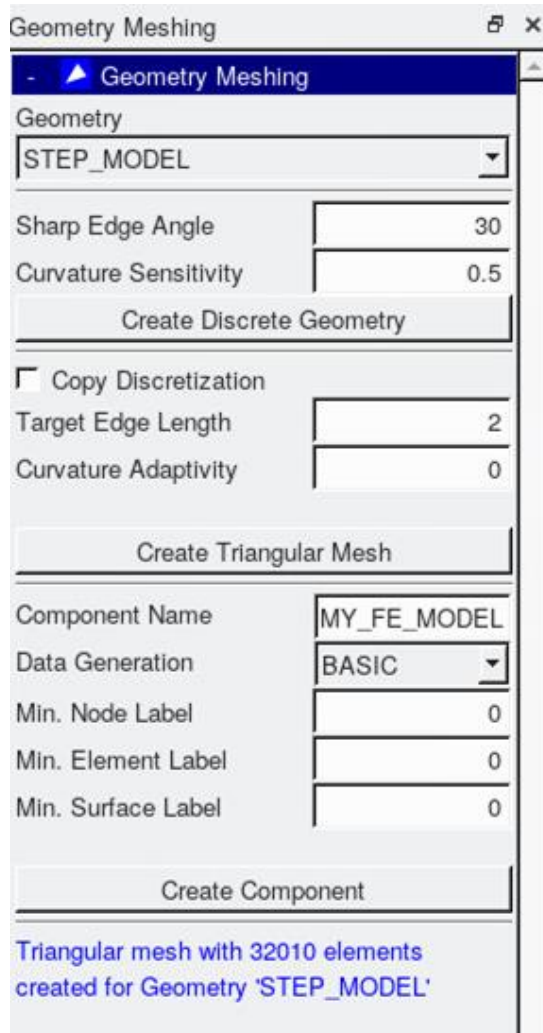
- Dreiecksnetz: Neu vernetztes Dreiecksnetz, das die angestrebte Kantenlänge und die für die FE-Analyse geeigneten Dreiecksformen anstrebt
- Lockerung der Merkmalsbeschränkungen, wo erforderlich (a posteriori-Modellvereinfachung)
- Optionale Netzverfeinerung in Regionen mit starker Krümmung



# Dreiecksnetz III



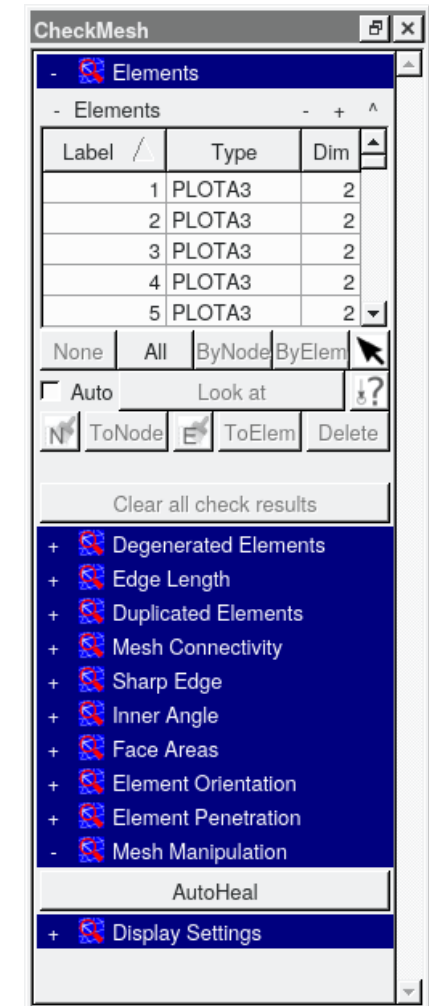
- Dreiecksnetz: Neu vernetztes Dreiecksnetz, das die angestrebte Kantenlänge und die für die FE-Analyse geeigneten Dreiecksformen anstrebt
- Lockerung der Merkmalsbeschränkungen, wo erforderlich (a posteriori-Modellvereinfachung)
- Optionale Netzverfeinerung in Regionen mit starker Krümmung



- Komponente: Speichert Dreiecksnetz als FE-Modell mit verschiedenen Ebenen der zusätzlichen Datengenerierung
  - **NONE**: Speichert nur Knoten und Elemente
  - **BASIC**: Hinzufügen von Formreferenzen und Elementsets für Schalen und Volumenkörper
  - **EXTENDED**: Hinzufügen von Elementsets für die wichtigsten Oberflächenteile, die Ebenen und Zylinder darstellen.
- Vereinfachte Modellvervollständigung mit Lasten und Randbedingungen

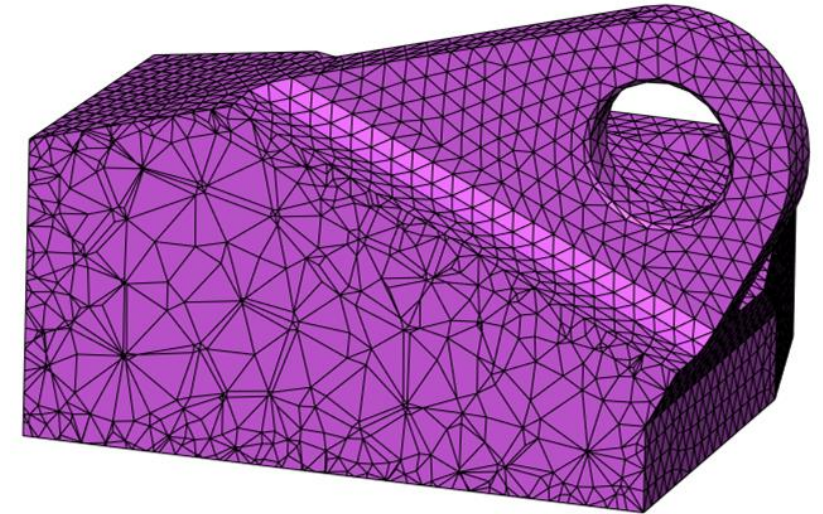
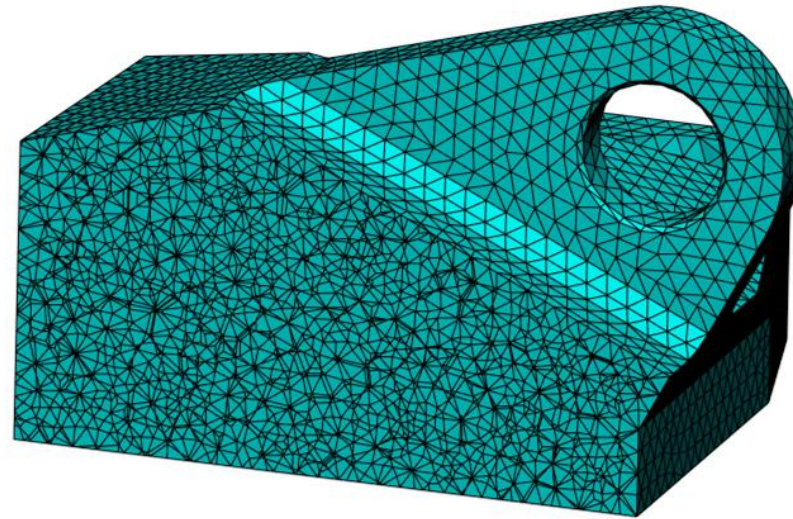
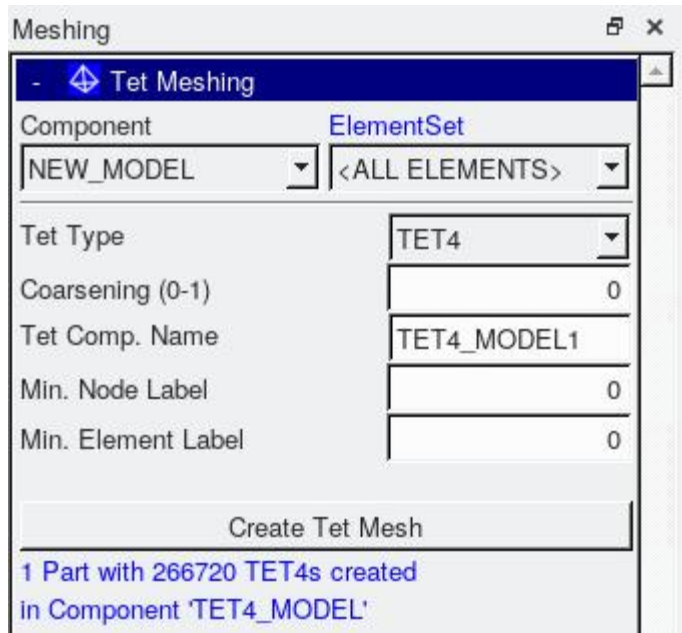
# Check Mesh

- Check Mesh: Umfassendes Werkzeug zum Analysieren und Korrigieren des Oberflächennetzes
- Am Wichtigsten: Schließen von Löchern, die durch fehlende oder degenerierte Flächen in der Geometrie entstehen
- In seltenen Fällen: Neuvernetzung von kleinen Flächen mit durchdringenden Oberflächennetzdreiecken
- In der Regel keine Probleme mit Design Space Geometrien





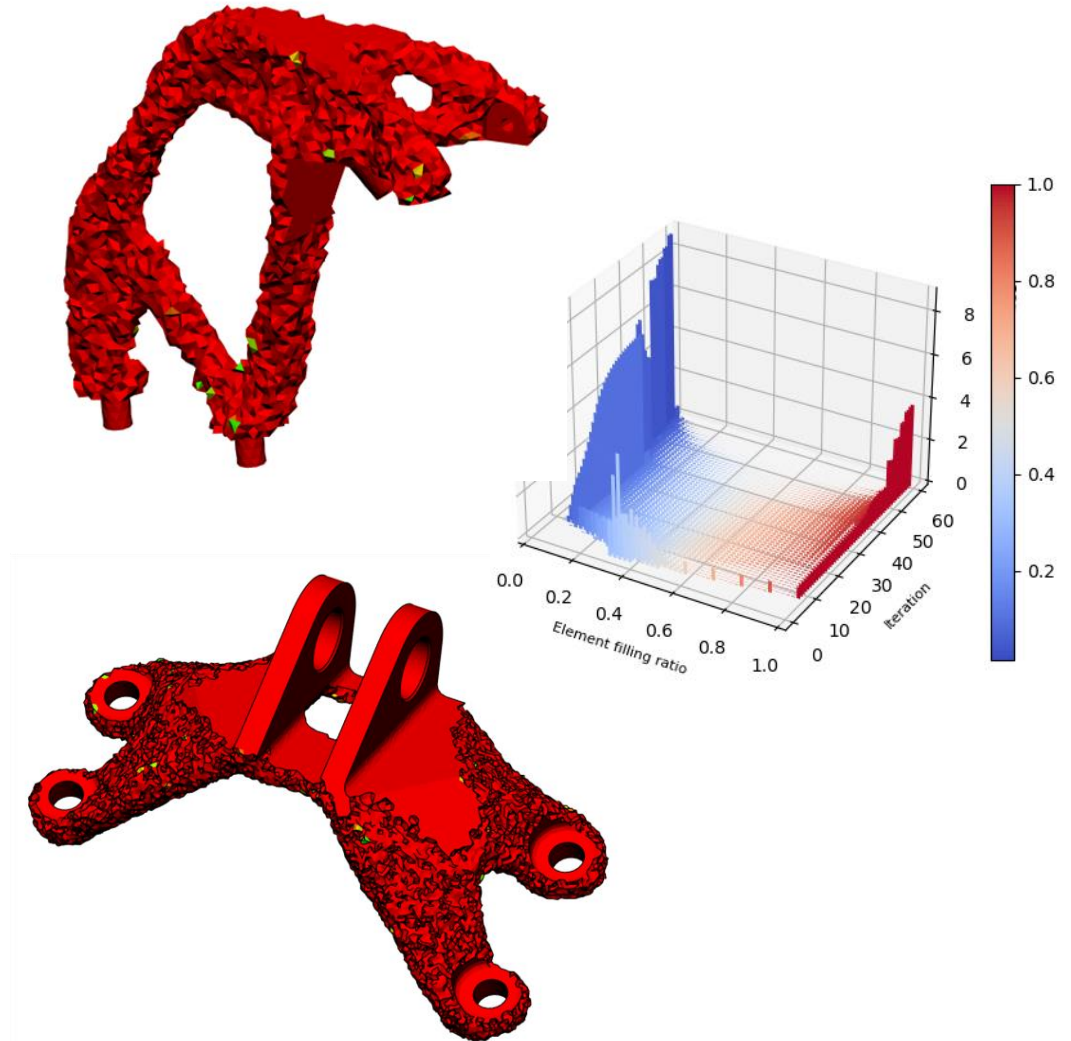
# TET Mesh



- TET-Netz: Erzeugt ein TET-Netz aus einem gegebenen Oberflächennetz entweder mit **TETGEN** (Standard) oder **NETGEN** (alternativ)
- Übermittlung zusätzlicher Daten (Formreferenzen, Elementsets als Flächen)
- Optionale Vergrößerung des Netzes im inneren Volumen (nicht empfohlen für Topologieoptimierung!)

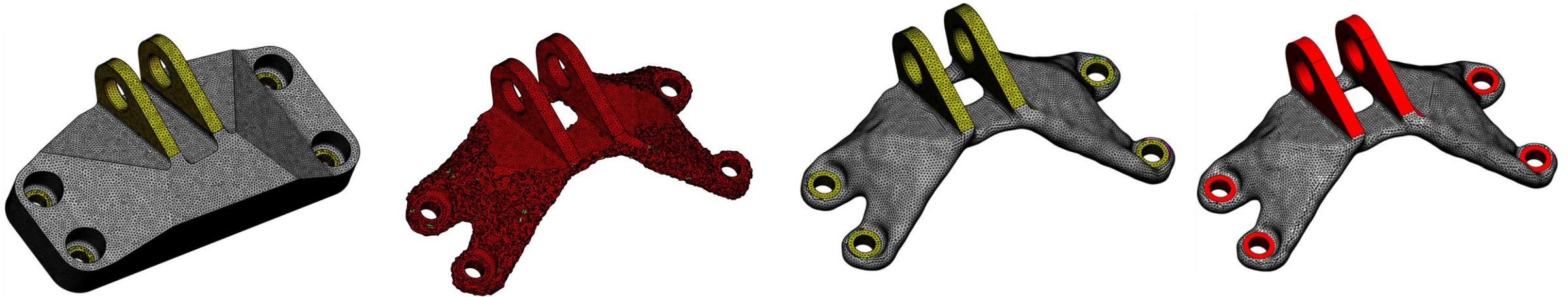
# Post Processing für Optimierung

- Vorläufiger Schwerpunkt auf Post-Processing zur Topologieoptimierung
- Anwendung auf Bauteilkonstruktion, andere Themen (z.B. Rippenkonstruktion) sind Gegenstand zukünftiger Entwicklungen
- Erweiterung des VisPER Design Wizard in zwei Schritten:
  - Erzeugung von 'hybriden' Geometrien, die aus der exakten parametrischen Repräsentation unveränderter Oberflächen des Designraums und einer approximativen Repräsentation neu generierter Oberflächen als Triangulation bestehen
  - Konvertierung der neu erzeugten Flächen in parametrische CAD-Flächen





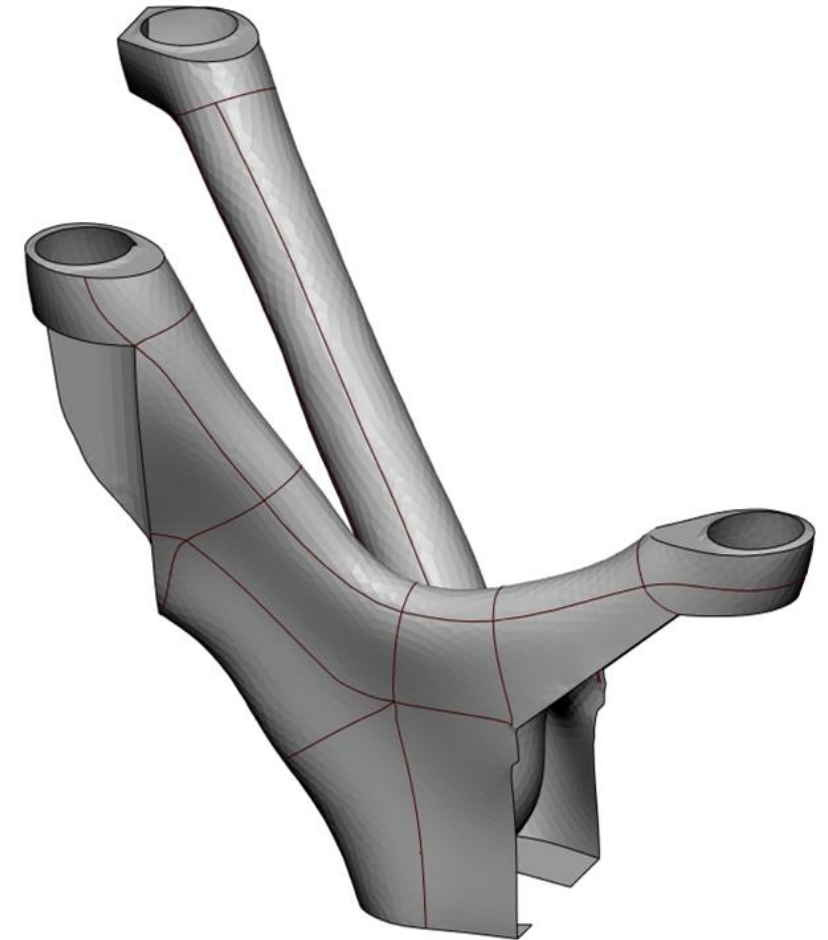
# Schritt 1: Erstellung einer hybriden Geometrie



- TET-Netz des Entwurfsraums, aufgeteilt in Entwurfs- und Nichtentwurfsbereich (oder "eingefrorener" Bereich)
- Übertragung von Formreferenzdaten auf das CAD-Modell des Konstruktionsraums vom TET-Netz auf das extrahierte Flächennetz während der Hüllengenerierung im Design Wizard
- Automatische Erkennung von vollständig erhaltenen Flächen des CAD-Modells im Konstruktionsbereich
- Ersetzen des Oberflächendreiecksnetzes durch ursprüngliche CAD-Flächen und Zusammenfügen mit neuen (triangulierten) Flächen

# Schritt 2: Oberflächenparametrisierung

- Der Schlüssel zur Konvertierung eines Flächennetzes (oder Teilen davon) in parametrische CAD-Flächen liegt in der Unterteilung der Fläche in ein Quad-Layout, d.h. in viereckige Flächen, die
  - in moderater Anzahl (editierbar!)
  - gut auf Hauptrichtungen, Merkmale und Begrenzungen ausgerichtet sind
  - vorzugsweise "konform", wodurch das Auftreten von T-Fugen vermieden wird
  - Hervorragend geeignet für die Anpassung von Splineflächen



*Quad Layout of a surface mesh*

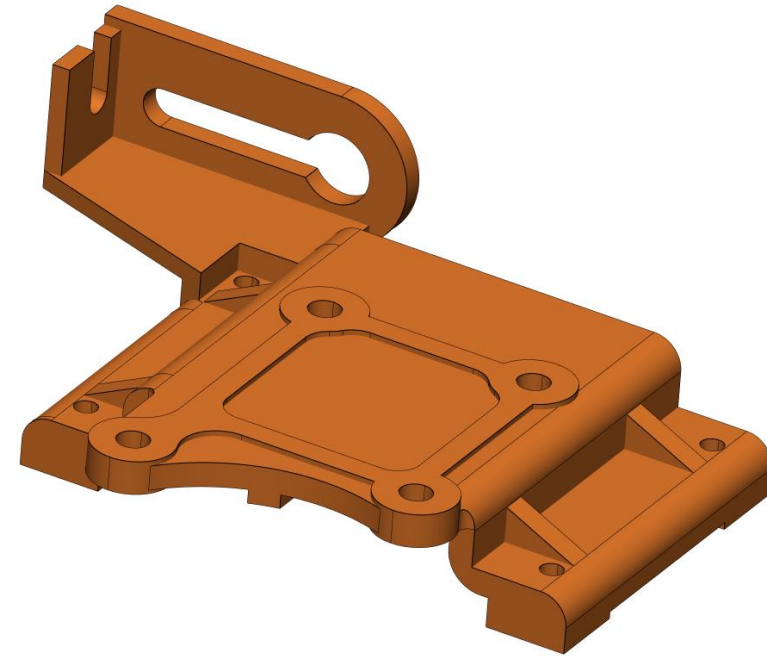
# Use Case - Geometry Meshing Demo

Das CAD Modell wurde von

Dr. Jaswinder Singh Saini,  
Associate Professor,  
Mechanical Engineering Department,  
Thapar Institute of Engineering and Technology  
(Deemed University)

freundlicherweise zur Verfügung gestellt.

Sachin Kalsi, Daljeet Singh, J. S. Saini:  
*Optimization of Compressor Mounting Bracket  
of a Passenger Car,*  
<https://doi.org/10.1007/s40032-018-0453-7>  
J. Inst. Eng. India Ser. C



- Geometrieverarbeitung in PERMAS/VisPER V19 zur Optimierung:
- Datenmodell für BRep-Geometrien in PERMAS Oberflächen- und TET-Vernetzungsfunktionen für Solid Strukturen in VisPER
- Automatische Verknüpfung zwischen FE-Modell und der zugrunde liegenden CAD-Geometrie  
Erstellung von 'hybriden' Geometrien während der Nachbearbeitung von Topologieoptimierungsergebnissen
- Derzeit in Arbeit: Finalisierung der Parametrisierung von Oberflächennetzen und Erstellung von CAD-Flächen
  - Verfügbar ~Oktober 2022

- <https://www.intes.de/edu>
- <https://www.researchgate.net/project/PERMAS4EDU>

Besuchen Sie unseren Stand in der Ausstellung

### PERMAS *for Education*

PERMAS is one of the worldwide leading Finite Element software systems for the solution of complex analysis tasks in research and industry.

PERMAS covers a wide spectrum of application areas like static analysis, dynamics, temperature fields and fluid-structure acoustics.

Many outstanding properties like


- fast solvers,
- exact and fast contact analysis,
- many nonlinearities,
- integrated optimization for topology, shape, sizing, sampling (DOE), and reliability analysis,
- Interfaces: VisPER, ANSA, ABAQUS, NASTRAN, MEDINA, HyperWorks, NX.

**FE process chain**  
from mesh to evaluation,  
on Windows and Linux.

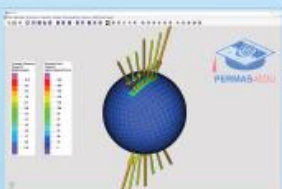
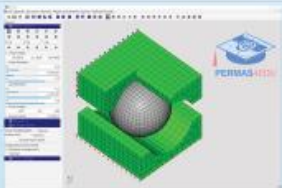
**Free-of-charge for**  
education and further training,  
no commercial use permitted.

**Limited model sizes, e.g.**  
16,000 nodes, 32,000 elements,  
65,000 degrees of freedom.

**How to get the software?**  
By registration on:  
[www.intes.de/edu](http://www.intes.de/edu)



PERMAS4EDU



Mesh; STL;  
other FE formats

↓

Model  
(VisPER Pre)

↓

Analysis  
(PERMAS)

↓

Evaluation  
(VisPER Post)

INTES GmbH  
Breitwiesenstr. 28  
D-70565 Stuttgart  
[www.intes.de/edu](http://www.intes.de/edu)