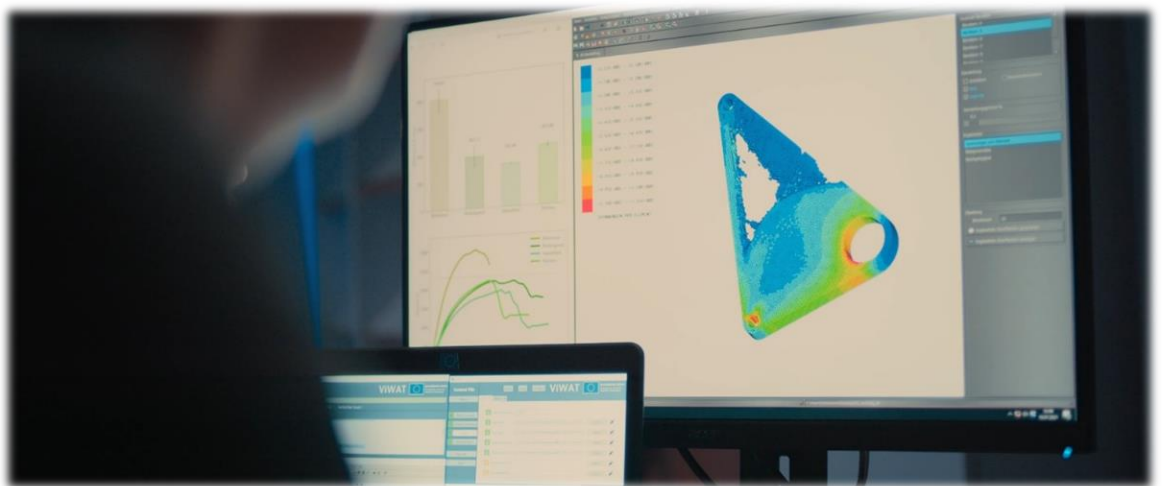




**25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag**  
**am 11. September 2024**

**25** **K-TAG**  
JAHRE



**Herausgeber:**

Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel

Dr.-Ing. Bettina Alber-Laukant

Dr.-Ing. Tobias Rosnitschek



## Inhalt:

**C. Von Andrian-Werburg, K. Raab:** *Neuigkeiten / Produktausblick PTC, Live Präsentationen PTC Creo Ansys, PTC Creo 11 & Creo+.*

**S. Nessler:** *MBD & ISO-GPS in Creo Parametric, so funktioniert es.*

**F. Hüter:** *FEA mit Z88 – Einsatz in Wissenschaft und Praxis.*

**T. Pampel:** *Effiziente CAM-Programmierung in Zusammenspiel mit dem digitalen Zwilling.*

**P. Robl:** *3D-modellbasiertes Arbeiten als Voraussetzung für GenAI in CAD.*

**C. Thieme:** *Nexus: Cloud Computing und Datenaustausch leichtgemacht.*

**R. Passmann:** *Detaillierte Betrachtung der Simulation der Additiven Fertigung.*

**P. Straetemans:** *Modellierung und Simulation – Eine Plattform als kollaborativer Ansatz für Design und Simulation.*

**A. Kormann:** *Python in Aktion: Automatisierung in der Produktentwicklung.*

**G. Hannig:** *25 Jahre Simulation im Federumfeld – von der linearen Statik zum KI-basierten digitalen Zwilling.*

**M. Probst:** *Vom Wunschergebnis zur Lösung in Minuten – In Minuten zu funktionalen CAD-Konzeptentscheid mittels Machine Learning.*

**C. Stautner:** *Wie man mit Simulation Zeit und Ressourcen spart.*

**H.-W. Theobald:** *3D-Metalldruck in der Praxis – typische Missverständnisse und wie sie sich vermeiden lassen.*

**S. Nessler:** *Creo Parametric mit Startup TOOLS und Freeware für Anwender, Azubis oder Studenten.*

**R. Passmann:** *Anwendungen zur Demokratisierung der Simulation.*

**R. Steinhart, C. Seifert:** *Methode zur Topologieoptimierung eines Radträgers.*

**K. Raab:** *Creo 11.0 Deep dive – Tipps & Tricks.*

**P. Grohmann:** *Parallel Computing für KMU: Die Erweiterung von Z88 im Gate2HPC-Projekt.*

**F. Hüter:** *FE-Modellbildung und Simulation hyperelastischen Materialverhaltens.*

**F. Hüter, J. Wittmann:** *Statische Reduktion von FE-Strukturen nach Guyan – Effizienzsteigerung durch den Schur-Komplement-Ansatz.*

**R. Löffler:** *Flexibel installierte Drähte mit Formgedächtnis – Eine alternative Aktorik für kompakte Bauräume?*

**J. Wittmann:** *Modal- und Frequenzganganalyse interagierender Bauteilkomponenten am Beispiel einer Elastomer-Gelenkwelle und eines Industriegetriebes.*





# 25 Jahre K-Tag

Eine kleine Chronik

Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Reinhard Hackenschmidt i.R.



## 1998

### Die neue Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften

- Berufung des Lehrstuhls Konstruktionslehre und CAD => Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg
- Beginn der Vorlesung Mitte Oktober 1998
- Alles neu: die Baustelle





## 1999

### Einrichtung des Lehrstuhls

- Versuchshallen => Verspannungsprüfstände
- Eigene Werkstatt
- Lehrveranstaltungen => Ausbildung Inhalte und Werkzeuge
- Meilenstein: erster Lehrstuhl in Deutschland mit 3D CAD für ALLE Studierende
- Mitarbeiter Akquise



# Wie alles in Bayreuth anfang ...



## 1999

### Einrichtung des Lehrstuhls



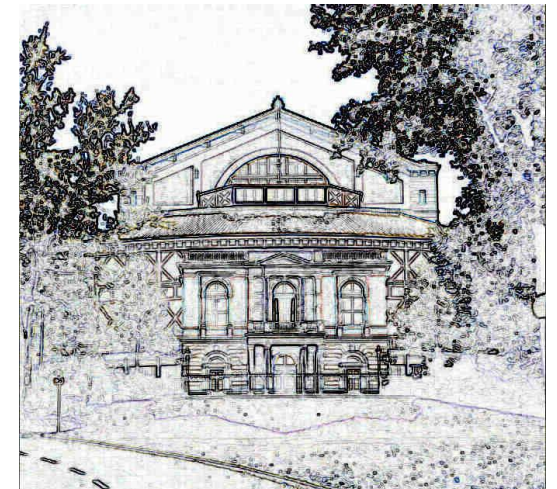




## 1999

### Problem

- Staatliche Zusatzaufgabe: Refinanzierung durch Drittmittelinwerbung
- => Bayreuth kennt keiner
- => Bayreuth als Ingenieurstandort unbekannt
- Abhilfe => Infoveranstaltung für die Industrie

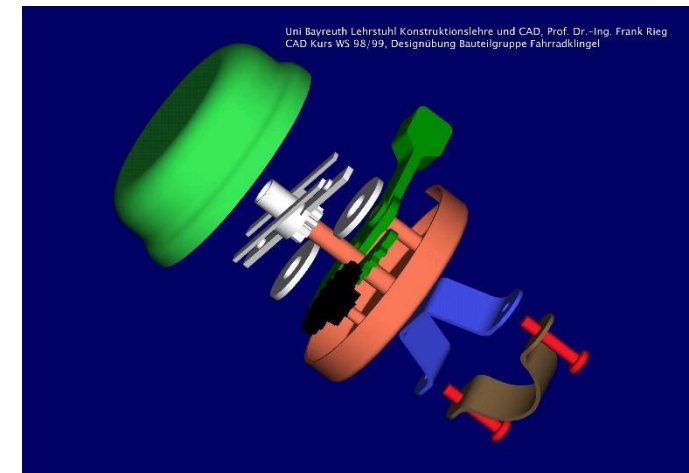




## 2000

### Die Lösung: Der Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

- Wir bringen Anwender und Anbieter von innovativen digitalen Lösungen für den Produktentwickler zusammen
- Neutrale Plattform
- Kostenlos
- Ein Tag
- All you can eat and drink





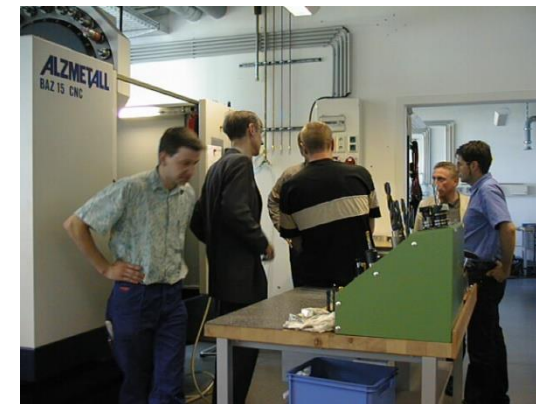
## 2000

### Die Sisyphusarbeit

- Anwender finden => Datenbank Firmen
- Anbieter finden: PTC
- Räumlichkeiten
- Termine
- Vortragende
- Verpflegung



# Der erste K-Tag am 17.5.2000









23.5.00

## Schulung ist das A und O

Erstes Anwendertreffen für dreidimensionale CAD-Programme an der Uni Bayreuth

### BAYREUTH

Längst überfällig war es laut Meinung der Teilnehmer: ein regionales Treffen von Anwendern des 3D-CAD-Programmes Pro/Engineer und seiner Schwesternprogramme. Der Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD machte es nun möglich: Anwender aus ganz Franken trafen sich an der Uni Bayreuth, um Erfahrungen auszutauschen.

„Computer-Aided-Design“ (CAD), „Rapid Prototyping“ und „Computer-Aided Manufacturing“ (CAM) sind Begriffe, an denen viele Konstrukteure und Produzenten heute kaum noch vorbeikommen. Es geht darum, mit Hilfe des Computers eine durchgängige Prozesskette von der Idee bis zur Produktion zu schaffen. Eines der am häufigsten genutzten Programme zur dreidimensionalen Konstruktion ist Pro/Engineer. Unmittelbar verbunden mit Pro/Engineer ist Pro/Mechanica, mit dem die Belastbarkeit auch komplexer Konstruktionsteile berechnet werden kann. Im Anschluss daran erlaubt Pro/Manufacturing die Simulation der Fertigung an der Maschine.

Prototypen können mit Hilfe eines besonderen Druckers hergestellt werden. Er verwendet Plastik statt Tinte. Schicht für Schicht baut er auf der Basis

der 3D-CAD-Daten innerhalb kurzer Zeit das dreidimensionale Modell auf, das nun auf Verbesserungsmöglichkeiten hin überprüft werden kann.

Die Vorträge und Workshops der Firmen und des Lehrstuhls für Konstruktionslehre und CAD machten deutlich, wie vielfältig und flexibel die Anwendungsmöglichkeiten sind. Sie zeigten, dass im Vergleich zur Neuentwicklung von Produkten nach herkömmlichen Verfahren die Entwicklungszeit um mindestens die Hälfte gesenkt werden kann. Es wurde aber auch klar, wie wichtig eine adäquate Schulung der Anwender ist. „Häufig wird die Software eingeführt, es wird aber nicht daran gedacht, die Mitarbeiter ausreichend zu schulen“, berichtete Dr. Klaus Dibbern vom Beratungs- und Schulungsunternehmen Denc AG aus Darmstadt.

Manfred Gerkens von der Volkswagen Coaching GmbH beobachtet bei den Schulungen von Volkswagenmitarbeitern: „Dreidimensionales Denken bereitet große Schwierigkeiten.“ Umso wichtiger ist es, dreidimensionales Konstruieren so früh wie möglich zu lernen. Aber: „Neben der Technischen Universität Darmstadt lernen Studierende nur an der Uni Bayreuth schon von Anfang an, dreidimensional am Computer zu konstruieren“, so Professor Frank Rieg vom Lehrstuhl für Konstruktionslehre

und CAD über die Situation der Ingenieurausbildung in Deutschland. An seinem Lehrstuhl lernen schon Studienanfänger sämtliche Schritte von der Entwicklung einer Idee bis zur Fertigung. Ein Schwerpunkt ist die Finite-Elemente-Analyse, mit der die Belastbarkeit der Konstruktionen berechnet wird. Rieg hat dazu ein Programm (Z 88) entwickelt, das Anwendern kostenlos zur Verfügung gestellt wird.

Nach dem Treffen zeigten sich die Organisatoren sehr zufrieden. „Obwohl es die erste derartige Veranstaltung in Franken war, sind 37 Firmen gekommen“, freut sich Reinhard Hackenschmidt, akademischer Rat am Lehrstuhl von Professor Rieg. Jetzt sollen solche Treffen zwei- bis dreimal im Jahr stattfinden. Immer wieder ging es in den Gesprächen nicht nur um technische, sondern um organisatorische Fragestellungen: Wie lässt sich eine Prozesskette optimieren? Wie können Teams koordiniert werden, die an verschiedenen Orten an der Entwicklung eines neuen Objektes arbeiten? „Unser Lehrstuhl plant deshalb jetzt einen oberfränkischen Konstrukteurtag“, so Hackenschmidt. Dort soll es nicht nur um ein Produkt wie Pro/Engineer gehen, sondern um verschiedene Software- und Hardware-Angebote sowie weitere Themen aus allen Bereichen der Konstruktion. mon



## Ein voller Erfolg

- Entwicklung zur Traditionsveranstaltung
- Von 5 auf bis zu 30 Vorträge. Von Orgelbau bis Märklin Eisenbahn.
- Von 1 auf 3 Hörsäle + Workshops
- Von 37 auf >230 Anwender
- Von 2 auf > 10 Anbieter





## Danke

- An alle Teilnehmer und deren Firmen
- An die Aussteller, die immer treu zu uns gehalten haben
- An den Lehrstuhl und dessen Mitarbeiter. Besonderen Dank an Frau Lackner, der Seele der K-Tages.
- An die Universität

## Alles Gute für die Zukunft



## P.S.

- Es sind 25 K-Tage, da im Anfang 2 pro Jahr durchgeführt wurden
- Es wurde dem Lehrstuhl 1999 untersagt die Veranstaltung ProUser Tag zu nennen
- Der Lehrstuhl erwirtschaftet keinen Gewinn mit der Veranstaltung. Alle Einnahmen werden in Essen und Trinken umgesetzt. Gewinne müssten an die Universitätsverwaltung abgeführt werden.

# 52 K-TÄG

JAHRE

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag



INTRODUCING



creo® 11



ptc

**INNEO**®  
That's IT.





DIGITAL TRANSFORMS PHYSICAL

# Christoph von Andrian-Werburg

*Director CAD Sales*

*PTC Parametric Technology GmbH*  
***candrian@ptc.com***

*+49 151 19548852*



# Klaus Raab

*Anwendungsberater*

*INNEO Solutions GmbH*  
***kraab@inneo.com***

*+49 7961 890 146*



**INNEO<sup>®</sup>**

**That's IT.**



# **CREO: *POWERING THE DIGITAL THREAD***

**Christoph von Andrian Werburg**  
*Director CAD Sales*



August 2024

# GLOBAL ENGINEERING CHALLENGES

Time to Market



Cost of Poor Quality



Product Innovation



**30%**  
of new product introductions *miss* time to market, quality and volume goals.





# DISRUPTIVE TECHNOLOGIES...

## AI



AI Materials

Generative Design

AI Security

AI Software Engineering

AI Analytics

## Data Agility



Data Sharing

Influencer Engineering

Metaverse

Blockchain

## Computing Advances



Simulation

Quantum Computing

IT Automation

Cloud

Self Integrating Apps

## Digital/Physical Convergence



Additive Manufacturing

Tech Stack Goes Physical

Design for Manufacturing



# DISRUPTIVE TECHNOLOGIES...

## AI



AI Materials

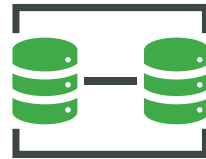
**Generative Design**

AI Security

AI Software  
Engineering

**AI Analytics**

## Data Agility



**Data Sharing**

**Influencer  
Engineering**

Metaverse

Blockchain

## Computing Advances



**Simulation**

Quantum Computing

IT Automation

**Cloud**

Self Integrating  
Apps

## Digital/Physical Convergence



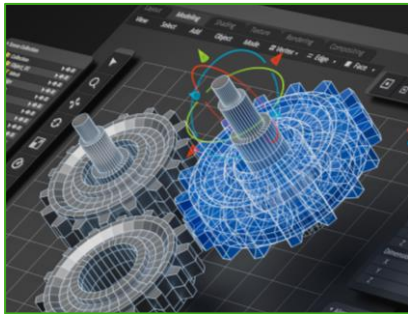
**Additive  
Manufacturing**

**Tech Stack  
Goes Physical**

**Design for  
Manufacturing**

# CREO'S FOUNDATIONAL MODEL-BASED STRENGTH

## Best-in-Class Parametric Modeling



## Best-in-class Robustness, Accuracy Associativity, Scalability



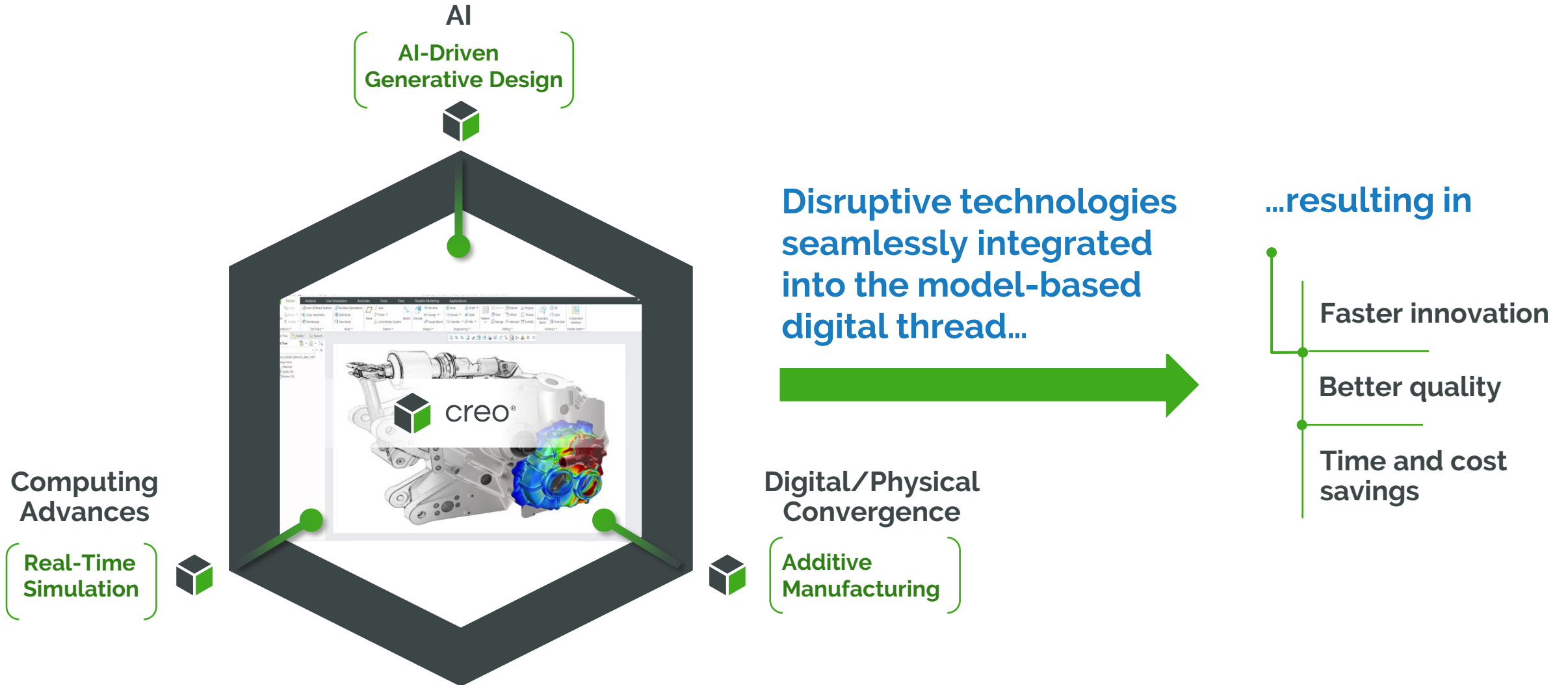
## Integrated design, simulation, and manufacturing solutions



## Breadth & Depth of Creo Capabilities

- 2D & 3D Concept Design Tools
- Parts & Assembly Modeling
- Automatic 2D Drawing Creation & Update
- Fully Semantic Model Based Definition
- Molded/Cast Part Design Tools
- Assembly Management & Performance Tools
- Parametric & Freeform Surface Design
- Multi-CAD Collaboration & Data Exchange
- Sheet Metal Part Design Tools
- Structural Framework & Weldment Design
- Photorealistic Rendering & Animation
- Direct Modeling with Creo Flexible Modeling
- Design Reuse & Automation
- Mechanism Design
- Volume Production & Mold Machining Capabilities
- Associative Mold & Die Design
- Broad Array of Simulation Technology for Engineers

# CREO TECHNOLOGY INTEGRATION





# CREO TECHNOLOGY & DEVELOPMENT STRATEGY

Only Creo delivers these technologies deeply integrating into the design environment...

...while delivering integral design, manufacturing & simulation capabilities supporting the entire digital and physical product lifecycle.

Real-Time Simulation  
Computing Advances

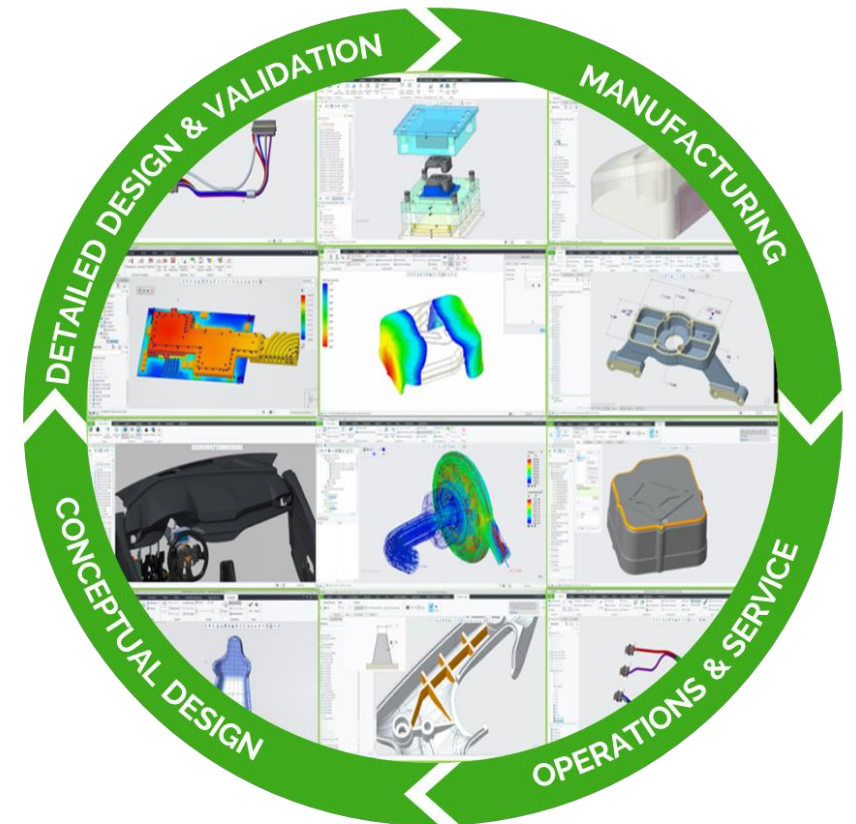


Additive Manufacturing  
Digital/Physical Convergence

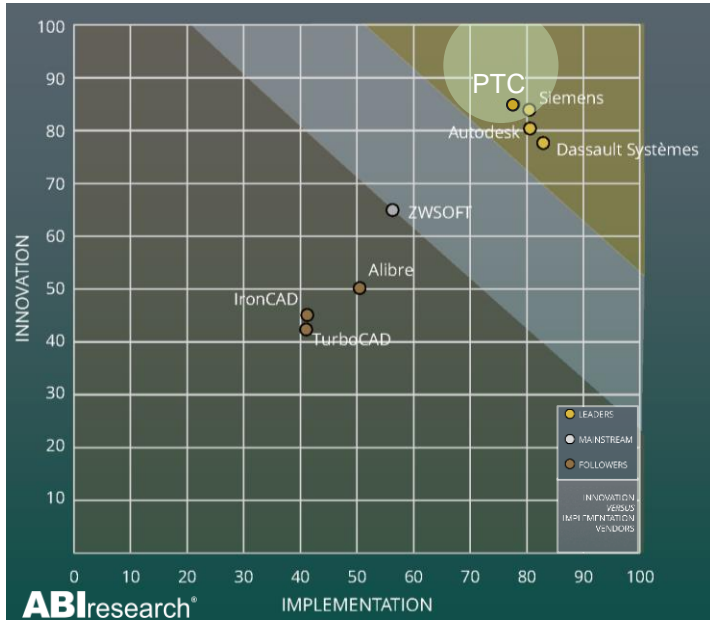
Generative Design

AI

AI-Driven Generative Design



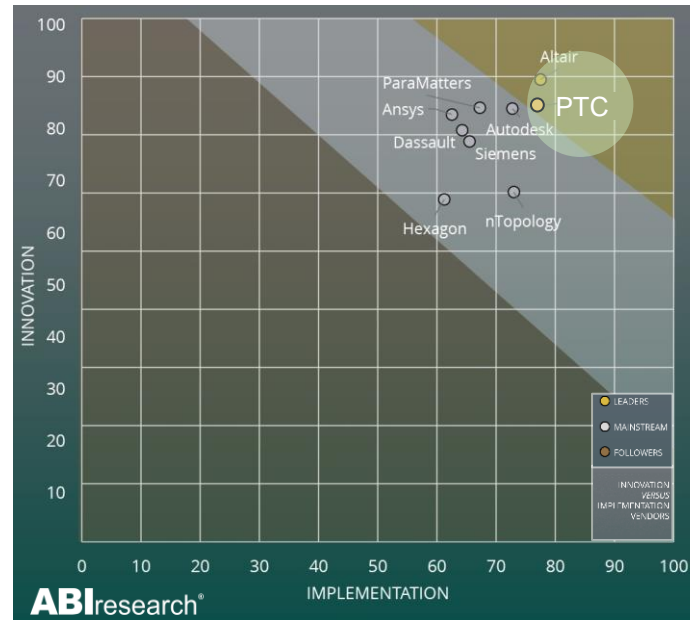
# ANALYSTS RECOGNIZE PTC'S CAD LEADERSHIP



2023

**ABI Research**  
MCAD for Large Enterprises  
and Manufacturing Scale

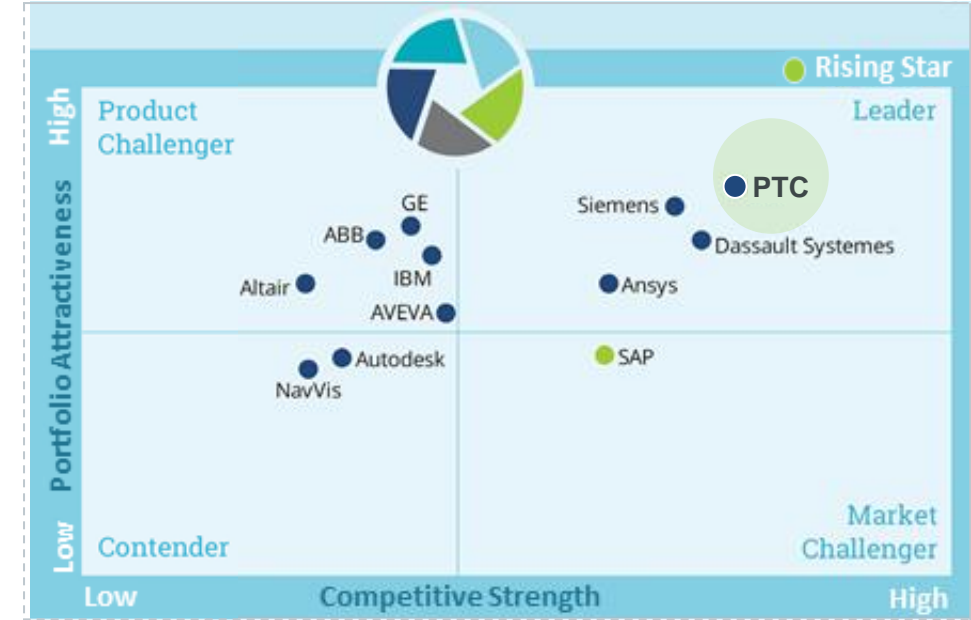
[Link to licensed report: ABI Research Names PTC #1 Innovator in CAD Competitive Matrix | PTC](#)



2022

**ABI Research** Matrix  
for Generative Design  
Software Solutions

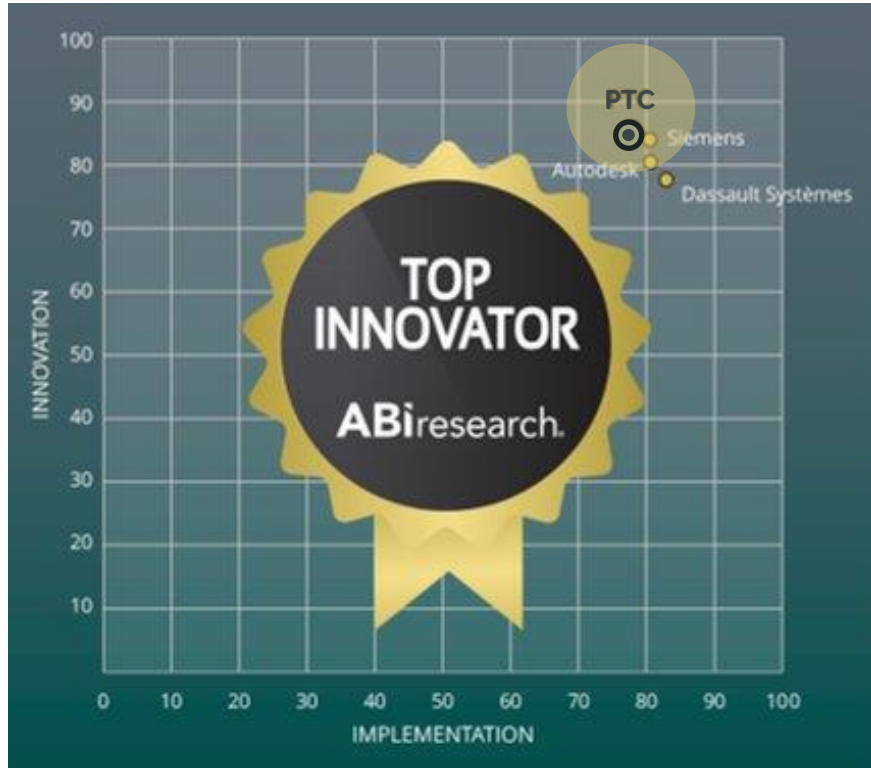
[Link to licensed report: ABI Research Names PTC a Leader in Generative Design Software | PTC](#)



2020

**ISG**  
Manufacturing Industry Services  
Manufacturing Virtualization Solutions

# CREO IS THE RECOGNIZED TECHNOLOGY LEADER



2023

**ABI Research's** inaugural MCAD SaaS for Large Enterprises & Manufacturing at Scale assessment

Creo and Creo+ recognized as a **Leader** and the **#1 Top Innovator** by independent research firm ABI Research

PTC *leads in innovation* with Creo and Creo+ due to both software offering the best service for integrated functions...

PTC is a *top implementer* with its best-in-class customer support and easy-to-use interface for new users.

Creo+ includes all the capabilities of Creo, plus cloud-based *real-time collaboration and license deployment* tools.

When making the transition to Creo+, *users can be up and running using their original on-premises Creo data files.*





INTRODUCING



creo® 11

Productivity & Usability  
Design for  
Electrification  
Design for Composites

Model-Based  
Definition  
Simulation Driven Design  
Design for Manufacturing





INTRODUCING



creo® 11

Productivity & Usability

Design for  
Electrification

Design for Composites

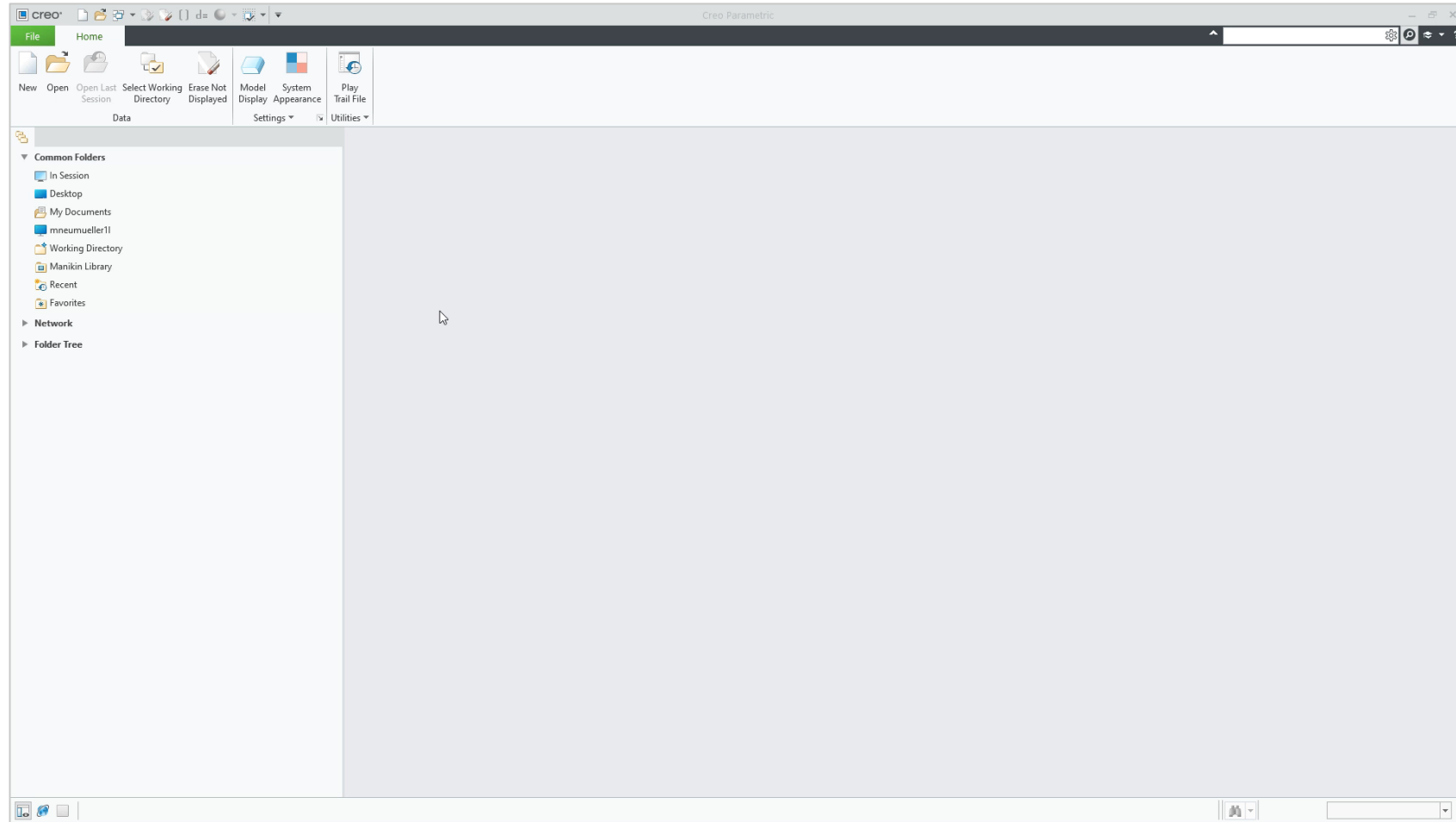
Model-Based  
Definition

Simulation Driven Design

Design for Manufacturing

## Usability

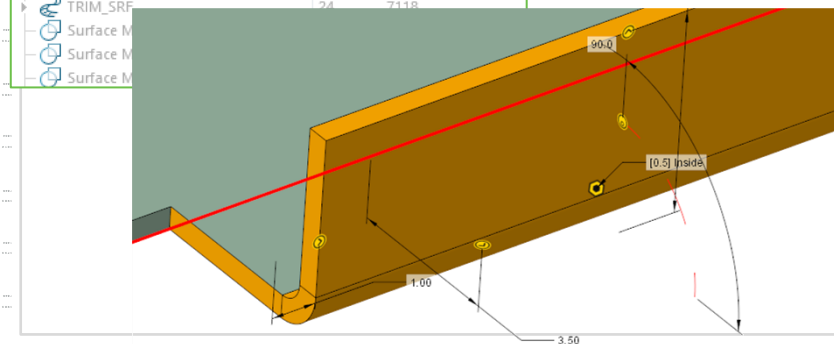
- Easily search and find settings in the options dialog
- Improved drag handles for feature dimensions
- Improved Model tree
  - Collapse/Expand behavior
  - Renaming



## Benefits:

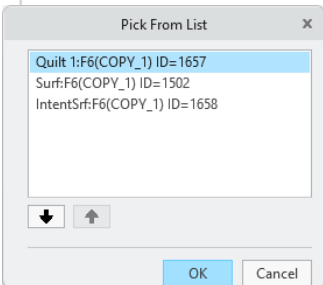
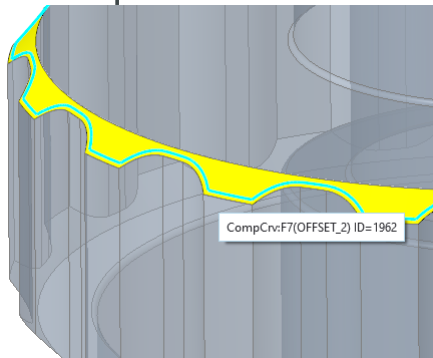
- Find relevant Creo option more quickly.
- Improved user experience
- Easier identification of controls for complex features

DTM1	14	642
Curve id 644	15	644
Surf		
Surf		
COP		
Surf		
Surface Merge id 717	21	717
TRIM_SRF	22	741
Curve id 4561	23	4561
TRIM_SRF	24	7118
Surface M		
Surface M		
Surface M		



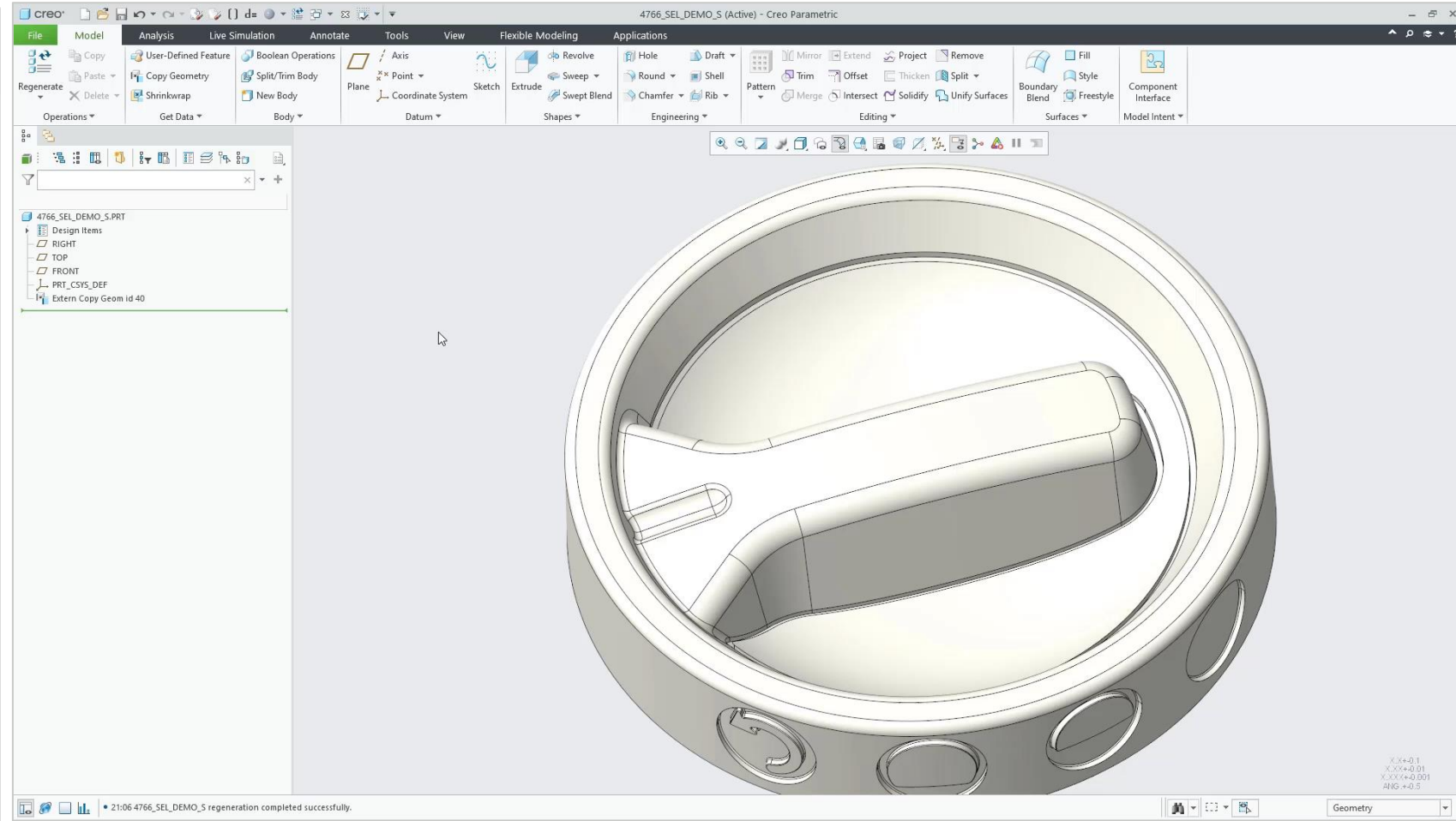
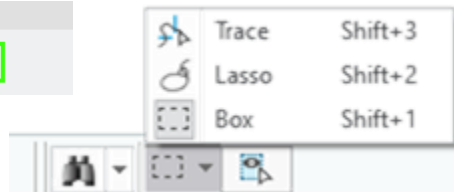
## Selection

- Box, Lasso & Trace Selection Support
  - New option to toggle between
    - Selection of all surfaces
    - Selection of visible surfaces only
- Selection priority for Quilts
- Improved composite curve



**Selection Priority**

Prioritize quilts over surfaces



## Benefits:

- Faster, more comfortable selection of many surfaces
- Easier workflows to ensure the more stable curve reference can be selected
- Configure surface selection to meet your preference



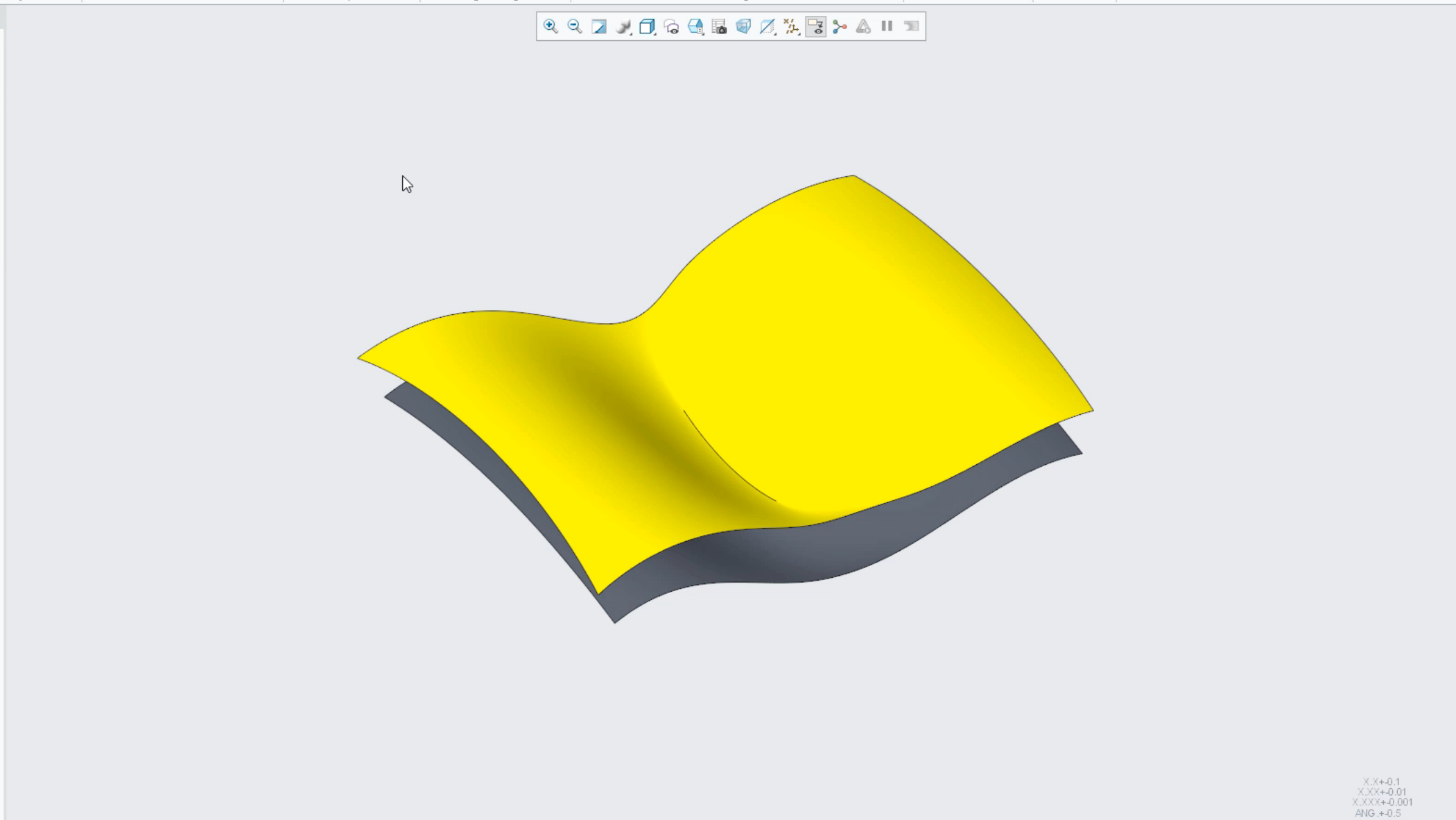
File Model Analysis Live Simulation Annotate Tools View Flexible Modeling Applications

Regenerate Copy Paste Delete Copy Geometry Shrinkwrap User-Defined Feature Boolean Operations Split/Trim Body New Body Plane Axis Point Coordinate System Sketch Extrude Revolve Sweep Swept Blend Hole Round Chamfer Draft Shell Rib Pattern Mirror Extend Project Remove Trim Offset Thicken Split Merge Intersect Solidify Unify Surfaces Fill Style Freestyle Boundary Blend Component Interface Model Intent

Operations Get Data Body Datum Shapes Engineering Editing Surfaces Model Intent

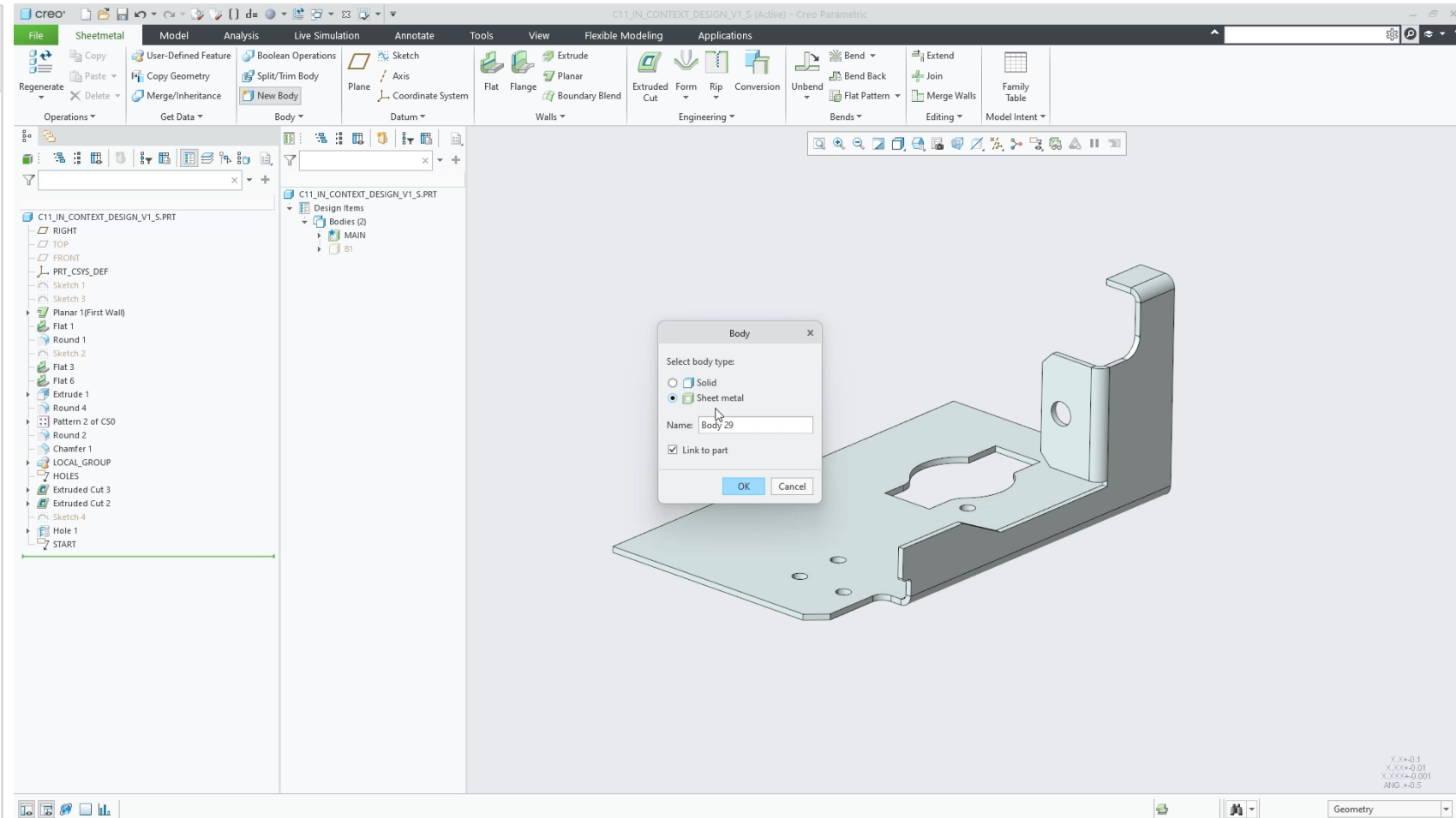
NC\_FEAT\_D\_SRFS.PRT

- Design Items
  - RIGHT
  - TOP
  - FRONT
  - PRT\_CSYS\_DEF
  - LOCAL\_GROUP
  - Style 1
  - Offset 1



## Multibody for Sheetmetal

- Simpler single part design workflows
- Split single SMT part into several Parts to reduce manufacturing costs/issues
- Design multiple same-thickness SMT parts in context
- Design multi-thickness SMT parts in context

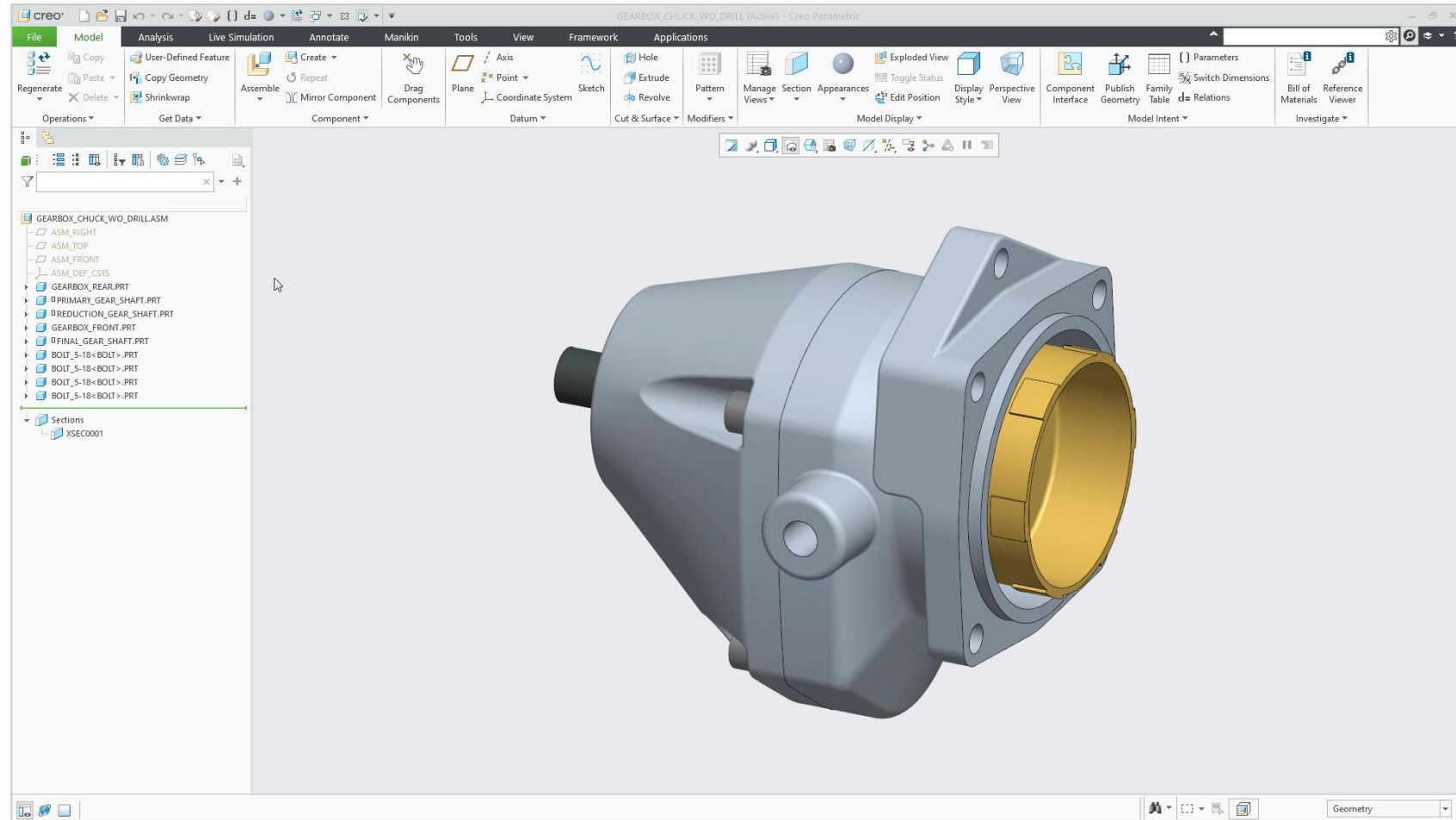
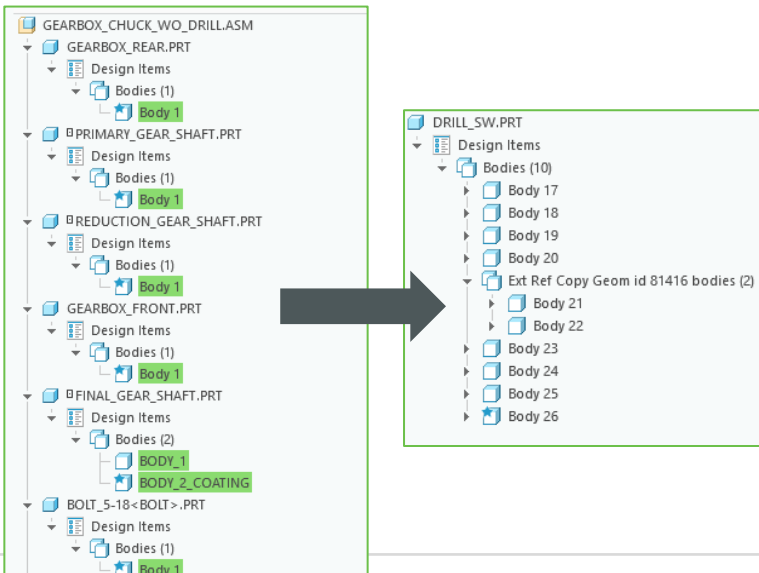


### Benefits:

- Design in context applying the master model methodology for Sheetmetal.
- Increased user productivity and design efficiency.
- Use multibody design methodologies for the design of sheetmetal parts and assemblies.

## Simplification

- Shrinkwrap option to collect bodies from referenced assembly into a part
- Merge options for bodies
  - Keep separate objects
  - Merge to single body per source part
  - Merge all

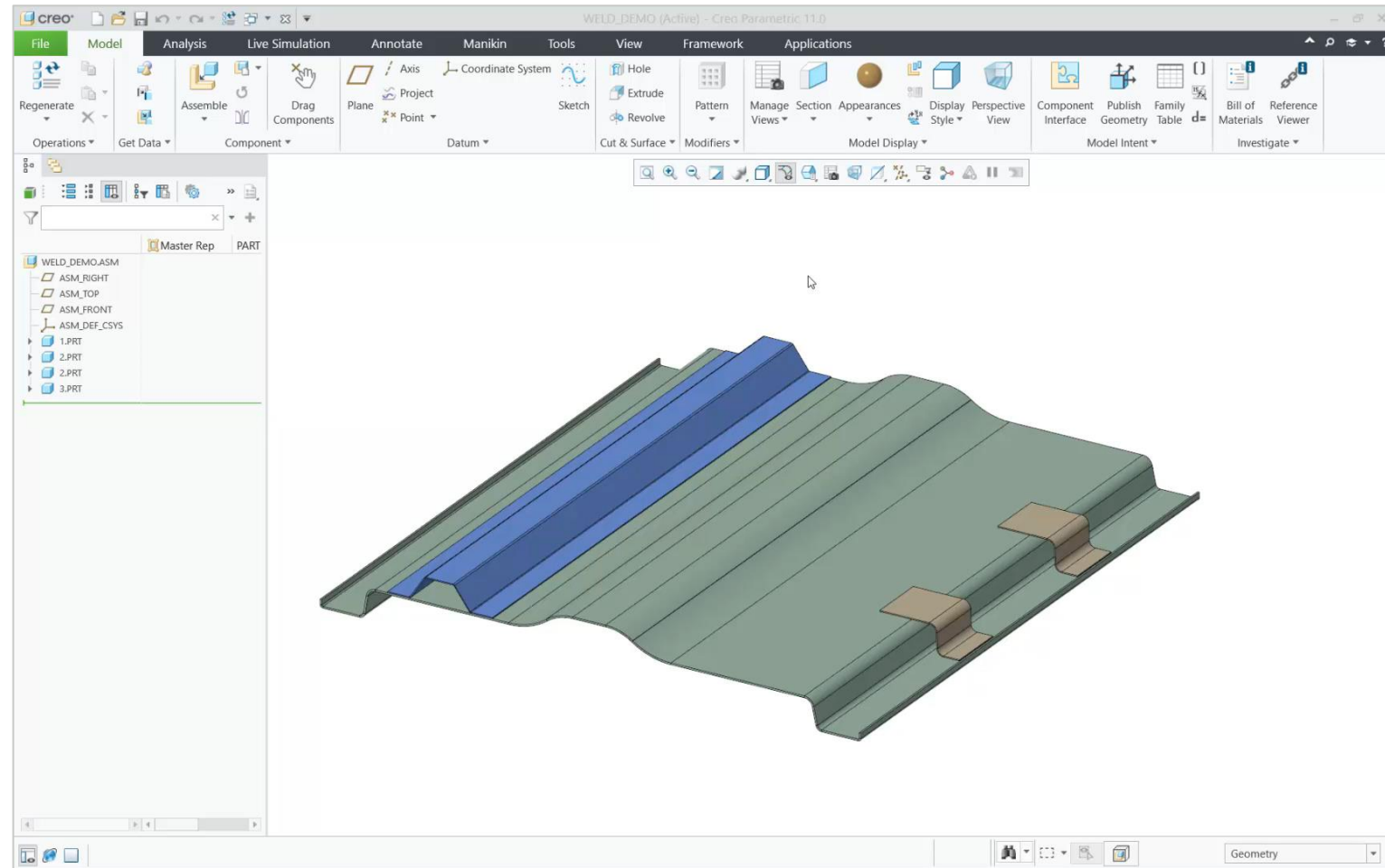
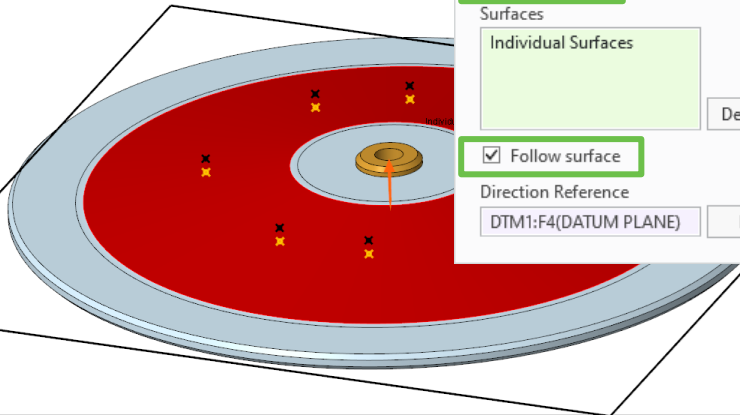
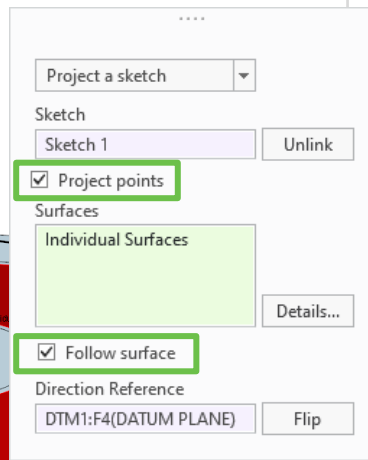


## Benefits:

- Easier creation of simplified models
- Easier conceptual design of assemblies with FMX
- Scale assembly for 3D printing

## Welding

- Improved Spot welding
  - Introducing Joint members
  - XMCF Export
- Offset edge, edge chain or intent chain references
- Project sketch points



### Benefits:

- Faster and more flexible definition of multiple projected point references
- Improved productivity eliminating additional steps
- Increases flexibility when defining spot welds



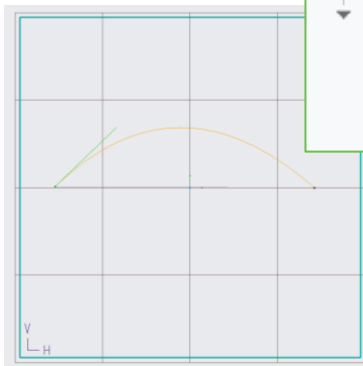
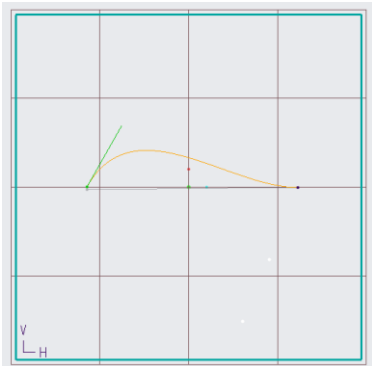
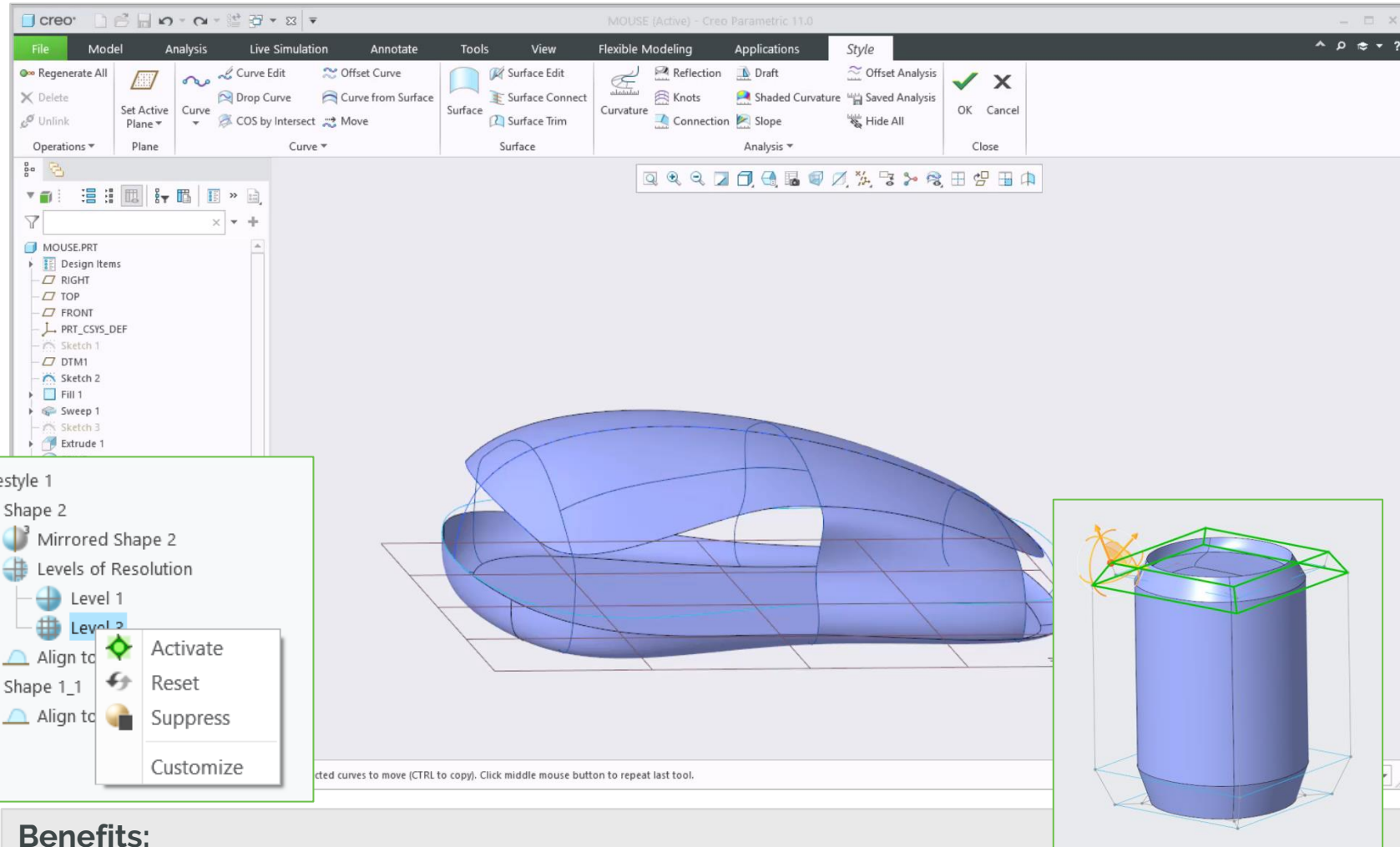
## Surfacing

### ■ Freestyle:

- Rotational pattern now supports reference pattern
- New Bevel operation
- Easier control of Multi Level

### ■ Style:

- Set curve degree below 3
- More intuitive curve editing
- Connection table for surfaces



### Benefits:

- Greater control of curves & surfaces
- Expanded modeling capabilities in Freestyle
- Streamlined workflows for working with Multi level subdivisions

File Model Analysis Live Simulation Annotate Tools View Flexible Modeling Applications

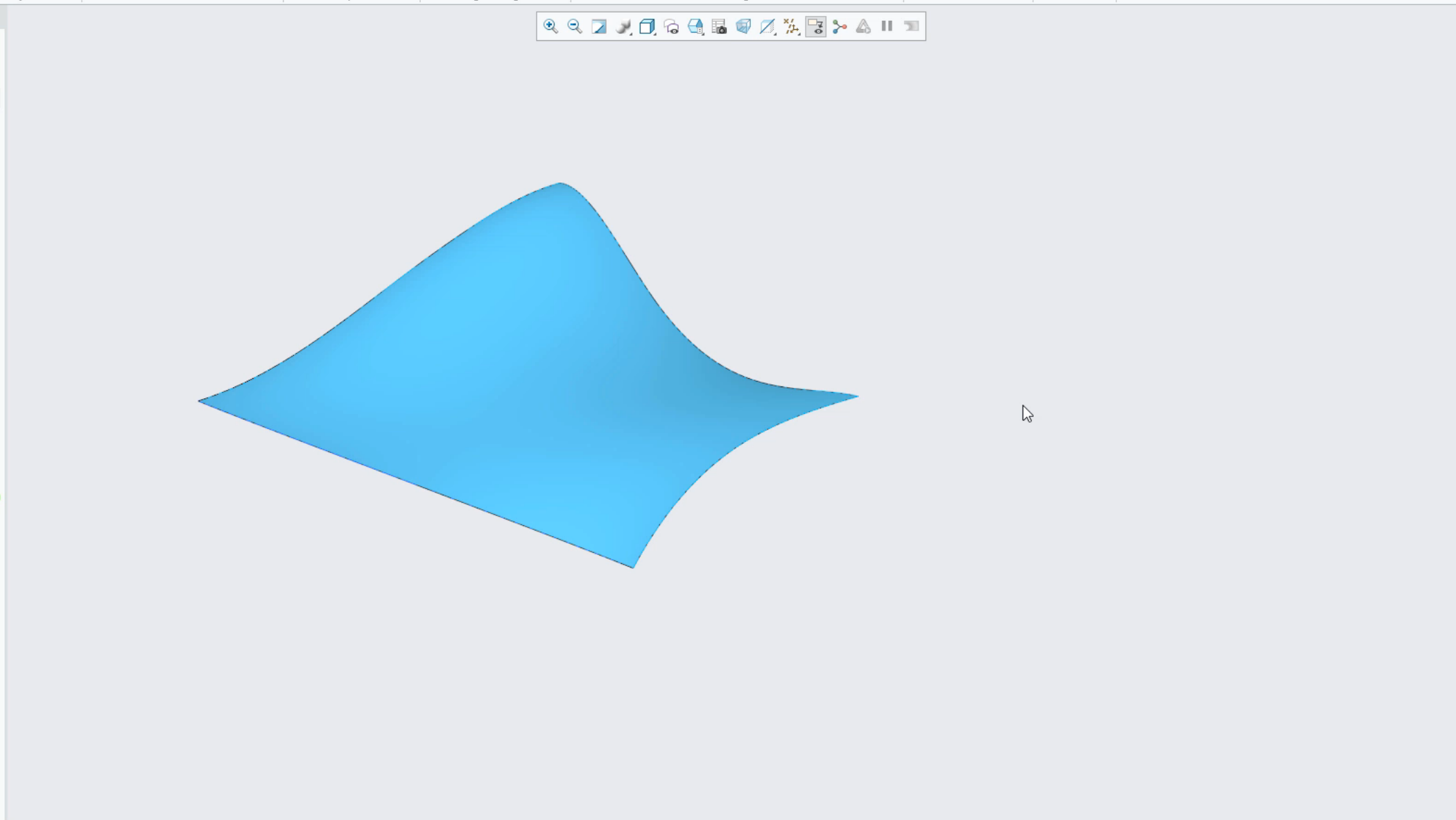
Regenerate Copy Paste Delete Copy Geometry Shrinkwrap User-Defined Feature Boolean Operations Split/Trim Body New Body Plane Axis Point Coordinate System Sketch Extrude Revolve Sweep Swept Blend Hole Round Chamfer Draft Shell Rib Pattern Mirror Extend Project Remove Trim Offset Thicken Split Merge Intersect Solidify Unify Surfaces Fill Style Freestyle Boundary Blend Component Interface

Operations Get Data Body Datum Shapes Engineering Editing Surfaces Model Intent

Filter: [ ]

C11\_EXTEND\_DEMO\_S.PRT

- Design Items
  - Materials
  - Quilts (3)
    - Quilt 3
    - Quilt 4
    - Copy 1
    - Quilt 5
    - Copy 2
  - Bodies (1)
    - RIGHT
    - TOP
    - FRONT
    - PRT\_CSYS\_DEF
    - DTM1
    - DTM2
    - Sketch 3
    - Sketch 4
    - Sketch 5
    - Curve 3
    - Boundary Blend 3
    - Copy 1
    - Copy 2





INTRODUCING



creo® 11

Productivity & Usability

Design for  
Electrification

Design for Composites

Model-Based  
Definition

Simulation Driven Design

Design for Manufacturing



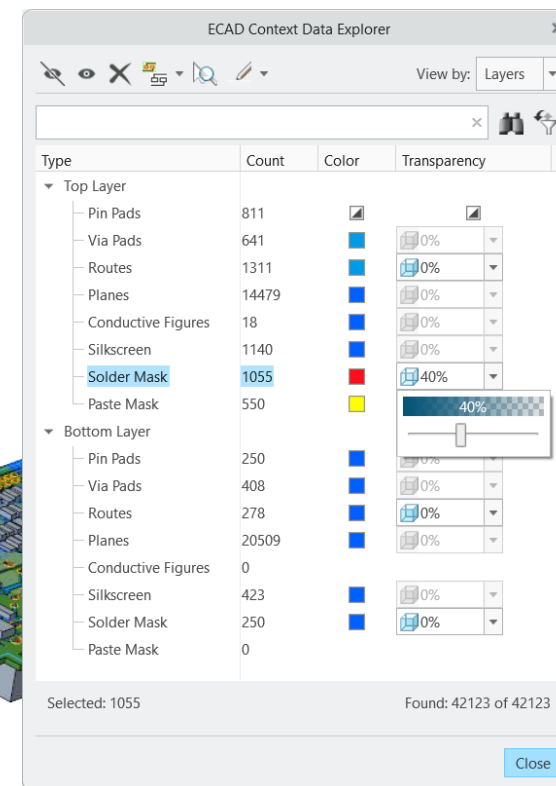
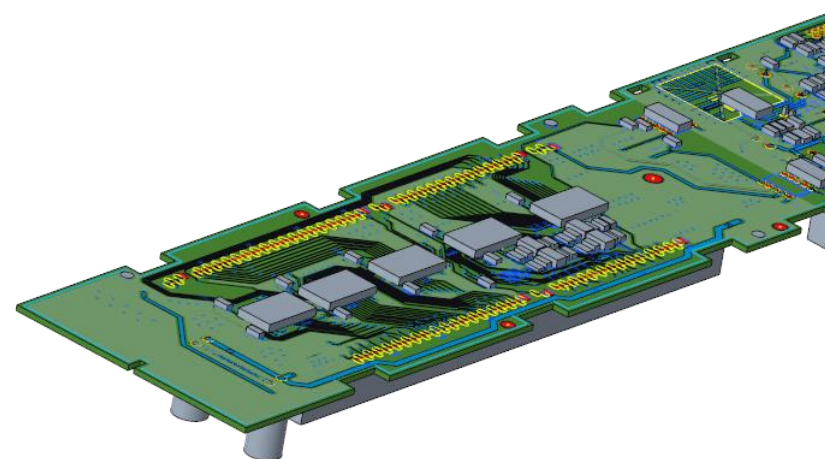
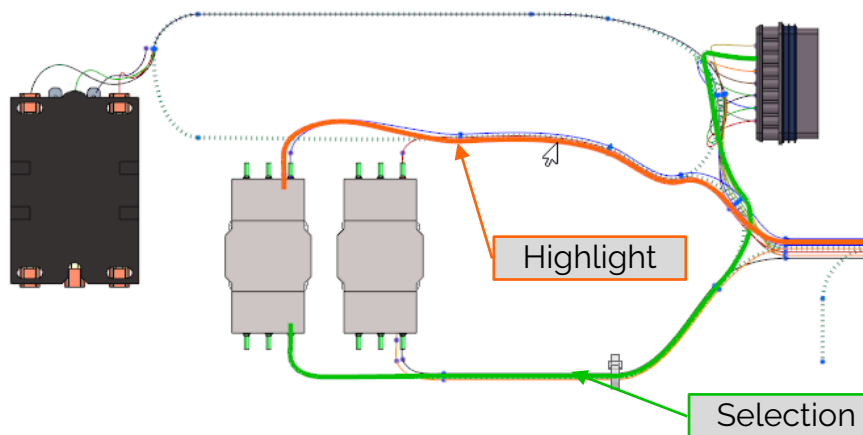
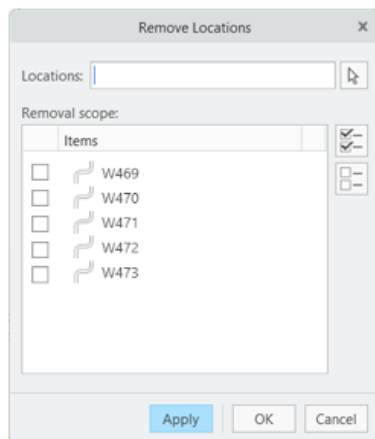
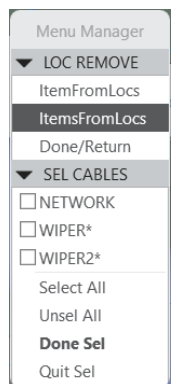
## Routed Systems

### Cabling

- Remove Locations capability
  - Dynamic preview in graphics area
  - Expanded filtering
  - Undo/Redo
- Cabling tree enhancements
- Productivity enhancements
  - Selection visibility

### ECAD

- Improved ECAD context data visibility



### Benefits:

- Easier to use and understand
- Enhanced functionality
- More flexibility to control presentation of various layers in ECAD





INTRODUCING



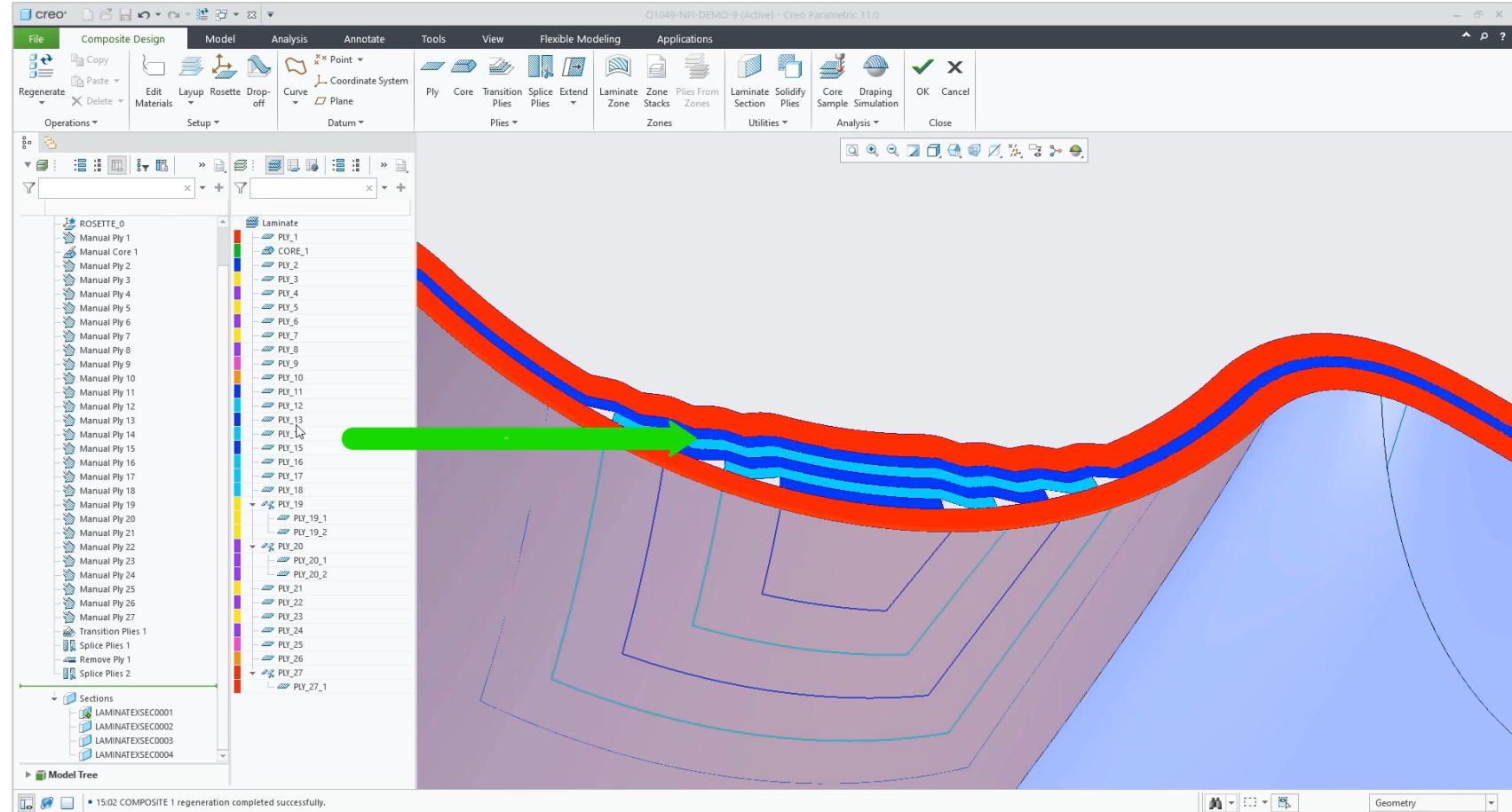
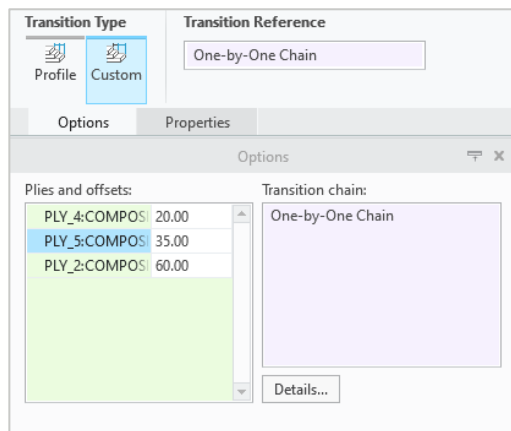
creo® 11

Productivity & Usability  
Design for  
Electrification  
Design for Composites

Model-Based  
Definition  
Simulation Driven Design  
Design for Manufacturing

## Expanded functionality

- Transitions
  - Modify transitions in graphics
  - Improved usability
- Laminate Section
  - Cross highlight & select Plies
  - Create section at part level
- Draping Simulation
  - Separate window for flat ply
  - Improved draping simulation



## Benefits:

- Improved usability and productivity
- Easier to manage and visualize plies
- Improved draping workflows



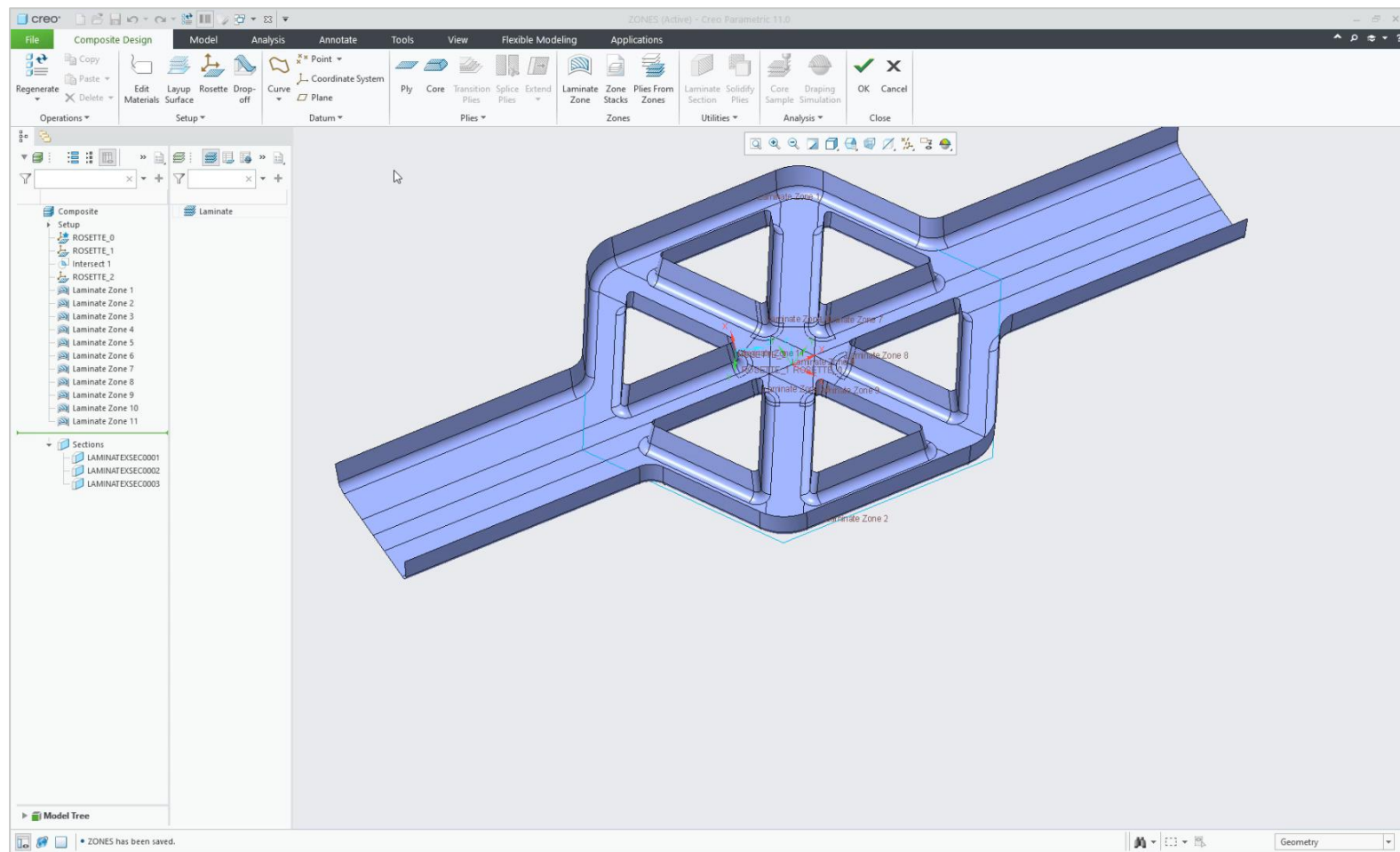
## Zone based design

- Zone Based Plies and Cores
- Define and save local Zone Stack
- Combine Zones & Stacks to create plies
- Use Plies from Zones tool to automatically create (multiple) plies

The image shows the 'Zone Stacks' dialog box in the software. It has a 'Stacks' list on the left with 'Stack 1' and 'Stack 2'. The 'Stack definition' table is as follows:

#	Material	Orientation
1	YE1200_S2	0.00
2	YE1200_S2	45.00
3	YE1200_S2	90.00
4	YE1200_S2	-45.00

Below the table is an 'Add Row' button. The 'Model Tree' on the right shows a hierarchy: Composite > Setup > Laminates > Laminated Zone 1 through 11, and Sections > LAMINATEXSEC0001 through 0003.



## Benefits:

- Automatically build many plies with the Zone Based approach
- Conceptual top-down composite design, using zones and zone stacks.
- Faster creation of large scale composite products

# DESIGN FOR COMPOSITES

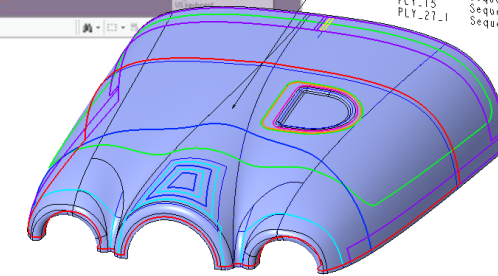
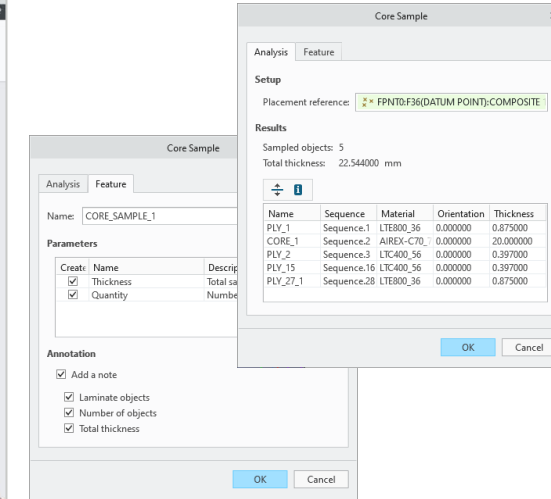
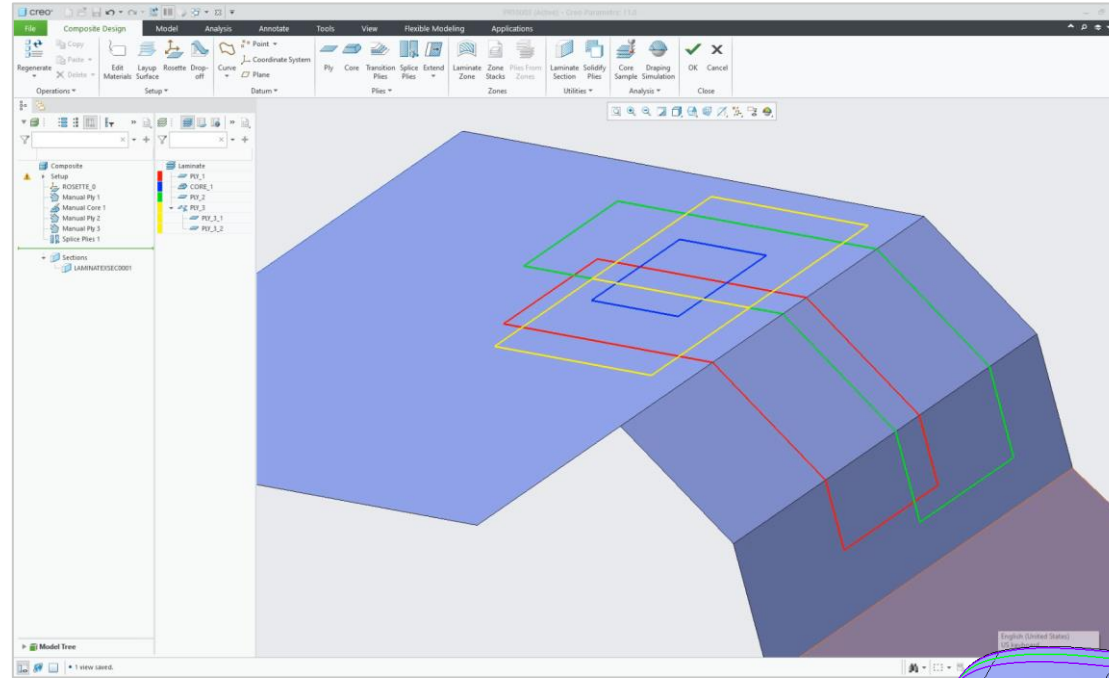
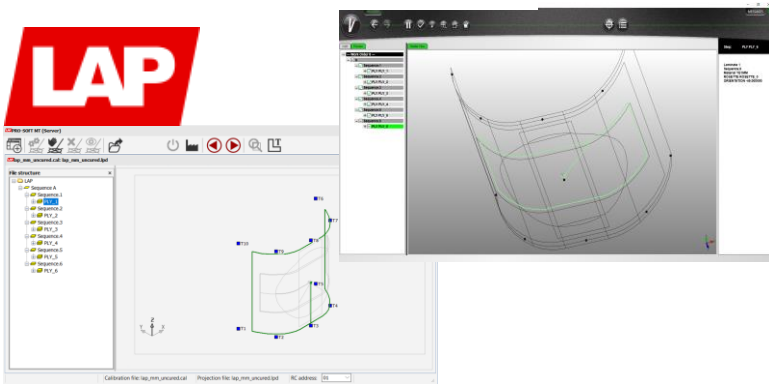


## Manufacturing

- Extend Ply boundary
  - By Value, Reference or Contour
  - Always performed inside the Layup quilt
- Core Sampling
  - Report a local laminate stack up at any point on a laminate
- Create laser projection files
  - Support leading LAP & VIRTEK systems

**VIRTEK**

**LAP**



Core Sample Results of Core Sample 1  
Sampled objects: 5  
Total thickness: 22.544000 mm

Name	Sequence	Material	Orientation	Thickness
PLY_1	Sequence.1	LTE800_36	0.000000	0.875000
CORE_1	Sequence.2	AIREX-C70_75	0.000000	20.000000
PLY_2	Sequence.3	LTC400_56	0.000000	0.397000
PLY_15	Sequence.16	LTC400_56	0.000000	0.397000
PLY_27_1	Sequence.28	LTE800_36	0.000000	0.875000

## Benefits:

- More flexibility during composite design and preparation for manufacturing
- Better insight into the composite design and adds more clarity on the ply book drawing
- Increase composite product quality supporting the laser guided manufacturing process





INTRODUCING



creo® 11

Productivity & Usability  
Design for  
Electrification  
Design for Composites

Model-Based  
Definition

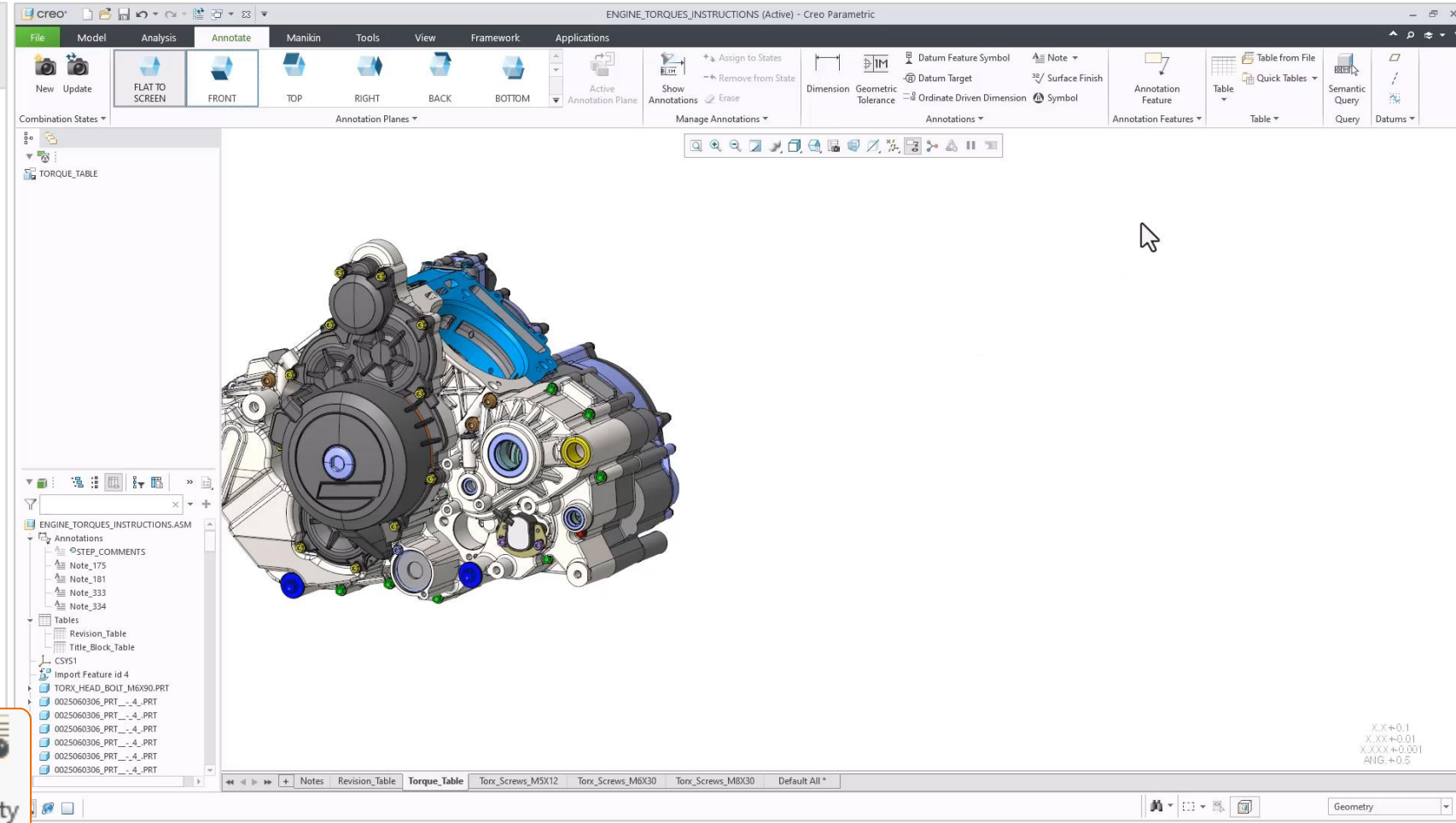
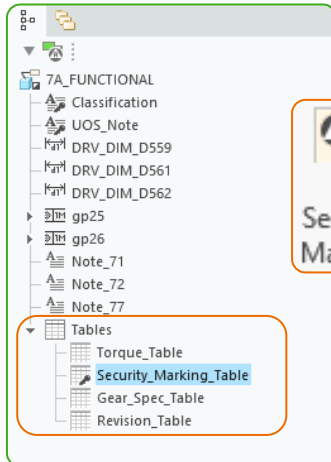
Simulation Driven Design

Design for Manufacturing

# MODEL BASED DEFINITION

## Tables

- Creation of simple tables
  - Formatting and editing options
  - Table node in model tree
- Flat-to-screen or annotation planes
- Support for parameter callouts
- Add semantic references for table or cells
- STEP AP242



## Benefits:

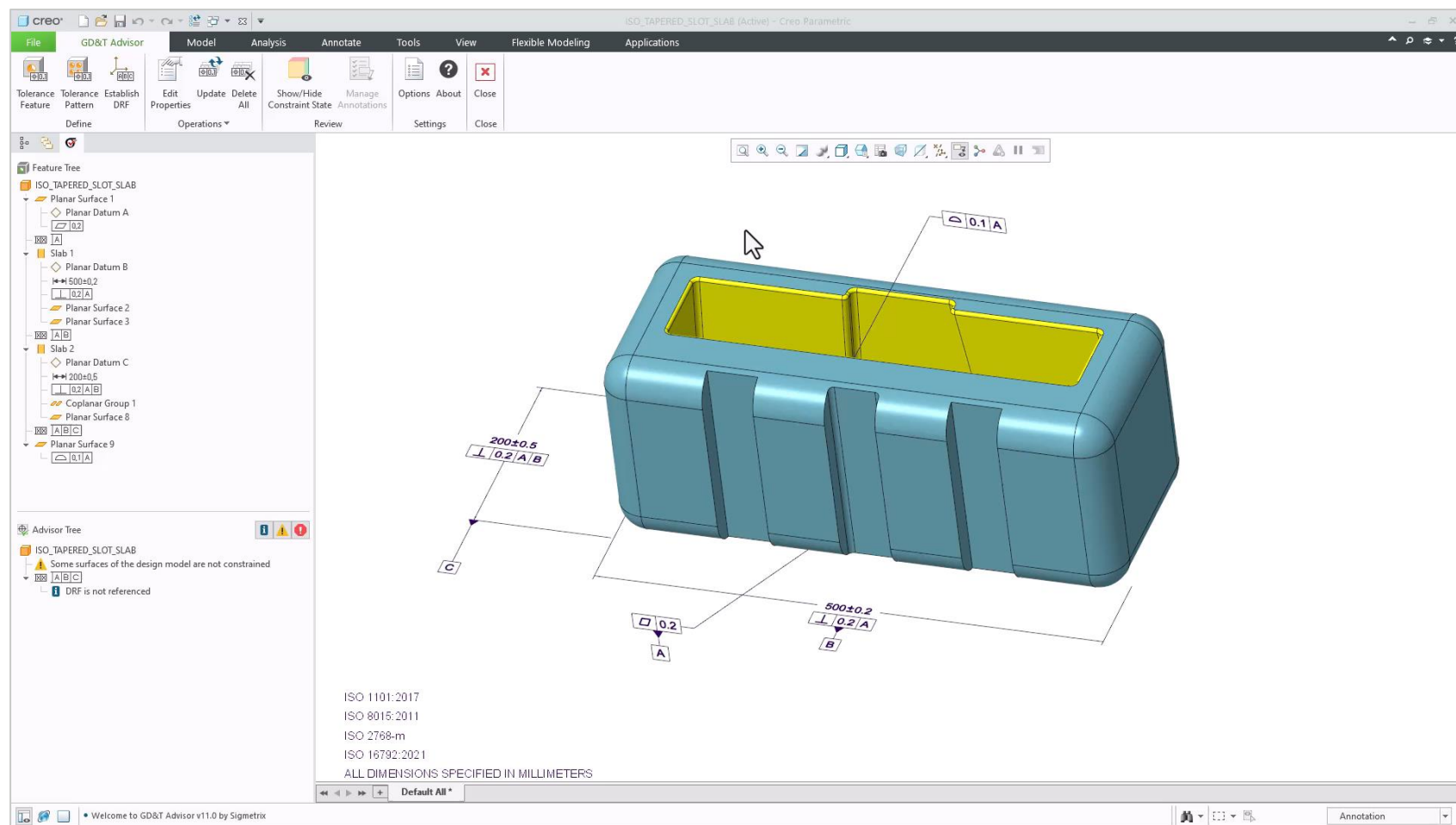
- Quick & easy way to organize data in a tabular form
- Easy and convenient way for creating security markings in a tabular form
- Quickly manipulate the table location, scale and proportions



# MODEL BASED DEFINITION

## GD&T Advisor

- Support for ISO GPS 22081 for general tolerances
- Combined Simplified Hole Callouts For ISO Models
- Enriched Support For Slab/Slot Features



Edit Model Properties

Model Type: Machined (material removal)  Non-Rigid

Dims and Tols: Properties & Notes

Tolerancing Standard: ISO 1101

Units  
Length Units: millimeters  
Angle Units: degrees

Size and Form Options  
 Independency Principle  
 Envelope Requirement

General Tolerances

ISO 2768:1  
 none  
 f = fine  
 m = medium  
 c = coarse  
 v = very coarse

ISO 22081  
 Profile tolerances: 0.3  
 Linear sizes: H7/h7  
 Angular sizes:  $\pm 1^\circ$

Linear Sizes  
 Value  
 ISO 286 Table  
 User-defined Table  
Fundamental Deviation: H/h  
Tolerance Grade: 7

Additional text:  
 Envelope Requirement

General tolerances ISO 22081  
 $0.3 A B C$   
Linear Sizes: H7/h7  
Angular Sizes:  $\pm 1^\circ$  See table 1 in document 123456

## Benefits:

- Improved compliance with the ISO standard
- Reduced clutter of annotations
- Reduces the number of clicks required to achieve the desired update



INTRODUCING



creo® 11

Productivity & Usability  
Design for  
Electrification  
Design for Composites

Model-Based  
Definition

Simulation Driven Design

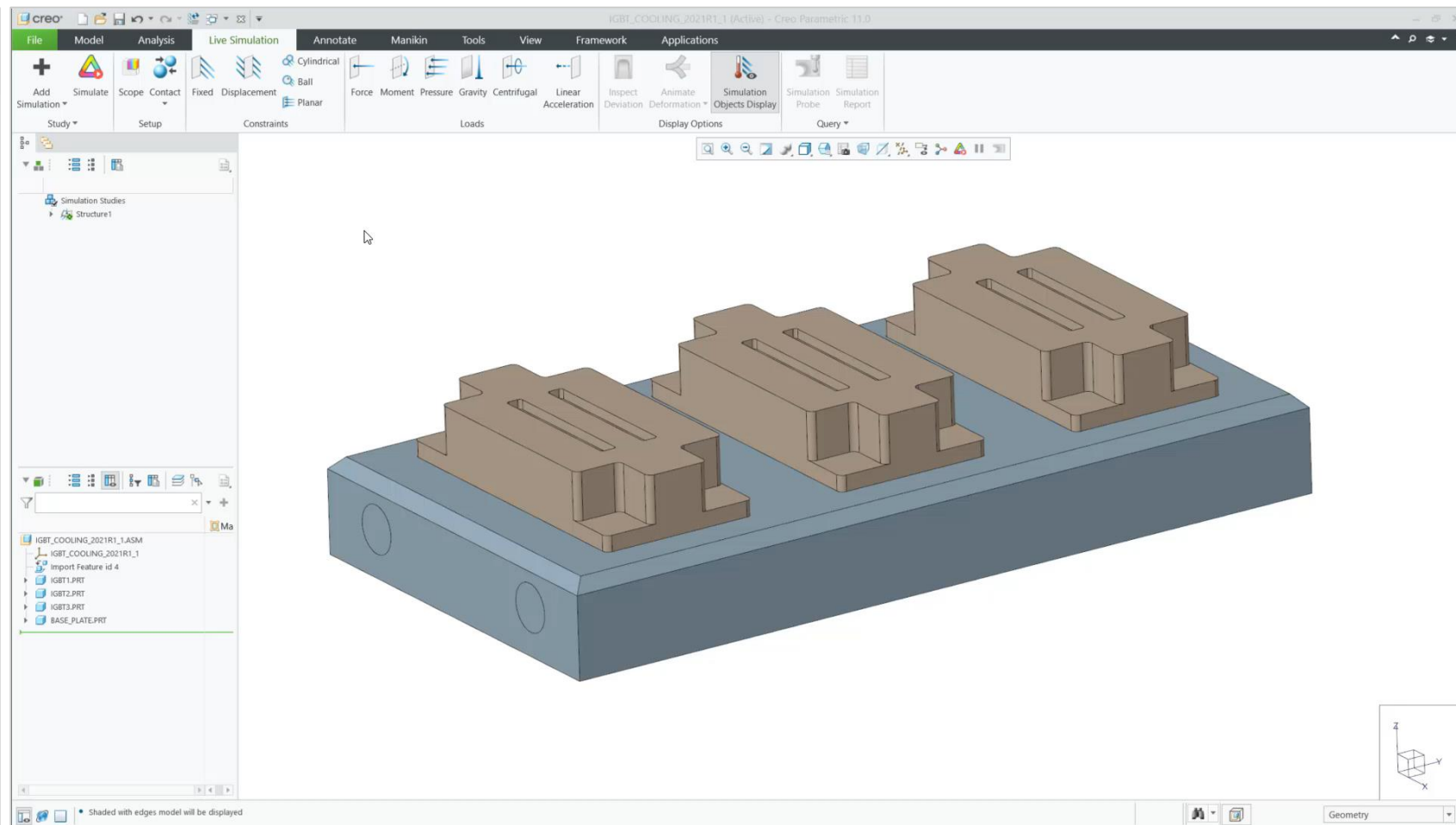
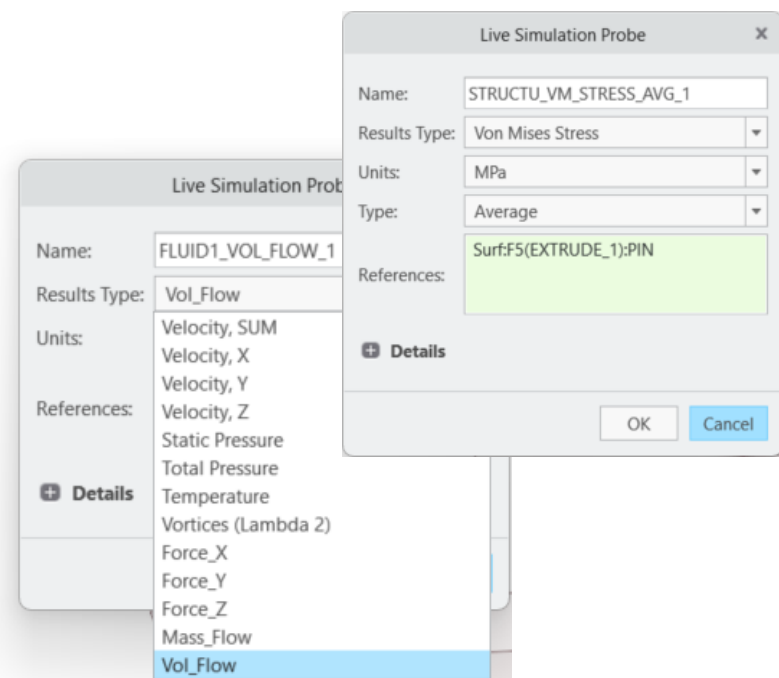
Design for Manufacturing



# SIMULATION DRIVEN DESIGN

## Creo Simulation Live

- Conjugate Heat Transfer
- Expanded Structural and Fluid Results
- Updated solvers



## Benefits:

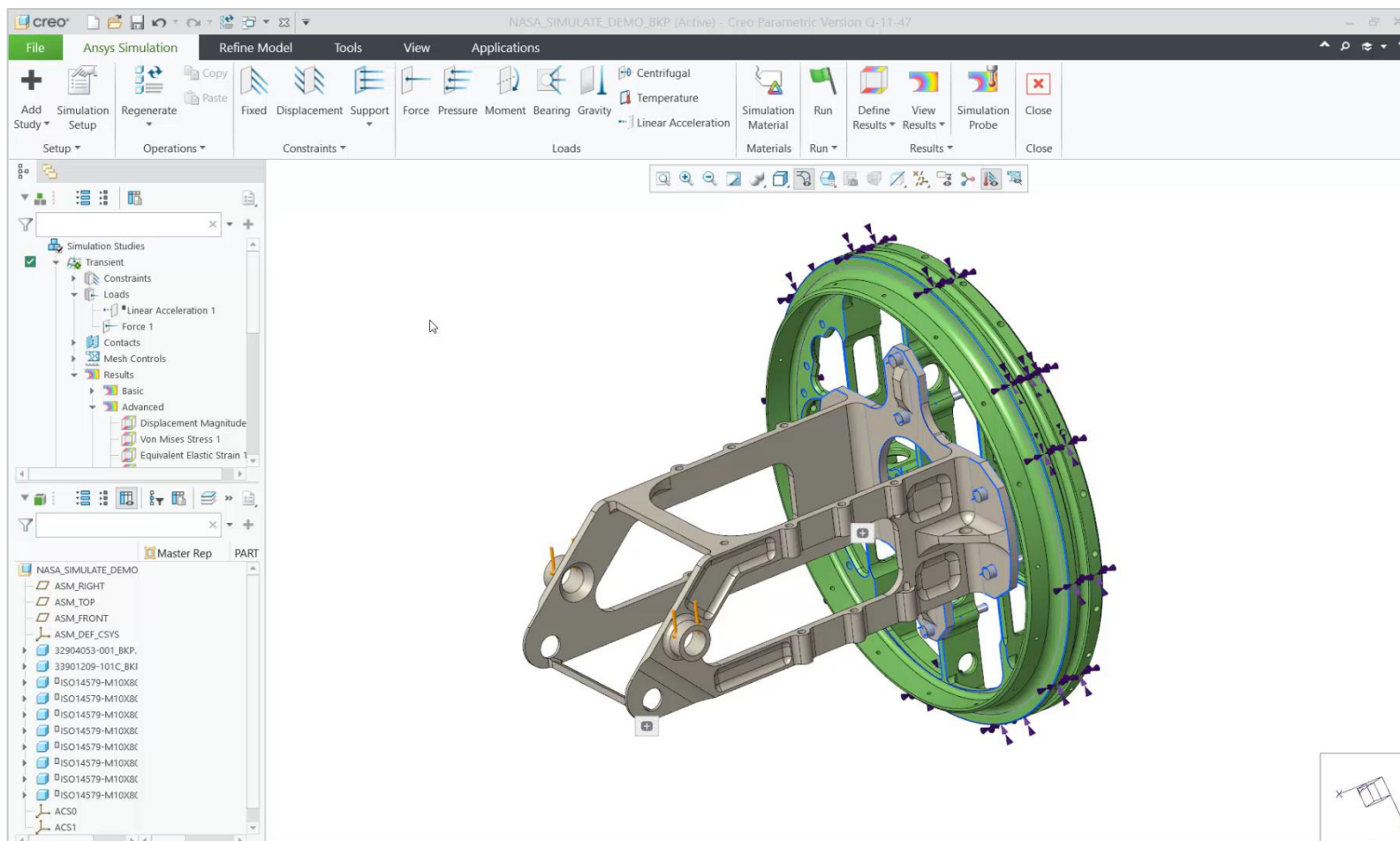
- Incredible speed in solving complex studies
- Accurately predict heat transfer of combination of solids and fluid flow
- Optimize designs from CHT results

# SIMULATION DRIVEN DESIGN

## Creo Ansys Simulation

### ■ Transient Structure

- Available in Creo Ansys Simulation Advanced
- Time dependent structural simulation
- Additional Simulation Setup options
  - Initial Velocity
  - Damping
  - Step Duration
  - Sub-Stepping
- Define constraints as functions of time



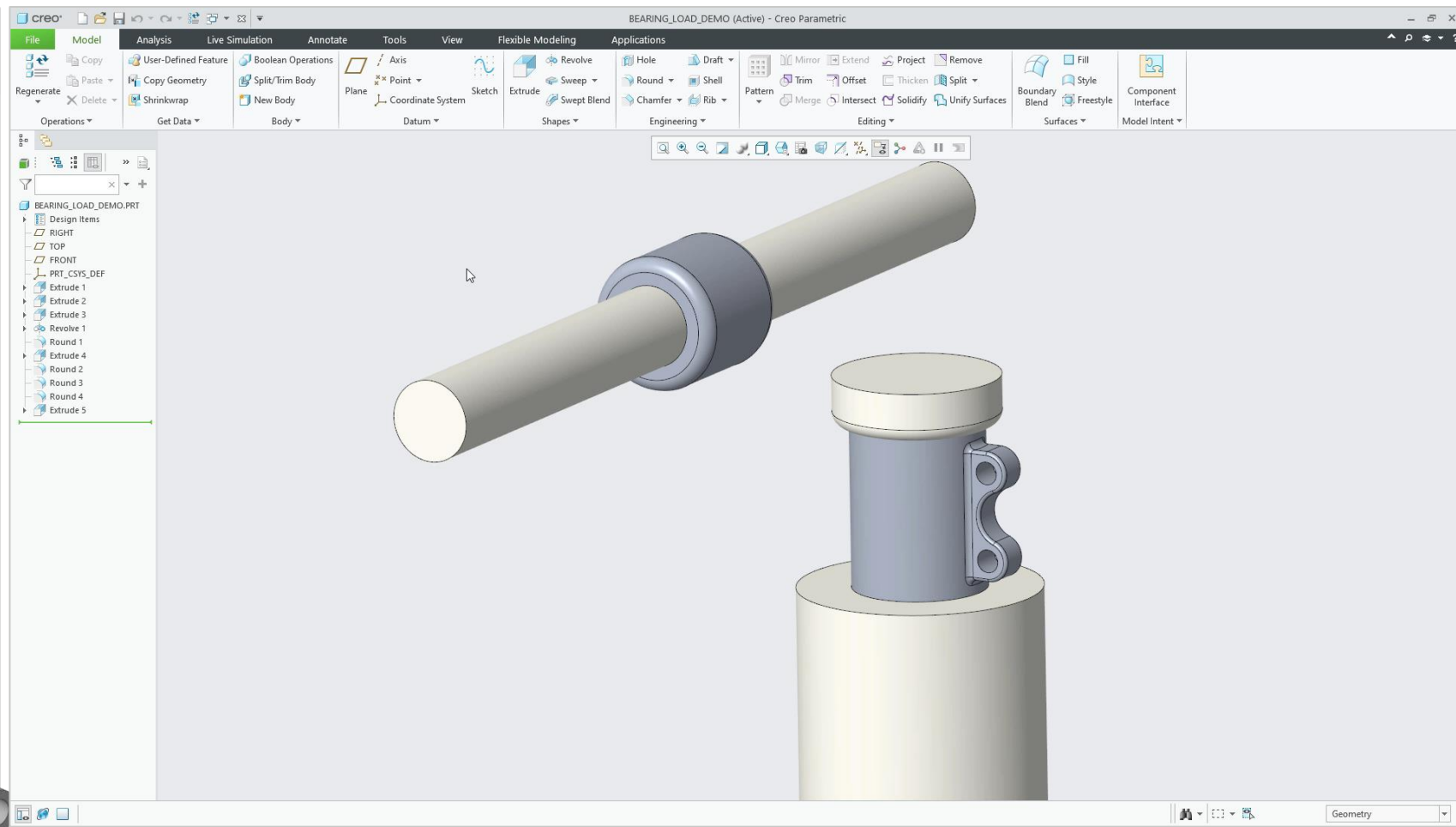
### Benefits:

- Powerful capabilities exposed
- Determines the dynamic response under time-history loading
- Multi-step, Time dependent structural simulation

# SIMULATION DRIVEN DESIGN

## Generative

- Control minimum thickness with Minimum Feature Size
- Support for Bearing Loads
- Maintain Planar symmetry during reconstruction

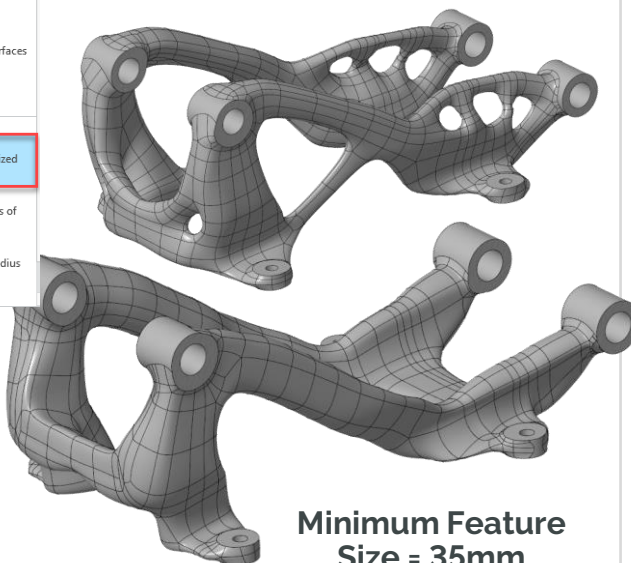


**Manufacturing Constraints**

- Build Direction**  
Reduces the number of supports for additive manufacturing
- Parting Line**  
Creates an angle between the pull direction and the resulting drafted surfaces
- Linear Extrude**  
Creates a linear pull direction extrude

**Geometric Constraints**

- Minimum Feature Size**  
Controls the feature size in the optimized shape
- Symmetry**  
Builds planar, rotational, or both types of symmetry
- Minimum Crease Radius**  
Creates geometry with a minimum radius of specified value.



Minimum Feature Size = 35mm

### Benefits:

- Controls the thickness and avoids thin-walled structures in the optimization
- Provides improved loading conditions for the optimization to capture design intent
- Maintain design intent during reconstruction





INTRODUCING



creo® 11

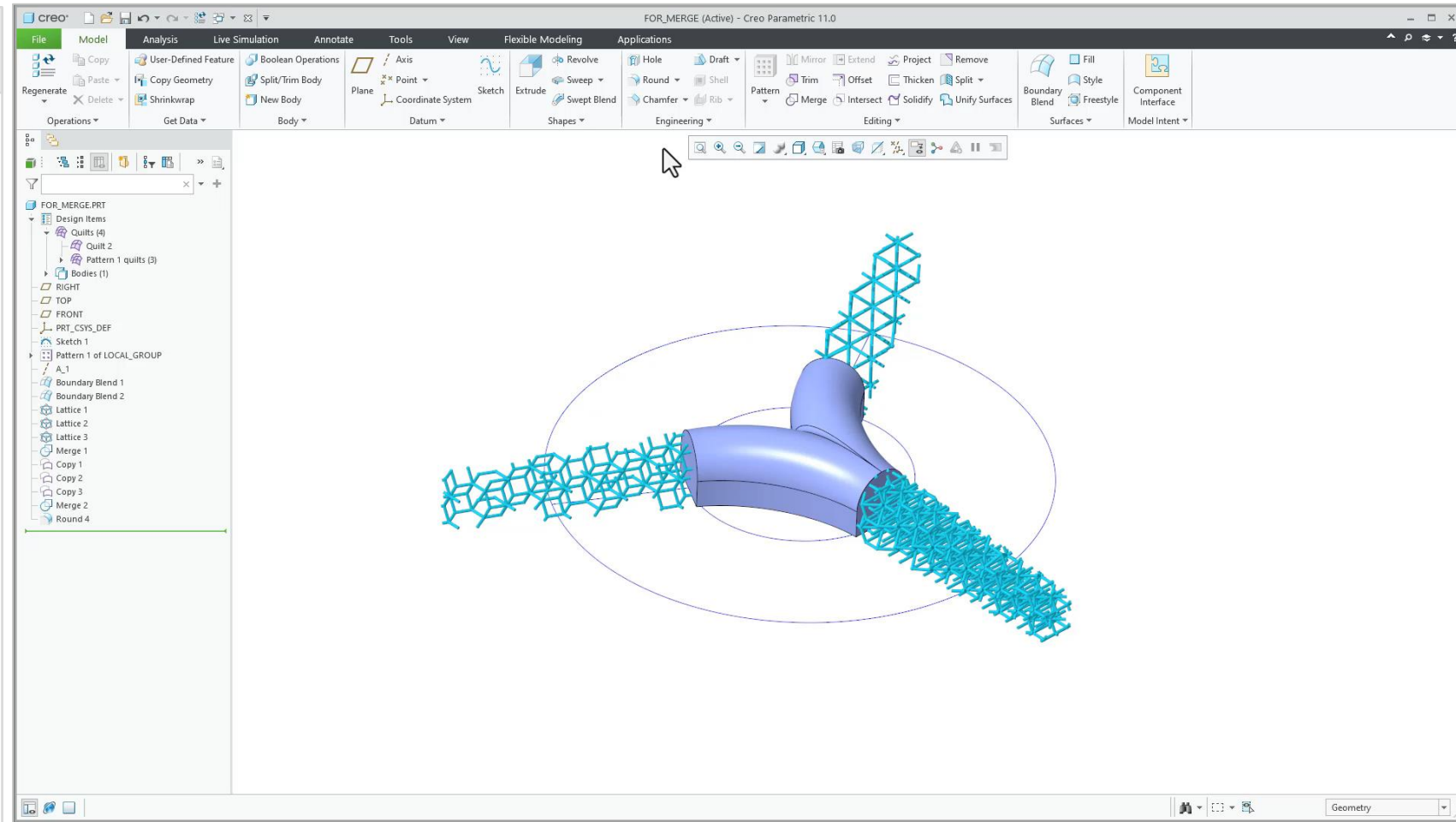
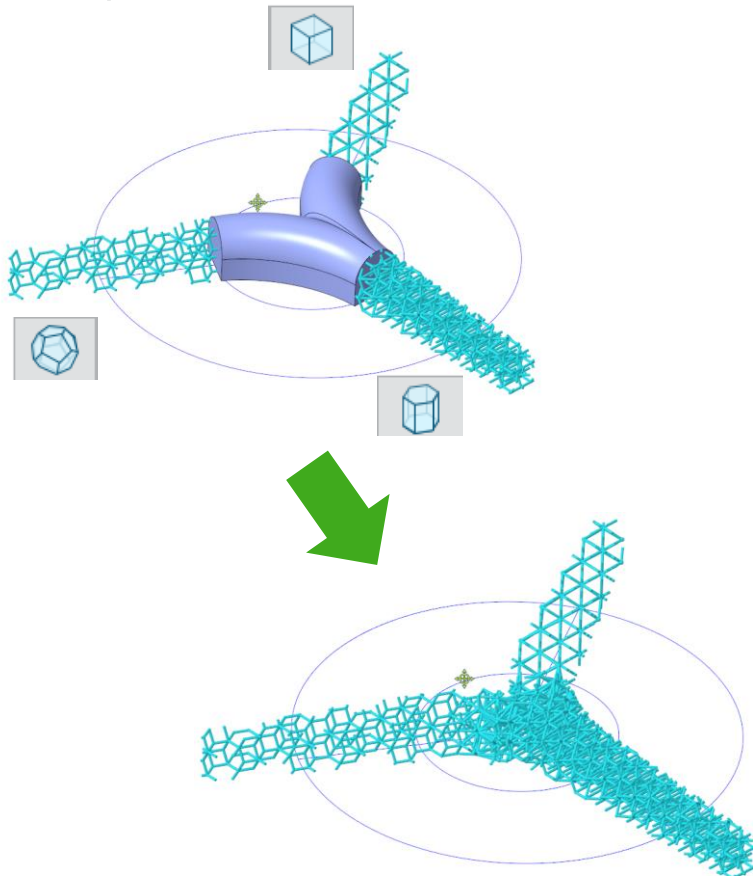
Productivity & Usability  
Design for  
Electrification  
Design for Composites

Model-Based  
Definition  
Simulation Driven Design  
Design for Manufacturing



## Connecting lattices

- **New** lattice command to connect two or more separate lattices

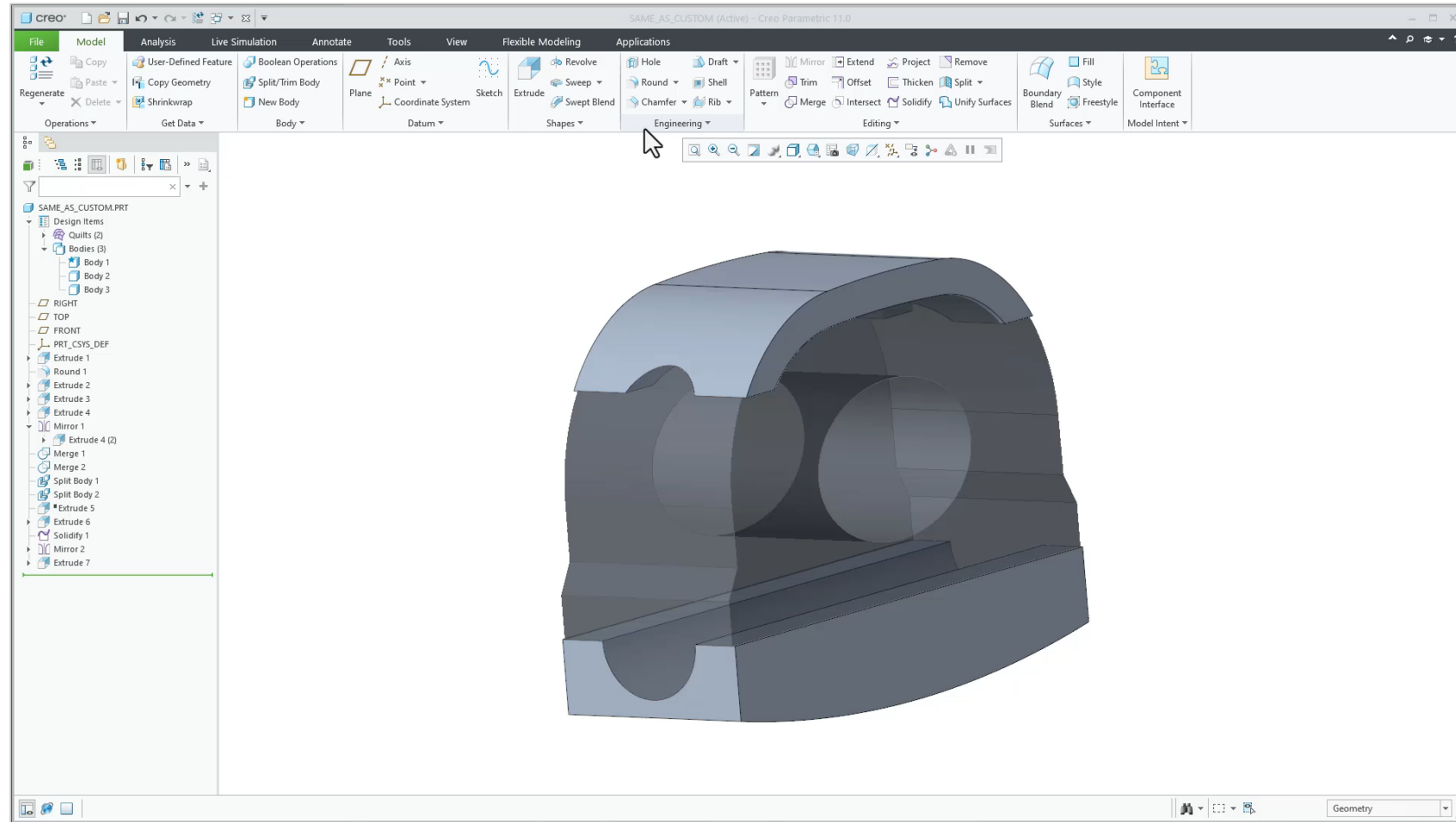


### Benefits:

- More flexibility to create complex lattices
- Straightforward workflow for creating continuous lattice structures
- Supported inside the same familiar Lattice UX

## Beam lattices

- Stochastic lattice
  - Randomization value
  - Define Pore Size
- Ability to adjust Simplified lattices using Warp
- 3MF/STL export options
  - Available in part mode
  - Add a penetration option for simplified lattices



## Benefits:

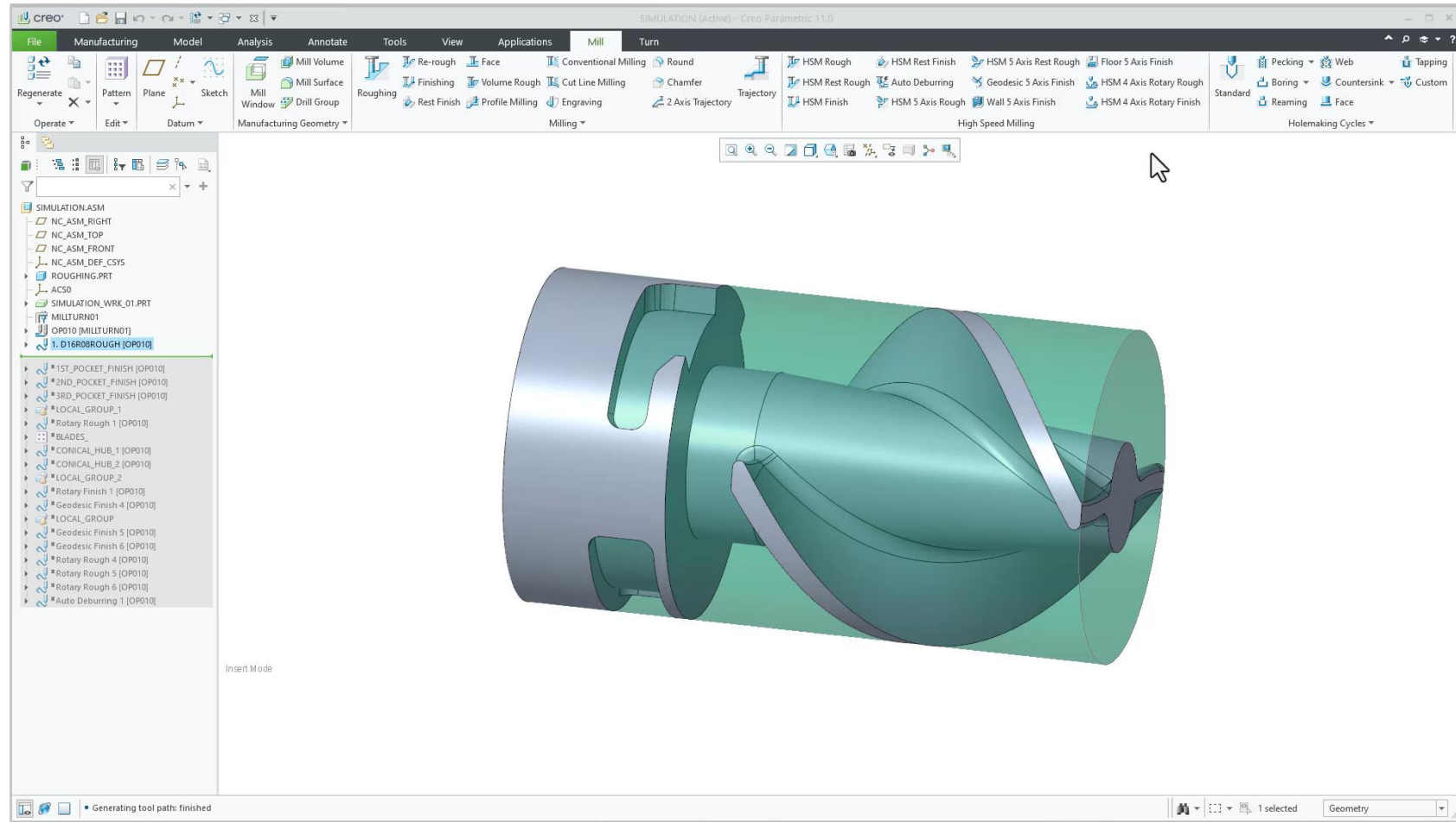
- Additional flexibility to prepare parts for 3D printing
- Straightforward workflow for medical implants
- More flexibility to create stochastic lattices

# SUBTRACTIVE MANUFACTURING



## High Speed Machining

- New 4 axis Rotary roughing and finishing toolpaths
  - Toolpaths that can pass 360 degrees to be used on screw type parts
  - Supports End Mill, Ball Mill and Bull Nose Mill



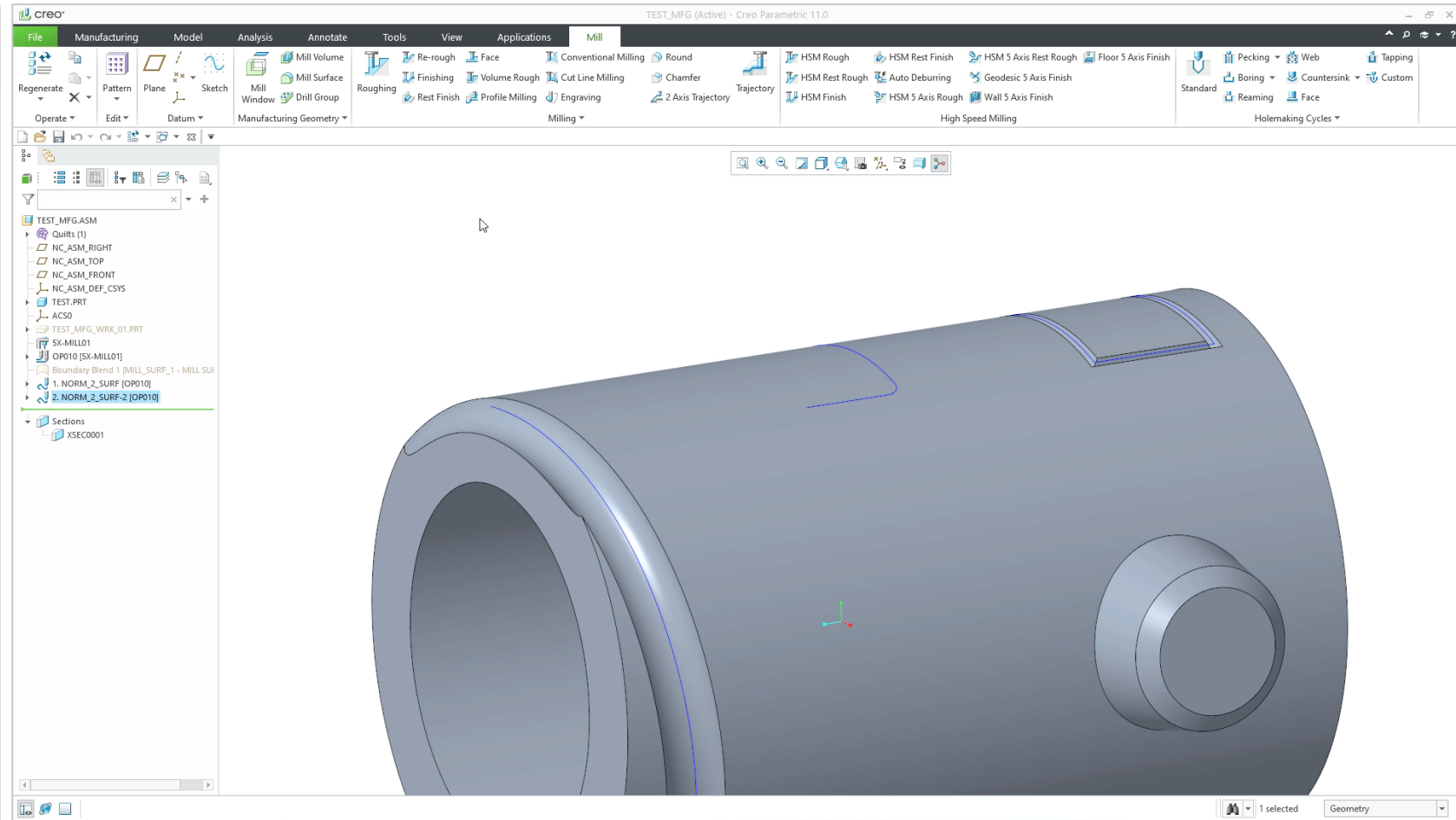
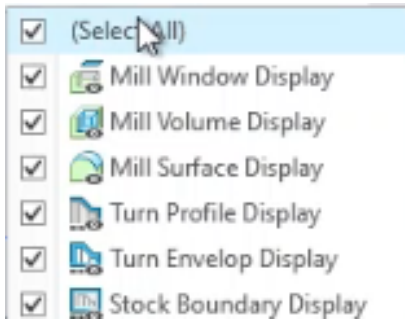
## Benefits:

- Automated Roughing and Finishing sequences
- Applicable in automotive and oil field crankshafts, camshafts and drill heads for example
- Response to a Direct Customer Request

# SUBTRACTIVE MANUFACTURING

## Milling

- Trajectory milling
  - Normal to surface – tangential entry/exit
  - Curves not on surface
- Trim retract motion to a plane.
- Easily manage display of manufacturing geometry in Graphics toolbar



### Benefits:

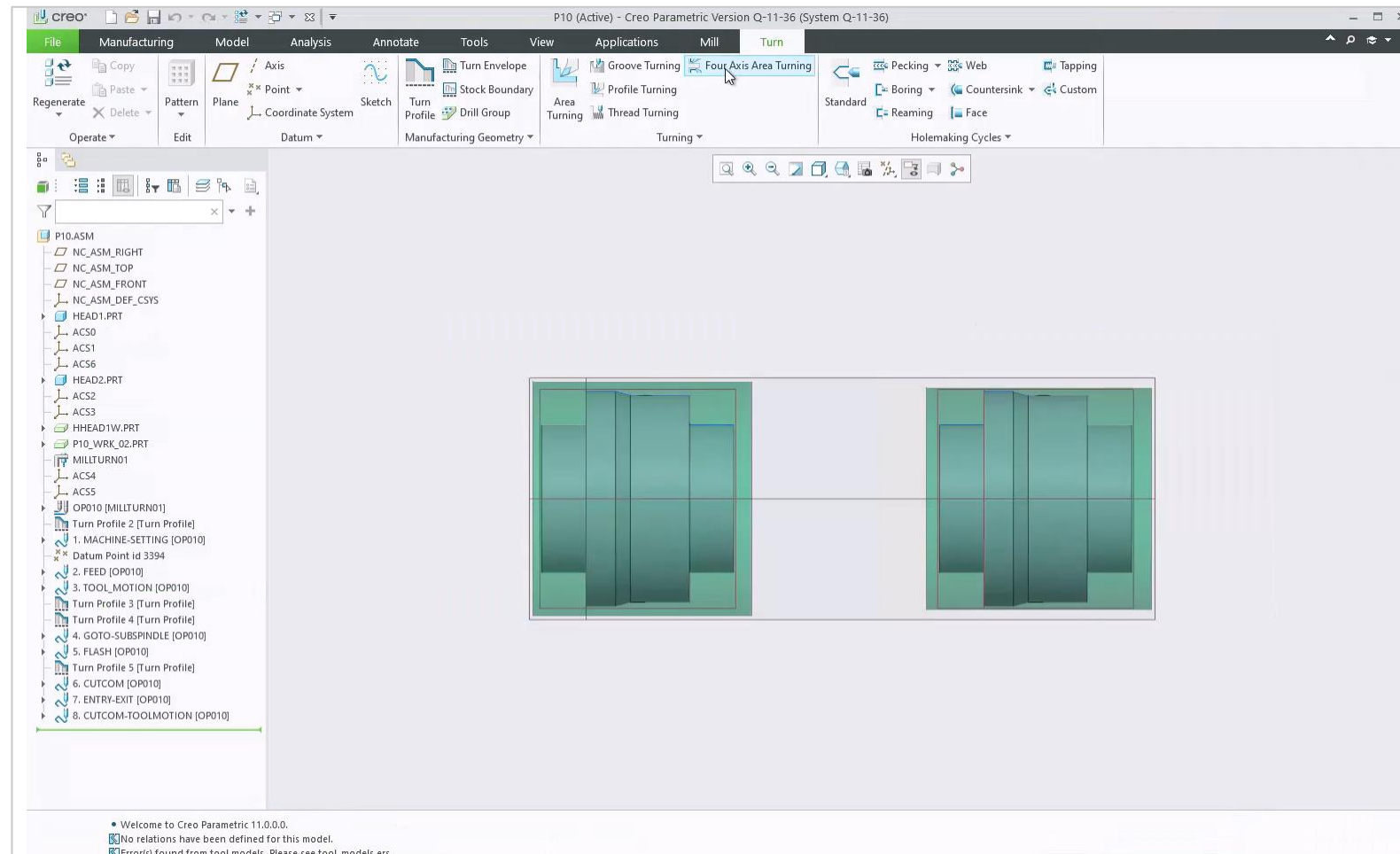
- Define entry and exit movement along the direction of the cut
- Reduce the possibility of breaking small tools
- Higher productivity, less time spent on retracts



# SUBTRACTIVE MANUFACTURING

## Turning

- Modernized 4 Axis area turning user interface.
- Improved material removal cut functionality for profile turning
- Additional Area turning capabilities added to 4 axis
  - User\_Output\_Point
  - CUTCOM support at each slice
  - Clear distance
  - Turn profile start and end driving the cut direction



## Benefits:

- Streamlined and Consistent UI
- Leverage enhancements done for other toolpaths



creo+™

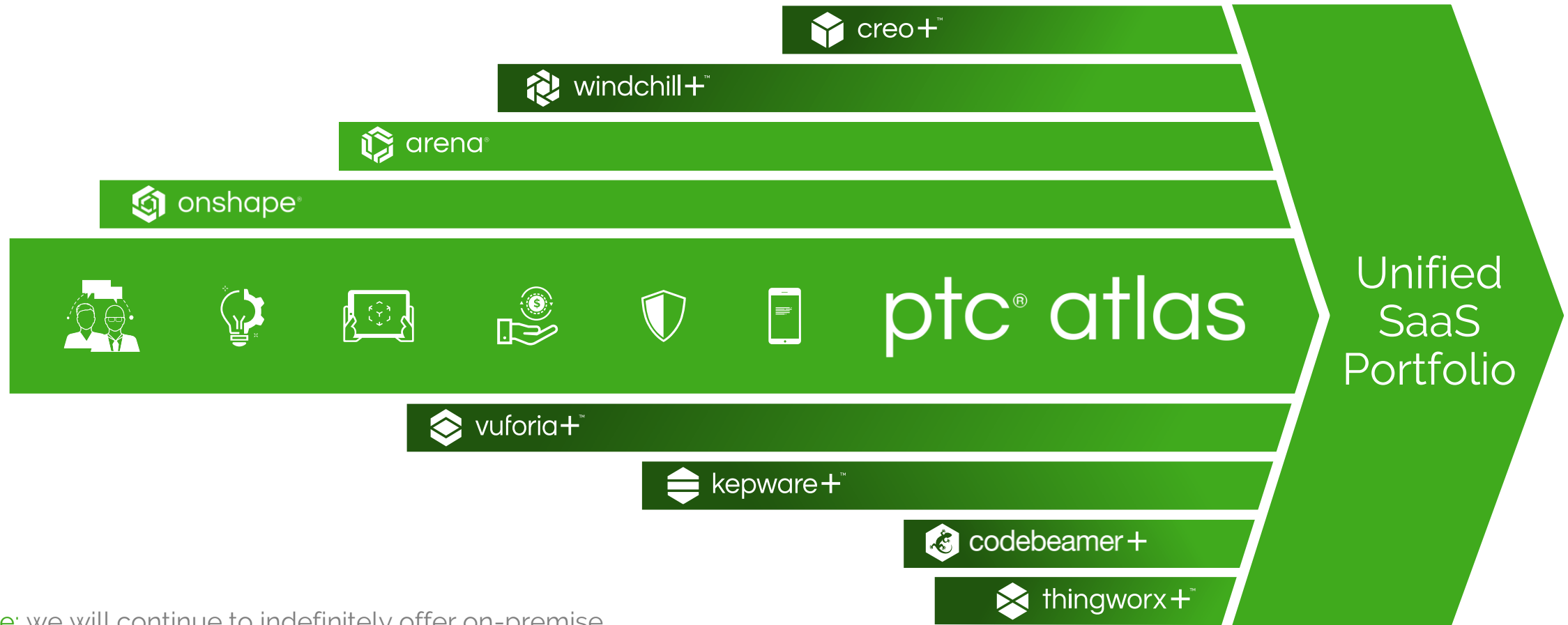
# SaaS EXPANDS THE BENEFITS OF DIGITAL





# DRIVING A NEW GENERATION OF LIFECYCLE MANAGEMENT

TODAY FUTURE



**Note:** we will continue to indefinitely offer on-premise offerings for Creo, Windchill, Integrity/Codebeamer, ThingWorx and Vuforia built from same code base.

# POWER & PROVEN FUNCTIONALITY WITH CLOUD-BASED COLLABORATION AND ADMINISTRATION



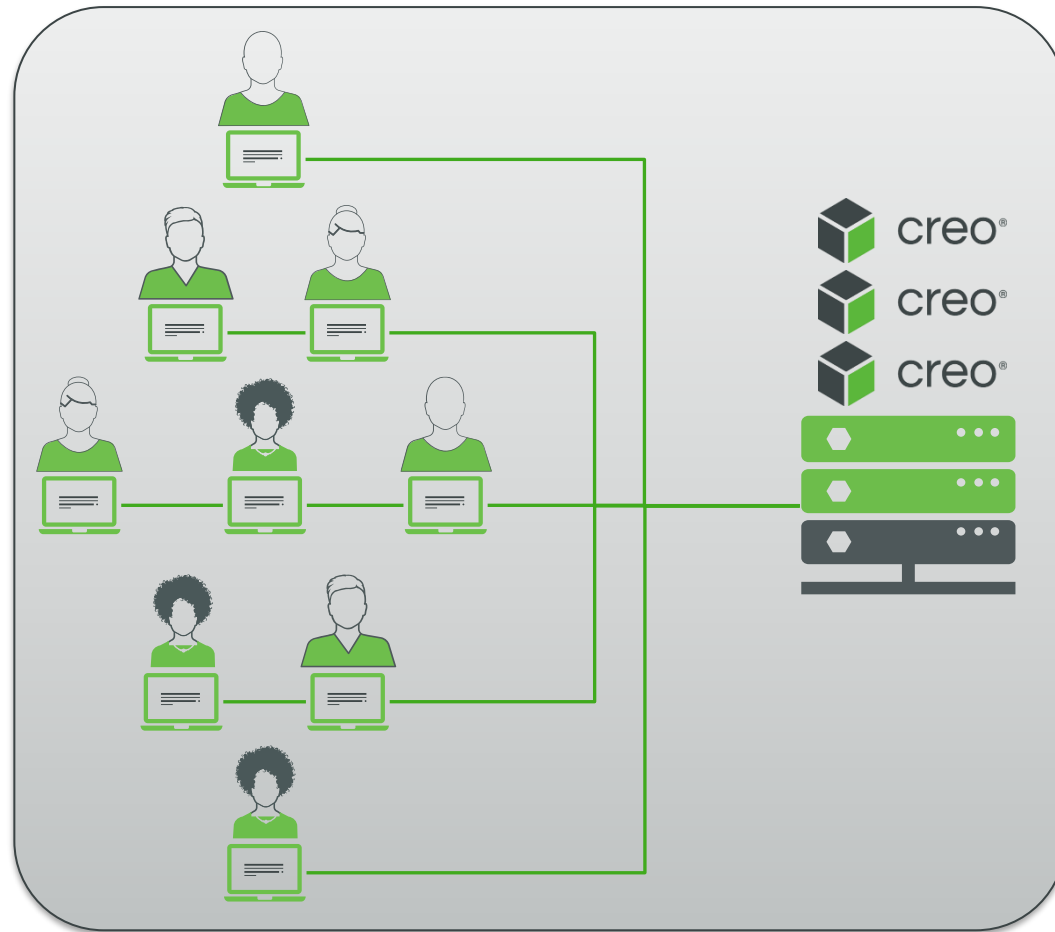
## All the Power of Creo, Plus:

- **Streamlined Deployment**
  - Simple user access and entitlement control
- **Enhanced Collaboration**
  - Multi-user, real time collaborative design
- **Compatible with:**
  - Windchill+
  - Windchill On-Premises (Indefinitely)



- easy to use
- easy to configure
- easy to deploy
- always up to date

# CURRENT PROCESS FOR ON-PREM CREO



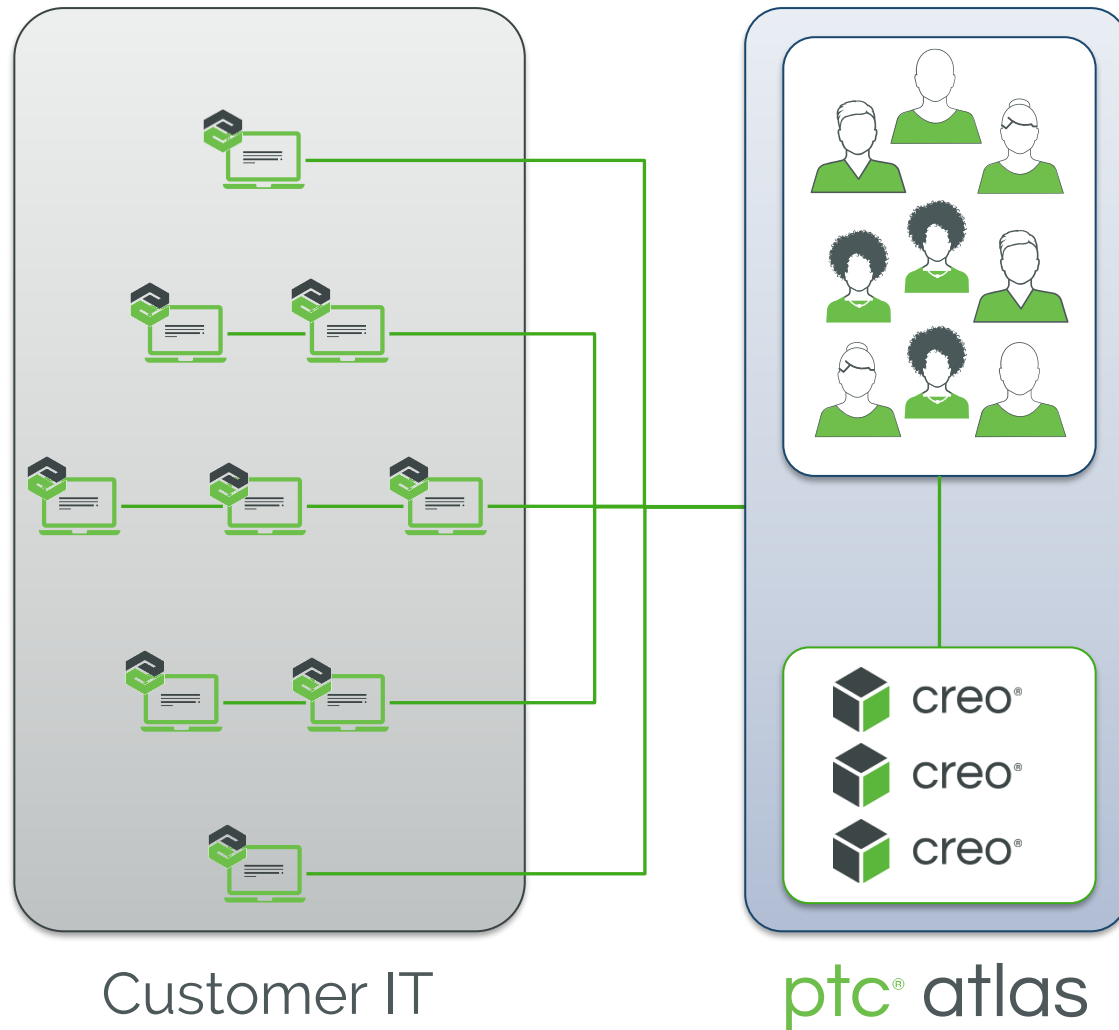
Customer IT

## Floating Licenses w/ Concurrent Users

- Companies generate and manage their Creo licenses on a local server
- Admin's install, configure Creo which will be deployed to their users
  - Perform exhaustive testing to validate the version
- Leverage 3<sup>rd</sup> party tools to push the validated version to their users

**Note:** Each update requires steps to be repeated

# TRANSITION TO CREO+ POWERED BY ATLAS



## Named User Entitlement with access to Extensions

- Users are invited into the organization and granted access to run Creo+
- Users are assigned Named User License Entitlements based on their given role and responsibility
- Groups are created with a defined setup options, dedicated extensions licenses and assigned users
- Creo+ would be automatically be installed on user machines, based on group specifications
- Updates are automatically pushed and installed to all users

### Solution:

- Through central administration and deployment, calls to Technical Support will be drastically reduced



Home

# Home

## Welcome to the Creo+ Portal

Here you can configure Creo+ global settings, assign licenses, and install Creo+.

Simple steps to get started:

1. Complete the Global Setup.
2. Invite people to the organization.
3. Assign licenses to enable them to run Creo+.
4. Use the Profiles tab to create and edit profiles in the organization.

Watch "Introduction to Creo+" for an overview of the setup.

## ACME Engineering - Creo+ Beta 2 Summary

People: 3

Groups: 3

### Global Setup

Set up the Creo+ version and configuration for your organization.

[Start](#)

### Invite People

Invite People to your organization via the Admin Portal

[Start](#)

### Setup Licenses

Assign license entitlements to people.

[Start](#)

### Download PTC Control Center

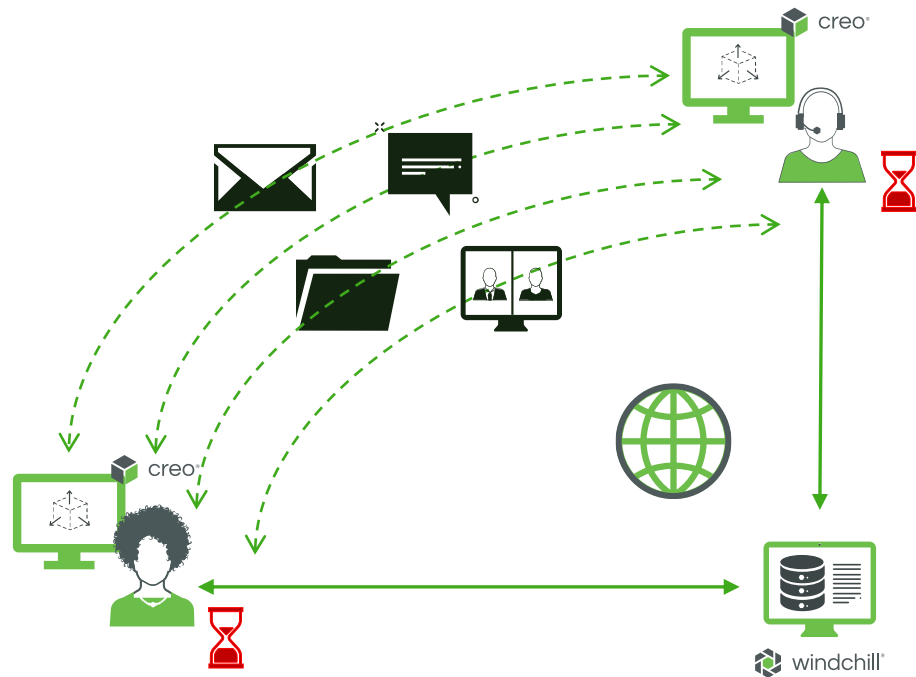
Download and install the PTC Control Center to automatically install Creo+ on your computer.

[Download](#)

## Resources

### Introduction to Creo+

# CURRENT COLLABORATION



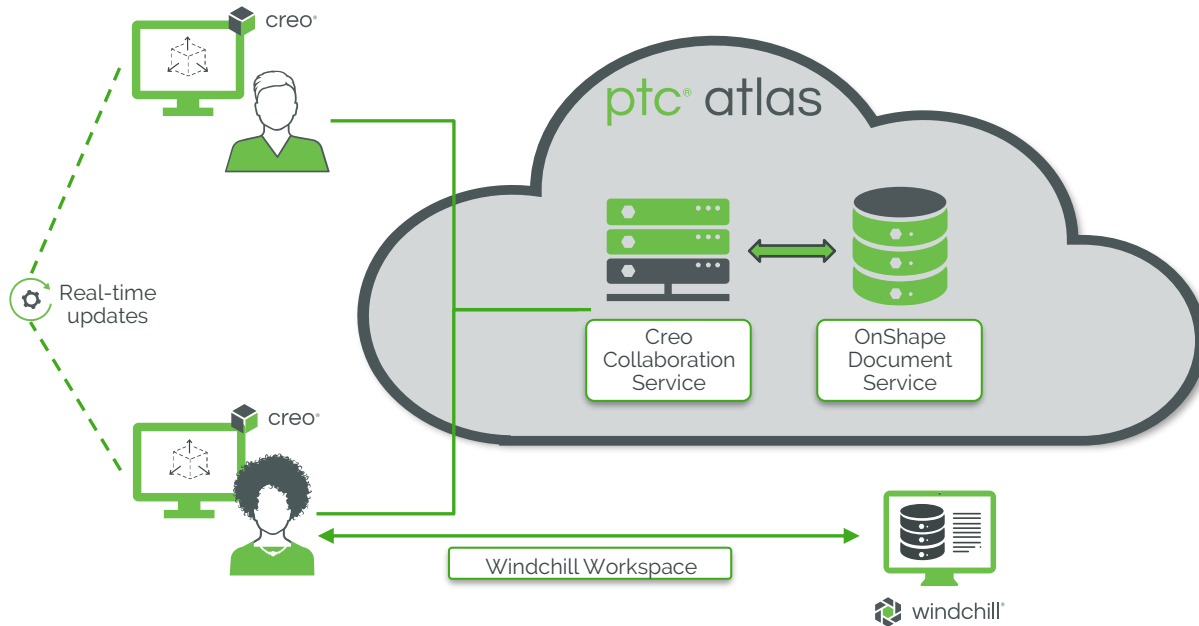
## Current collaboration methods are ad-hoc and sequential

- Users make changes to the design, check the data into PDM, another user checks out the data and makes changes
- Companies collaborate with vendors and suppliers through e-mails, video calls, and chats
- There's no centralized and secure way to capture design feedback from downstream back into the Creo model for designers

## Challenge:

- How do we bring together designers and other stakeholders to work on designs without the limitations of current communication?

# COLLABORATION WITH CREO+

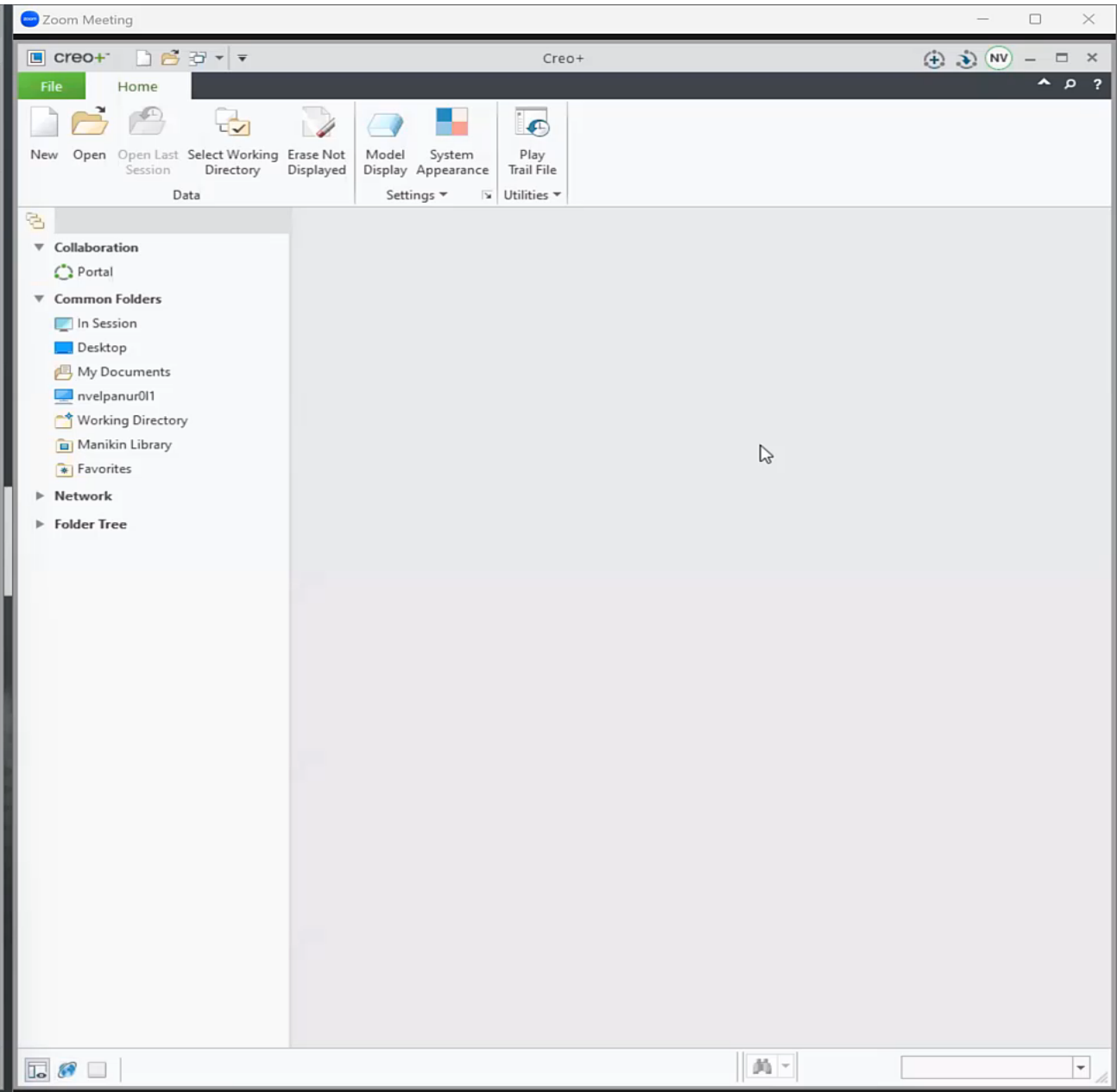
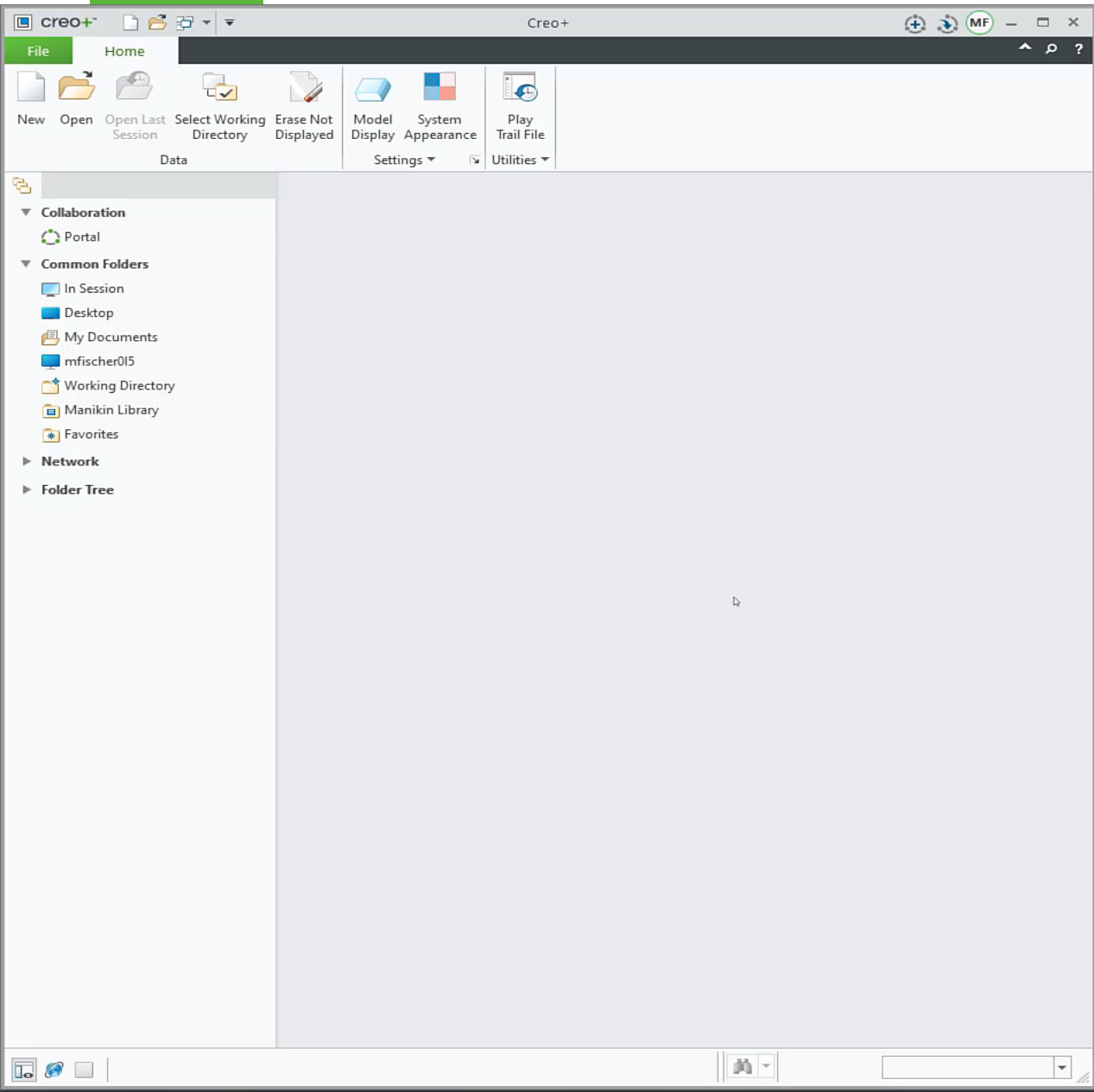


## Multi-user Collaboration in Creo

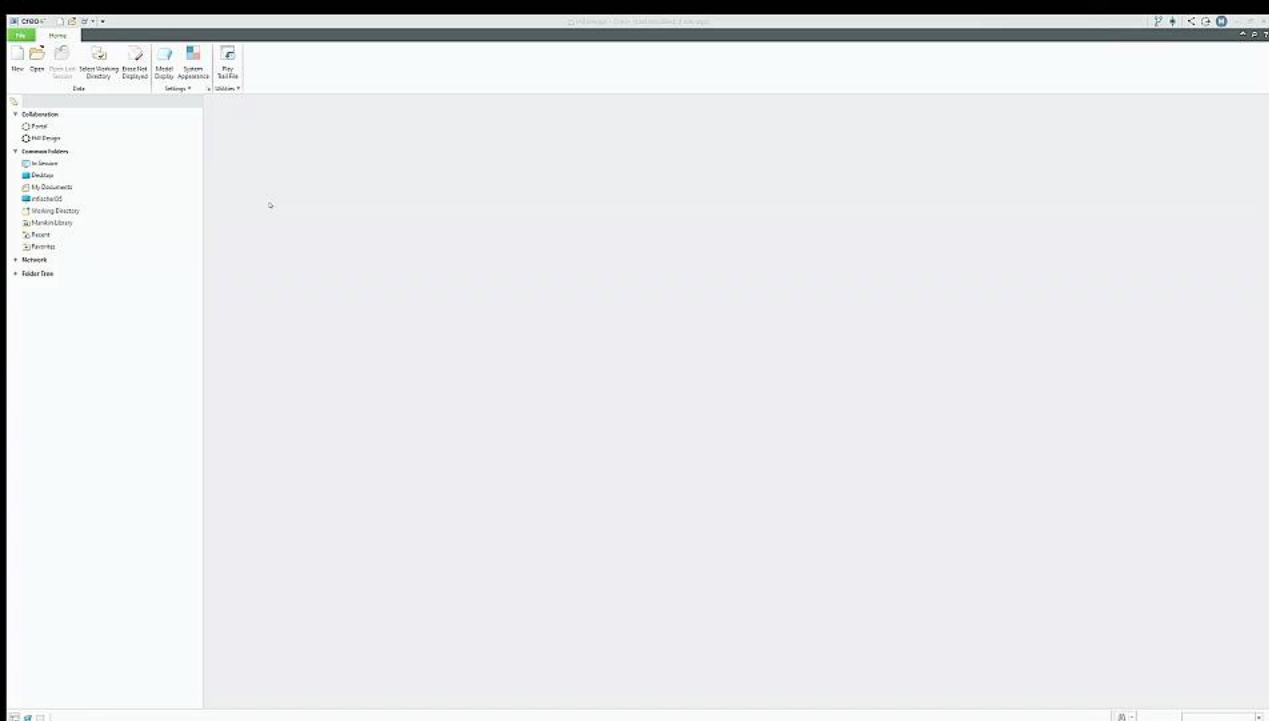
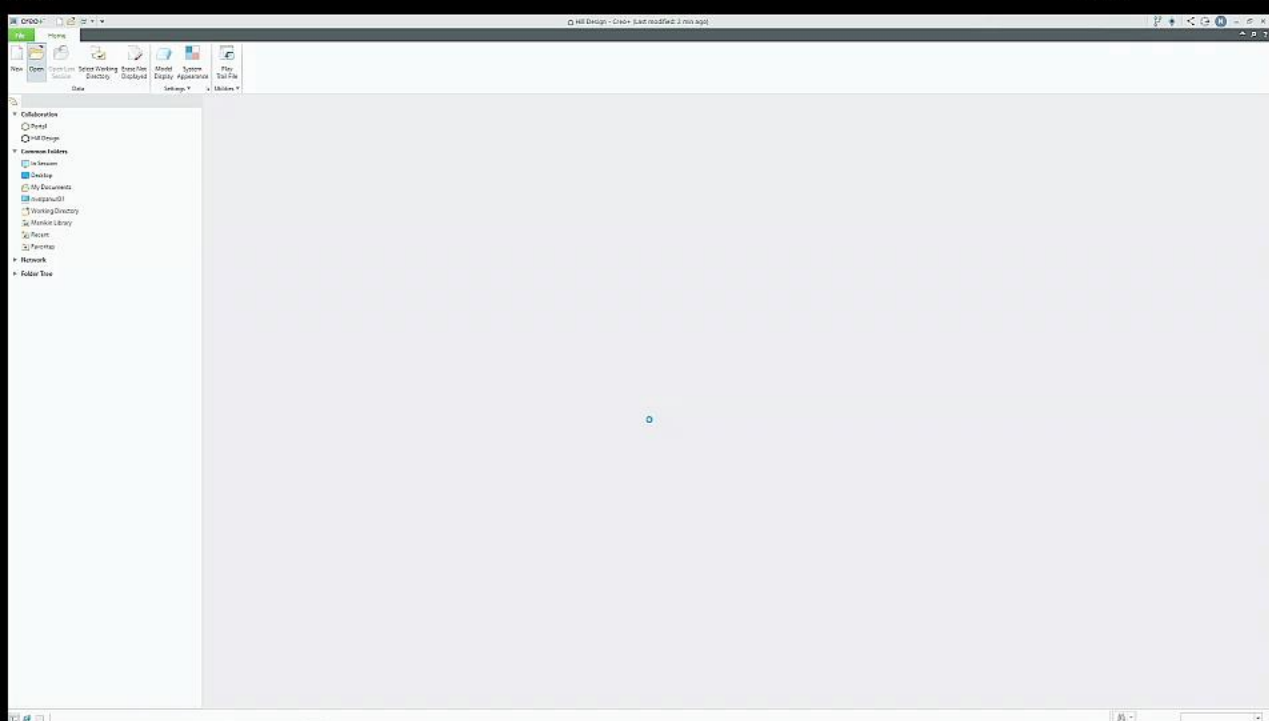
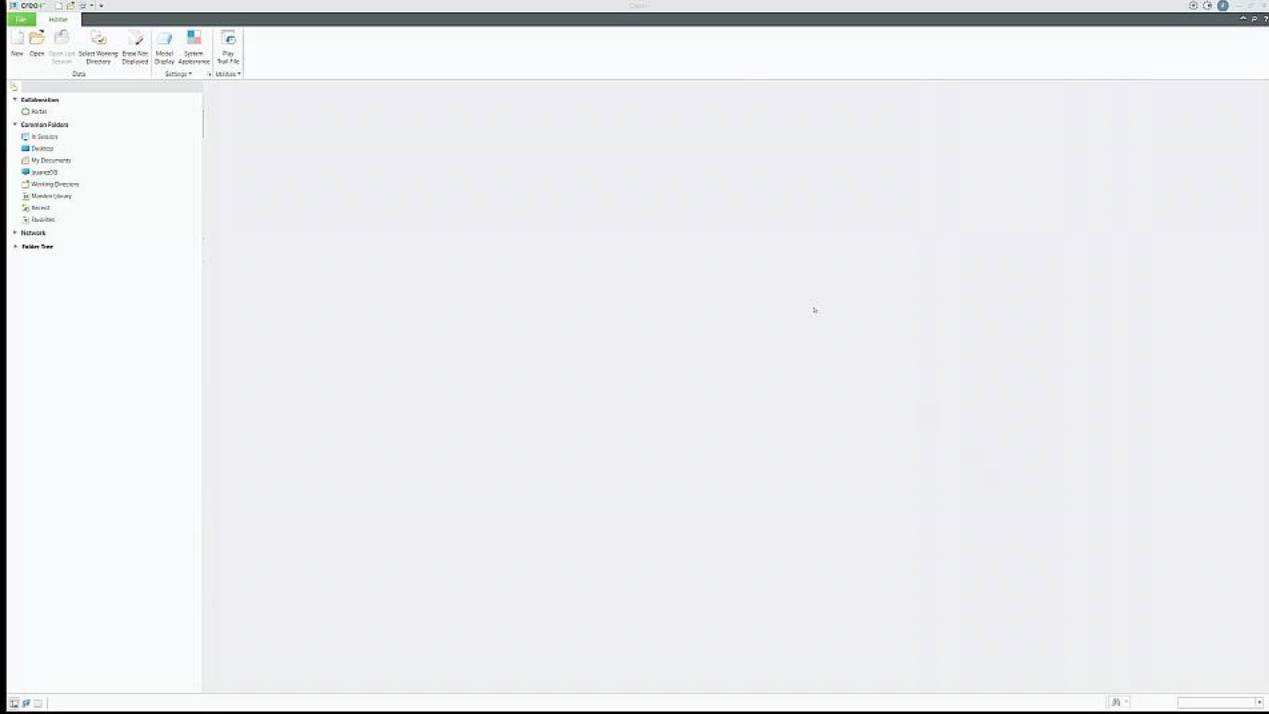
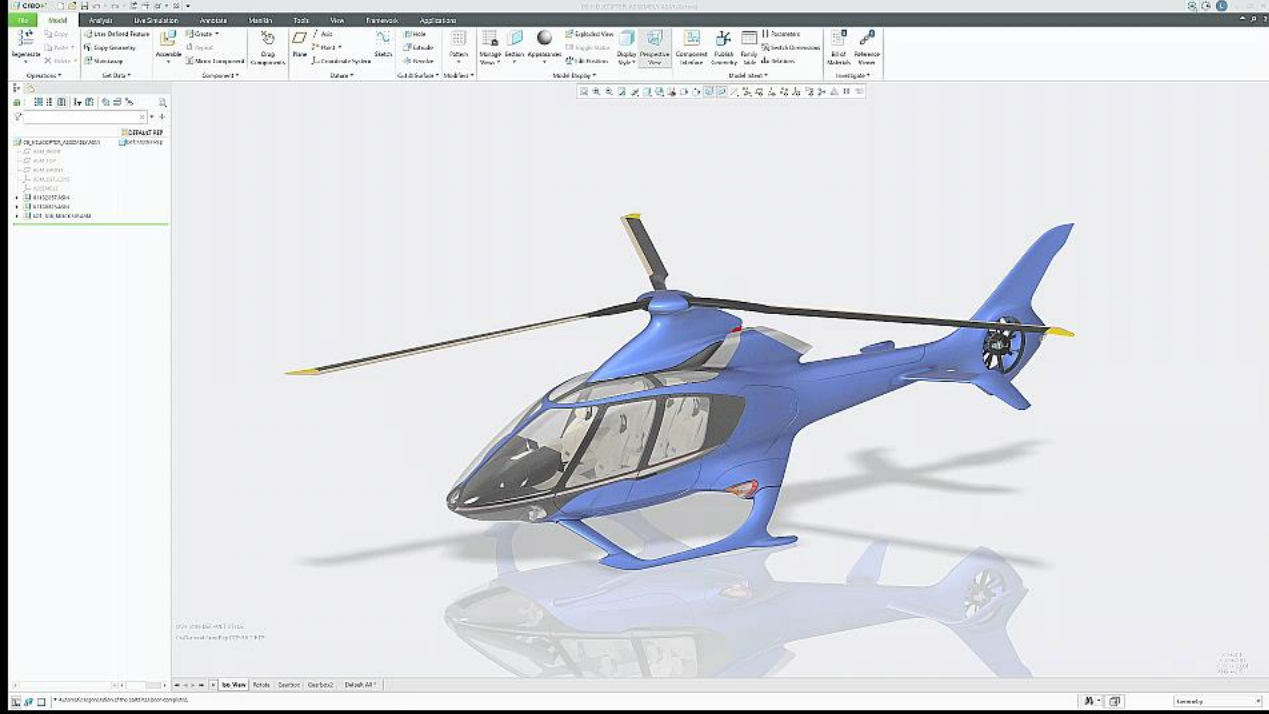
- Users starts up a Creo Collaboration session and bring in the required project data
- Multiple other users can be invited to join the Collaboration session and work on specific portions of the design
- Since the Collaboration service runs on Atlas, each change is synchronized in real-time across all users
- Multiple design variations can be explored and feedback can be captured within the project

### Solution:

- Creo Collaboration brings together multiple designers to collaborate in real-time – faster and more efficiently in a secure connected environment



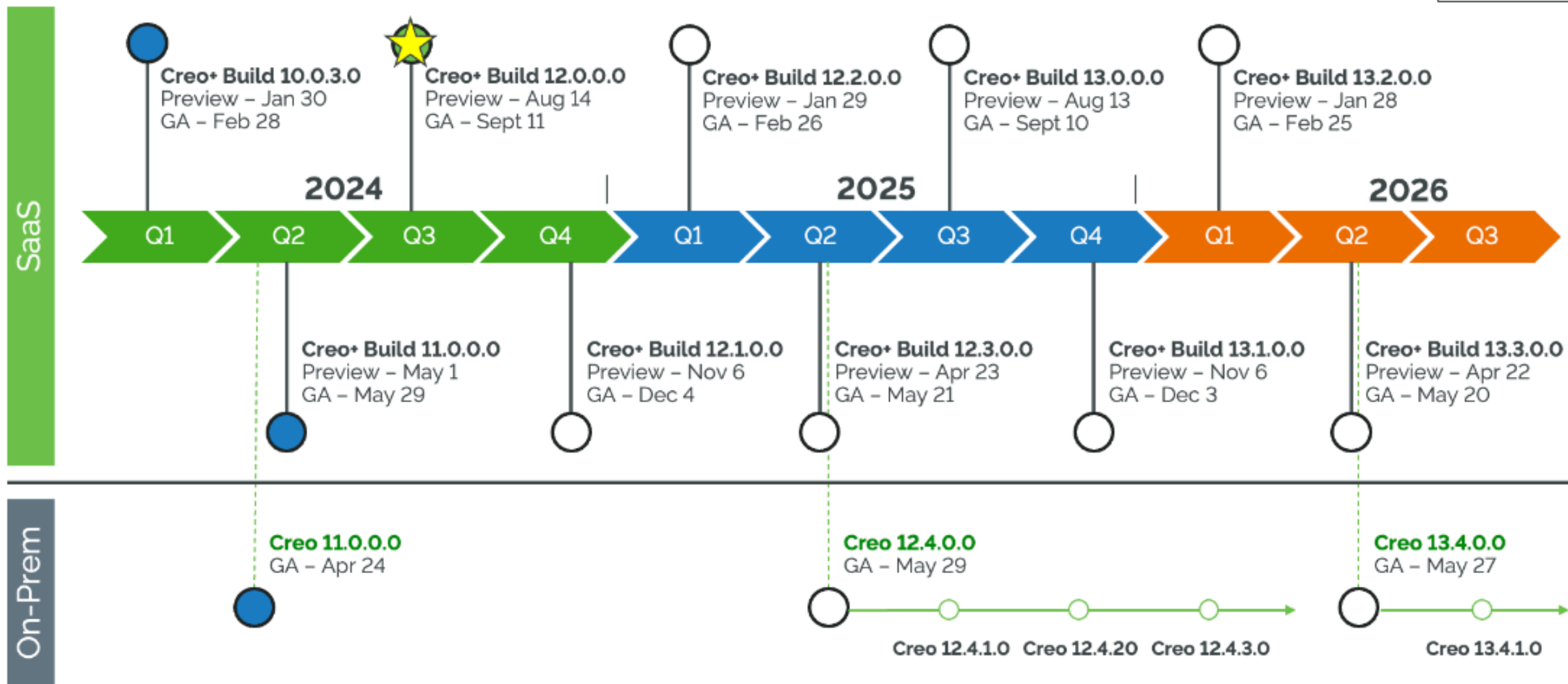




# CREO+ "SAAS FIRST" RELEASE CADENCE

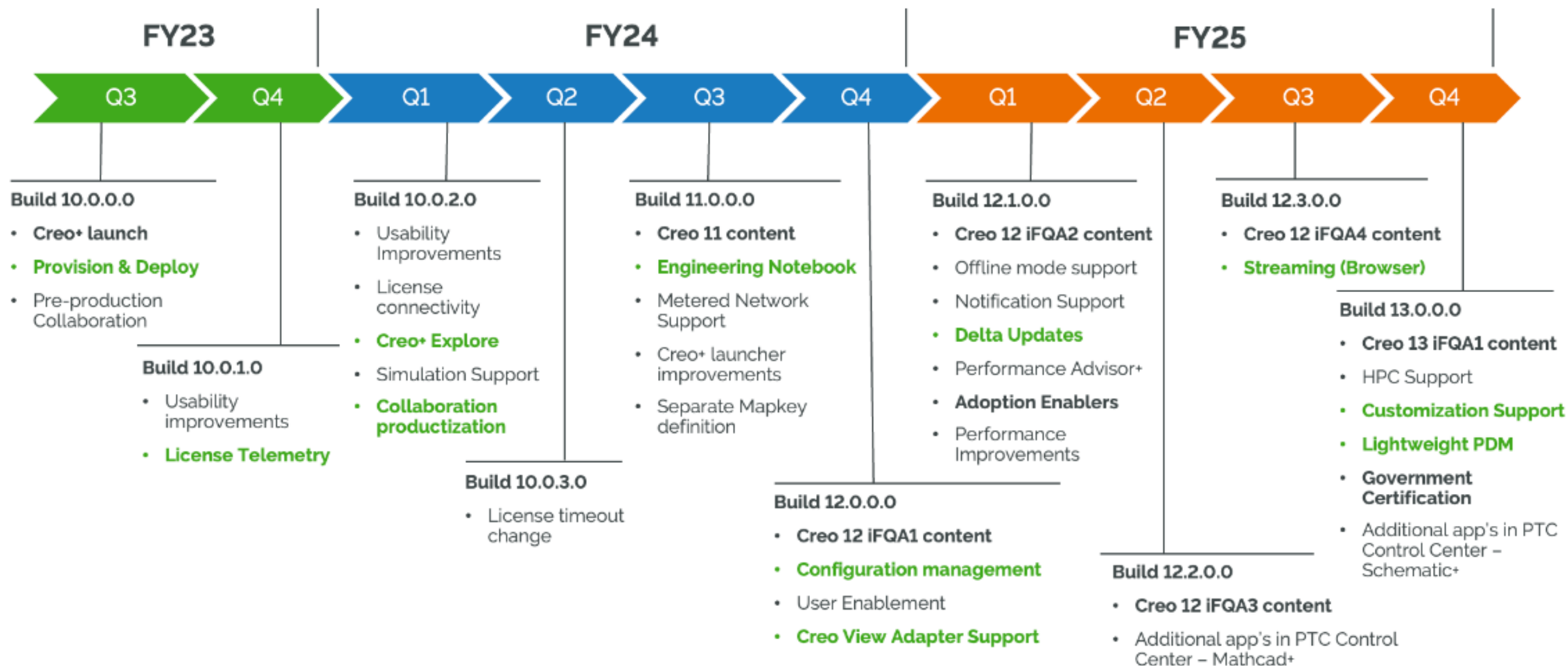
**Key**

- On track
- Not Started
- Completed



Future looking information subject to change without notice (GA dates might change)

# ROADMAP FOR CREO+



## Creo+ SaaS-Only Capabilities

Future looking information subject to change without notice



# AI IN ENGINEERING



# VALUABLE

## APPLY PRACTICAL AI SOLUTIONS TO OUR CUSTOMERS TOP PROBLEMS



### Engineering

#### Accelerate Product Development

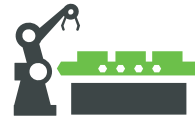
Smart requirements & test authoring, design recommendations, supplier analytics

#### Reduce COGS

Part rationalization, reuse, classification

#### Quality, Risk & Impact

Quality, change mgt analytics, IP protection



### Manufacturing

#### Design for manufacturability

Automate process plans & work instructions authoring

#### Improve Operational Efficiencies

Identify bottlenecks, time loss efficiencies, accelerate issue triage and resolution

#### Skill the Workforce

AI-assisted assembly, changeover, and maintenance



### Service

#### Optimize Spare Parts Management

Inventory forecasting, pattern detection, failure rate root cause, sustainability insights

#### Proactive Service

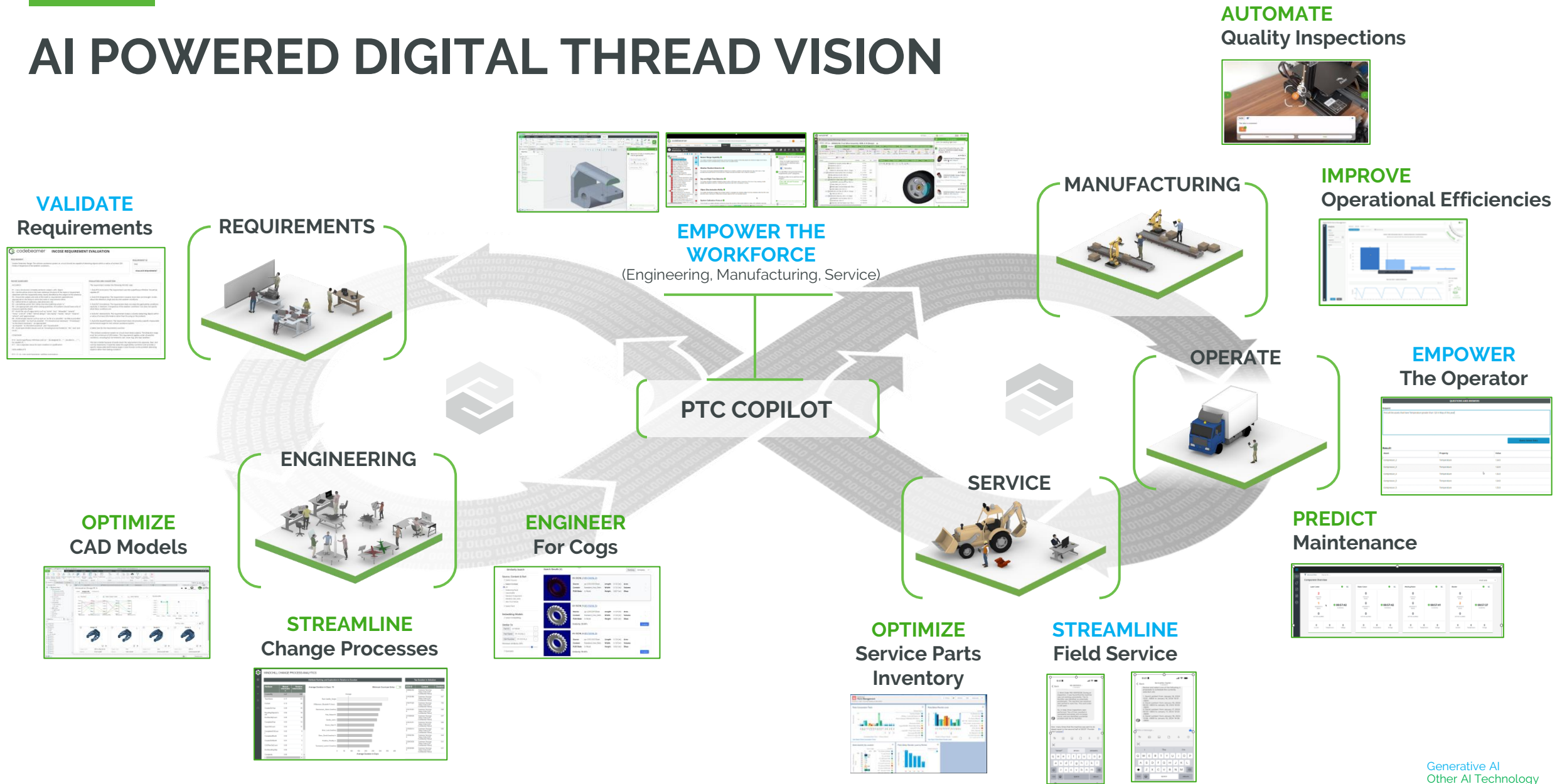
Remote troubleshooting and triage; forecast technician scheduling

#### Reduce Service Delivery Costs

Reduce field visits and truck roles; reduce onsite time with AI assistance

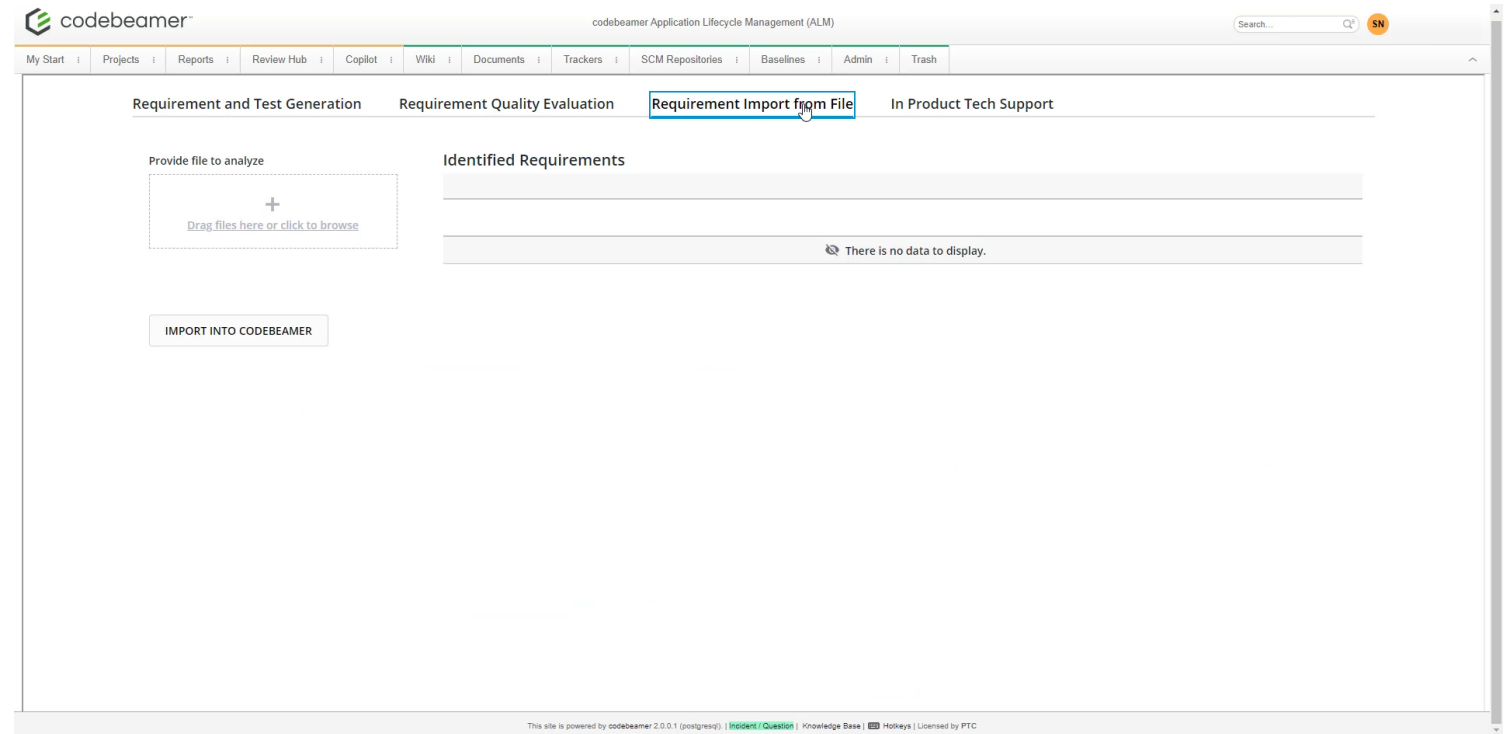
**Improved customer experience** – smart search, chatbot for knowledge and expert support

# AI POWERED DIGITAL THREAD VISION



# COPILOT FOR REQUIREMENTS AUTHORIZING

- Analyze requirements for quality such as INCOSE guidelines or internal best practices (SMART)
- Ingest requirement references (RFPs, product vision) to speed up requirement planning and initial authoring
- Suggest and generate requirement & test case content
- Search for duplicate / similar requirements



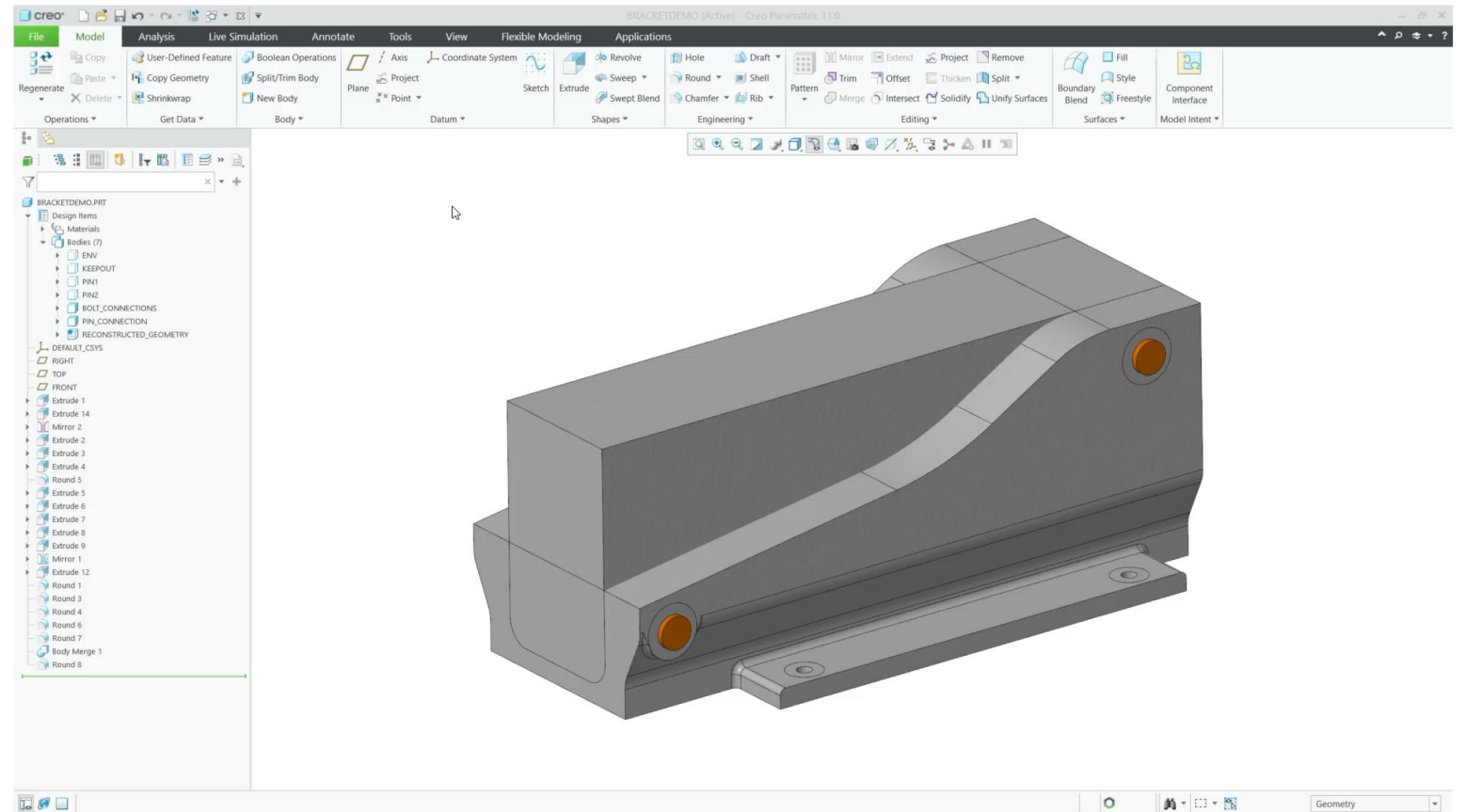
PRODUCT  
Codebeamer

AI & ANALYTICS  
Generative AI / Copilot

STATUS  
Research

# GENERATE 3D MODELS

- Uses algorithms and computational methods to explore a variety of design options based on specific constraints and objectives
- Considers parameters such as material property, manufacturing methods and performance



PRODUCT  
Creo

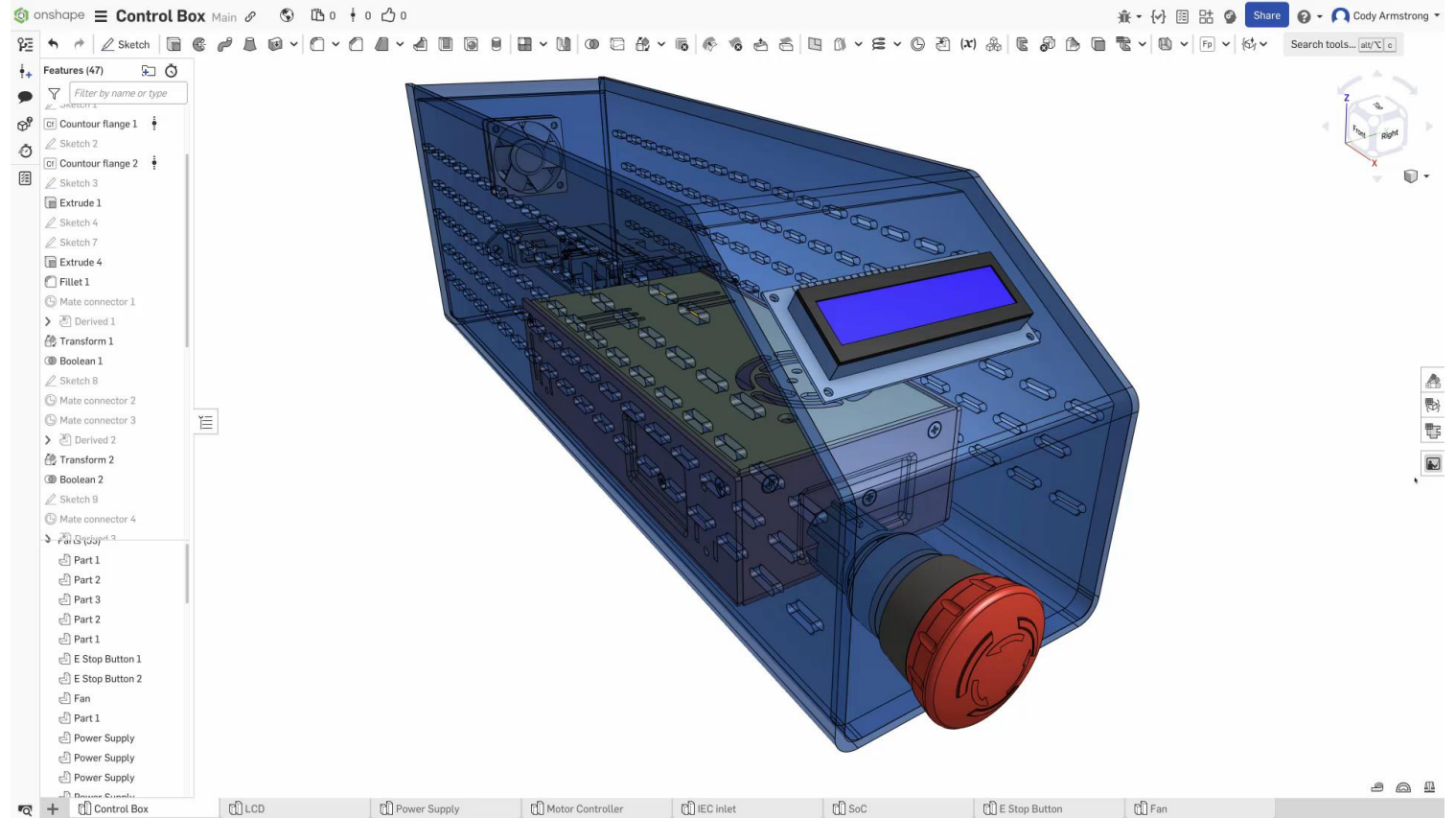
AI & ANALYTICS  
Generative Design

STATUS  
Released



# COPILOT FOR IN PRODUCT SUPPORT

- New User Experience
  - Support
  - Training
- Users can ask questions and get immediate answers referencing Onshape's vast library of learning materials



PRODUCT  
Onshape

AI & ANALYTICS  
Copilot

STATUS  
Research

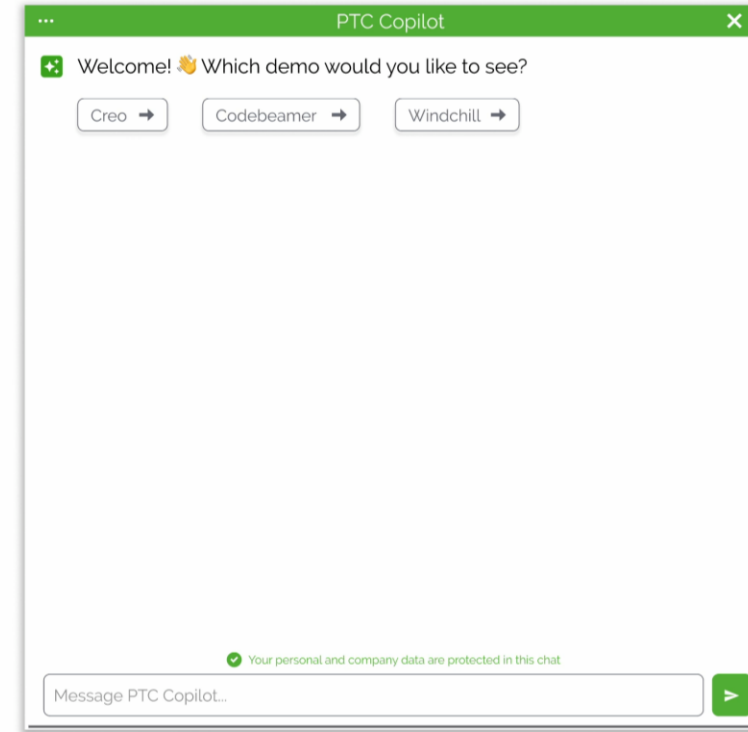
# COPILOT FOR ENGINEERING IN CREO

- Ask your engineering software for training and troubleshooting guidance
- Ingest requirements documents, create new requirements, and assess for quality
- Search your product data, find related documentation and part info, create reports for engineering stakeholders

Vision Demo



PTC Copilot



PRODUCT  
CAD, ALM, PLM

AI & ANALYTICS  
Copilot

STATUS  
Research

This is forward looking information subject to change at PTC's Discretion

# MATERIAL SELECTION – LOW IMPACT MATERIALS

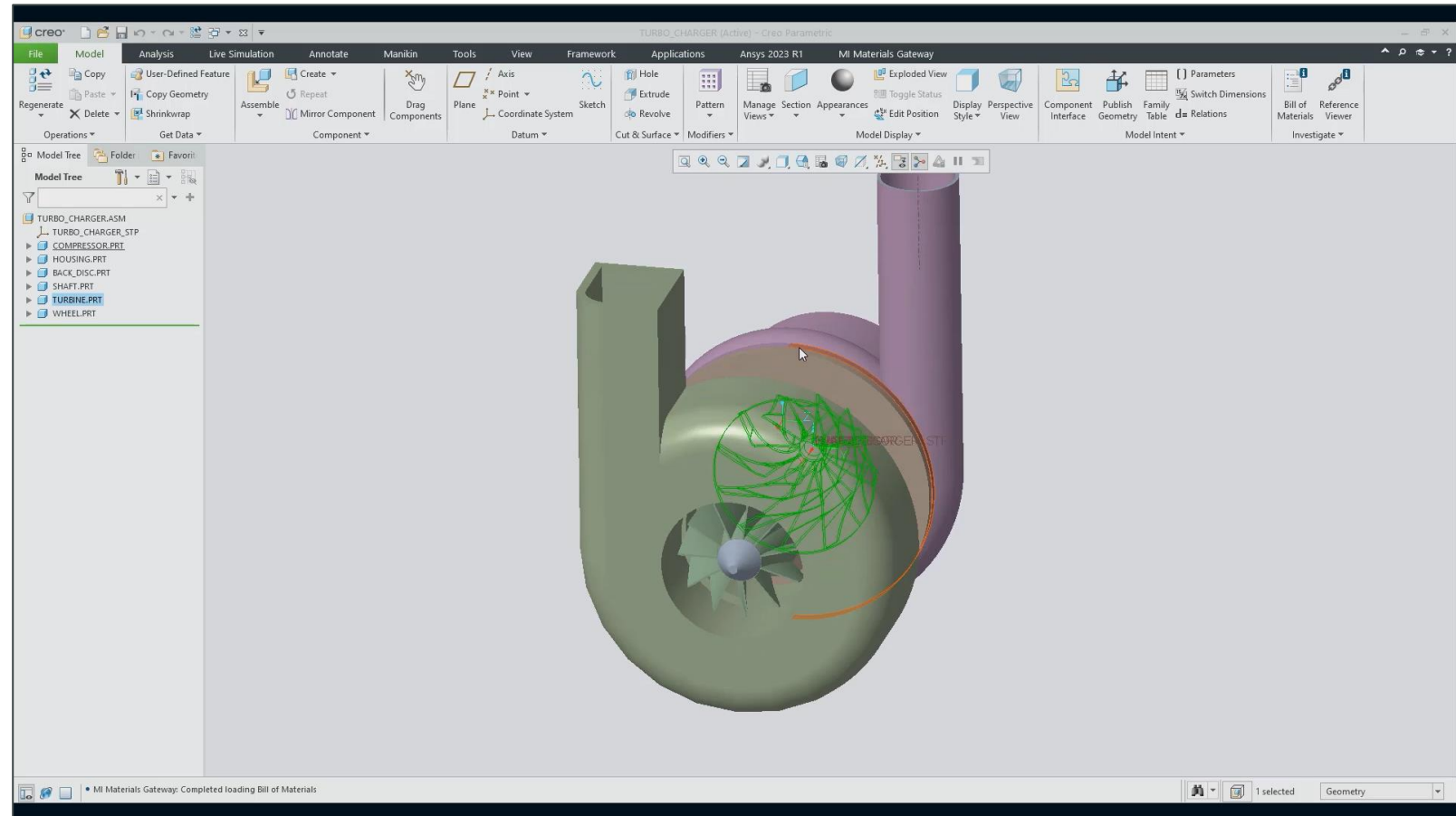
**Value: Find lower-footprint materials that meet specifications**

CAD designers search and select material

CAD-PLM synchronize material attributes used in roll-ups

Current & recommended material data source is Granta with Creo, but the API's plan to support other commercial and custom sources

Video: Creo user selects primary and alternative titanium grades



# PART REUSE AND CLASSIFICATION

## Applied AI

- Search similar parts while designing to reduce duplicate creation
- Find duplicates across your data to reduce carrying costs
- Get assistance classifying parts and associated attribute values

### Database Sources

Name	Type	URL	Contexts	Parts	Duplicates (%)	Indexed
PP-2301230725WE	Windchill	<a href="https://pp-2301230725we.portal.ptc.io/">https://pp-2301230725we.portal.ptc.io/</a>	5	5926	1860 (31.39%)	<input checked="" type="checkbox"/>
PP-2301230726NK	Windchill	<a href="https://pp-2301230726nk.portal.ptc.io/">https://pp-2301230726nk.portal.ptc.io/</a>	7	4241	3037 (71.61%)	<input checked="" type="checkbox"/>

Add Source

### Database Apps

#### Database Cleansing

Run Duplicate Search on your source database of choice to find duplicates. Search results are clustered into groups of possible duplicates.

Duplicate Search

#### Part Reuse

Search for similar parts in your source database or context of choice. Search results can be refined by filtering and ranked with different orderings.

Similarity Search

#### Classify Parts

Identify unclassified parts in your Windchill PLM database of choice and assign them to correct classes based on their similarity.

Classify Parts

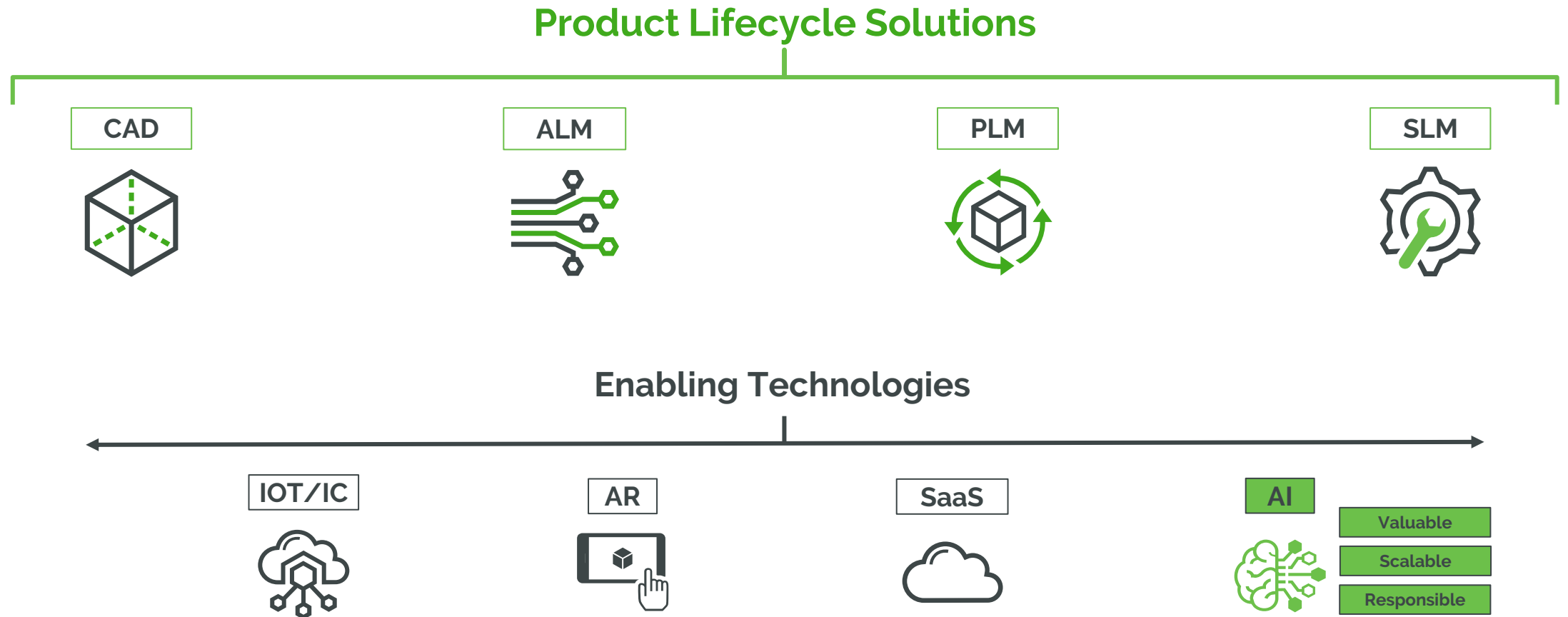
PRODUCT  
Windchill

AI & ANALYTICS  
Computer vision, Machine learning

STATUS  
Research



# AI IS AN ENABLING TECHNOLOGY FOR PTC'S PRODUCT LIFECYCLE SOLUTIONS





# THE ROAD AHEAD



User Productivity (AI and Foundational)



Model-Based Definition



Design for Electrification



Composite Design and Manufacture



Design for Manufacturing



Simulation Driven Design



SaaS



**THANK YOU**

[ptc.com](http://ptc.com)



# MBD & ISO-GPS mit Creo Parametric

Das neue GENIUS TOOLS Produkt  
GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS

Bayreuth, den 11.9.2024, Steffen Neßler



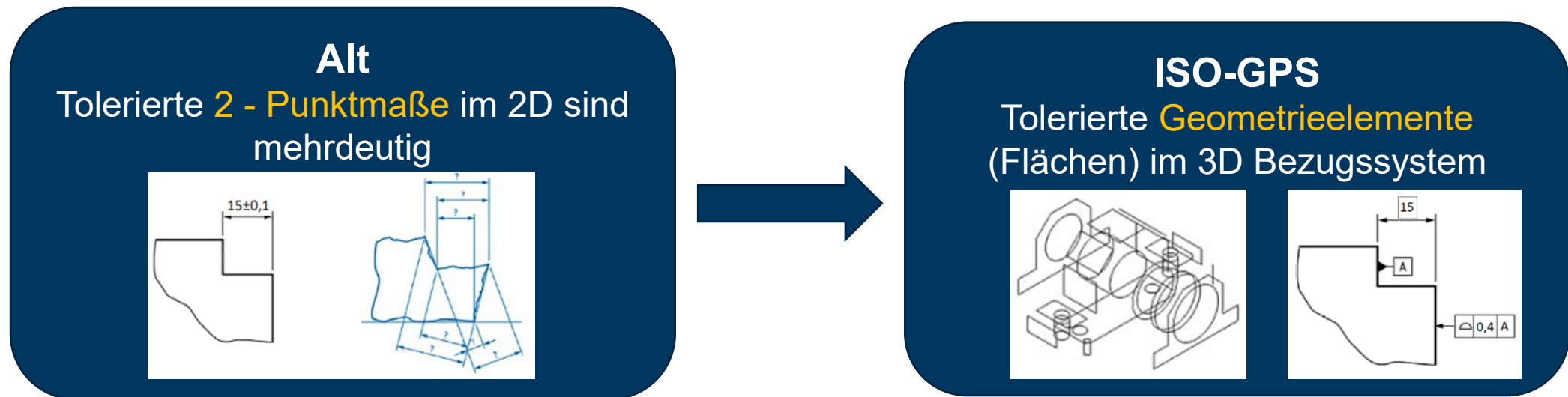


# Agenda

- Warum ein neues Produkt mit diesen Namen?
  - Warum ISO-GPS?
  - Warum MBD?
  - Warum MBD & ISO-GPS?
- **Funktionsorientiertes Konstruieren und Spezifizieren im 3D**
  - Creo Parametric Workflow für MBD / ISO-GPS
- MBD / ISO GPS und Creo Parametric mit INNEO
  - In 3 Schritten zu MBD / ISO-GPS TDPs (Technical Data Package)
- **GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS**
  - Demo
  - Produktübersicht

- Die Geometrische Produktspezifikation (ISO-GPS) ist nach ISO 8015 das **aktuelle Regelwerk** zur Spezifikation der Produktgeometrie (TDP; Zeichnungen) und deren Verifikation.
- Warum ein neues Regelwerk?

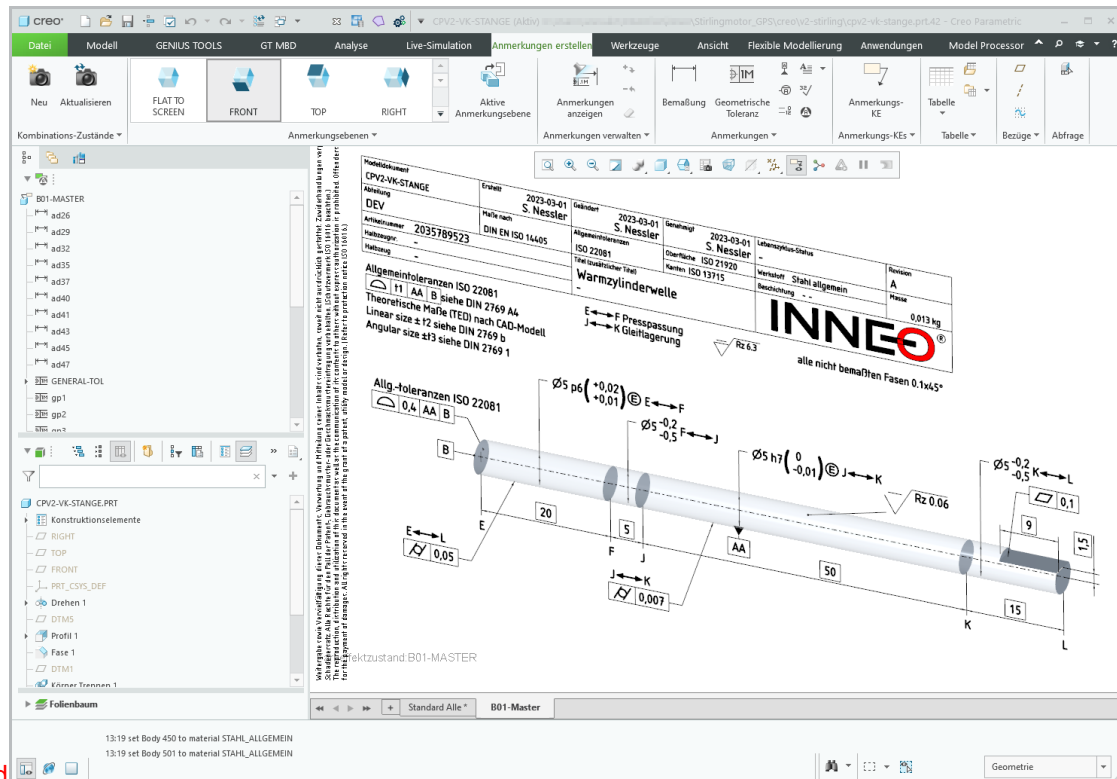
Eine 1:1 „**Übersetzung**“ ist NICHT möglich.



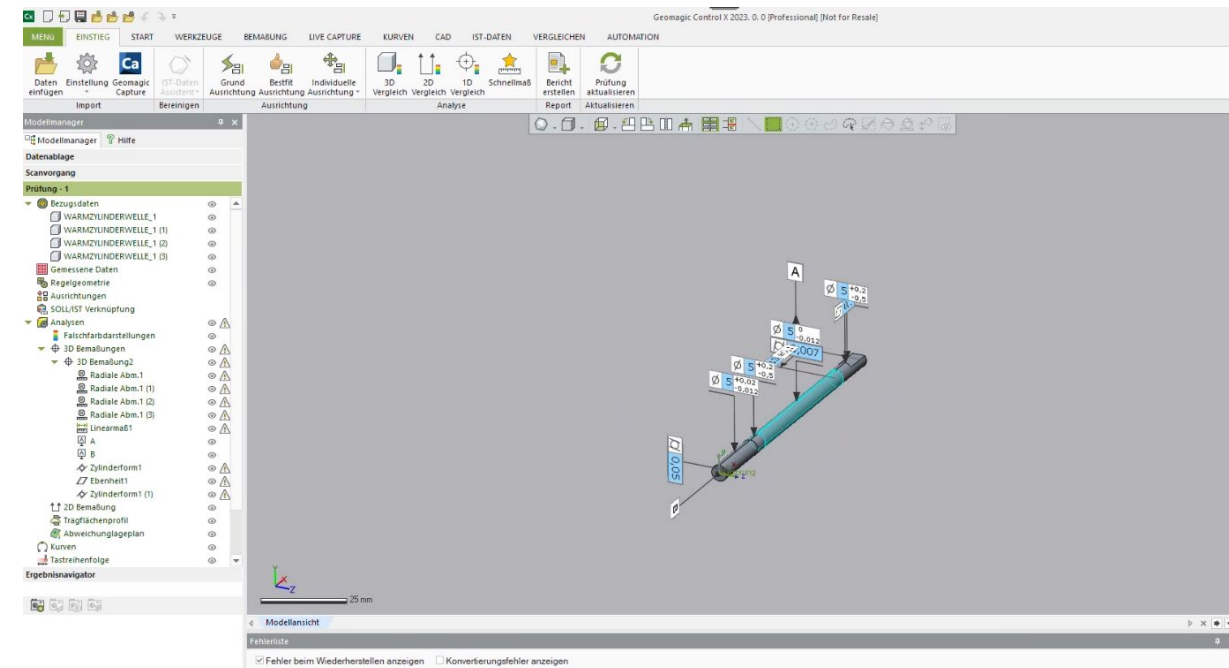
ISO-GPS hat den Fokus auf eine funktionsorientierte Spezifikation

- Eine Quelle für alle Produktangaben (Geometrie, Spezifikation)
- Bei MBD löst das 3D-Modell die 2D-Zeichnung als PMI-Quelle ab. Dabei ist jede PMI mit der Geometrie verknüpft (Semantik).
- Basis für menschen- und maschinenlesbare für Folgeprozesse

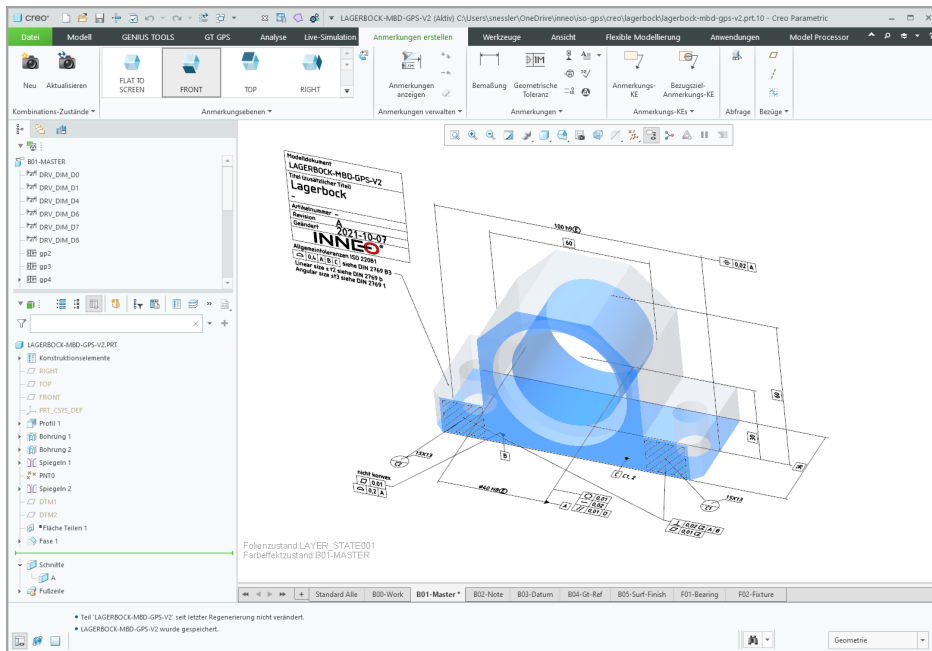
## CAD Creo Parametric Model



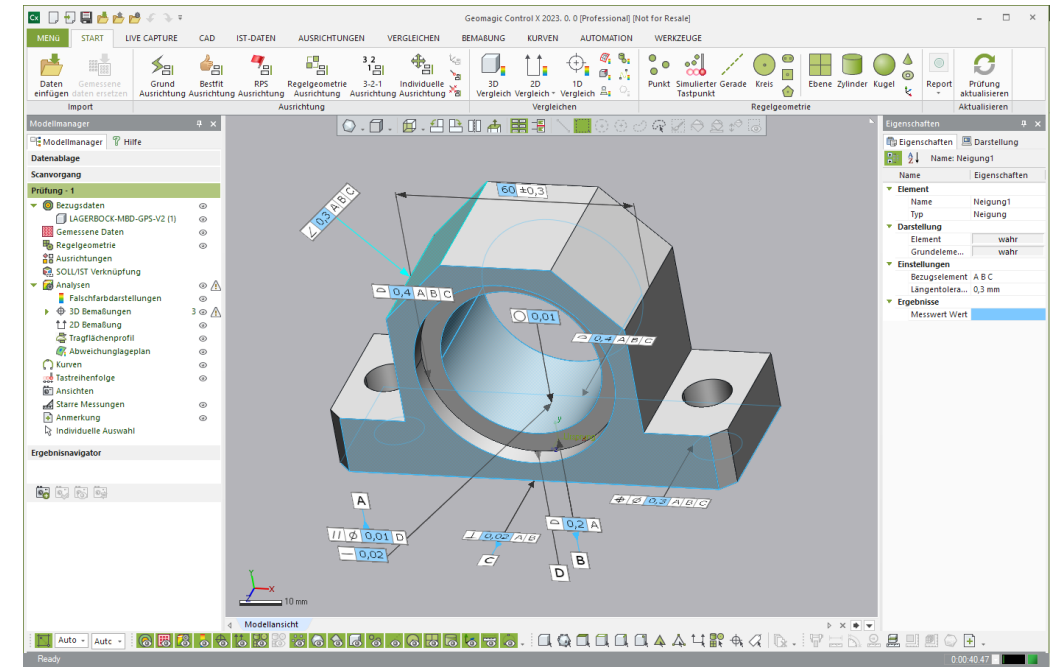
## QA Geomagic Control X



- Obwohl in allen **ISO-GPS** Normen die Produktspezifikationen in 2D-Zeichnungsdarstellungen abgebildet sind, handelt es sich um **eine dreidimensionale Beschreibung** (Geometrieelemente gibt es nun mal nicht in Zeichnungen).



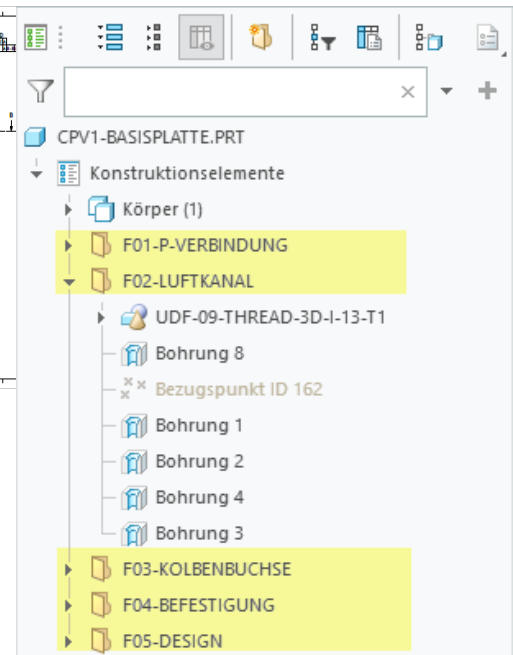
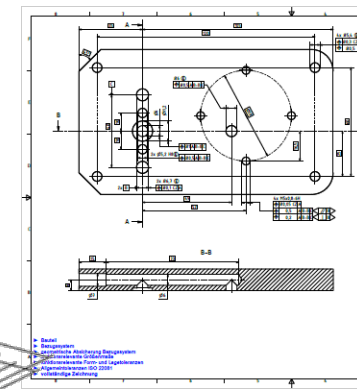
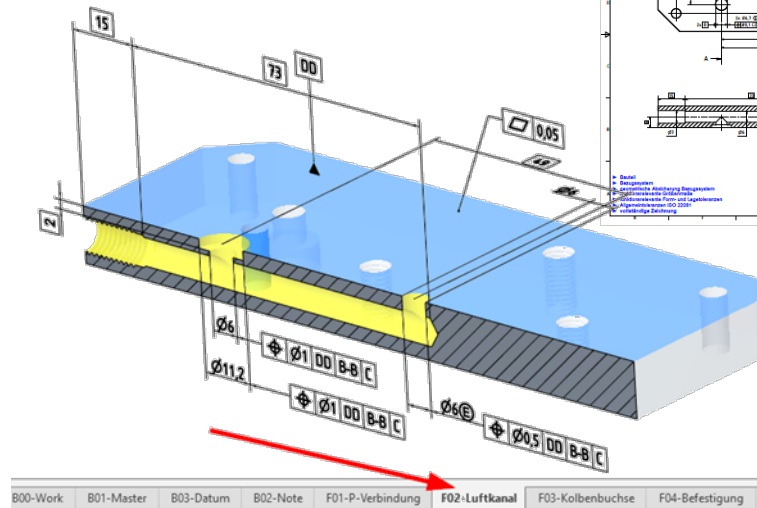
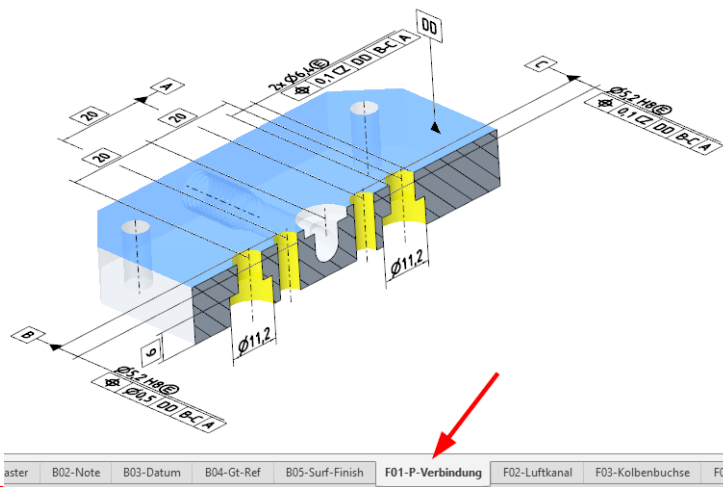
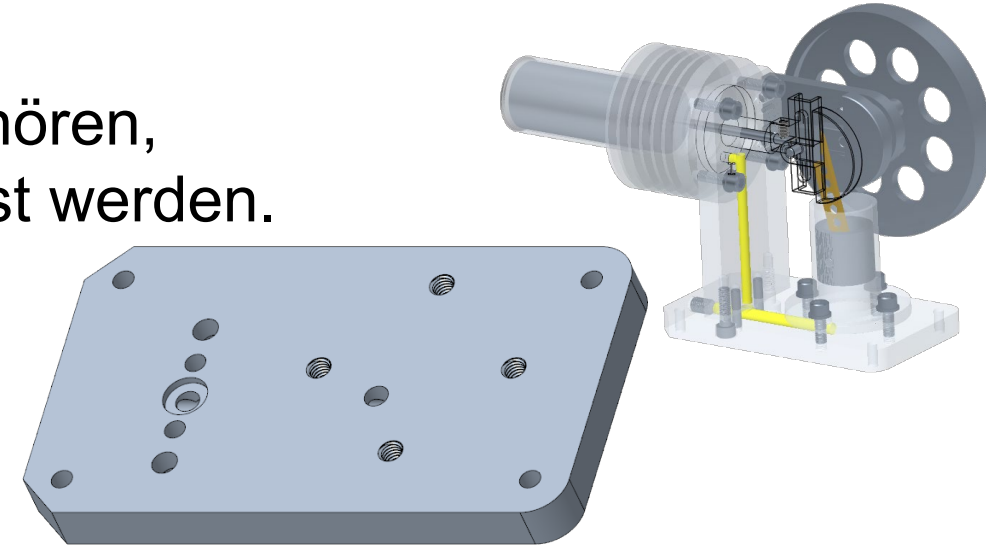
Kosteneinsparung  
im QA-Prozess



**Funktionsorientiertes Konstruieren und Spezifizieren im 3D**



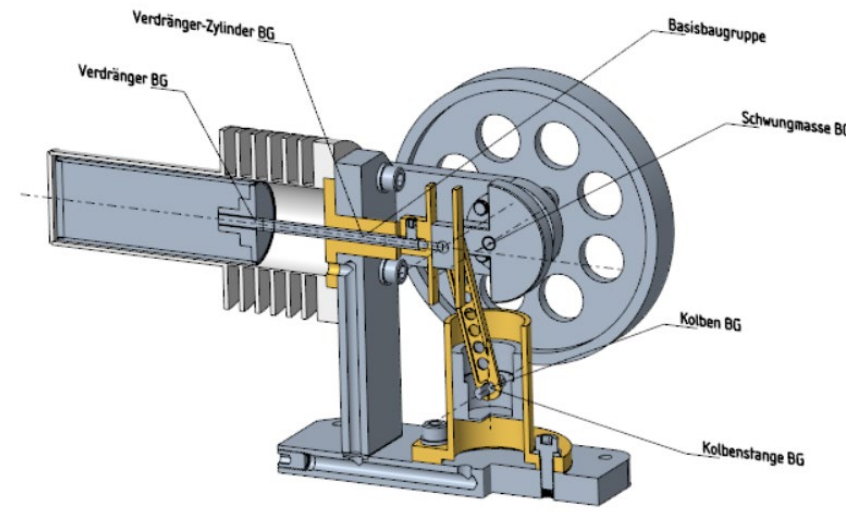
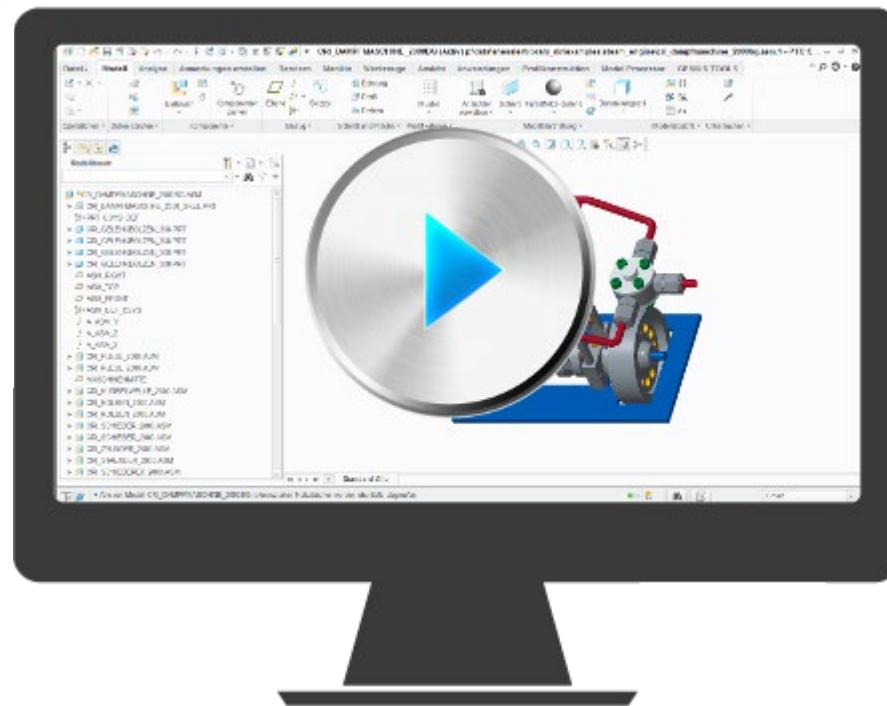
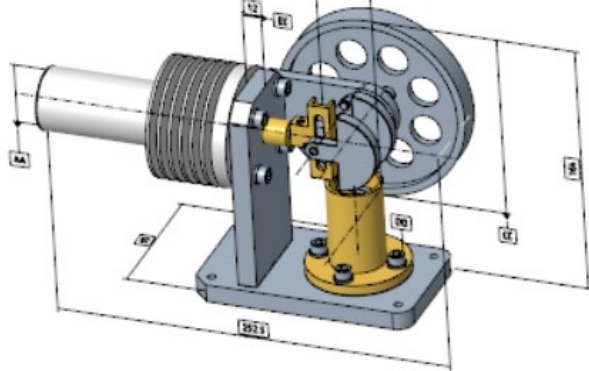
- Konstruktionselemente, die zu einer Funktion gehören, können in Konstruktionsgruppen zusammengefasst werden. (Konstruktionsbaum ab Creo 8.0)
- Jede Funktion kann in einer oder mehreren kombinierten Ansichten abgebildet werden.
- Hier wird die ISO-GPS Spezifikation abgebildet
- Farben können helfen, die Funktion mit den zugehörigen Geometrieelementen schneller zu verstehen



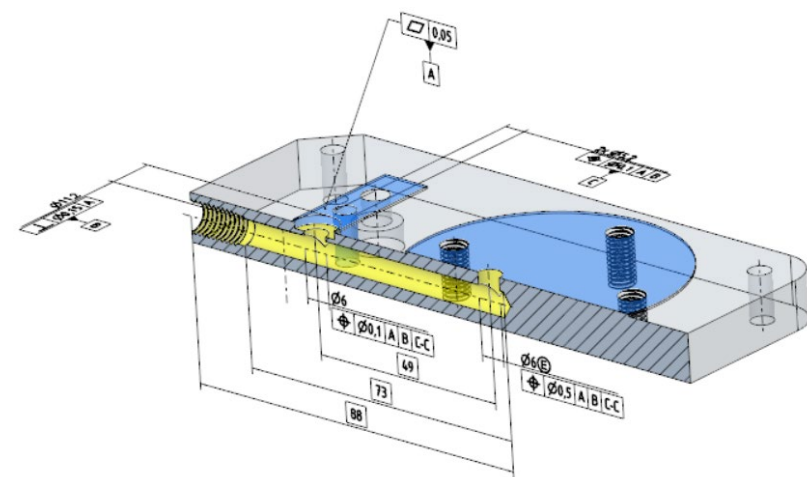
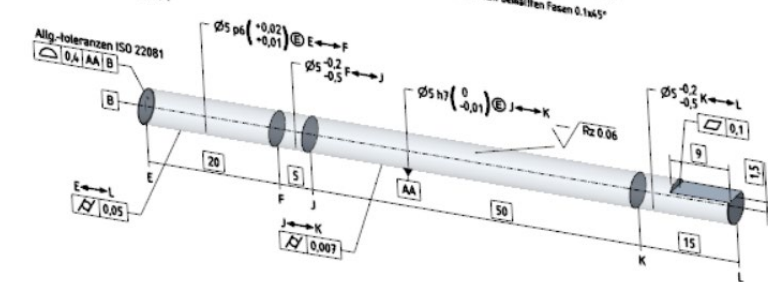
## Live Demo

Wichtigster Punkt: Die Rechte für den Fall der Patente, Gebrauchsmuster oder Geschäftsgeheimnisse verbleiben bei der Produktion, Distribution und Nutzung des Motors als auch bei der Konstruktion der Bauteile ohne schriftliche Genehmigung. Offenders will be held liable for the payment of damages. All rights reserved in the event of the grant of a patent, utility model or design. Similar to protection notice ISO 10013.

Produktname	Datum	Geändert	Geändert	Geändert	Technische Status	Rev.
CPV2-STIRLINGMOTOR	2023-02-28	S. Nessler	2023-02-28	S. Nessler	2023-02-28	A
DEV	2023-02-28	S. Nessler	2023-02-28	S. Nessler	2023-02-28	A
Art-Nr.	2035789276	DIN EN ISO 14405	ISO 22061	Überichte ISO 1392	Verfahren	Stahl allgemein
Teilname					Material	
Bezeichnung					Bezeichnung	
<p>Algemeintoleranzen ISO 22061</p> <p>Lineare Maße <math>\pm 0,1</math> siehe DIN 2769</p> <p>Lineare Maße <math>\pm 0,2</math> siehe DIN 2769 b</p> <p>Angular Maße <math>\pm 0,5</math> siehe DIN 2769 1</p>						
<b>INNEO</b>						3,614 kg



Produktname	Datum	Geändert	Geändert	Geändert	Technische Status	Rev.
CPV2-WÄRMELÄUFE	2023-03-01	S. Nessler	2023-03-01	S. Nessler	2023-03-01	A
DEV	2023-03-01	S. Nessler	2023-03-01	S. Nessler	2023-03-01	A
Art-Nr.	2035789523	DIN EN ISO 14405	ISO 22061	Überichte ISO 1392	Verfahren	Stahl allgemein
Teilname					Material	
Bezeichnung					Bezeichnung	
<p>Algemeintoleranzen ISO 22061</p> <p>Theoretische Maße (TEO) nach CAD-Modell</p> <p>Lineare Maße <math>\pm 0,2</math> siehe DIN 2769 b</p> <p>Angular Maße <math>\pm 0,5</math> siehe DIN 2769 1</p>						
<b>INNEO</b>						0,612 kg



## Schritt 1

### ISO-GPS Kenntnisse erlernen

- Seminare „Geometrische Produktspezifikation (GPS)“
- SIGMETRIX Online Training



## Schritt 2

### Funktionalitäten in Creo Parametric erlernen

- Schulung „Model Based Definition“
- Verwendung von GD&T Advisor
- GPS konformes Bemaßen am Creo Parametric Modell
- Vertiefende Workshops
- Toleranzanalyse mit CETOL $\sigma$ /EZ-Tol

## Schritt 3

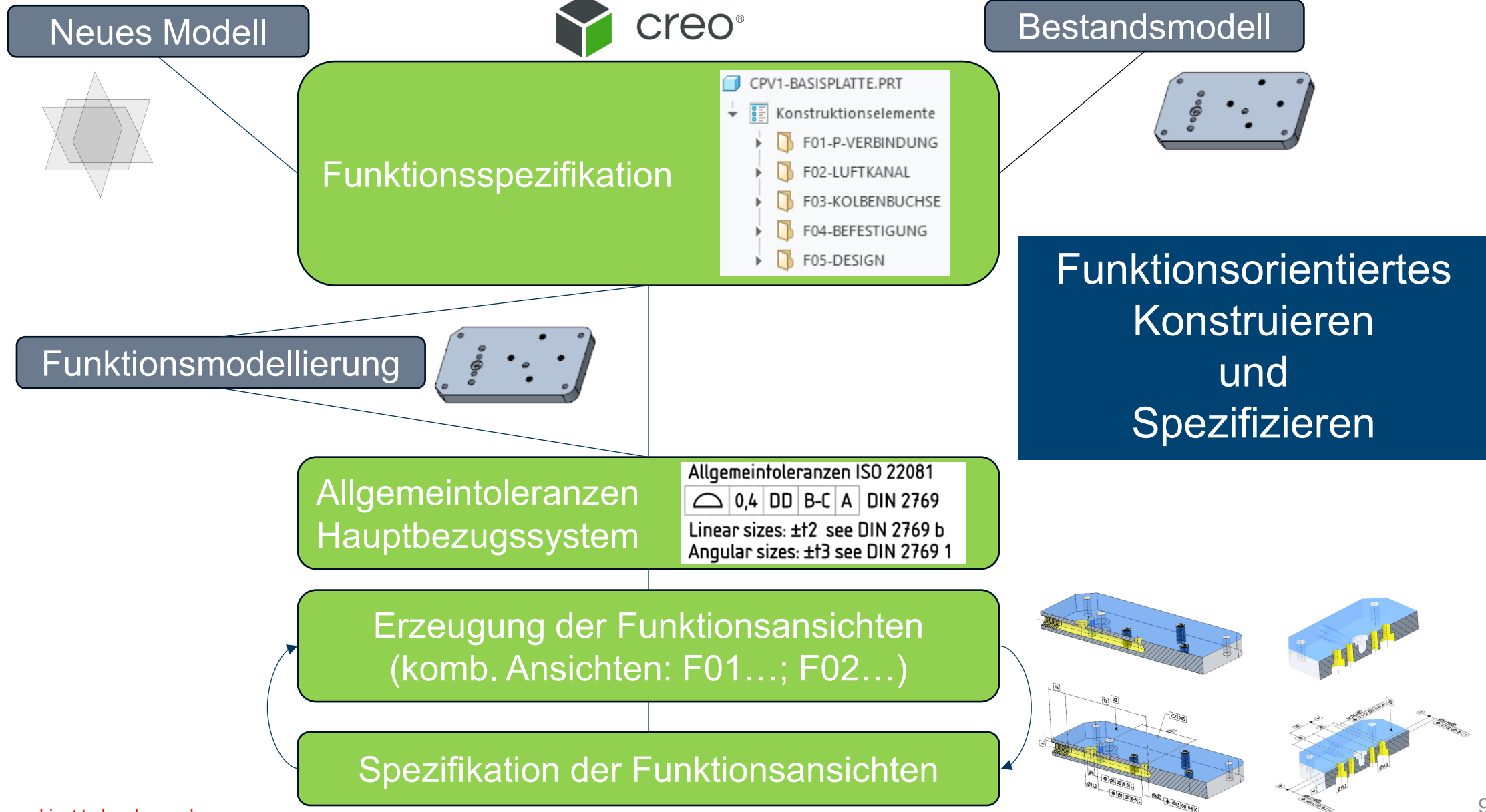
### Umsetzung im eigenen Unternehmen

- POC Aufbau
- Analyse der Zeichnungsverwendung (wer, was, wofür)
- semantischer ISO-GPS/MDB Modelle
  - Modellaufbau (neu, Bestandsdaten)
  - Arbeitsrichtlinien
- Key-User Team (CAD, QA, Fertigung) erprobt die neuen Prozesse (QA, CAD, PLM ...)
- INNEO Consulting Services unterstützen in der Erprobungsphase
- GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS



## Erfolgreiche Einführung maschinenlesbarer ISO-GPS Informationen





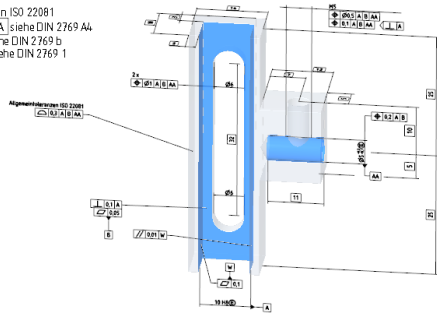


# Die „richtige“ Creo Parametric Version

## Creo 4

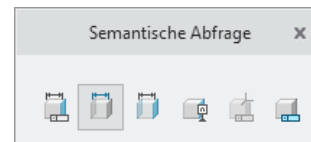
Voll semantische Definition F&L

Allgemeintoleranzen ISO 22061  
 [1] A | B | AA (siehe DIN 2769 A4)  
 Linear size ±12 siehe DIN 2769 b  
 Angular size ±3 siehe DIN 2769 1



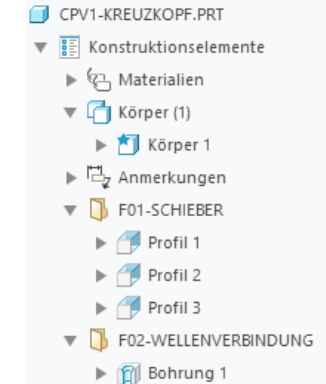
## Creo 7

Semantische Abfragen



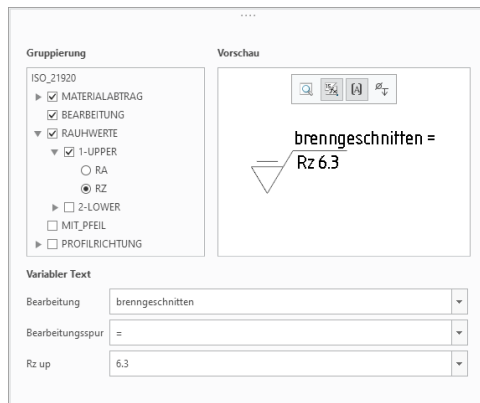
## Creo 8

Symbole im 3D / Strukturbäume



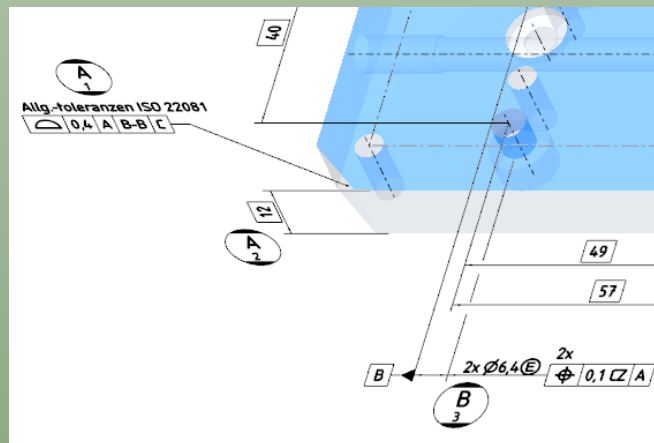
## Creo 9

Oberflächenangaben in 3D



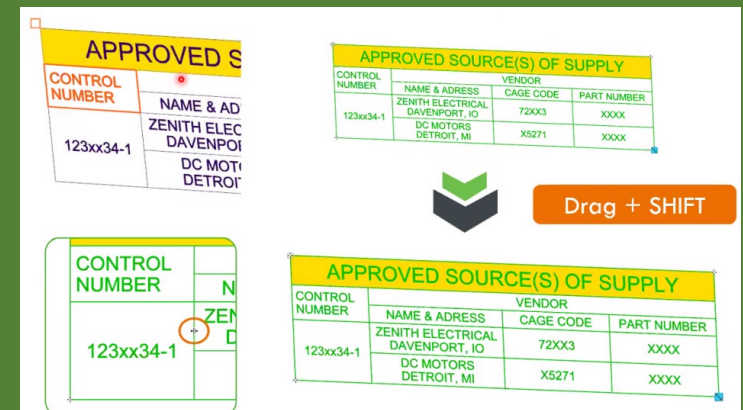
## Creo 10

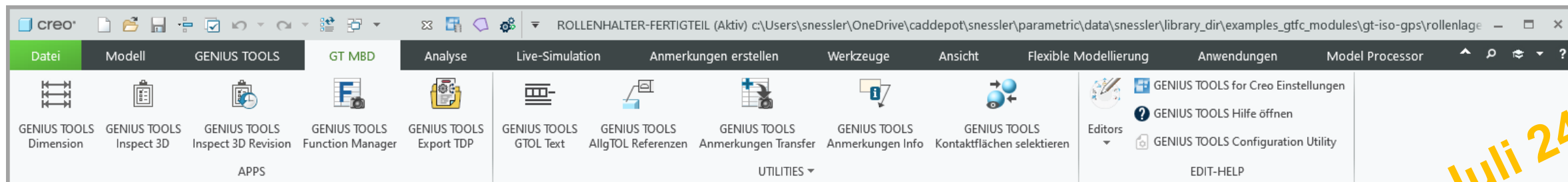
Verknüpfte Symbole



## Creo 11

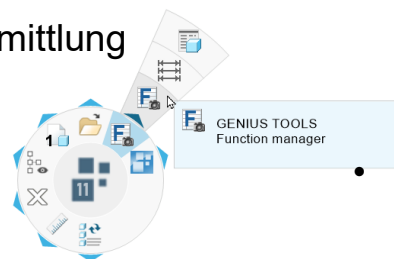
Tabellen (Texte) im 3D





## Hauptfunktionen

- Funktionsmanager
  - Handhabung kombinierter Ansichten (vollkonfigurierbare Erzeugung)
  - Farbvergabe in komb. Ansichten
- Konfigurierbare, automatische TDP Erstellung
- Infotool für Anmerkungen, Kontaktflächenermittlung
- GTOL - Texteditor (u. a. Setzen der Allgemeintoleranzen)
- 3D Inspect für Symbole und Auswertungen
- GENIUS TOOLS Quick Access – Mapkeymanagement
- GENIUS TOOLS Dimension – Alle Maße im Griff

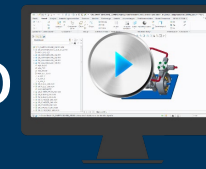


## Nutzen

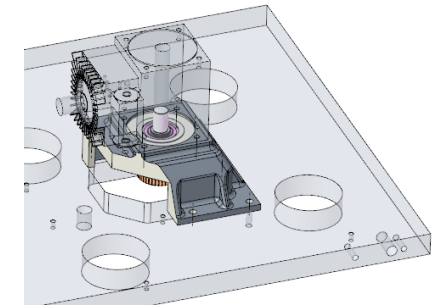
- Hohe Zeitersparnis im Modellaufbau
- Erhöhung der Modellqualität
  - Standardisierung der 3D-Ansichten / Farbvergabe
  - Überprüfung der Semantik
- Unterstützt verschiedene Aufgaben des Konstrukteurs
  - Vergabe der Allgemeintoleranzen
  - Kontaktflächenermittlung
- Unterstützt Folgeprozesse
  - QA durch die Ausgabe von Inspect-Dokumenten
  - Unterstützt ZEISS CALYPSO-Anforderungen

Seit Juli 24

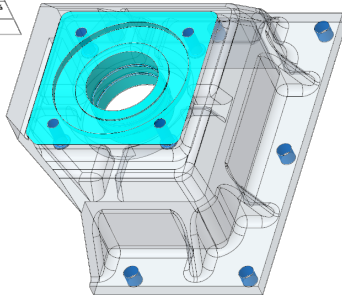
**Unterstützt funktionsorientiertes Konstruieren und Spezifizieren im 3D**



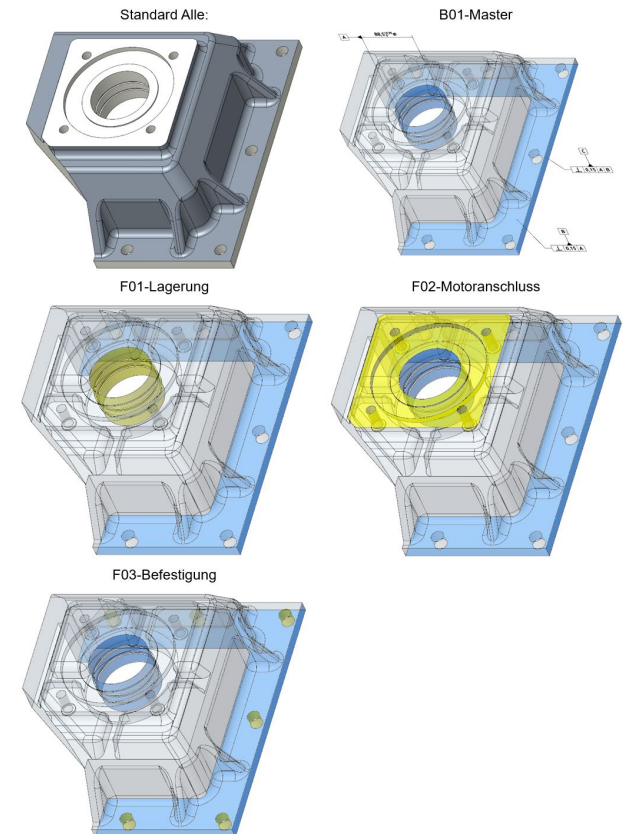
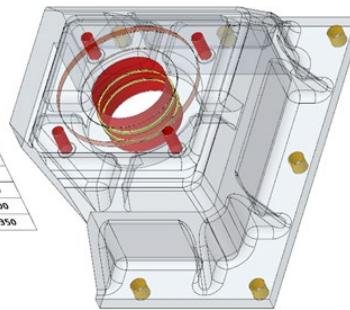
- Funktionsspezifikation
- Erzeugung kombinierter Ansichten mit Funktionsfarbcodierung
- Erzeugung der Spezifikation durch semantische Anmerkungen
  - Allgemeintoleranzen (GD&T Advisor)
  - Funktionsrelevante Spezifikation
- Technologieanmerkungen / Übersichtsdarstellungen
- Semantikprüfung
- TDP Erstellung



Allgemein	Spez. 1	Spez. 2	Spez. 3
▼	▼	▼	▼
▼	▼	▼	▼
▼	▼	▼	▼
▼	▼	▼	▼



Passmaß	Abmaße	µm	
♦	φ13.5H8	0.017 0.000	27
♦	φ5H7	0.005 0.000	35
♦	φ110h8	0.006 -0.004	54
♦	φ160H8	0.003 0.000	63
♦	φ17.5H12	0.180 0.000	180
♦	3.15	0.100 -0.100	200
♦	φ88.5	0.006 -0.000	350





*Konstruktionsgruppen*

Scrollbare Navigation über die kombinierten Ansichten

Immer alphabetisch sortiert

Allgemeintoleranzen ISO 22081  
 0.4 | A | B | C-C | DIN 2769  
 Linear size: #f2 see DIN 2769 b  
 Angular size: #f3 see DIN 2769 1

Modelltitel  
 CPV2-BASISPLATTE  
 Teilbezogener Titel  
 Basis-Platte  
 Artikelnummer 2035789110  
 Revision 2023-06-04  
 Geändert

*kombinierte Ansichten*

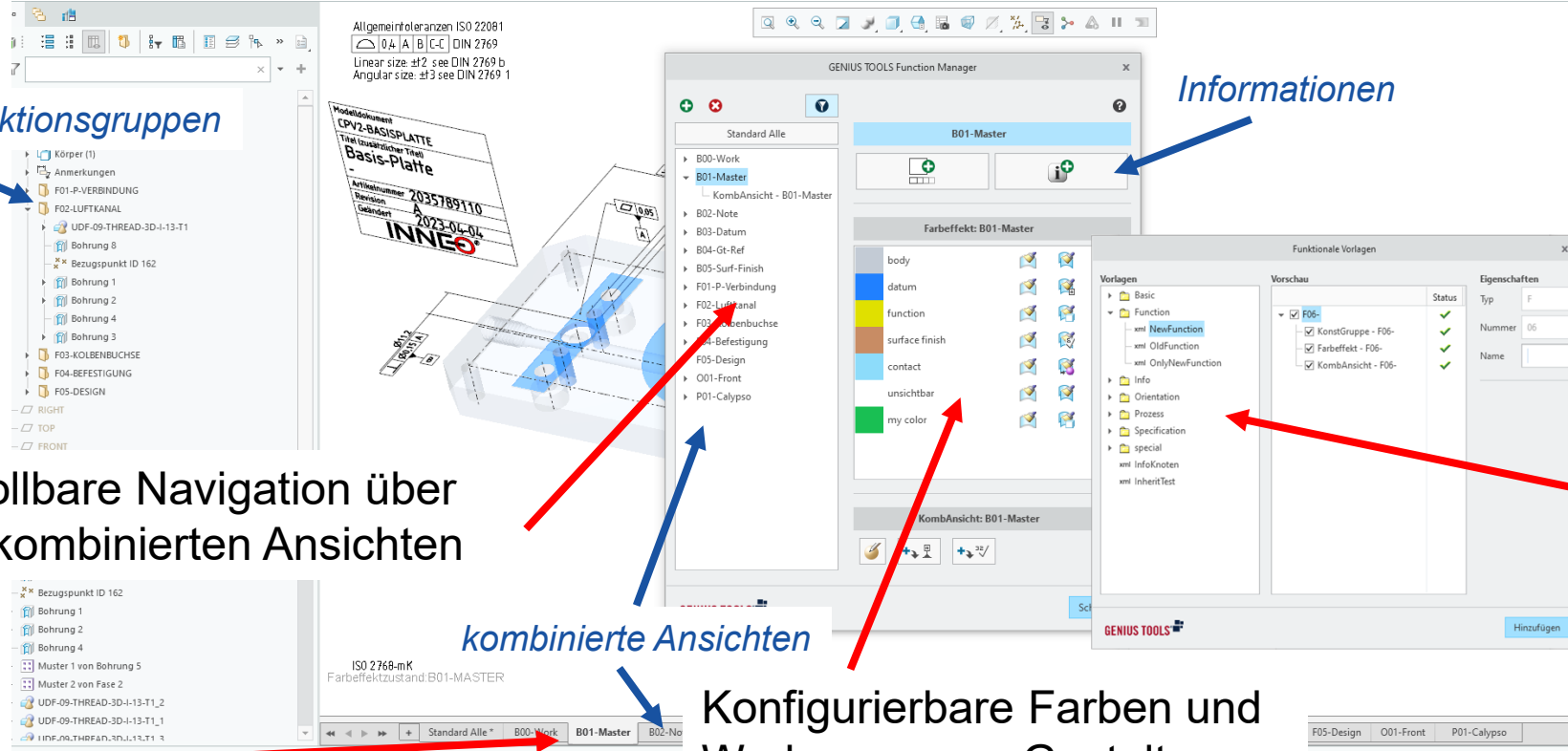
Konfigurierbare Farben und Werkzeuge zur Gestaltung der kombinierten Ansichten

*Informationen*

## Function Manager

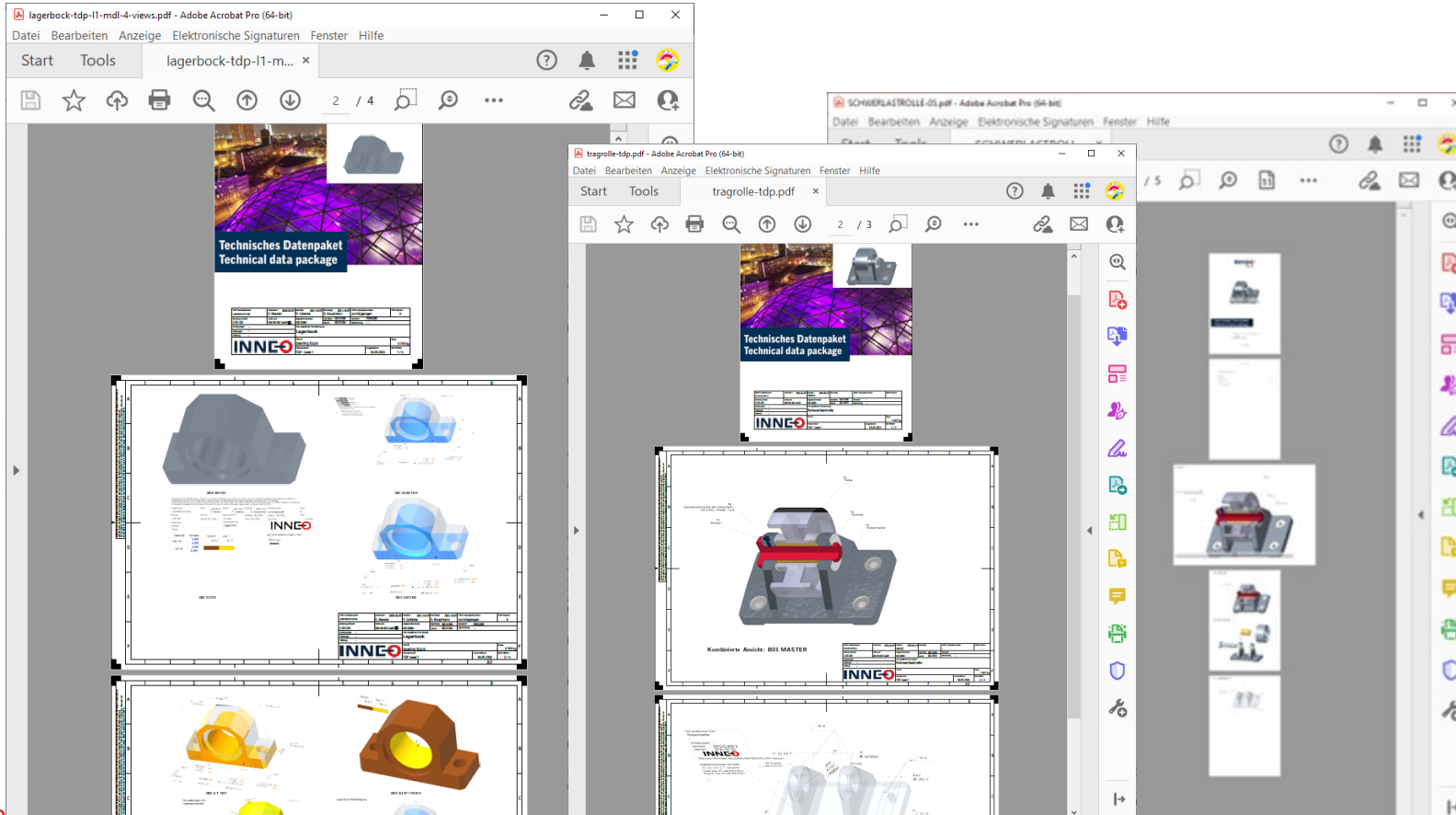
*function = { Konstruktionsgruppe, kombinierte Ansichten, Informationen }*

Konfigurierbare Templates zur Erstellung von kombinierten Ansichten mit Namensgeneratoren





# Neues Produkt: GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS

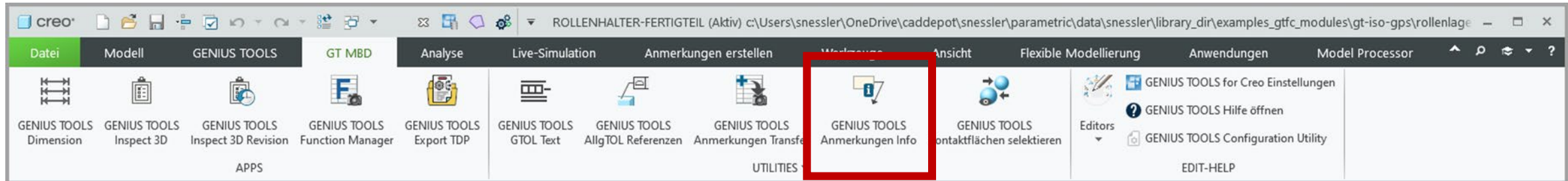


## Export TDP

Kapitelorientierte Konfiguration zur Erzeugung eines PDF-Dokuments

- Kapitelbeispiele(geplant):
- Titelblatt
  - Inhaltsverzeichnis
  - Kapitel mit einer komb. Ansicht/Blatt
  - Kapitel mit (x) komb. Ansichten/Blatt
  - Kapitel mit externen Daten
  - Kapitel mit 3D PDF
  - Kapitel zum Einbetten von Daten
  - :

Kann mit Model Processor Worker Extension in Windchill automatisiert erstellt werden.



GENIUS TOOLS Anmerkungen Info

Sortiert nach: Elemente

Elemente	Sichtbarkeit	Kombinierte Ansichten	Semantik	Wert	Typ	Toleranz
Driven Dimension (3 2)						
ad31	1	F02-FIXTURE	T	18	General	+0.2 / -0.2
ad32	0		T	40	General	+0.3 / -0.3
ad39	0		T	60	General	+0.3 / -0.3
Driving Dimension (15 0)						
DRV_DIM_D0 - d0	2	B01-MASTER   F01-BEARING	T	36	General	+0.3 / -0.3
DRV_DIM_D1 - d1	2	B01-MASTER   F01-BEARING	T	60	General	+0.3 / -0.3
DRV_DIM_D10 - d10	3	B03-DATUM   B04-GT-REF   F01-BEA	✓	50	Plus-Minus	+0.2 / +0.1
DRV_DIM_D11 - d11	1	F01-BEARING	T	5	General	+0.1 / -0.1
DRV_DIM_D12 - d12	2	B04-GT-REF	X	12	Symmetric	±0.5
DRV_DIM_D14 - d14	1	F02	T	40	General	+0.3 / -0.3
DRV_DIM_D2 - d2	1	F02-FIXTURE	T	15	General	+0.2 / -0.2
DRV_DIM_D27 - d27	1	F01-BEARING	T	3.5	General	+0.1 / -0.1
DRV_DIM_D28 - d28	1	F01-BEARING	T	3.5	General	+0.1 / -0.1
DRV_DIM_D3 - d3	1	F01-BEARING	T	44	General	+0.3 / -0.3
DRV_DIM_D4 - d4	2	B01-MASTER   F01-BEARING	T	60	General	+0.3 / -0.3
DRV_DIM_D5 - d5	1	F01-BEARING	X	45	General	+0.5 / -0.5
DRV_DIM_D6 - d6	3	B01-MASTER   B04-GT-REF   F01-BEA	✓	100	kg	0 / -0.087
DRV_DIM_D7 - d7	2	B01-MASTER   F01-BEARING	T	30	General	+0.3 / -0.2
DRV_DIM_D8 - d8	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	✓	40	H8	+0.039 / -0
Datum Tag (6 0)						
AE_SET_DATUM_TAG_A - Datum_Tag_A	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	✓	A		
AE_SET_DATUM_TAG_B - Datum_Tag_B	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	✓	B		
AE_SET_DATUM_TAG_C - Datum_Tag_C	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	✓	C		
Datum_Tag_D	3	B03-DATUM   B04-GT-REF   F01-BEA	✓	D		
dt7 - C1	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	X	C1		
dt8 - C2	5	B01-MASTER   B03-DATUM   B04-GT	X	C2		
Symbol (5 0)						
AE_SYMB0L0 - symbol_0	1	B02-NOTE		SFELD_SUT_INT_D		
symbol_14	1	B01-MASTER		SFELD-KLEIN		
symbol_15	1	B02-NOTE		LAGERBOCK-TOL		
symbol_17	1	B02-NOTE		KLAMMERN		
symbol_26	1	B01-MASTER		TEDS-NACH-PRT		
Note (5 1)						
Note_0	0					
Note_20	1	F01-BEARING				
Note_21	1	F02-FIXTURE				

## Anmerkungselement Info

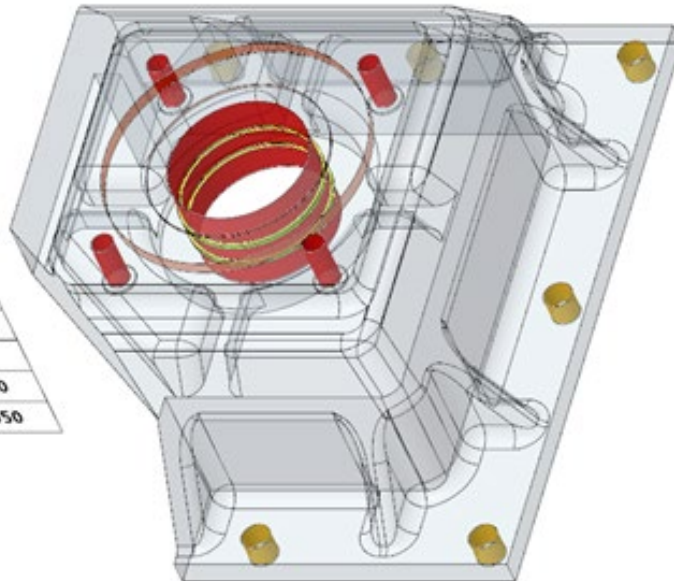
Übersicht über alle Anmerkungen

Finden von nicht mehr  
angezeigten Anmerkungen

Kontrolle der semantischen  
Verknüpfungen

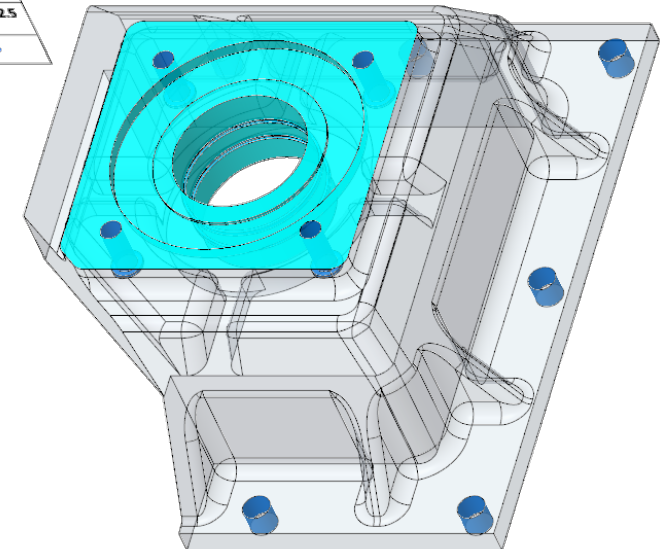
## Größenmaßtabelle\*

Passmaß	Abmaße	µm
♦	Φ13.5H8 0.027 0.000	27
♦	Φ85H7 0.035 0.000	35
♦	Φ110h8 0.000 -0.054	54
♦	Φ160H8 0.063 0.000	63
♦	Φ17.5H12 0.180 0.000	180
♦	3.15 0.100 -0.100	200
♦	Φ88.5 0.350 -0.000	350



## Oberflächentabelle\*

Allgemein	Spez. 1	Spez. 2	Spez. 3
√	√ Ra 1.6	√ Ra 3.2	√ Ra 12.5
♦	♦	♦	♦



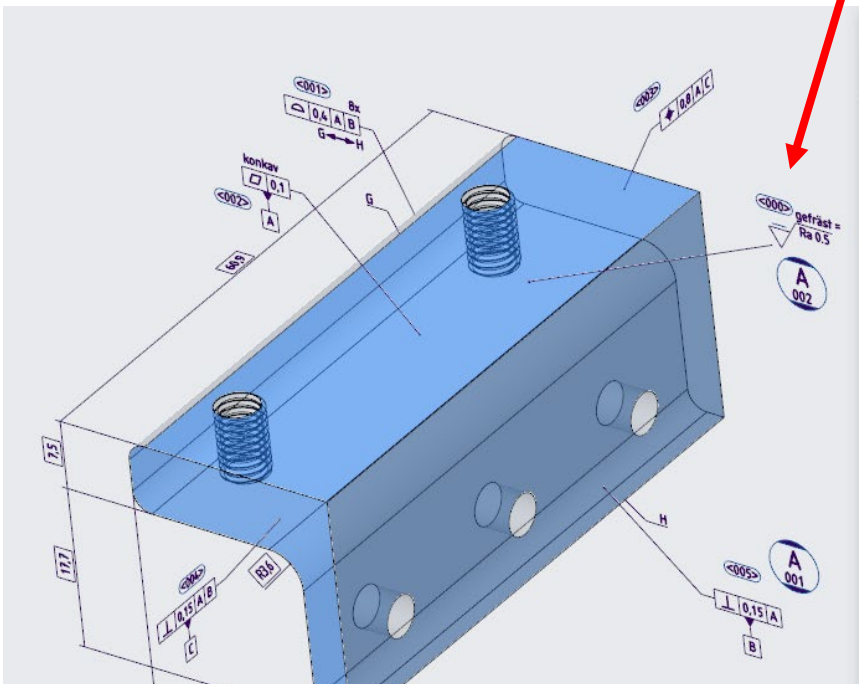
\*ab Creo Parametric 11

# Neues Produkt: GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS



Symbole (Inspect/Änderung...) mit Verknüpfungen zu Anmerkungen und Nummerierung

**Inspect 3D**



Sortierachsen: Y

Positionierung Übersicht

Verknüpfte Prüfmerkmale:

Merkmal-Nr.	Haupttyp	Untertyp	Nennm
001	Form und Lage	△ (Profil einer Fläche)	
002	Form und Lage	□ (Ebene)	
003	Form und Lage	⊕ (Position)	
004	Form und Lage	⊥ (Rechtwinkligkeit)	
005	Form und Lage	⊥ (Rechtwinkligkeit)	

Auslesen der Anmerkungseigenschaften

Export der Inspect-Tabelle zu EXCEL

Nr.	Blatt	Raster	Haupttyp	Subtyp	Nennmaß	Abmaß	Mindestmaß	Hochstmaß	Tol. Standard	Tol. Tabelle	Tol. Klasse	Parameter	Notiz	Creo Symbol	Beschreibung	Prüfmerkmal	Quelle (PRT, ASM, DRW)
001			Form und Lage	△ (Profil einer Fläche)												gf_inspect_iso753	winkel-fm-gd4.prt
002			Form und Lage	□ (Ebene)									±0.1			gf_inspect_iso753	winkel-fm-gd4.prt
003			Form und Lage	⊕ (Position)									+10.81 A			gf_inspect_iso753	winkel-fm-gd4.prt
004			Form und Lage	⊥ (Rechtwinkligkeit)									±10.15 A			gf_inspect_iso753	winkel-fm-gd4.prt
005			Form und Lage	⊥ (Rechtwinkligkeit)									±10.15 A			gf_inspect_iso753	winkel-fm-gd4.prt



# Fragen? Kommentare?

Jetzt ist Zeit dafür

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

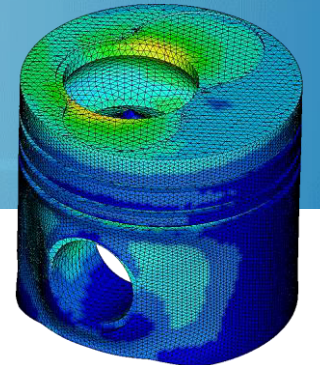
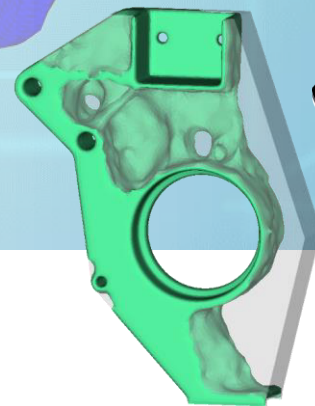


**INNEO**®  
That's IT.

# FEA mit **Z88** – Einsatz in Wissenschaft und Praxis

Florian Hüter, Johannes Wittmann

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag  
Bayreuth, 11. September 2024



# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

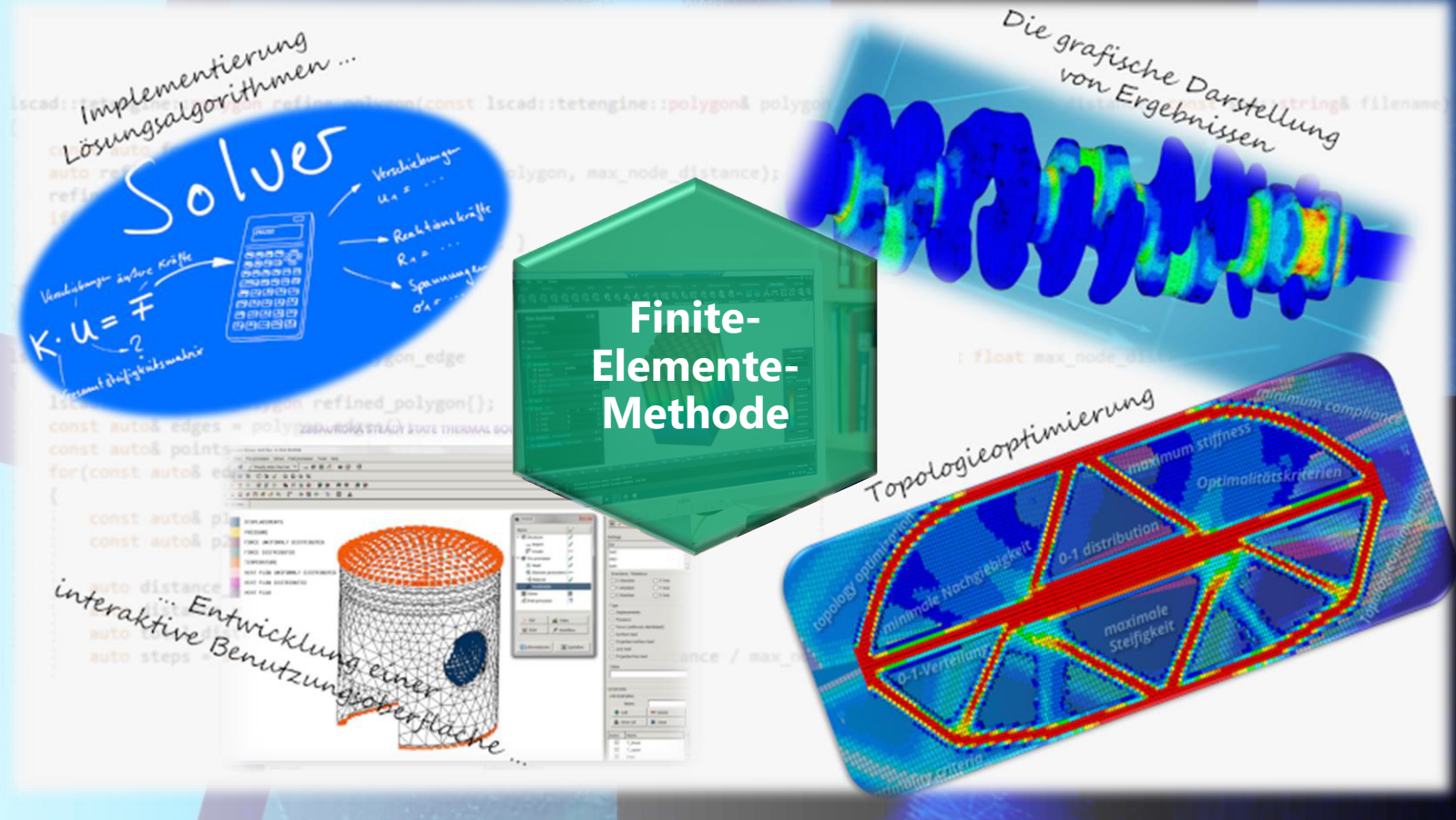
Die Entwickler ...

## Der Lehrstuhl

- Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel
- Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg (emeritus)
- 4 OBERINGENIEURE
- 10 wissenschaftliche Mitarbeiter
- 4 weitere Mitarbeiter

## Forschungsschwerpunkte

- Finite-Elemente-Analyse für die Antriebstechnik
- Material & Tribologie
- Digitalisierung





# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

Über Z88 ...

## Z88Aurora

- Lineare Berechnung
- Nichtlineare Berechnung
- Eigenschwingungsberechnung
- Thermische Berechnung

## Z88Arion

- OC-Verfahren: max. Steifigkeit
- SKO-Verfahren: max. Festigkeit
- TOSS-Verfahren: minimale Nachgiebigkeit in Kombination mit maximaler Festigkeit

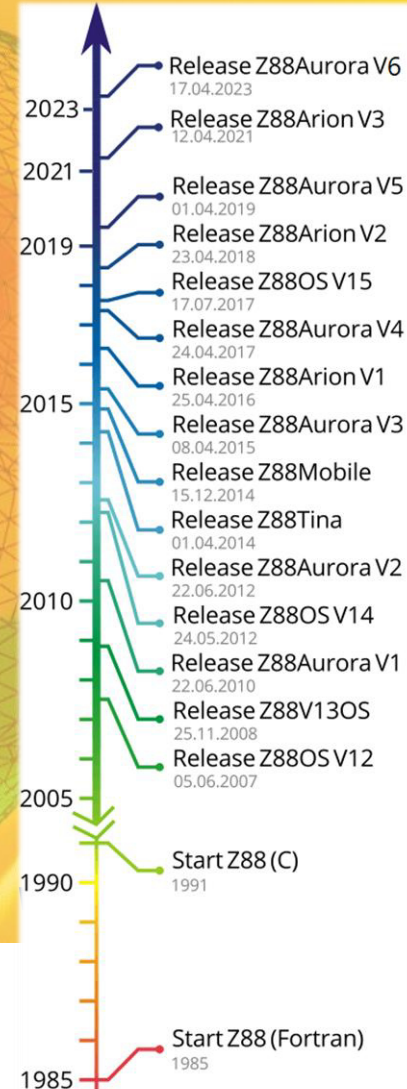
[www.z88.de](http://www.z88.de)



Z88 Aurora®



Z88 Arion®



# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

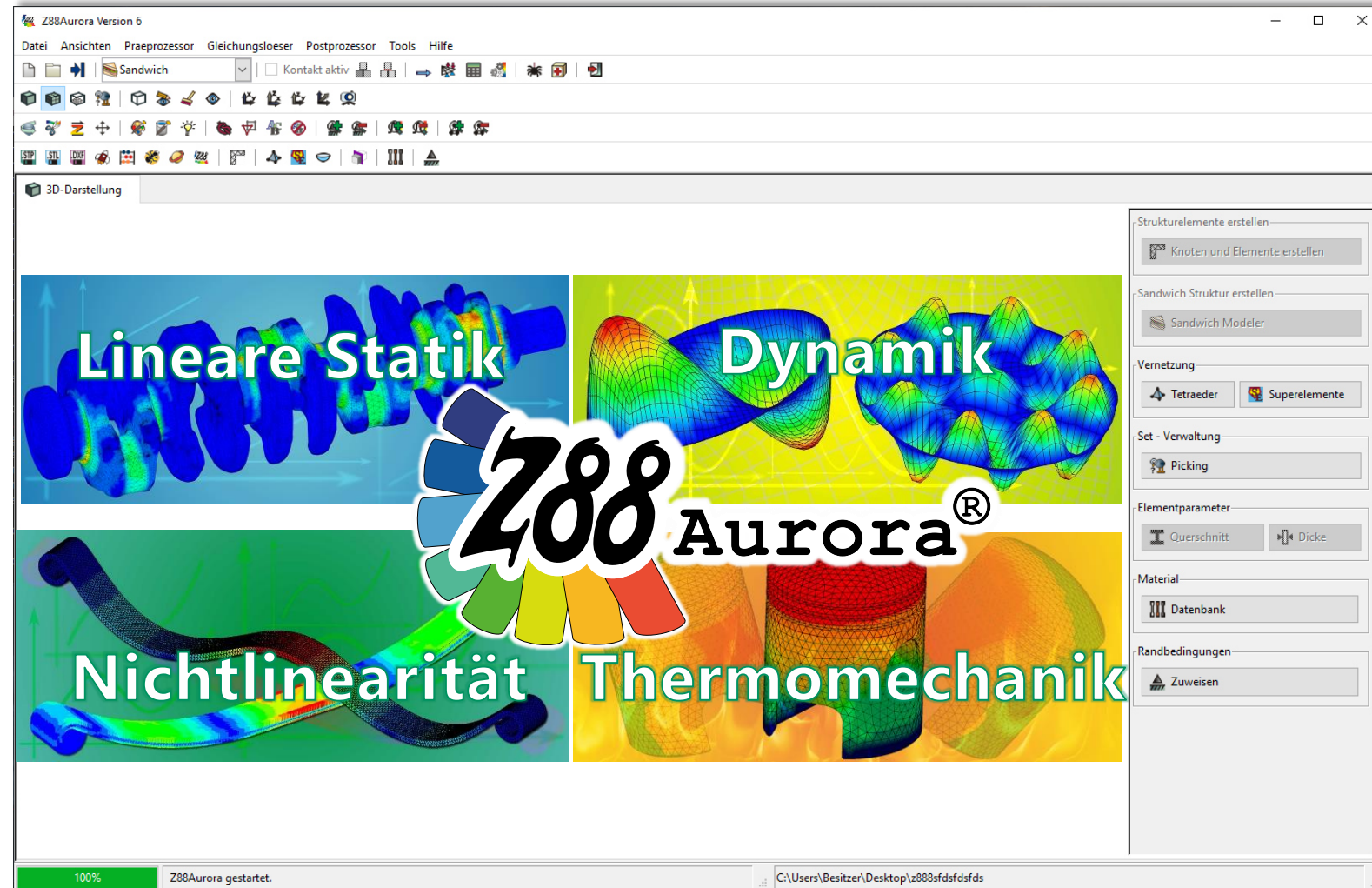
## Über Z88Aurora®

### Z88Aurora

- Lineare Berechnung
- Nichtlineare Berechnung
- Eigenschwingungsberechnung
- Thermische Berechnung

### Z88Arion

- OC-Verfahren: max. Steifigkeit
- SKO-Verfahren: max. Festigkeit
- TOSS-Verfahren: minimale Nachgiebigkeit in Kombination mit maximaler Festigkeit





# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

## Z88Aurora® V6 – Überblick

### Projektstart

- Projektmappen für übersichtliche Arbeitsumgebung
- Import von CAD-Daten: STEP, STL, DXF
- Import von FE-Daten: NASTRAN, ABAQUS, ANSYS, COSMOS

### Preprocessing

- Mapped- und Freemeshing
- 2D/3D-Netzerzeugung
- Interaktive Aufgabe von Randbedingungen: Fixierungen, Deformationen, Kräfte, Drücke
- Große, editierbare Materialdatenbank

### FE-Solver

- 25 verschiedene Finite-Elemente-Typen
- Parallelisierte Algorithmen
- Direkte und iterative Gleichungslöser
- Lineare, nichtlineare, thermo-mechanische und Eigenschwingungsanalyse

### Postprocessing

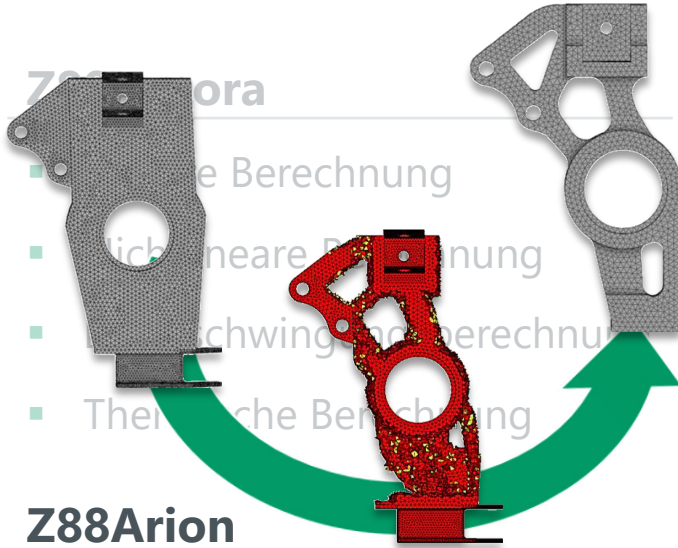
- Freie Skalierbarkeit der verformten Struktur
- Spannungsausgabe
- Einzeldarstellung sensibler Bauteilbereiche
- Einfacher Export von Analyseergebnissen

**Finite Elemente Analyse mit Z88Aurora®**



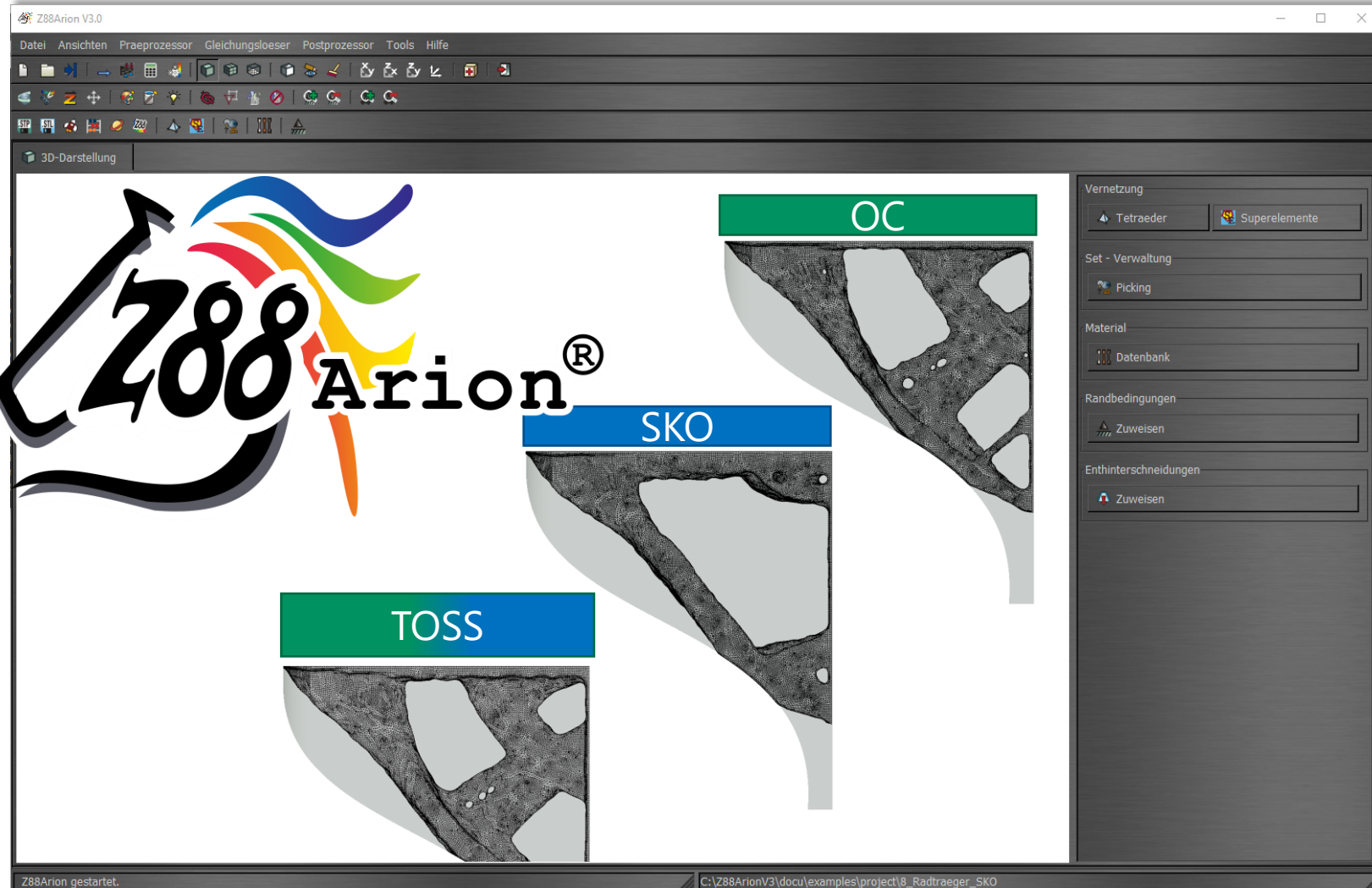
# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

Über Z88Arion®



## Z88Arion

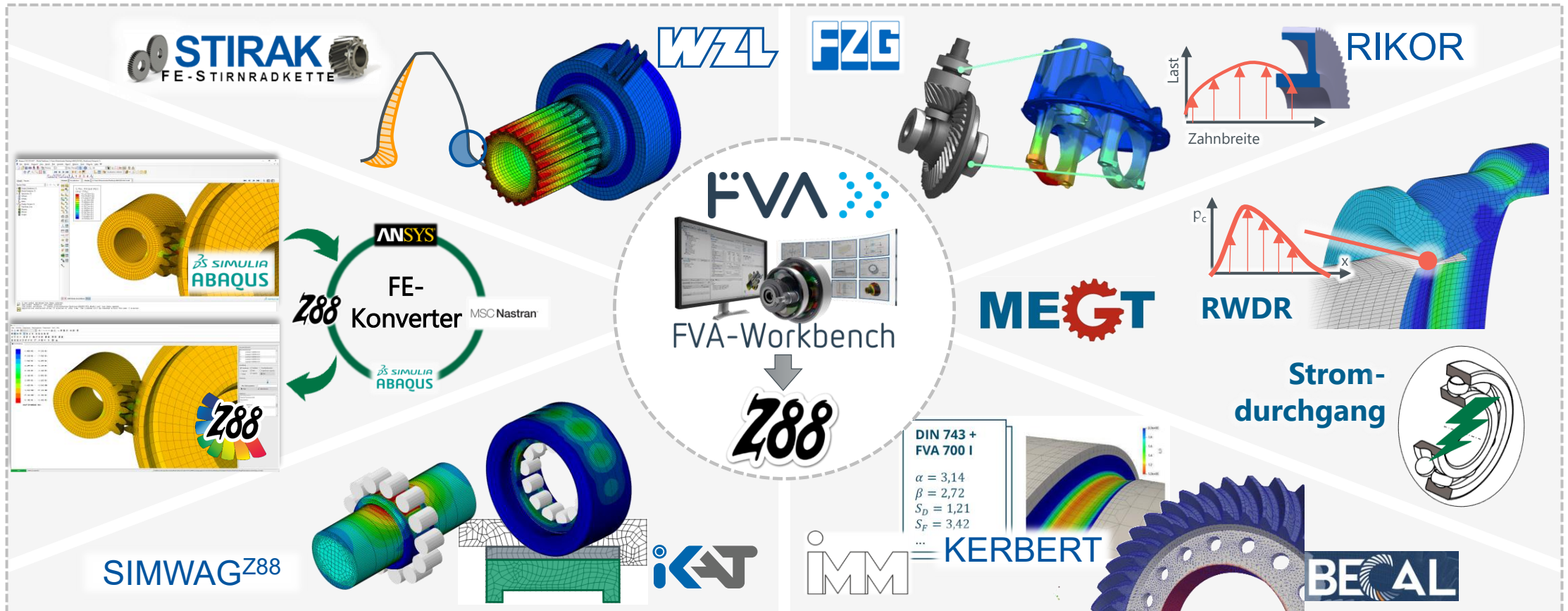
- OC-Verfahren: max. Steifigkeit
- SKO-Verfahren: max. Festigkeit
- TOSS-Verfahren: minimale Nachgiebigkeit in Kombination mit maximaler Festigkeit





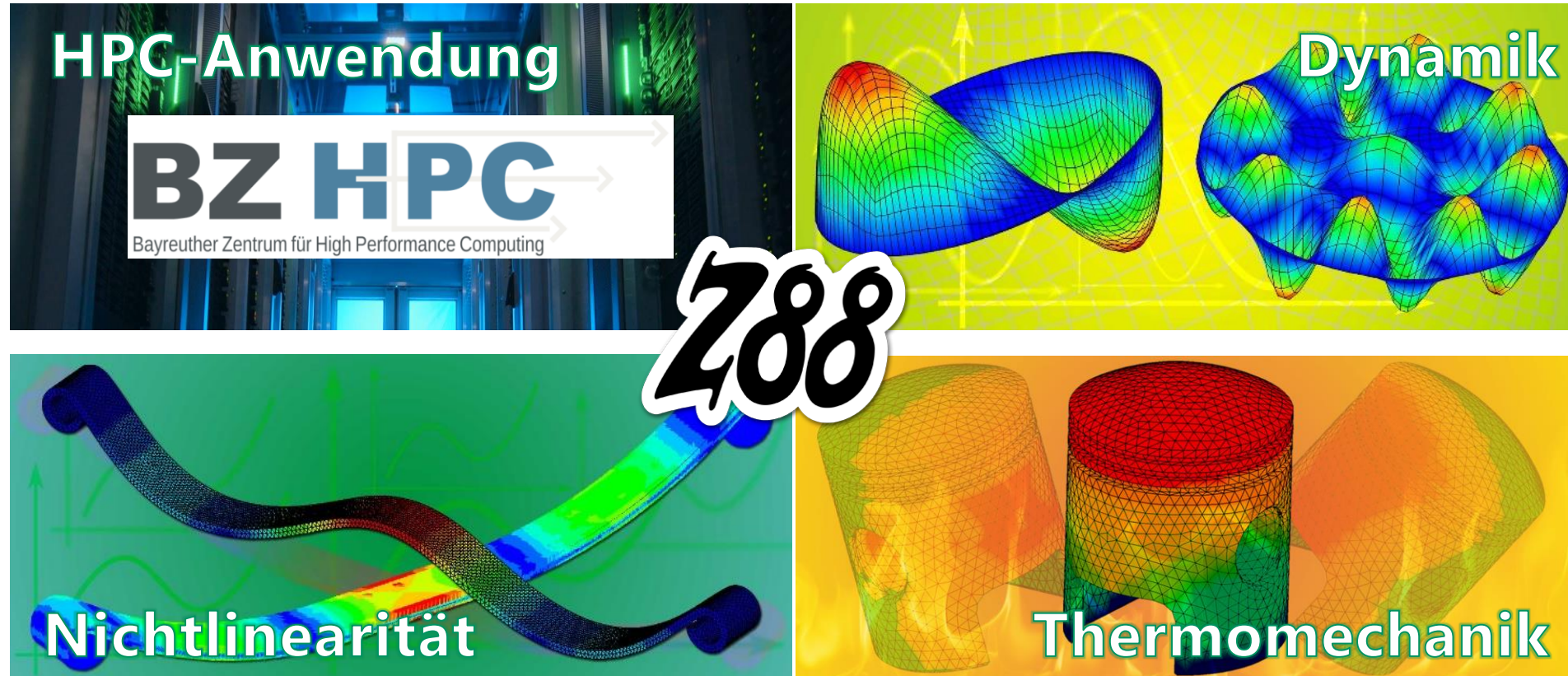
# Finite-Elemente-Analyse mit Z88

Z88 in der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.



# Aktuelle Entwicklungsthemen

## Entwicklungsfelder

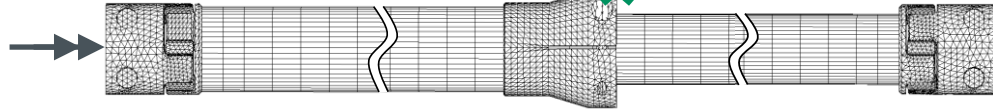




### Modal- und Frequenzganganalyse

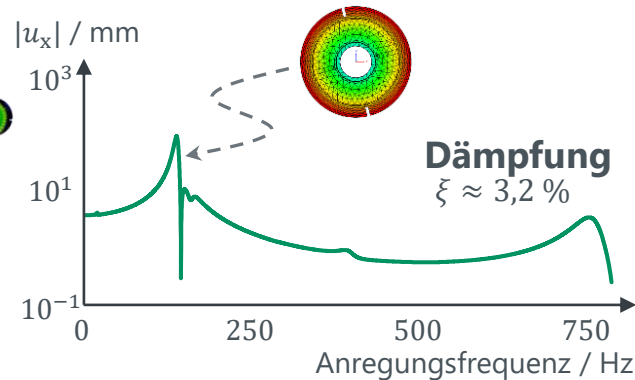
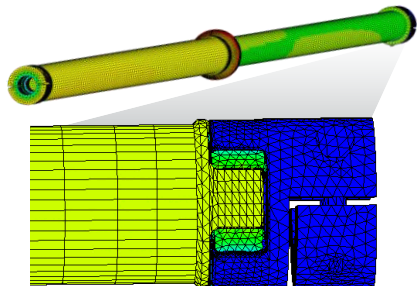
#### Harmonische Anregung Elastomer-Gelenkwelle

$$\tilde{M} = M_{0,max}(\cos(\Omega t) + \sin(\Omega t)) \quad \text{Auswertung}$$



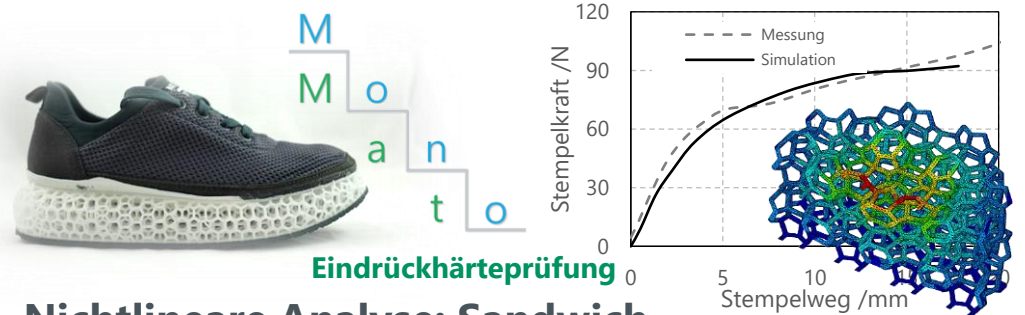
#### Amplitudengang mit modaler Superposition

#### Torsionskritische Eigenschwingung



### Nichtlineare FE-Analysen

#### Transiente Analysen: AF-TPU-Gitterstrukturen



#### Nichtlineare Analyse: Sandwich



# Aktuelle Entwicklungsthemen

## Nichtlineare Sandwich-Analysen mit Z88Aurora® V6

### Z88Aurora® V6

- Anisotropie
- Nichtlineare Materialmodelle (Plastizität, Hyperfoam)
- Versagenskriterien
- Kontaktmodellierung

# ESSBe

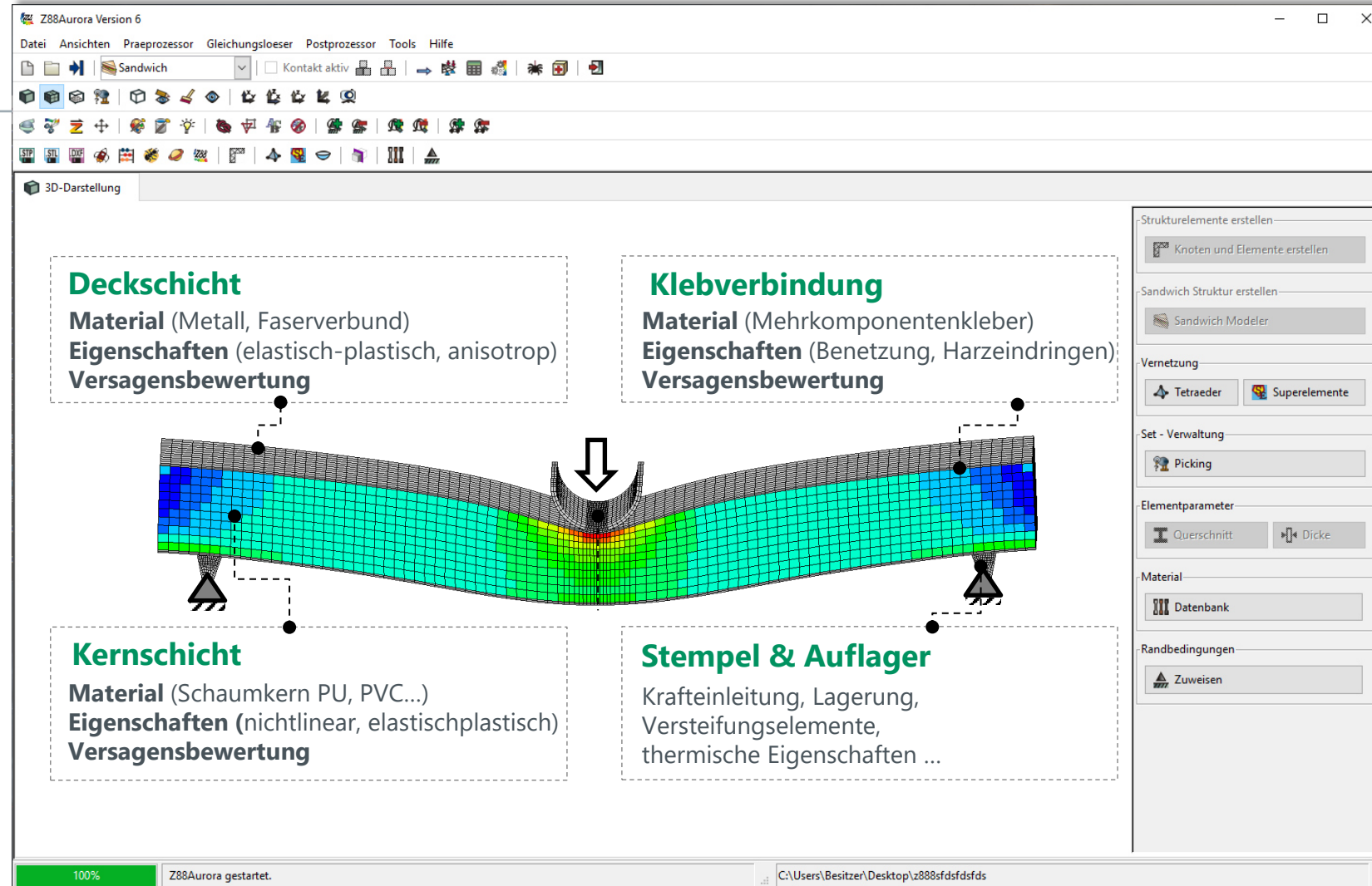
Easy Sandwich Struktur Berechner für KMU



**Europäische Union**  
Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung



**Lehrstuhl für  
Konstruktionslehre und CAD**  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel



**Deckschicht**  
Material (Metall, Faserverbund)  
Eigenschaften (elastisch-plastisch, anisotrop)  
Versagensbewertung

**Klebschicht**  
Material (Mehrkomponentenkleber)  
Eigenschaften (Benetzung, Harzeindringen)  
Versagensbewertung

**Kernschicht**  
Material (Schaumkern PU, PVC...)  
Eigenschaften (nichtlinear, elastischplastisch)  
Versagensbewertung

**Stempel & Auflager**  
Krafteinleitung, Lagerung,  
Versteifungselemente,  
thermische Eigenschaften ...

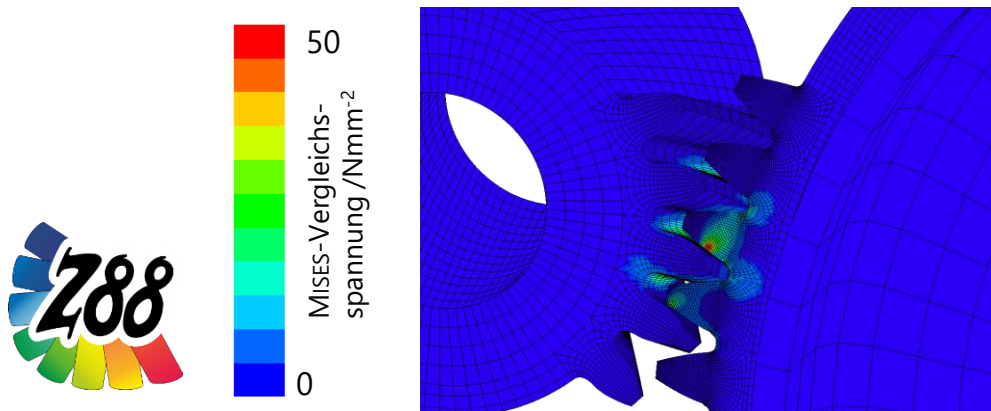
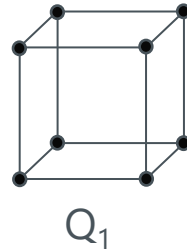
100% Z88Aurora gestartet. C:\Users\Besitzer\Desktop\z888fdfsdfsdfs



### Nichtlineare Kontaktanalyse

#### Quasi-statische Abwälz-Simulation

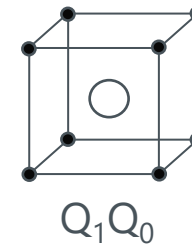
- Rückwärts-EULER-Zeitintegration
- Reibungsfreier Knoten-Fläche-Kontakt
- Materialmodellierung:
  - Ritzel: 16MnCr5 | HENCKY
  - Rad: POM | MARLOW



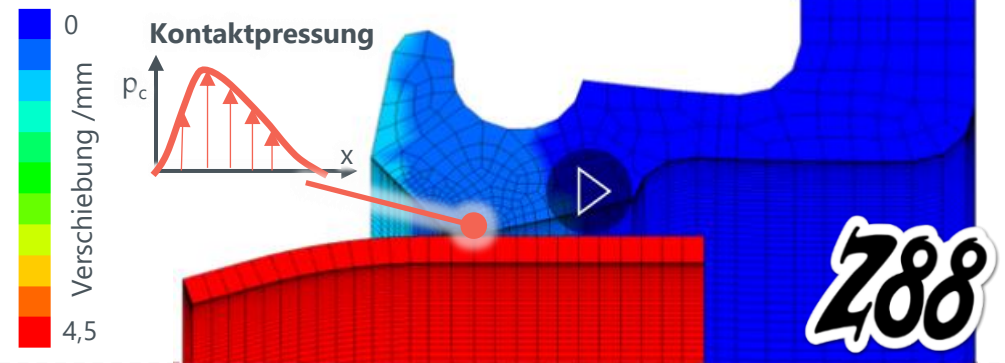
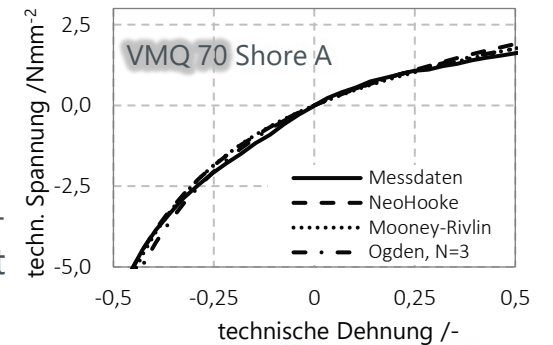
### Materialnichtlinearität

#### Montage-Simulation RWDR

- Hybridelemente



- Hyperelastizität



<https://doi.org/10.1007/978-3-642-16621-1>

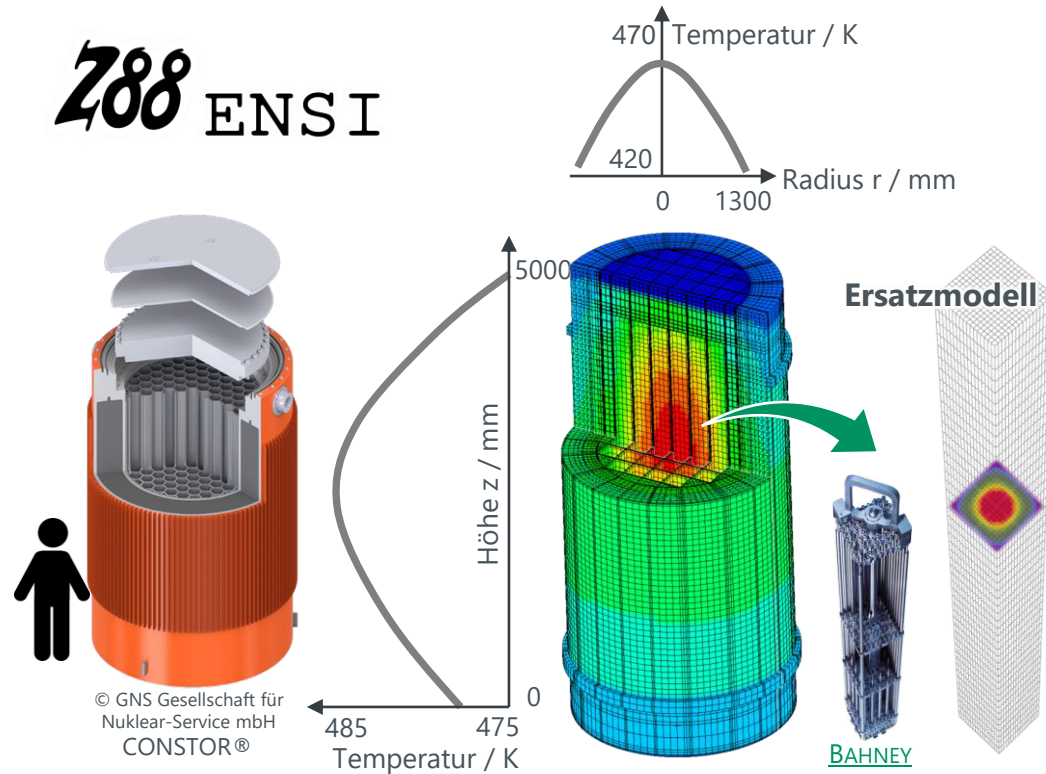
<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:1831525119/FE-Berechnung-Kunststoffzahnraeder-in-der-FVA-Workbench?cHash=10bad9f37b8de4294b0294c0dd1e55c1>



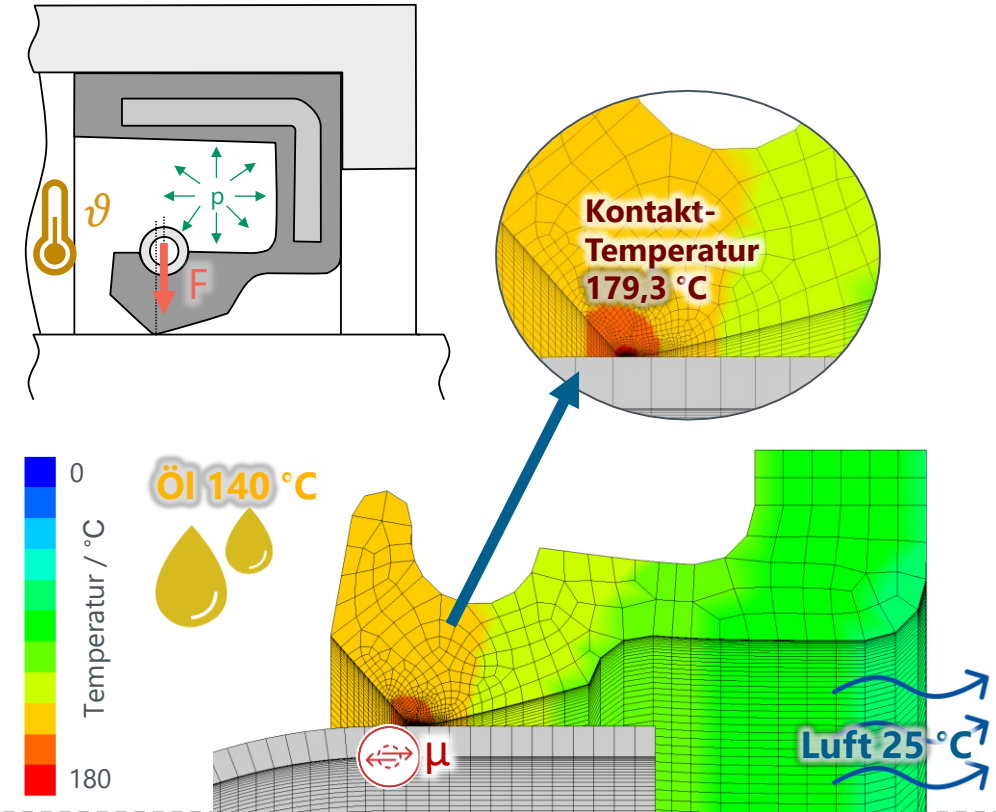
# Aktuelle Entwicklungsthemen

## Thermische Finite-Elemente-Analyse mit Z88

### Transportbehälter- und Brennelementmodell



### Thermo-mechanische Simulation



JENNEWAIN Dissertation (2016), ISBN:978-3-95974-015-9  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-16621-1>





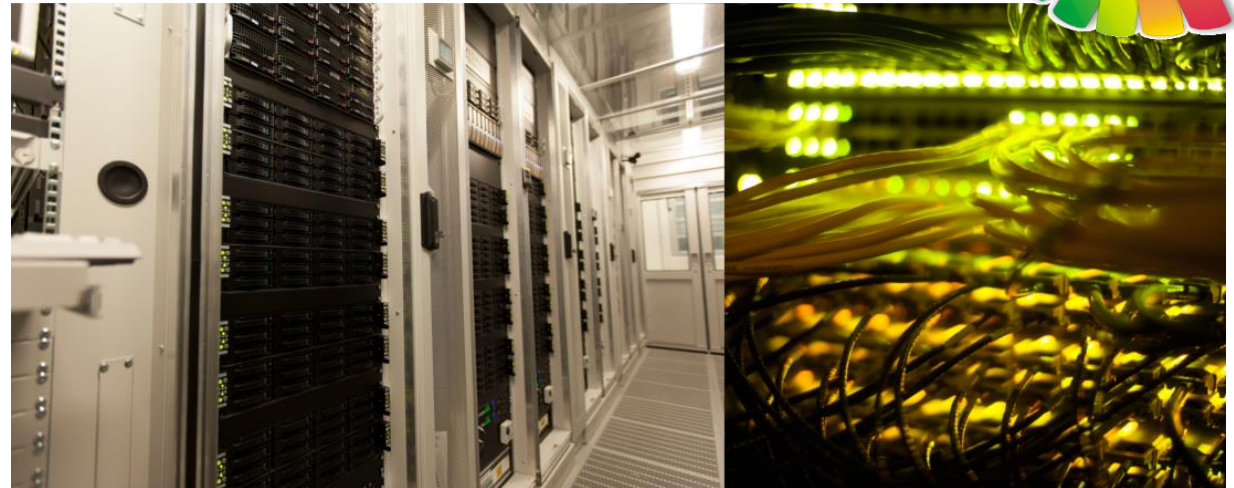
**BZ HPC**

Bayreuther Zentrum für High Performance Computing

- 62 Knoten á 128cores@384GB RAM
- 4 Knoten á 192cores@1.5TB RAM
- 1 Knoten á 4 Nvidia H100, 3TB RAM, ~15TB Nvme
- 1 Knoten á 4 AMD Mi210, 3TB RAM, ~15TB Nvme
- 100G HDR Infiniband

# Gate2HPC

- Gateway für Clusternutzung
- Parallelisierung des Z88-Kontaktrechenkerns






# Gate2HPC

### Nutzen von Methoden der Künstlichen Intelligenz


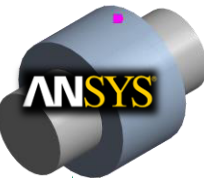
 Bereitstellung von vorgefertigten **Notebooks**


 **Bild**  
(z. B. Anomalieerkennung)

 **Sprache**  
(z. B. Large-Language-Models)




 **Logische Schlussfolgerungen**  
(z. B. Datenanalyse)

### Ansteuerung von FE-Programmen

### Parallelisierung der hauseigenen Software Z88

**Memory**

L3	L3	L3	L3
L2	L2	L2	L2
L1	L1	L1	L1
core	core	core	core

**Memory**

L3	L3	L3	L3
L2	L2	L2	L2
L1	L1	L1	L1
core	core	core	core

**Konverter**



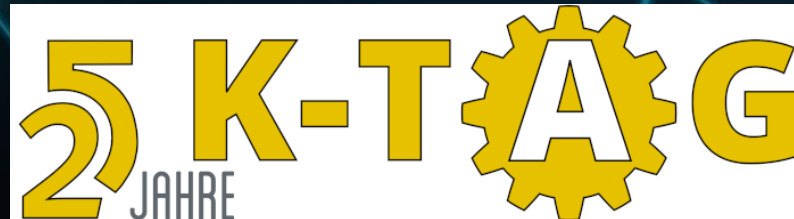
Bei Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.





# HEXAGON

Limitless possibilities. One logo





# Hexagon Divisionen

## Manufacturing Intelligence

Konvergenz von den Bereichen design and engineering, Produktion und Lösungen der Messtechnik intelligente Fabriken und die digitale Transformation zu ermöglichen.



## Agriculture

Bessere Planung, effiziente Ausführung, präzise Maschinensteuerung und automatisierte Arbeitsabläufe zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Effizienz und Produktivität.



## Asset Lifecycle Intelligence

Technische Lösungen für Unternehmen, die es den Kunden ermöglichen, rentablere, sicherere und nachhaltigere Industrieanlagen zu planen, zu bauen und zu betreiben.



## Autonomy & Positioning

Wegweisende End-to-End-Lösungen für eine sichere Positionierung und Korrektur zu Lande, zu Wasser und in der Luft.



## Mining

Löst die schwierigsten Herausforderungen über und unter Tage mit bewährten Technologien für Planung, Betrieb und Sicherheit.



## Xalt Solutions

Beschleunigung der digitalen Transformation durch Lösung von Herausforderungen am Arbeitsplatz mit dem agilsten Framework der Branche.



## Safety, Infrastructure & Geospatial

Verbesserung der Widerstandsfähigkeit kritischer Dienste und Infrastrukturen durch Umwandlung komplexer Daten in aussagekräftige Informationen für eine bessere Entscheidungsfindung.



## Geosystems

Ein umfassendes Portfolio digitaler Lösungen, die die physische Welt erfassen, messen und visualisieren und datengesteuerte Veränderungen in zahlreichen Ökosystemen ermöglichen.

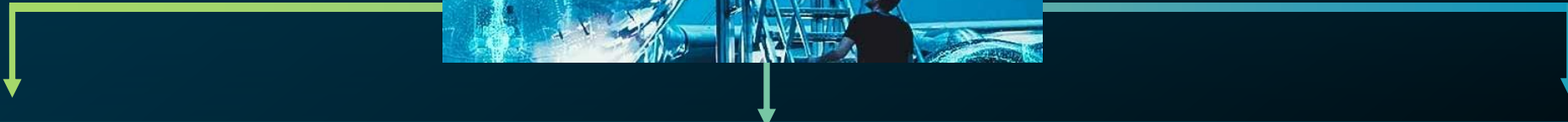




# HEXAGON DIVISIONEN



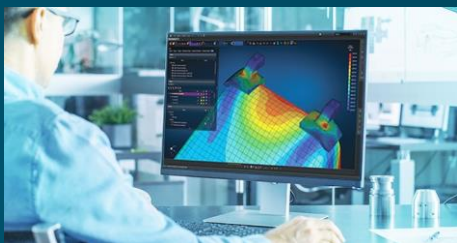
## Manufacturing Intelligence



### Design and Engineering

### Production

### Metrology



ONE MI



ONE MI



- Virtuelle Fertigung
- Multiphysische Simulation
- Dynamische Systeme
- Digitale Materialien
- Strukturanalyse

- Einzel- und Serienfertigung
- Werkzeug- und Formenbau
- Blechbearbeitung
- CNC-Simulation

- Stationäre und portable Messtechnik
- Automation und digitale Vernetzung
- Messtechnik für Bearbeitungsmaschinen



**HxGN  
Multiphysics**

### Multiphysische Simulation an einem Ort

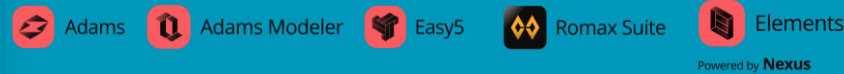
Digitale Zwillinge für die Struktursimulation und -analyse, Ermüdung, numerische Strömungsmechanik, Akustik- und NVH-Simulation und die multiphysische Cosimulation.



**HxGN  
System  
Dynamics**

### Lösungen für den Einblick in die Bewegung auf Systemebene

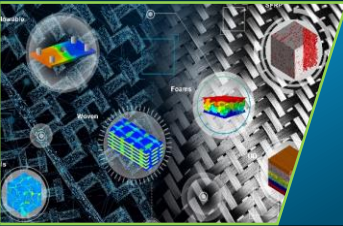
CAE-gestützte Entwicklung komplexer Produkte mit reduziertem Prototyping und optimierter Zusammenarbeit.



**HxGN  
Virtual  
Manufacturing**

### Lösungen für Prozessketten in der Fertigung/Produktion

Kalkulation und Simulation von Metallumformung, Schweißen, Fügen, additiver Fertigung (AM).



**HxGN  
Digital  
Materials**

### Lösungen für rechnergestützte Material-/Werkstofftechnik und -modellierung

Inkl. Datenmanagement und künstliche Intelligenz.



**HxGN  
Virtual  
Mobility**

### Lösungen für Design, Prüfung, und virtuelle Validierung

Sicherheit und Qualität für Fahrsicherheitssysteme und autonome Fahrzeugsysteme



## Simulations- steuerung



## Künstliche Intelligenz & Machine Learning



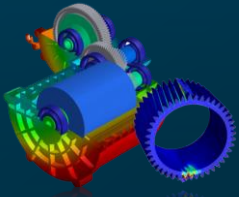
nexus





# Das D&E Simulationsportfolio von Hexagon

Getriebe-  
konstruktion



Romax  
**Rx**

Fahrerassistenzsysteme /  
Virtuelle Testfahrt



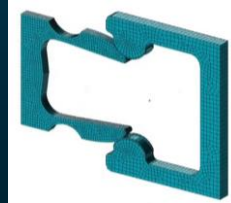
Virtual Test Drive  
**VTD**

Mehrkörper-Dynamik

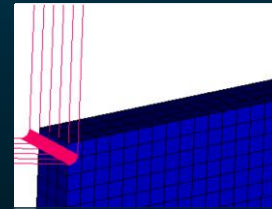


Adams  
**Ad**

Elastische Deformation / Superelastisches /  
Vibration duktiles Versagen



MSC Nastran  
**Na**



Marc  
**Ma**

Impact / Brittle  
Fracture / FSI



Dytran  
**Dy**

Ermüdung /  
Fraktur

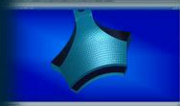


CAEfatigue  
**Cf**

Gemeinsame CAE Plattform  
 Modellierer  
 Formatkonvertierung  
 Generative Gestaltung  
 (Topologieoptimierung)



MSC Apex  
**Ap**



Patran  
**Pa**



Machine Learning &  
Optimierung

Odyssee  
**AI ODS**

Material-Management

Material Center  
**MC**

Co Simulation  
**Co<sup>s</sup>**  
MSC Cosim

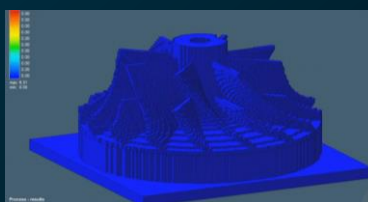
Simulations-  
Management

SimManager  
**SiM**

Umformen / Schweißen / Additive Fertigung..

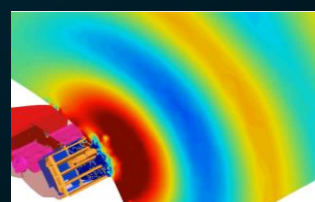


FormingSuite  
**FS**



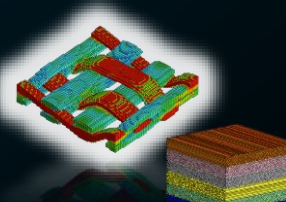
Simufact  
**Sf**

Akustik / Vibration / Rauheit



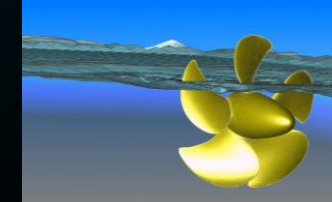
Actran  
**Ac**

Material Modellierung



Digmat  
**Di**

CFD / DEM (Strömungsdynamik)



Cradle  
**Cr<sup>FI</sup>**



**HxGN  
Mould & Die**



VISI



WORKNC

Eine umfassende Lösung für die Konstruktion von Kunststoff-Spritzgießformen und Folgeverbundwerkzeugen. Vollständig integrierte oder eigenständige NC-Programmierung speziell für den Werkzeug-Formenbau und oder große Formen



**HxGN  
Production Machining**



EDGECAM



ESPRIT



ESPRIT EDGE

Eine Reihe von CAD/CAM-, Prozessoptimierungs-, Werkstattintelligenz- und Workflow-Automatisierungsfunktionen, die Werkstätten in die Lage versetzen, operative Spitzenleistungen in der Fertigung zu erzielen



**HxGN  
Sheet Metal Fabrication**



RADAN

Eine Blechfertigungssuite, die den Fertigungsprozess vereinfacht, indem sie eine End-to-End-Lösung für alle Blechfertigungsprozesse, die den bietet



**HxGN  
Wood, Stone & Composites**



ALPHACAM



CABINET VISION



S2M CENTER

Eine Reihe von Lösungen, die es Herstellern ermöglichen, kundenspezifische Produkte zu entwerfen und zu fertigen, indem sie fotorealistische Renderings, Materialoptimierung, Ausschreibungen, Berichte und G-Code-Generierung nutzen



**HxGN  
Additive Manufacturing**



AM STUDIO



ESPRIT EDGE

Lösung für die additive Fertigung von Metall für die Bauvorbereitung, Prozessoptimierung, Nachbearbeitung und Workflow-Automatisierung

## Übergreifende Lösungen



DESIGNER



NCSIMUL



WORKPLAN

ne::us

datanomix





### HxGN Stationary Solution



PC-DMIS



QUINDOS

In Kombination mit unserem umfassenden KMG-Portfolio bieten diese programmierbaren Messsoftwareanwendungen höchste Messgenauigkeit und Prüfflexibilität für Qualitätsingenieure in jedem Unternehmen.



### HxGN Portable Solution



Inspire



SpatialAnalyzer



REcreate

Für den Fall, dass die Messgeräte zum Teil gebracht werden müssen. Von kleinen Teilen bis hin zu großen Anwendungen wie Schiffbau, Luft- und Raumfahrt und Architektur - diese Lösungen sind intuitiv, einfach und schnell.

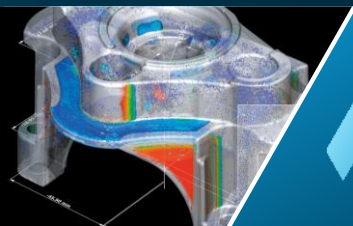


### HxGN Robotic Automation



HxGN Robotic Automation

Eine vereinfachte Scan-Automatisierung. In Verbindung mit unserer "Portable Solution" ermöglicht sie dank ihrer leistungsstarken digitalen Zwillingstechnologie die schnelle und effiziente Programmierung von Roboterzellen.



### HxGN NDE



HxGN Visual Detection

Eine leistungsstarke Suite zerstörungsfreier Bewertungswerkzeuge für eine gründliche Teileanalyse. Von der Inline-Erkennung von Kratzern mithilfe von Kameratechnologie bis hin zur Nutzung von CT-Daten zur Durchführung von Geometrie- und Materialanalysen, Simulationen und mehr.



### HxGN Quality Assurance



Q-DAS Product Line



eMMA

Für den Fall, dass der Fertigungsprozess validiert und überprüft werden muss. Diese Software-Suite für die statistische Prozesskontrolle hilft Herstellern, die Qualität zu sichern und die Effizienz und Produktivität ihrer Prozesse durch leistungsstarke Erkenntnisse zu steigern.

## Übergreifende Lösungen



I++ Simulator

ne:::us



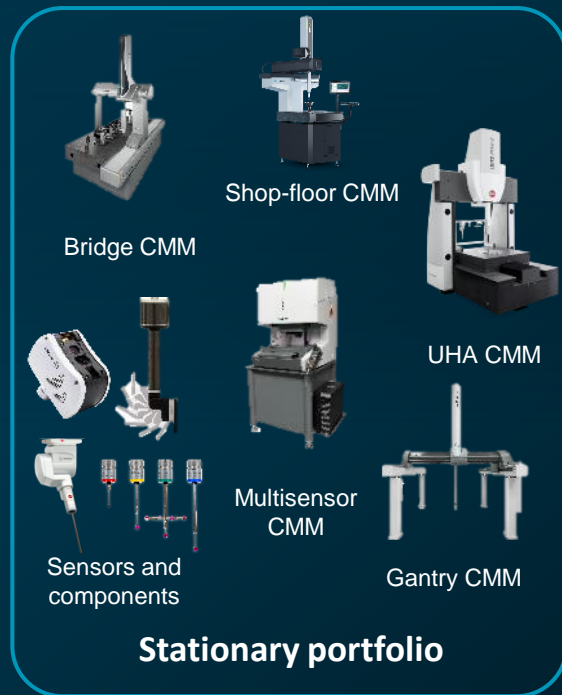
Metrology Reporting



Metrology Asset Manager

# Was sind Mess- und Prüfgeräte?

Unsere **Mess- und Prüflösungen** reichen von Koordinatenmessgeräten (KMGs), portablen Messarmen, Laser Trackern und Streifenlichtscannern bis hin zu Handgeräten und automatisierten Lösungen - alle unterstützt durch Software für dimensionelle Messtechnik und Computertomografie. Unsere Produkte und Lösungen erfassen und verarbeiten reale Daten zur Positionierung und Inspektion und liefern verwertbare Informationen, die die Effizienz, Qualität und Produktivität kontinuierlich verbessern.



Stationary portfolio

Bridge CMM

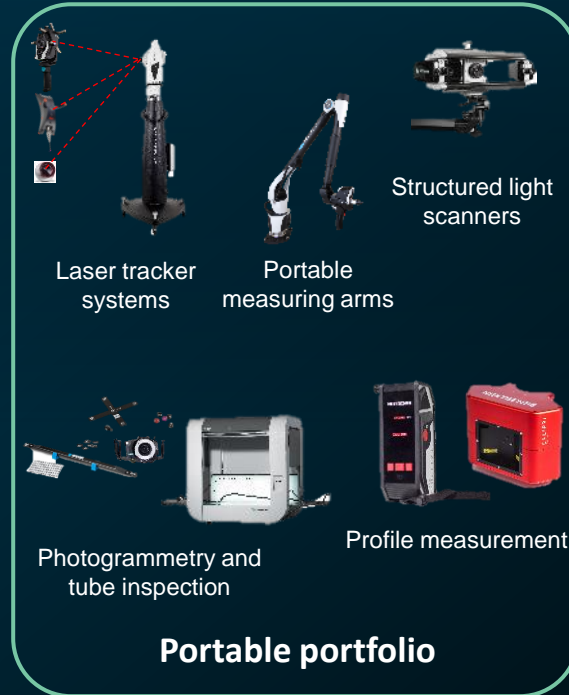
Shop-floor CMM

UHA CMM

Multisensor CMM

Gantry CMM

Sensors and components



Portable portfolio


Laser tracker systems

Portable measuring arms

Structured light scanners

Photogrammetry and tube inspection

Profile measurement



Machine tool portfolio

Machine tool measurement

Machine calibration and optimisation



Automation and digital connectivity

Robot automation

Asset management

ZWECK	Stationary portfolio	Portable portfolio	Machine tool portfolio	Automation and digital connectivity
	Hochpräzise stationäre Geräte vollautomatisiert für Labor- und Werkstattumgebung	Portablen Geräte ermöglichen die Messung direkte in der Fertigungsumgebung.	Sensoren für die direkte Messung in Bearbeitungsmaschinen.	Informationen in Echtzeit über den Zustand und die Leistung von Messgeräten.

## Automation & Zusammenarbeit

- ✓ Kataloge und Bibliotheken
- ✓ Zusammenarbeit /Job Collaboration
- ✓ Automatisierung von Arbeitsabläufen
- ✓ Produktivitäts-Tools





# Ein Portfolio für die Optimierung von Fertigungsabläufen

Vom ersten Konzept zum fertigen Produkt

Design und Entwicklung



Unternehmensintegration



Künstliche Intelligenz

Edge computing

verbesserte Visualisierung

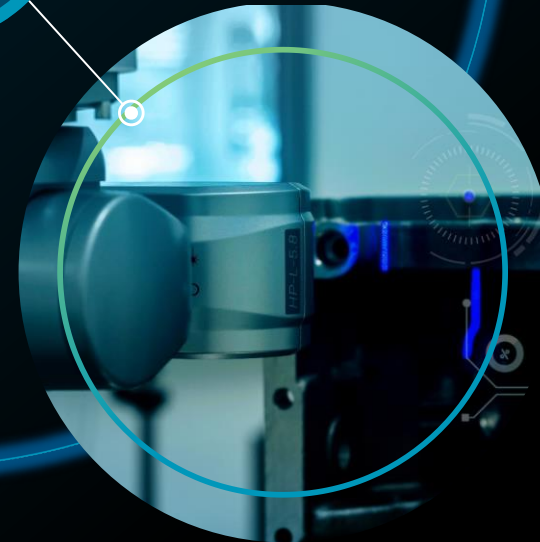
erhöhte Beweglichkeit

ne:us

Produktion



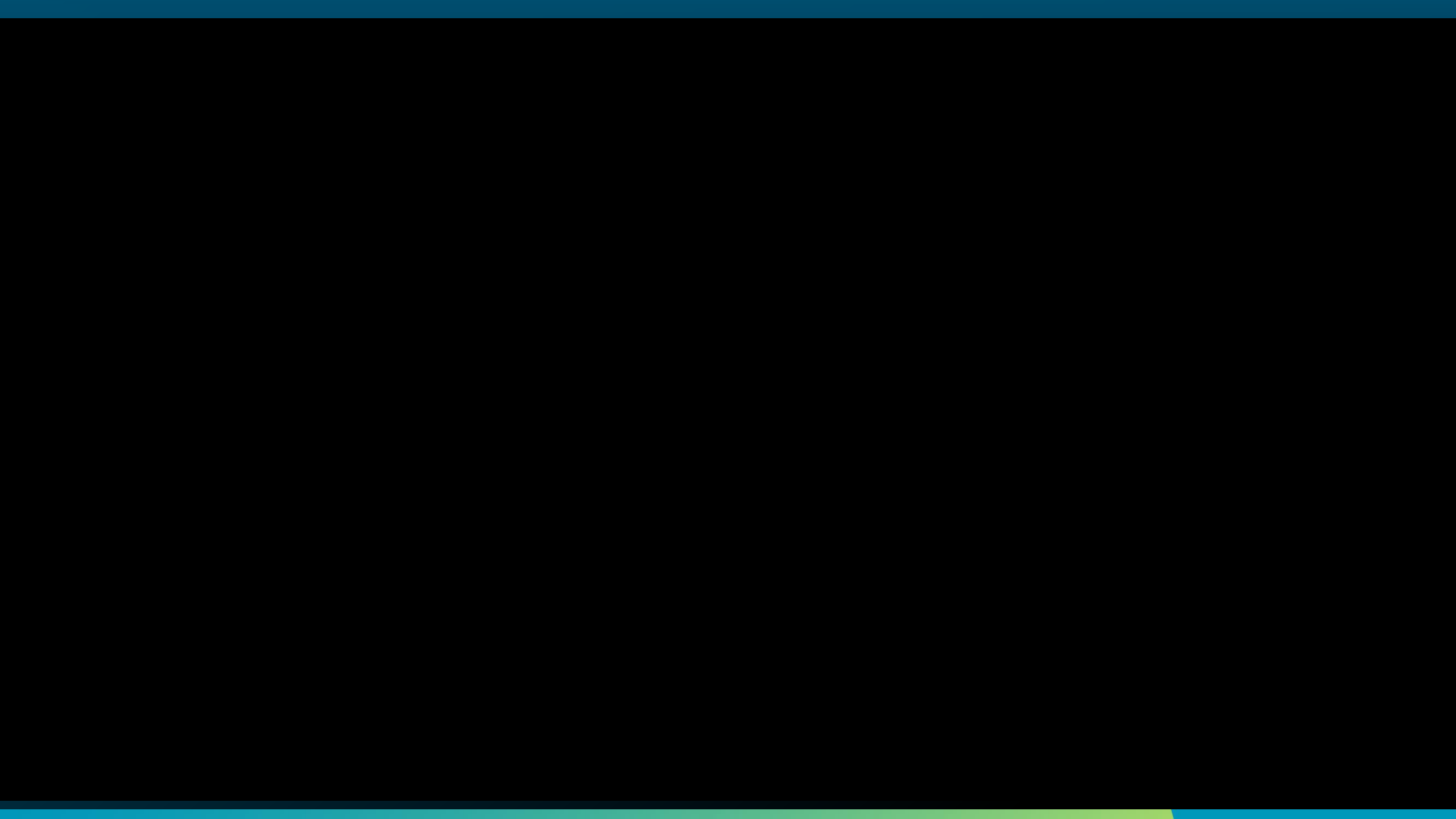
Messtechnik und Inspektion





**Thema:**

**Effiziente CAM-Programmierung in Zusammenspiel mit dem digitalen Zwilling**



**Danke**



**HEXAGON**

empowering an autonomous future



# 3D-modellbasiertes Arbeiten als Voraussetzung für GenAI in CAD

Dr.-Ing. Peter Robl  
Siemens AG, T AMC DMT



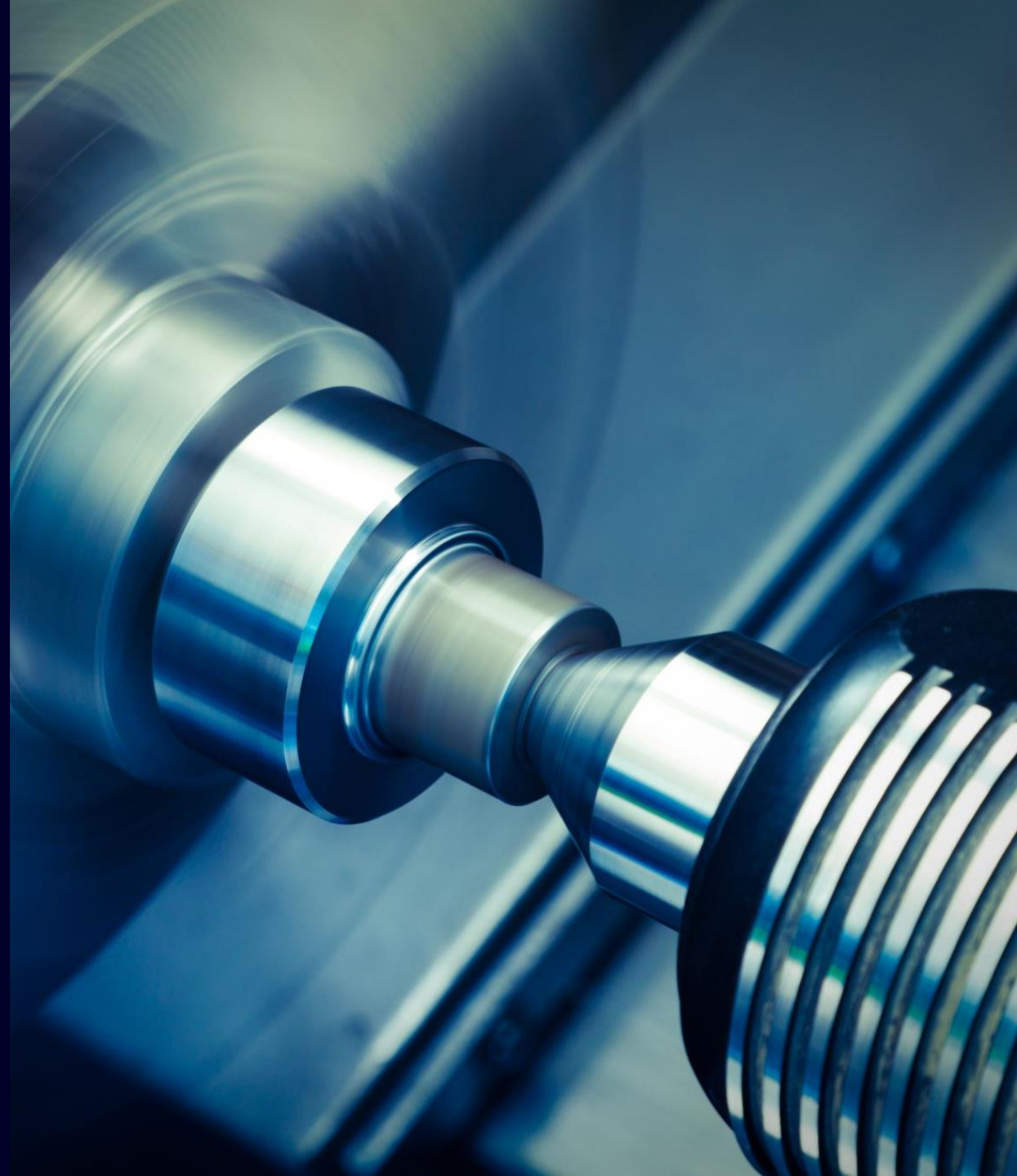
# Agenda

## Vom 2D zum 3D und KI-Methoden

- 1 Ausgangspunkt wo kommen wir her
- 2 Substitution 2D-Zeichnung durch 3D-Modelle
- 3 Möglichkeiten die ein FIM bietet
- 4 Ausgangspunkt für die Arbeitsplanung
- 5 Vom 3D-CAD-Modell zum Arbeitsplan
- 6 KI-gestützte Feature-Erkennung - Arbeitsvorgänge
- 7 KI-gestützte Erstellung der AVOMs (Arbeitsvorgangsmodelle)

## Unterstützende Maßnahmen

- 8 2D-3D-Datenverwaltung im PDM-System
- 9 3D-Baugruppen und ISO-GPS;  
"Part-centric": mehr als eine Methode
- 10 Zusammenfassung und Ausblick





# Vom 2D zum 3D und KI-Methoden zur Automatische Arbeitsplanung

# Seit Beginn der Industrialisierung ist die 2D-Zeichnung führend

Das Papierdokument ist das gelenkte Objekt in der Fabrik





**Seit Beginn der Industrialisierung ist die 2D-Zeichnung führend**  
Das Papierdokument ist das gelenkte Objekt in der Fabrik

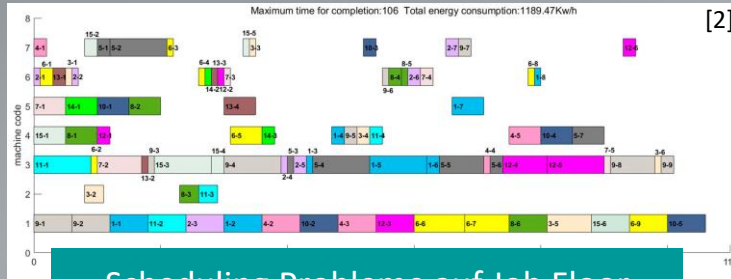
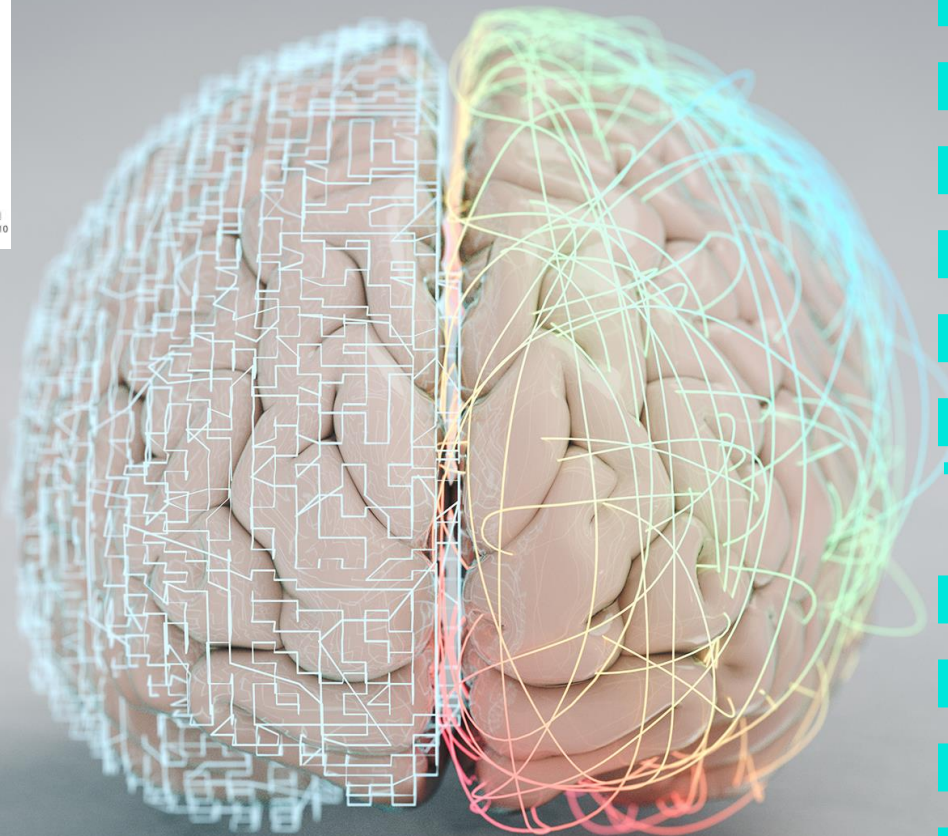


# Januar 2024

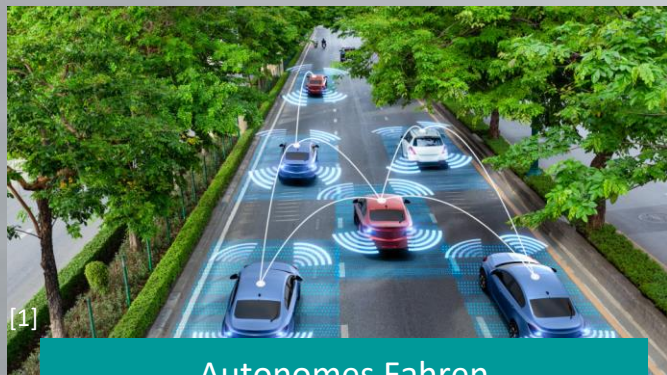


# Anwendung von Methoden der Künstliche Intelligenz

Anwendungen im Alltag und in der Industrie sind heute „Standard“



Scheduling Probleme auf Job Floor  
→ Genetic Algorithmen



Autonomes Fahren  
→ Reinforcement Learning

Für CAM-Automatisierung

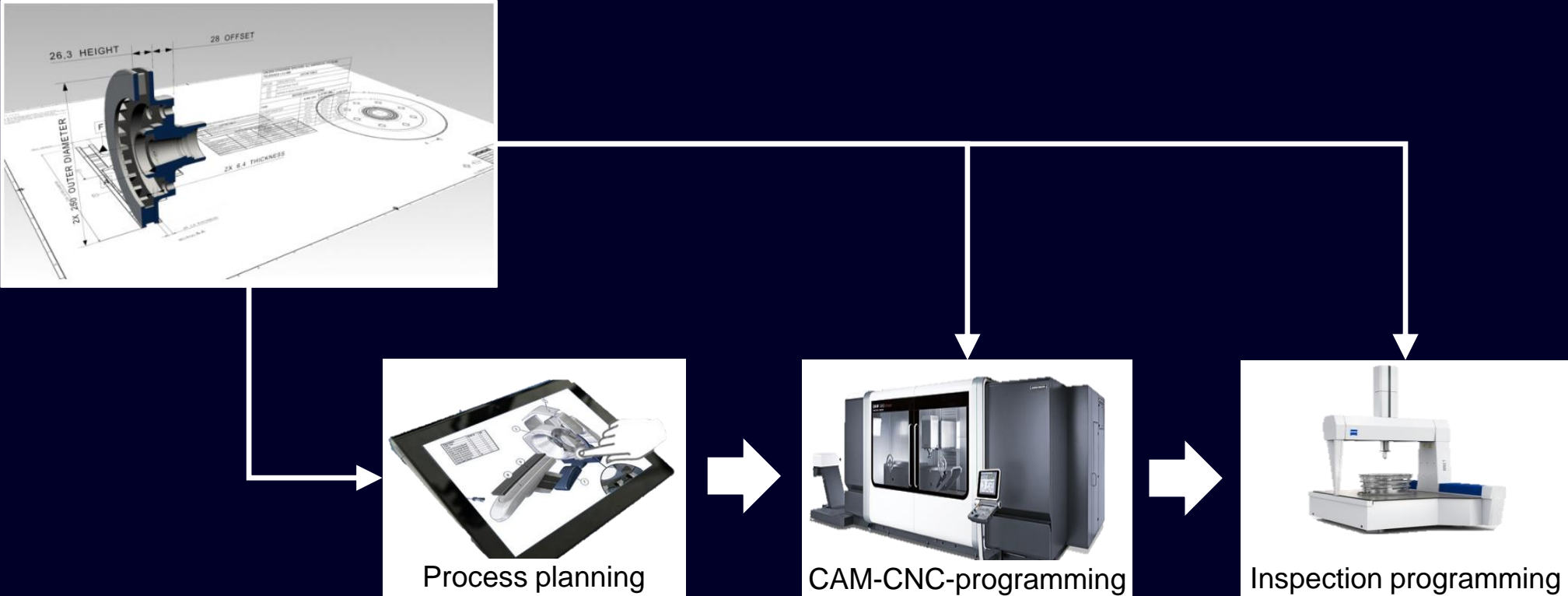
ChatBots (wie ChatGPT)  
→ Large Language Modelle (GenAI)

Für Feature Erkennung und  
Arbeitsplanerstellung

Soziale Netzwerke  
→ Graph Learning Methoden

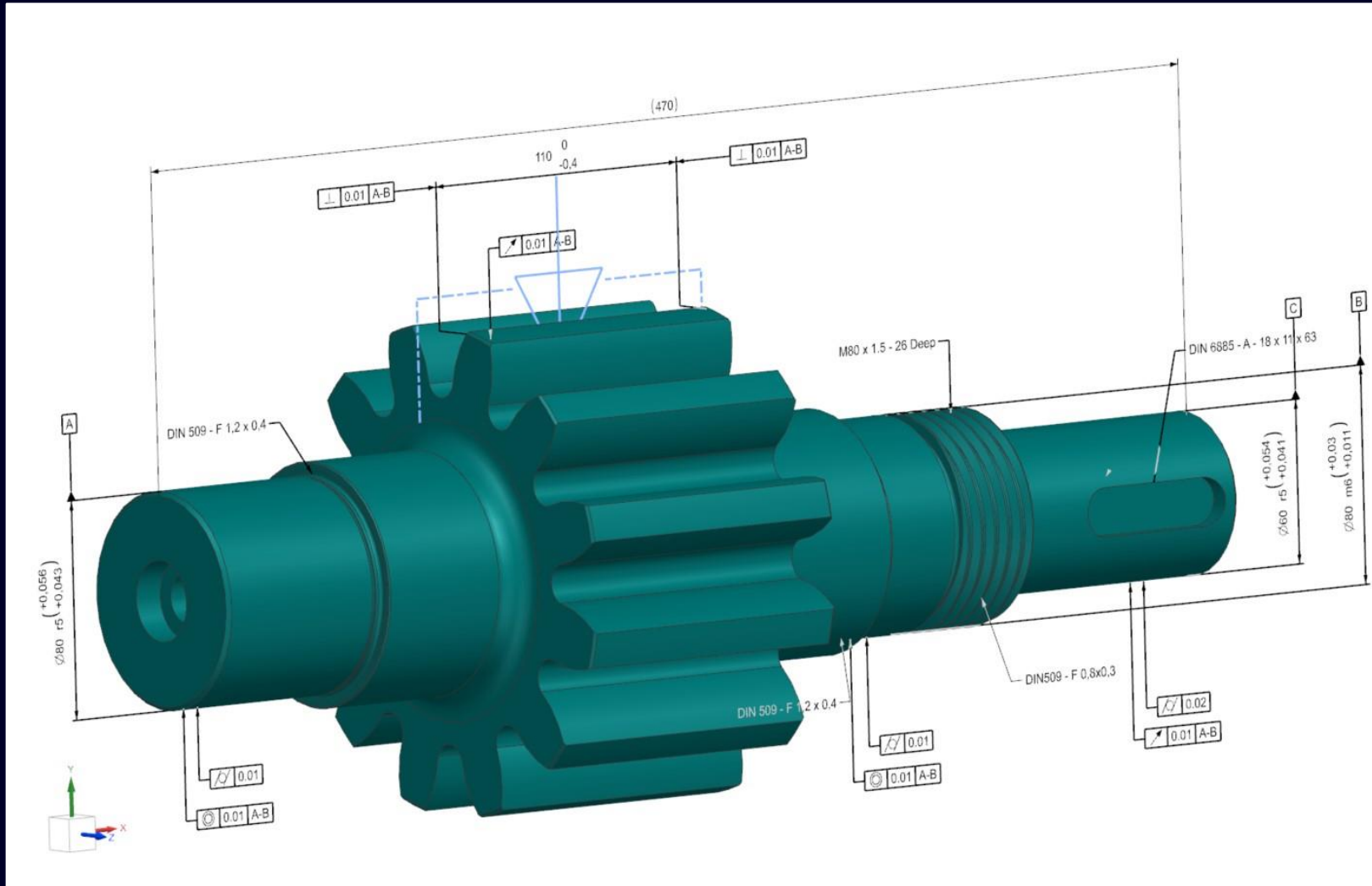
# Das Funktionale-Informations-Modell (FIM) ermöglicht einen automatischen Informationstransfer

Das 3D-CAD-Modell ersetzt das Papierdokument "das gelenkte Objekt" in der Fabrik



# Wie kann das ein 3D-CAD-Modell leisten?

Die Volumenrepräsentanz wird mit Informationsfeatures erweitert

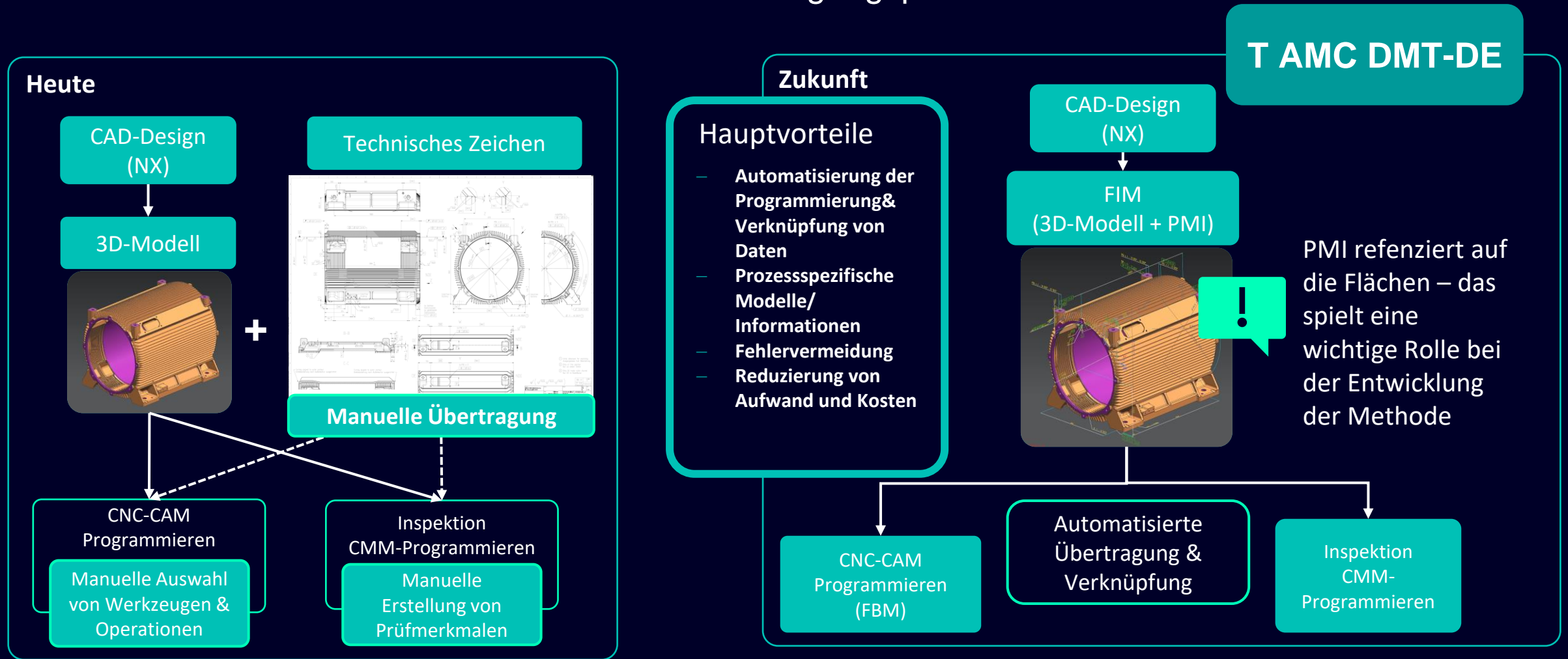


## 3D-FIM-als Basis:

- alle Geometrie- und Designfeatures sind modelliert
- Fehler: häufig wird eine 3D-Zeichnung erstellt

# Heute vs. Zukunft: Substitution der 2D-Zeichnung durch 3D-Modelle mit PMI

## Effizienterer Daten- und Informationstransfer in Fertigungsprozessen



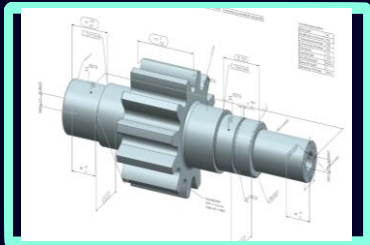
CAD: Computer Aided Design; CAM: Computer Aided Manufacturing; CMM: Coordinate Measuring Machine; FIM: Functional Information Model; PMI: Product Manufacturing Information



# 3D-CAD-Modelle als FIM (mit PMI) eröffnen Wege zur Automatisierung KI-Methoden finden neue Lösungsvorschläge

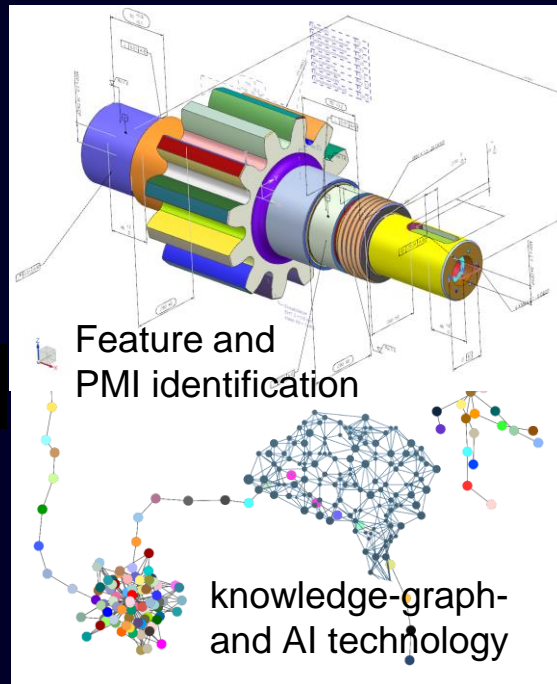
## Product definition

Functional Information Model  
**FIM as master model**



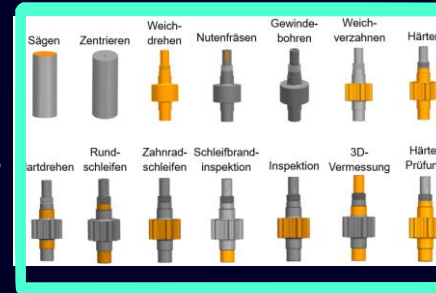
The FIM with the PMI replaces the 2D drawing

## Analysis of 3D Model



Identification of the feature, combination of the information and Derivation of the work plan

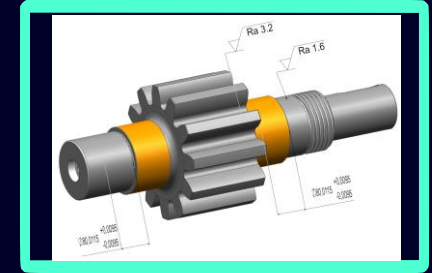
## Derivation of the required work process models



Saving of operation specific 3D models in TC and assignment in the TC work plan



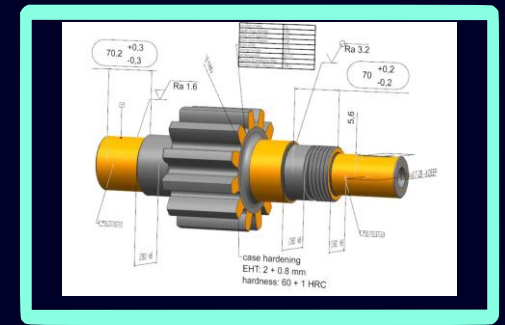
Operation-specific 3D-model



## Manufacturing

Application of 3D models

## Quality-Inspection



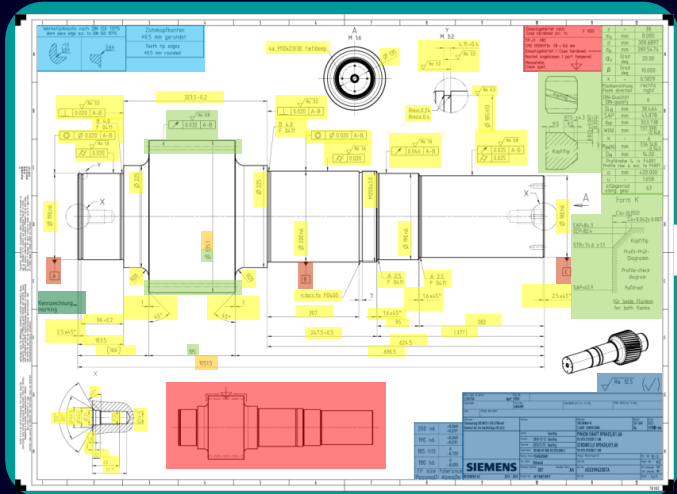
Quality Functional Information Model  
**QFIM**

- ✗ Gap in Siemens Software
- ✓ Available in Siemens Software

# Das 3D-CAD-Modell mit PMI dient zur Ableitung der Arbeitsvorgangsmodelle Substitution der 2D-Zeichnung

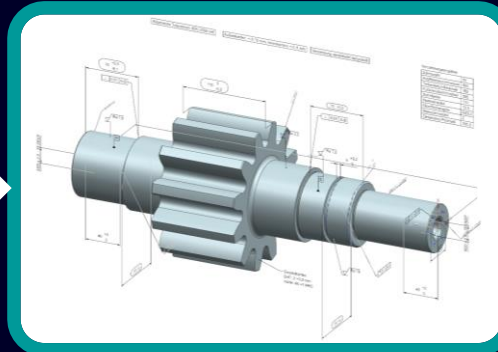
## 2D-Zeichnung:

- Analyse der darin verorteten Informationen



## FIM Master Model:

- spezielle Informationen sind auf die jeweilige Fläche referenziert

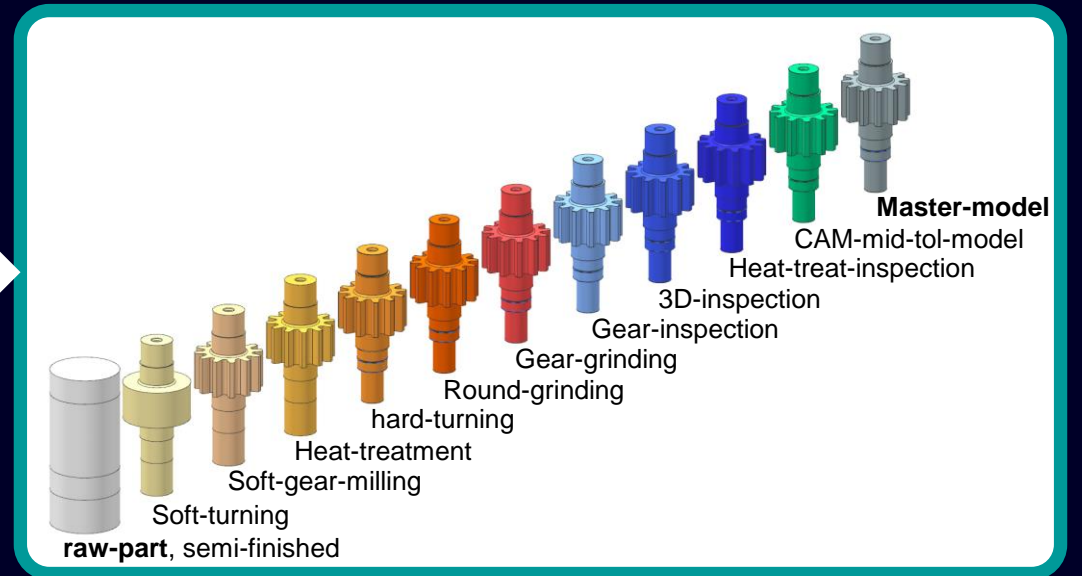


## Vorteile:

- assoziative Prozessmodelle je Bearbeitungsschritt:
- Vereinfachung im Fertigungsprozess
- immer up-to-date

## Arbeitsvorgangsmodelle für jeden Bearbeitungsschritt:

- Nur die Informationen, die zum jeweiligen Zeitpunkt gebraucht werden



hier die Links zum Video:

DE: [Smarte Fertigung - Functional Information Model \(FIM\) - de](#)

EN: [Smart Manufacturing - Functional Information Model \(FIM\) - en](#)

# Arbeitsplanerstellung - Prozessentwicklung

# Ausgangspunkt für die Arbeits-/ Prozessplanerstellung

Ausgehend von der 2D-Zeichnung und ähnlichen Arbeitsplänen wird der neue Arbeitsplan erstellt.

Eine durchgängige Automatisierung der Prozessplanung existiert heute nicht

## Stand der Technik in Arbeitsplanung

- 2D-Zeichnung wird aus dem 3D-Modell abgeleitet bzw. entwickelt
- Prozessplan wird auf Basis der 2D-Zeichnung und der Erfahrung des Prozessplaners erstellt
- Der Prozessplan basiert meist auf alten Arbeitsplänen und berücksichtigt meist auch keine möglichen Alternativ-Vorgänge
- Manuelle Arbeit kostet viel Zeit und Geld und er führt zum Fehlen eines Standards

PMI\* : Product Manufacturing Information

Ähnliche Bauteile  
suchen, basierend  
auf Erfahrung

2D Zeichen

Arbeitsplan  
anpassen  
neue

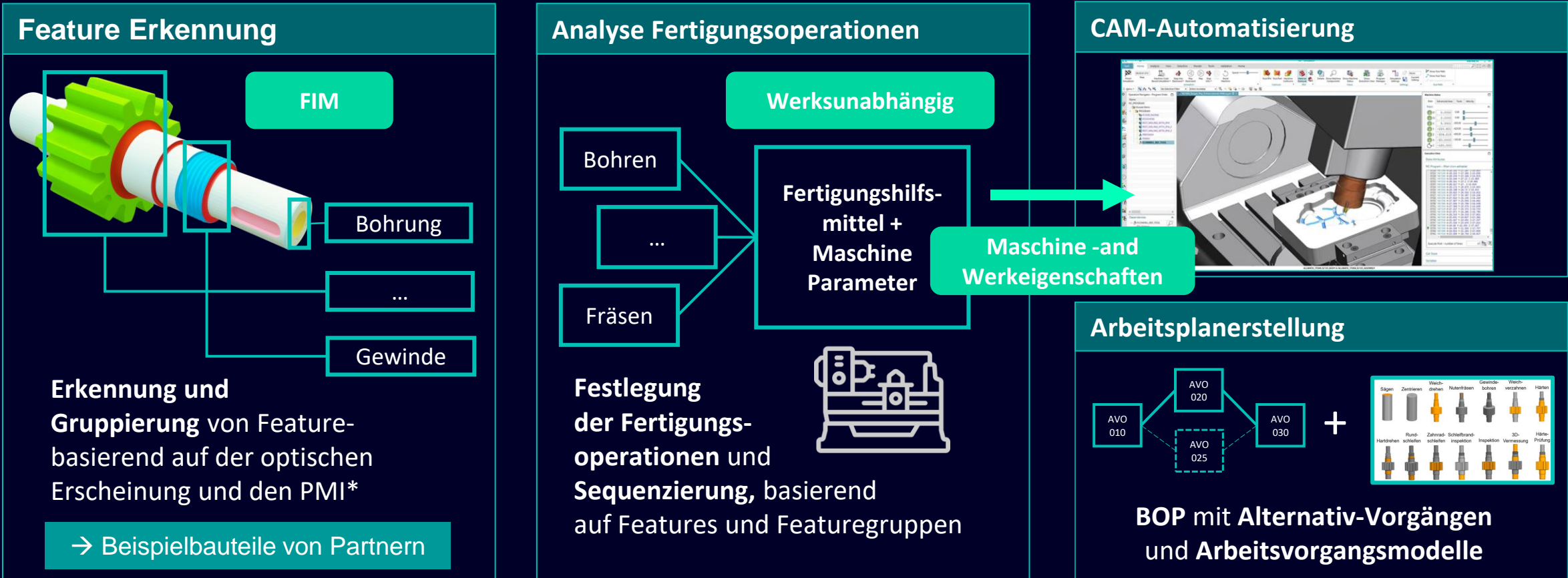
AVO Nr.	Arbeitsvorgangsbeschreibung	Kostenstelle	Lohngruppe	Maschine	Fertigungshilfsmittel	Rüstzeit [min]	Bearbeitungszeit [min]	
10	Rundmaterial auf 345mm Länge sägen	300	04	4101	-	5	10	
20	Rundmaterial auf 340mm anlöten und zentrieren	340	06	4201	1001 1051	2	15	
30	Welle komplett drehen	380	06	4313	1101/1121/1131	2,6	20	
70	Fertigteilkontrolle	900	07	9002	-	-	3,8	10



# Das 3D-CAD-Modell des Bauteils wird direkt zur Arbeitsplanerstellung genutzt

## 3 Schritte vom 3D-CAD-Bauteil zum automatisch erstellten Arbeitsplan

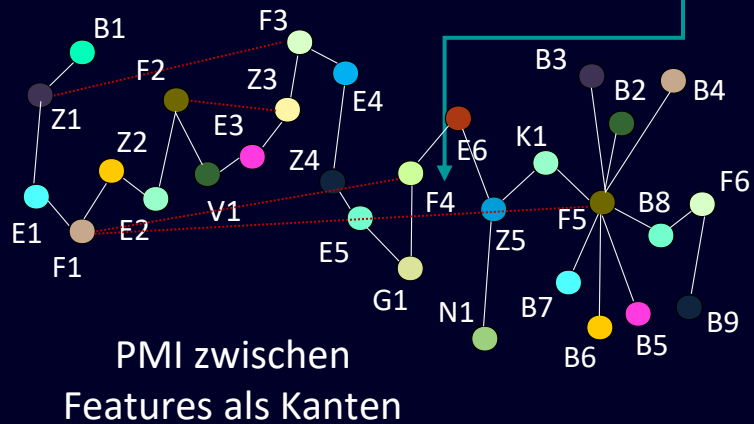
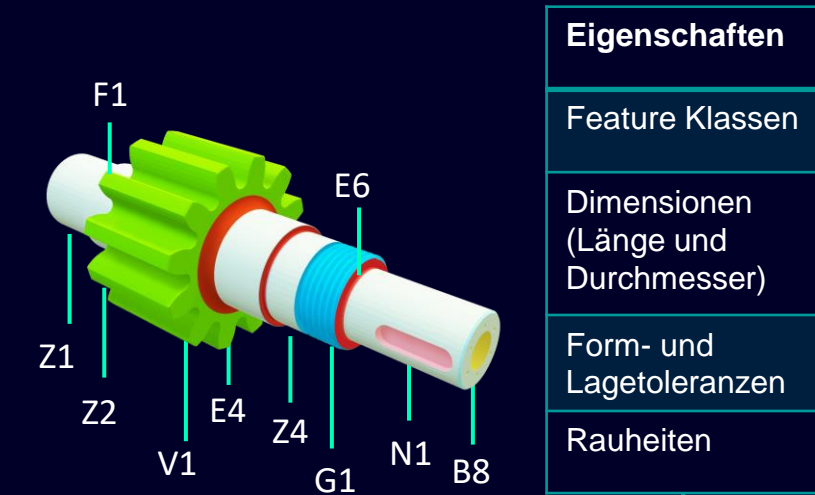
Die Automatisierung der Prozessplanung bietet Lösungen für alle drei Teilprobleme



PMI\* : Product Manufacturing Information; FIM: Functional Information Model

# KI-Methoden ermitteln aus den x-Features die notwendigen Arbeitsvorgänge

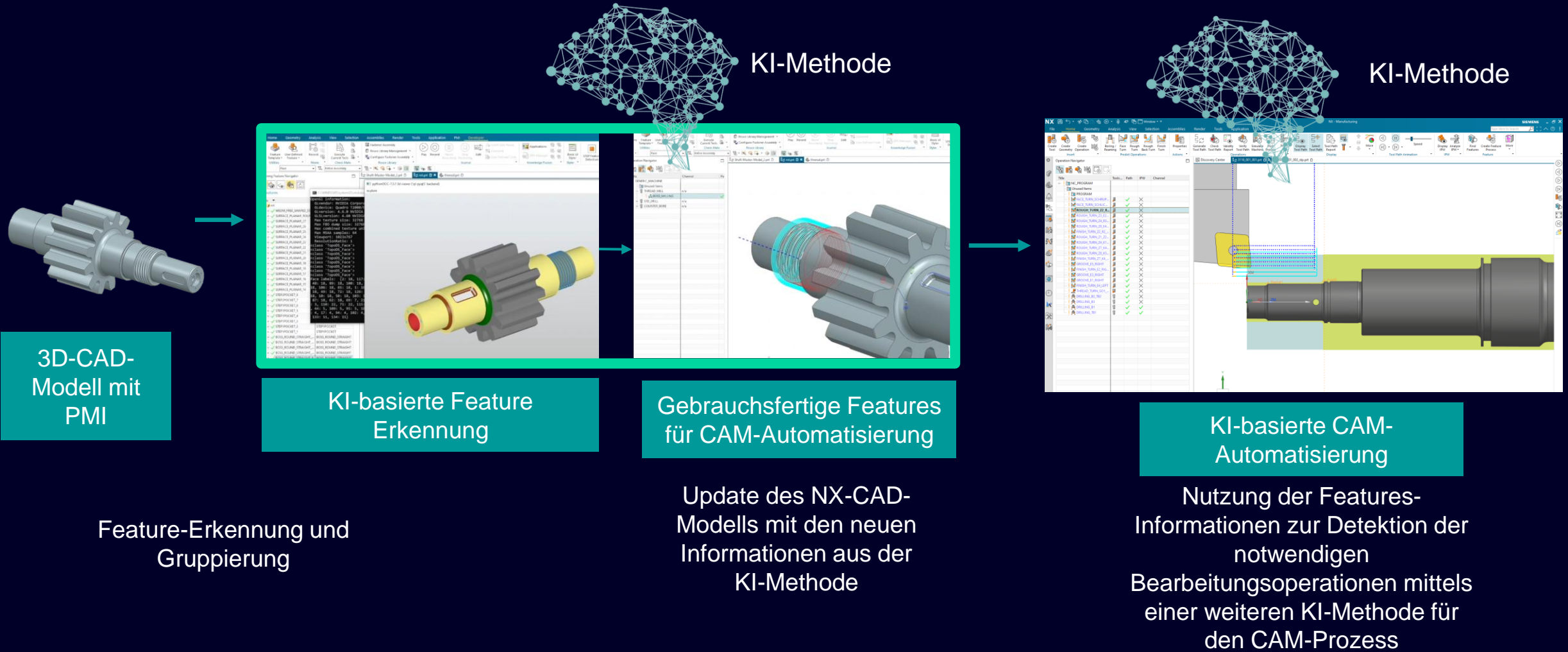
Geometrie-, Design- und Inforamtinasfeatuerees werden gruppiert



AVO	AVO Name	Zum komplett Fertigen	Aufmaß	Arbeitsplatz
10	DREHEN	F1 K1 Z1 F101 E1 F2 K2 Z16 R4 F11 K6 K7 Z15 Z14 G1	0,35: Z3 0,3 : Z2	AP1120
20	DREHEN	F10 K4 Z13 F901 F9 E3 U1 R3 F8 E2 F5 K201 F6 Z8 R1 R2 K3 F7 Z11	0,3 : Z12 0,35: Z4 Z5 Z6	AP1122
30	VERZAHNEN	-	V1 V2 V3	AP1454
50	WASCHEN	-	-	AP1345
80	TRANSPORT	-	-	AP1342
110	DIREKTHÄRTEN	-	-	AP1124
115	KUGELSTRAHL.	-	-	AP1114
120	RICHTEN AUTOMATISIERT	-	-	AP1156
140	SCHLEIFEN	Z2 Z3 Z4 F3 Z5 F301 Z6 F4 Z7 Z12	-	AP1780
150	SCHLEIFEN- VERZAHNEN	V1 V2 V3	-	AP1897
180	WASCHEN	-	-	AP1172
190	TRANSPORT	-	-	AP1452

# Workflow für KI-gestützte Feature-Erkennung zur CAM-Automatisierung

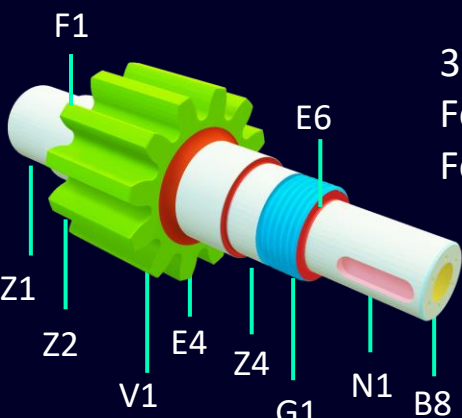
## 3D-CAD-Modell basierte CAM-Automatisierungsschritte für Rotationssymmetrische Teile



# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Gruppierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features

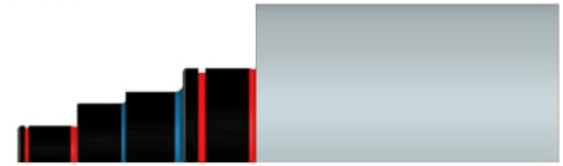
	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX


AVO 0: Rohteil



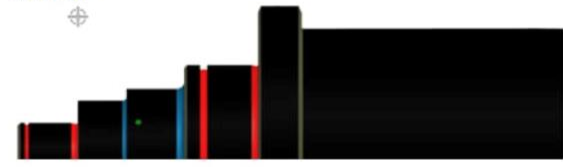
AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



AVO Fertig

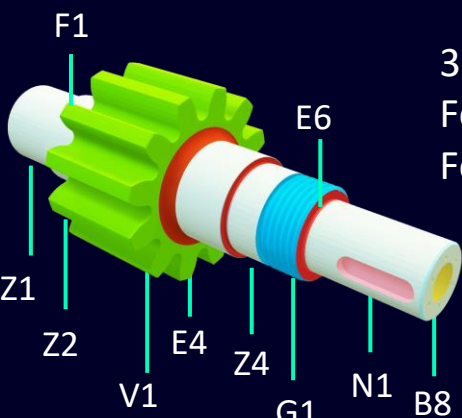




# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features


	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX

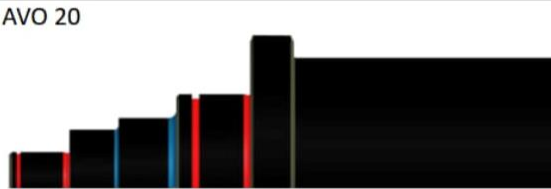
AVO 0: Rohteil



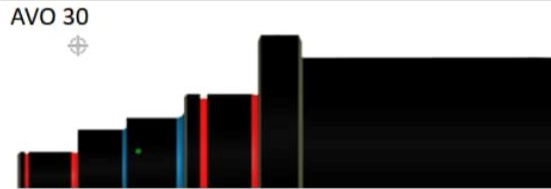
AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



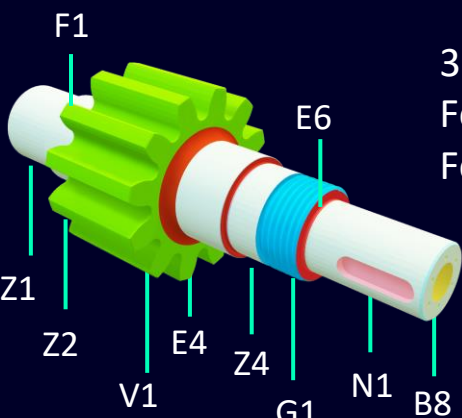
AVO Fertig



# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features


	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX


AVO 0: Rohteil




AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



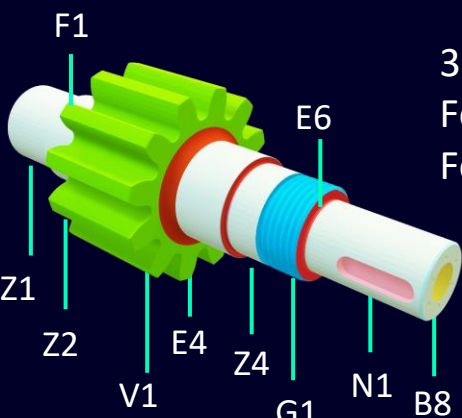
AVO Fertig



# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features


	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX


AVO 0: Rohteil




AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



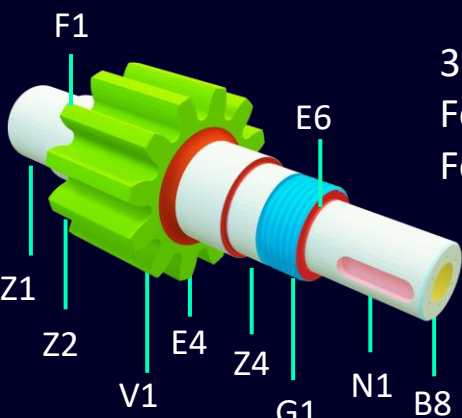
AVO Fertig



# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features

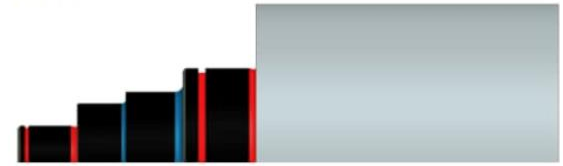
	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX


AVO 0: Rohteil




AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



AVO Fertig

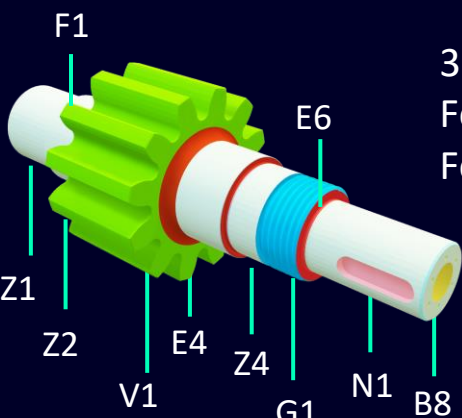




# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features


	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodelle in NX

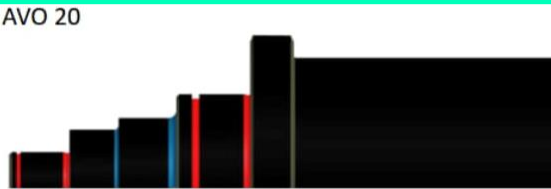
AVO 0: Rohteil



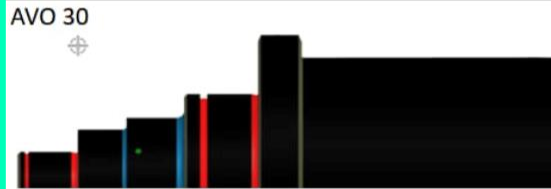
AVO 10




AVO 20




AVO 30




AVO 40




AVO 60



AVO 70



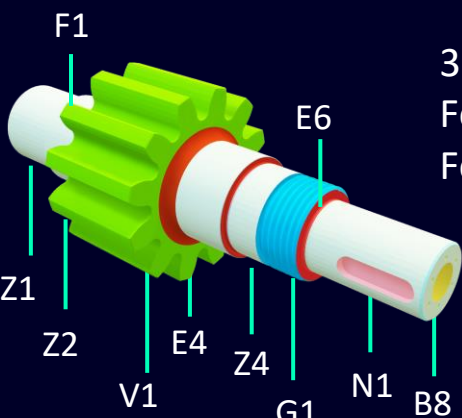
AVO Fertig



# Gruppierten x-Features als Basis für eine KI-Methode zur Entwicklung der AVOMs

Zu jedem Arbeitsvorgang/Aufspannung wird ein spezifisches 3D-CAD-Modell abgeleitet

Input




3D-CAD-Modell mit  
Feature Erkennung +  
Feature Segmentierung

+ Arbeitsplan für Geometrieändernde  
Arbeitsvorgänge basierend auf Features

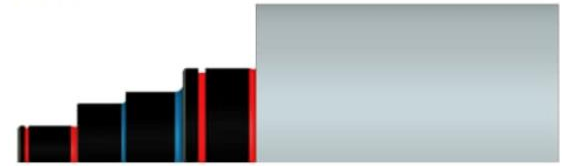
	AVO Nr.	Zylinder 1	Zylinder 2	Zylinder 3	Zylinder 4	Zylinder 5	Zylinder 6	FTG mit ZG
DR 1	10	Z1K1E1E2F2	Z2K2R1F3	Z3R2F4	Z4K3E3E4F5			Z1:0.29 Z4:0.25 F2:0.24 F5:0.22
DR 2	20					Z5K4K5	Z6K6F6	
BO	30			B1		B2	B3	
VZ	40					V1	V2	V1:0.39
HAE	50					V1	V2	
HDR/SLF	60	Z1F2			Z4F5			
VZSLF	70					V1		

Automatisch generierte Arbeitsvorgangsmodele in NX

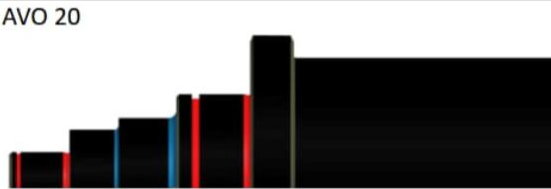
AVO 0: Rohteil



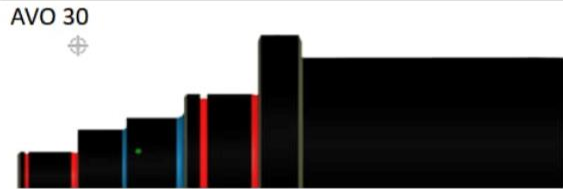
AVO 10




AVO 20




AVO 30



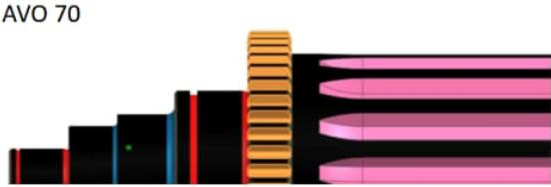
AVO 40



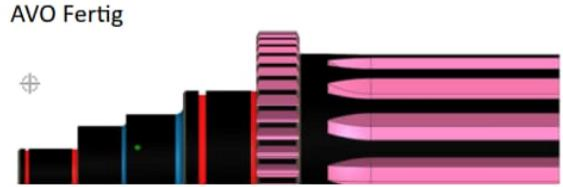
AVO 60



AVO 70



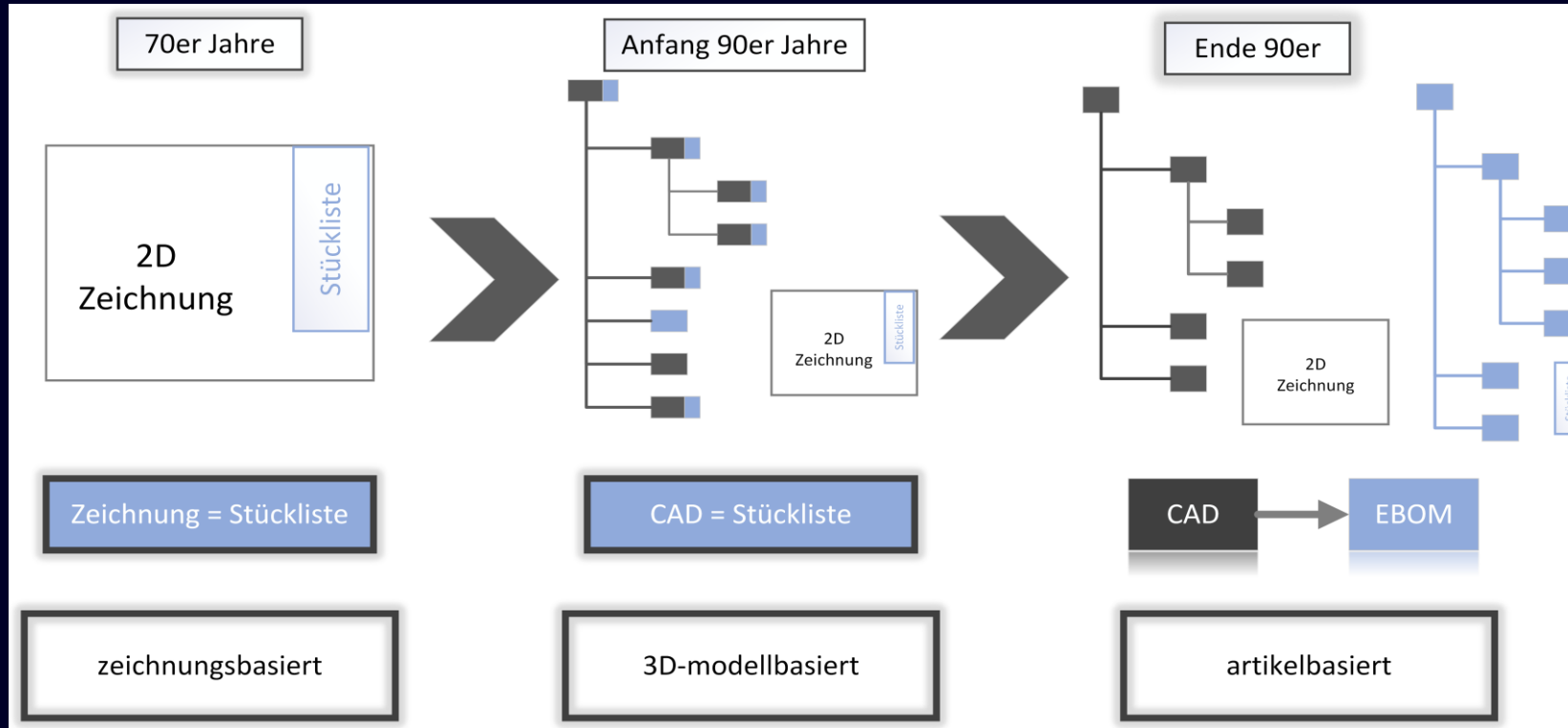
AVO Fertig



# Unterstützende Maßnahmen

An abstract graphic on the right side of the slide. It features a large, dark blue circle with a thick, dark blue ring inside it. The background of the circle is filled with a complex, textured pattern of fine, radiating lines in various shades of blue and teal, creating a sense of depth and movement. The overall aesthetic is modern and technical.

# Im Anfang war die 2D-Zeichnung daraus wurden digitale CAD-Strukturen Einführung von 2D-CAD-Systemen und Umstieg auf 3D-CAD-Methoden



Quelle: Mrowka 2020 [5]

## Vom analogen zum digitalen Stücklistentstehungsprozess

- seit den 70er- und 80er-Jahren ist die CAD-Welt in 2D und die Stückliste meist auf der Zeichnung
- mit Einführung der 3D-CAD-Systeme wurden PDM-Prozesse etabliert, die CAD-Daten und Stücklisten konnten getrennt werden

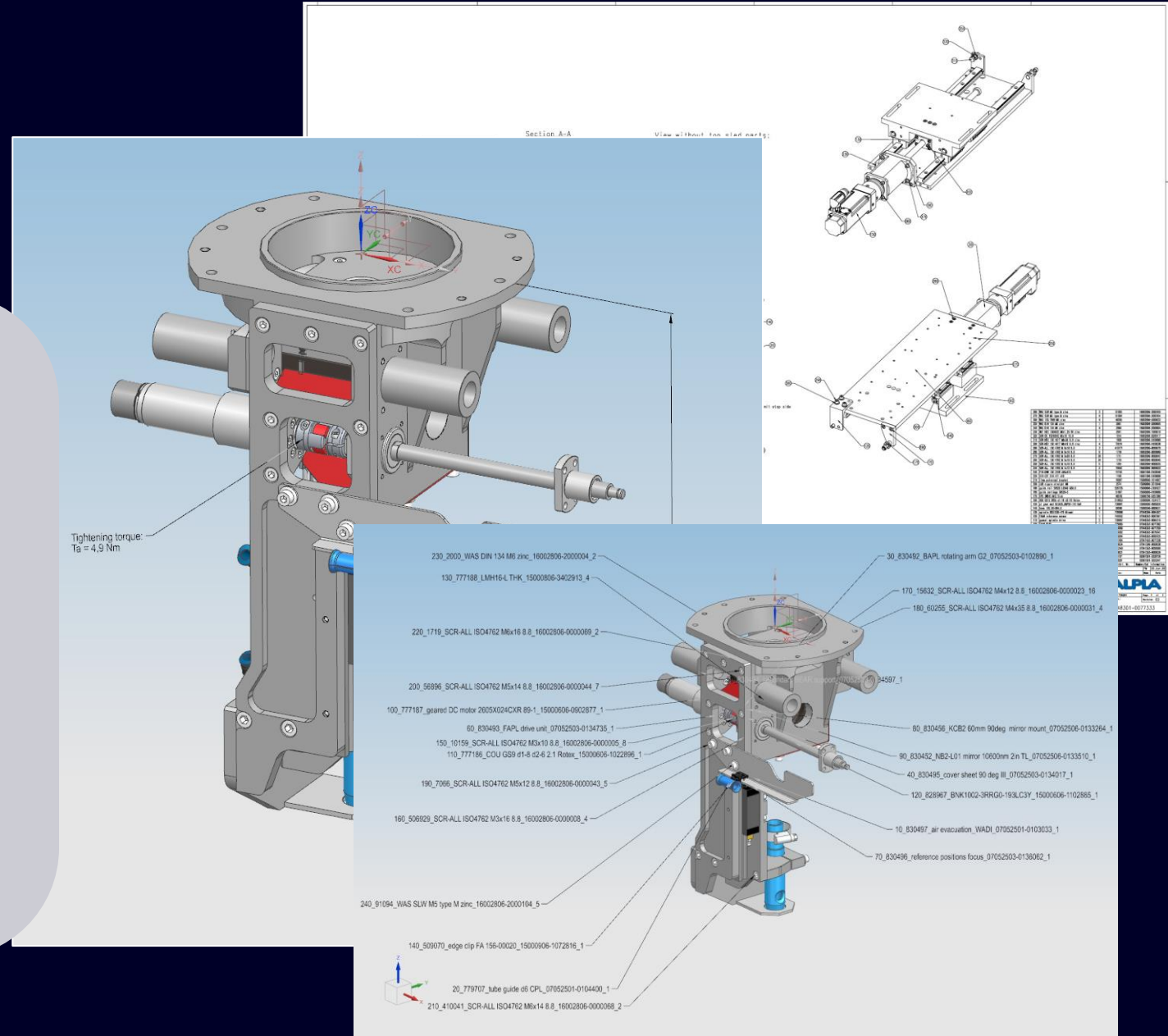


# 3D-CAD-Baugruppe mit PMI ersetzt die 2D-Baugruppenzeichnung

Beispiel aus dem Sondermaschinenbau

## Maßnahmen:

- Nutzung der CAD-Funktionen zur Visualisierung der Informationsfeatures wie: Einstellmaße, Anzugsmomente, Montagehinweise
- Darstellung dieser Informationsfeatures auf definierten Model-views (Modelview “Assembly” )
- Darstellung von „Stamm- oder Metadaten“ wie: Benennung, Artikelnummer
- Verlinkung von Werk-, DIN-, ISO-Normen mittels PMI

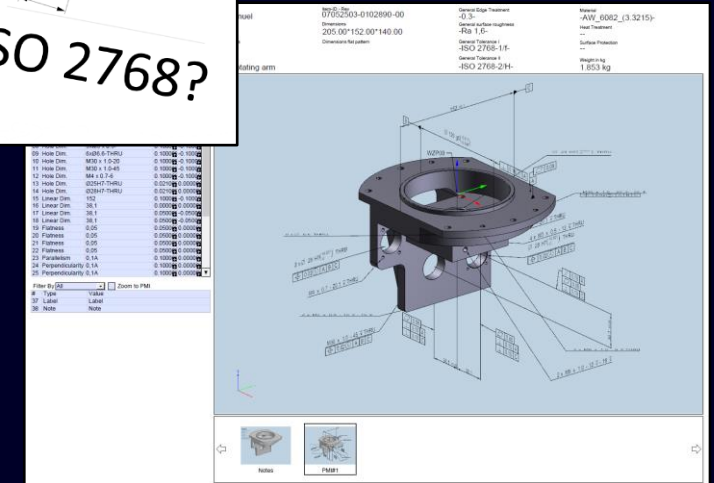
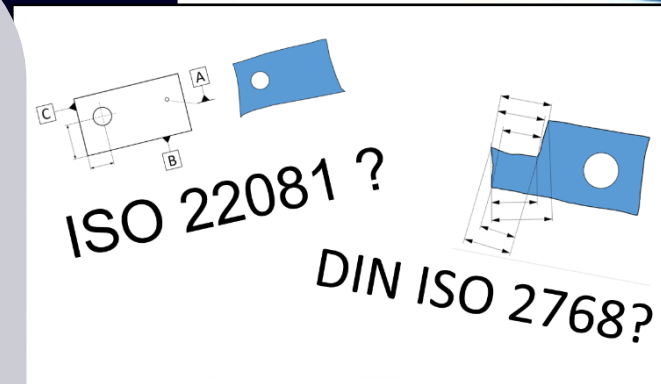
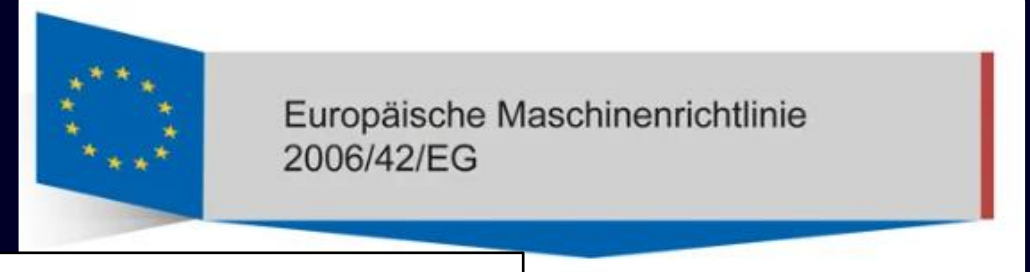


# Neue Strategie zur Angabe der Toleranzen und zum Messprozess

## Das 2-Punkt-Maß wird mehr und mehr von Form- und Lagetoleranzen abgelöst

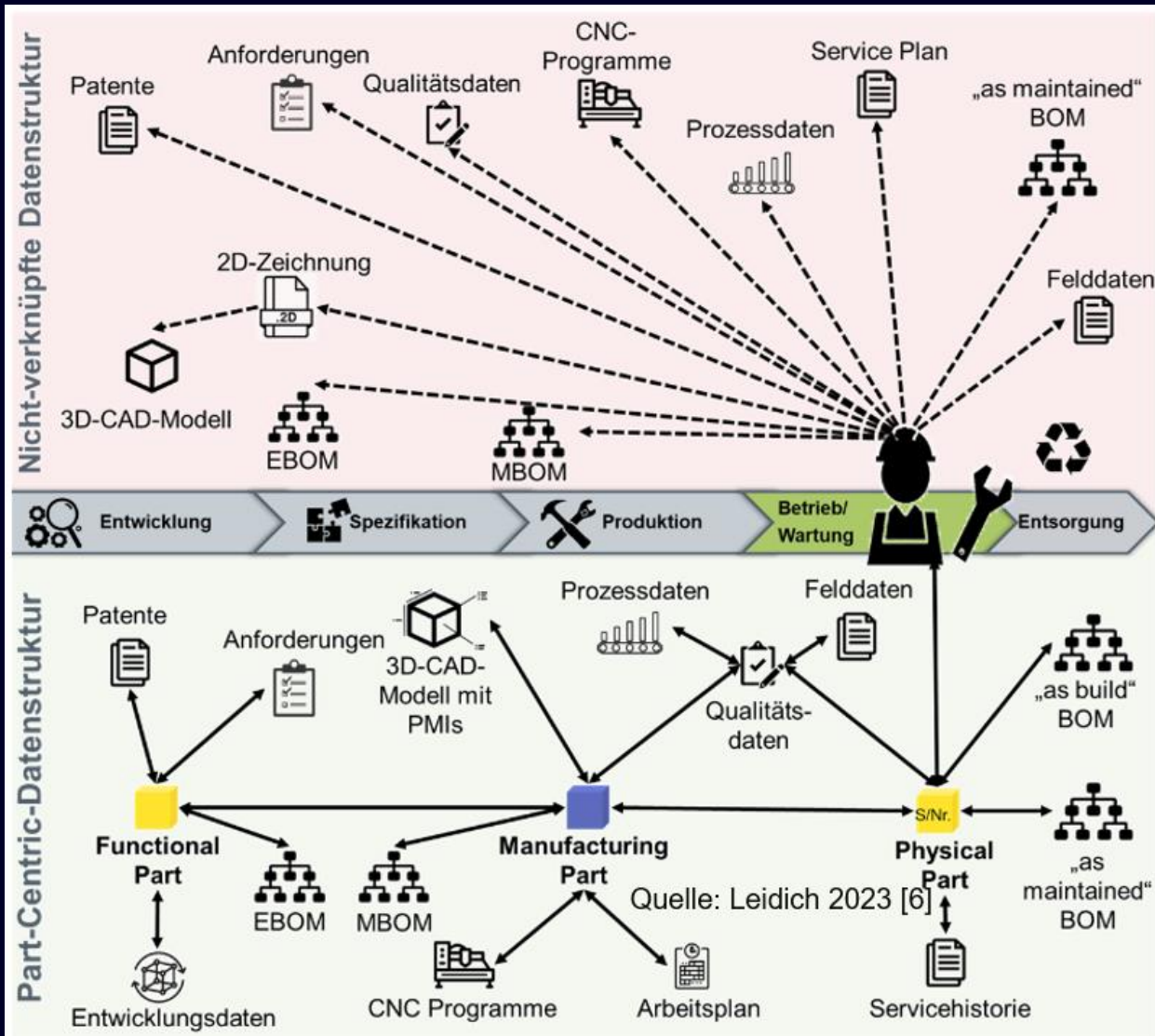
### Maßnahmen:

- In das 3D-CAD-Modell werden nur noch explizit tolerierte Maße eingetragen.
- Form- und Lagetoleranzen müssen in einem Bezugssystem definiert werden
- „Model-check“ auf semantische Korrektheit der Toleranzangaben ist unumgänglich
- Neue Normen wie **ISO 22081** können nur teilweise angewendet werden, da z.B. die Achse als Bezugsobjekt nicht zugelassen ist
- Das Tolerierungssystem muss im Messprozess auch taktil anwendbar sein
- Freimaßtoleranzen und die dazugehörigen Normen sind teilweise zurückgezogen



# Digitalisierung heißt – Verknüpfung der Daten, da wo sie entstehen

## Lokale Datenspeicherungen versus „Part-Centric“ Datenstrukturen



### 3 Blickwinkel auf die Bauteile/Strukturen:

- **Functional Part**

alle Entwicklungsdaten werden auf das E-part oder die EBOM verlinkt (z. B. funktionale Variante A)

- **Manufacturing Part**

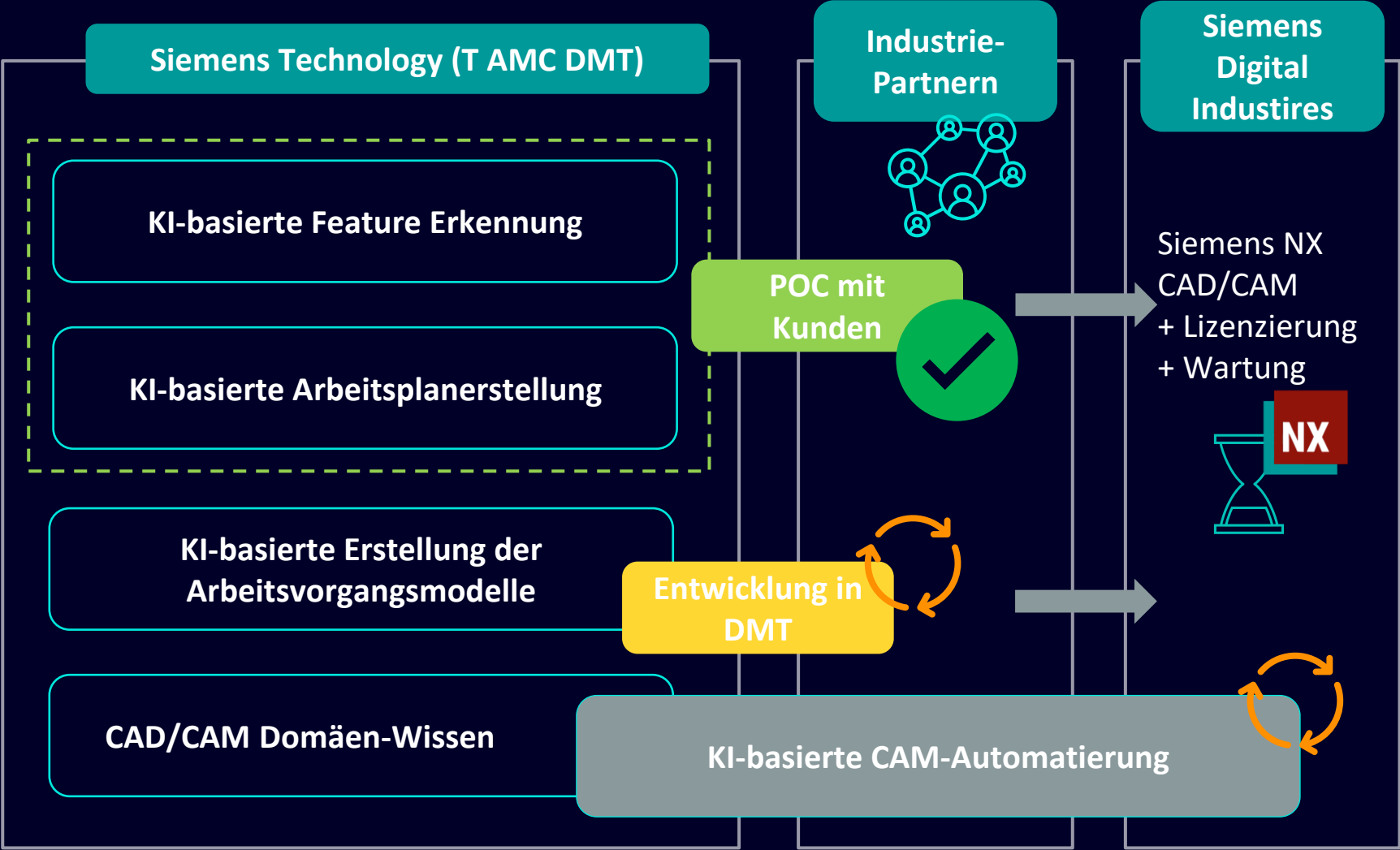
fertigbares M-part oder MBOM am Standort A oder B mit den dort gültigen Daten

- **Physical Part**

das wirklich hergestellte part, BOM mit Serial-Nr. „112“ für Kunde X mit den, im Prozess angefallenen bzw. gesammelten Daten → Digital Twin

# Zusammenfassung und Ausblick

## KI-Unterstützung zur CAM-Automatisierung





# Contact



**Dr.-Ing. Peter Robl**  
Head of Research Group

**Digital Manufacturing Technologies**  
Otto-Hahn-Ring 6  
81739 Munich  
Germany

Phone +49 1522 3150978  
E-mail [peter.robl@siemens.com](mailto:peter.robl@siemens.com)



**Dr.-Ing. Oliver Lohse**  
Senior Key Expert

**Digital Manufacturing Technologies**  
Otto-Hahn-Ring 6  
81739 Munich  
Germany

Phone +49 173 3170480  
E-mail [Oliver.Lohse@siemens.com](mailto:Oliver.Lohse@siemens.com)



## **Nexus: Cloud Computing und Datenaustausch leichtgemacht**

Bayreuther Konstrukteurstag 11.9.2024

Cornelia Thieme  
Hexagon

# What is Cloud Computing?

Cloud computing is used for computations which typically required much computational power



## **Real-Time Processing:**

Processing data immediately as it arrives.

Examples: Financial transactions, streaming data processing, IoT (Internet of Things).

## **High-Performance Computing (HPC):**

Computations that require extremely high computational power, often on distributed systems.

Examples: Scientific simulations, weather forecasting, molecular dynamics, genomics research.

## **Machine Learning and AI Computations:**

Training and applying machine learning (ML) and artificial intelligence (AI) models.

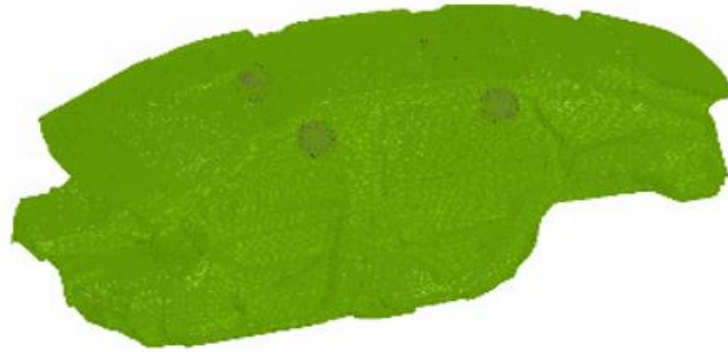
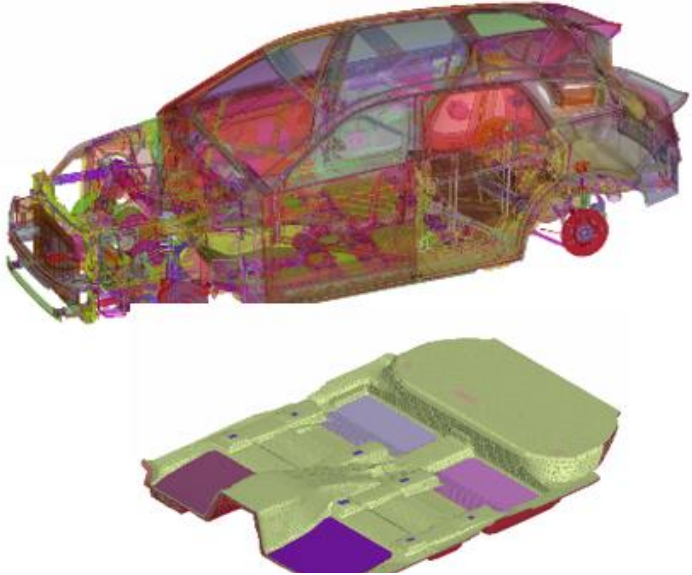
Examples: Image recognition, natural language processing, predictive models, training neural networks.

## **Database Queries and Transaction Processing:**

Performing database queries and transactions on a cloud-based database.

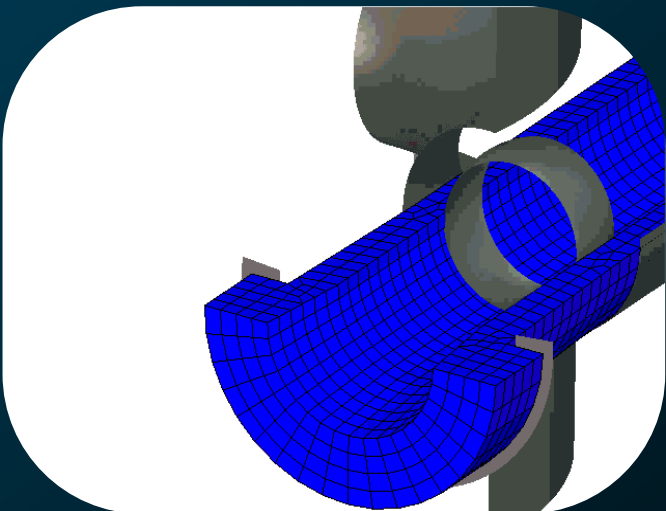
Examples: Managing data in scalable cloud databases, online Transaction Processing, querying customer data from a cloud database.

# High Performance Computing in CAE, Examples



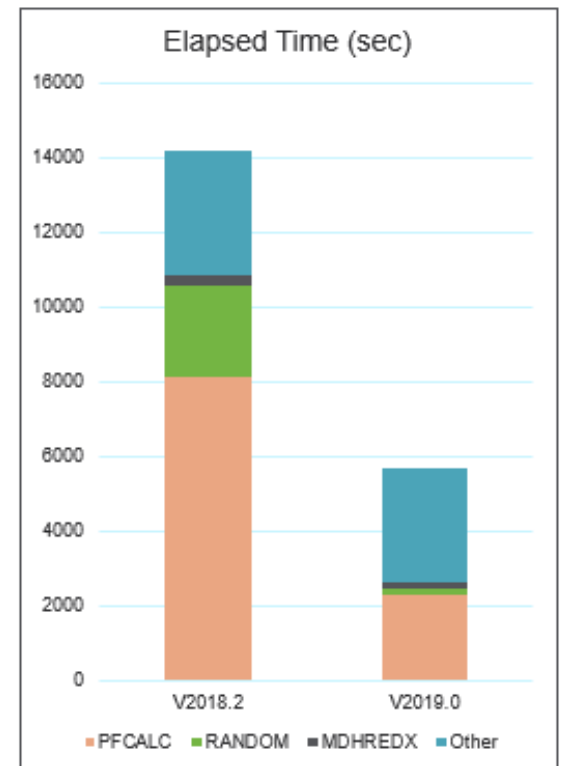
Run times of CAE analyses can be between seconds and days

Guellec, A., Cabrol, M., Jacqmot, J., and Van den Nieuwenhof, B., "Optimization of Trim Component and Reduction of the Road Noise Transmission Based on Finite Element Methods," ISNVH 2018 SAE Technical Paper 2018-01-1547



Number of DOFs	10.4 million
Number of Grid Points	1.7 million
Number of 2D Elements	1.2 million
Number of 3D Elements	0.6 million
Number of Structure Modes	2,300
Number of Fluid Modes	640
Number of Load Cases	277
Number of Forcing Frequencies	230

Typical run times (not same model as in the pictures)

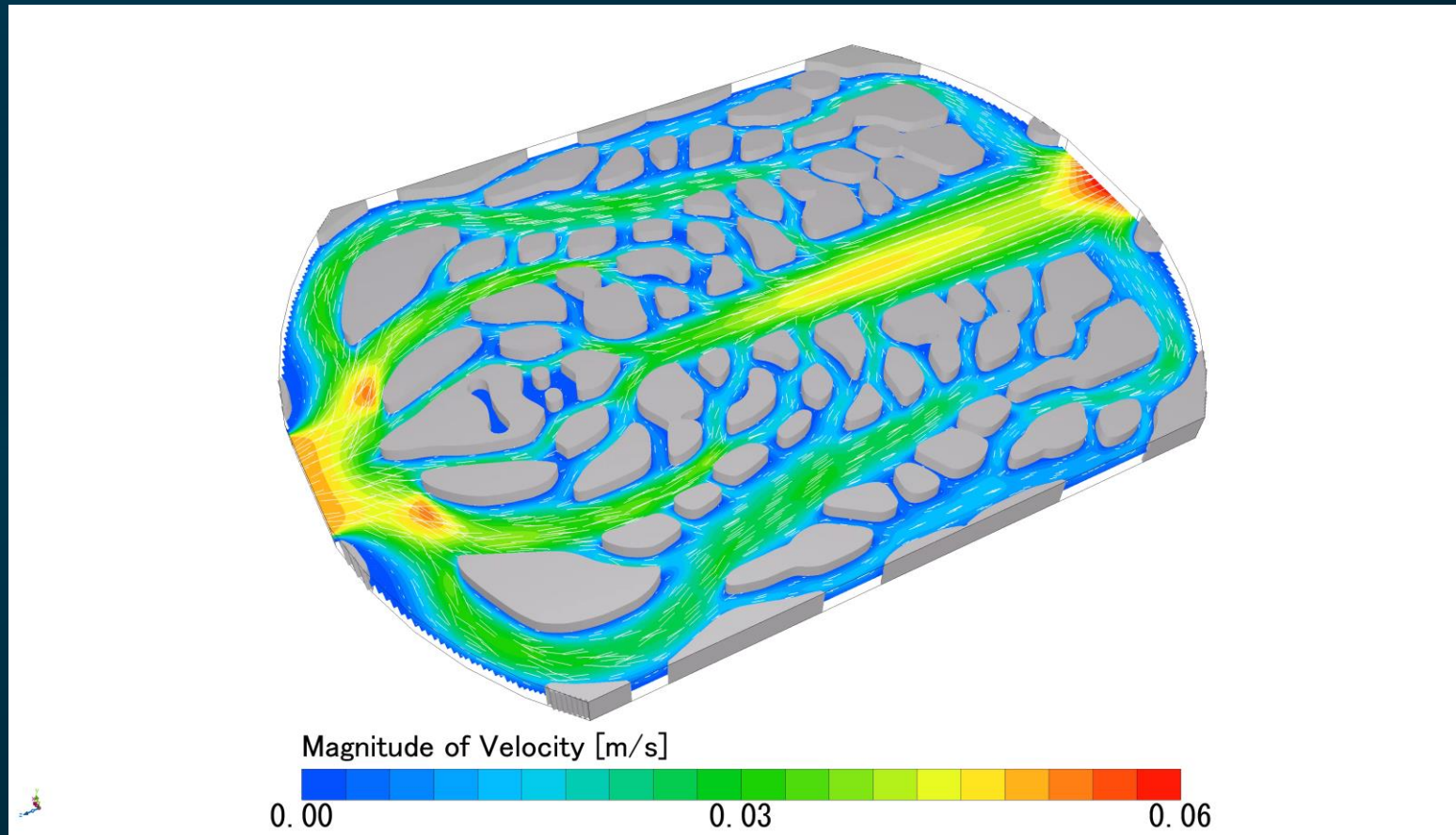




# High Performance Computing in CAE, Examples

## Topology optimization of heat exchanger

Optimal shape and flow velocity contour plot



Find a shape that minimizes the average temperature of the heat source area while keeping the pressure loss within 10 times the initial design.

Calculation time:  
50min, 36 parallels, 200 cycles

# How is Cloud Computing Performed?

Public cloud or private cloud

- Public: customers share the infrastructure, machines are used by different company
- Private: infrastructure is only used by one company, can be on-premise or remote

Big cloud providers

Platforms with run-ready software CAE installations e.g.:

- Rescale, platforms by software providers

Data:

- Input files are uploaded, result files downloaded – or pre/postprocessing is handled directly in the cloud

Price structure:

- Pay-by-use
- BYOL (bring your own license)
- Depends on run time, machine, number of parallel processors, data storage, ...

# Customer Challenges in Computing

## Research & Development Head

- Capex limit on hardware & software
- Difficult to predict fluctuating demands

## CAE Manager

- Multiple users
- Multiple runs
- Delivery deadlines
- Limited hardware & software capacity

## Other Challenges

- Data handling
- Longer runtime
- Difficult access to HPC
- Remote connection

## CAE Engineer

- Time pressure
- Multiple iteration needs
- Data sharing & collaboration



*Need for scalable cloud-based computing solution for simulation needs*

# Nexus Compute: Easy-to-Use Cloud Computing

## Supports execution of various applications

MSC Nastran, Marc, Actran, Cradle CFD, CAEfatigue, Dytran and Simufact Welding

## No limitations on compute resources & software licenses

Execution of different simulations in parallel ensures faster turnaround time

## Easy to use

Software is already installed

## Easy to collaborate

Just “share” the project with colleagues

## New, flexible business model

Consumption-based pricing

The screenshot displays the Nexus Compute web interface for creating a new job. The browser address bar shows the URL: <https://nexus.hexagon.com/compute/project/3cf378fd-3198-435d-92c4-d6c022f46130/create-new>. The page title is "New Job".

**Job Configuration** Use any of these solvers

Solvers available: Actran, Marc, MSC Nastran - 2023.2 (selected), scSTREAM, scFLOW, Dytran, Simufact Welding, Adams.

**Configuration Settings**

Hardware: small 16-cores AMD EPYC 7V73X, 448GB RAM, 1920GB storage. A "Recommend..." button is visible.

Command: `nast20232 solve=auto memorymax=0.75xphysical buffsize=65537 ...`

**Clear overview of consumption**

Credits per hour: 24.8 credits

Max runtime: 1-h

Total: 24.8 credits

1 file selected. Buttons: Cancel, Submit Job →



# Overview of Consumption

**Total Cost Summary**

<b>Credits per hour</b>	40.7 credits
-------------------------	--------------

Credits needed to run the selected machine and solver. Note that pricing combines both hardware and software.

---

<b>Max runtime</b>	1-h ▾
--------------------	-------

Select the maximum runtime for your job. This puts a hard limit on the amount of time the instance is used.

---

<b>Total</b>	40.7 credits
--------------	--------------

The maximum number of credits needed for hardware and solver use based on the selected maximum runtime. Note: total cost of the job may be less depending on actual job duration.

Nexus uses pre-paid „Nexus credits“

Hardware and software included

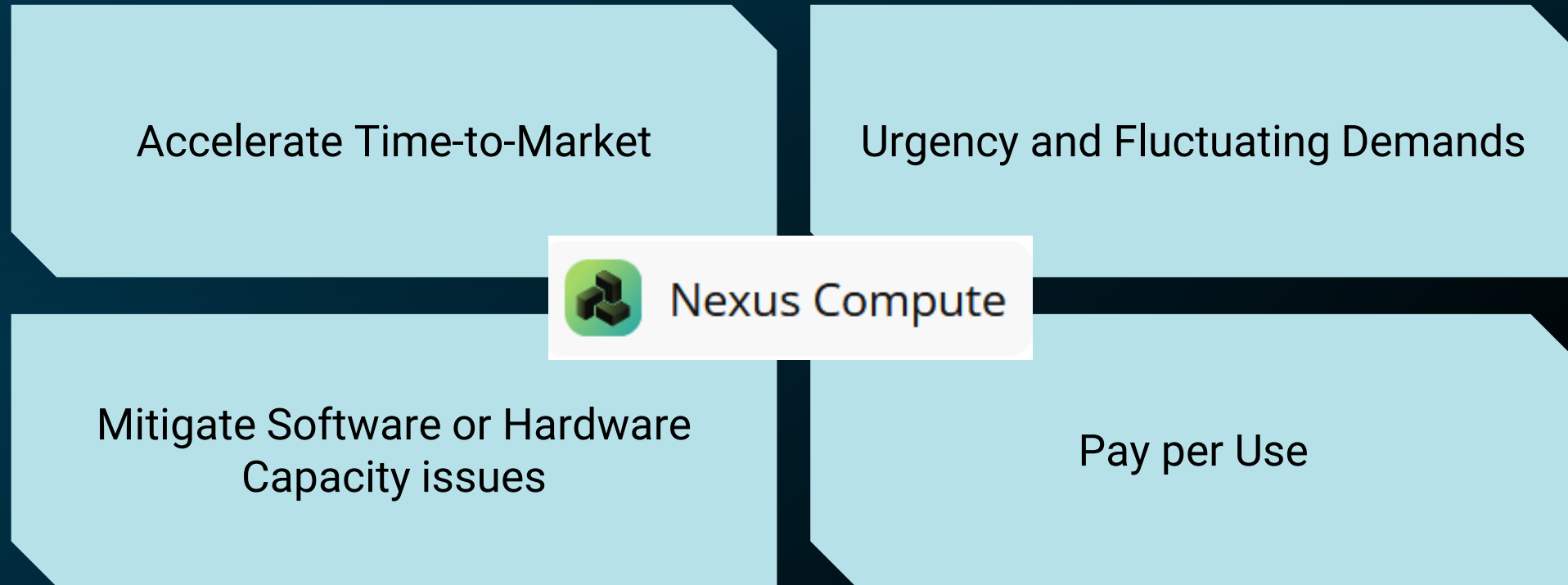
Stronger machines require more credits per hour

Number of credits is defined per hour, but accounted per minute

Job runtime can be limited by the user

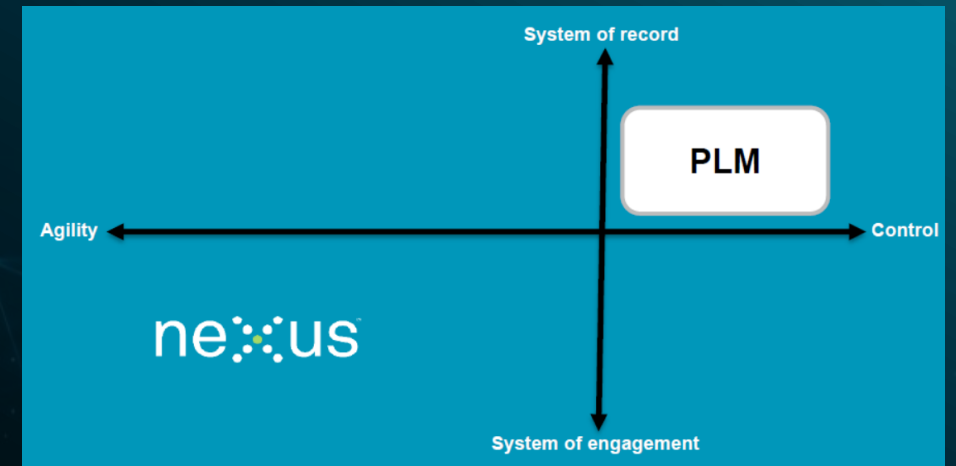
Email notification when job is finished

# Nexus Compute Can Drive Value in Four Key Areas



# What Is Nexus?

- Nexus is Hexagon's digital reality platform
- Nexus is Hexagon's E-Learning, documentation and support platform
- Practical apps for engineering collaboration between different teams and companies
- Easily accessible cloud computing



# Hexagon Portfolio Dedicated to Optimising Manufacturing Workflows

From first concept to final product

## Design and engineering

CAE: FEM, CFD, multibody, acoustics simulation etc.  
Optimise designs  
Reduce prototypes  
Accelerate innovation



Nexus

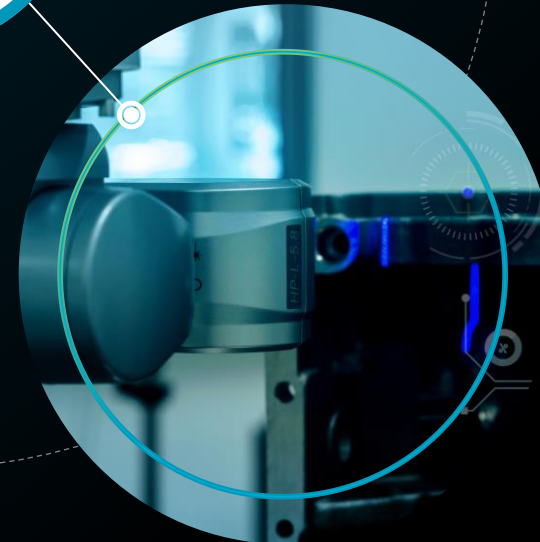
## Production

CAM software  
Improve process efficiency  
Reduce waste and rework



## Metrology and inspection

Scanners, metrology hardware and software  
Capture real-world data  
Manage product quality





# Nexus Platform First Impression

The screenshot shows the Nexus Platform dashboard for user Cornelia. The browser address bar displays <https://nexus.hexagon.com/home/dashboard/>. The top navigation bar includes the Nexus logo, a search bar with the text "Search by keyword...", and user profile information for "Hexagon" and "CT".

The left sidebar contains a navigation menu with the following items: Home, My Products, My Projects, All Products, Services, Tech Center, Help, and Partners.

The main content area features a personalized greeting: "Welcome back, Cornelia". Below this, there is a featured article titled "Engineering Reality 2024 Volume 1: Accelerate Smart Manufacturing". The article includes a sub-headline "SHINE: The innovation that sets Hexagon's 3D laser scanning solutions ahead" and a photograph of a hand using a 3D laser scanner on a red and yellow object. Two buttons are provided: "View story" and "View all stories".

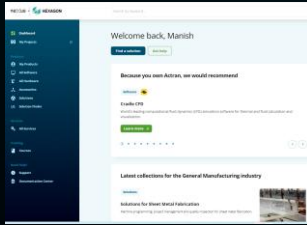
Below the article, a section titled "Because you own 3D Whiteboard, you maybe interested in" lists various software products. A "Software" filter is active. The products listed are:

- 3D Whiteboard
- Adams
- Marc
- Materials Connect
- MSC Apex
- Romax
- Romax Concept

At the bottom left, the text "CABINET VISION" is partially visible. The bottom right corner features the Hexagon logo and a "Privacy" link.

# Nexus Apps

## Nexus Home



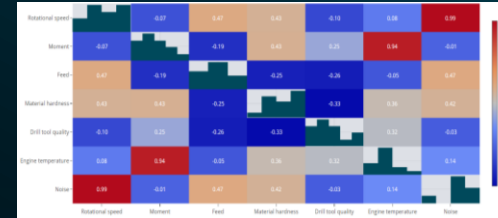
Nexus Home serves as a marketplace for HMI products providing one-stop shop customer experience

## Metrology Reporting App



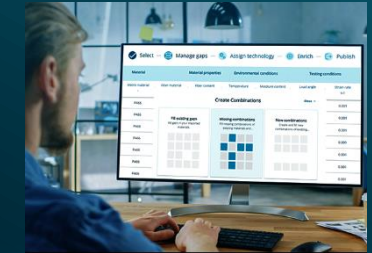
Metrology Reporting provides manufacturers with real-time metrology information and insights

## Odyssee Explore



Odyssee Explore shows statistics plots for a quick overview of datasets: correlations, heatmaps, clusters, etc.

## Materials Enrich App



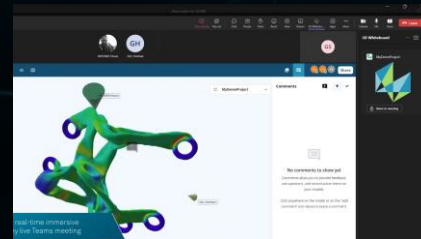
Enriches material data to drive faster product design and development.

## Materials Connect App



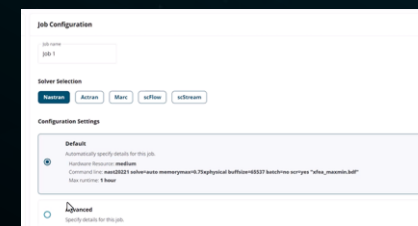
Cloud-native visualization and material data management solution.

## 3D Whiteboard



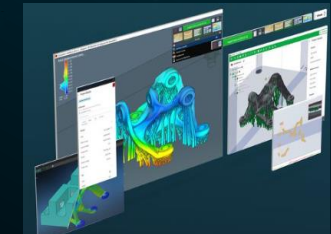
Visual collaboration app that allows stakeholders to perform live, interactive reviews in full 3D

## Nexus Compute



Cloud computing

## DfAM Workflow



Design for Additive Manufacturing is a connected workflow that streamlines and reduces design & engineering lead time.

# Nexus 3D Whiteboard

## Design review with stakeholders

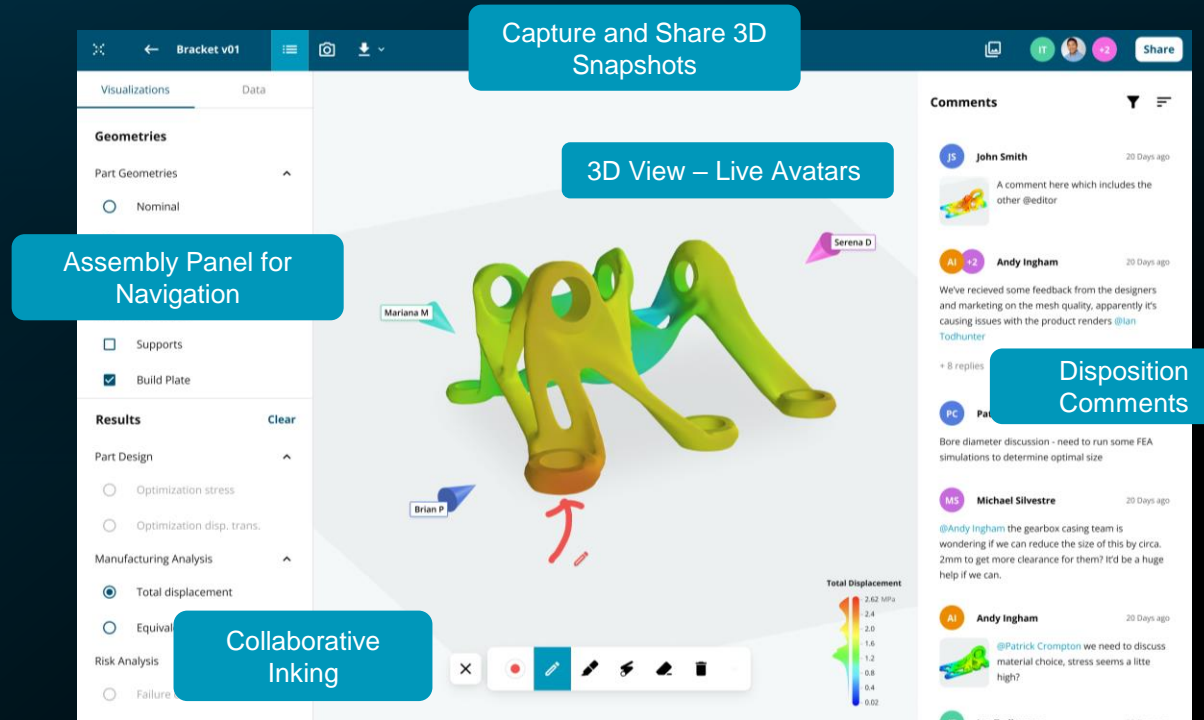
Share 3D artefacts (CAD, CAE etc.) to view, analyze and share visual insights using 3D data from various sources

## Collaborate on review actions

Comments, annotations, snapshot tool

## Engage in live collaboration in a browser or in Teams

Add 3D Whiteboard to a Microsoft Teams meeting for a fully immersive, real-time collaborative environment



# nexus<sup>®</sup>

## Freedom to innovate

Sign up at



[nexus.hexagon.com](https://nexus.hexagon.com)



And start your free  
cloud computing test!



# Detalliertere Betrachtung der Simulation der Additiven Fertigung

## Extended Abstract K-Tag 2024

Die Additive Fertigung oder der 3D-Druck von Bauteilen hat durch die Entwicklung der Drucker in den letzten zehn Jahren einen erheblichen Aufschwung erlebt und gehört nun zu den Standard-Fertigungsverfahren. Seitens der Softwarehersteller von Finite Element Systemen wurde viel investiert, um eine Simulation der additiven Fertigung mit geringem Benutzer-Aufwand zu ermöglichen. Ein Vortrag im letzten Jahr beschrieb die digitale Prozessplanung und die Durchführung der Simulation auf der 3DEXPERIENCE Plattform von Dassault Systèmes.

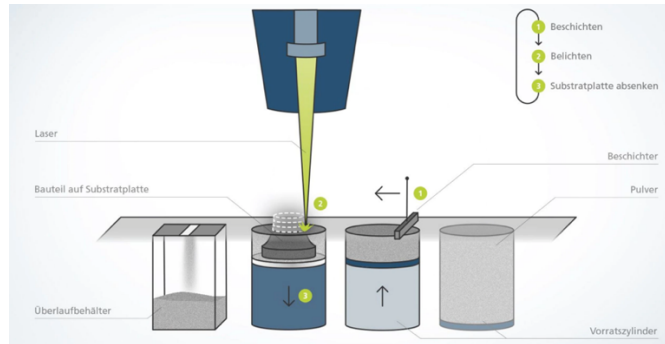
Der Fokus dieses Beitrages liegt auf dem SLS-Verfahren (Selective Laser Sintering). Das Verfahren ist dem Laser Powder Bed Verfahren des letzten Beitrages ähnlich. Insbesondere aber für Kunststoff-Materialien übernimmt das nicht belichtete Pulver eine stützende Wirkung. Somit sind bei Kunststoffen keine Stützstrukturen notwendig. Die notwendige Abbildung des Pulvers ist in 3DEXPERIENCE nicht direkt vorgesehen. Dieser Beitrag beschreibt einen selbst erstellten, veränderten Arbeitsablauf anhand eines Beispiels.

## Rückblick K-Tag 2023

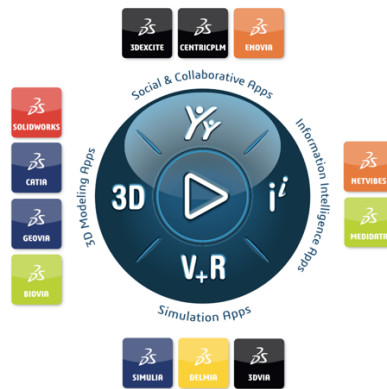
Eine Übersicht der verschiedenen Verfahren der Additiven Fertigung findet sich in [1] und beginnt bei dem Aggregatzustand, siehe folgendes Bild. Hierbei gehört das Laser-Sintern wie das Laser Powder Bed-Verfahren für Metalle zu den PBF-Verfahren.

Gliederungsteil		Hauptteil		Zugriffsteil								
Aggregatzustand	Form	Bindungsmechanismus	Bezeichnung	Kunststoff	Metall	Keramik	Schichtdicke [µm]	Stützstruktur	Kammergebunden	Multimaterialfähigkeit	Bauraum	
												Form
Fest	Pulver	Verschmelzen	Laser-Sintern	X	X	X	< 10	Ja	Begrenzt	mittel		
			Pulverbettbasiertes Schmelzen (PBF)	Laser Powder Bed Fusion	X	X	X	10-100	X	Ja	Begrenzt	mittel
			Elektronen-Strahlschmelzen	X	X	X	10-100	X	Ja	Begrenzt	klein	
	Strang	Verschmelzen	Materialauftrag mit gerichteter Energieeinbringung (DED)	Laser-Pulver-Auftragsschweißen	X	X	X	>200	Nein	Ja	mittel	
			Freistrahli-Bindemittelauftrag (BJT)	3D-Druck / Binder Jetting	X	X	X	> 100	Ja	Nein	groß	
				Materialextrusion (MEX)	Schmelzschiichtung	X	X	X	10-100	X	Nein	Ja
Folie	Verkleben	Schichtlaminierung (SHL)	Fused Layer Modeling	X	X	X	>200	Nein	Ja	mittel		
			Layer Laminated Manufacturing	X	X	X	10-100	X	Ja	Nein	groß	
Flüssig	UV	Bedbasierte Photopolymerisation (VPP)	Stereolithografie	X	X	X	< 10	X	Ja	Nein	groß	
			Zwei-Photonen-Polymerisation	X	(X)	X	< 1	Ja	Nein	klein		
			Digital Light Processing	X	X	X	10-100	X	Ja	Nein	mittel	
		Freistrahli-Materialauftrag (MJT)	Multi-Jet Modeling	X	X	X	10-100	X	Ja	Ja	mittel	

In dem Beitrag zum K-Tag 2023, [2], haben wir uns auf das Laser Powder Bed Verfahren beschränkt. Hierbei wird mittels eines Beschichters, siehe folgendes Bild aus [3], eine dünne Schicht des Metallpulvers auf einem Tisch verteilt und anschließend durch einen Laser belichtet. Der Tisch wird dann abgesenkt, es wird wieder eine Pulverschicht aufgetragen, welche wiederum belichtet wird.

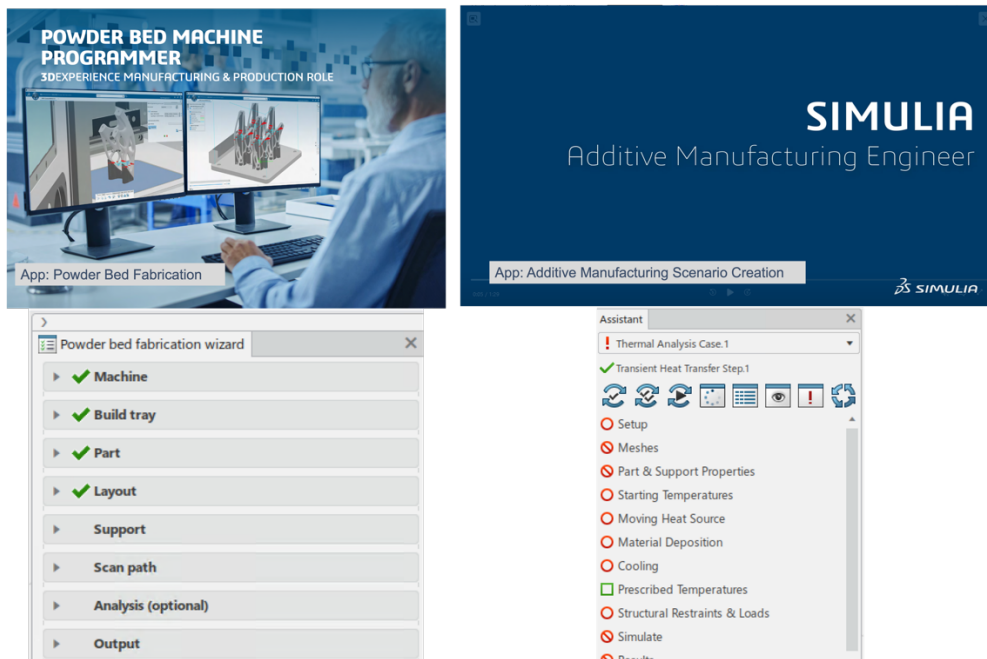


Mit 3DEXPERIENCE stellt die Dassault Systèmes eine Plattform für die digitale Produktentwicklung, siehe [4]. Ein wesentliches Element ist der Kompass, siehe Bild.



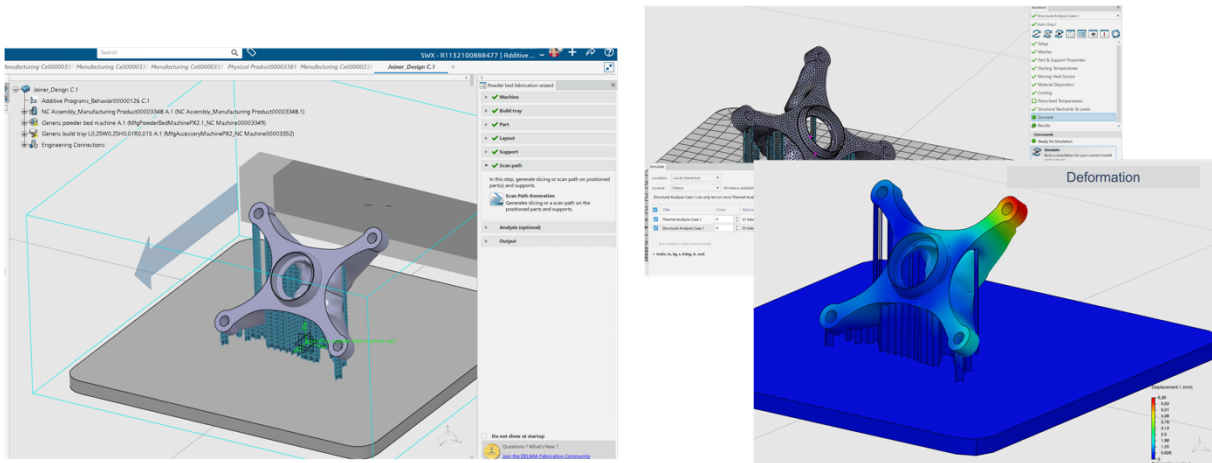
Die verschiedenen, um den Kompass herum angeordneten Brands stellen Apps bereit, welche Rollen der Benutzer zugeordnet sind. Wesentlich für die hier gezeigten Anwendungen sind die Brands DELMIA und SIMULIA aus dem Quadranten für die Simulation Apps.

Hier werden die Rolle ‚Powder Bed Machine Programmer‘ mit der App ‚Powder Bed Fabrication‘ für den Aufbau des Prozesses und die Rolle ‚Additive Manufacturing Analysis Engineer‘ mit der App ‚Additive Manufacturing Scenario Creation‘ für die Simulation verwendet, siehe folgendes Bild.



Ein wesentliches Merkmal der 3DEXPERIENCE Plattform sind geführte Bearbeitungsabläufe. Diese haben den großen Vorteil eines kontrollierten sowie strukturierten Vorgehens. Die Plattform erlaubt aber jederzeit, über diese Führung hinaus manuell einzugreifen.

Im Vortrag wurde dargestellt, wie man durch Abarbeitung der Punkte des jeweiligen Assistenten sowohl die Prozess-Vorbereitung abschließen als auch eine Simulation von Temperatur, Spannungen und Verzug durchführen kann. Dabei erfolgt die Übergabe wesentlicher Informationen wie der Bauteil-Anordnung oder des Laser-Scan-Pfades weitestgehend automatisch. Im folgenden Bild auf der linken Seite dargestellt sieht man das Ergebnis der Prozessvorbereitung mit positioniertem Bauteil und den notwendigen Stützstrukturen. Auf der rechten Seite dargestellt ist das Ergebnis der Simulation zur Deformation des Bauteils nach Abschluß der Fertigung.



Mittels 3DEXPERIENCE und den genannten Rollen sowie Apps kann man auf sehr einfache Weise den Prozeß der Additiven Fertigung definieren und mittels der Simulation analysieren. Das im Beitrag zum K-Tag 2023 verwendete Beispiel des Powder Bed Verfahrens von Metallen zeigt dies auf. Weitere Erläuterungen zur Literatur und der Berücksichtigung des Verfahrens finden sich in diesem Vortrag.

### Selective Laser Sintering (SLS) - Verfahren

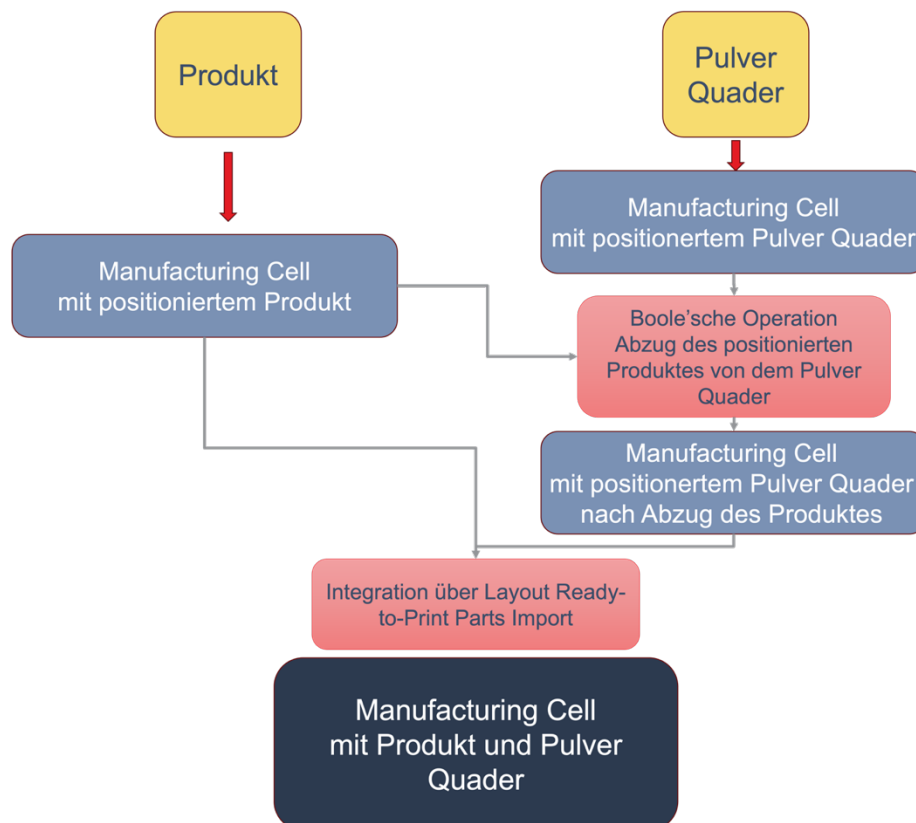
In diesem Beitrag soll näher auf das SLS-Verfahren zur Herstellung von Bauteilen aus Kunststoff eingegangen werden. Das Verfahren ist sehr ähnlich dem im Rückblick beschriebenen Verfahren zur additiven Herstellung von Metallen. Einen wesentlichen Unterschied stellt das unbelichtete Pulver dar. Dieses Pulver ist so kompakt, daß es die Bauteile trägt und somit keine Stützstrukturen notwendig sind. Die Wärmeabfuhr erfolgt in diesem Fall nur über das Pulver, welches die Wärme aber nur sehr langsam abführt. Die Kompaktheit des Pulvers ist in einem Video auf der 3DSystems Website, [5], gut erkennbar. Das folgende Bild zeigt ein paar Ausschnitte dieses Videos.



## Darstellung des SLS-Verfahrens in 3DEXPERIENCE

Zur Zeit ist in 3DEXPERIENCE die Darstellung des Pulvers nicht vorgesehen. Es ist auch keine Notwendigkeit gegeben, das Pulver in der Prozessvorbereitung darzustellen. Ein besonderer Vorteil der Integration von Prozessvorbereitung und Simulation auf der 3DEXPERIENCE Plattform stellt die automatische Übernahme der Schichtbildung in der Simulation dar. Letztere müsste sonst vom Benutzer definiert werden, stellt aber eigentlich einen Maschinenparameter dar. Dementsprechend wurde hier ein Arbeitsprozeß aufgebaut, welcher das Pulver bereits in der Prozessvorbereitung berücksichtigt. Es wäre aber auch ein anderer Weg denkbar.

Der aufgebaute Prozeß ist im folgenden Bild dargestellt.

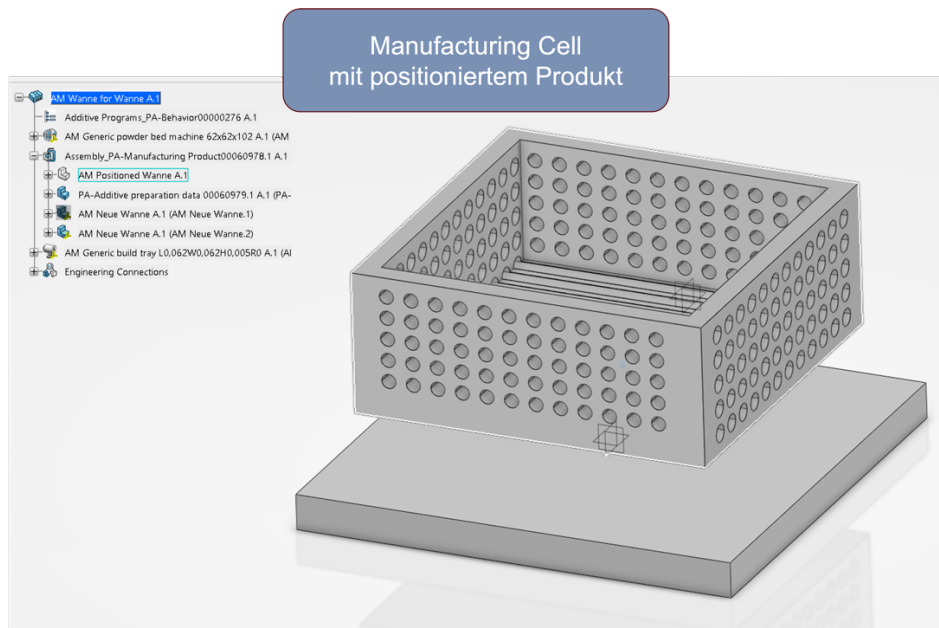


Begonnen wird der Prozeß mit den CAD Modellen von Produkt und Pulver Quader und der Auswahl einer bestimmten Maschine mit Tisch. Maschine und Tisch werden immer wieder verwendet. Mit der Maschine sind die Parameter für das Aufbringen des Pulvers und der Belichtung verbunden. Auf diese wird im Arbeitsablauf bei jedem Aufbau einer Manufacturing Cell zurückgegriffen. Auch die Parameter für das Layout sollten immer vorher festgelegt werden. Pulver Quader und Produkt werden jeweils in einer Manufacturing Cell positioniert. Das Pulver wird anschließend exportiert und mittels einer Boole'schen Operation um das Produkt reduziert. Der reduzierte Pulver Quader wird anschließend nochmals auf dem Tisch positioniert. Es stehen somit 2 Manufacturing Cells zur Verfügung. Nun wird eine neue Manufacturing Cell erstellt. Hier überspringt man den Arbeitspunkt des Imports der Parts (Bauteile) und wählt im Layout den Import bereits positionierter Bauteile. Dann definiert man den Scan Path für Pulver Quader und Produkt. Prinzipiell können dabei verschiedene Laser verwendet werden. Zu berücksichtigen ist hier aber, daß der abgebildete Pulver Quader für die Maschinensteuerung nicht notwendig ist. Für die Maschinensteuerung könnte man die zuerst erstellte Manufacturing Cell des Produktes zurückgreifen. Prinzipiell kann man mehrere Produkt-Bauteile verwenden.

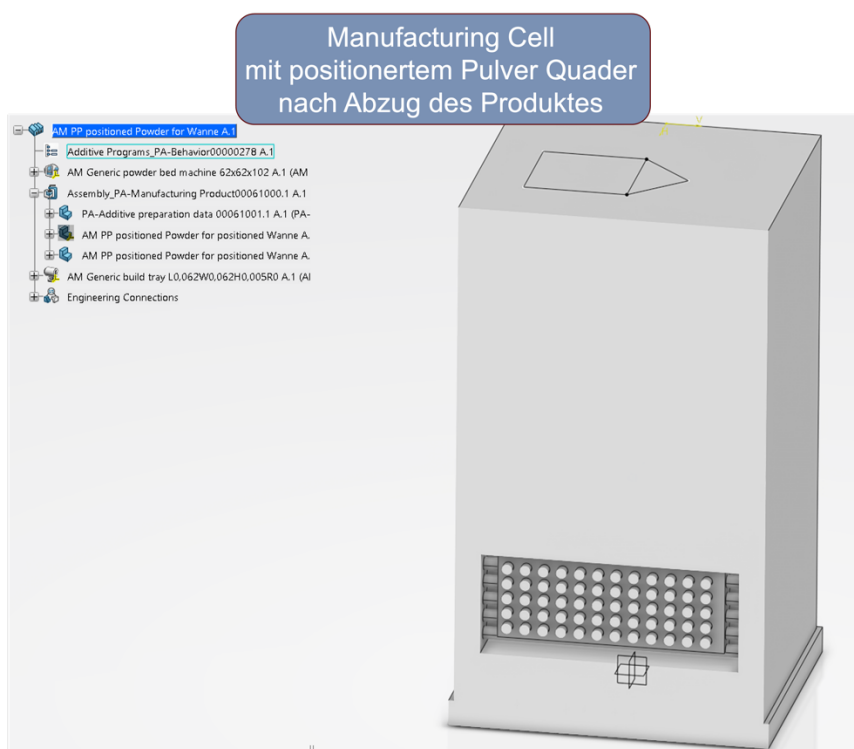


Der aufgebaute Arbeitsablauf wurde mit einem Beispiel durchgeführt. Das Produkt ist hierbei so erstellt worden, daß sich kleine und große Flächen darin befinden.

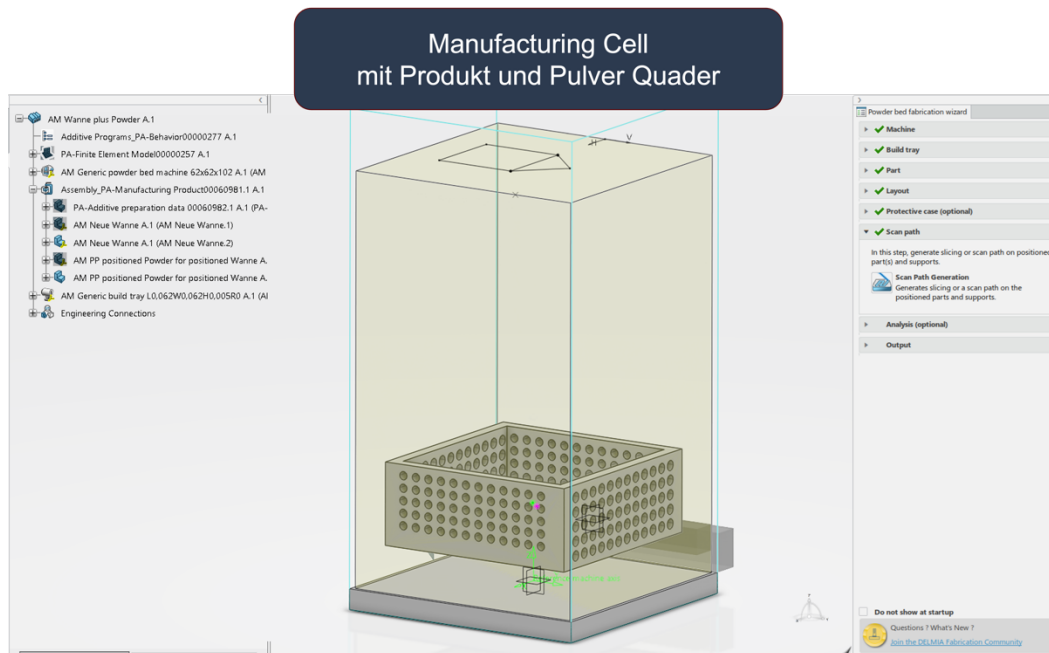
Im folgenden Bild ist das in einer Manufacturing Cell positionierte Produkt dargestellt. Hier handelt es sich um einen Kasten mit gebohrten Seitenwänden.



Es wurde eine Manufacturing Cell für den Pulver Quader aufgebaut. Von dem positionierten Quader wurde das Produkt mittels Boole'scher Operation abgezogen und erneut eine Manufacturing Cell aufgebaut, siehe folgendes Bild.

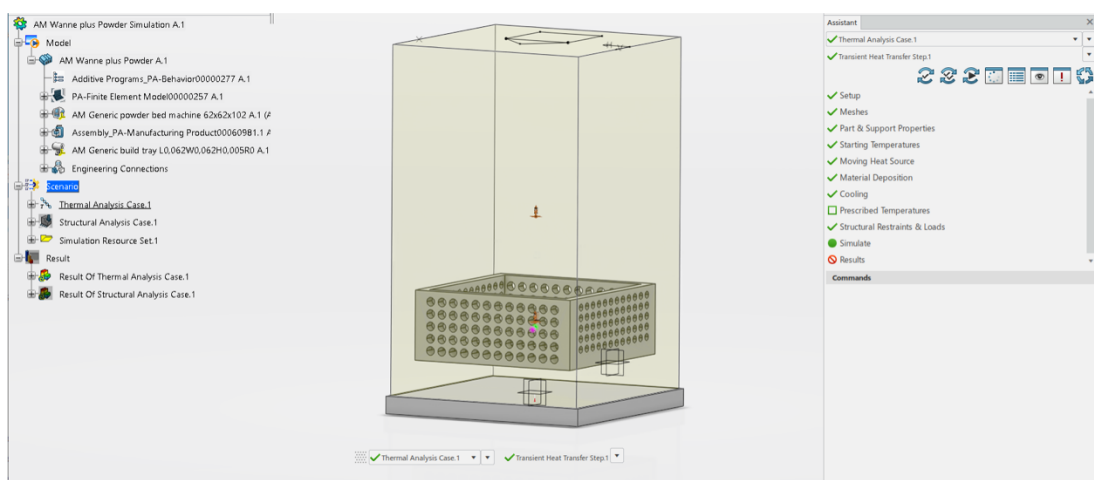


Nach dem Import von Produkt und Pulver Quader als Ready-to-Print Parts ist die Anordnung fertig, siehe folgendes Bild. Nun wird noch der Laser-Pfad erstellt.

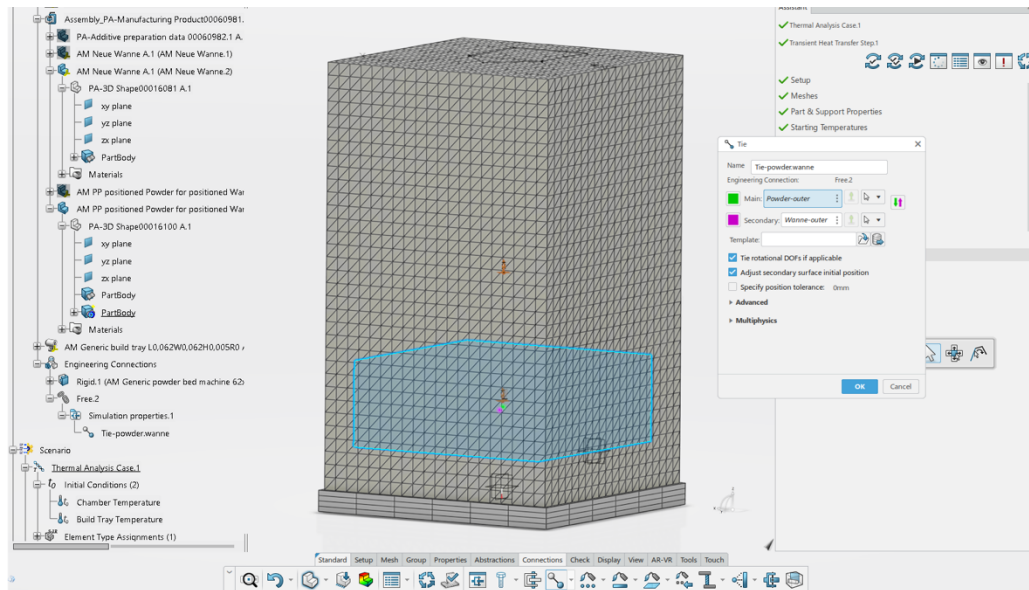


Der Wechsel zur Simulation erfolgt, wie im Beitrag zum K-Tag 2023 beschrieben, einfach durch den Wechsel der 3DEXPERIENCE App.

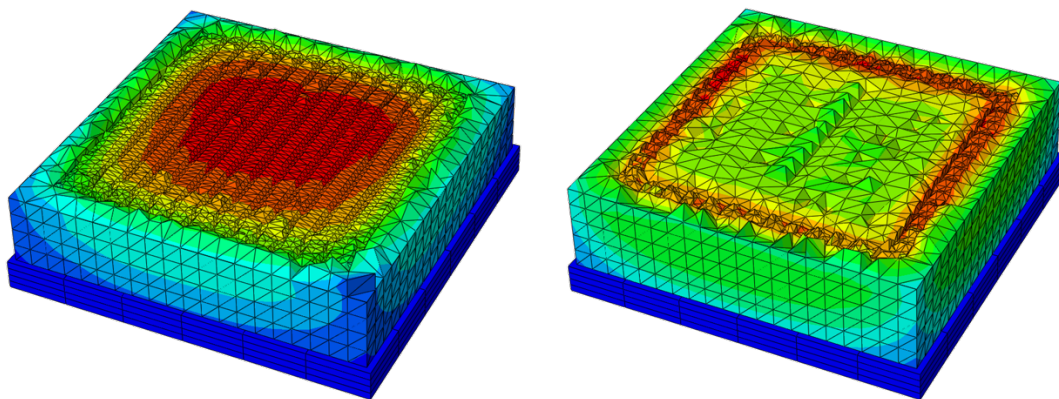
Das Vorgehen für die Simulation basiert im Wesentlichen auf dem Vorgehen aus dem Beitrag vom K-Tag 2023 und folgt der Vorgabe des Assistenten, siehe folgendes Bild. Ein Vorteil der App zur Erstellung der Simulation ist die Unterscheidung in ‚Moving Heat Source‘ und ‚Material Deposition‘. So wird eine Wärmequelle (Heat Source) nur dem Produkt, das Ablegen des Materials (Material Deposition) aber Produkt und Pulver Quader zugewiesen.



Abweichend vom Assistenten muss eine Verbindung zwischen Pulver Quader und Produkt für die Simulation von Temperatur und Strukturmechanik aufgebaut werden. Wie im Bild von 3DSystems gut zu erkennen, entsteht eine feste Verbindung des Pulvers zum Bauteil. Dementsprechend wird eine TIE Verbindung definiert, siehe folgendes Bild.



Anschließend wird die Simulation durchgeführt. Im folgenden Bild ist im linken Teilbild die Temperaturverteilung beim Druck des Bodens und im rechten Teilbild beim Druck einer Bohrungsreihe dargestellt.



## Zusammenfassung

Im Beitrag zum K-Tag 2023 haben wir gezeigt, wie in der 3DEXPERIENCE Plattform der Prozess und die Simulation der Additiven Fertigung am Beispiel des Metallpulver-Druckes definiert werden. Sowohl die Definition des Prozesses als auch der Aufbau der Simulation werden von einem Assistenten geführt, wodurch sich Aufwand und Komplexität der Aufgabe deutlich verringern. Gezeigt wurde die sequentiell thermisch-mechanisch gekoppelte Analyse.

In diesem Beitrag haben wir nun ein Beispiel zum Selective Laser Sintering (SLS) von Kunststoffen erstellt. Da die Berücksichtigung des Pulvers in der Simulation notwendig ist, wurde ein notwendiger Arbeitsablauf definiert. Der Arbeitsablauf ist zur Zeit noch recht aufwendig, sollte aber durch Automatisierung verkürzt werden können.

## Quellen

- [1] Lachmayer, R., Ehlers, T., and Lippert, R. B., 2022, *Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [2] "25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag Am 11.09.2024" [Online]. Available: <https://www.konstrukteurstag.de/>. [Accessed: 19-Sep-2024].
- [3] "Wie Phönix aus der Asche" [Online]. Available: [https://www.trumpf.com/de\\_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion/](https://www.trumpf.com/de_DE/loesungen/anwendungen/additive-fertigung/laser-metal-fusion/). [Accessed: 29-Aug-2023].
- [4] "We Are the 3DEXPERIENCE Company | Dassault Systèmes" [Online]. Available: <https://www.3ds.com/>. [Accessed: 20-Jul-2023].
- [5] "3D Printers, Software, Manufacturing & Digital Healthcare | 3D Systems" [Online]. Available: <https://de.3dsystems.com/>. [Accessed: 19-Sep-2024].





# Modelierung und Simulation – Eine Plattform als kollaborativer Ansatz für Design und Simulation

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag  
11. September 2024

# That 's me



**Peter Straetemans**  
SENIOR CONSULTANT  
SIMULATION

Simulation Department  
TECHNIA DACH

Mail:

[peter.straetemans@technia.com](mailto:peter.straetemans@technia.com)

Mobile: +49 (0)172 72 79 0 77

# Agenda

- Vorstellung TECHNIA
- Modellierung und Simulation

# TECHNIA Simulation



# TECHNIA – PLM Integrator

- Know-how ist der Schlüssel für eine erfolgreiche PLM-Implementierung
  - Implementierung von PLM-Lösungen weltweit in verschiedenen Varianten
  - Software-Know-how für die Weiterentwicklung
  - Serviceteam für die Implementierung
  - Kenntnis der notwendigen Infrastruktur



Software



Services

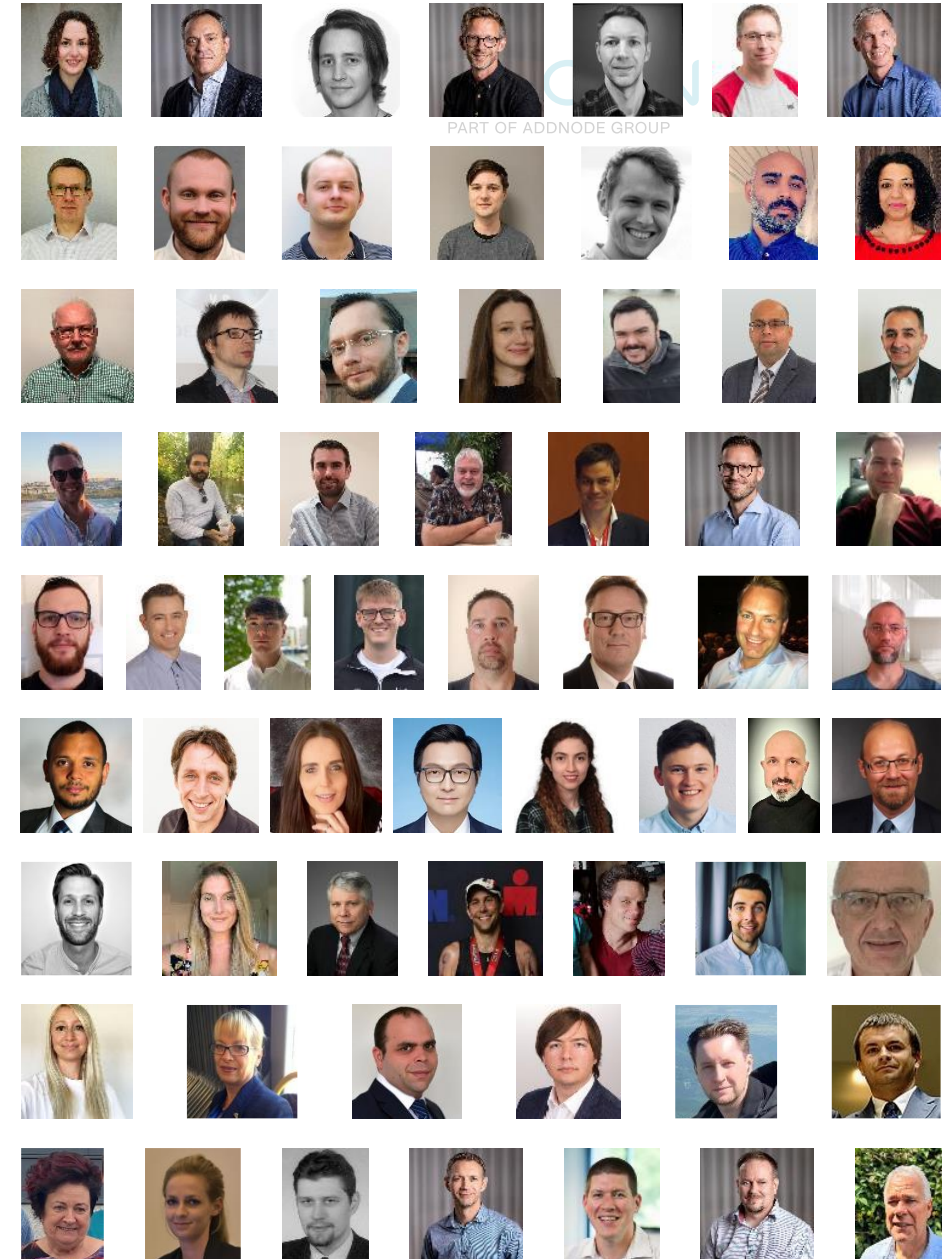


Infrastruktur



# TECHNIA Simulation

- Mehr als 80 Simulationsexperten
- Abdeckung von 17 Ländern
- Langjährige Erfahrung im Bereich Designer- und Advanced-Simulation unter Verwendung des Simulia-Portfolios
- Enge Zusammenarbeit mit anderen Markenexperten innerhalb von TECHNIA, um die 3DExperience-Plattform zu fördern



- UNSERE PLM-PLATTFORM
- UND SCHLÜSSELPARTNER



The **3DEXPERIENCE**® Company

TECHNIA ist stolz darauf, ein Dassault Systèmes Platinum Partner zu sein.

Seit 30 Jahren arbeiten wir als Ausbildungspartner, Wiederverkäufer, Implementierungsexperte und F&E-Partner zusammen und entwickeln ergänzende Add-ons für die 3DEXPERIENCE-Plattform.

Lesen Sie mehr unter [www.3ds.com](http://www.3ds.com)



WE'RE PART OF  
THE #1 PLM ECOSYSTEM

# SIMULIA PORTFOLIO



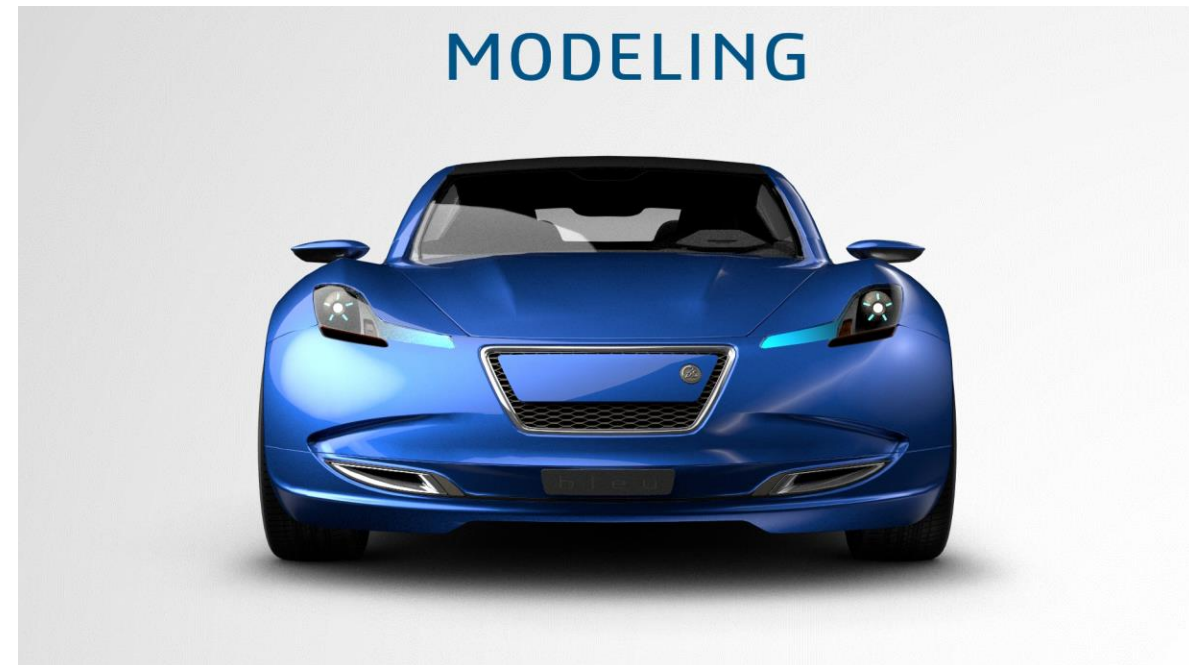


# Modellierung und Simulation

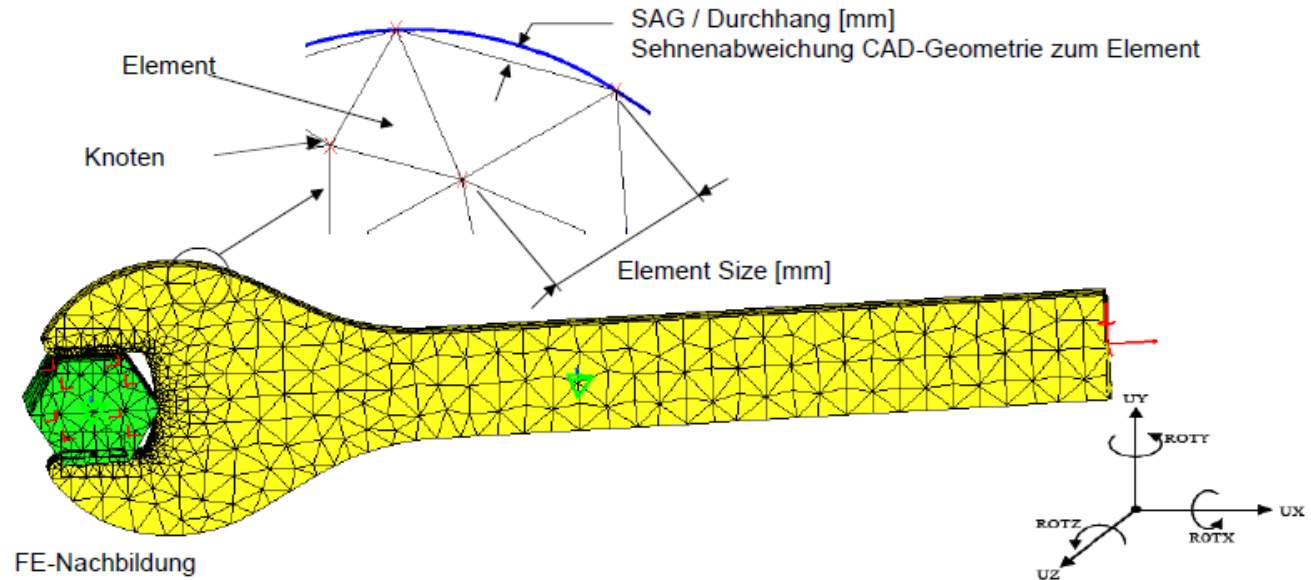
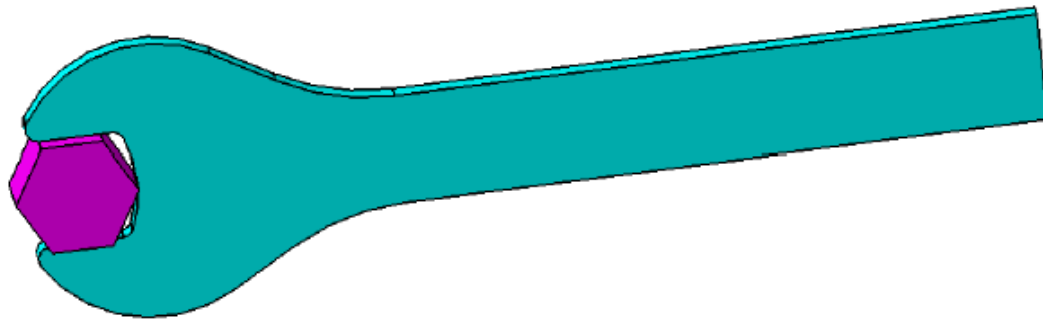
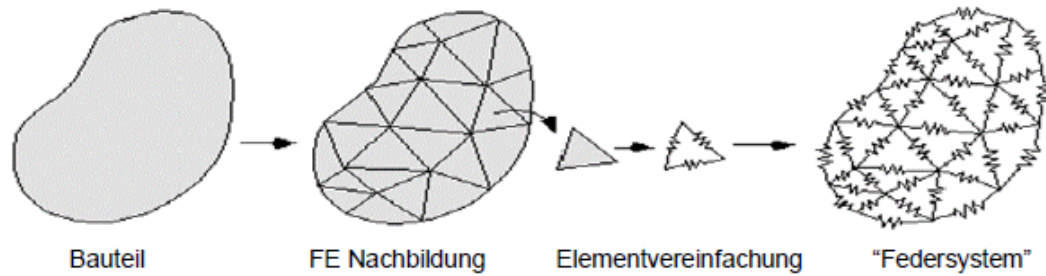
# Konstruktionsnahe Simulation ein Thema verschiedene Begriffe:

- Konstruktionsintegrierte Simulation
- FEM für den Konstrukteur
- CAD-integrierte Berechnung
- ...
- Simulation innerhalb des PLM-Systems
  
- Dassault Systemes:

**MODSIM – Modeling & Simulation**



# Grundlagen für die Methode der Finiten-Elemente

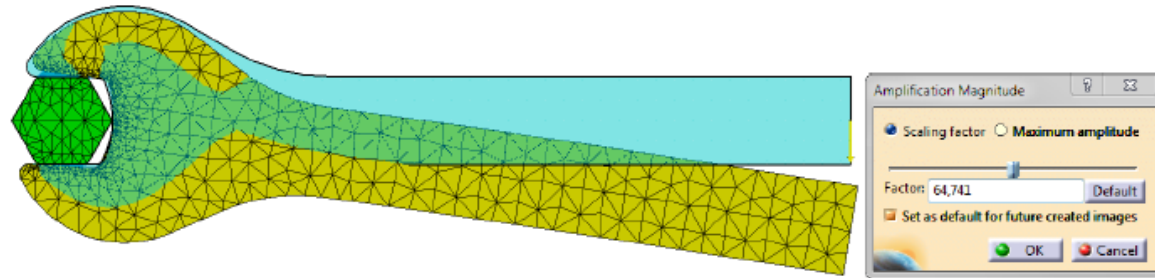


FE-Nachbildung

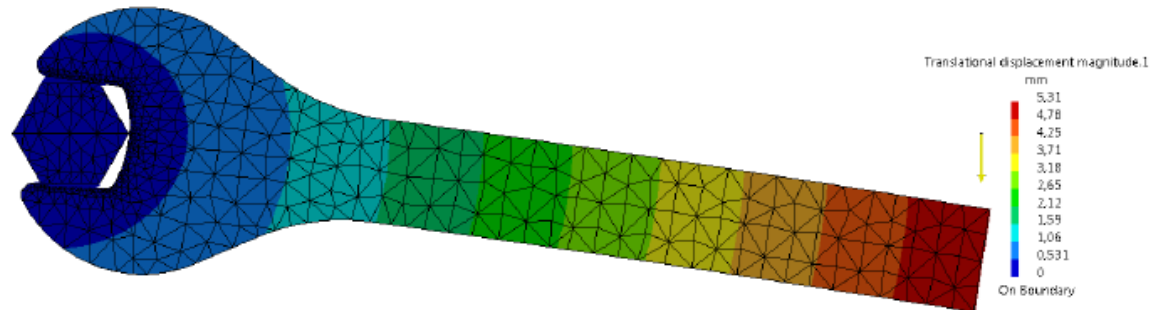
<b>Element</b>	Ein finites Element ist ein diskreter „Teil“ der Geometrie. Alle Elemente zusammen bilden die Geometrie nach → Mesh / Vernetzung.
<b>Knoten</b>	Knoten verbinden die Elemente in der Nachbarschaft. Verschiebungen werden über die Knoten beschrieben (Freiheitsgrade)
<b>Freiheitsgrade (Degree of Freedom DOF)</b>	Beschreibt die möglichen Bewegungsrichtungen der Knoten. Die Bewegung kann translatorisch und rotatorisch sein. Die Anzahl der Freiheitsgrade hängt vom Elementtyp ab. Volumenelemente: 3 translatorische DOF; Schalenelemente 5 DOF; Kinematikelemente 6 DOF

# Mögliche Ziele/Ergebnisse einer FE-Analyse

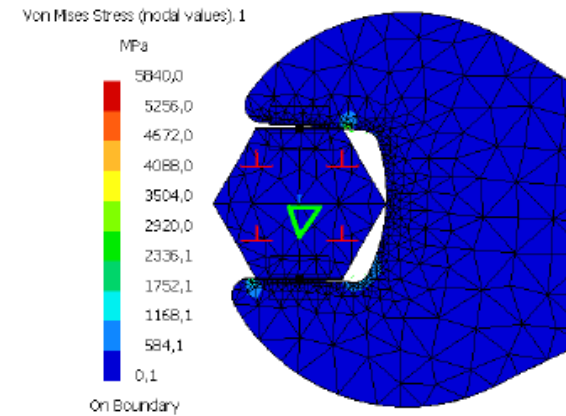
Verformung:



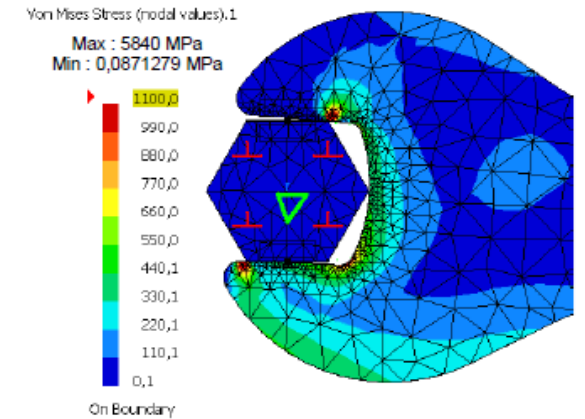
Verschiebung:



Spannungen:

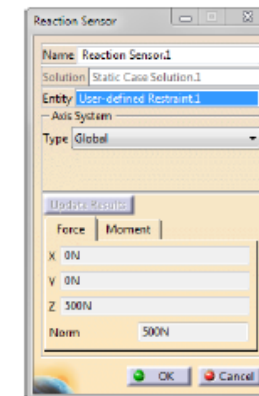


Spannungsdarstellung



Auswertung - Spannungsdarstellung skaliert

Reaktionskräfte:

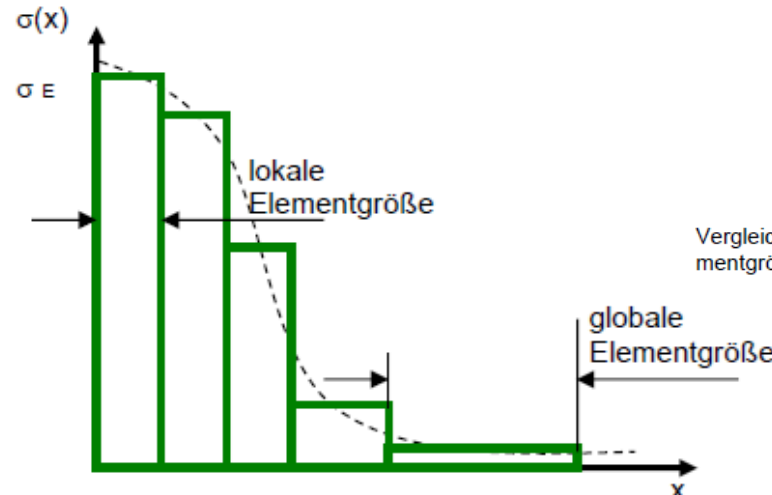
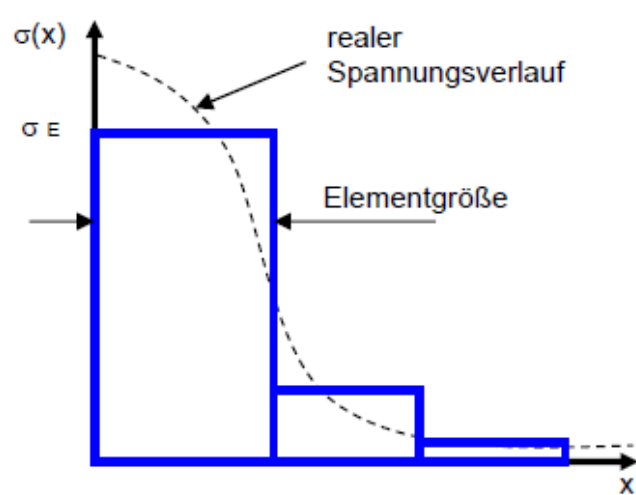




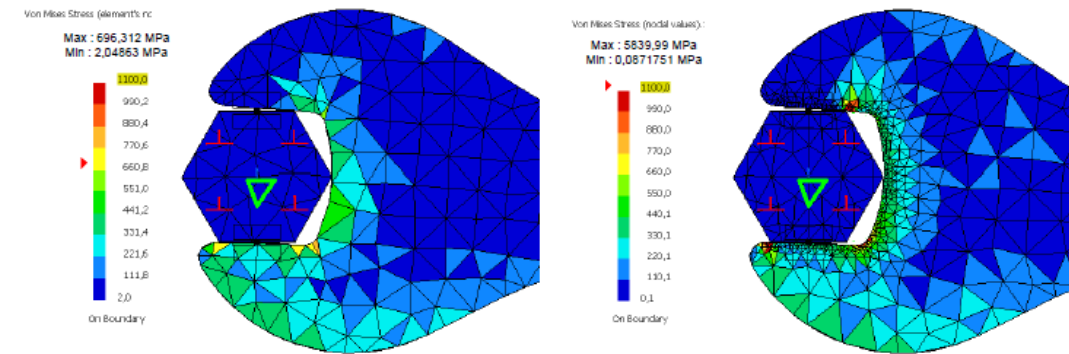
# Bauteil Diskretisierung - Vernetzung

Bei der Diskretisierung kann man die globale und die lokale Vernetzung unterscheiden.

An Stellen, an denen „große“ Spannungsänderungen auftreten (meistens auch die Stellen hoher Spannungen), kann das Netz entsprechend verfeinert (kleinere Elemente) werden. An anderen Stellen mit geringen Spannungsänderungen kann ein grobes Netz (große Elemente) verwendet werden.

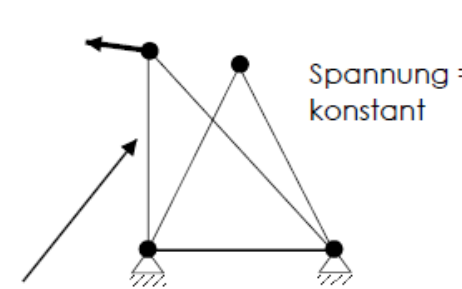
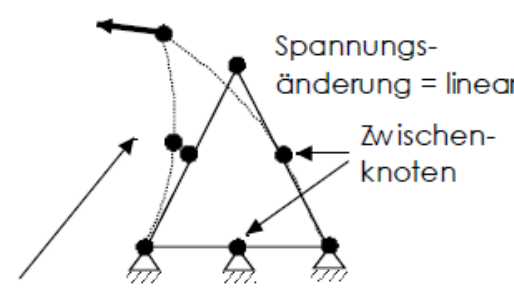
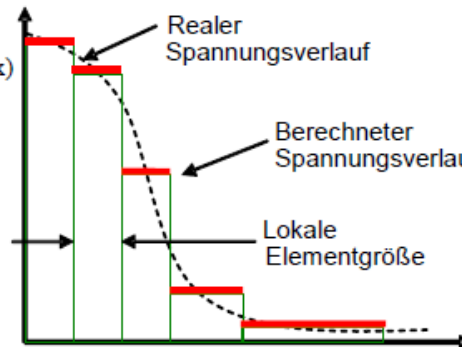
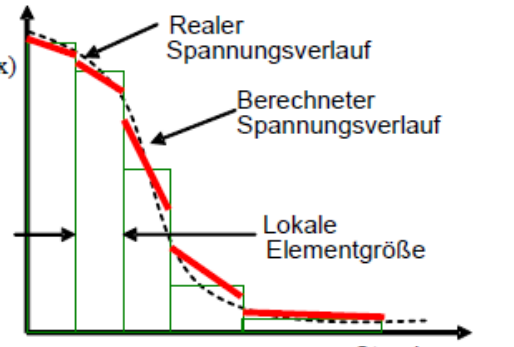


Skizze zur Veranschaulichung der Diskretisierung einer Spannungsfunktion  $\sigma(x)$ . Die Diskretisierung wird von a) bis b) stufenweise erhöht.

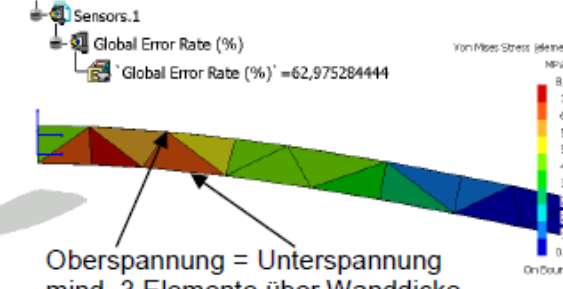


Vergleich der Ergebnisse einer Simulation mit gleichen Randbedingungen aber unterschiedlichen Elementgrößen. Die Farbskala ist bei beiden Abbildungen gleich skaliert.

# Elementordnung – Lineare vs. Parabolische Elemente

Lineare Elemente	Parabolische Elemente
 <p>Spannung : konstant</p> <p>Verformung = linear</p>	 <p>Spannungs- änderung = linear</p> <p>Zwischen- knoten</p> <p>Verformung = parabolisch</p>
 <p><math>\sigma(x)</math></p> <p>Realer Spannungsverlauf</p> <p>Berechneter Spannungsverlauf</p> <p>Lokale Elementgröße</p> <p>Strecke</p>	 <p><math>\sigma(x)</math></p> <p>Realer Spannungsverlauf</p> <p>Berechneter Spannungsverlauf</p> <p>Lokale Elementgröße</p> <p>Strecke</p>

Spannung = *konstant* bedeutet, dass in einem Element nur ein Spannungszustand herrscht. Erst im Nachbarelement ändert sich die Spannung



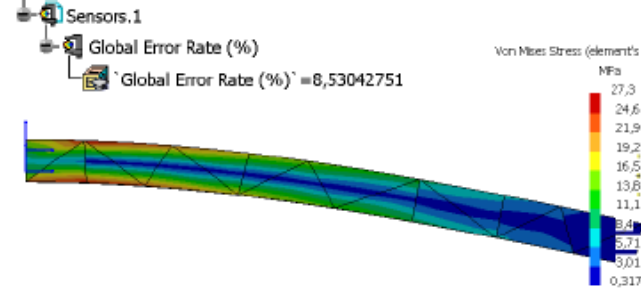
Sensors.1  
Global Error Rate (%)  
Global Error Rate (%) = 62,975284444

Von Mises Stress (element) MPa  
8,1  
7  
6  
5  
4  
3  
2  
1  
0,2  
on Boundary

Oberspannung = Unterspannung mind. 3 Elemente über Wanddicke

Achtung: keine Spannungsaussage mit linearen Elementen

Spannung = *linear* bedeutet, dass sich die Spannung in einem Element linear verändert.



Sensors.1  
Global Error Rate (%)  
Global Error Rate (%) = 8,53042751

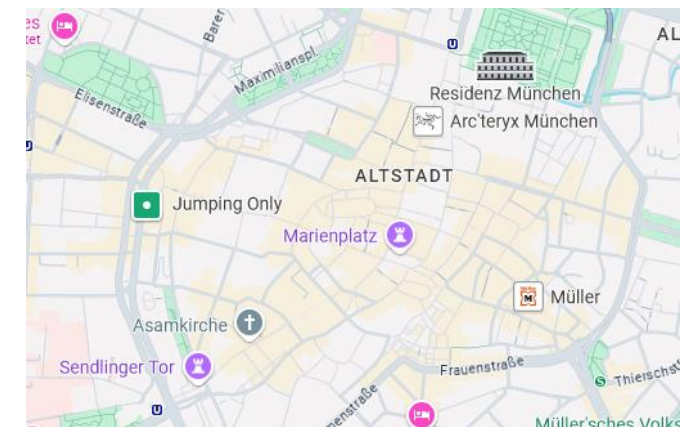
Von Mises Stress (element's n) MPa  
27,3  
24,6  
21,9  
19,2  
16,5  
13,8  
11,1  
8,4  
5,7  
3,0  
0,317  
on Boundary

Spannungsaussage nur mit parabolischen Elementen

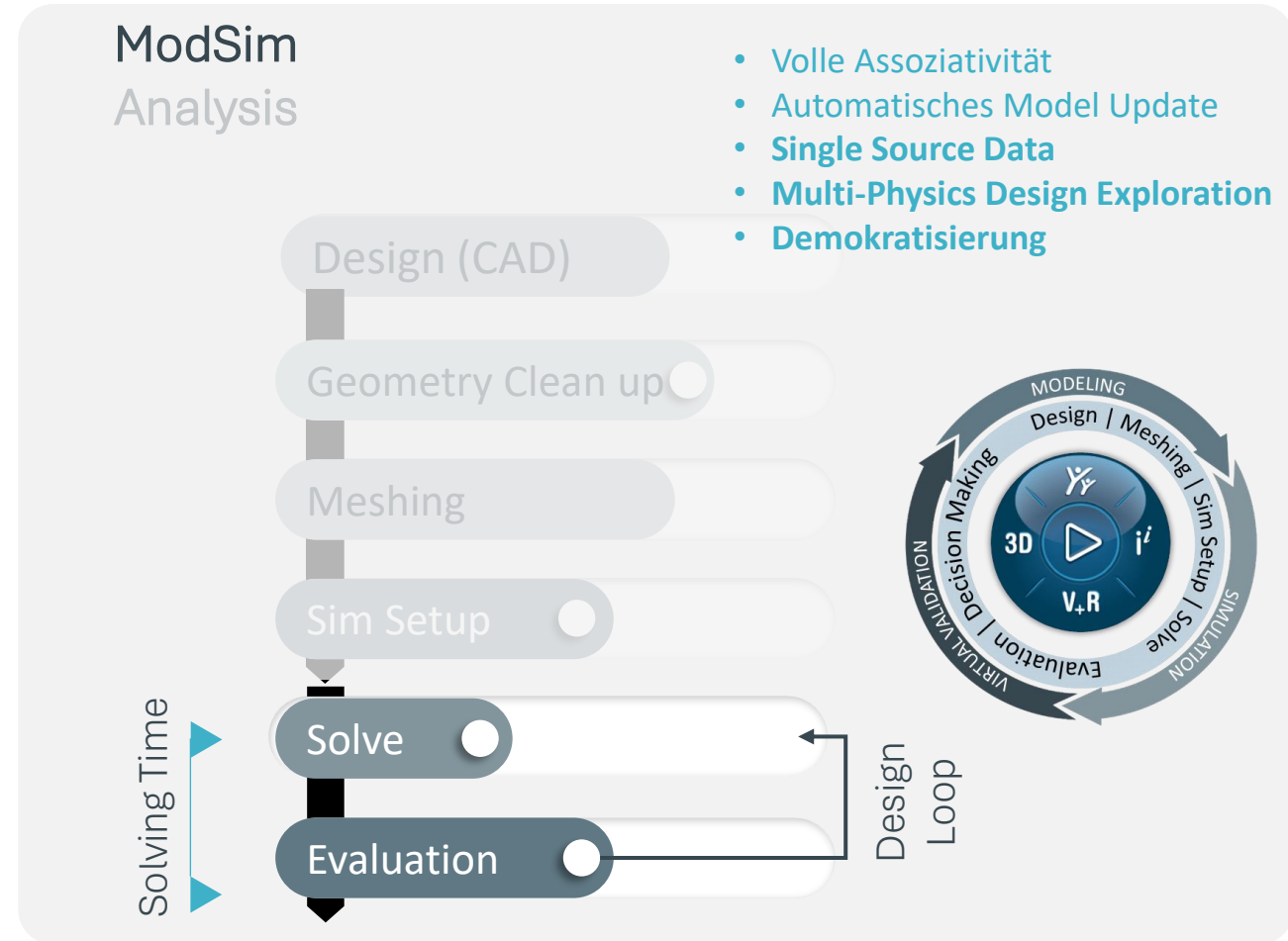
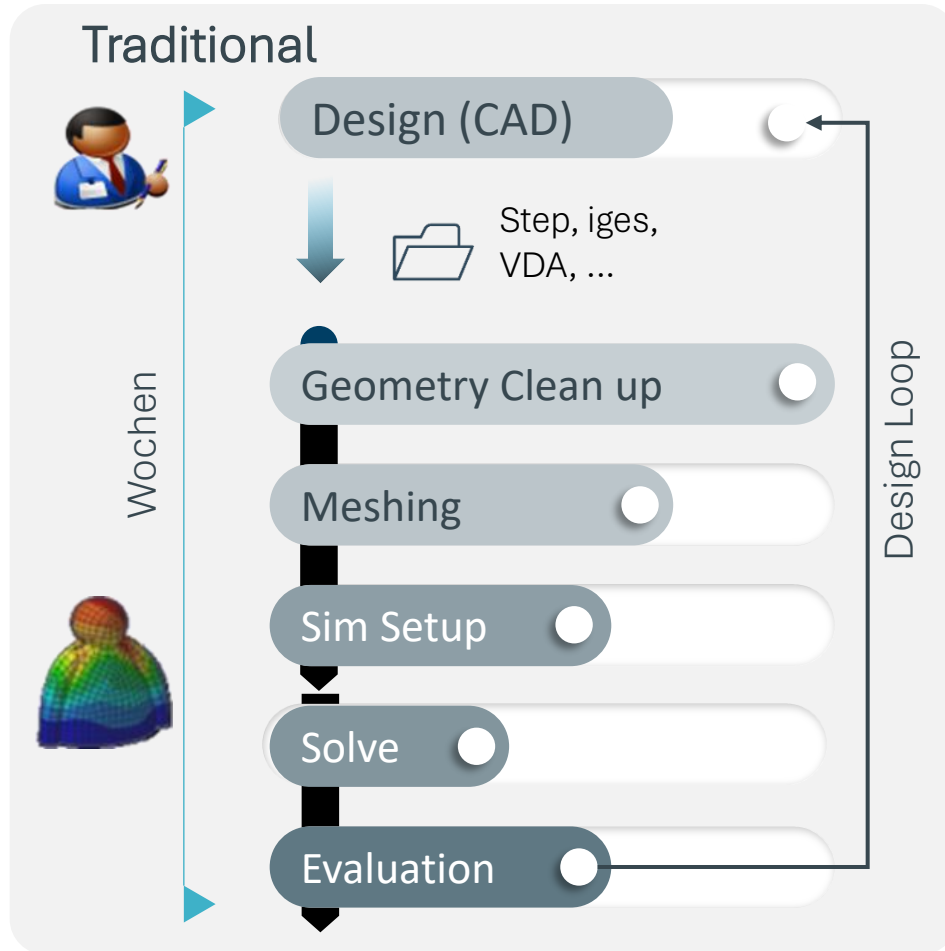


# Strategie und Vorgehensweise

- Schritt 1: Prüfung der Randbedingungen
  - Elemente erster Ordnung (lineare Elemente)
  - Schnelle Rückmeldung
  - Reine qualitative Ergebnisbetrachtung
- Schritt 2: Varianten- oder Verformungsanalyse
  - Elemente zweiter Ordnung (parabolische Elemente)
  - Quantitative Verformungsanalyse
  - Qualitative Spannungsbetrachtung
- Schritt 3: lokale Spannungsanalyse
  - Lokale Netzanpassung in Bereichen der Spannungsbetrachtung



# Übergang von der traditionellen FEM Prozess zu MODSIM





# Consistent User Experience - Simulationsziele Konstrukteur und CAE Experte

Plattform integrierte Simulationslösungen



Lineare FEM

Nichtlinear FEM

Nichtlineare Multiphysik Simulation

Häufigkeit der Simulation

5 – 10%

10 – 25%

90 - 100%

Variantenuntersuchung

“schnelle” und leicht verständliche Ergebnisse

Ziel: Schnelle Vorhersage zu den Bauteileigenschaften

Berücksichtigung von mehr Randbedingungen, daher höhere Realitätsnähe

Nichtlineare Analyse, Plastizität, Kontakt, Reibung, große Verformungen,..

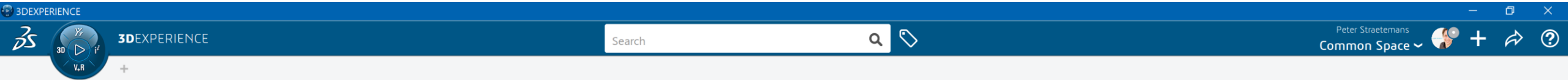
Thermische Analyse

Absicherung der Bauteileigenschaften

Kombination von physikalischen Bereichen, daher maximale Realitätsnähe

Ziel: Möglichst exakte Vorhersage der Bauteileigenschaften

# Vorteile für die Plattform Integrierte Simulation



Collaborative Modeling

Einheitliche Solver

Single Source of Truth

Modeling Intelligence

CAD-CAE Assoziativität

Engineering Templates

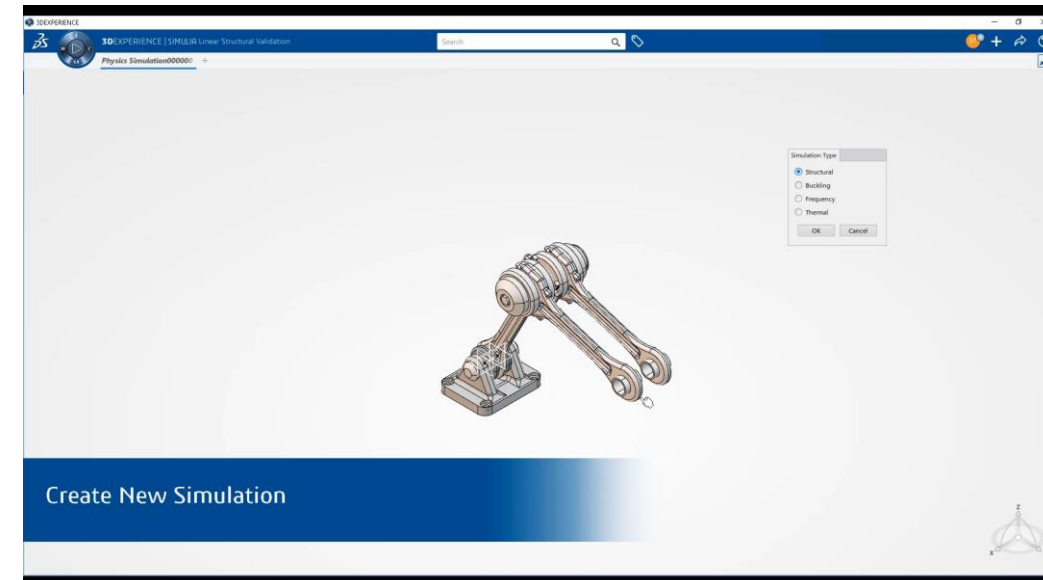
Prozess Management



Consistent User Experience

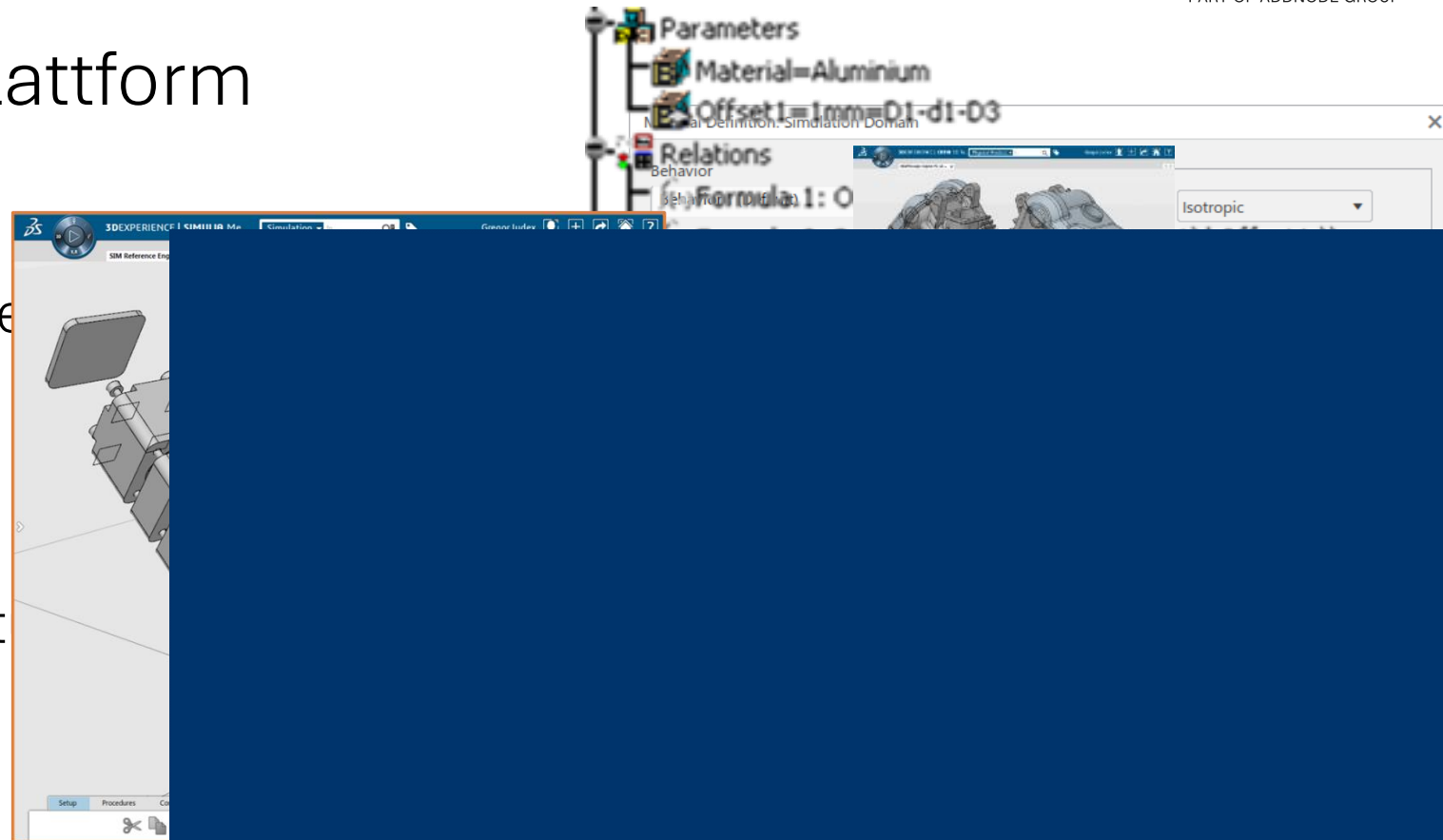
# ModSim in der Plattform

- Konstruktion und Simulation in einer Plattform
  - keine Schnittstellenproblematik
  - gewohnte Anwendungsumgebung
- Einfache Handhabung
  - Durchgängige Arbeitsumgebung
  - Angeleitete Arbeitsabläufe durch Menu Assistenten
- Assoziativ und generativ
  - Fokus liegt auf der Geometrie, die Analyse wird mit den Änderungen aktualisiert
  - leicht zu verstehen, ob die Designänderungen eine Verbesserung bewirkt



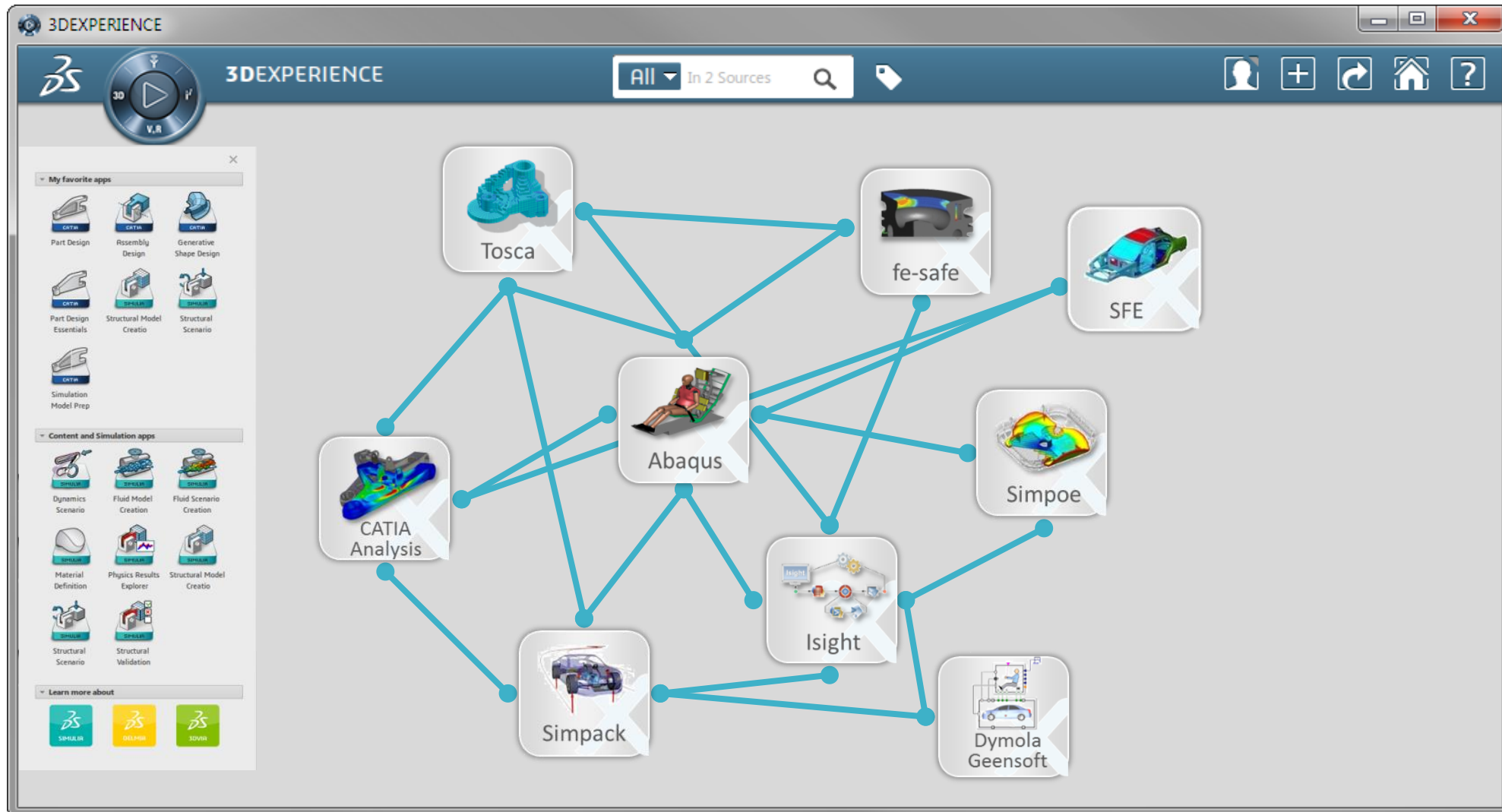
# ModSim in der Plattform

- Material Eigenschaften
- Knowledgeware
- Analysis Templates
- Parametric Design St



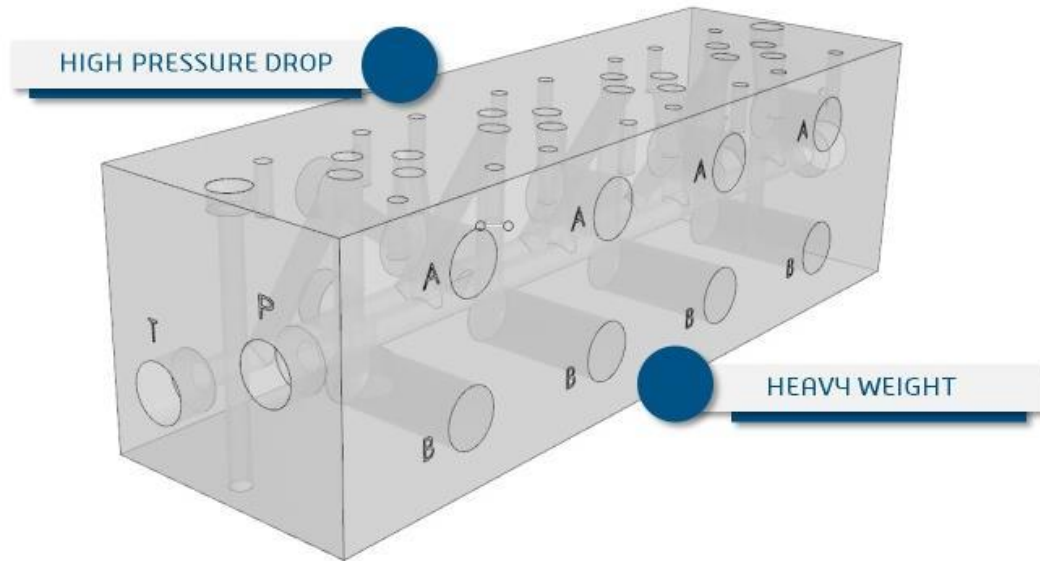


# Einheitliche Solver

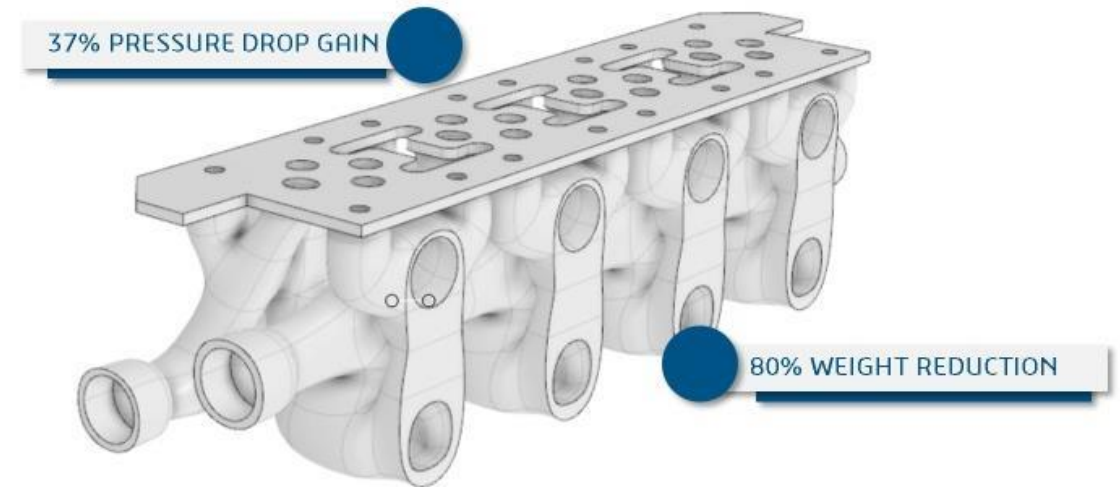


# Beispiel Topologieoptimierung Hydraulikverteiler

## Ursprüngliches Design



## Performance Driven Part Design



**Initial Mass: 8.3KG**

**Final Mass: 1.7KG**

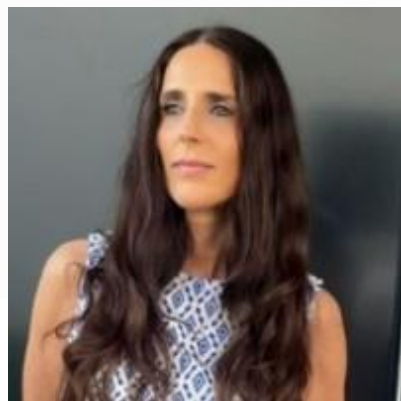
# Beispiel Topologieoptimierung Hydraulikverteiler

## Hydraulic Block Manifold Multi-Domain Generative Design

Fluid Generative Design ①  
Minimize Pressure Drop

Structure Generative Design ②  
Lightweight Design

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!  
Besuchen Sie uns auf unser Stand.



- +49 721 97043 16
- [simulation@technia.de](mailto:simulation@technia.de)



# Automatisierung in der Produktentwicklung mit Python

Andreas Kormann, M.Sc.

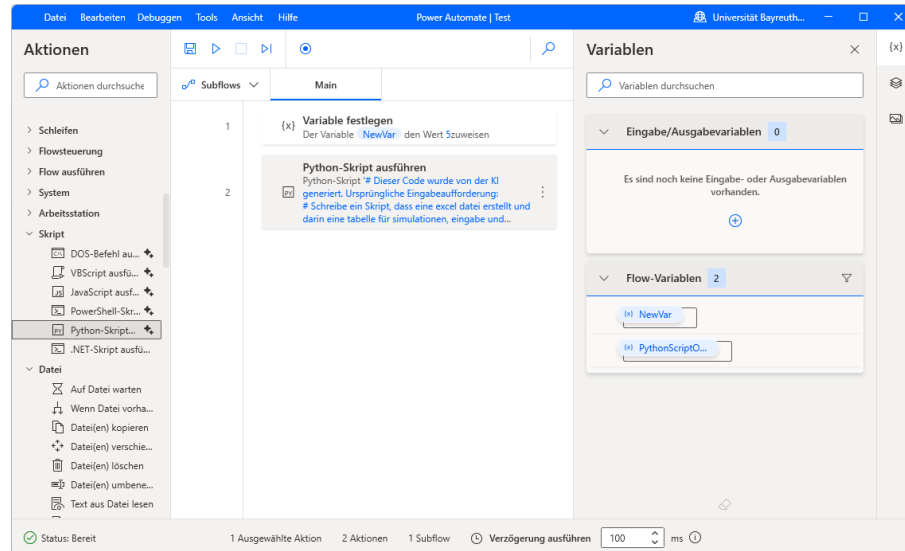
25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag  
Bayreuth, 11. September 2024



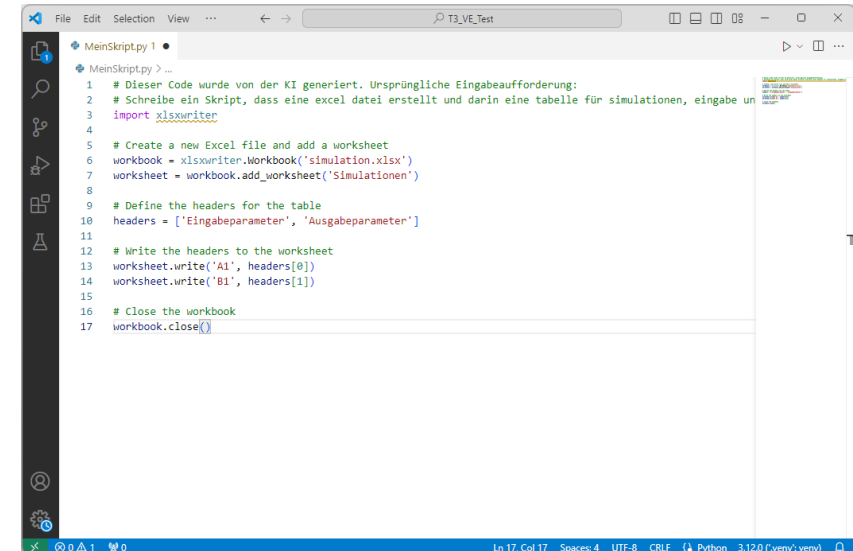
# Automatisierung in der Produktentwicklung

## Wie lassen sich Aufgaben automatisieren?

### Nutzung geeigneter Automatisierungstools



### Erstellung von Skripten



## Was ist Python?

### Python...

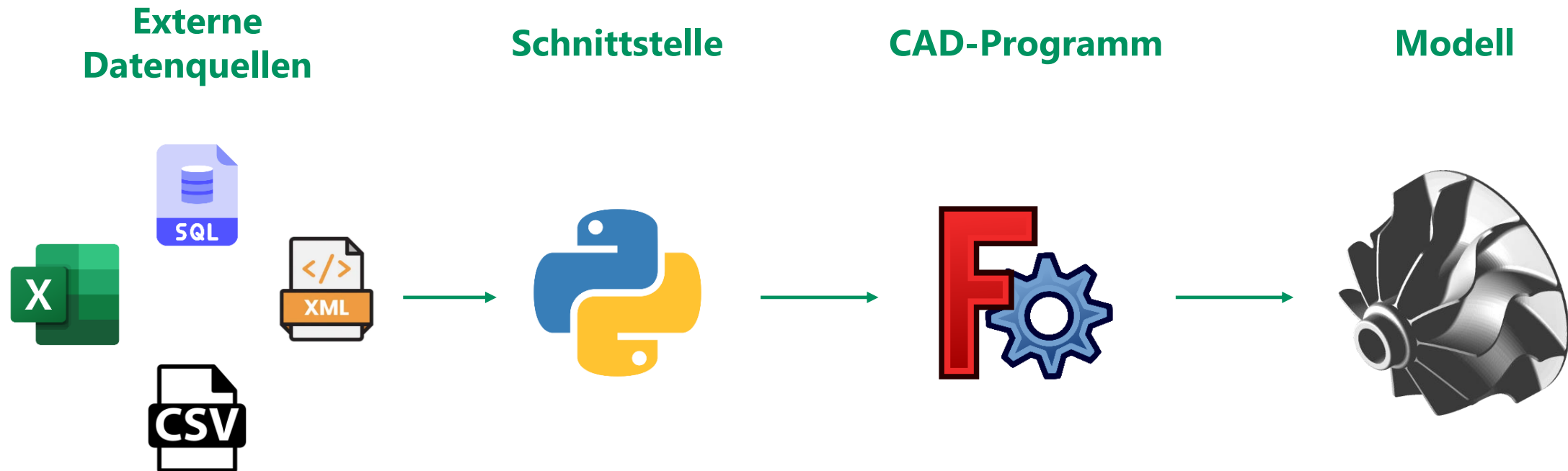
- ist eine interpretierte Programmiersprache.
- ist eine der am häufigsten verwendeten Programmiersprachen.
- besitzt eine einfache und lesbare Syntax, die das Erlernen von Python einfacher macht.
- hat eine große und aktive Community, die zahlreiche Bibliotheken und Frameworks bereitstellt.



# Automatisierte Modellgenerierung

Was versteht man unter der automatisierten Modellgenerierung?

Erstellen eines (Simulations-)Modells nicht (rein) manuell sondern vielmehr auf Basis externer Datenquellen mittels Schnittstellen und Algorithmen.



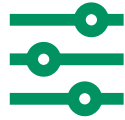
G. Mayer et al. (Hg.), *Ablaufsimulation in der Automobilindustrie*, 2020



Zeit- und  
Arbeitsersparnis



Erhöhung der  
Flexibilität und  
Anpassungsfähigkeit



Import und Export von  
Daten verschiedener  
Formate



Reduzierung von  
menschlichen Fehlern



Mehr Zeit für kreative  
und innovative  
Aufgaben



Erstellen komplexer  
Geometrien, Muster  
oder parametrischer  
Entwürfe

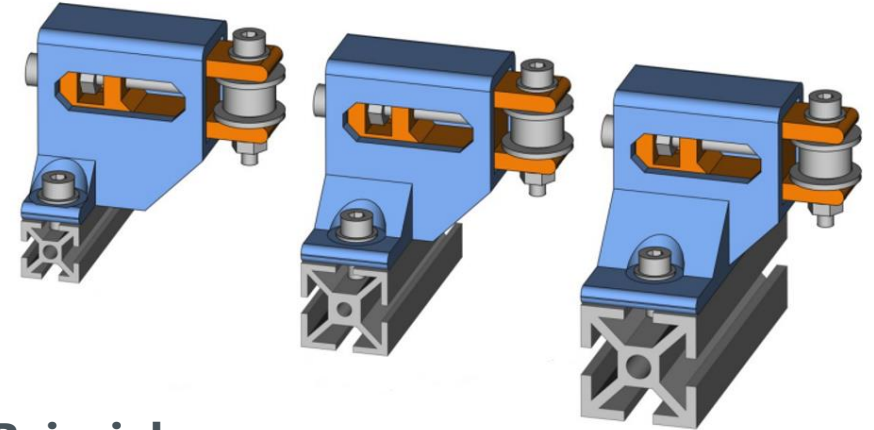


Modell-  
standardisierung und  
Wiederholbarkeit



### Was ist CAD-Scripting?

Nutzen einer Programmiersprache (z. B. Python) in Kombination mit einem CAD-Programm (z. B. FreeCAD).



### Beispiel:

Automatisierte Anpassung von Bauteilen an veränderte Gegebenheiten, wie andere Anbaumaße

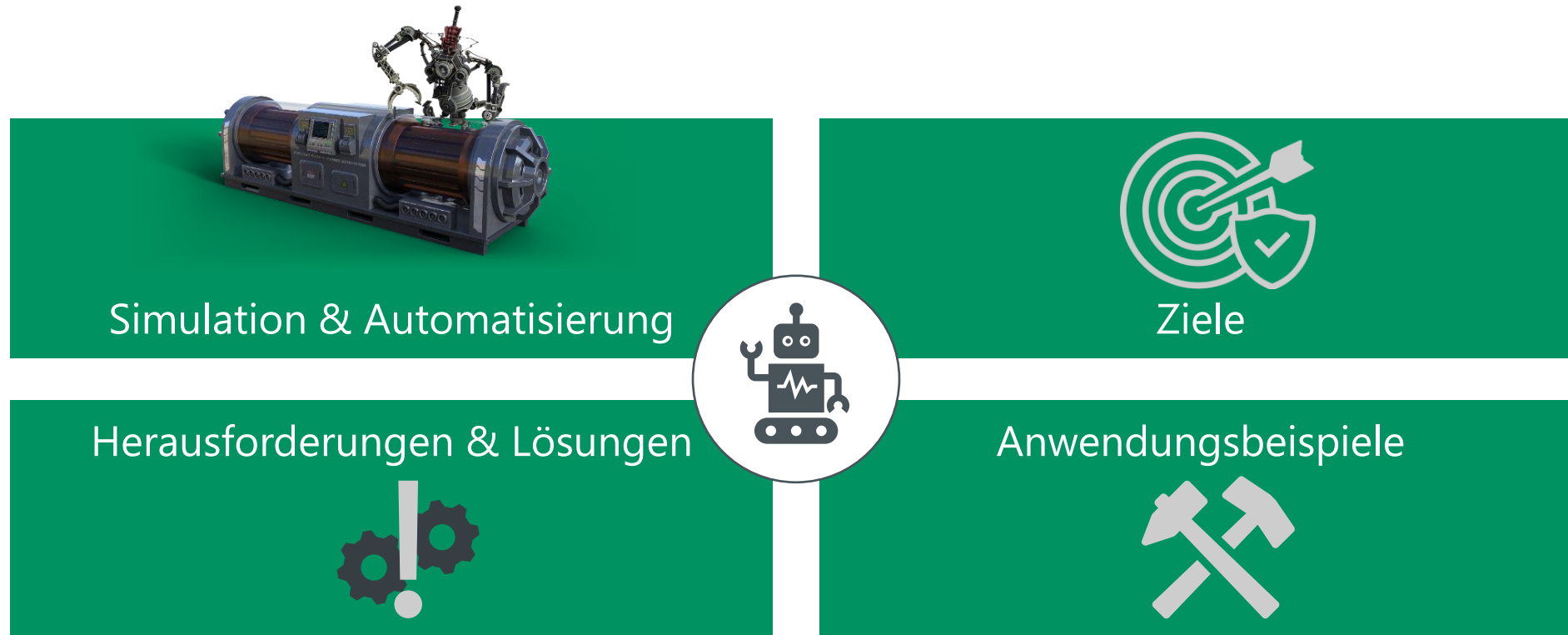
**Wegfall einfacher aber lästiger manueller Anpassungen**

<https://www.linkedin.com/advice/0/how-can-you-use-scripting-languages-tools>  
F. Machado et al., *Parametric CAD modeling for open source scientific hardware*, 2019



# Automatisierung im Bereich Simulation

## Überblick



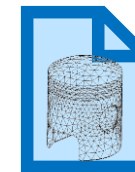
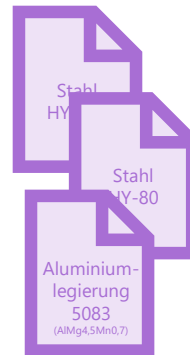
### Sinnvolle Anwendungsfälle sind z.B. ...

- betrachtete Komponenten tauschen
- verwendete Materialien tauschen
- Randbedingungen ändern

Materialparameter1.txt

Materialparameter2.txt

Materialparameter3.txt



Simulations-Eingabedatei.inp

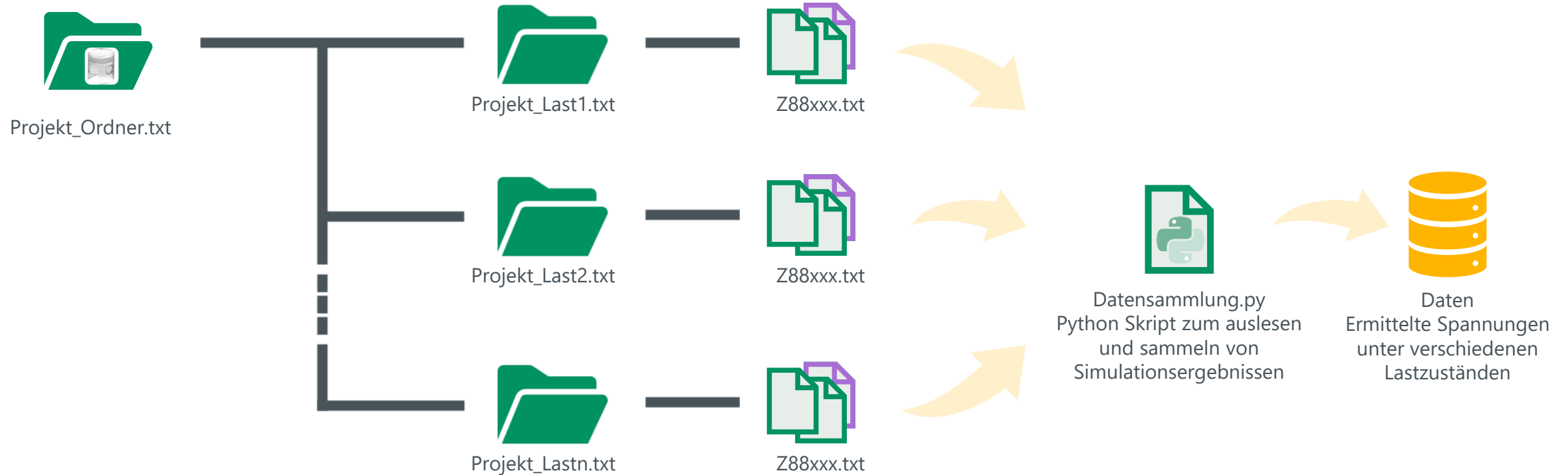
EingabedateiErstellen.py  
Python Skript zur Editierung  
von FEM-Eingabedateien





# Automatisierung im Bereich Simulation

## Variantenanalysen auswerten



# Automatisierung im Bereich Simulation

## Ergebnisvisualisierung



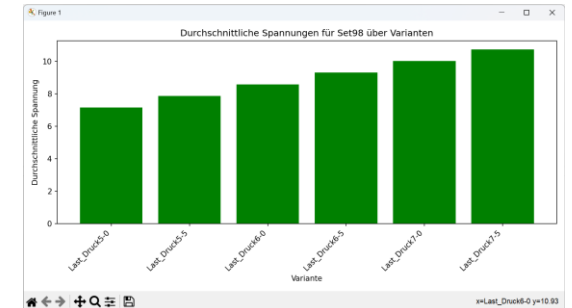
Daten

Ermittelte Spannungen  
unter verschiedenen  
Lastzuständen



Auswertung.py

Python Skript zur Auswertung  
und Visualisierung von  
Simulationsergebnissen



Darstellung



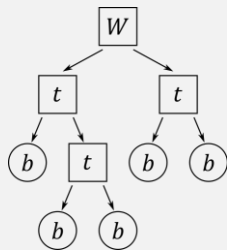
### Der Ablauf von Python-Programmen und -Skripten kann enthalten ...

#### Regelbasierte Programmierung

Vordefinierte Entscheidungslogik durch Programmcode

##### Beispiel:

Entscheidungsbäume, einfache Skripte

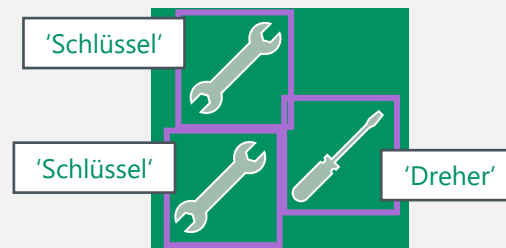


#### Machine Learning

Datenbasierte Mustererkennung und Klassifikation

##### Beispiel:

Klassifikationsmodelle, Regression

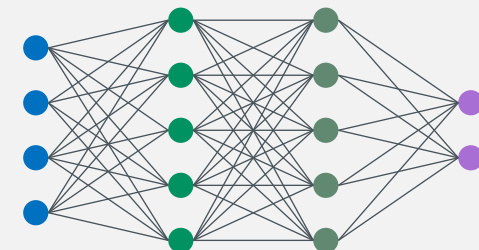


#### Künstliche Intelligenz (KI)

Verstehen und Verarbeiten natürlicher Sprache

##### Beispiel:

Sprachmodelle (LLMs)










# Nutzung von LLM's

## Erweiterung der Fähigkeiten von LLM's

### LLM

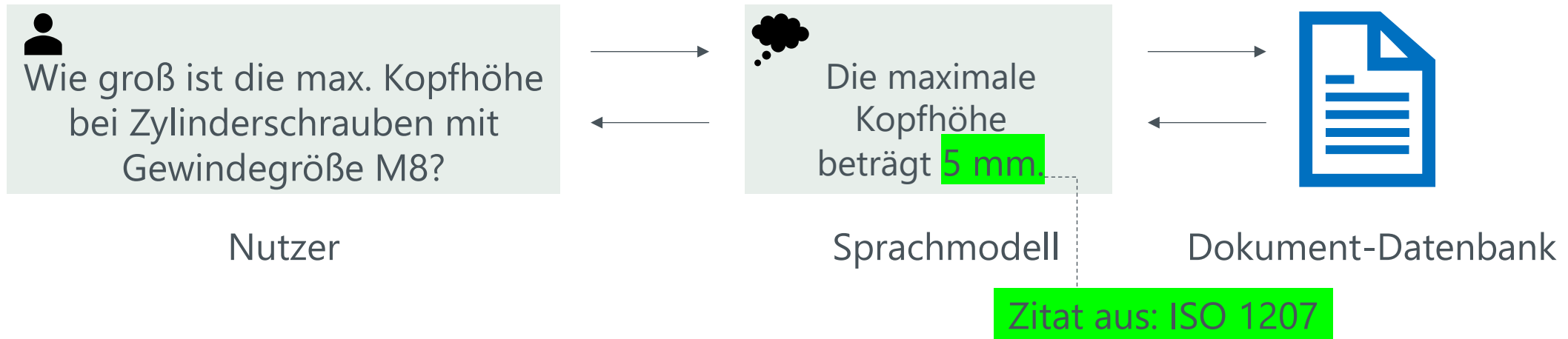
 Textgenerierung

### LMM oder LLM + Erweiterung

-  Textgenerierung
-  Bild-Text zu Text
-  Text zu Bild
-  Dokumentzusammenfassung
-  Funktionsaufrufe (Tools)
-  Websuche
-  Multimodal







### Autonomer KI-Agent in der Produktentwicklung

#### 1 Zielvorgabe

„Erarbeite ein Konzept für ein neues Smartphone“

#### 2 Denken und überlegen

- Analyse der Kundenbewertungen zu Smartphones im Internet
- Analyse der Markttrends
- Unternehmensinterne Analyse der vorhandenen Daten und des Know-Hows, welches im Unternehmen vorhanden ist.

#### 3 Planen

Der KI-Agent benötigt Zugriff auf Kundenbewertungen, Markttrend-Datenbanken und internes Know-how. Er plant den Prozess mit den richtigen Daten und Berechtigungen.

#### 4 Prüfen

Der KI-Agent hinterfragt seine Ideen und korrigiert bei Bedarf vorherige Schritte, um die Genauigkeit zu erhöhen.

#### 5 Ausführen

Der KI-Agent setzt den erstellten Plan um.

#### 6 Beenden und Evaluieren

Nach Abschluss prüft der KI-Agent, ob das Ziel erreicht wurde, und nimmt bei Bedarf Anpassungen vor.

<https://ambersearch.de/de/ki-agent/>



# FITfor4.0



# Organisation und Ablauf des Projektes FITfor4.0

## Durchläufe



- Angebot der Schulung insgesamt fünf mal.
- Gleichbleibende Themengebiete in allen Durchläufen.
- Inhalte jeweils auf die Interessen der Teilnehmer abstimmbaar.
- Abhaltung von zehn Schulungseinheiten je Durchlauf.





# Organisation und Ablauf des Projektes FITfor4.0

## Themengebiete

T1	
T2	Grundkurs Python
T3	
T4	Automatisierte Modellgenerierung
T5	Grundlagen der IT-Sicherheit
T6	
T7	Automatisierung im Bereich Simulation
T8	
T9	KI Methoden in der Produktentwicklung
T10	Datenmanagement

	November			Dezember			Januar		
KW44	1. Fr	Allerheiligen		1. So			1. Mi	Neujahr	
	2. Sa			2. Mo			2. Do		
	3. So			3. Di			3. Fr		
KW45	4. Mo			4. Mi	Termin 5		4. Sa		
	5. Di			5. Do			5. So		
	6. Mi	Termin 1		6. Fr			6. Mo	Heilig Drei Könige	
KW46	7. Do			7. Sa			7. Di		
	8. Fr			8. So			8. Mi	Termin 8	
	9. Sa			9. Mo			9. Do		
KW47	10. So			10. Di			10. Fr		
	11. Mo			11. Mi	Termin 6		11. Sa		
	12. Di			12. Do			12. So		
KW48	13. Mi	Termin 2		13. Fr			13. Mo		
	14. Do			14. Sa			14. Di		
	15. Fr			15. So			15. Mi	Termin 9	
KW49	16. Sa			16. Mo			16. Do		
	17. So			17. Di			17. Fr		
	18. Mo			18. Mi	Termin 7		18. Sa		
KW50	19. Di			19. Do			19. So		
	20. Mi	Termin 3		20. Fr			20. Mo		
	21. Do			21. Sa			21. Di		
KW51	22. Fr			22. So			22. Mi	Termin 10	
	23. Sa			23. Mo			23. Do		
	24. So			24. Di	Heiliger Abend		24. Fr		
KW52	25. Mo			25. Mi	1. Weihnachtstag		25. Sa		
	26. Di			26. Do	2. Weihnachtstag		26. So		
	27. Mi	Termin 4		27. Fr			27. Mo		
KW53	28. Do			28. Sa			28. Di		
	29. Fr			29. So			29. Mi		
	30. Sa			30. Mo			30. Do		
				31. Di	Silvester		31. Fr		

	Durchlauf
	Präsenztermin
	Digitaler Termin





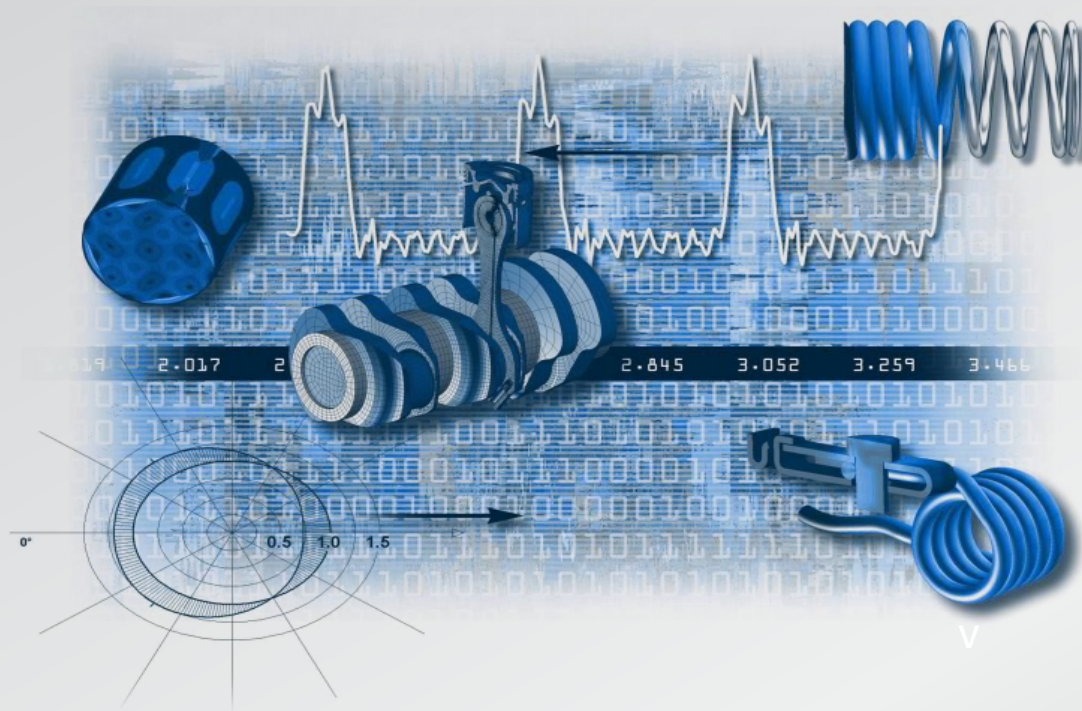
## Andreas Kormann M.Sc.

[Andreas.Kormann@uni-bayreuth.de](mailto:Andreas.Kormann@uni-bayreuth.de)

Tel.: 0921 / 55-7196







# 25 JAHRE SIMULATION IM FEDERUMFELD VON DER LINEAREN STATIK BIS ZUR KI - BASIERTEN FERTIGUNGSSIMULATION

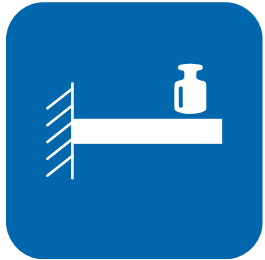
*25. BAYREUTHER KONSTRUKTEURSTAG*

11.09.2024

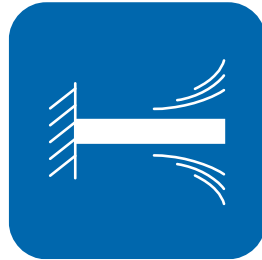


# AGENDA

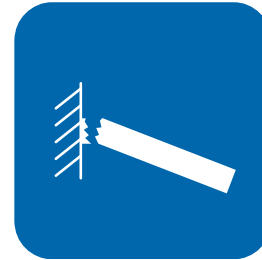
- *SCHERDEL siment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*



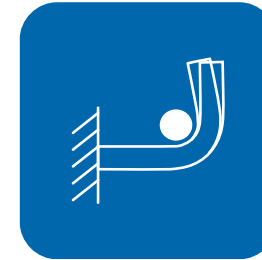
Statik



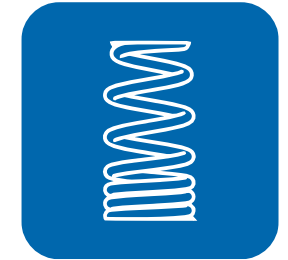
Dynamik



Betriebsfestigkeit



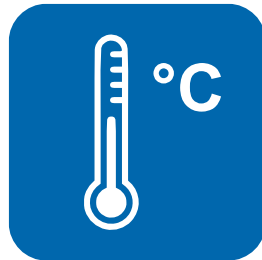
Umformen



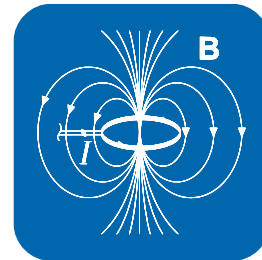
Federn



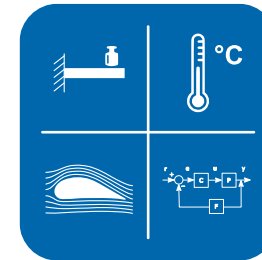
Strömungsmechanik



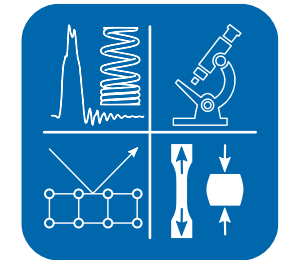
Temperaturfelder



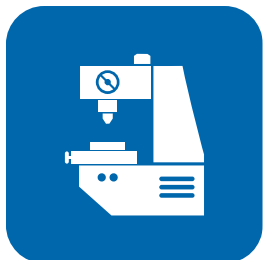
Elektro-Magnetik



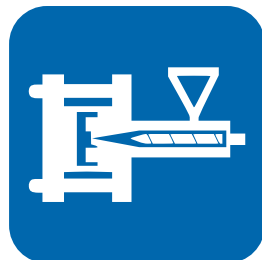
Multi-Physik



Versuche



Maschinenbau



Spritzguss



Crash



Optimierung



Software & KI

## 10 Berechnungsingenieure

- 2 Werkstoffwissenschaftler
- 6 Maschinenbauer
- 2 Physiker

## 3 studentische Arbeitsplätze

- Mathematiker
- Werkstoffwissenschaftler
- Maschinenbauer

> 60 studentische Arbeiten seit 1998

## Software



Statik – lin. Dynamik – transiente Dynamik – Betriebsfestigkeit – Kriechen

2000

2005

2010

2015

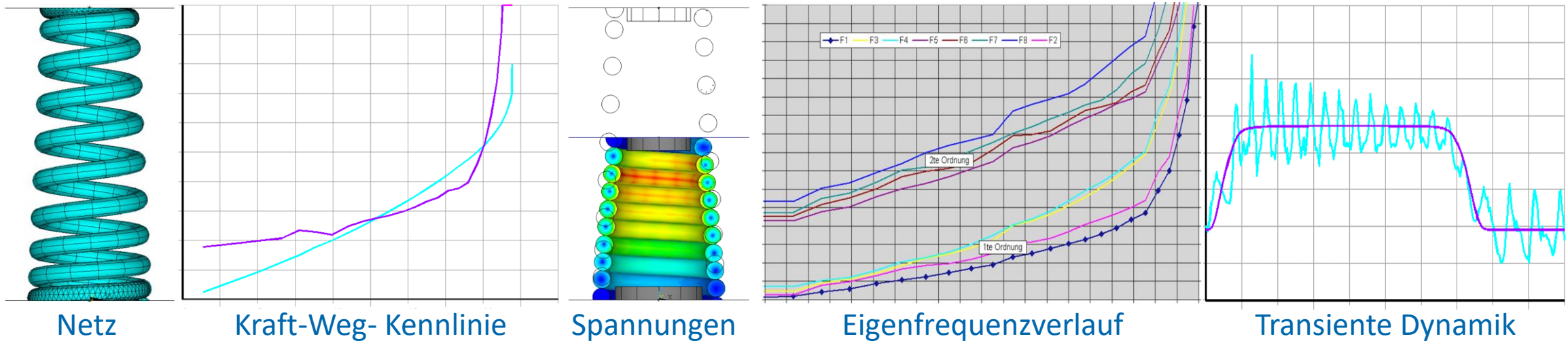
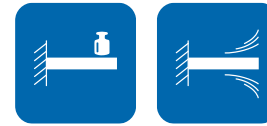
2020

2025

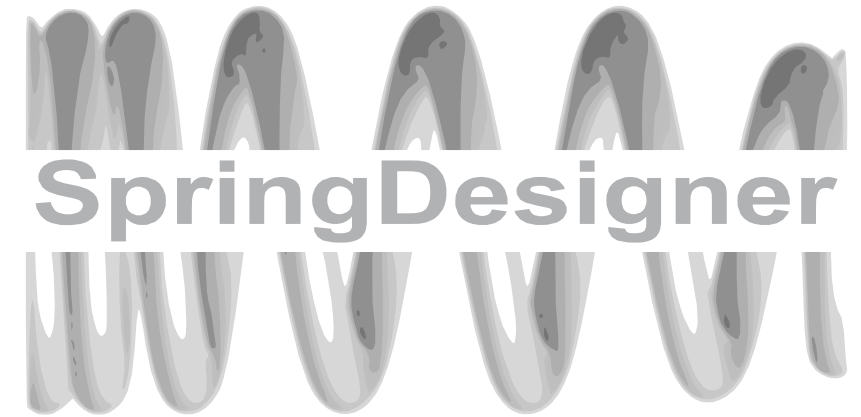
# AGENDA

- *SCHERDEL s:ment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*





- Aufwendige Modellierung
- Schwierige Enden-Vernetzung
- Lange Rechenzeiten
- Konvergenzprobleme
- Transiente Dynamik erfordert
  - Dämpfung über Coulomb'sche Reibung
  - angepasste Reibmodelle





# AGENDA

- *SCHERDEL s:iment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*

### EIGENSCHAFTEN

- 1 D Berechnung
- Beliebige Querschnitte
- Beliebige Federformen
- Beliebiger Steigungsaufbau
- Variable Enden Modellierung

### ERGEBNISSE

- Verschiebungen
- Axiale Kräfte
- Spannungen (Querschnitt; Windungen)
- Eigenfrequenzen
- Animationen

### INTERFACES

- CAD in allen Positionen
- Hexaeder-Vernetzer bis in die Federenden

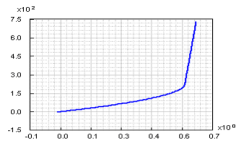
The screenshot displays the SpringDesigner software interface for a spring design project. The main window shows a 3D model of a spring with a blue and green stress distribution. The left sidebar contains various settings:

- Modulauswahl:** Federparameter (selected), Sprung, Begrenzung, Federform, Gleitend, Dynamik, Vorauslegung, Federenden, Zeichnung, Freies Design.
- Federparameter:** Freie Länge - Windungen: L0 = 50.6, Nges = 9.25.
- Material:** VD SiCr DIN 17 223, E-Modul = 200000, G-Modul = 79500, nue = 0.2578, Rm = 1910, Auslastungsfaktor = 0.5, rho = 7.85.
- Profil:** Drehung = 0, Centerfess = 0, Ellipse (1.11M1064-1000), Breite = 3.7, Höhe = 3.
- Torsionskonstanten:** It [mm<sup>4</sup>] = 11.83, Wt [mm<sup>3</sup>] = 6.566.

The right side of the interface shows a 3D model of the spring with a stress distribution. Below the model, there are two graphs: 'Kraft [N]' (Force) and 'Rate [N/mm]' (Rate). The Force graph shows a peak of 445.3 N. The Rate graph shows a peak of 90.0 N/mm. The graphs are labeled 'Bienenkorb\_L1.stp' and 'Bienenkorb\_L2.stp'. The bottom right corner shows a cross-section of the spring with a stress distribution and a 3D model of the spring with a stress distribution.

### EIGENSCHAFTEN:

- 1D-Mehrmassenschwinger
- X Massen pro Windung
- Nichtlineare Steifigkeits- und Dämpfungs-Kennlinien

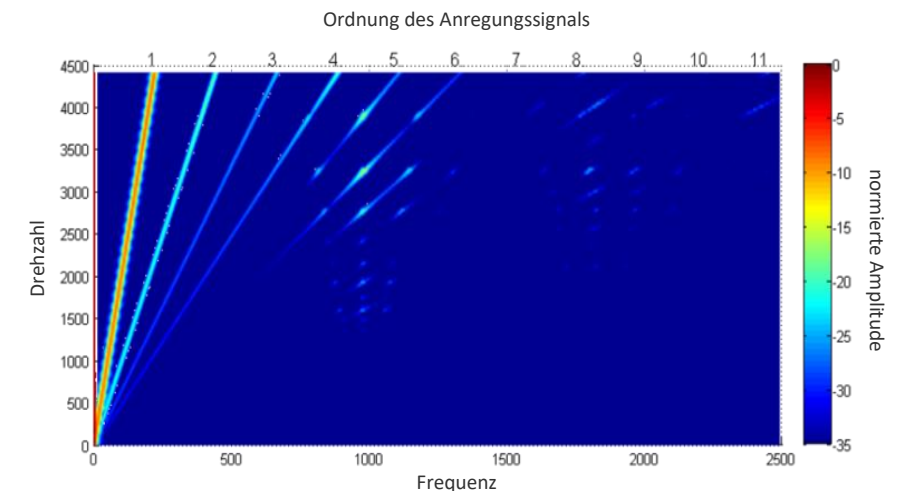
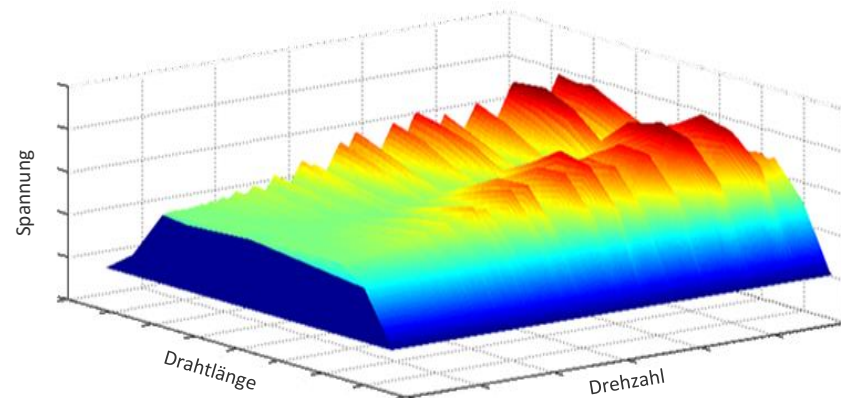


- Sehr schnell

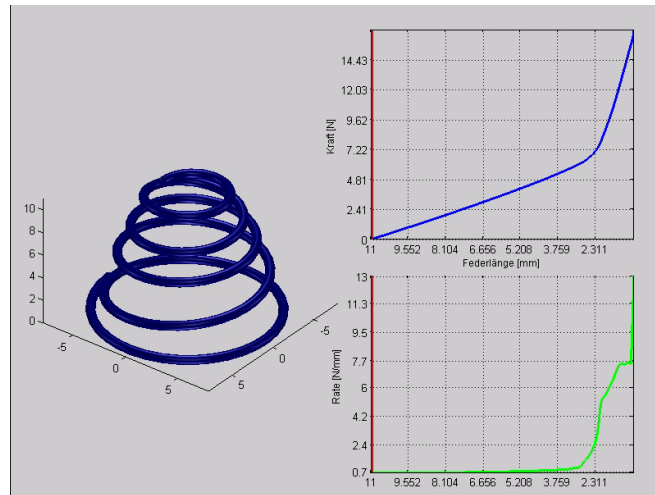
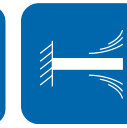
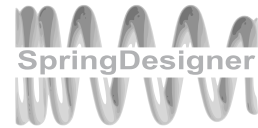
Kennlinie		Abbrechen	
Spannung		Frequenzen	
L [mm]	n	1	2
40.767	32	8.767	44
257.8	661	403.2	132.7
42.7	49	0.3	35.4
320	813	493	168
172	241	69	145
567	1417	850	312
0	0	0	0
0.17118	0.43468	0.2635	0.090055

### ERGEBNISSE:

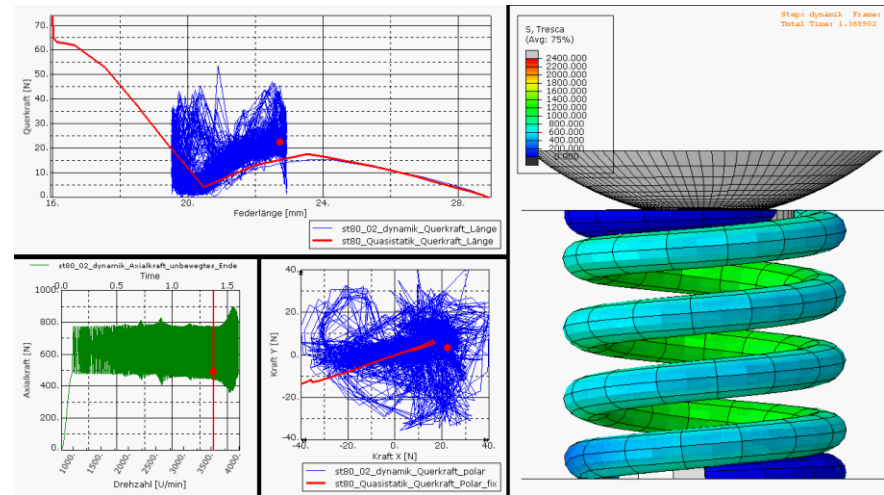
- Animationen
- Nockenkontaktkräfte
- Axiale Federkräfte
- Frequenzgang
- Ordnungsanalyse



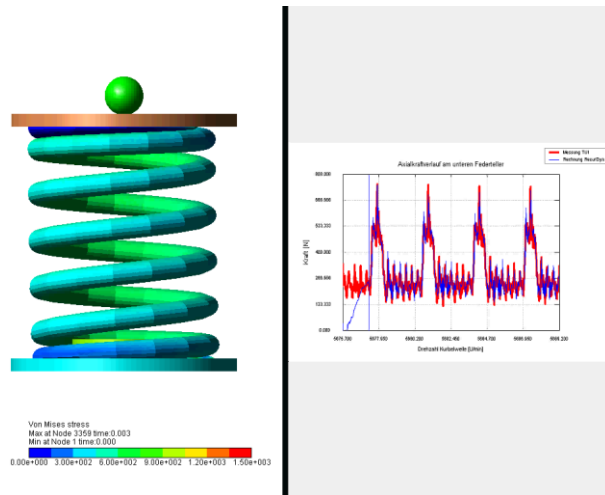




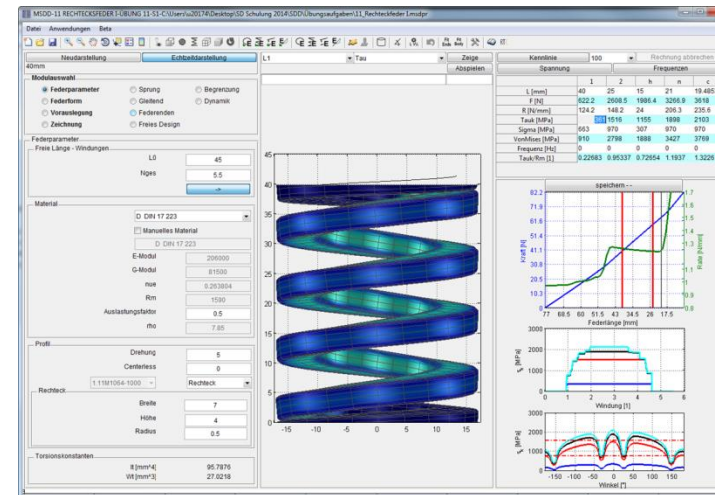
Konische Mini Block Feder



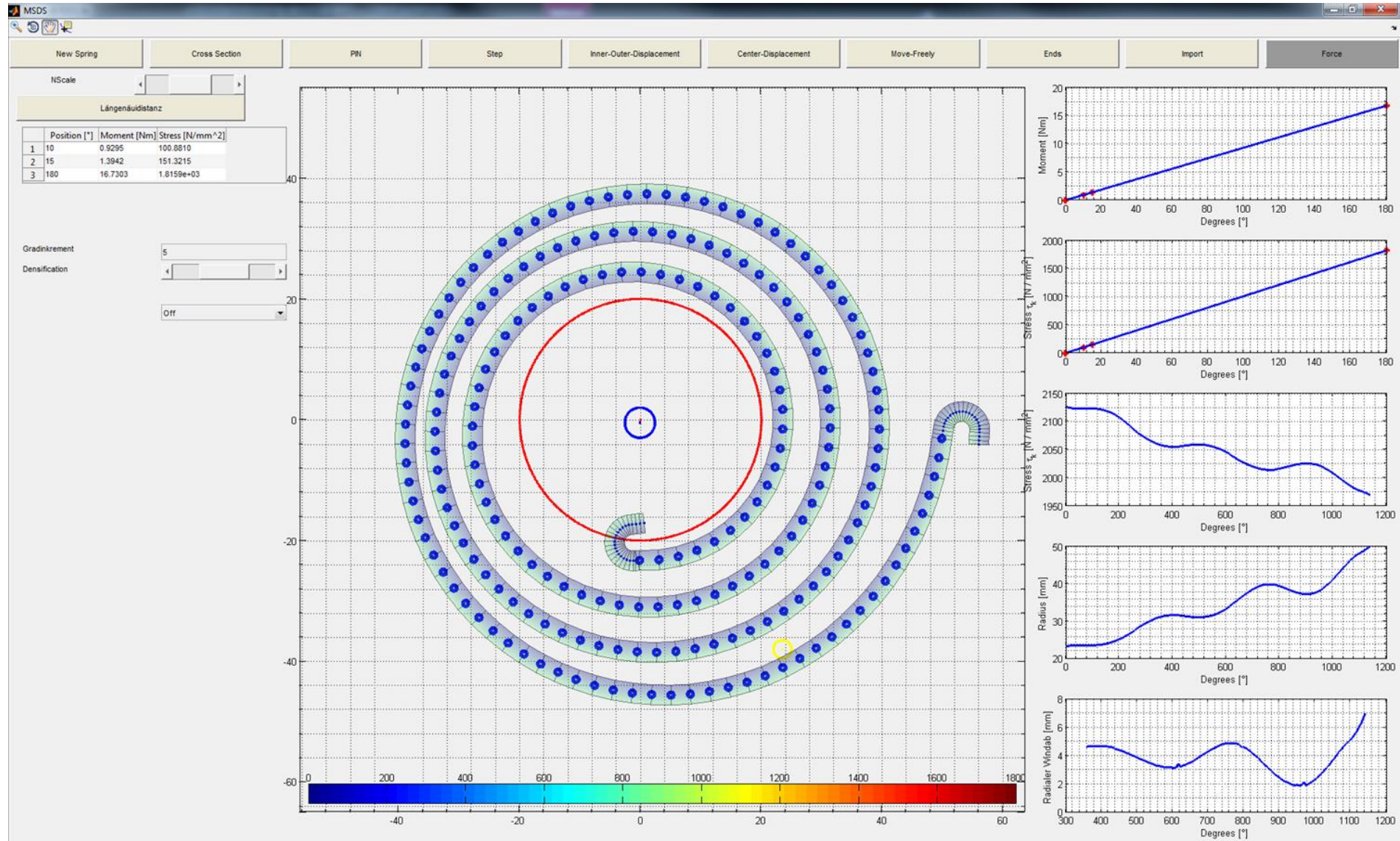
Pumpenfeder



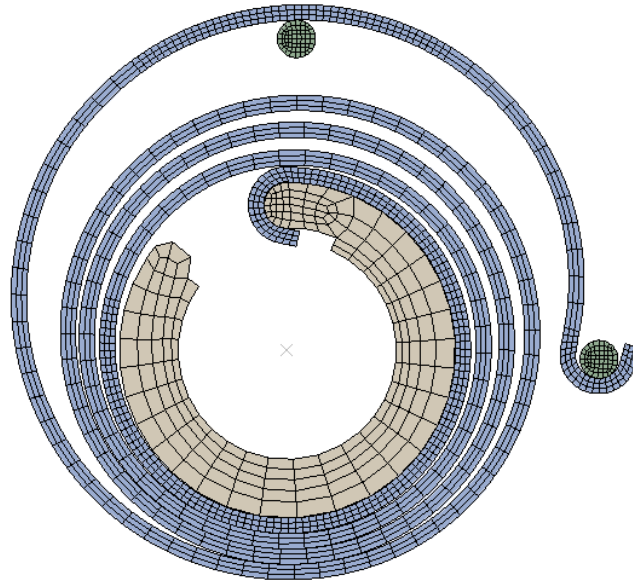
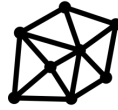
Ventilfeder



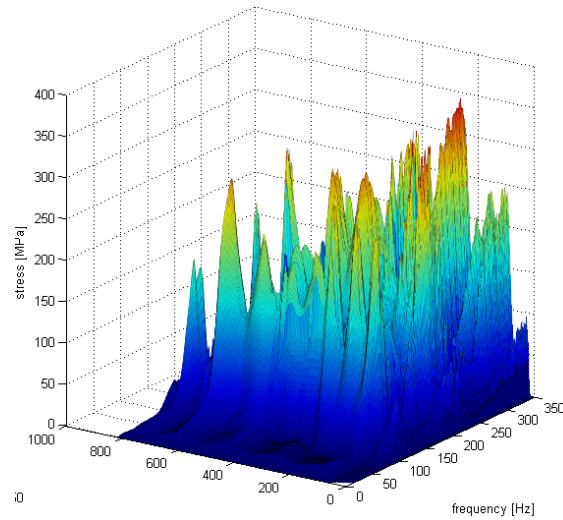
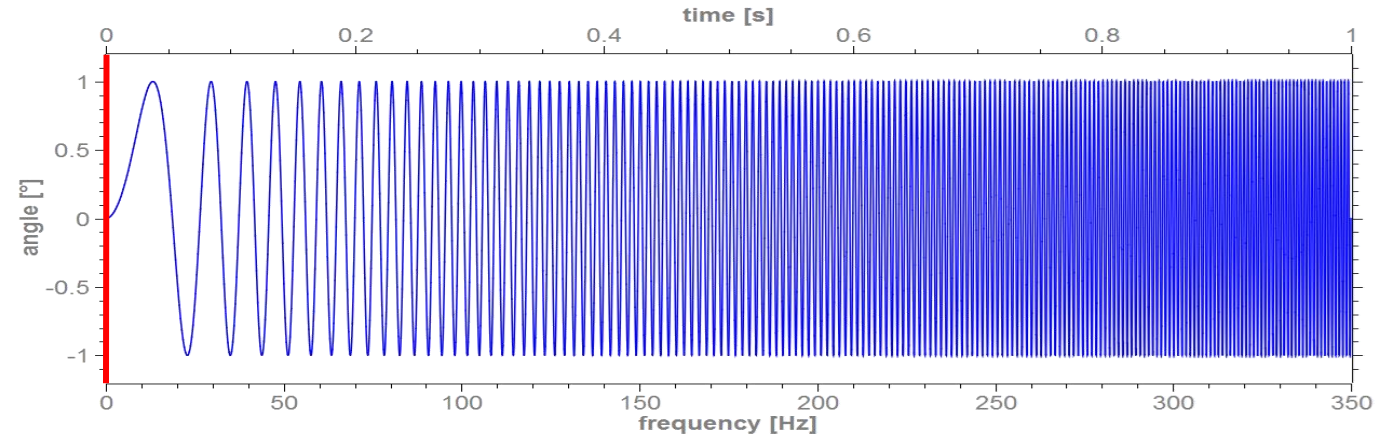
Maximalkraftfeder mit Rechteckquerschnitt



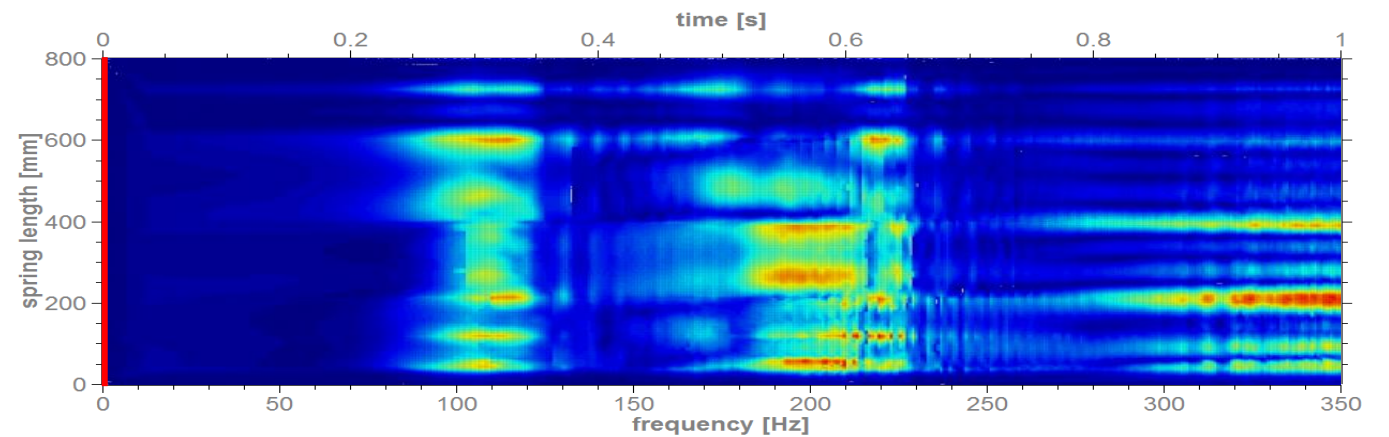


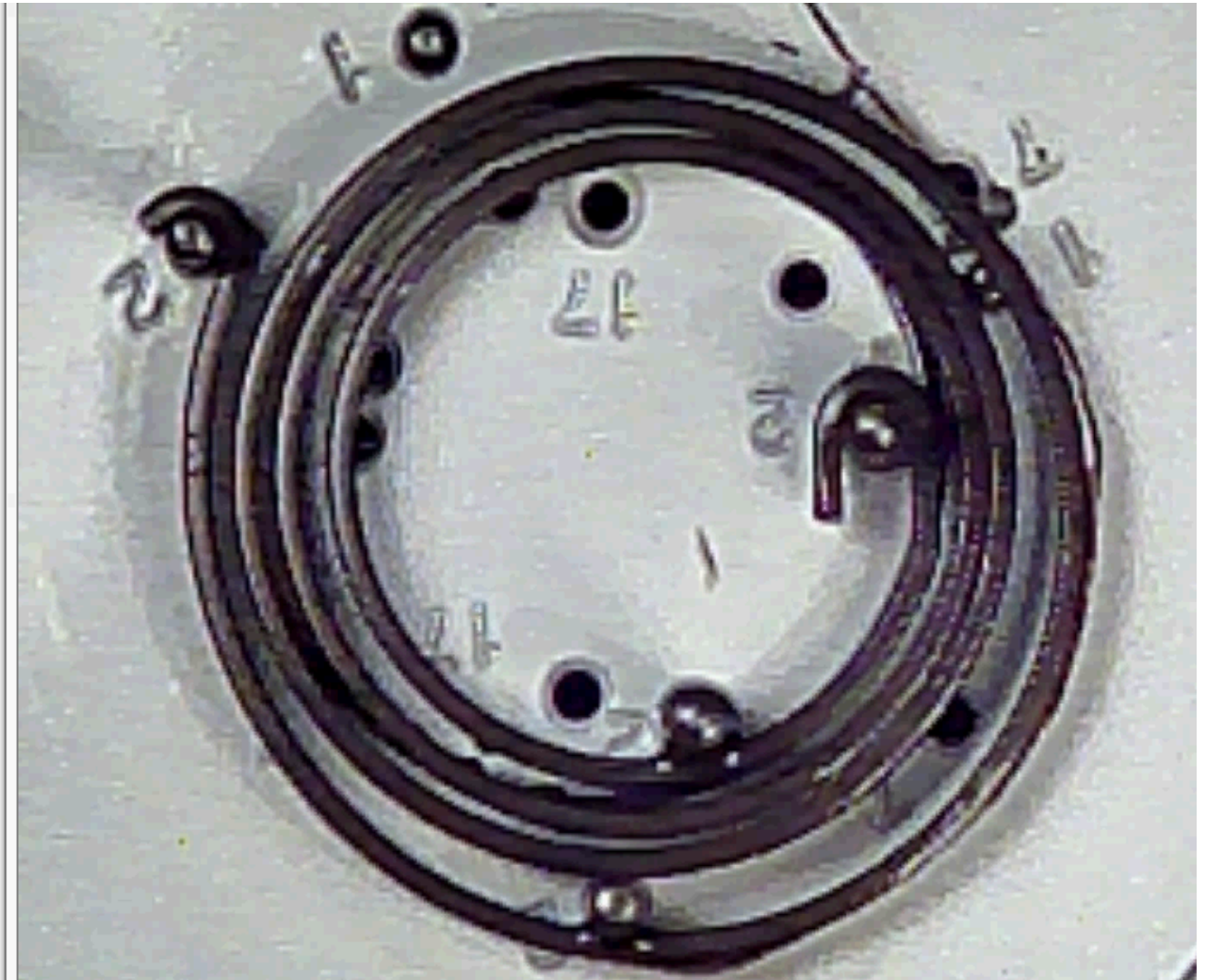
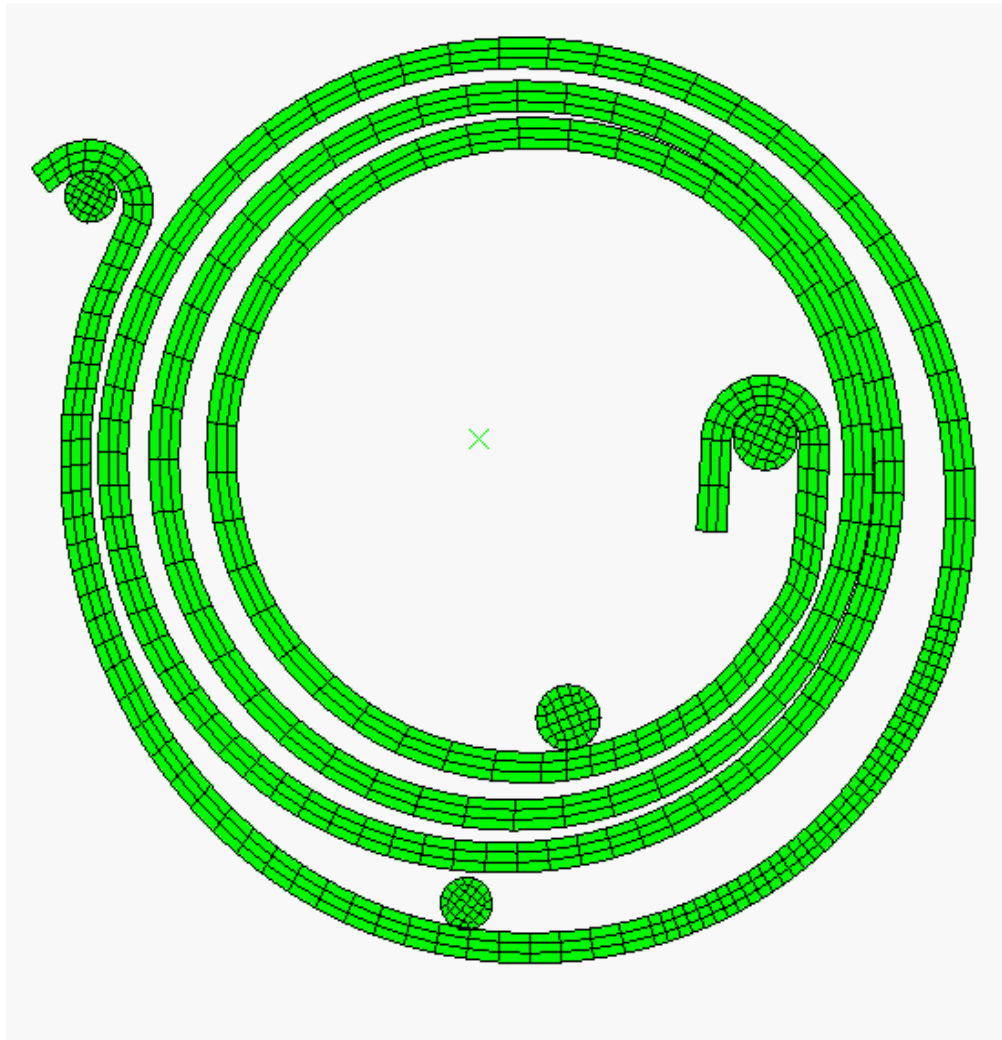
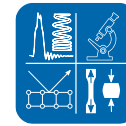


Frequenzrampe



Dynamische Hubspannung







MSDW 1.3 Testversion

Datei Optionen

**Drahtprofil**

Drahtprofil: Rechteck Naturkante

Drahthöhe h (mm): 0.5 Toleranz hTol (mm):

Drahtbreite b (mm): 4 Toleranz bTol (mm):

Eckenradius r (mm): Toleranz rTol (mm):

**Werkstoff**

Werkstoffdatenbank: Ck 67 / C 67 H+A

Elastizitätsmodul E (N/mm²): 210000 / 206000

Zugfestigkeit Rm (N/mm²): 1800 / 1200

Spannungsobergrenze: Standard 1

**Durchmesser**

Außen De (mm): 44

Mittlerer Dm (mm): 40

Innen Di (mm): 36

**Windungen**

Gesamtwindungen nt: 4

Federnde Windungen n: 2

Nichtfedernde Windungen oben: 2

Nichtfedernde Windungen unten:

Wellen pro Windung ww: 4.5

**Phase/Tellerung/Blocklänge**

Anfangswinkel unten: 0

Tellerung psi (°): 0

Sicherheit Blocklänge SBI: 0

Federdarstellung

Bemerkungen/Zusätzliche Angaben

real LD = 16

**Datensatzinformation**

Bearbeiter:

Kunde:

Zeichnungsnummer:

Version:

**Ergebnisse**

Federrate 1	R1 (N/mm)	26.95
Federrate 2	R2 (N/mm)	194.35
Wickelverhältnis	Dm/b	10
Materialbreiten/dickenverhältnis	b/h	8
Materialaufstauchung außen	ha	0.485
Materialaufstauchung innen	hi	0.515
Wellenhöhe	hw	5.93
Amplitudenhöhe	a	2.72
sa erforderlich	(mm)	---
sa vorhanden	(mm)	---

Feder gestanz

Federenden verschweißt

Feder gewunden

Federenden angelegt

Kugelgestrah

Spannungsoptimiert

Federlänge L (mm)	Federkraft F (N)	Federweg s (mm)	Spannung sigma (MPa)	Hubspannung	De' (mm)
L0	16	16			
L1	14	14	53.898	<input checked="" type="checkbox"/>	---
L2	10	10	744.707	<input checked="" type="checkbox"/>	---
Ln	5	5	1716.44	<input type="checkbox"/>	---
Lc	2.575		2187.73	<input type="checkbox"/>	---

Hubspannung	sigma H (MPa)	Auslastung	sigma n/Rm	Zulässige Hubspannung	sigma H (MPa)
	3215.17		6.66		---

Diagramm Kennlinie

Federkraft F [N] vs Federlänge L [mm]



# AGENDA

- *SCHERDEL s:iment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*



**FKM**  
Forschung im VDMA

**RECHNERISCHER  
FESTIGKEITSNACHWEIS**

FKM-Richtlinie  
2. Auflage 2023

für Federn und Federelemente

VDMA Verlag



SDD V2.08 - INNOTECH-SCHULUNGSNUMMER-V1-cl\daten\fed\sd Druck\project\standard.msdp

Datei Zeichnung Ansicht Export Dynamik Beta

Neudarstellung Echtzeitdarstellung

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis ist erbracht.

**Modulwahl**

Federparameter  Sprung  Begrenzung

Federform  Gleitend  Dynamik

Vorauslegung  Federenden  FKM (beta)

Zeichnung  Freies Design

**FKM Eingaben**

Werkstoffgruppe:

Bruchdehnung A [%]:

Wärmebehandlungstemperatur T\_W [°C]:

Nitrieren:

Rauheit:

Einsatztemperatur [°C]:

Lastwechsellast N [1]:

Überlastfall:

Lastkollektiv:

Vertrauenswahrscheinlichkeit C [%]:

Ausfallwahrscheinlichkeit P\_A [1]:

Streuspanne der Last\_SB [1]:

Hochbelastete Oberfläche:

Eigenspannungsberücksichtigung:

Mittelspannungsverschiebung [MPa]:

Festigkeitszuwachs:

Starte FKM Nachweis

a\_BK = 0.83605 -- tau\_BK = 491.3524  
Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis ist erbracht.

-10 -5 0 5 10

0 0.2 0.4 0.6 0.8 1 1.2

Kennlinie 50 Rechnung abbrechen

	Spannung	1	2	h	n	c
L [mm]	39.5	30	9.5	44	22.77	
s [mm]	9.8	19.3	9.5	5.3	26.53	
F [N]	240.91	547.57	306.66	114.48	908.45	
R [N/mm]	29.4	35.6	6.2	26.7	121.1	
Tauk [MPa]	499	1138	640	236	1824	
Sigma [MPa]	190	249	59	141	142	
VonMises [MPa]	884	1987	1103	433	3162	
Frequenz [Hz]	0	0	0	0	0	
Tau/Rm [1]	0.21451	0.49004	0.27553	0.10167	0.77797	

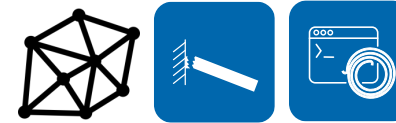
**FKM Bewertung**

Bauteilwöhlerlinie, tau\_mittel = 819 MPa

Wöhler OHNE Sicherheitsfaktor  
 Wöhler MIT Sicherheitsfaktor  
 max. Lastpunkt

R = -unendl.  
 R = -1  
 R = 0  
 R = 0.5  
 tau\_0,ax  
 tau\_0,ax + Sicherheit  
 max. Lastpunkt

1. Auflage 2020
2. Auflage 2023



### FKM Methodik allg. akzeptiert

- Anpassung an hochfeste Werkstoffe
- Berücksichtigung der Fertigung
  - Wärmebehandlung
  - Kugelstrahlen
  - Nitrieren
  - Rauheit
  - Eigenspannungen
- Hochbelastete Oberfläche
- Lastkollektive
- Schubbelastete Federn (Zug-/Druckfedern)
- Biegebelastete Federn (Drehfedern, Stanz-Biege-Teile)
- Einsatztemperatur
- Sicherheitskonzept

FKM\_GUI\_v009
Save Load

**Eingaben**

**Werkstoff**

Werkstoffgruppe: ölschlussvergütet

Zugfestigkeit R<sub>m</sub> [MPa]: 1800

Bruchdehnung [%]: 6

---

**Prozess**

Wärmebehandlungstemperatur T<sub>W</sub> [°C]: 350

Kugelstrahlbehandlung:

Nitriert:

Rauheit: niedrig R<sub>z</sub> <= 6 µm

Eigenspannungsberücksichtigung: Mittelspannungsversch...

Eigenspannung [MPa]: -600

---

**Geometrie**

Hochbelastete Oberfläche [mm²]: 500

Spannungsbeiwert k [1]: 1

---

**Last / Applikation**

Kollektiv: Einstufen

Lastart: Biegung schließend

Überlastfall: Mittelspannung konstant

Lastwechselzahl N [1]: 10000000

Einsatztemperatur [°C]: 20

---

**Sicherheitskonzept**

Vertrauenswahrscheinlichkeit C [%]: 50

Ausfallwahrscheinlichkeit P<sub>A</sub> [1]: 0.5

**Spannungen**

FEM  
Manuell

Lade FEM Ergebnisse
Schreibe FEM a<sub>BK</sub> Output

	Eintrag Nr [1]	Sig <sub>m</sub> [MPa]	Sig <sub>a</sub> [MPa]
max. Sig <sub>m</sub>	1	0	0
max. Sig <sub>a</sub>	2	0	0

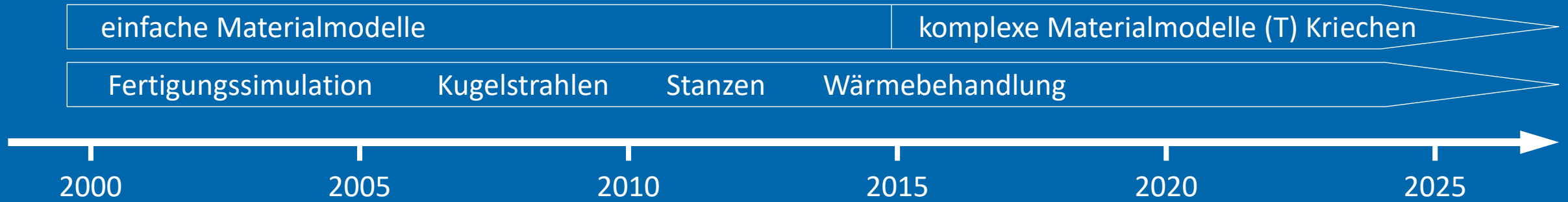
---

**FKM Nachweis**

Starte FKM Nachweis

max. Auslastungsgrad a<sub>BK</sub> [1]      a<sub>BK</sub>





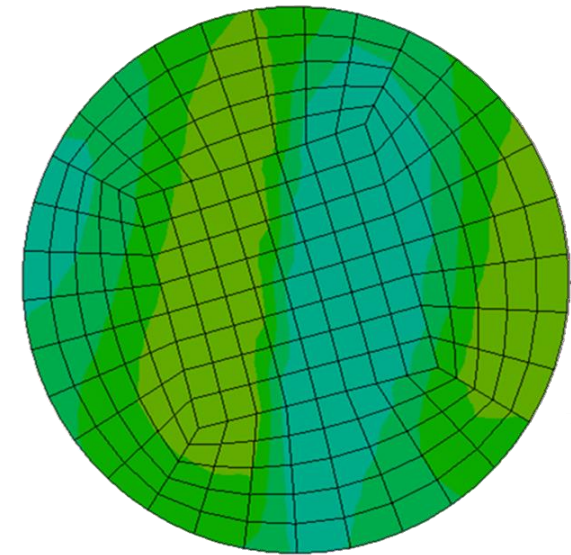
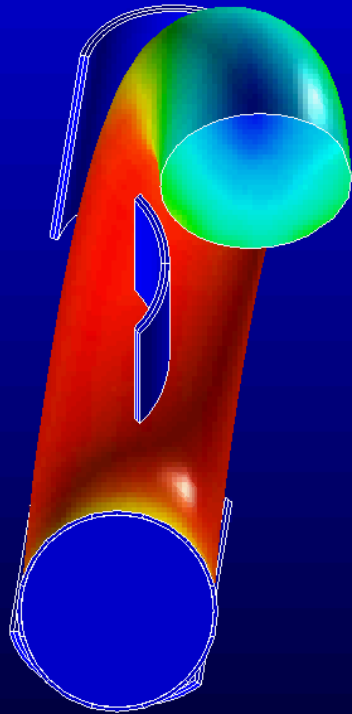
# AGENDA

- *SCHERDEL s:ment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*

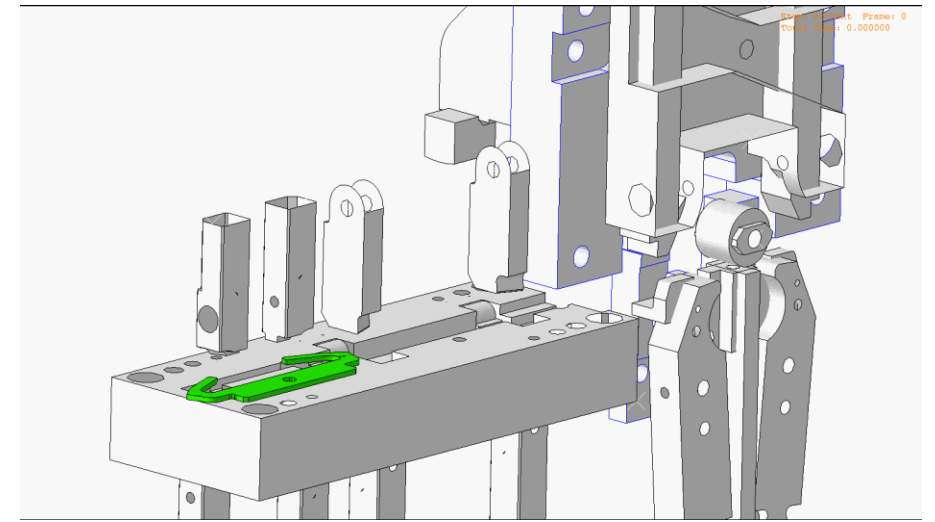
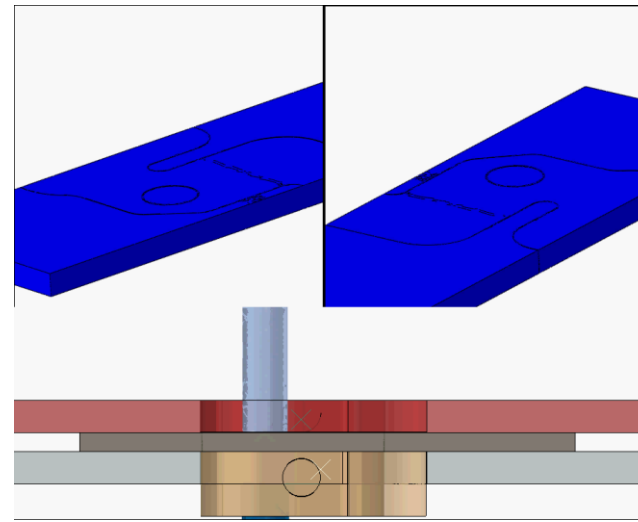
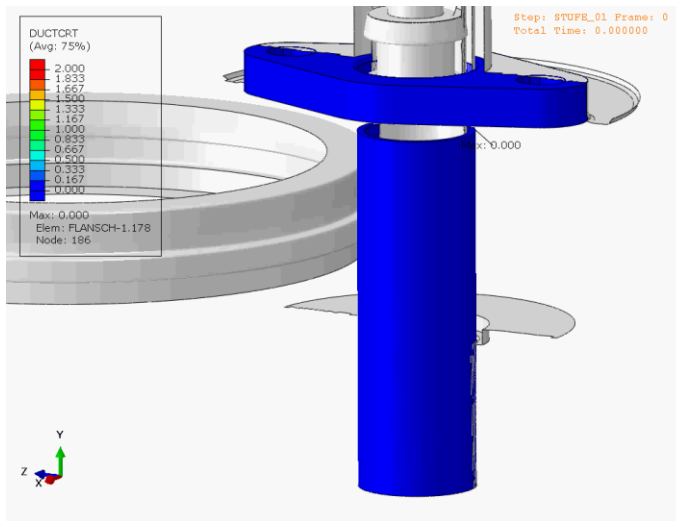


1

### Umformsimulation



Nach Nachwärmebehandlung



- Kontinuierliche Weiterentwicklung der Materialmodelle notwendig
  - E-Modul
  - Poissonzahl
  - Fließgrenzen
  - Verfestigung
  - Kriechmodellezwingend Temperaturabhängig
- Bauschinger Effekt



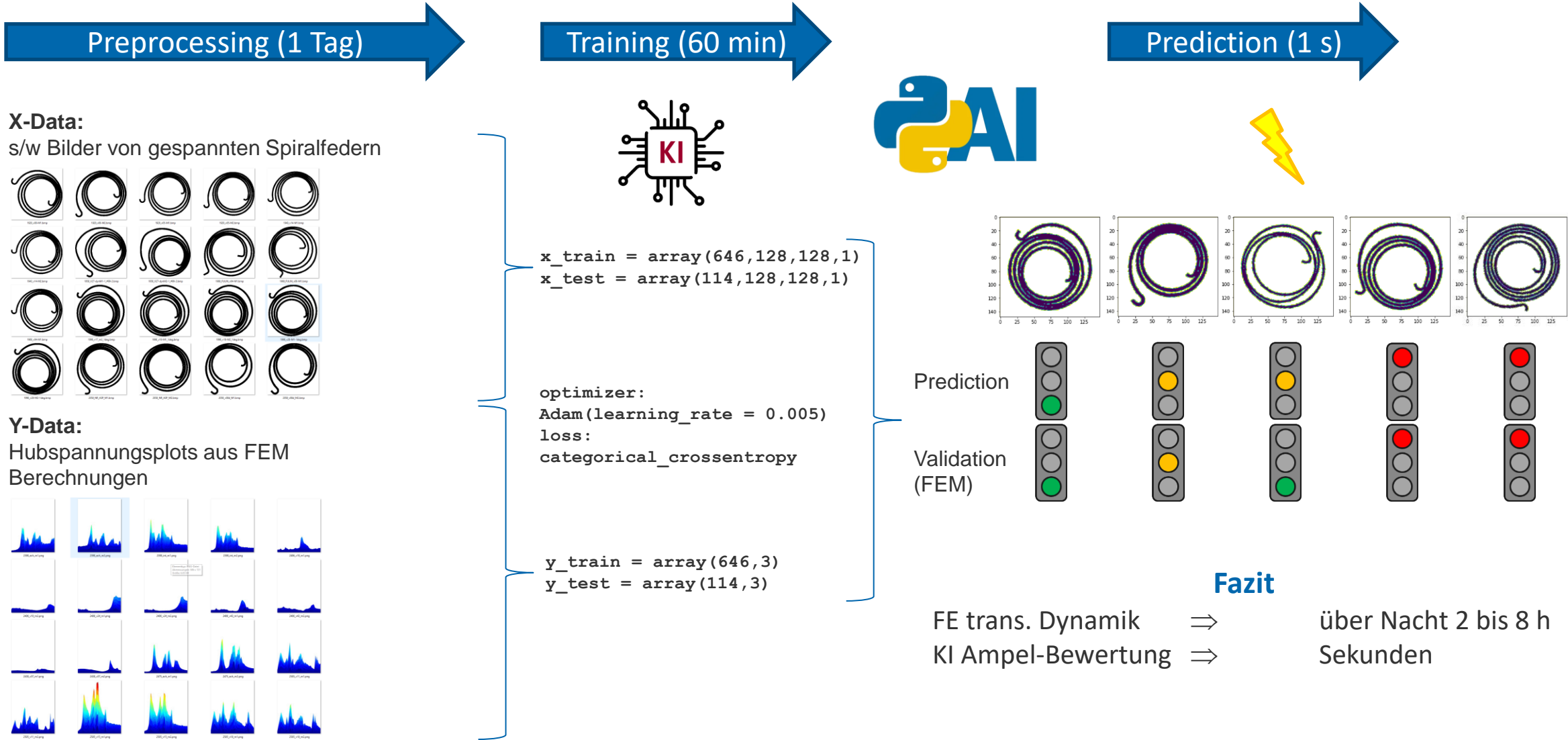
# AGENDA

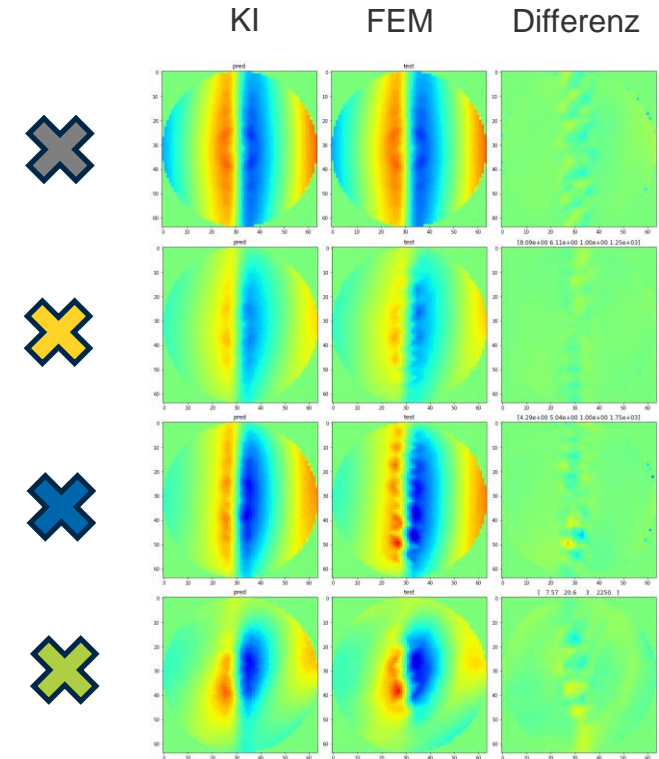
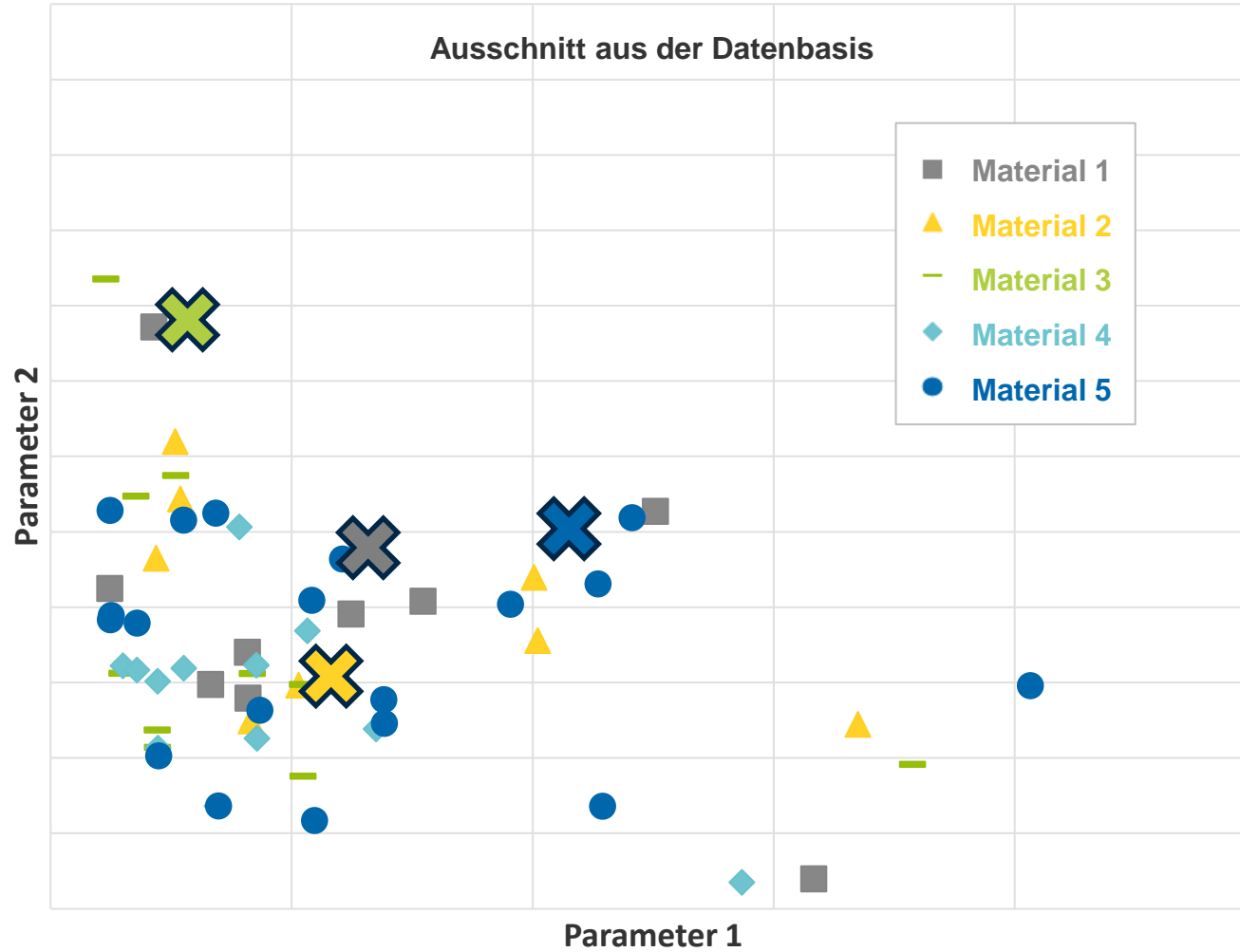
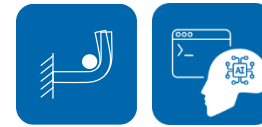
- *SCHERDEL s:iment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*

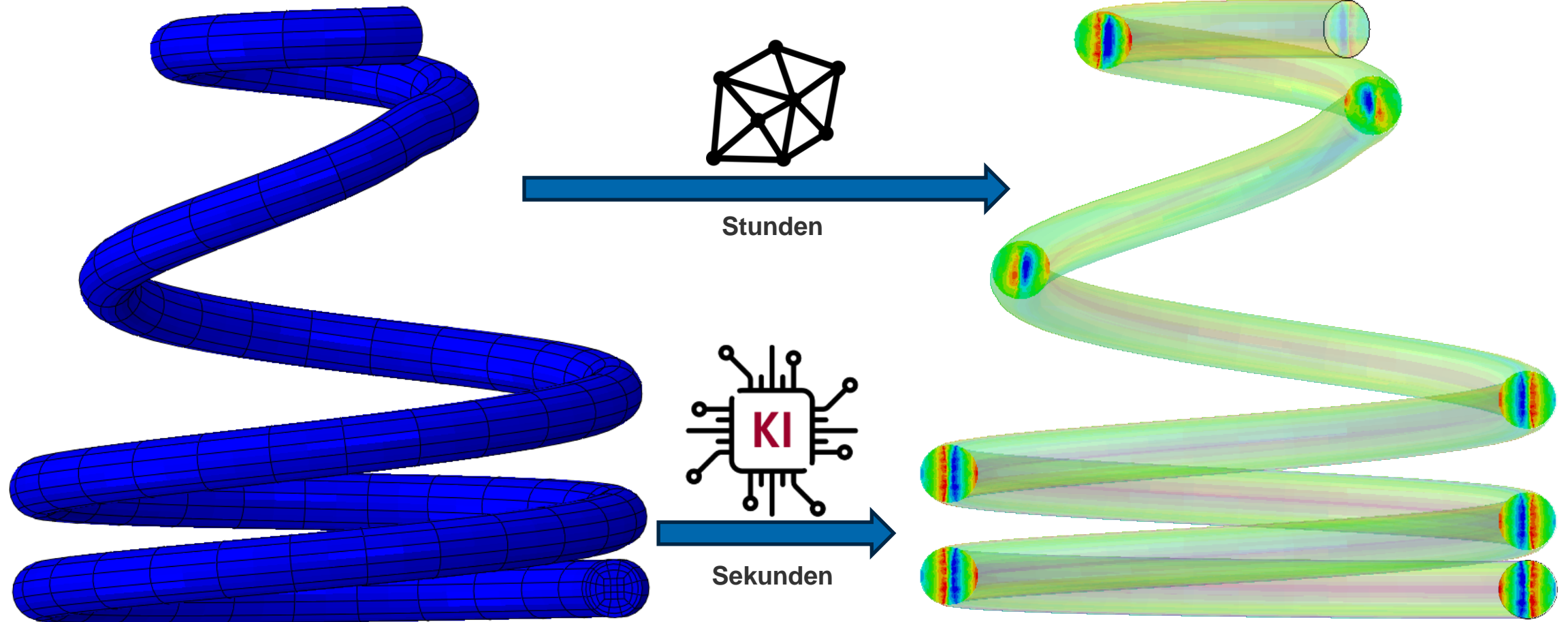
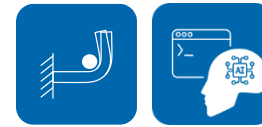


# DATENBASIERTE SPIRALFEDER DYNAMIK

VORHERSAGE DES DYNAMISCHEN VERHALTENS EINER SPIRALFEDER

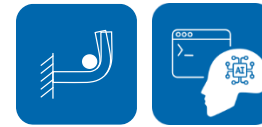




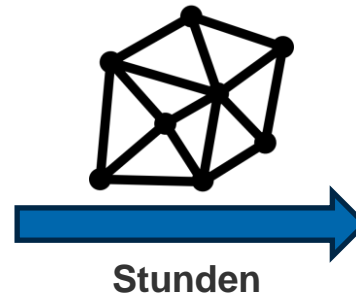


Nominalgeometrie **ohne** Fertigungseigenstress

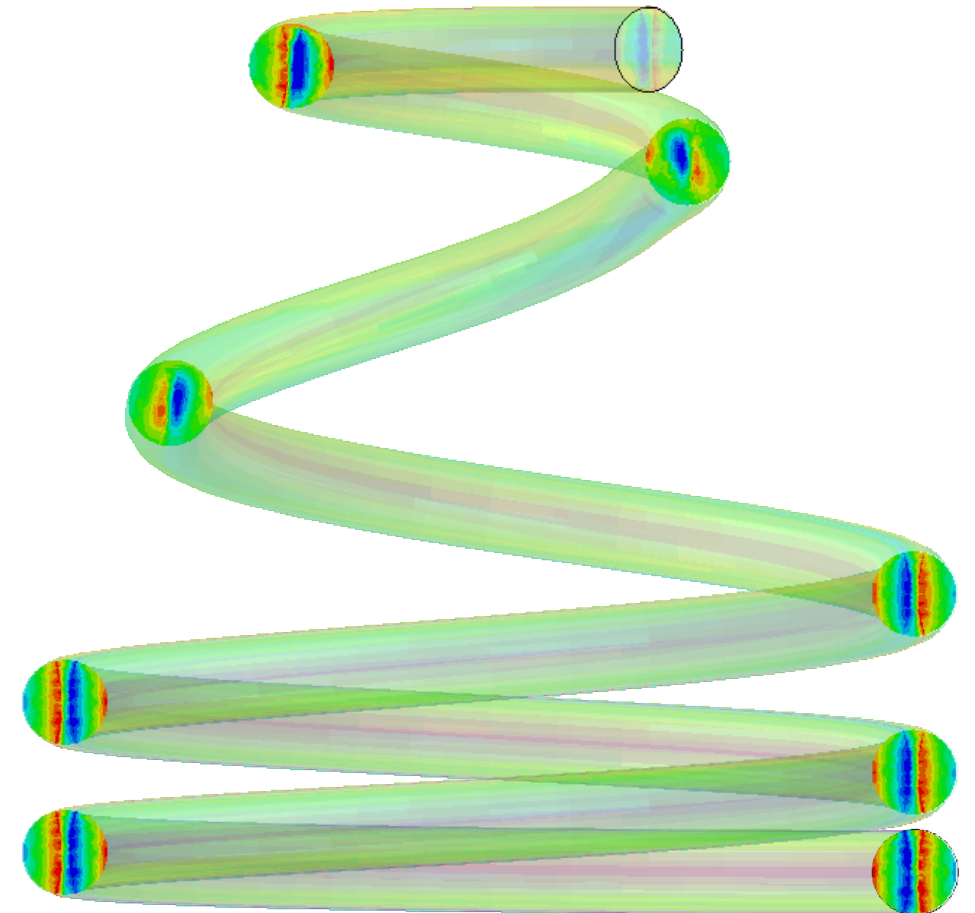
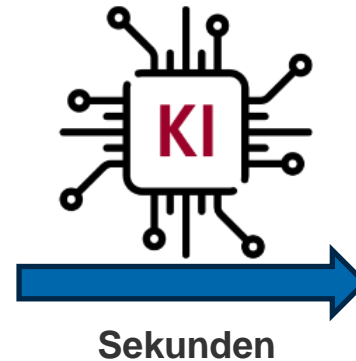
Nominalgeometrie **mit** Fertigungseigenstress



Die datenbasierte Fertigungssimulation ermöglicht es die Fertigungseigenstressen in **jeder** Designauslegung zur ermitteln.



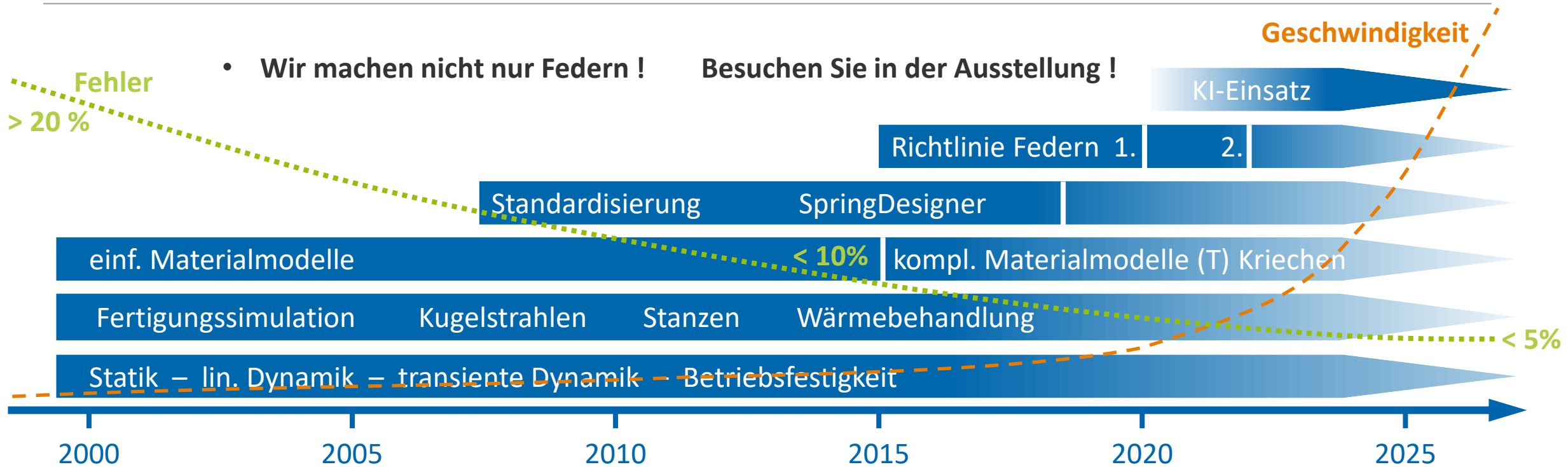
Über die Nutzung der FKM-Richtlinie Federn kann der Einfluss der Fertigungseigenstressen auf die Betriebsfestigkeit des Bauteils direkt ermittelt werden.





# AGENDA

- *SCHERDEL siment – ein ganz kurzer Überblick*
- *Federberechnung*
  - *Statik - Dynamik*
  - *SpringDesigner*
  - *Betriebsfestigkeit*
  - *Fertigung - Materialmodelle*
  - *Beschleunigung durch KI*
- *Zusammenfassung & Ausblick*



- Kontinuierliche Verfeinerung der Modelle
- Validierte Materialmodelle sind die Basis
- Vorhersagegenauigkeit wird absolut immer besser => immer nur so genau wie nötig !
- Durch Einsatz von KI in standardisierten Prozessen sind enorme Produktivitätsgewinne möglich
- First time right Prototypen sind Realität!

# MANY THANKS FOR YOUR ATTENTION!

**Danke!** obrigado! 谢谢! *Děkuji!* **Merci!** ありがとう! **Gracias!** спасибо! **dakujem!** *dankjewel!* teşekkür ederim! **köszönjük!** **tack!** *dziękuję!* धन्यवाद!

# From desired result to solution in minutes!

Using Machine Learning for fast  
functional concept design decisions.

# Agenda

1 why

---

2 how

---

3 what

---

4 result

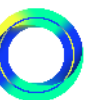
---

5 conclusion

---

6 outlook

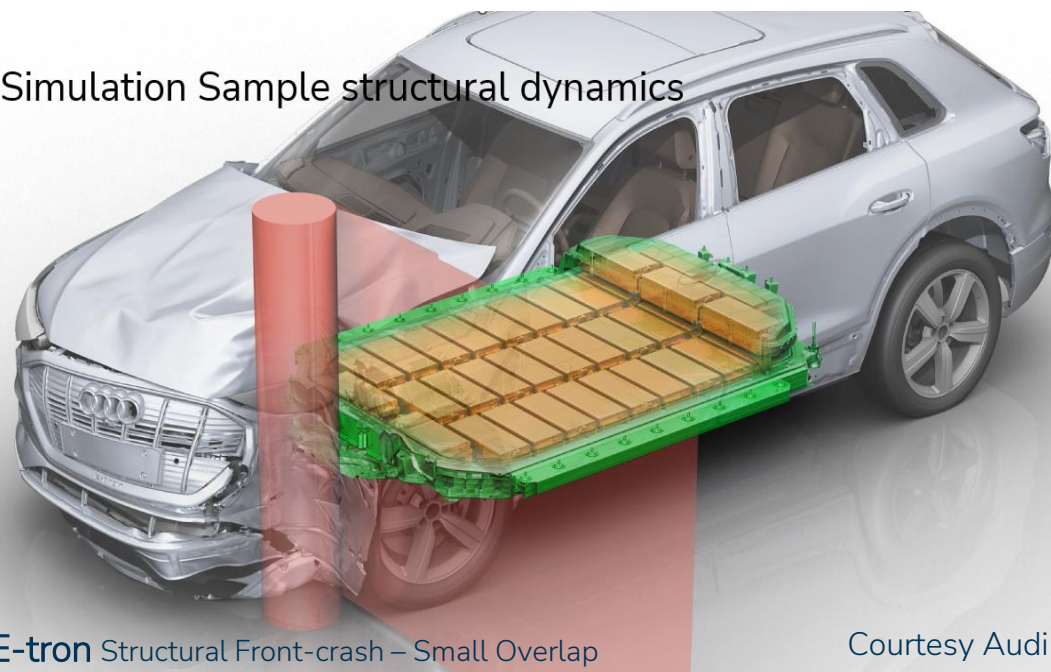
---





# Simulation Capabilities

Simulation Sample structural dynamics



Courtesy Audi

## Complete car @ Audi:

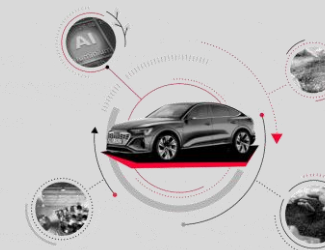
Simulations per project:	ca. 58.000
Number of load cases:	90 Structure- and 141 MV/HV
Simulation time:	20h for 140ms Crash time
Number of elements:	> 16.000.000

→ High accuracy and acceptance  
**but limited reactivity!**

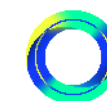
## Additional Challenges



### Circular Economy



→ Increasing importance of the  
concept design phase



# Exemplary use case

## Crash Management System (CMS)

### Concept design phase:

- reliable information required
  - costs,
  - manufacturing, design space,
  - functionality, weight, ...
- Quick, robust decisions required
  - within even no lead time
  - good accuracy
  - comprehensive consideration ...

➔ Enhanced way of decision making

CMS – the starting point of deformation and energy absorption

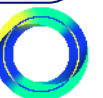
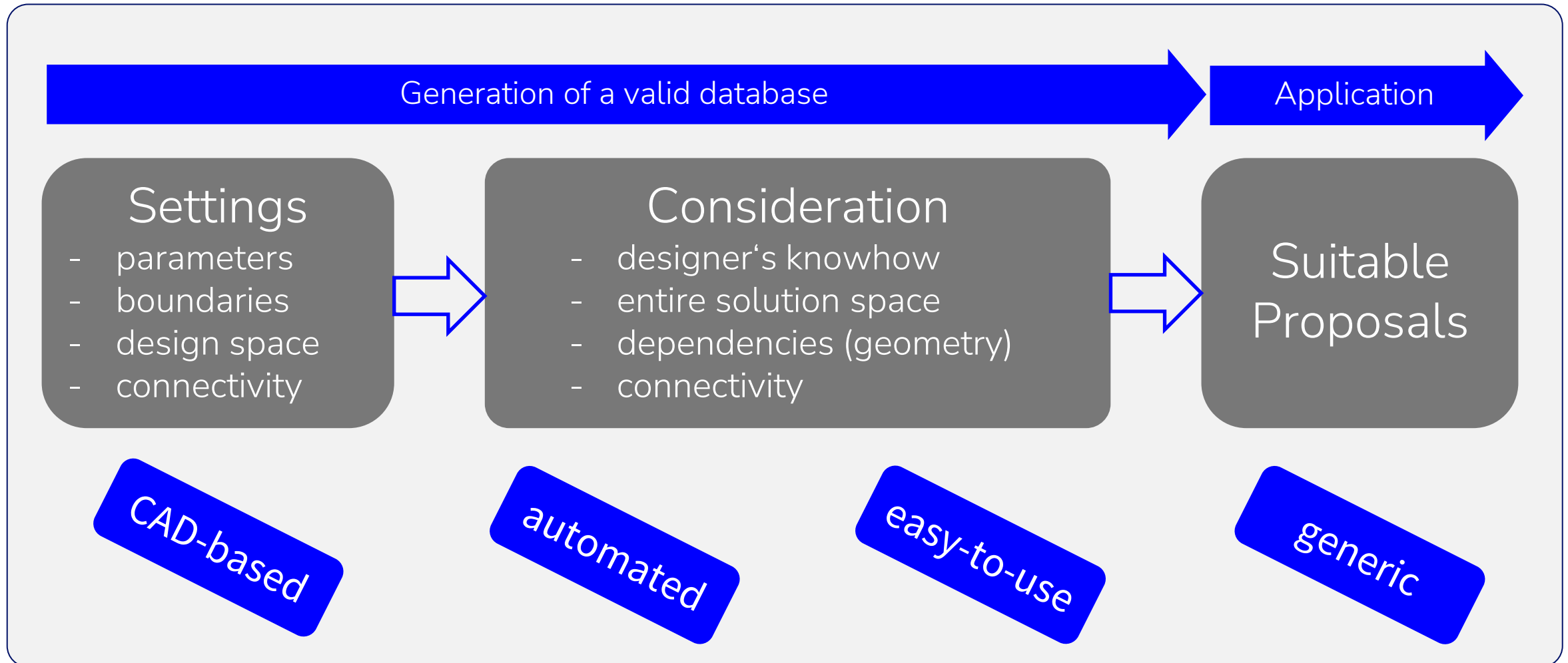


Courtesy Audi



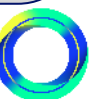
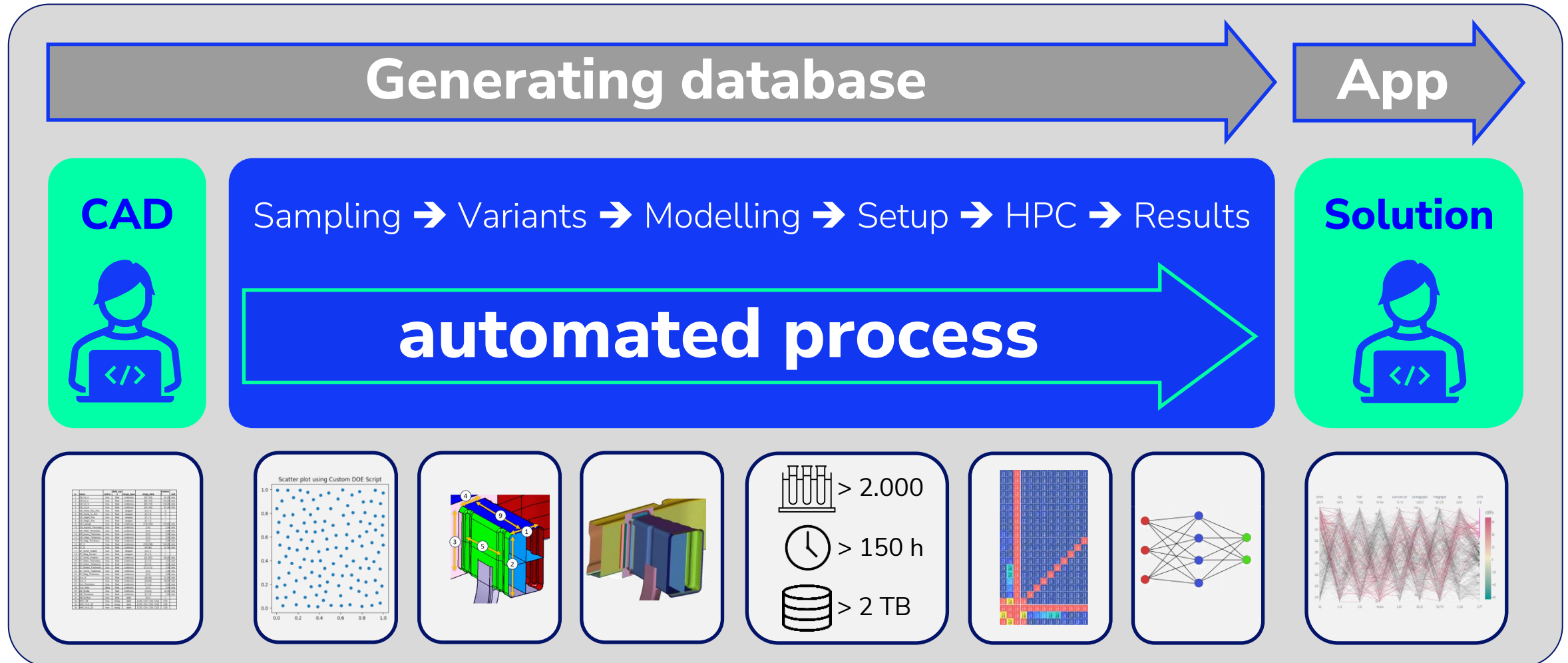
# Our Goal

One step towards automated design proposals



# Basic Process Scheme

A row of automated steps

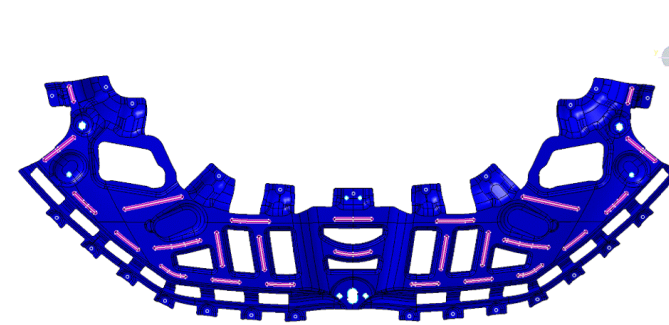


# Parametrized CAD models

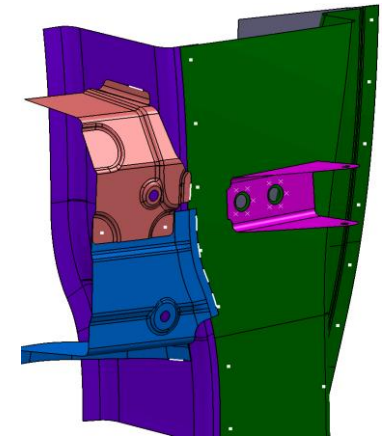
CATIA V5 driven design of experiments  
powered by FCM CAT.CAE-Bridge

- fully automated design variation
  - patterns like holes, swages, ribs
  - parameter dependency rules
  - quality & collision checks
- entire definition of simulation information
  - property & material as parameters
  - parametrized connectivity
  - solver information
- 100%
  - CAD update stability
  - CATIA V5 integrated
  - associativity CAD-CAE

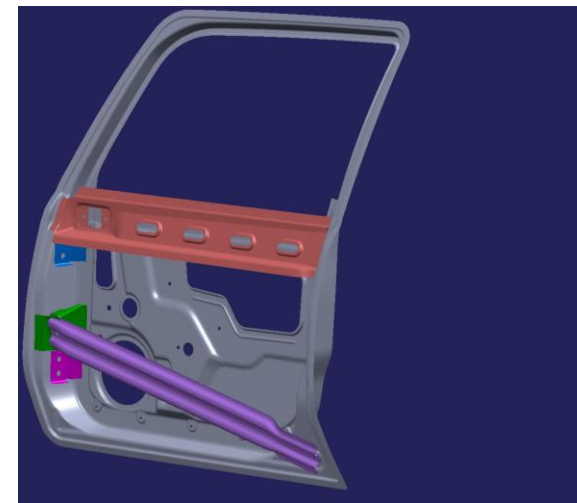
## Automated design variations



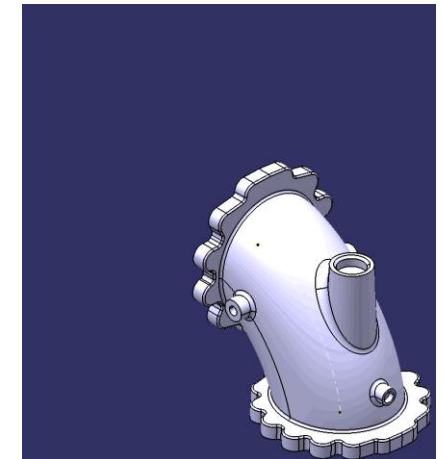
patterns and connection items



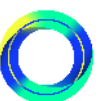
parametrized connectivity



design space & collision check



solid structures



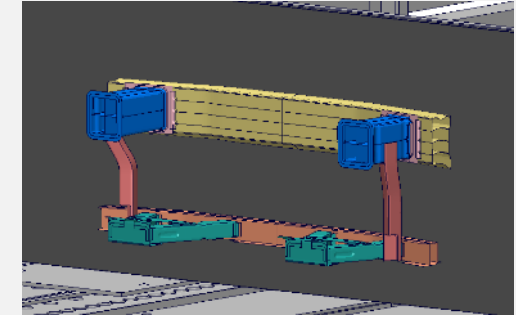
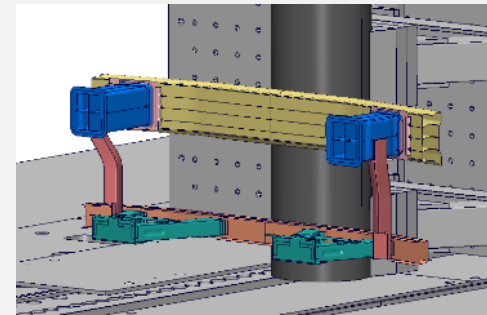


# The mixed parameter set

- floating continuous (geometry dimensions)
- floating stepped (number of items)
- floating table (on/off)
- string table (material)

nr.	name	active	data_type	range_type	range_data	nominal	unit
1	CB_Hi_H	true	float	continuous	[50,140]	81,00	mm
2	CB_Hi_V	true	float	continuous	[80,170]	134,00	mm
3	CB_Vo_V	true	float	continuous	[80,170]	134,00	mm
4	CB_Vo_H	true	float	continuous	[50,140]	81,00	mm
5	CB_Sicke_Aus_Anz	true	float	stepped	[0,5,1]	2	
6	CB_Sicke_In_Anz	true	float	stepped	[0,5,1]	2	
23	QT_Verte_Thickness	true	float	continuous	[2,5]	3,00	mm
24	QT_Steg_Thickness	true	float	continuous	[2,5]	3,00	mm
25	ULe_H	true	float	continuous	[20,50]	31,80	mm
26	ULe_V	true	float	continuous	[20,60]	46,80	mm
27	ULe_Thickness	true	float	continuous	[1,5,4]	2,50	mm
28	ULe_Teile	false	float	continuous	[2,3]	2,00	mm
29	AB_Breite	true	float	continuous	[10,45]	32,00	mm
30	AB_Thickness	true	float	continuous	[2,5,5]	3,50	mm
31	AB_EinAus	true	float	table	[0,1]	1	
32	MAT_CB	true	string	table	[C20, C24, C28, C32]	C20	
33	MAT_ULE_QT	true	string	table	[C20, C24, C28, C32]	C20	
34	MAT_HLE_QT	true	string	table	[C20, C24, C28, C32]	C20	

## Selected load cases: frontal pole & full wall



## Parameter plan

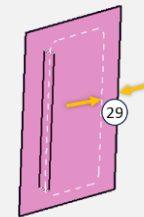
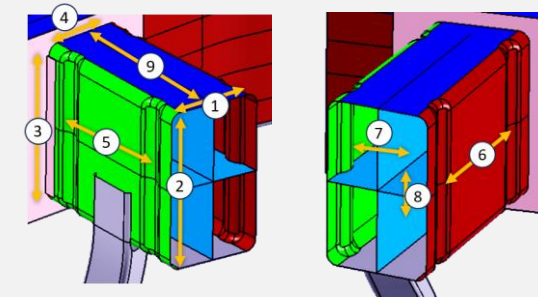
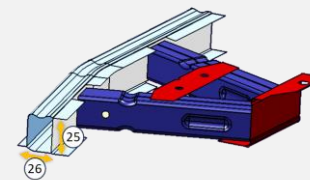


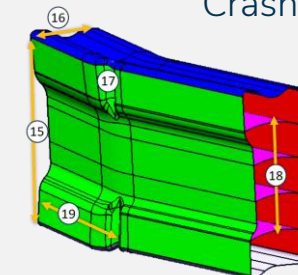
Plate on / width



Crash box



Lower cross beam

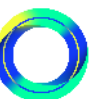
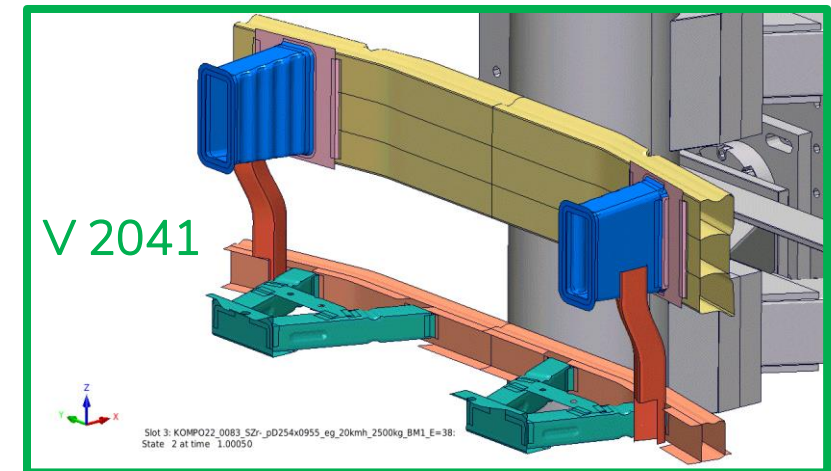
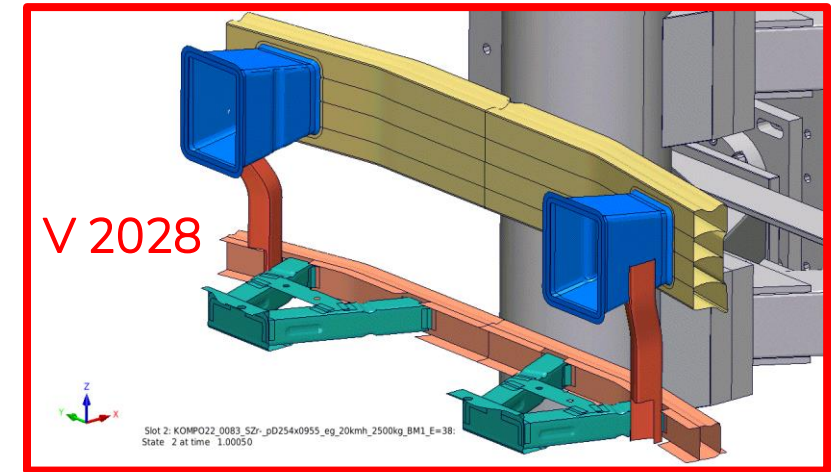
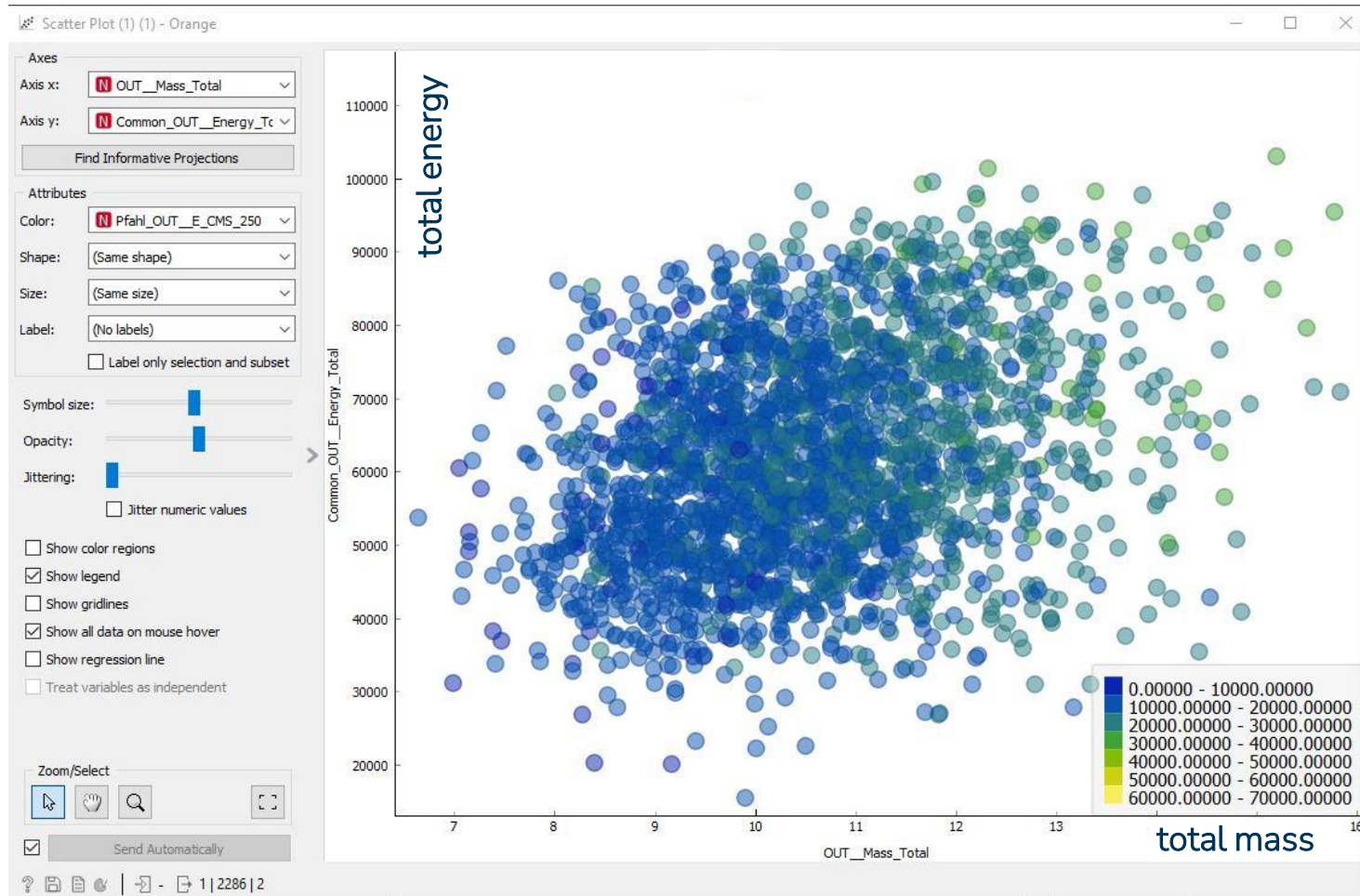


Upper cross beam



# Simulation Results

Interactive data analysis (e. g. "Orange")



# Machine Learning Model

based on simulation results

## Generating database

## Application

### DoE (FEM)

- 2 load cases
- 2300 experiments
- 34 parameters
- 45 result values

### Results

- kpi calculation
- curves
- tables

### ML-model

- free python library
- training for each key result separately
- cross validation

### Slider App

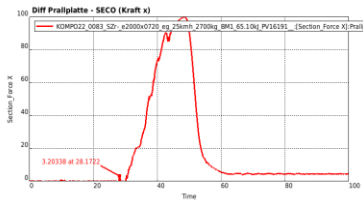
- choose parameter values
- narrow down results
- run new DoE on model
- iterative optimization

### Parallel coordinates

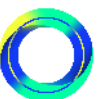
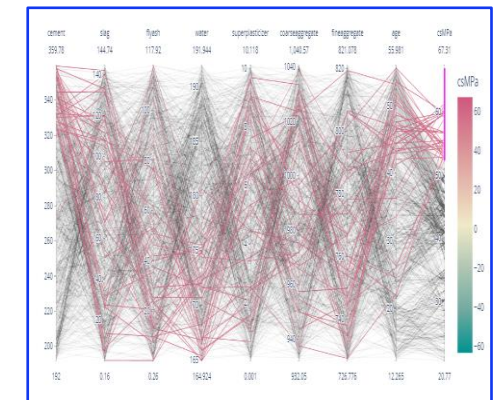
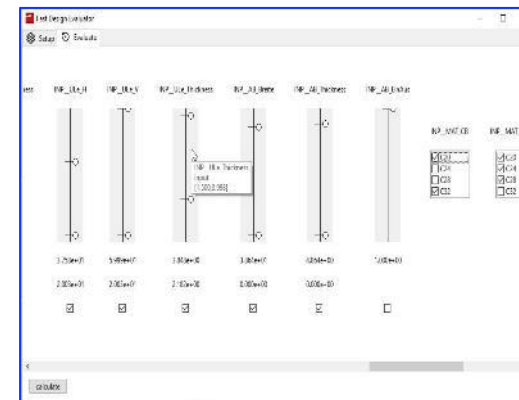
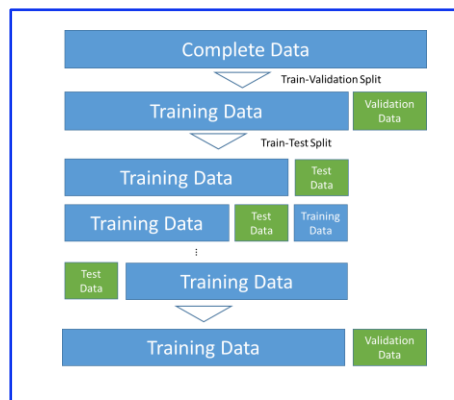
- limit or fix parameter values
- view valuable results
- export parameter table



Audi



overall simulation time (HPC): **6,5 days**  
temp. overall disk space: **2,6 TB**





# Use Case CMS issue

Applicating the tool

## Requirement:

find a CMS configuration that meets important functional constraints with the minimum mass

## Boundaries:

- many design parameters already set
- room for variation mainly in the crash-box
- external dimensions and length of the crash-box already defined. (LCB=180 mm)

## Tool:

### Fast Design Evaluator

- choose model
- configure input variables
- start ML-surrogate model

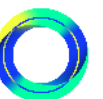
Fast Design Evaluator

Setup Evaluate

Model = CMS\_6\_MO1 DOE Size = 1000

Input Variable	Value	Selected
INP_CB_Sicke_In_Anz	1.000e+00	<input type="checkbox"/>
INP_CB_StegH_Anz	1.000e+00	<input checked="" type="checkbox"/>
INP_CB_StegV_Anz	1.000e+00	<input checked="" type="checkbox"/>
INP_CB_Laenge	1.803e+02	<input type="checkbox"/>
INP_MAT_CB		<input type="checkbox"/> C20 <input checked="" type="checkbox"/> C24 <input checked="" type="checkbox"/> C28 <input type="checkbox"/> C32
INP_MAT_ULE_QT		<input checked="" type="checkbox"/> C20 <input checked="" type="checkbox"/> C24 <input checked="" type="checkbox"/> C28 <input type="checkbox"/> C32
INP_MAT_HLE_QT		<input type="checkbox"/> C20 <input checked="" type="checkbox"/> C24 <input checked="" type="checkbox"/> C28 <input type="checkbox"/> C32
Wand_OUT_Fx_Peak_max_HLE_li	3.633e+02	<input checked="" type="checkbox"/>
Wand_OUT_E_CB_max_Defo_li	1.906e+04	<input checked="" type="checkbox"/>
Wand_OUT_E_QT_max_Defo	1.388e+04	<input checked="" type="checkbox"/>
Wand_OUT_E_CB_max_Defo_li	4.951e+03	<input checked="" type="checkbox"/>
Wand_OUT_E_QT_max_Defo	3.313e+03	<input checked="" type="checkbox"/>

calculate

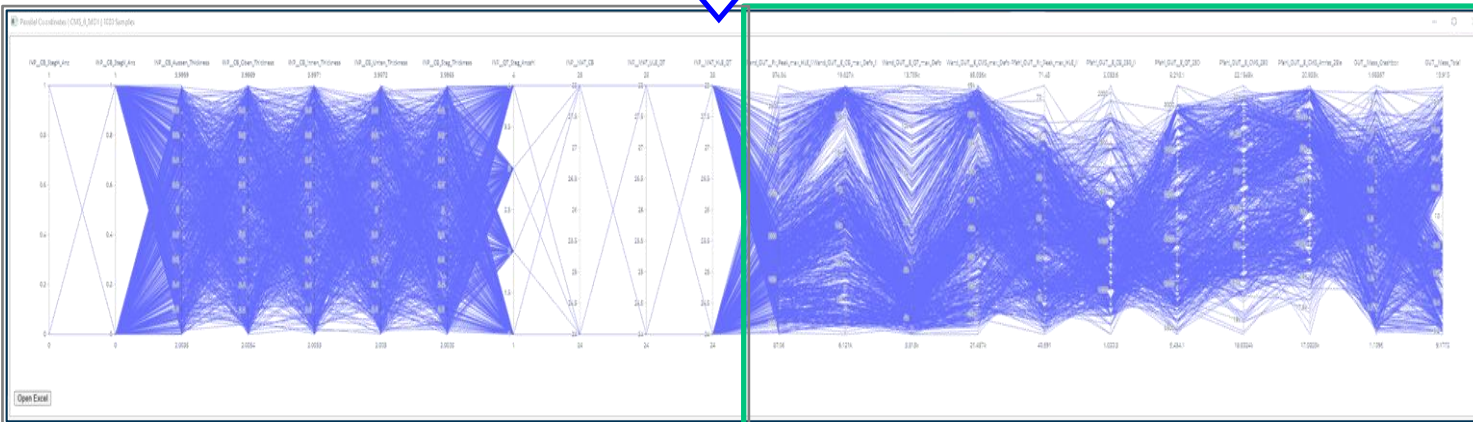
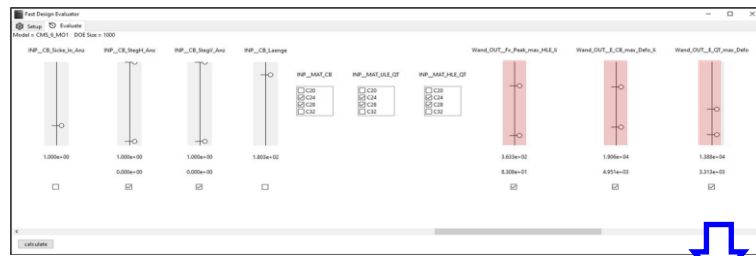


# Use Case

Finding a suitable parameter vector

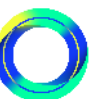
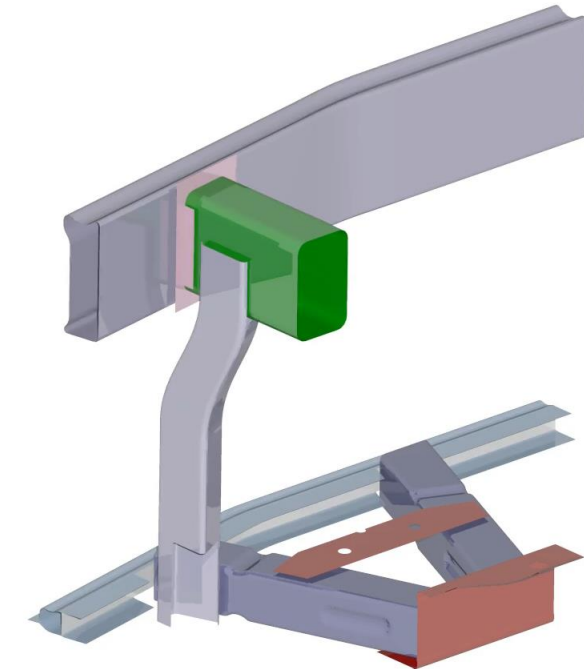
Solution space with Fast Design Evaluator:

- all ML- DOE experiments as line plots in a parallel-coordinate plot with all variable parameters
- interactive filters help to narrow down the experiments / configurations



Inputs

Outputs





# Use Case

Finding a new solution

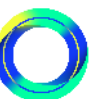
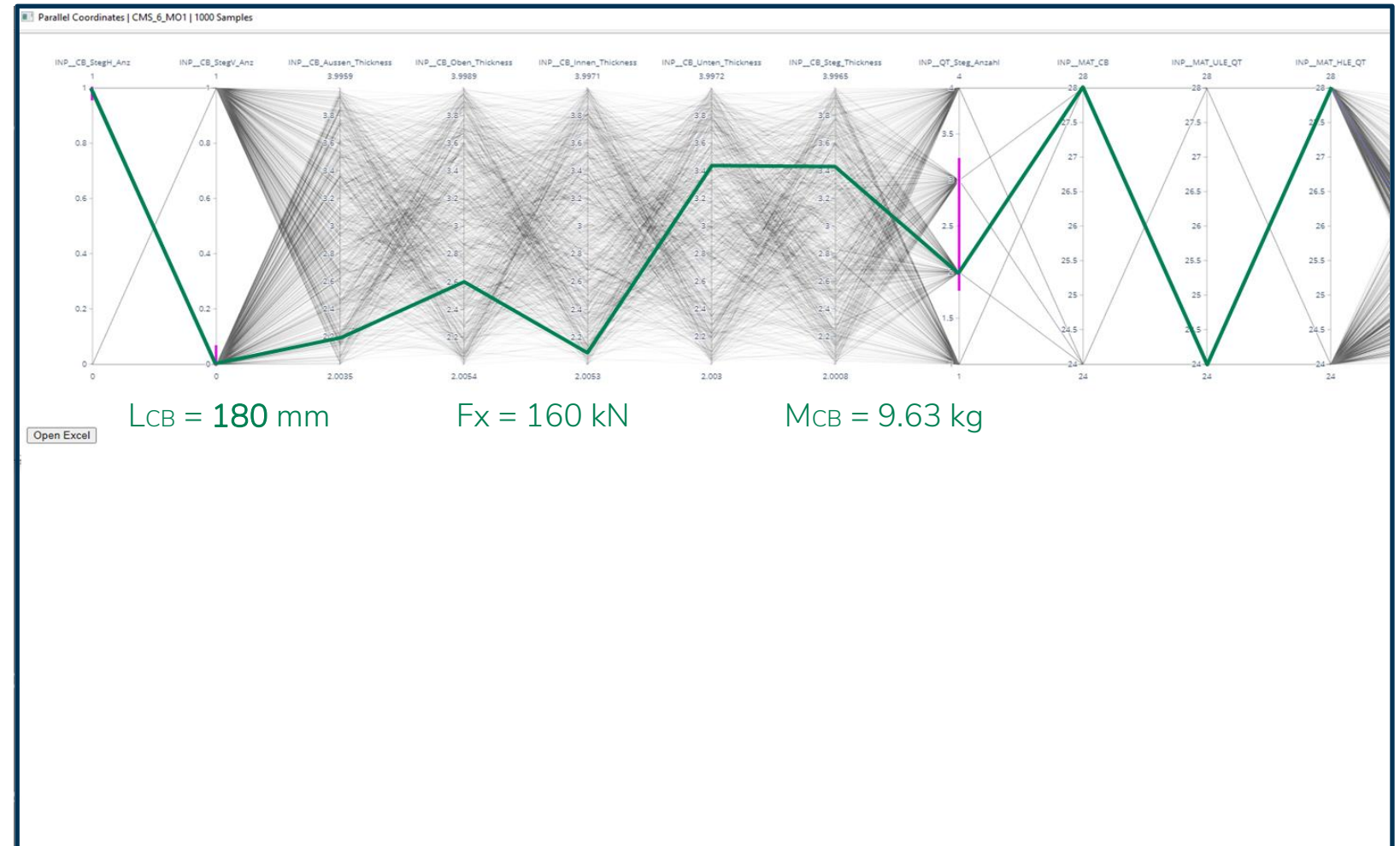
Task: reduce length by 20mm and find a new parameter set, that meets the target conditions

Modified distribution of thickness in crash-box

- ✓ Compensation of lower length
- ✓ Thus, higher force level

unchanged boundary conditions

- force level  $F_x < 200$  kN
- energy absorption wall load case  $> 45$  kJ
- energy absorption pile load case  $> 20$  kJ





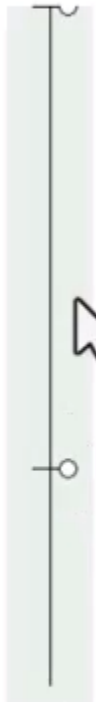
# CAIQ

COMPUTER AIDED CREATIVITY

# Fast Design Evaluator

10.000s of experiments in minutes

Model = CMS\_6\_MO1 DOE Size = 10000

INP  
CB\_Hi\_H1.398e+1  
7.886e+01INP\_CB\_Hi\_H  
input  
[50.089, 139.850]INP  
CB\_Hi\_V1.700e+02  
8.005e+01INP  
CB\_Vo\_V1.699e+02  
8.002e+01INP  
CB\_Vo\_H1.400e+02  
5.000e+01INP  
CB\_Sicke\_Aus\_Anz5.000e+00  
0.000e+00INP  
CB\_Sicke\_In\_Anz5.000e+00  
0.000e+00INP  
CB\_StegH\_Anz1.000e+00  
0.000e+00INP  
CB\_StegV\_Anz1.000e+00  
0.000e+00INP  
CB\_Laenge1.900e+02  
1.300e+02

Calculate

Save DOE

Save Setup

Load Setup

manipulate parameter ranges

INP  
AB\_EinAus



1.000e+00  
0.000e+00



INP  
MAT\_CB

- C20
- C24
- C28
- C32

INP  
MAT\_ULE\_QT

- C20
- C24
- C28
- C32

INP  
MAT\_HLE\_QT

- C20
- C24
- C28
- C32

Wand\_OUT  
Fx\_Peak\_...x\_HLE\_li



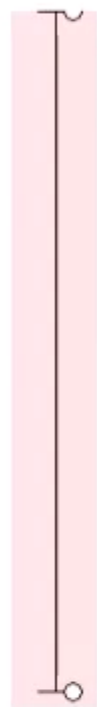
5.002e+02  
5.089e+01

Wand\_OUT  
E\_CB\_max\_Defo\_li



2.793e+04  
7.728e+01

Wand\_OUT  
E\_QT\_max\_Defo



3.369e+04  
6.429e+02

Wand\_OUT  
E\_CMS\_max\_Defo



7.259e+04  
4.324e+03

Pfahl\_OUT  
Fx\_Peak\_...x\_HLE\_I



1.388e+02  
1.531e+01

Calculate

Save DOE

Save Setup

Load Setup

output range sliders



INP  
CB\_Hi\_H



8.120e+01



INP  
CB\_Hi\_V



1.341e+02



INP  
CB\_Vo\_V



1.339e+02



INP  
CB\_Vo\_H



8.120e+01



INP  
CB\_Sicke\_Aus\_Anz



5.000e+00

0.000e+00



INP  
CB\_Sicke\_In\_Anz



5.000e+00

0.000e+00



INP  
CB\_StegH\_Anz



1.000e+00

0.000e+00



INP  
CB\_StegV\_Anz



1.000e+00

0.000e+00



INP  
CB\_Laenge



1.800e+02



Calculate

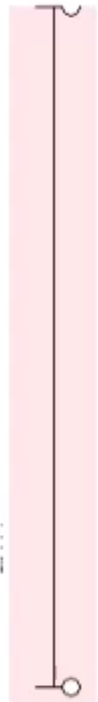
Save DOE

Save Setup

Load Setup

run first DoE



Wand\_OUT  
E\_QT\_max\_Defo

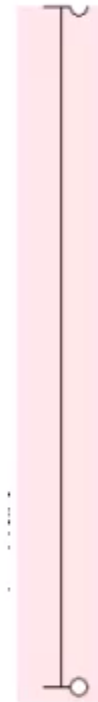
3.369e+04

6.429e+02

Wand\_OUT  
E\_CMS\_max\_Defo

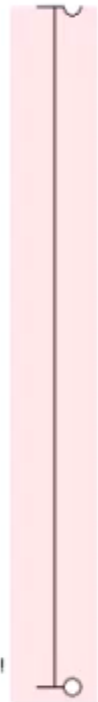
7.259e+04

3.811e+04

Pfahl\_OUT  
Fx\_Peak\_...x\_HLE\_li

1.388e+02

1.531e+01

Pfahl\_OUT  
E\_CB\_250\_li

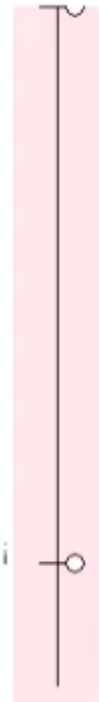
4.356e+04

1.314e+01

Pfahl\_OUT  
E\_QT\_250

1.886e+04

1.533e+03

Pfahl\_OUT  
E\_CMS\_250

7.032e+04

1.810e+04

Pfahl\_OUT  
E\_CMS\_Anriiss\_2Ele

5.125e+04

4.263e-07

OUT  
Mass\_Crashbox

2.625e+00

5.958e-01

OUT  
Mass\_Total

9.519e+00

6.638e+00

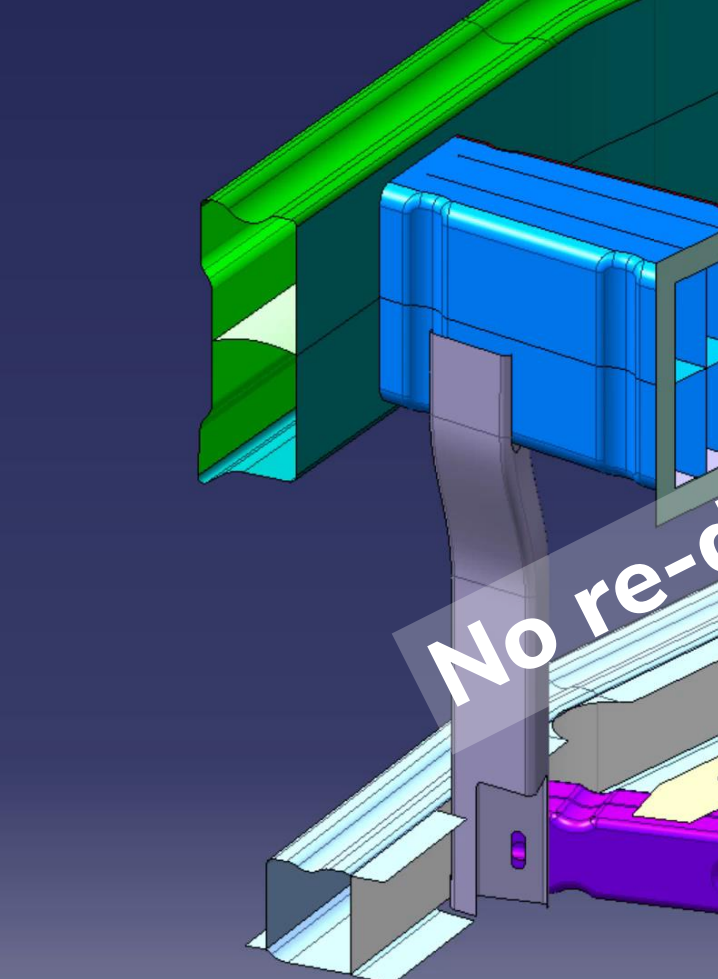
Calculate

Save DOE

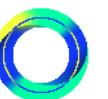
run third DoE iteration ( 2nd iteration skipped )

# Automated CAD-Generation on CSV-Input

Basis for CAD and 3D CAE evaluation



Parameter	unit	Variant 1	Variant 2	Variant 3	Variant 4	Variant 5	Variant 6	Variant 7	Variant 8	Variant 9
CB_Hi_H	mm	75,01	146,34	72,68	120,58	63,50	109,08	141,25	107,06	130,50
CB_Hi_V	mm	133,46	85,79	133,83	137,12	102,93	171,66	173,81	171,95	124,86
CB_Vo_V	mm	129,57	84,17	86,76	101,82	142,18	122,26	161,71	104,76	139,81
CB_Vo_H	mm	55,27	102,07	73,05	83,50	130,59	139,58	101,17	87,85	67,21
CB_Sicke_Aus_Anz		0	3	0	3	1	2	3	2	1
CB_Sicke_In_Anz		2	4	3	1	2	1	3	1	2
CB_StegH_Anz		2	1	0	1	1	1	0	0	1
CB_StegV_Anz		2	1	1	0	1	0	0	1	1
CB_Laenge	mm	178,74	175,03	170,81	141,08	172,74	162,43	173,12	130,44	174,13
CB_Aussen_Thickness	mm	5,9	4,25	3,90	2,55	1,63	2,49	1,55	2,95	1,28
CB_Oben_Thickness	mm	3,46	4,45	3,08	2,96	2,56	4,07	1,80	1,03	2,27
CB_Innen_Thickness	mm	2,78	3,87	1,44	4,26	3,12	1,98	3,78	1,84	3,26
CB_Unten_Thickness	mm	2,74	3,97	2,59	2,40	3,55	3,59	1,67	2,55	1,57
CB_Steg_Thickness	mm	2,52	2,43	3,67	1,74	3,69	2,88	1,00	3,04	3,02
QT_V	mm	105,22	149,46	167,05	145,38	141,16	163,22	117,59	172,81	102,27
QT_H	mm	51,61	67,10	40,67	60,83	74,80	58,48	63,73	59,81	54,02
QT_Sicke_Anzahl		0	0	1	1	2	2	0	1	1
QT_Steg_Anzahl		2	1	1	1	3	0	4	0	0
QT_Sicke_Position	mm	73,70	90,59	140,93	132,86	221,68	112,48	80,69	84,59	26,43
QT_Oben_Thickness	mm	2,37	3,19	1,52	1,20	4,19	1,08	4,17	2,33	3,70
QT_Unten_Thickness	mm	3,36	4,39	3,43	3,33	4,17	2,54	2,47	1,54	1,51
QT_Hinten_Thickness	mm	1,21	1,12	3,38	1,55	3,20	2,86	1,97	4,37	3,62
QT_Vorne_Thickness	mm	2,50	3,11	1,55	1,29	3,06	2,99	3,09	3,42	1,36
QT_Steg_Thickness	mm	2,13	1,97	3,52	1,49	1,49	2,19	3,35	3,78	3,98
ULe_H	mm	29,59	47,52	39,82	48,61	38,29	26,80	36,47	43,35	45,41
ULe_V	mm	59,87	37,74	22,16	37,17	20,13	48,90	24,75	25,32	35,53
ULe_Thickness	mm	1,76	1,88	1,35	2,16	2,07	2,08	1,25	2,50	2,19
ULe-Teile	mm	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
AB_Breite	mm	36,29	10,91	32,01	42,44	39,22	41,85	48,71	27,95	33,36
AB_Thickness	mm	3,81	5,24	3,65	5,82	4,54	2,43	3,58	2,87	5,07
AB_EinAus		0	1	1	1	0	0	0	1	1



# Conclusion

out of >2.200 experiments

## Goals reached:

- high responsiveness (minutes)
- easy-to-use application
- good accuracy for concept decisions

## Special: recursive result delimitation

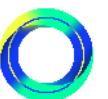
## To be considered:

- geometric model
  - parametric CAD model (stability!)
  - logical dependencies
- generic approach preferable in the beginning
  - increasing model complexity step by step

### think big - start small

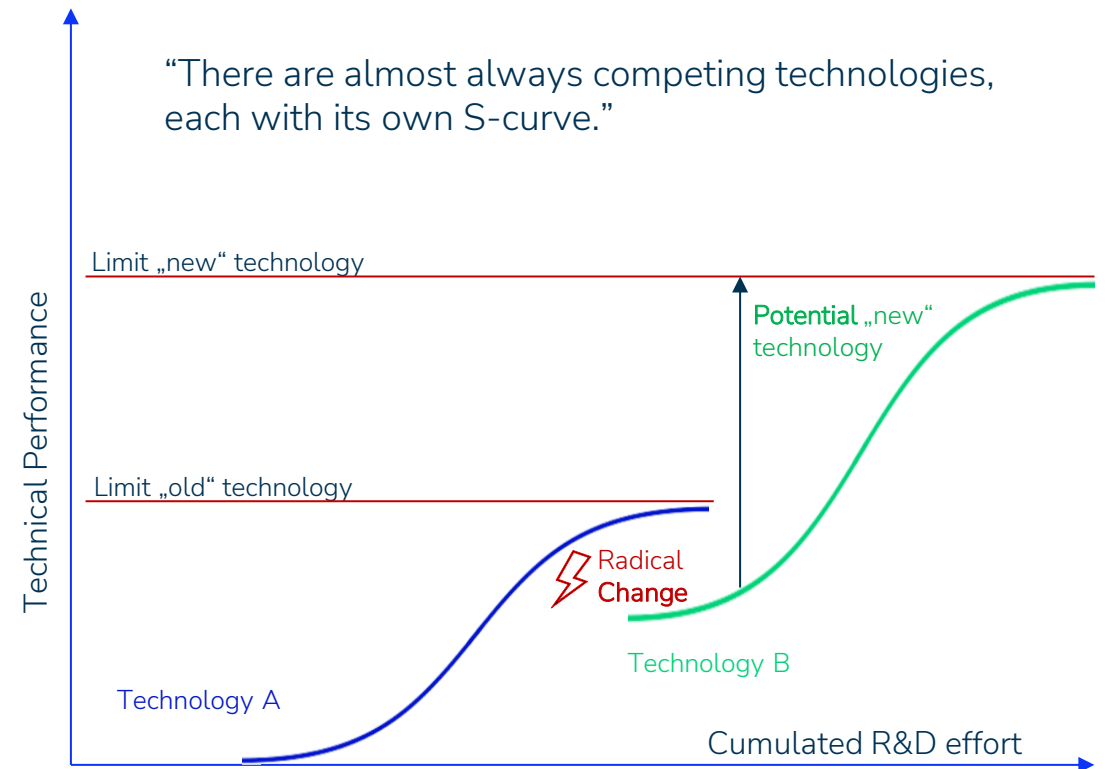
- number of simulations  $\geq n^2$
- critical load cases only
- requested accuracy ~ design maturity

➔ **Starting investment required!**  
(simulations, training, knowhow)



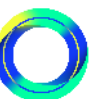
# Next steps (wip)

- Improvements
  - app usability
  - accuracy (adaptive DoE)
  - process integration (customer environment)
- Learning from data
  - derive general recommendations
  - understanding data science better
- Provide service to e. g. designers



Forster, Richard (1986) to Innovation: “The Attacker’s Advantage”

→ ML models are changing the world of engineering!



# Platform Integration

Simulation Lifecycle Management → Data-Based Engineering

direct access to data and kpi information

The screenshot displays a software dashboard with the following components:

- Left Sidebar:** Navigation menu with options like 'Produkte', 'Projekte', 'Meine Aufgaben', 'Task Boards', 'Fehler', 'Maßnahmen', 'Workflows', 'Organisationen', 'Automatisierung', and 'Administration & Konfiguration'.
- Top Header:** 'Meine Startseite' and a list of active dashboards: 'Fahrsitz 2021', 'My Automations', 'Spiralfelder 2021', 'Beam 2021', 'DOE-Dashboard', 'Dashboard #6', 'Dashboard #7', and 'Neues Dashboard'.
- Main Content Area:**
  - Table:** A table with columns 'Name', 'Beschreibung', 'max deflec...', and 'max rotatio...'. It lists various CAD variants (V13 to V01) with their descriptions and numerical values.
  - Project Tasks:** A list of tasks under 'Projektaufgabe ...' including 'Bewertung Konzeptstudien', 'Vorserie', 'Serienentwicklung', 'Bauteiloptimierung', 'Erstbewertung Lastfallkollektive', 'Phase1', and 'Virtuelle Bewertung Konzept 1'.
  - Automation List:** A list of SDMs (Subautomations) such as 'Subautomation - create\_presentation', 'CAEDocument creator', 'Batch Mesh (SeatStructure)', 'JobSubmit', and 'Animator'.
- Right Panel:** 'Aktivitäten' section showing user interactions, including a post by 'Eaton, Clarissa' with a date of '16.05.2022' and a 3D model image.

provision of CAE-Apps for optimum work efficiency





# Danke!

Doing a job RIGHT the first time  
gets the job done.

Doing the job WRONG fourteen times  
gives you job security.

(Stephen Hawkings)



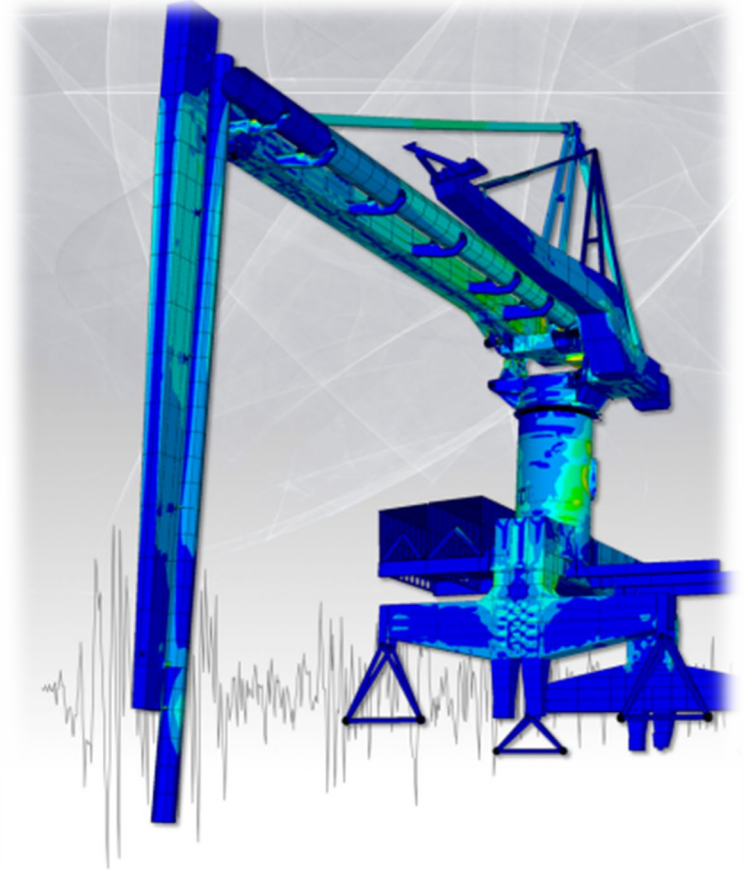
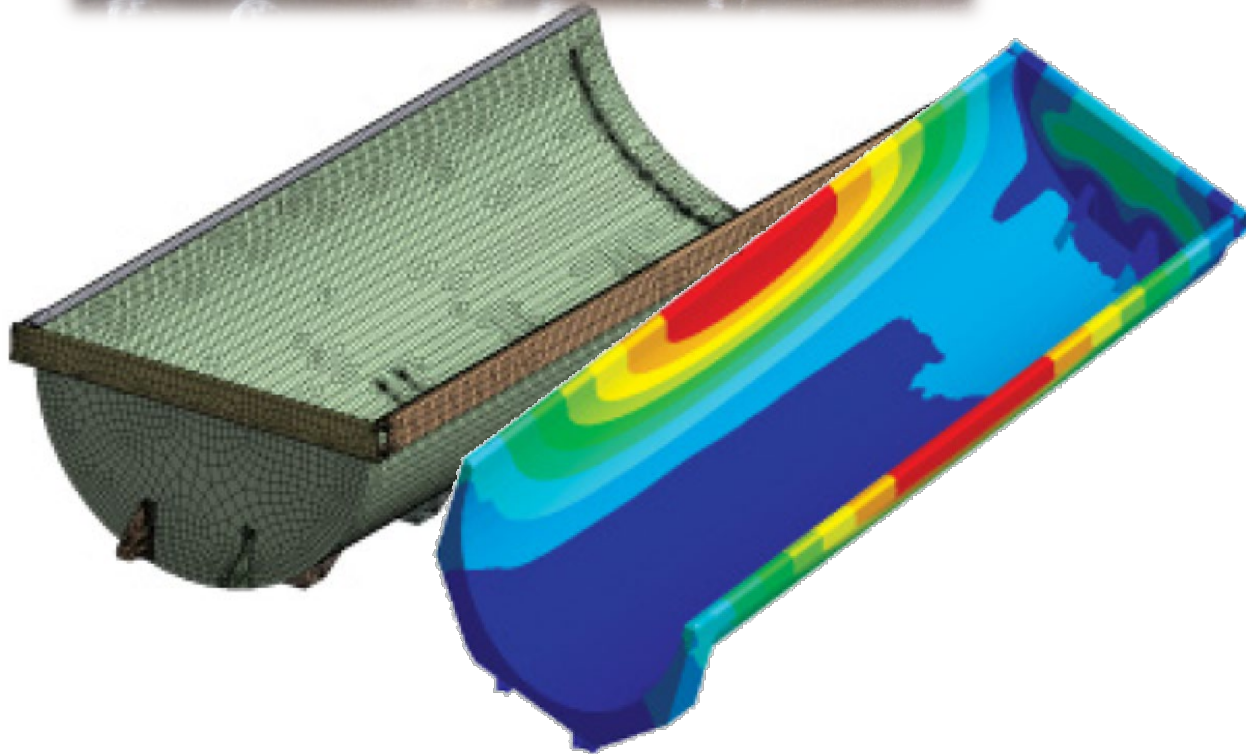
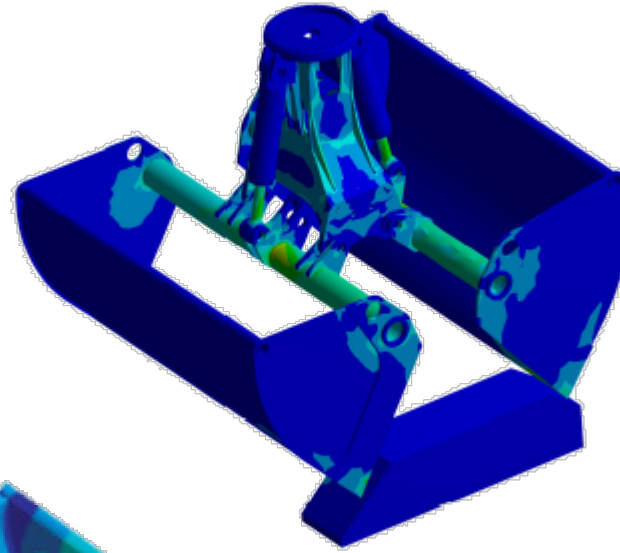
Für weitere Fragen finden Sie uns auch in der Ausstellung!

# Wie man mit Simulation Zeit und Ressourcen spart

Christian Stautner

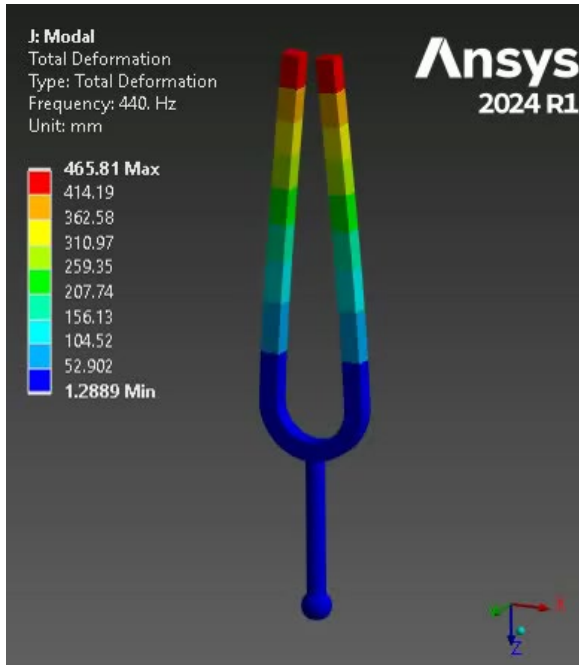
© INNEO Solutions GmbH | [www.inneo.com](http://www.inneo.com)

**INNEO**<sup>®</sup>  
That's IT.



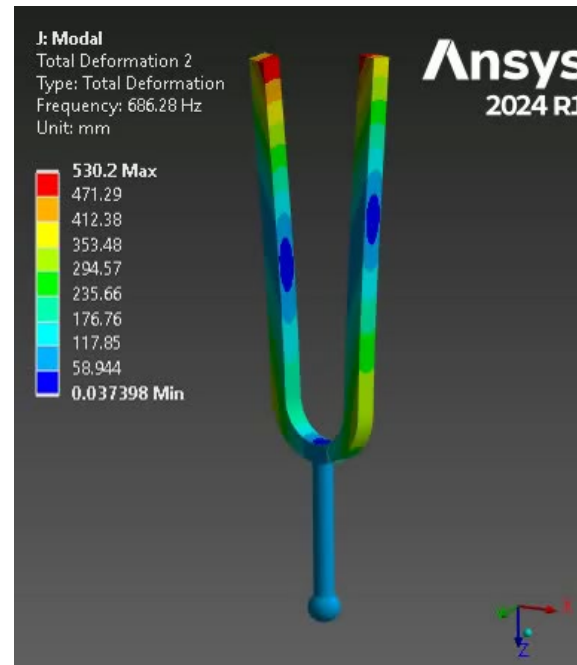
Als Ergebnis liefert die Modalanalyse die Eigenfrequenzen und deren Schwingformen, die sogenannten Eigenmoden.

## 1. Eigenfrequenz



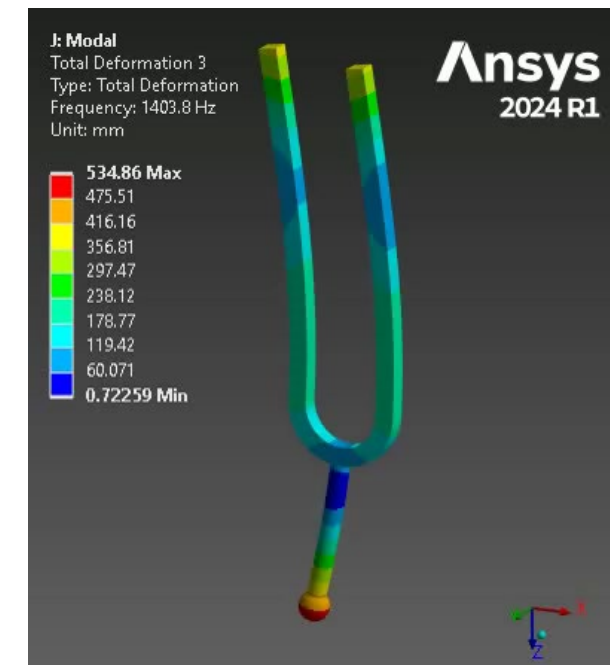
440 Hz

## 2. Eigenfrequenz



686 Hz

## 3. Eigenfrequenz

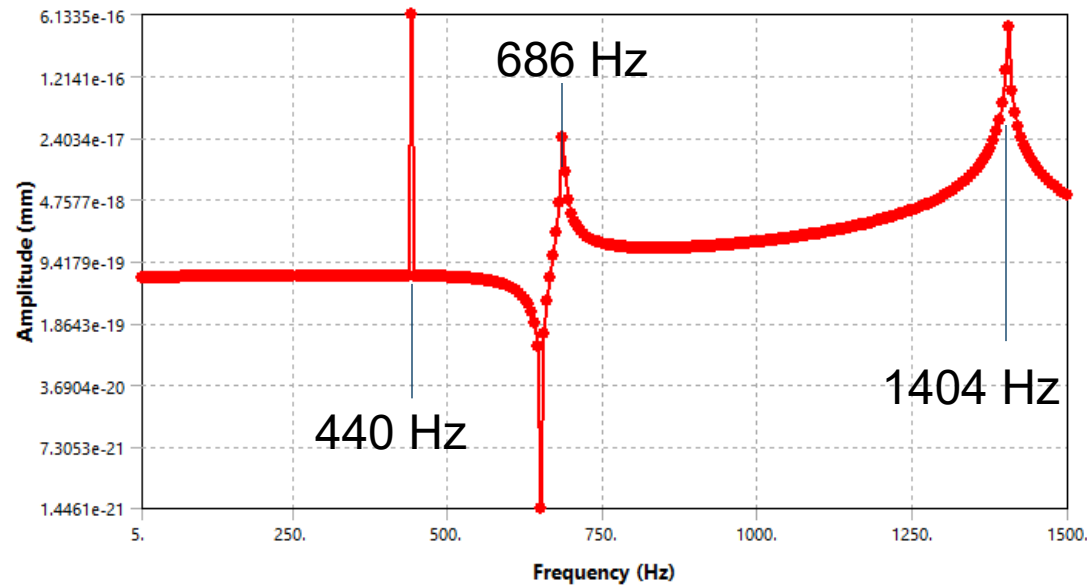


1404 Hz

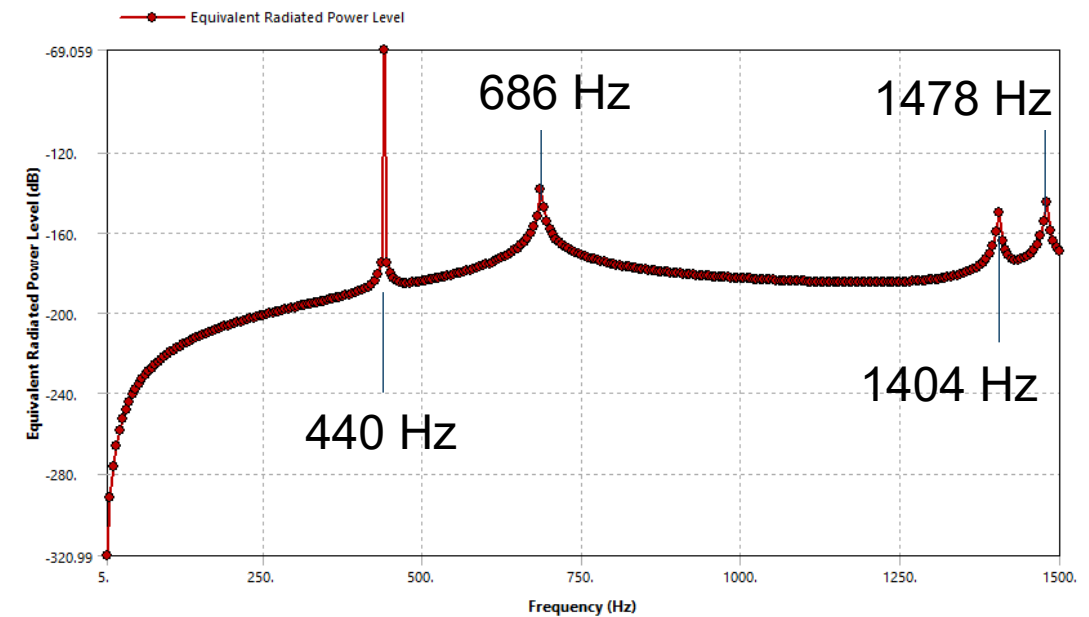
Harmonische Antwort Analyse Entspricht der Simulation beispielsweise eines Shakertests (Frequenz Sweep)

Anregung in einem Frequenzbereich von 0 – 1500 Hz mit konstanter Amplitude

Verformung in X-Richtung



Schallleistungspegel

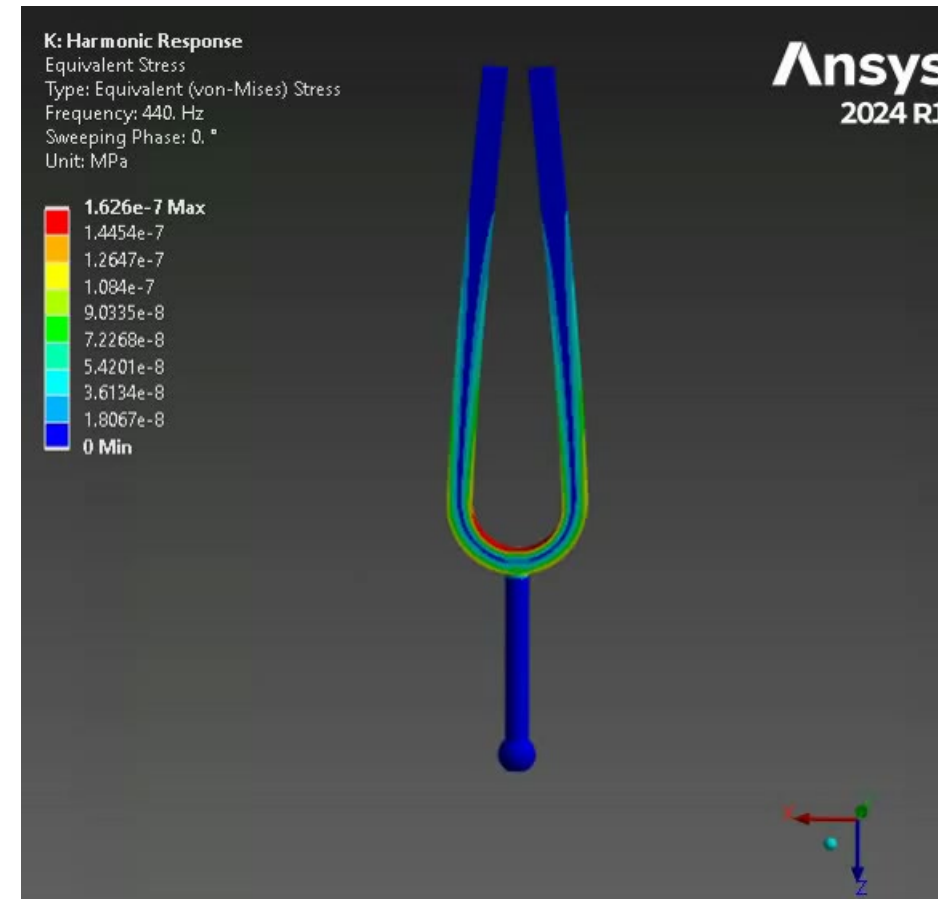


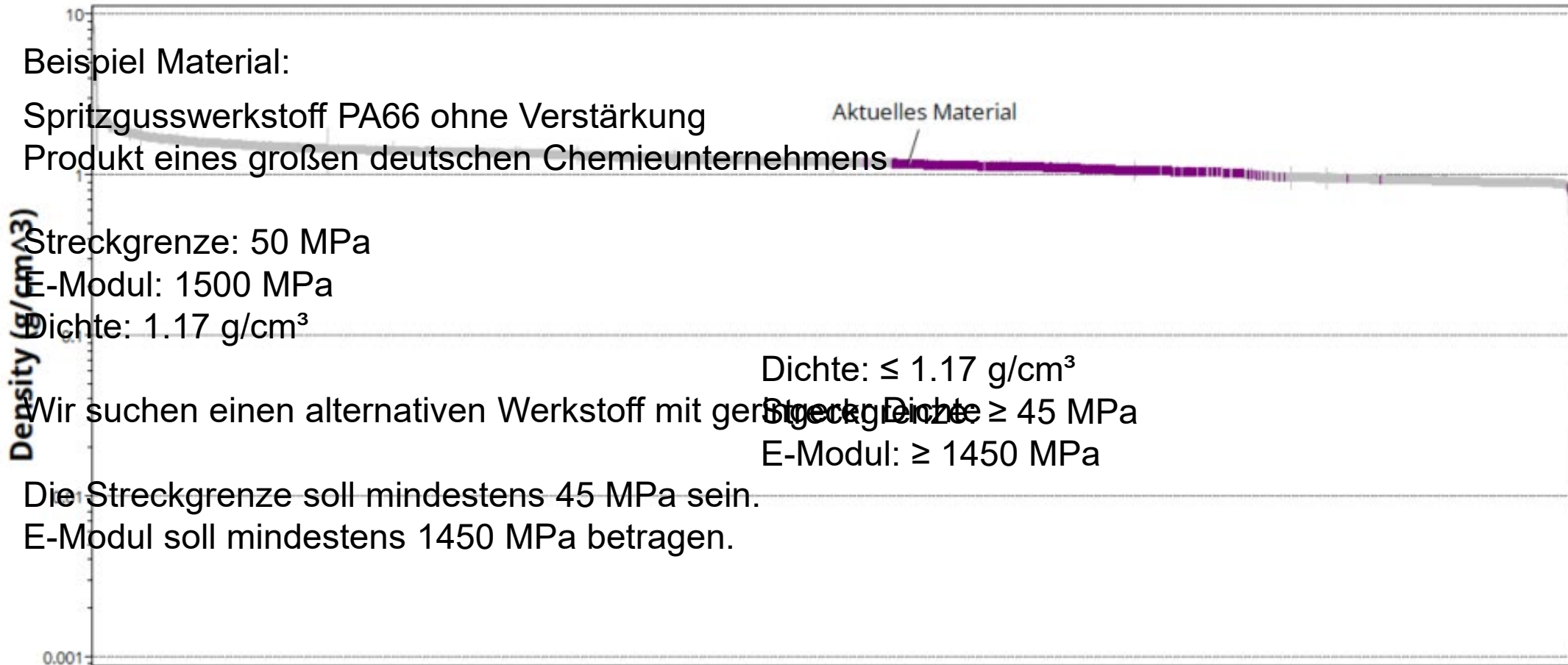


## Zusätzliche Ergebnisse: Entstehende Spannungen beim Erreichen der Eigenfrequenz

Sehr geringe Spannung für die Stimmgabel

Wir bekommen eine Aussage über die tatsächlichen Spannungen im Bauteil, beim Anregen der Eigenfrequenz





107586 Polymerwerkstoffe in der Datenbank

→ nach Berücksichtigung der mechanischen Kennwerte und der Dichte, sind noch 1994 übrig.

- Um eine engere Auswahl zu treffen, stellen wir diese 1994 Werkstoffe als Vergleich von Dichte über Festigkeit dar.

Kriterien:

Streckgrenze  $\geq 45$  MPa

Dichte  $\leq 1.17$  g/cm<sup>3</sup>

Kandidat 1:

Streckgrenze: 48 MPa

Dichte: 0.19 g/cm<sup>3</sup>

Kandidat 2:

Streckgrenze: 138 MPa

Dichte 1.13 g/cm<sup>3</sup>

Kandidat 3:

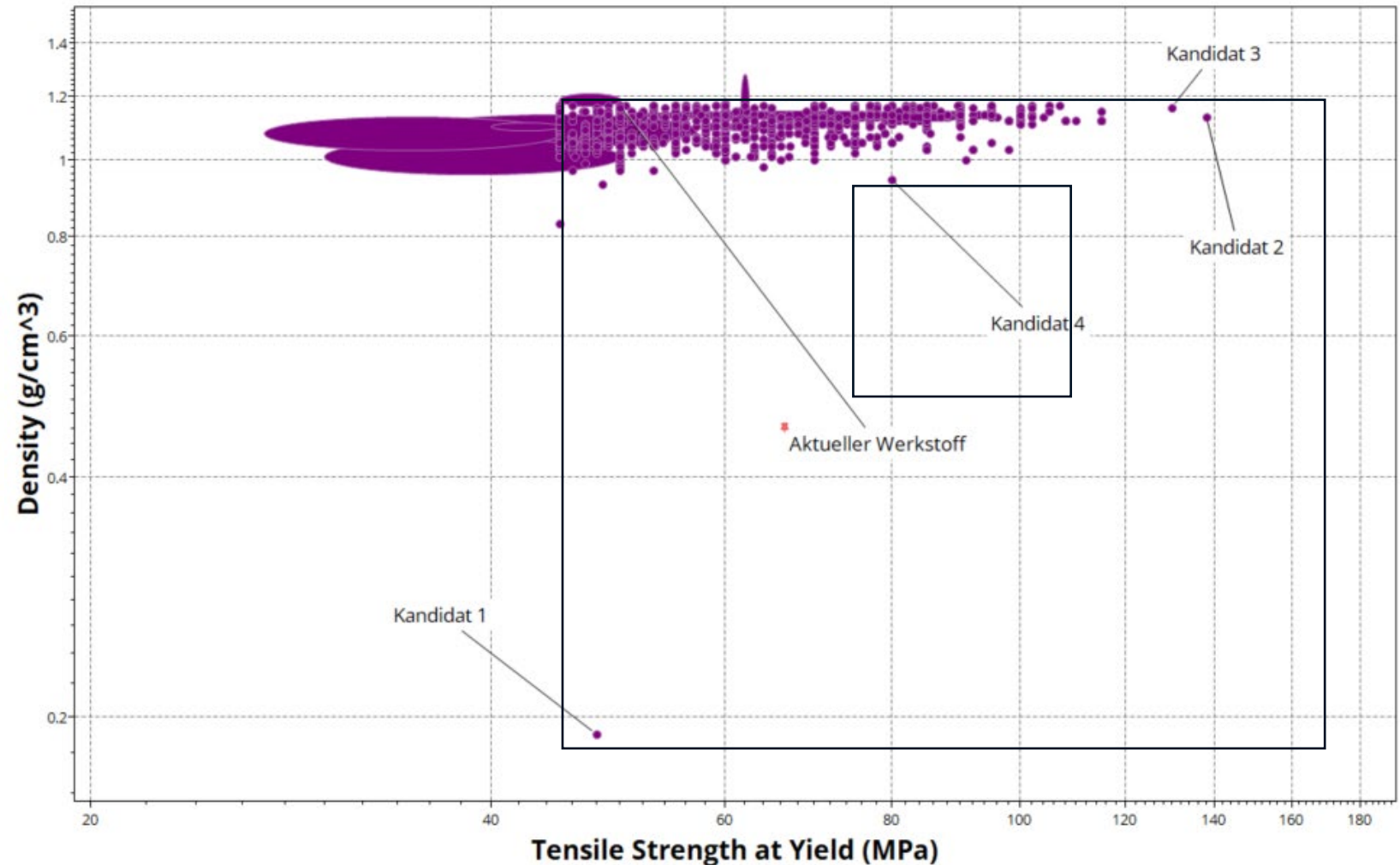
Streckgrenze: 130 MPa

Dichte: 1.16 g/cm<sup>3</sup>

Kandidat 4:

Streckgrenze: 80 MPa

Dichte: 0.945 g/cm<sup>3</sup>



## • Vergleichstabelle

	Aktueller Werkstoff	Kandidat 1	Kandidat 2	Kandidat 3	Kandidat 4
<span>^</span> General Information					
Manufacturer / Supplier	LANXESS GmbH	SABIC	Orion Performance Compounds, Inc.	Grupa Azoty S.A.	AD majoris
Product Name	Duurethan®	INP™ FLICRIN™	i-OnComp™	Tarnamid®	MAJORIS
<span>^</span> Mechanical					
Tensile Modulus (MPa)	1500	1950 ↑	8270 ↑	8000 ↑	5400 ↑
Tensile Strength at Yield (MPa)	50	48 ↓	138 ↑	130 ↑	80 ↑
Tensile Strength at Break (MPa)		56	121		
Tensile Elongation at Yield (% strain)	20				3.4 ↓
Tensile Elongation at Break (% strain)		100	2.1	4.5	
Flexural Modulus (MPa)	1600	1900 ↑	7580 ↑	6700 ↑	4850 ↑
Flexural Strength (MPa)	55	72 ↑	194 ↑	195 ↑	127 ↑
Flexural Strength at Yield (MPa)		74			
<span>∨</span> Impact					
<span>∨</span> Hardness					
<span>∨</span> Thermal					
<span>∨</span> Electrical					
<span>∨</span> Key Features, Uses & Ratings					

## Fazit:

- Die Auswahl der möglichen Werkstoffe ist groß, kann über sinnvoll gewählte Kriterien eingeengt werden.
- Reduktion auf einen Materialtyp auch möglich. → Reduktion auf PA66 ergibt noch 505 Ergebnisse

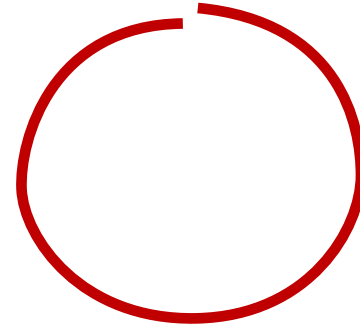
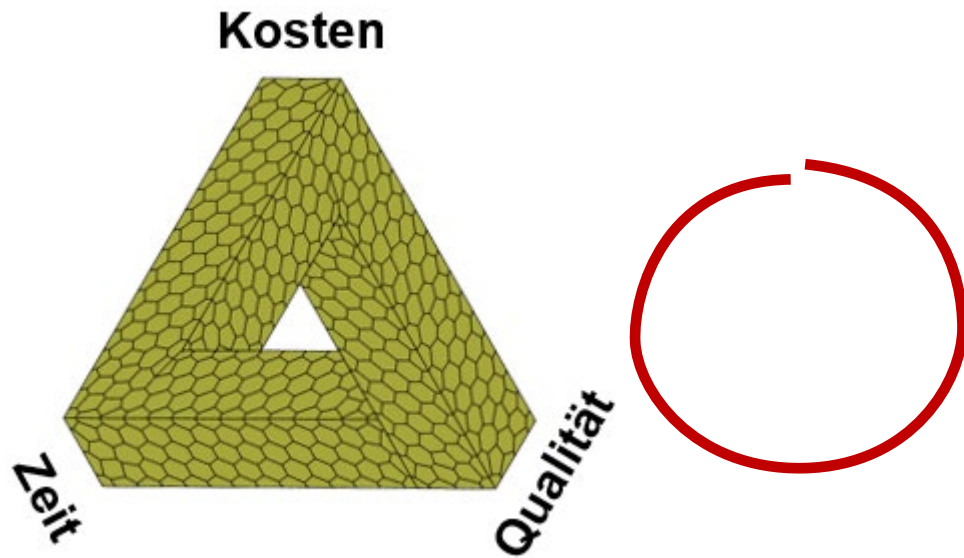
## Nächste Schritte:

- Überprüfen des aktuellen Designs mit den ausgewählten Werkstoffen
  - gewählte Werkstoffe können aus Granta Selector exportiert werden
- Optimierung des Designs bei stark verbesserten Werkstoffkennwerten
  - Weitere Materialeinsparung durch Volumenreduktion



**Einsatzgebiet der Optimierung**







## Typische Fragestellungen

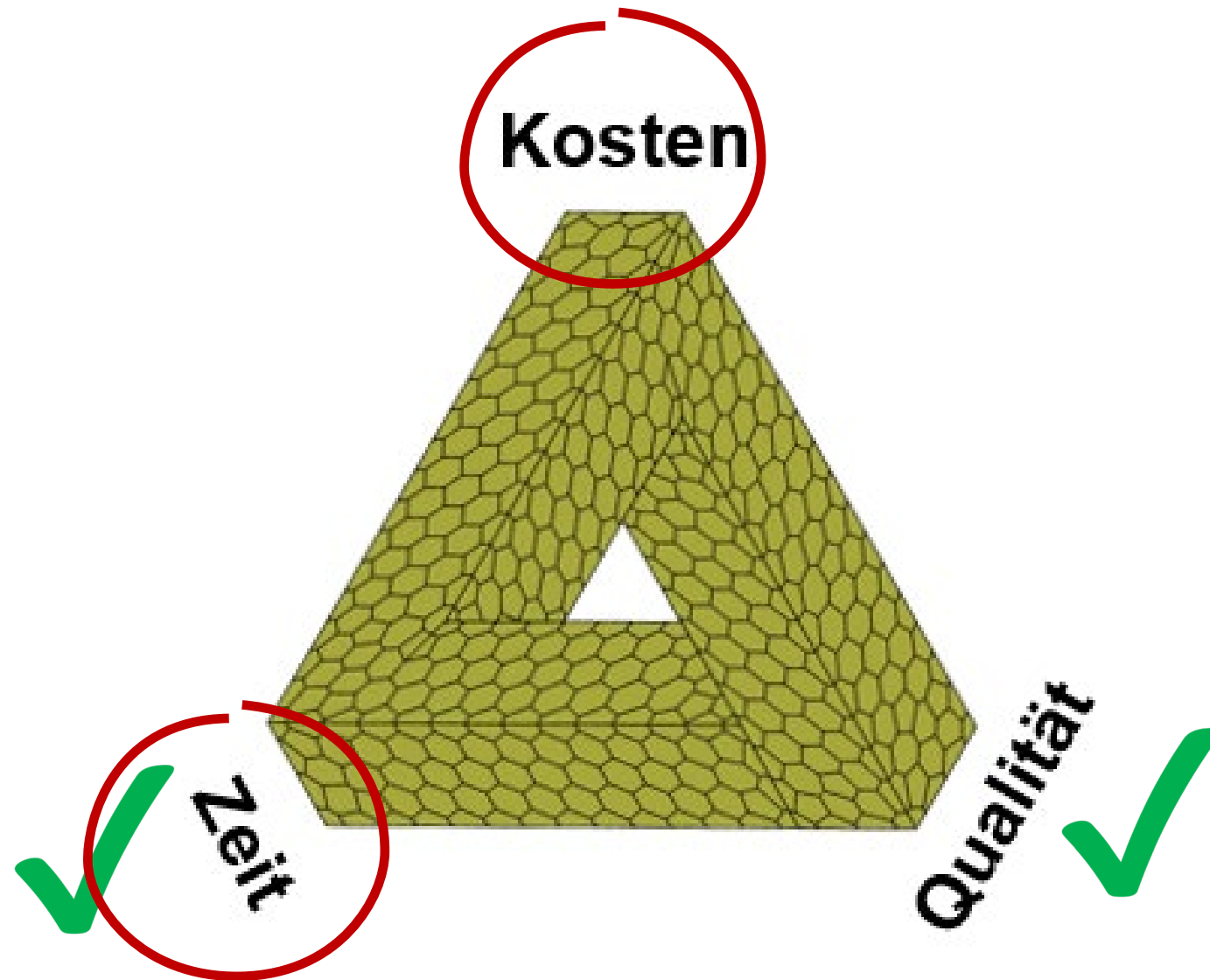
- Erfüllt mein Design die Anforderungen?
- Wird mein Bauteil die Belastungen aushalten?
- Kann ich noch was optimieren?

- Wird es im Betrieb funktionieren?

## SIMULATION IST DIE ANTWORT

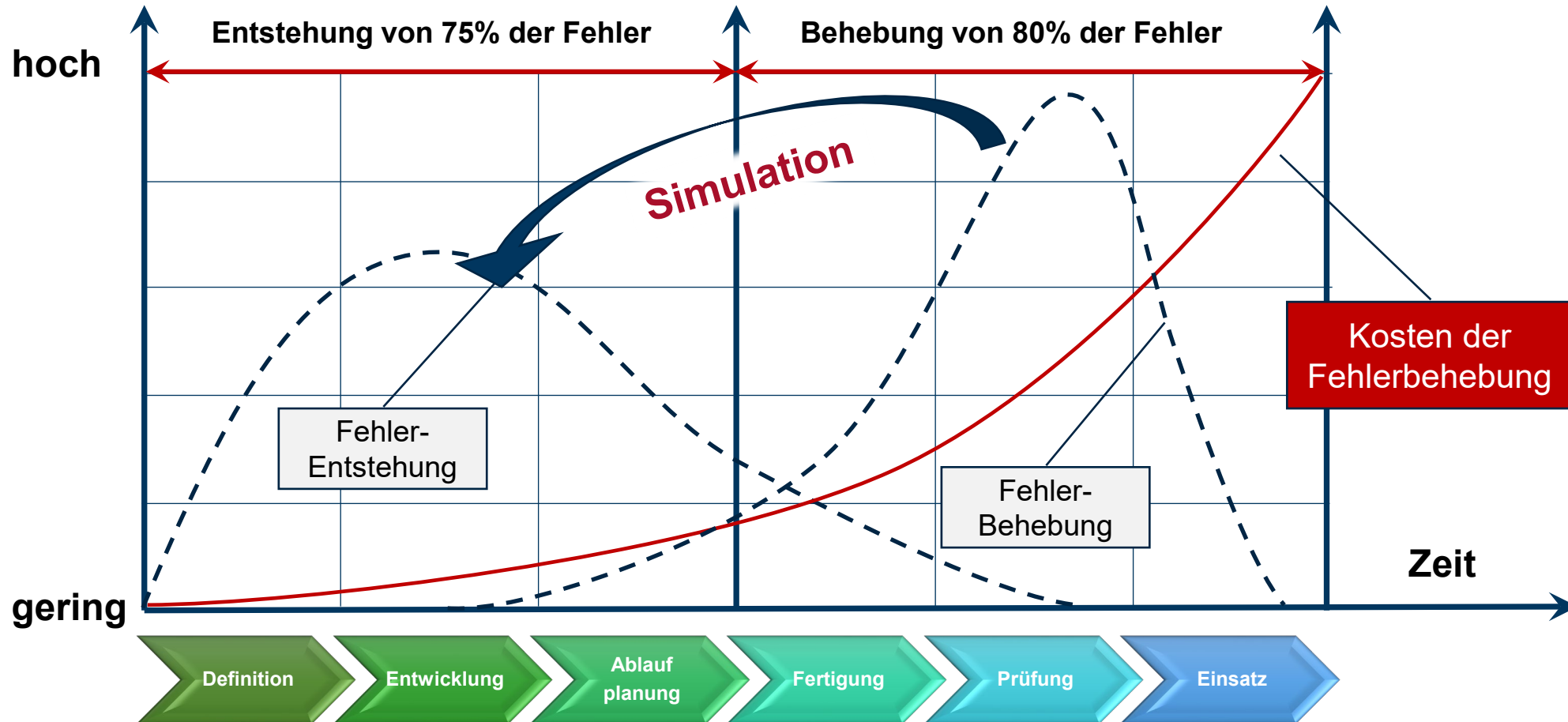
Simulation ermöglicht schon bereits in der Konzeptphase der Entwicklung Prognosen über die Performance zu erstellen um damit das Design abzusichern

- Wird es im Betrieb funktionieren?

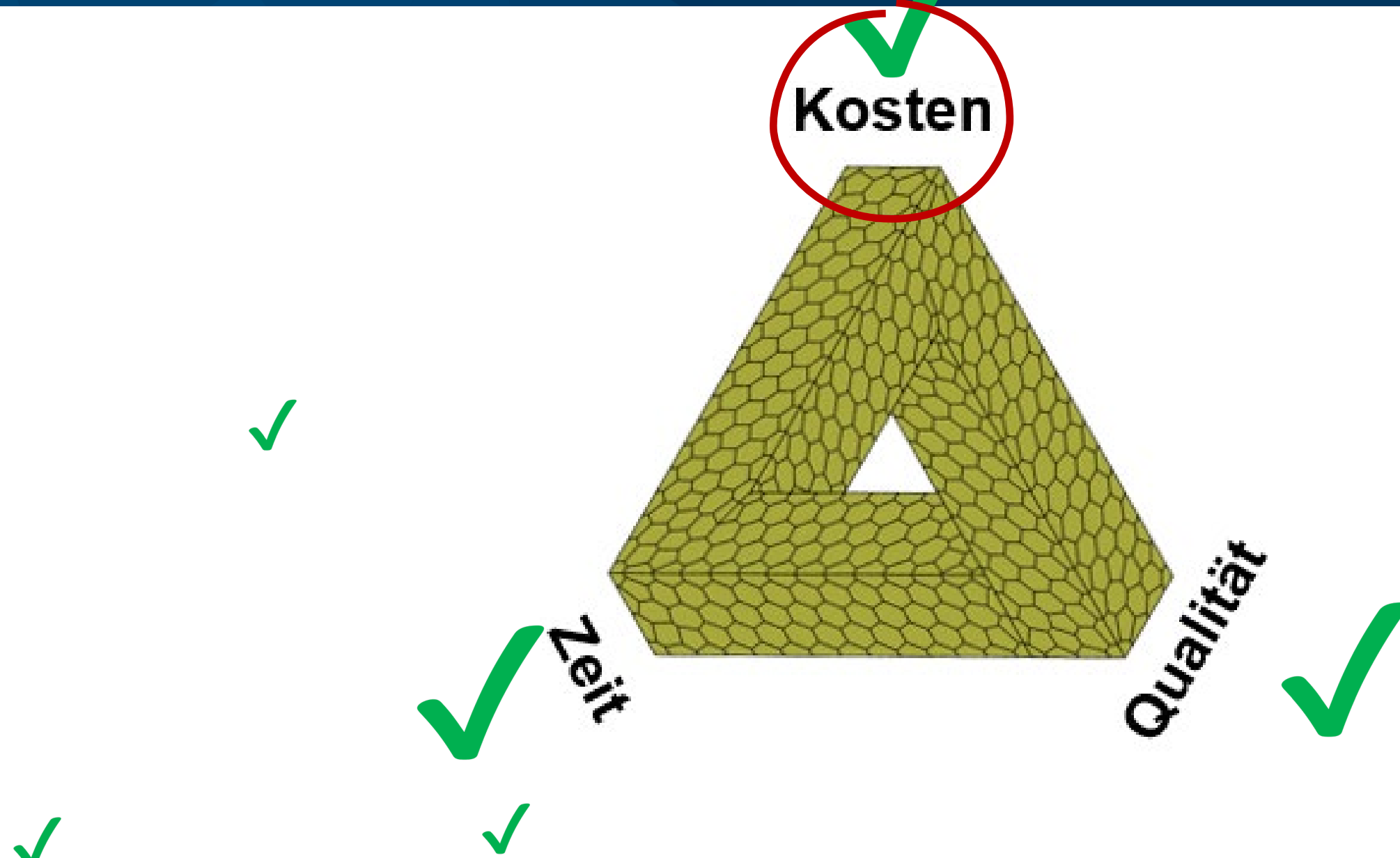


# Zehnerregel der Fehlerkosten

Die Kosten zur Behebung eines Fehlers verzehnfachen sich mit jeder Produktionsstufe



Konstruktionsbedingte Fehler, die erst beim Endkunden auftreten, erzeugen die höchstmöglichen Fehlerkosten

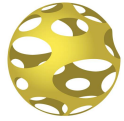




# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



**INNEO**®  
That's IT.



3D METALL THEOBALD  
METAL · ON · DEMAND

5 K-TÄG  
2 JAHRE

25. Bayreuther  
3D-Konstrukteurstag

11. September 2024

*3D-Metalldruck in der Praxis*

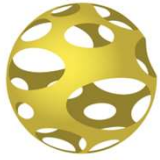
*typische Missverständnisse und wie sie sich vermeiden lassen*

➤ **Einführung**

➤ 3D-Metalldruck: powder bed fusion-laser beam

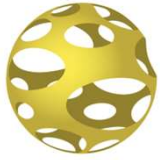
➤ Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften

➤ Anwendungen und Leitlinien




# Vorstellung

- Ausbildung:
  - Industriemechaniker, Spanner-Pollux GmbH
  - Diplom Wirtschaftsingenieur, TU Dresden
  - MBA an der HHL
  
- Erfahrung:
  - selbständig seit Ende 2015
  - davor Angestellter im mittelständischen Sondermaschinenbau: Assistent technische Leitung, Leiter Vorfertigung, Leiter Qualitätsmanagement
  
- 3D-Metall Theobald e.K.
  - Lohnfertigung: 1.4404, 1.4542 und CuSn10
  - Eintägiges Praxistraining
  - Produkte: Werkzeuge zu Verarbeitung von Kleinteilen



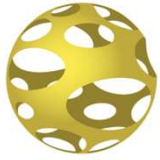
# typische Missverständnisse

## Additiv gefertigte Metallwerkstücke ...

- sind zu teuer. → Bauteile zu groß – zu geringe Komplexität
- haben eine schlechte Oberfläche. → Verglichen womit?  
→ Welche Bereiche sind funktionsrelevant?
- halten nicht. → teilweise bessere Werkstoffeigenschaften  
als konventionell gefertigte Teile
- brauchen wir nicht ...  
... können alles zerspanend fertigen. → Mangel an Wissen, keine Idee zu den  
Anwendungsfeldern
- Mit Additiver Fertigung kann man alles herstellen.  → fertigungsgerechte Konstruktion notwendig



- Einführung
- **3D-Metalldruck: powder bed fusion-laser beam**
- Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften
- Anwendungen und Leitlinien

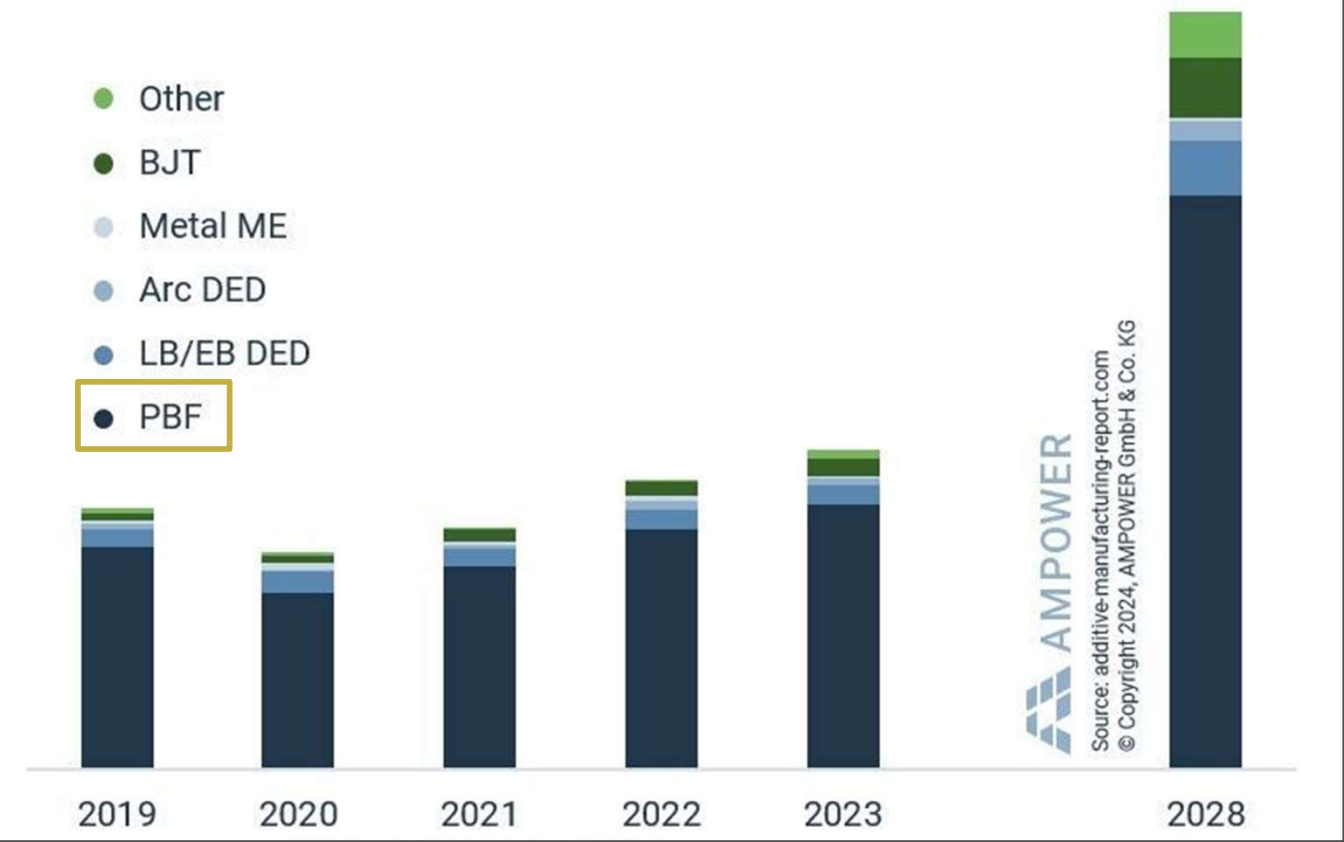


# Additive Fertigung von Metallteilen - Verfahren

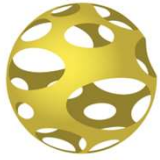
Prozesskategorien (DIN EN ISO/ASTM 52900)

- **pulverbettbasiertes Schmelzen, PBF, powder bed fusion**
- Materialauftrag mit ge...
- Freistrahl-Bindemittel...
- Materialextusion, MEX
- Freistrahl-Materialauftr...
- (Schichtlaminiierung, S...
- (badbasierte Photopol...

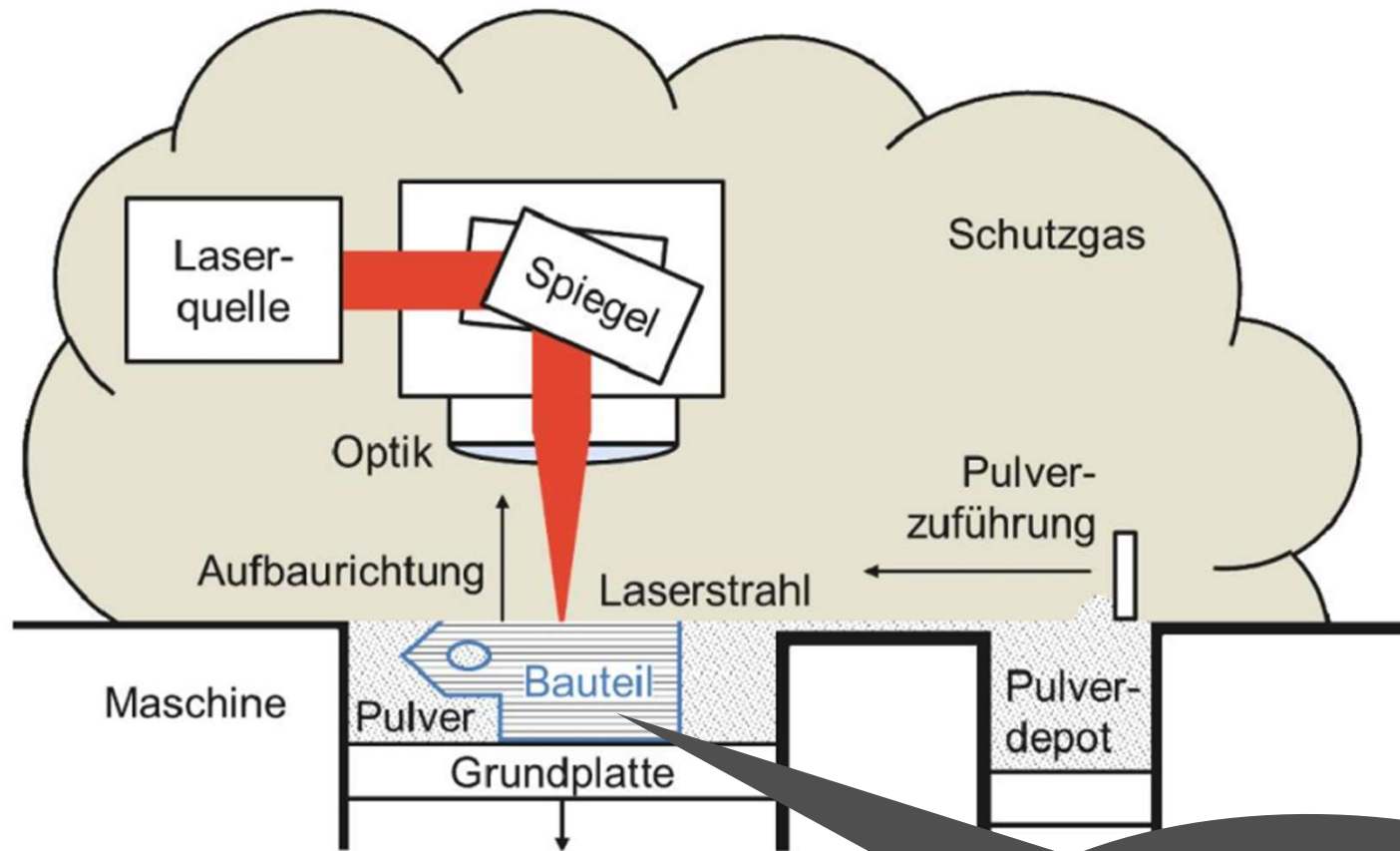
Metal equipment revenue by technology 2019 to 2023 and forecast 2028 [EUR billion]



Quelle: Abruf LinkedIn 21.8.2024

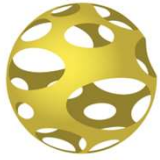


# PBF - Funktionsprinzip



Quelle: Masterprojekt Kießling, Valentin 2022

**Je größer das  
aufgeschmolzene  
Volumen, desto  
teurer!**

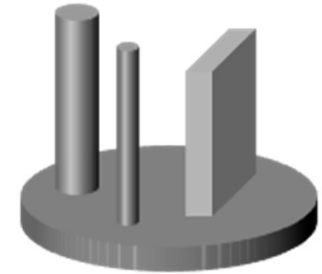


# Eigenheiten des PBF-Prozesses

## ➤ Serielle vs. Parallele Produktion

- Bau unterschiedlicher Werkstücke in einem Druckjob
- Kein Rüstaufwand zwischen unterschiedlichen Werkstücken

→ **Einzelstücke, Kleinserien**



## ➤ Geschwindigkeit des Herstellungsprozesse vs. Gesamtdurchlaufzeit

- Der einzelne Druckjob dauert lange,
- kann aber mehrere konventionelle Arbeitsgänge ersetzen

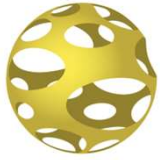
→ **einfacherer & schnellerer Gesamtprozess**

## ➤ Zusammenspiel mit dem Post-Processing

- In der Regel gilt: kein 3D-Metalldruck ohne Zerspanung

→ **weniger Zerspanung, schnellerer Prozess**

## ➤ Produktivität vs. Qualität



# Spektrum – Verfahrensgrenzen

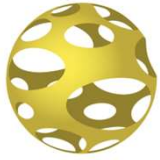
<b>Hersteller</b>	3D Microprint (EOS)	Trumpf	Trumpf	Nikon SLM Solutions
<b>Maschine</b>	DMP60	TruPrint 1000	TruPrint 5000	NXG XII 600 E
<b>Auftragsrate</b>		2-18 ccm/h	5-180 ccm/h	bis 1000 ccm/h
<b>Schichtstärke</b>	1 – 5 µm	10-50 µm	30-150 µm	120 µm und >
<b>Fokus- Ø</b>	≤ 30 µm	55 µm	80 µm	80 -160 µm
<b>Bauraum in mm</b>	Ø60 x H30	Ø100 x H100	Ø300 x H400	600x600x1500
<b>Laser</b>	50 Watt	1-2 x 200Watt	3 x 500 Watt	12 x 1000 Watt
<b>Stand:</b>	07/2024	<b>Mitte 2022</b>	07/2024	07/2024

**Auflösung**

**Produktivität**







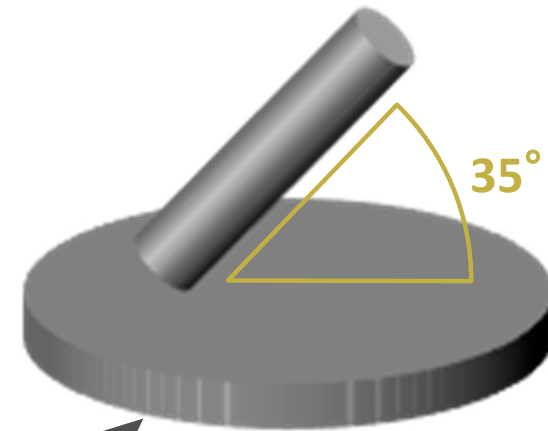
# Stützstrukturen

## ➤ Funktion:

- Stabilisierung der ersten vollaufgeschmolzenen Schichten im Pulverbett
- Fixierung des Bauteils auf der Plattform
- Kompensation von Verzug
- Wärme abführen

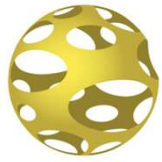
## ➤ Downskin-Winkel:

Winkel zwischen der Bauplattform und einer Downskin-Fläche.



**mehr Stützen – mehr  
manuelle & maschinelle  
Nachbearbeitung**

Quelle: ISO/ASTM 52911-1:2019, eigene Ergänzungen



# Fertigungsgerechte Konstruktion – Robotergreifer

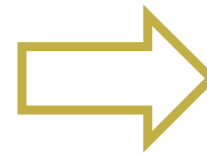
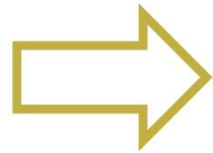
Ursprung  
112 €/Stk.\*



Reduktion Nachbearbeitungskosten  
85€/Stk.\*



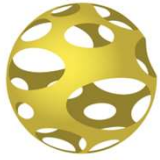
Funktionsintegration  
88€/Stk.\*



**Zusätzliche Funktion  
– keine zusätzlichen  
Fertigungskosten!**

Quelle: Zusammenarbeit mit

- Einführung
- 3D-Metalldruck: powder bed fusion-laser beam
- **Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften**
- Anwendungen und Leitlinien



# Werkstoffe

## Nickelbasislegierungen

Reinnickel, IN718, IN625, IN939,  
Legierung X (2.4665), Haynes 188,  
Haynes 282, Hastelloy C 22, Alloy HX,  
reines Ni

## Titanlegierungen

Ti6Al4V, Ti Gr. 2, Ti Gr. 4, Ti Gr. 5, TA 15

## Kobalt-Chrom

CoCr

## Amorphe Metalle

ZR01, ZR01, ZR01

## Edelmetalle

Gold, Silber, Platin

## Refraktärmetalle

Wolfram, Tantal

## Edelstähle

1.4441, **1.4404**, 1.4540, **1.4542**, 1.4545,  
1.4547, Invar 36

## Werkzeugstähle

1.2709 / M300, 1.2343 / H11, 1.2344 / H13

## Einsatzstahl: 1.7147

## Weitere Stähle: 1.4859, 1.4308

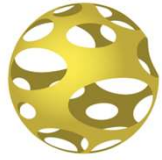
## Aluminium

AlSi10Mg, AlSi12, AlSi9Cu3,  
Scalmalloy (AlMg7Sc2ZrMn), M174+  
(AlSi12Cu4Ni2Mg), AlSi7Mg0.6, CustAlloy®  
(AlSi3,5Mg2,5)

## Kupfer

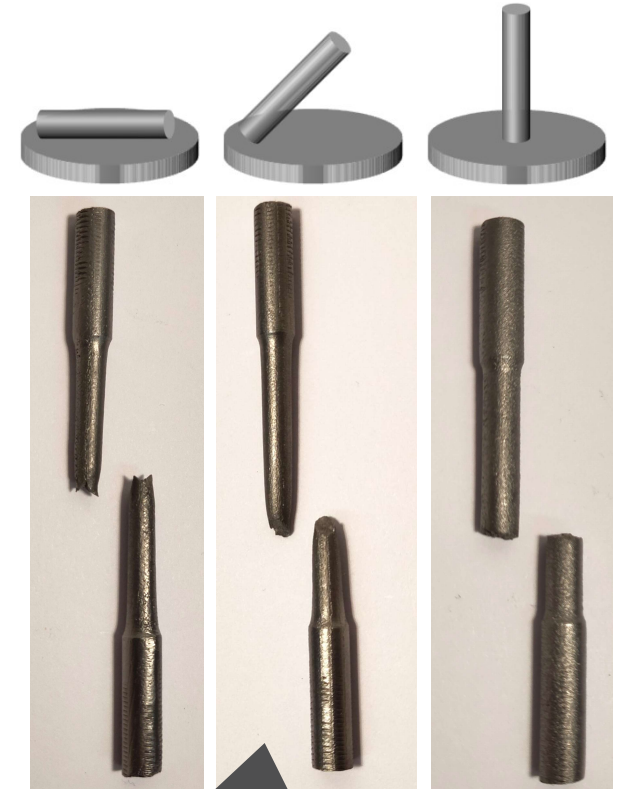
Reinkupfer, CuCr1Zr, CuNi2SiCr, CuNi30,  
**CuSn10**

Quellen: Unternehmenswebseiten von EOS, Trumpf, Oerlikon und Toolcraft , Stand Q1/2023



# Werkstoffeigenschaften - 1.4404

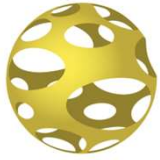
Bezeichnung	Einheit	1.4404
$\rho$ - Dichte	[%]	99,5
Dehngrenze	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	510 +/- 10
Zugfestigkeit	$R_{m0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	585 +/- 10
Bruchdehnung	$A_t$ [%]	54 +/- 2
Kerbschlagarbeit	KV [J]	150 +/- 10
Härte Vickers	[HV10]	227 +/- 5
E Lochkorrosion	[mVAgAgCl]	700 +/- 55



Quelle: Auswertungen HTWK Leipzig, 3D-Metall Theobald e.K.

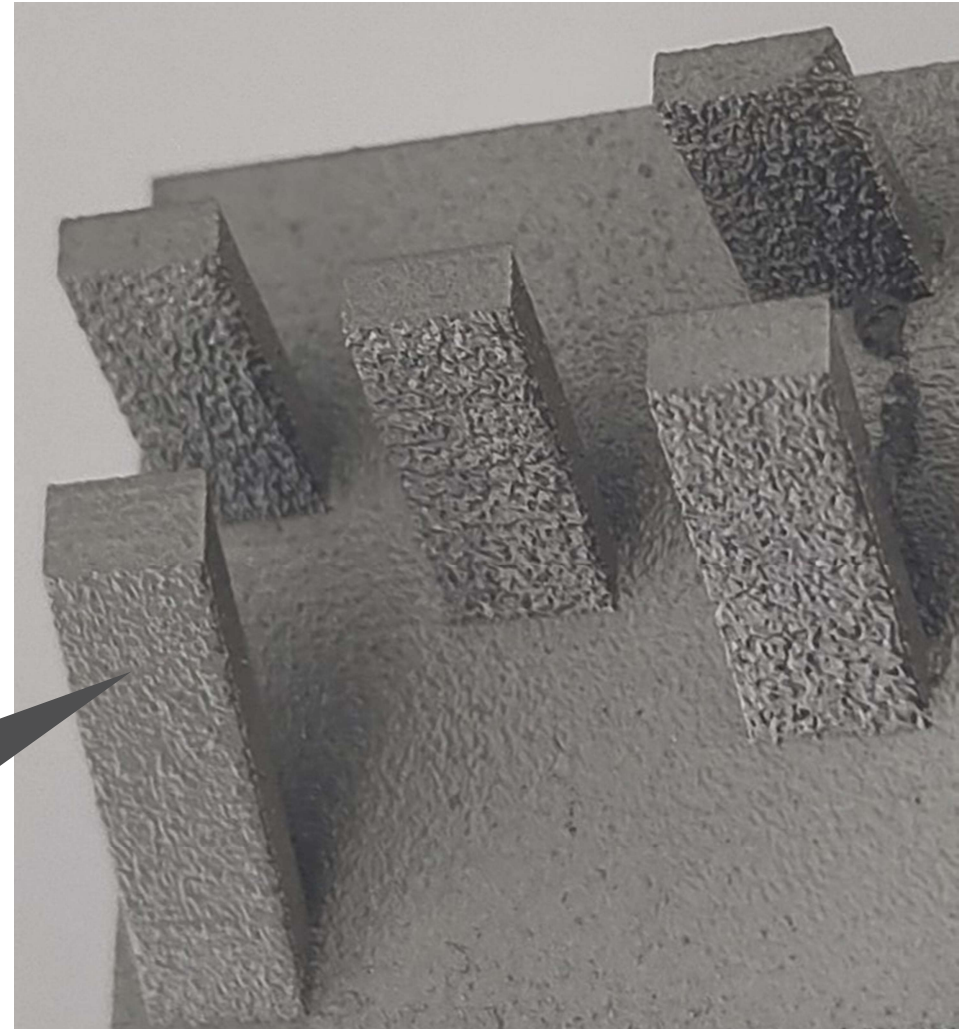
**Wenn es drauf  
ankommt, Anisotropie  
beachten!**



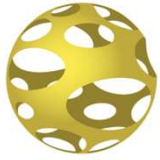


# Oberflächenqualität

- Geometrische Eigenschaften des Modells
  - Deckfläche  $R_a$  3,6 $\mu$ m  $R_z$  16,2 $\mu$ m
  - Seitenfläche  $R_a$  1,9 $\mu$ m  $R_z$  10,4 $\mu$ m
- Werkstoff: 1.4404
- Fertigungsumgebung
  - Maschine
  - Druckjob
  - Parametersatz



**Die Rauheit ist  
abhängig vom  
Bauwinkel!**



# Auflösung vs. Toleranzen

➤ Auflösung → bei uns Stahl ab 0,15mm, Bronze 0,1mm

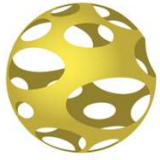
- Laserspot
- Schichtstärke
- Material
- Parametersatz

➤ Toleranzen

- **Auflösung**
- Rauheit ← Auflösung und Ausrichtung
- Verzug ← Design, Ausrichtung und Parametersatz
- Möglichkeit der Nachbearbeitung

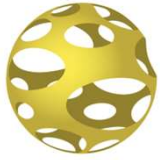
Wenn es drauf  
ankommt,  
Abhängigkeit vom  
Bauwinkel beachten!

- Einführung
- 3D-Metalldruck: powder bed fusion-laser beam
- Werkstoffe und Werkstoffeigenschaften
- **Anwendungen und Leitlinien**



# Anwendungen





## Leitlinien für PBF-LB



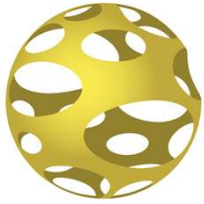
Anwendungsszenario: mangelnde **Verfügbarkeit** (F&E, Ersatzteile,...)  
Auswahl von Werkstücken...

1. mit eher kleinem Bauvolumen
2. mit hoher Komplexität
3. mit vielen Arbeitsgängen in der konventionellen Fertigung
4. die mit Sonderwerkzeugen gefertigt werden
5. die in kleinen Stückzahlen benötigt werden

Anwendungsszenario:  
**Neukonstruktion für Metall-AM**  
Um das volle Potential zu nutzen ...

1. Funktionsbereiche am geplanten Werkstück definieren
2. Ausrichtung des Werkstückes im Bauraum festlegen
3. Fertigungsanlage definieren
4. Downskin-Winkel zur Vermeidung von Nachbearbeitung berücksichtigen
5. Nachbearbeitungsprozesse mitdenken





## Weitere Informationen...

Jetzt, durch Ihre **Fragen**

im Anschluß **im persönlichen Gespräch**  
oder in einem

**Praxis-Training** additive Fertigung (Metall)

- für Konstrukteure und Entwickler
- in Zusammenarbeit **mit Sven Herbst**



# INNEO „Freeware“

Für Studenten und Auszubildende,  
Home-Use Anwender und Jedermann

Bayreuth, den 11.9.2024, Steffen Neßler

© INNEO Solutions GmbH | [www.inneo.com](http://www.inneo.com)

**INNEO**®  
That's IT.

# Agenda

- Produktübersicht
- Freewareprodukte
  - GENIUS TOOLS CommaToDot
  - GENIUS TOOLS Purge
  - GENIUS TOOLS Material Browser
  - GENIUS TOOLS FlexNet Watcher
- Startup TOOLS ohne Lizenz
- Model Processor ohne Lizenz



Software der INNEO Solutions GmbH, die ohne Lizenzierung verwendet werden darf.

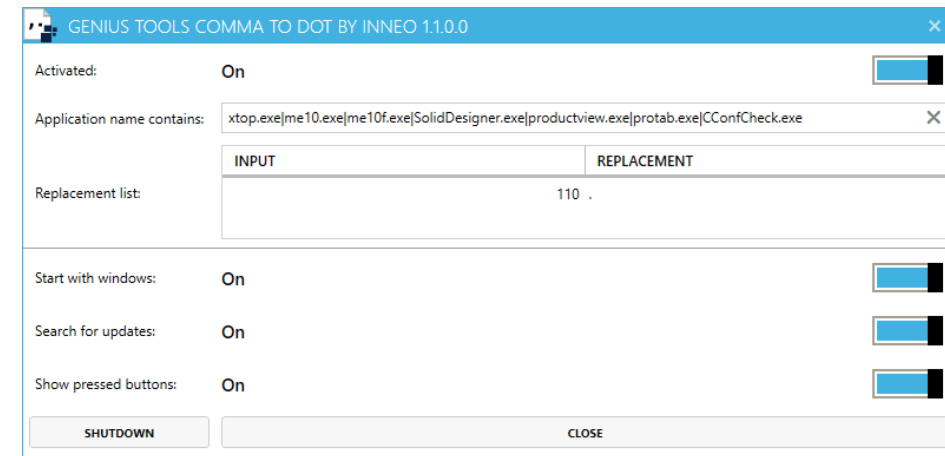
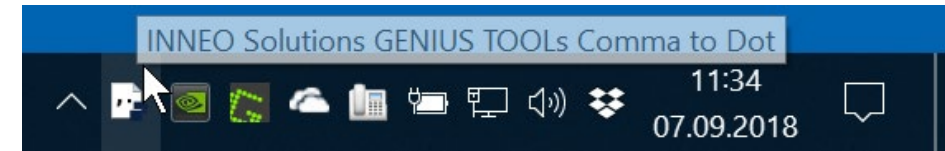
Produkt	Beschreibung	Anwenderkreis
GENIUS TOOLS CommaToDot	Tastendefinition	Freeware
GENIUS TOOLS Purge	Dateibereinigung	Freeware
GENIUS TOOLS Material Browser	Creo Parametric Materialdateien bearbeiten	Freeware
GENIUS TOOLS FlexNet Watcher	Lizenzüberwachung	Freeware
Startup TOOLS	Creo Parametric Arbeitsumgebung	Studenten und Auszubildende Creo Parametric HomeUse Anwender
Model Processor	Creo Parametric Modellüberarbeitung	Alle aber Funktionseinschränkung auf eine Aktionsliste und das aktuelle Creo Parametric Modell

- Ermöglicht 2 Funktionen

- Komma zu Punkt Konvertierung der Kommataste im Tastatur – Zahlenblock
  - Die Konvertierung erfolgt nur in allen **definierten** Programmfenstern und deren abgeleiteten Fenstern. (D.h. im EXCEL und anderen Applikationen bleibt weiterhin das Komma.
  - -> Vorteil haben alle Creo Parametric Nutzer, deren Zahlenblock ein Komma ausgibt. Dies ist z.B. bei allen deutschen Tastaturen der Fall. Creo Parametric Anwender können so alle Zahleneingaben über den Zahlenblock durchführen.

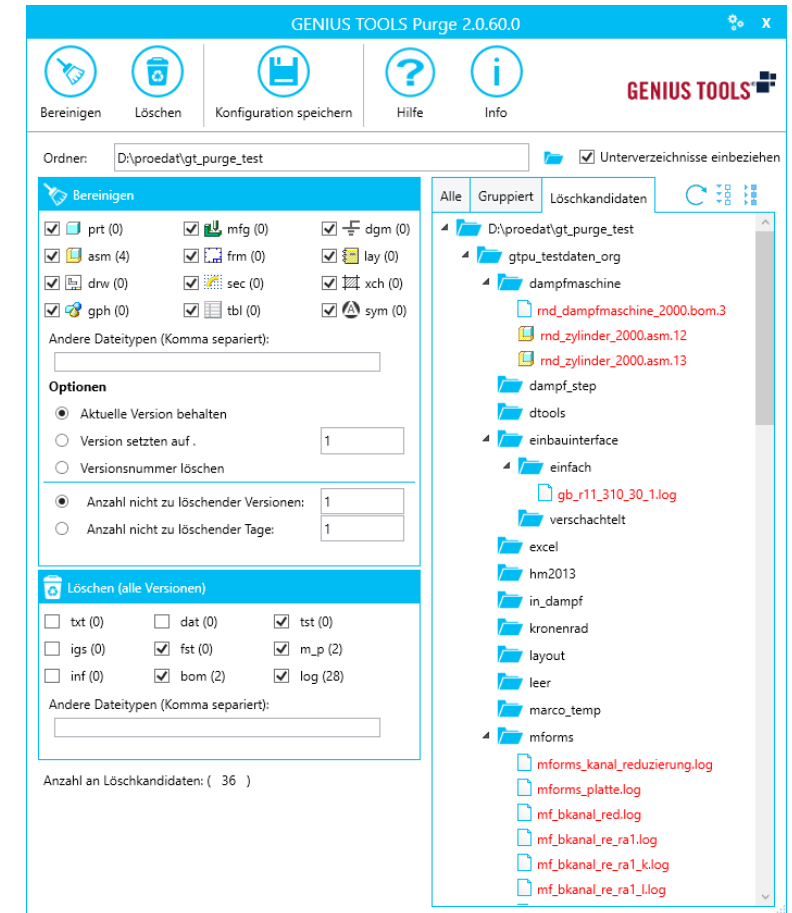
- Grafische Anzeige gedrückter Sonder- und Maustasten

- Über der Taskleiste erscheinen Symbole die anzeigen, ob die SHIFT, STRG, ALT oder Maustasten gedrückt sind. Die Funktionalität steht systemweit zur Verfügung und ist damit auch für andere Applikationen verwendbar.
- -> Sehr nützlich in Trainingsräumen, Präsentationen, Videotutorials ...
- So ist sehr schnell zu erkennen, wie eine Funktionalität aufzurufen ist.

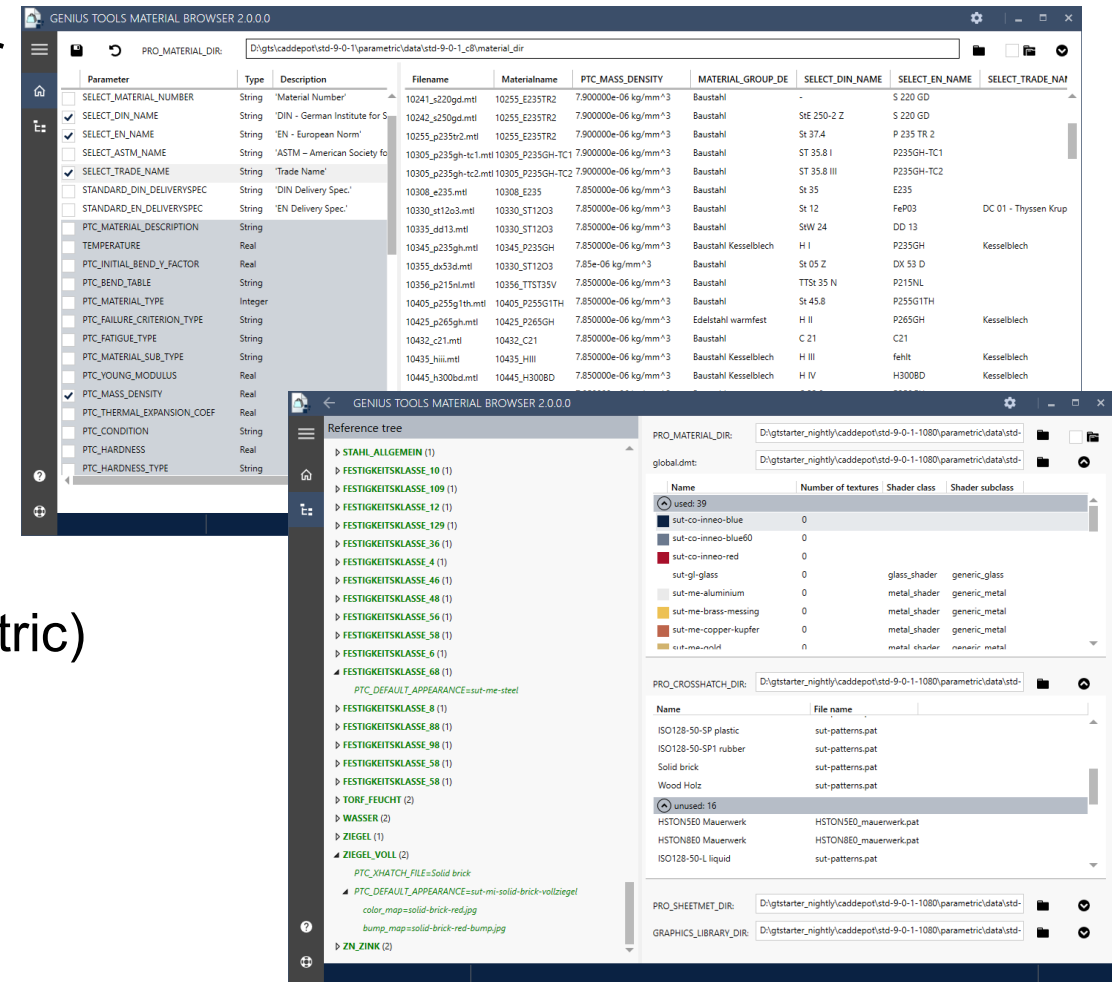




- Bereinigen Creo spezifischer Dateiversionen
  - 12 Standardtypen + eigene Dateierweiterungen
  - Auf aktuelle Version
  - Bestimmte Version einstellen (z.B. 1)
  - Versionsnummer löschen
  - Mehrere Versionen behalten (Anzahl/Tage)
- Löschen von Dateien nach Dateierweiterung
  - 9 Standardtypen + eigene Dateierweiterungen
- Vorschau zu entfernender Dateien
- Integration in Windows Dateieexplorer
- Rekursiv über Verzeichnisse anwendbar
- Deutsch und Englisch verfügbar
- Dateien können in Papierkorb verschoben werden



- Tabellarische Editieren von Creo Parametric Materialdateien
- Tabellarische Anzeige ausgewählter Materialparameter
- Erzeugen benutzerspezifischer Materialparameter
- Schnelles erkennen fehlender Materialparameter
- Editieren von Materialparameterwerten
  - Alle auf einmal
  - Mit Mehrfachselektion
  - Suchen/Ersetzen
  - Aufsplitten von Materialparameterwerten
- Konvertieren alter \*.mat Materialdateien in neue \*.mtl Materialdateien (benötigt Creo Parametric)
- Grafischer Referenzbaum für Farbeffekte, Schraffuren, Texturen und Biegetabellen



- Automatische Überwachung von Flexnet Lizenzkeys verschiedener Lizenzserver
- Automatische Überwachung von https Adressen zur Erreichbarkeit und Ablaufdatum des Zertifikats
- Überwachung der GENIUS TOOLS Starter Satelliten

Server	Features	Feedback
7766@localhost	gts_creo	2 x 11.0 - 11-jun-2025
7766@localhost	mp_user	2 x 11.0 - 11-jun-2025
7788@localhost	PROE_DesignPrm	1 x 42.0 - 31-jan-2026
7766@localhost	gts_creo	10 x 11.0 - 11-jun-2025
25734@localhost	solidworks	1 x 31.0 - 19-apr-2025
7788@localhost	PROE_DesignPrmP	1 x 42.0 - 31-jan-2026
https://windchilldemo.inneo.cloud		03.11.2024 00:59:59

Last check: 30.07.2024 12:15:55

Satellit	State	Last started	Last sync time	Last shutdown
LPZWIN10SLOW	Running	30.07.2024 06:29:43	30.07.2024 06:58:38	30.07.2024 06:29:25
	Running	30.07.2024 06:28:07	30.07.2024 09:28:35	30.07.2024 06:27:50

Main server URL: http://srvsutdev:8092

Last check: 30.07.2024 12:15:51

Activated:  On

Server	Features
7766@localhost	gts_creo
7766@localhost	mp_user
7788@localhost	PROE_DesignPrm
7766@localhost	gts_creo
25734@localhost	solidworks
7788@localhost	PROE_DesignPrmP
https://windchilldemo.inneo.cloud	

Server list:

GTS main server URL: http://srvsutdev:8092

Check interval (in minutes): 240

Check only newest version:  On

Start with windows:  On

Search for updates:  On

Buttons: Shutdown, Close

- Voraussetzungen
  - „richtiges“ Creo Parametric Release zu Startup TOOLS Release
  - Im parametric.psf Key ist eine Ausbildungs- oder HomeUse Lizenz eingetragen

```
##### Creo Parametric Schools Standard #####  
#Feature Line Type = INCREMENT  
#Feature Name = CREOPMA_SchoolSTD6  
#Feature Version = 42.0  
#Version = Creo 11.0  
#Number of Copies = uncounted locked license  
#Supersede = Y  
#Issue Date = 17-JUL-2024  
#Expiration Date = 18-JUL-2025  
#Node Locked Option = NOTEBOOK  
#Node Locked Option = ASSEMBLY  
#####
```

```
***** Summary Table *****  
# PTC Host ID 00-20-F4-79-09-07  
#FeatureName Qty Product Release Type Expiration Contract  
#PROE_DesignEssH 1 Creo Design Essentials Home Use Creo 11.0 Lic 31-jan-2026 002510006  
#-----  
#START: License File for HOST ID 00-20-F4-79-09-07  
#-----  
##### LOCKED License #####  
# Serviceable = Creo Design Essentials Home Use  
# Feature Name = PROE_DesignEssH  
# Feature Version = 42.0  
# Number of Copies = uncounted  
# Expiration Date = 31-jan-2026  
# Optional Modules = INTERFACE for CATIA  
# Optional Modules = FEATURE
```

- **Softwaredownload**

<https://www.inneo.de/de/services/technischer-support/genius-tools-downloads.html>

**GENIUS TOOLS Downloads**  
Hier finden Sie relevante Downloads zur GENIUS TOOLS® Produktfamilie.

Home » Services » Technischer Support » GENIUS TOOLS Downloads

Bitte wählen Sie das entsprechende Produkt um eine Übersicht der produktrelevanten Downloads zu erhalten.

Zu beachtende Hinweise für Updates können auch hier eingesehen werden: <http://updateadvisor.inneo.com>.

- GENIUS TOOLS License Manager »
- Startup TOOLS »**
- GENIUS TOOLS Starter »
- GENIUS TOOLS Library »
- GENIUS TOOLS Parameter »
- GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS »
- GENIUS TOOLS Model Processor »
- GENIUS TOOLS Model Processor User »
- GENIUS TOOLS Purge (Freeware) »
- GENIUS TOOLS CommaToDot (Freeware) »
- GENIUS TOOLS Materialbrowser (Freeware) »
- GENIUS TOOLS FlexNet Watcher (Freeware) »

Release	Version	Datum	Kommentar	Download
11.0	11.0.0.0	26. JUL. 2024	Support für Creo 7.0, 8.0, 9.0, 10.0, 11.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Software (1,26 GB)</li> <li>DataCreo7 (259 MB)</li> <li>DataCreo8 (259 MB)</li> <li>DataCreo9 (308 MB)</li> <li>DataCreo10 (308 MB)</li> <li>DataCreo11 (308 MB)</li> <li>Dokumentation (113 MB)</li> <li>Education/HomeUse Software incl. Data (1,19 GB)</li> </ul>
10.0	10.0.2.0	18. MÄR. 2024	Support für Creo 7.0, 8.0, 9.0, 10.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Software (701 MB)</li> <li>DataCreo7 (259 MB)</li> <li>DataCreo8 (259 MB)</li> <li>DataCreo9 (308 MB)</li> <li>DataCreo10 (308 MB)</li> <li>Requirements Check (0,04 MB)</li> <li>Dokumentation (100 MB)</li> <li>Education/HomeUse Software incl. Data (738 MB)</li> </ul>
9.0	9.0.2.0	20. APR. 2023	Support für Creo 7.0, 8.0, 9.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>Software (421 MB)</li> <li>DataCreo7 (258 MB)</li> <li>DataCreo8 (258 MB)</li> <li>DataCreo9 (258 MB)</li> <li>Wichtige Informationen</li> </ul>



STOOLS-SE GENIUS TOOLS STARTER APP 11.0.0.0

Projekt Favorit Details

Creo Parametric 11.0 Student Edition ★ Creo Parametric 11.0.1.0

GENIUS TOOLS for Creo

Beinhaltet die Vollversionen von:  
GENIUS TOOLS Parameter  
GENIUS TOOLS Library  
GENIUS TOOLS MBD for ISO-GPS

Info Lizenzen Konfig Projektoptionen Ändern

Projekt Konfigurationsbausteine (.pro) stools-se-creo11p

Aktiv	Name	Toolkit
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_cabling.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_core.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_dir_file.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_export.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_imexport.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_mapkeys.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_piping_mapkey.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_piping.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	config_sut_c11p_welding.pro	0
<input checked="" type="checkbox"/>	GENIUS TOOLS for Creo	1

VERWENDETE TOOLKIT APPLICATION (PROJECT)  
GENIUS TOOLS for Creo

# Model Processor – Gastmodus/Testversion

GENIUS TOOLS Model Processor

Optionen wählen

GENIUS TOOLS

Geben Sie Ihren Lizenzserver an (z.B. 7766@Servername) und wählen Sie die zu startenden Module.

Beispiele installieren

.mpz Verzeichnis:

**Lizenzierung**

kostenlose Testversion

INNEO License Manager (Flex Net)

Lizenzserver:

Lizenztyp:

Sprache:

Icongröße:

Automatisches Speichern:

INNEO Solutions GmbH

< Zurück Installieren Abbrechen

Name:

Module

Model Processor

Module

snessler x

Modellauswahl

Überarbeitung (mit)

aktuelles Modell

alle in

Stapelverarbeitung

nutze Checkliste

auch über Instanzen

schreibe Log

Lizenzmodus:

**Request for Registration**

Die folgend erhobenen Daten werden hauptsächlich für Informationsfälle (Bugs, Sicherheitslücken, Support) verwendet.

Vorname:

Nachname:

Firma:

Straße / Nummer:

PLZ / Stadt:

Land:

E-Mail:

E-Mail wiederholen:

OK Cancel

Übersicht Log Warnungen Fe

Kopfbereich (einmalig ausgeführt)

Modellbereich (für jedes Mod

B 0 Material editieren (v

**Information**

Sie können im Gastmodus nur eine Aktionsliste zu einem mpz hinzufügen. Bitte kaufen Sie eine Lizenz um diese Beschränkung aufzuheben.

OK

# Fragen? Kommentare?

Jetzt ist Zeit dafür

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!



**INNEO**®  
That's IT.

# Anwendungen zur Demokratisierung der Simulation

## Extended Abstract K-Tag 2024

### Abstract

Die Simulation - d.h. die digitale Darstellung der Herstellung, des Gebrauchs und des Betriebs von Produkten in der Struktur-, der Fluidmechanik oder des Elektro-Magnetismus - hat eine hohe Bedeutung in der Produktentwicklung. Der Einsatz der Simulation wächst besonders in den letzten Jahren rasant. Ein wesentlicher Teil dieser Simulationen wird durch speziell geschulte Berechnungs-Ingenieure erbracht. In den letzten Jahren wächst die Kritik an dem bestehenden System der Trennung von Konstruktion und Simulation. Bereits im letzten Jahr hat der Autor verschiedene Ansätze zur Demokratisierung der Simulation vorgestellt.

Nach einem Rückblick auf den Vortrag des K-Tages 2023 wird am Beispiel einer vermeintlich einfachen Problemstellung aufgezeigt, daß oft Vorarbeiten zur Sicherung der Qualität einer Simulation notwendig sind.

### Rückblick K-Tag 2023

Betrachtet man ein paar Schlagzeilen zur Simulation in diesen Tagen, so bekommt man leicht den Eindruck, daß die sofortige Integration der Simulation in die bestehenden Entwicklungsprozesse notwendig ist. Im folgenden Bild werden ein paar dieser Schlagzeilen wiedergegeben.

Significant **improvement** in product **efficiencies** of up to **40%**, dramatically reduced **development times from months to weeks**, **weight savings** of up to **20%** and the **capex cost** of up to **8%**

**Digitale Simulation ist schneller und kostengünstiger als physische Prototypen**

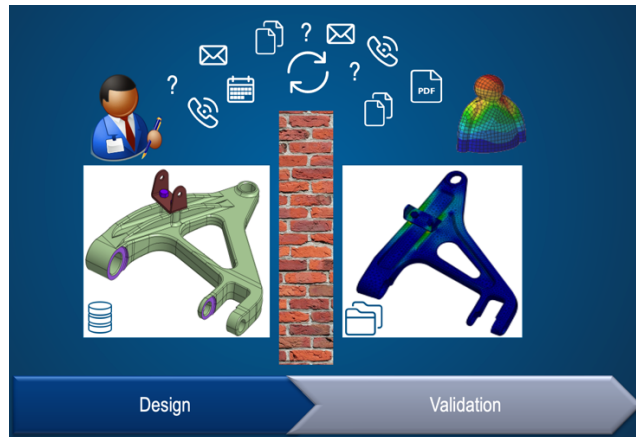
**Bringen Sie Konstruktion und Simulation auf die nächste Stufe**

Discovery lets engineers focus on innovation and product performance. ... Discovery removes barriers that previously prevented engineers from using engineering simulation.

Nach [1] ist es wichtig, daß der „schöpferische und kreative“ Konstruktionsprozeß nicht unterbrochen wird. Dies geschah in der Vergangenheit durch das Warten auf Versuche oder das Warten auf die Simulation. In [2] wird die Simulations-Abteilung als ‚bottleneck‘ im Entwicklungsprozeß bezeichnet. In [3] führt der sequentielle Arbeitsablauf von Konstruktion-Simulation-Konstruktion zu ineffektiven Entwicklungsprozessen.

Der Begriff des Arbeitens in Silos findet sich häufig. In einem internen Dokument der Dassault Systèmes wird dieses Arbeiten in Silos bildlich dargestellt:



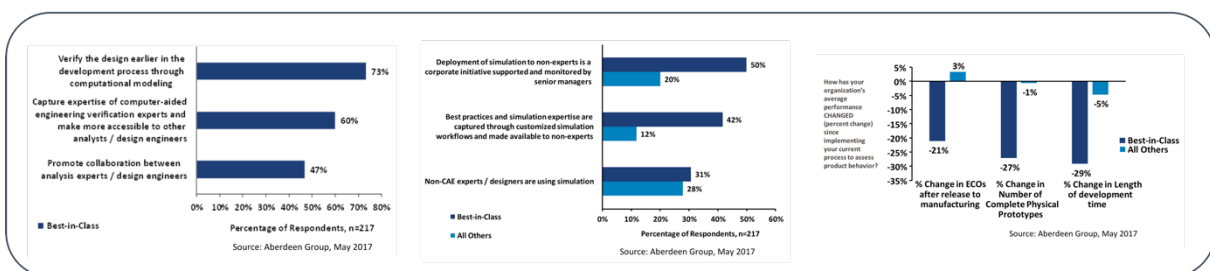


Quelle: Internes Dokument Dassault Systemes

In den letzten Jahren gab es durch die Entwicklung der Software Systeme für die Simulation eine deutliche Verbesserung der Werkzeuge für die Simulation. Wesentliche Punkte sind dabei:

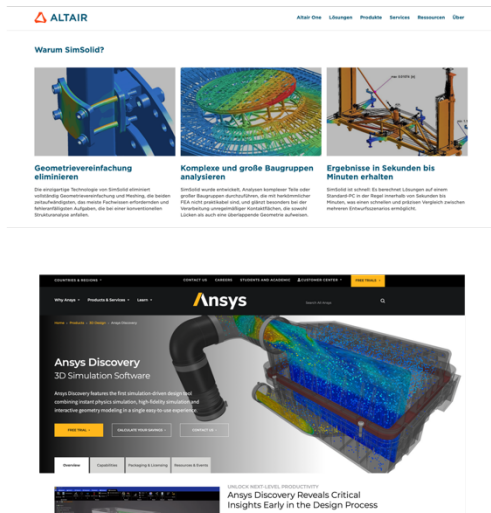
- Verbesserte Geometrie-Aufbereitung
- Automatische Vernetzung auch "schlechter" Geometrien
- Verbessertes Konvergenz-Verhalten der impliziten Solver
- Einsatz expliziter Solver für statische Problemstellungen
- Einsatz des automatischen Kontaktes zwischen Bauteilen
- Beseitigung der Schnittstellen bei Multi-Physics Anwendungen.

In [2] werden die Vorteile der konstruktions-integrierten Simulation für die Industrie anhand von Umfrage-Ergebnissen dargelegt. Hierbei wird zwischen innovativ führenden Firmen (Best-in-Class) und dem „Rest“ (All Others) unterschieden. Betont wird das „Left Shifting“, eine frühe Verifikation und Optimierung des Produktes, links im folgenden Bild. Ein Wechsel hin zur konstruktions-integrierten Simulation wird von vielen Firmen angestrebt, mittig im folgenden Bild. Hierdurch konnten die Firmen die Kosten und die Dauer der Entwicklungsprozesse deutlich reduzieren, rechts im Bild.



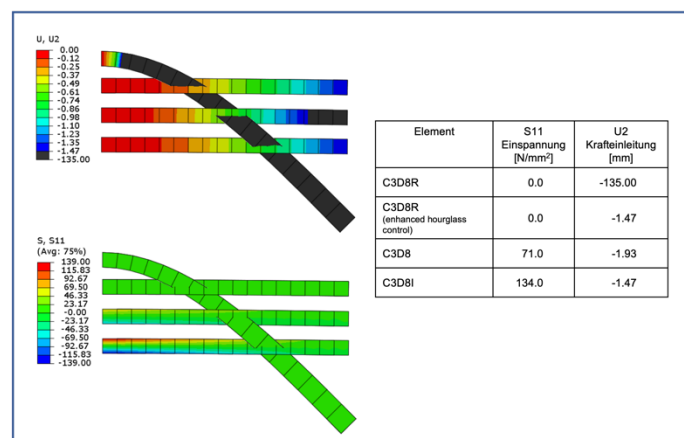
So wird nach [1] der Einsatz von Simulation im Konstruktionsprozeß deswegen besonders wichtig, da der Wechsel von einer erfahrungsbasierten zu einer wissensbasierten Entscheidung in der Konstruktion erfolgen muss. In [4] werden die Vorteile einer Konstruktions-integrierten Simulation dargestellt. Die Anforderungen an die Konstruktionsprozesse sind in einer schwierigeren Umgebung stark gestiegen. Hier ist die Konstruktions-integrierte Simulation ein Problemlöser und beschleunigt somit die Demokratisierung der Simulation.

Heutige Software-Systeme bieten entsprechende Lösungen an, siehe folgendes Bild. In [5] wird das Produkt SimSolid von der Firma Altair beschrieben. In [6] wird die Software ANSYS Discovery vorgestellt. In [7] wird der MODSIM Ansatz von Dassault Systemes beschrieben.



In der Literatur finden sich genügend Argumente für eine deutliche Stärkung der konstruktionsintegrierten Simulation. Die Demokratisierung der Simulation führt zu besseren Produkten in kürzeren Entwicklungsprozessen. Die Software-Hersteller stellen dafür die notwendigen Werkzeuge bereit, wobei zwischen geführten und neueren/automatisierten Berechnungsprozessen unterschieden werden kann.

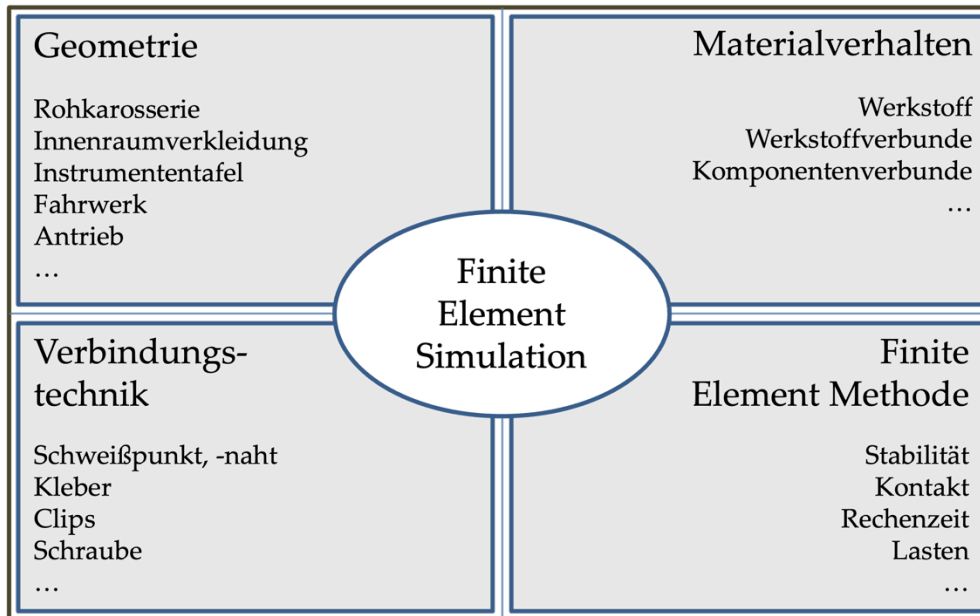
Fragt man einen erfahrenen Berechnungs-Ingenieur, so ist die Wahrscheinlichkeit hoch, daß dieser ob dieser Entwicklung starke Bedenken hat. Auf unserer Website [8] haben wir einen Beitrag, welcher sich mit der richtigen Wahl der Elemente für eine Simulation befasst. Als Beispiel dient die lineare Belastung eines Biegebalkens. Hier zeigt sich, daß die falsche Wahl von Element und Diskretisierung zu komplett falschen Ergebnissen führen kann. In dem folgenden Bild führt nur die Wahl eines, in der Praxis eher selten verwendeten, Elementes zum richtigen Ergebnis.



In der Literatur zu den automatisierten Berechnungsprozessen finden sich Hinweise zur Verwendung von Referenz-Speicher (Reference Memory in [9]), der Treue oder des Speichers der Grafikkarte zur Erhöhung der Qualität der Berechnung [1]. Dies erscheint doch eher schwierig, da bisher keine Literatur gefunden wurde, welche die Abhängigkeit der Physik einer Simulation von solchen Größen näher erläutert.

## Abbildungs-Felder

Bereits in einer früheren Veröffentlichung [10] haben wir erläutert, daß die Güte und Prognosefähigkeit einer Simulation von der Qualität der Abbildung von Geometrie, Material, Verbindungstechnik und den Algorithmen der Finite Element Methode abhängen. Folgendes Bild haben wir dieser Veröffentlichung entliehen.

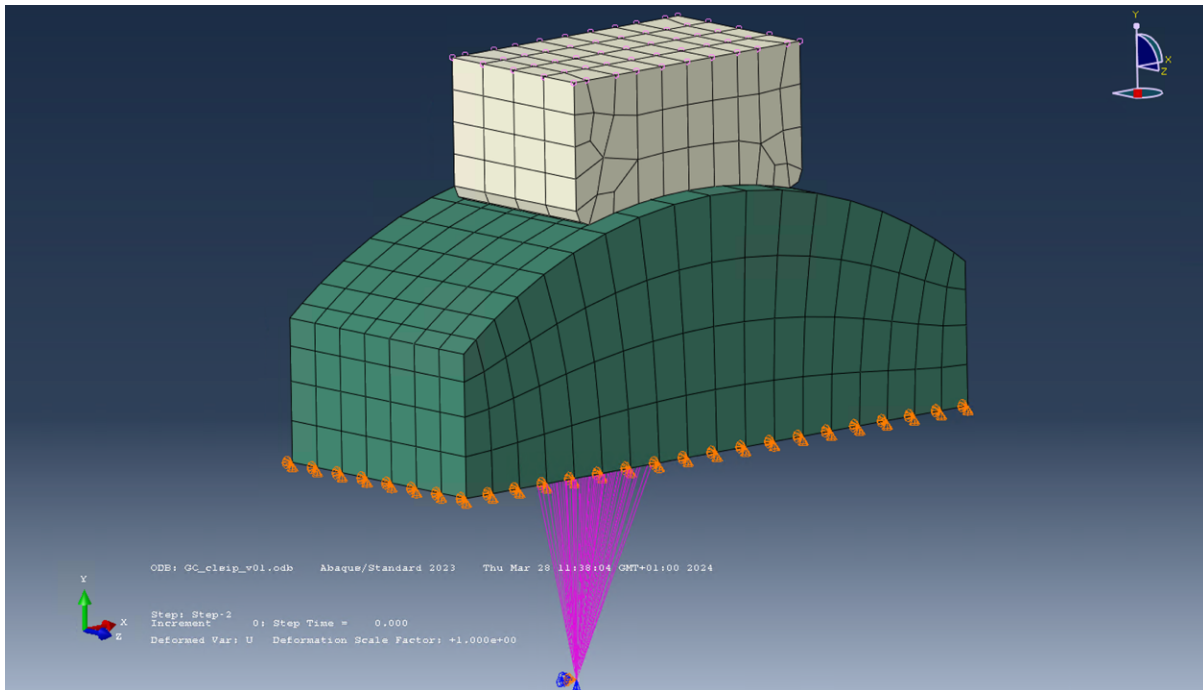


Je nach qualitativen und quantitativen Zielen einer Simulation sollte die Qualität in einzelnen oder allen Bereichen geprüft und verbessert werden. Der frühere Vortrag enthält Beispiele und Vorgehensweisen zur Bearbeitung der Bereiche.

## Herausforderung einer einfachen Problemstellung

Als Beispiel verwenden wir eine einfache Welle-Nabe-Verbindung. Die Abbildung der Geometrie und gegebenenfalls einer Verbindungstechnik ist recht einfach. Meist stellt die Dimension (im m-Bereich) und die notwendige Auflösung (im mm-Bereich) eine Herausforderung, insbesondere an die verwendete Hardware, dar. Das Materialverhalten wird auf die Elastizität eines Metalls beschränkt. Die Finite Element Simulation soll Ergebnisse hinsichtlich der Mikrobewegung zwischen Welle und Nabe sowie der Spannungen im Bereich der Oberfläche der Welle liefern, welche anschließend in einer Dauerfestigkeitsberechnung verwendet werden. Obwohl Kanteneffekte wegen deren Singularität zuerst ausgeschlossen werden, bedarf es grundsätzlicher Untersuchungen zur „korrekten“ Abbildung der Mikrobewegungen und der Spannungen. Eine realistisch durchführbare Simulation erlaubt aber nur eine minimale Elementkantenlänge von circa 3 mm. Die Berechnungen wurden mit Abaqus/Standard [11] durchgeführt.

Zuerst wird ein 3-dimensionales Testmodell verwendet. Ein Bauteil (Impactor) wird gegen ein anderes Bauteil (Block) 0.03 mm gedrückt (Step-1) und anschließend um 0.01 Grad verdreht (Step-2). Aus beiden Belastungen ergeben sich geringe Relativ-Verschiebungen im Tausendstel Millimeter-Bereich. Die Mikrobewegungen sollen an der Kontaktfläche ausgewertet werden.



In Voruntersuchungen wurde bereits der zu verwendete Elementtyp festgelegt, ein voll-integriertes, lineares 8-Knoten-Solid Element (C3D8I), siehe auch [8]. Variiert wurde die Elementkantenlängen und der Elastic Slip der Penalty Formulierung für die Reibung. Hierbei handelt es sich um eine elastisch-ideal plastische Beschreibung des Reibverhaltens, um eine stabile Konvergenz zu gewährleisten. Der Elastic Slip Factor beschreibt dabei die elastische Steigung (je kleiner, desto steiler). Dieser Faktor kann relativ zur Elementkantenlänge (Elastic Slip Tolerance) oder als Dimension (Elastic Slip) definiert werden. Folgende Varianten wurde berechnet:

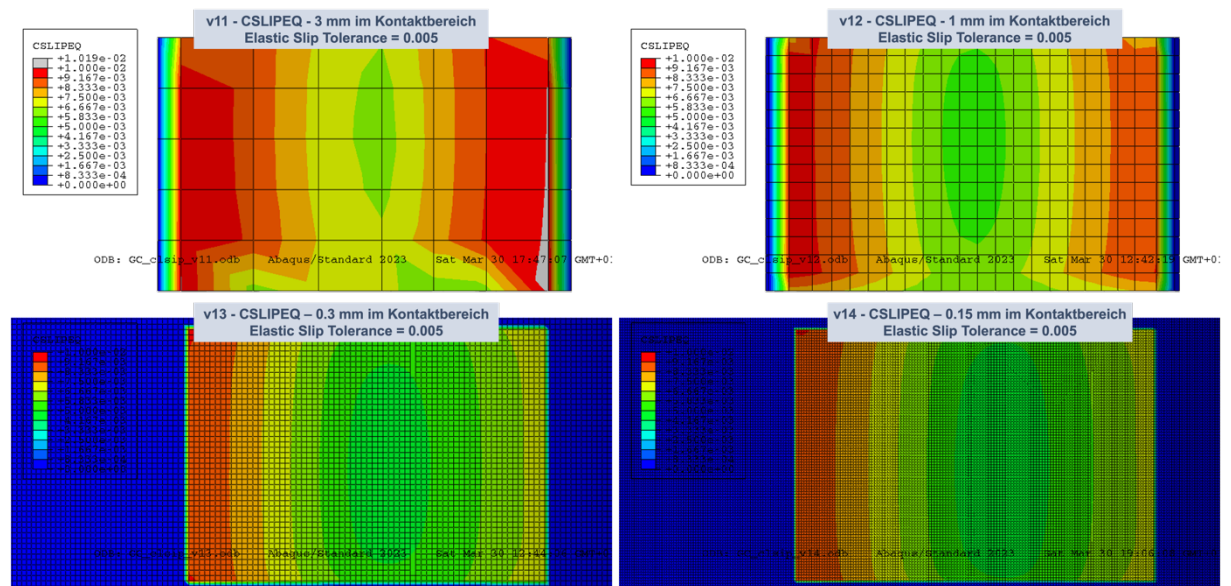
Berechnungs-Lauf	Element-Kantenlänge Impactor	Element-Kantenlänge Block	Elastic SLIP Factor (Reibfaktor 0.1)	Elementtyp	Bemerkung	Nodes / Elements NoOfVariables	Iteration/Wall Clock Time
GC_cslip_v01	3	3	Default 0.005	C3D8I	Impactor mit Partition	1021 / 648 / 11880	18/6
GC_cslip_v02	1	1	Default 0.005	C3D8I	Impactor mit Partition	17602 / 14912 / 248897	20/36
GC_cslip_v03	0.3	0.3	Default 0.005	C3D8I	Impactor mit Partition	601817 / 572692 / 9271954	27/8704
GC_cslip_v04	1	1	Default 0.005	C3D8S	Impactor mit Partition	17602 / 14912 / 55041	20/42
GC_cslip_v10	1/1	1/1	Default 0.005	C3D8I	Ab hier Impactor und Block mit TIE	26893 / 22394 / 373946	23/79
GC_cslip_v11	3/3	3/3	0.005	C3D8I		1719 / 1079 / 19496	19/7
GC_cslip_v12	1/3	1/3	0.005	C3D8I		14830 / 12296 / 205655	21/38
GC_cslip_v13	0.3/3	0.3/3	0.005	C3D8I		477673 / 463597 / 7340496	28/6608
GC_cslip_v14	0.15/3	0.15/3	0.005	C3D8I	Ab hier veränderte Aufteilung für den Block zur Reduktion der Elemente (andernfalls ist der RAM Bedarf > 128 Gbyte)	1692147 / 1623914 / 26228525	29/76206 (swapping)
GC_cslip_v15	0.3/3	0.3/3	0.005	C3D8I		226073 / 208318 / 3397075	27/1444
GC_cslip_v16	3/3	3/3	s=0.001 mm	C3D8I		1751 / 1121 / 20138	24/9
GC_cslip_v17	1/3	1/3	s=0.001 mm	C3D8I		9673 / 7559 / 128564	28/29
GC_cslip_v18	0.3/3	0.3/3	s=0.001 mm	C3D8I		226073 / 208318 / 3397075	27/1425

Man erkennt, daß die Bauteile partitioniert werden mussten, um das Modell rechenbar zu halten. Bei der v14 haben 128 GByte RAM nicht ausgereicht, so daß die Simulation extrem lange dauerte.

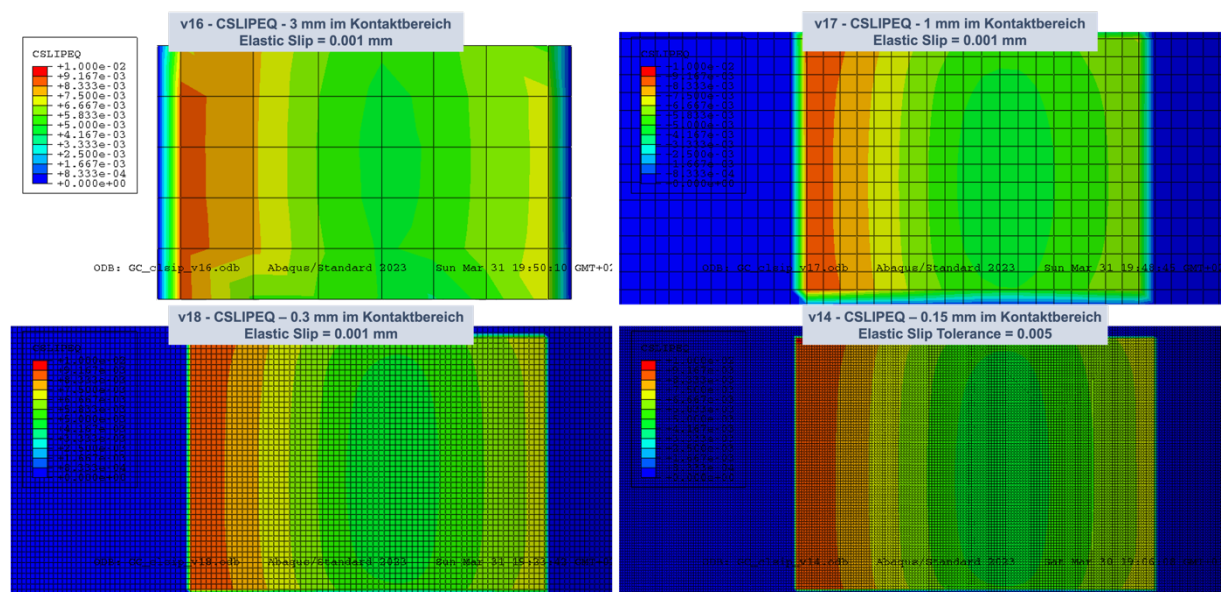
Für die Bestimmung der Mikrobewegung wird hier die Abaqus Variable CLSIPEQ verwendet. Diese stellt die aufsummierte resultierende Bewegung in der Kontaktebene dar. Verwendet man die Default-Parameter so erkennt man im Vergleich der Varianten v11, v12, v13 und v14 eine deutliche Abhängigkeit des Ergebnisses von der Feinheit des Netzes, siehe folgendes Bild.



Für die Varianten mit 3 mm und 1 mm Elementkantenlänge erscheint das Ergebnis noch symmetrisch. Die Verwendung der Default-Parameter erscheint somit nicht zulässig für die Detektion der Mikrobewegungen mit einer Vernetzung mit 3 mm Kantenlänge.

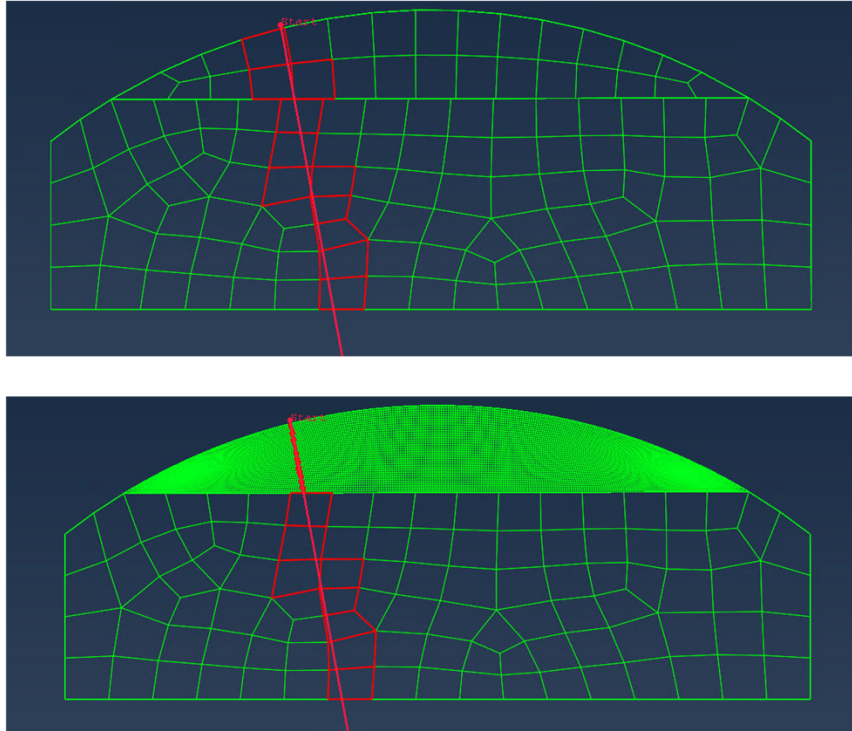


Es gibt hier aber eine anwendbare einfache Lösung durch die Vorgabe eines festen Elastic Slip, wie in diesem Fall, oder einer deutliche kleineren Elastic Slip Tolerance. Nun ist das Ergebnis für größere Elementkantenlängen deutlich näher an dem Ergebnis mit einem sehr feinen Netz, siehe folgendes Bild. Aufgrund der deutlichen Unterschiede in der Elementkantenlänge bleiben aber weiterhin Unterschiede, welche vernachlässigt werden müssen. Weiterführende Literatur findet sich zum Beispiel in [12].

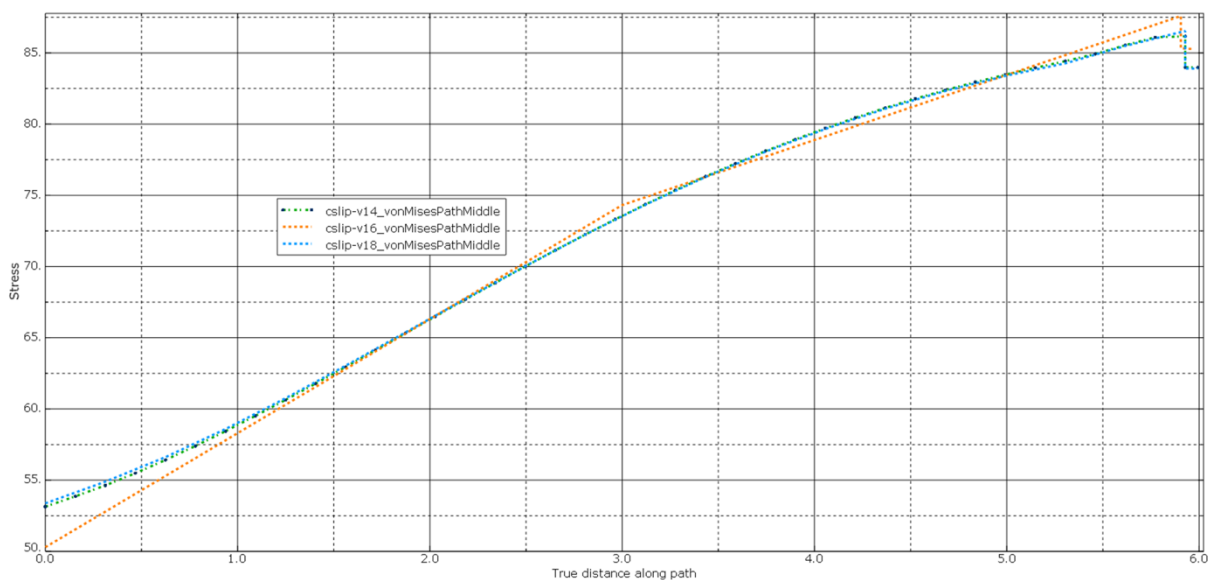




Das gleiche Modell wird auch zur Darstellung der Spannungen in Abhängigkeit von der Elementkantenlänge verwendet. Abaqus ermöglicht die Ermittlung der Spannungen entlang eines Pfades. Schon die Darstellung dieser Pfade im folgenden Bild zeigt, daß Unterschiede in den Spannungen im Block zu erwarten sind. Allerdings gilt auch hier, daß eine minimale Elementkantenlänge von 3 mm für eine Simulation der Problemstellung notwendig sind.



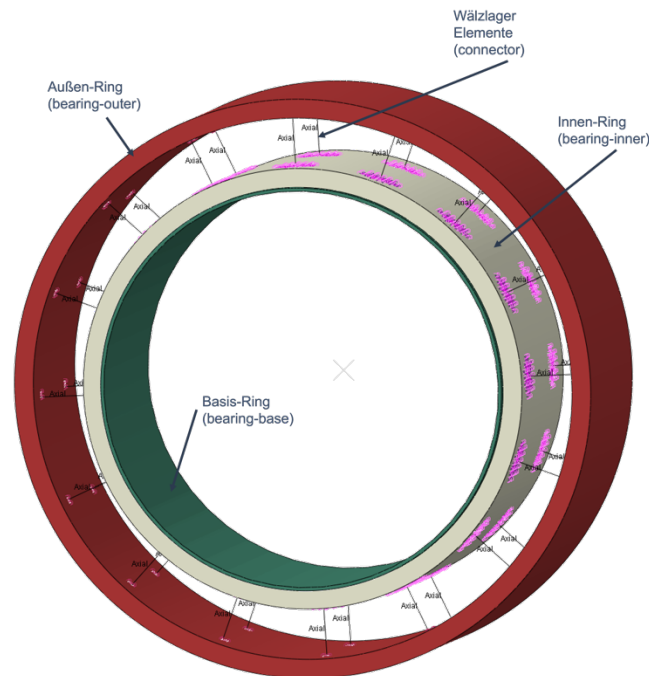
Betrachtet man nun die Spannungen entlang dieses Pfades für die Varianten v14 (0.15 mm Kantenlänge), v16 (3 mm Kantenlänge) und v18 (0.3 mm Kantenlänge) so ergeben sich folgende Spannungsverläufe entlang des Pfades (beginnend an der Oberfläche), siehe folgendes Bild. Die Abweichungen sind hier gering und können vernachlässigt werden.



Es zeigt sich an diesem kleinen Beispiel, daß mit einer Korrektur der Default-Werte für den Kontakt auch mit einem groben Netz Aussagen über Mikrobewegungen und Spannungen getroffen werden

können. In diesem Fall führt die Korrektur der Default-Werte auch zu nur einer geringen Veränderung des Konvergenzverhaltens und damit des Zeitaufwandes der Simulation.

Bei der Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen wird das Lager meist vereinfacht durch die Kopplung eines Teils der Welle im Lagerbereich mit einem Zentral-Knoten abgebildet. Die Art der Kopplung und die richtige Wahl der Randbedingungen sind dann mögliche Fehlerquellen mit erheblichen Auswirkungen auf das Ergebnis. In einem ersten Ansatz wurde ein anderes Modell für die Lagerabbildung erstellt, siehe folgendes Bild. Ein solches Modell verändert aber das Konvergenzverhalten und führt zu einer Verlängerung der Berechnung.



## Zusammenfassung

Beschrieben wurden in einem früheren Beitrag die Vorteile einer Demokratisierung der Simulation. Um diese Vorteile nutzen zu können, bedarf es gemeinsamer Anstrengungen von Konstrukteuren und Berechnungs-Ingenieuren.

Die Güte und Prognosefähigkeit einer Simulation hängen von der Qualität der Abbildung von Geometrie, Material, Verbindungstechnik und den Algorithmen der Finite Element Methode ab. Es wurde aufgezeigt, daß selbst für eine vermeintlich einfache Problemstellung wie einer Welle-Nabe-Verbindung Voruntersuchungen für die Definition notwendiger Simulations-Parameter notwendig sind. Auch wurde aufgezeigt, daß Fehlerquellen einer vereinfachten Betrachtung aufgezeigt und gegebenenfalls durch Modelländerungen vermieden werden müssen.

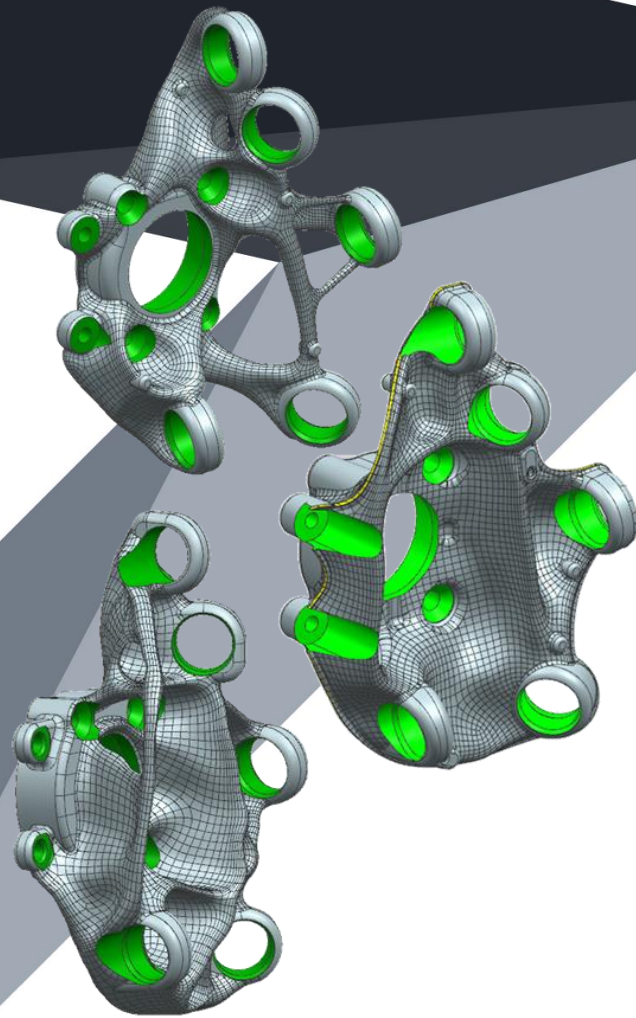
Sicher gilt:

- Die Simulation muss einen Mehrwert im Produkt-Entstehungs-Prozess bieten.
- Die Simulation sollte prognosefähig sein.

## Quellen

[1] Brand, M., Baur, K., Brunner, S., and Gebhardt, C., 2020, *Physik begreifen – besser konstruieren*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- [2] Cline, G., 2017, *THE BENEFITS OF SIMULATION-DRIVEN DESIGN*, ABERDEEN GROUP.
- [3] Karlsson, L., Pahkamaa, A., Karlberg, M., Löfstrand, M., Goldak, J., and Pavasson, J., 2011, "Mechanics of Materials and Structures: A Simulation-Driven Design Approach," *J. Mech. Mater. Struct.*, 6(1–4), pp. 277–301.
- [4] Jackson, C., *The Four Benefits of Simulation-Driven Design*, Lifecycle Insights.
- [5] "Strukturanalyse Für Schnelle Designiterationen | Altair SimSolid" [Online]. Available: <https://www.altair.de/simsolid/>. [Accessed: 28-Jun-2023].
- [6] "Ansys Discovery | 3D Product Simulation Software" [Online]. Available: <https://www.ansys.com/products/3d-design/ansys-discovery>. [Accessed: 28-Jun-2023].
- [7] Popielas, F., 2022, "Introduction TO MODSIM."
- [8] systemworkx AG, "Home - PLM Blog & Knowledge Center - Simulation, etc.," PLM Blog & Knowledge Center [Online]. Available: <https://plm.systemworkx.de/>. [Accessed: 01-Oct-2023].
- [9] Symington, I., 2020, "Designer Oriented Software - Is It Accurtae? Part 1," *NAFEMS Benchmark Magazine*, (Januar 2020).
- [10] Paßmann, Ralf, and Herrmann, Martin, "Finite Element Simulationen in Der Praxis - Voraussetzungen Für Prognosefähige Berechnungen," *CAE-Forum Auf Der HMI 2015*, Hannover.
- [11] "Welcome to the SIMULIA User Assistance - SIMULIA Benutzerunterstützung 2024" [Online]. Available: [https://help.3ds.com/2024/english/dssimulia\\_established/SIMULIA\\_Established\\_FrontmatterMap/DSDocHome.htm?contextscope=all&id=f5aaff0376ab4eb59dac8c8b241ef08f](https://help.3ds.com/2024/english/dssimulia_established/SIMULIA_Established_FrontmatterMap/DSDocHome.htm?contextscope=all&id=f5aaff0376ab4eb59dac8c8b241ef08f). [Accessed: 21-Sep-2024].
- [12] Mäntylä, A., and Lönnqvist, C., 2009, "Fretting Simulation for Crankshaft-Counterweight Contact."



# ACONEXT - RADTRÄGER

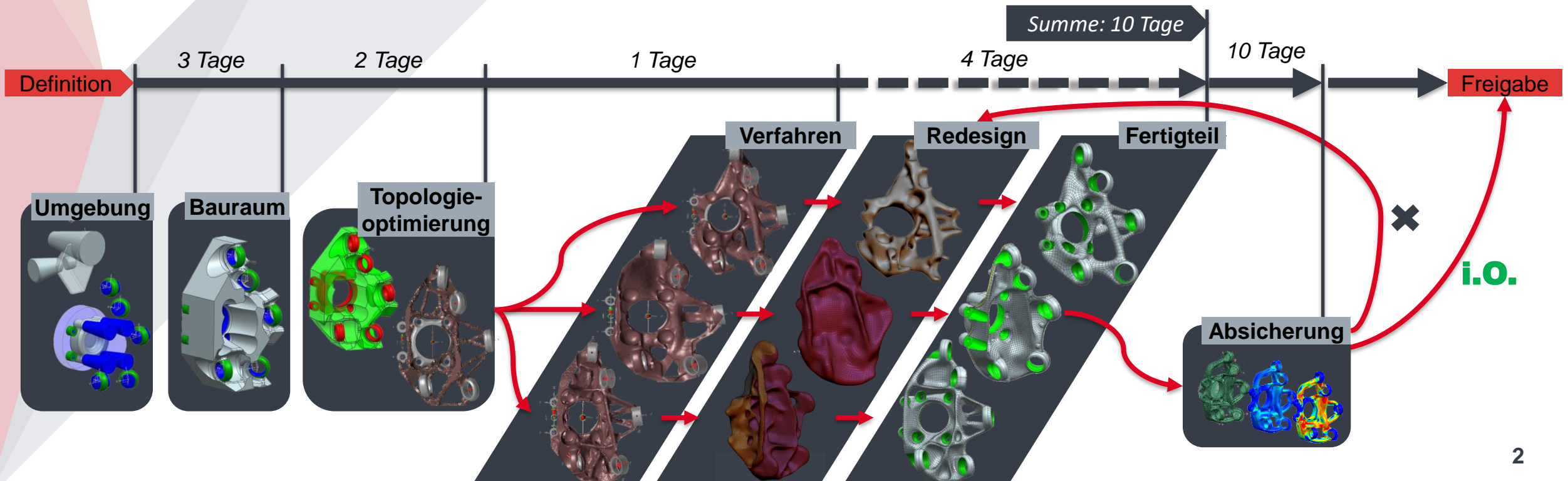
## Datenquelle

- Bauraum, Lasten (Annahmen aus Abschlussarbeit Martin Silvan)

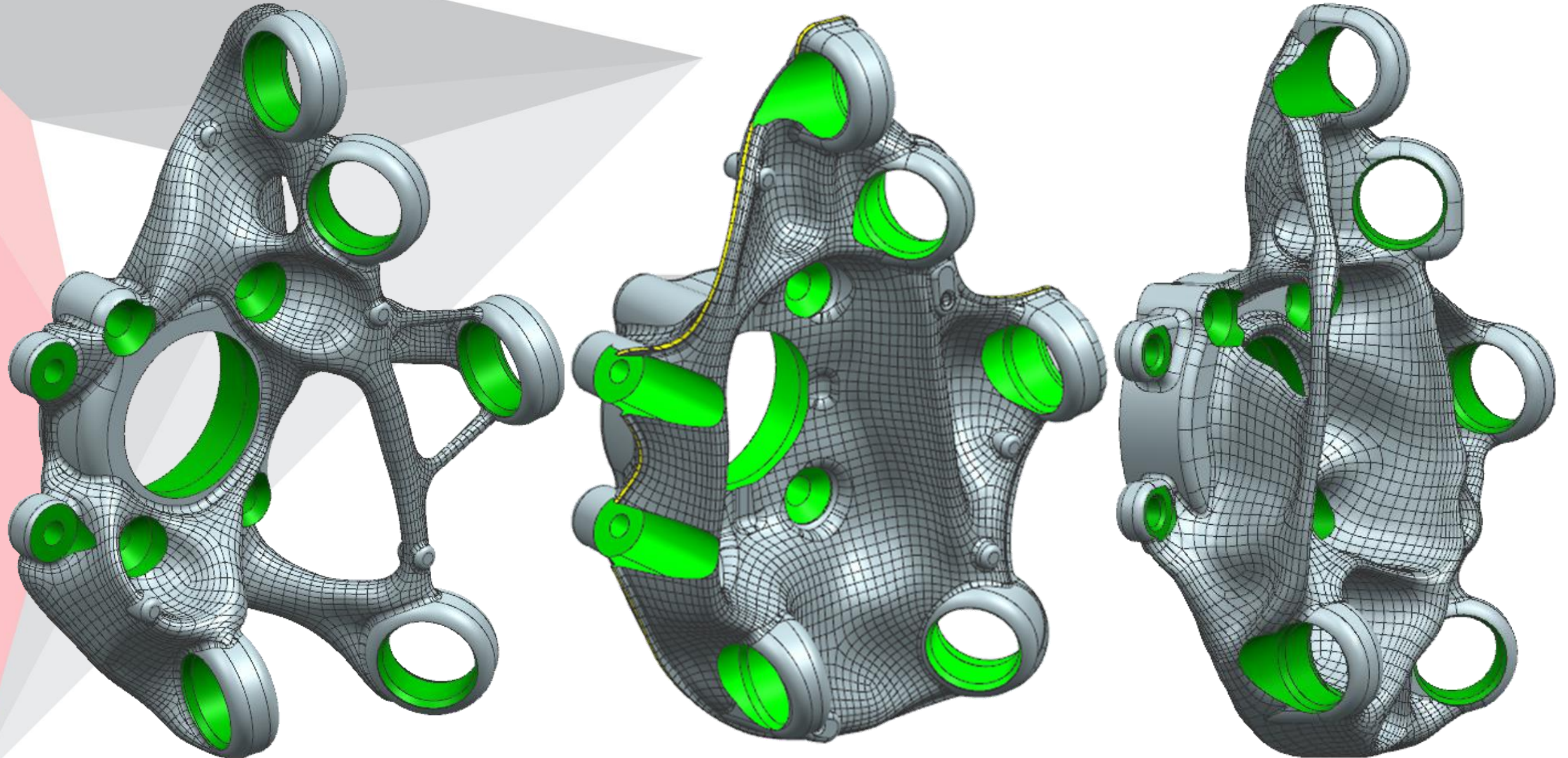
- » Redesign mittels **netzbasierter Geometriaufbereitung**
- » **parallele Konzeptentwicklung** möglich
- » Änderungen der Randbedingung mit geringem Zeitaufwand

## Fazit:

- » Konzeptauswahl nach Konstruktion
- » geringer Aufwand je Entwicklungsschleife
- » Verkürzung der Entwicklungszeit, bei:
  - » Absicherung ELFs n.i.O
  - » Veränderung der Randbedingungen

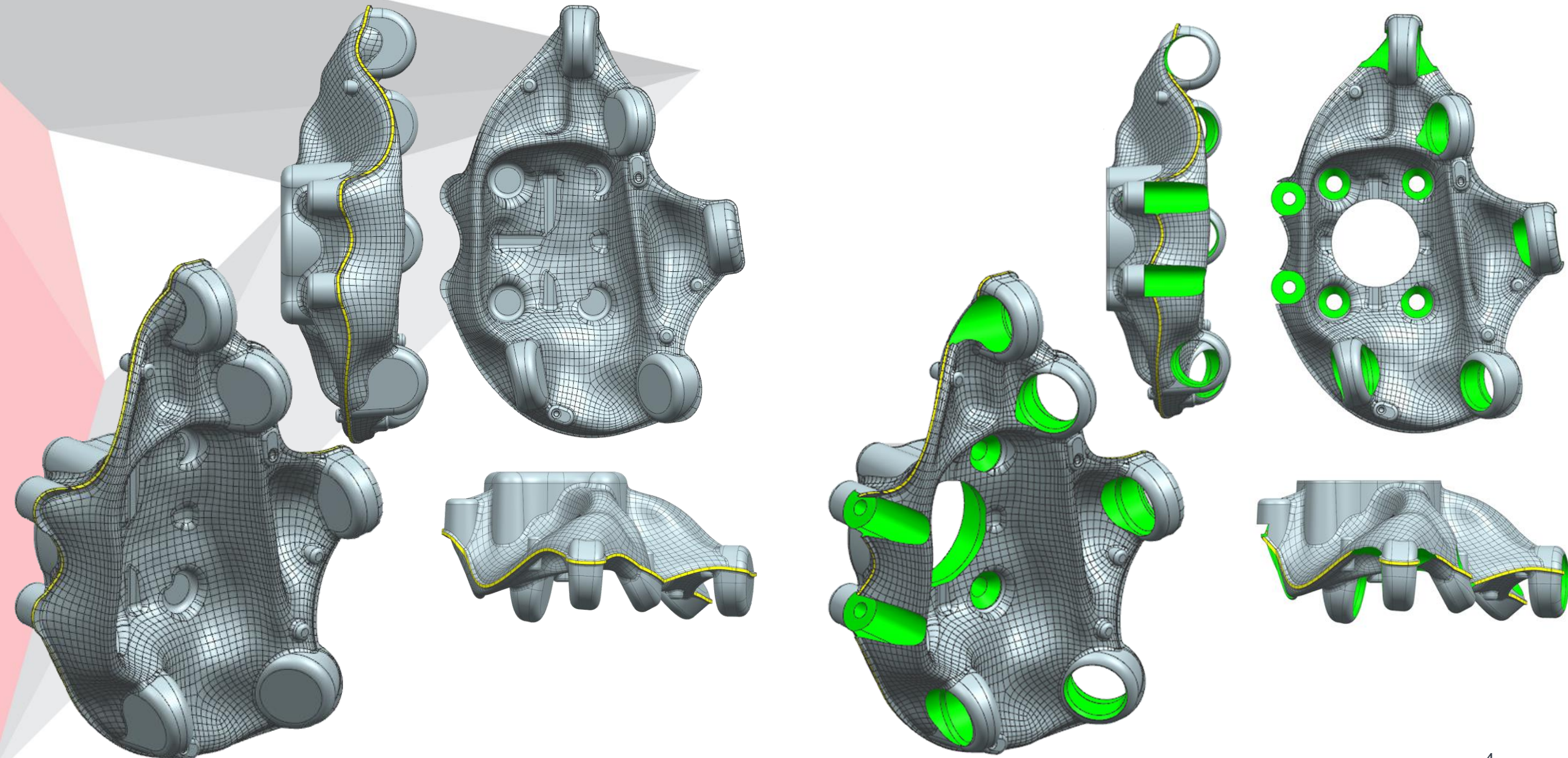






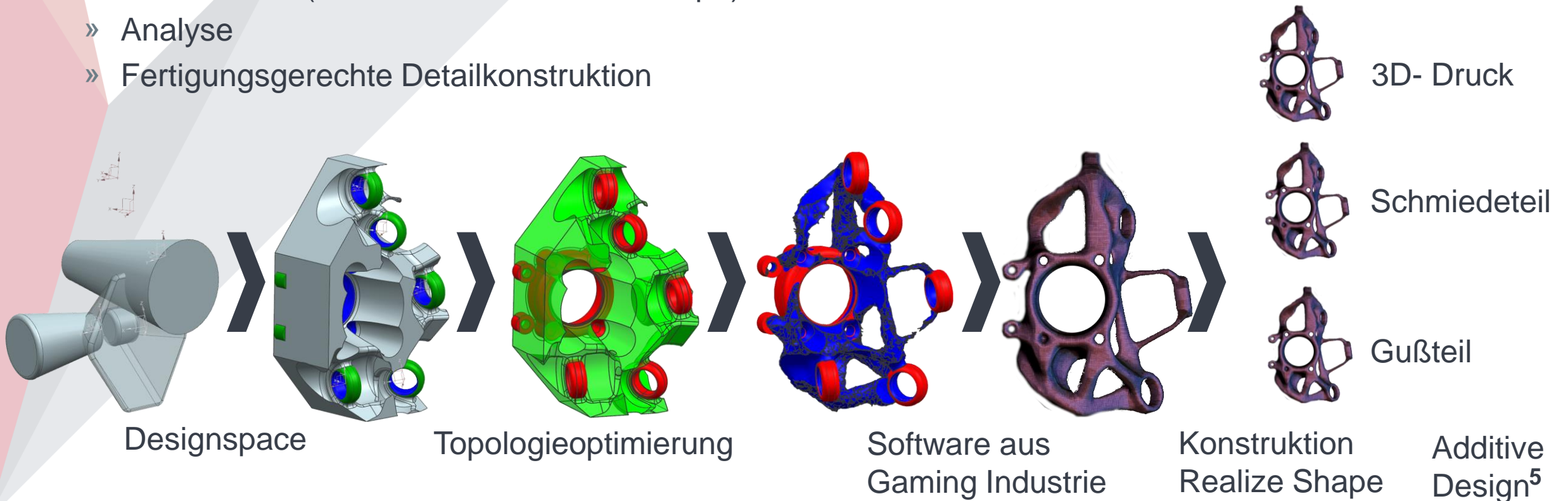


# RADTRÄGER SCHMIEDEN (ROHTEIL & FERTIGTEIL)



## WORKFLOW

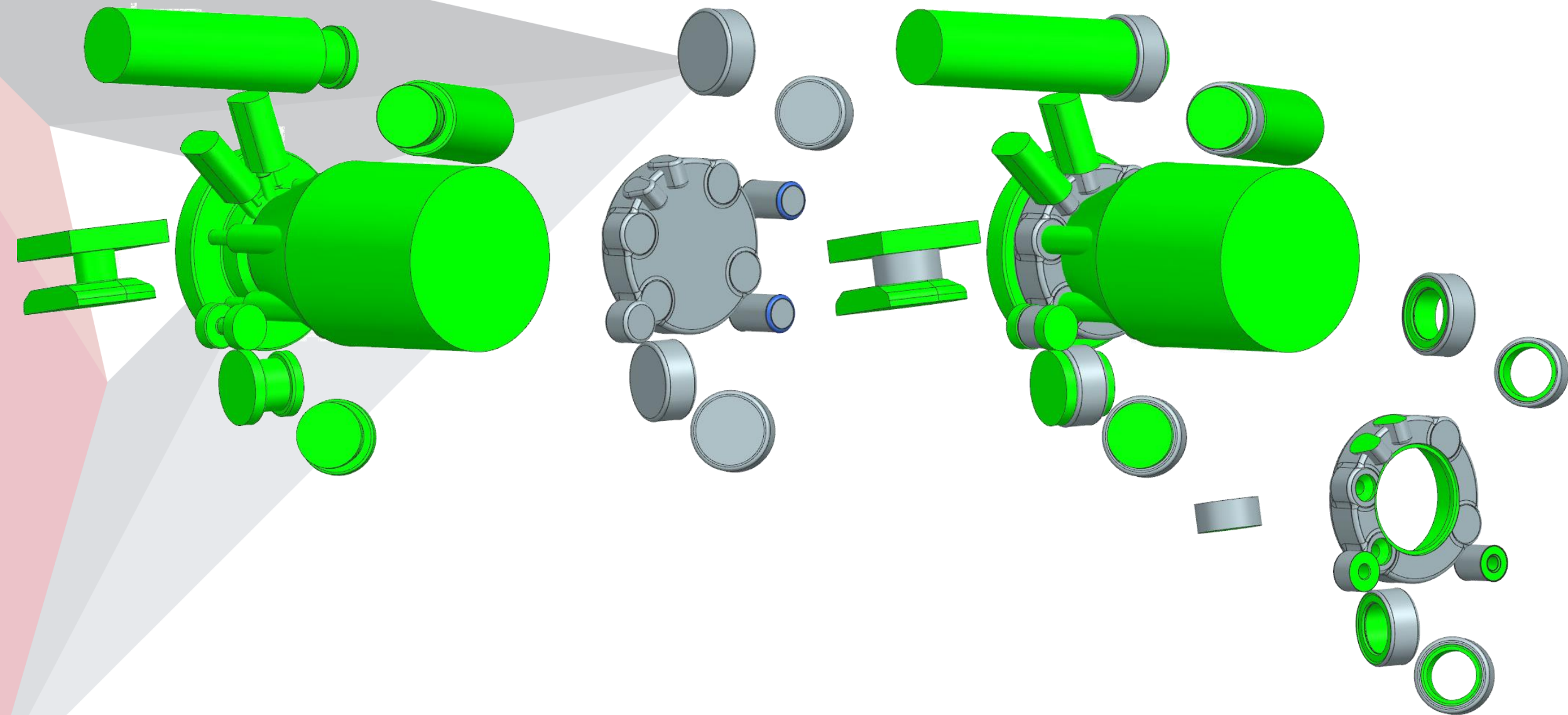
- » Bauraumdefinition im Gesamtfahrzeug
- » Topologieoptimierung
- » Aufbereitung (3D-Software aus Gaming Industrie)
- » Konstruktion (Siemens NX – Realize Shape)
- » Analyse
- » Fertigungsgerechte Detailkonstruktion





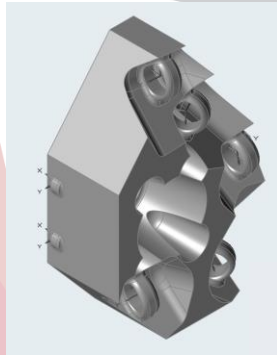
# DESIGNSPACE (NX)





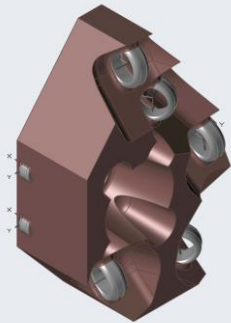


# TOPOLOGIEOPTIMIERUNG



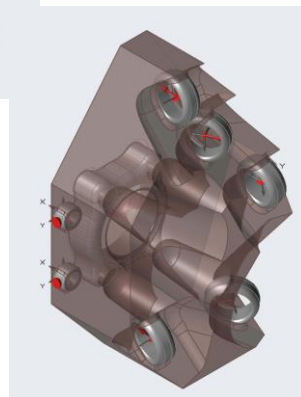
## Import \*.jt

- Geometrien
- Material
- Koordinatensysteme

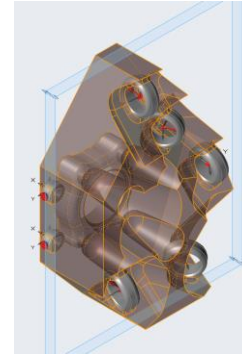


## Zuweisungen

- Designspace
- Non-Designspace



## Lastfälle

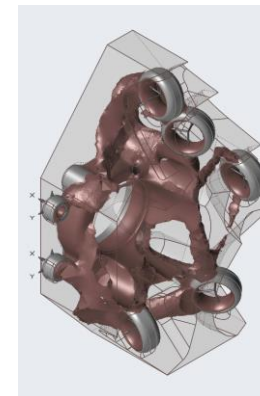


## weitere Restriktionen

- Entformungsebene/ -fläche
- Symmetrie

## Optimierungseinstellungen

- Zielfunktion
- Restriktionen
- etc.



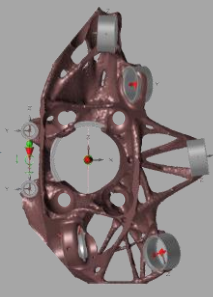
## Export \*.stl

## 3D Druck

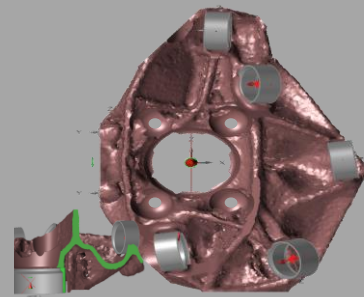


ID #47  
Overhang 60deg

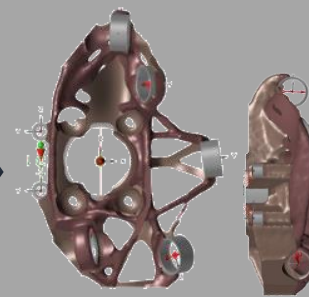
## Schmieden



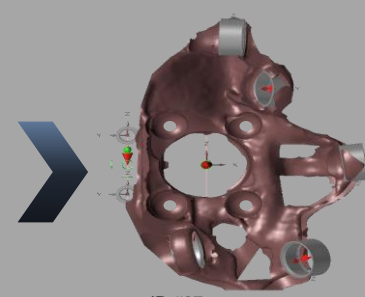
ID #18  
Split Draw



ID #10  
Split Draw & noHole



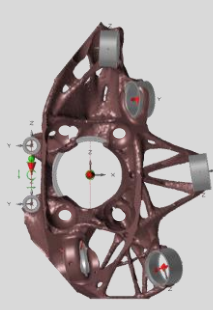
ID #31  
Trennfläche & 2x Single Draw



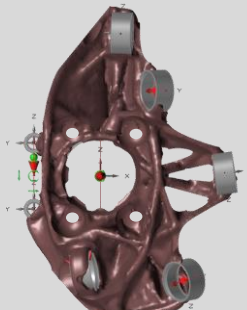
ID #37  
Trennfläche, 2x Single Draw, noHole & manueller  
Bauraumbeschnitt

- manueller Input:
- Trennfläche
  - Bauraumbeschnitt

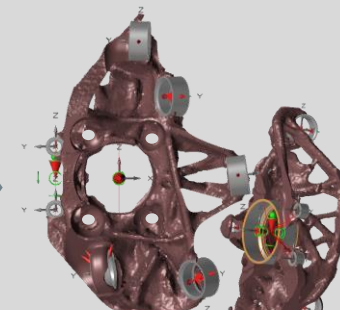
## Guß



ID #18  
Split Draw

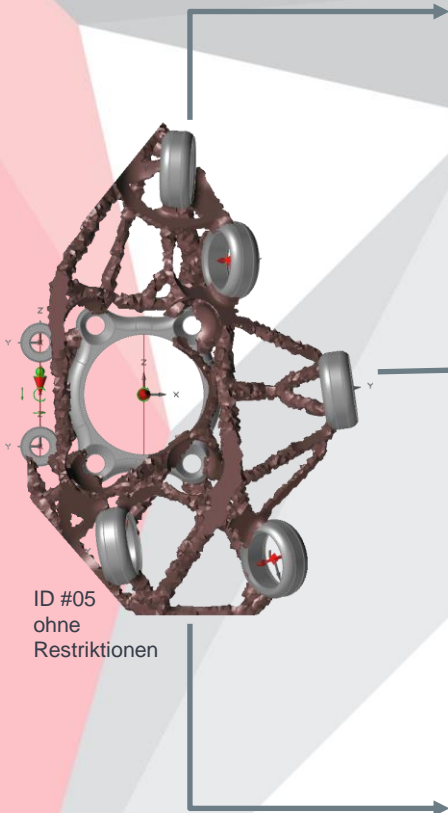


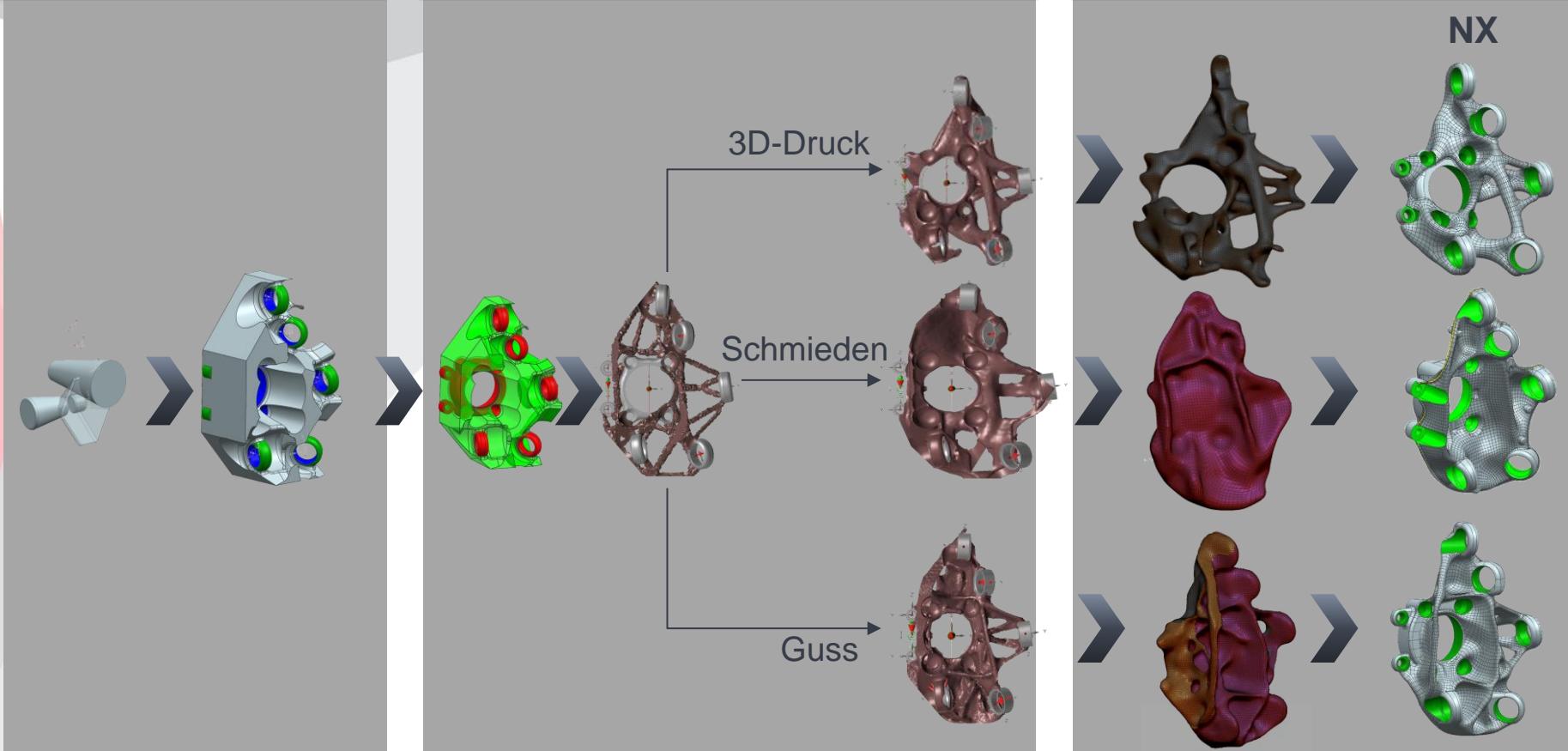
ID #43  
Bauraumbeschnitt & Split Draw



ID #45  
weitere Entformungs-richtungen

- manueller Input:
- Trennfläche
  - Bauraumbeschnitt





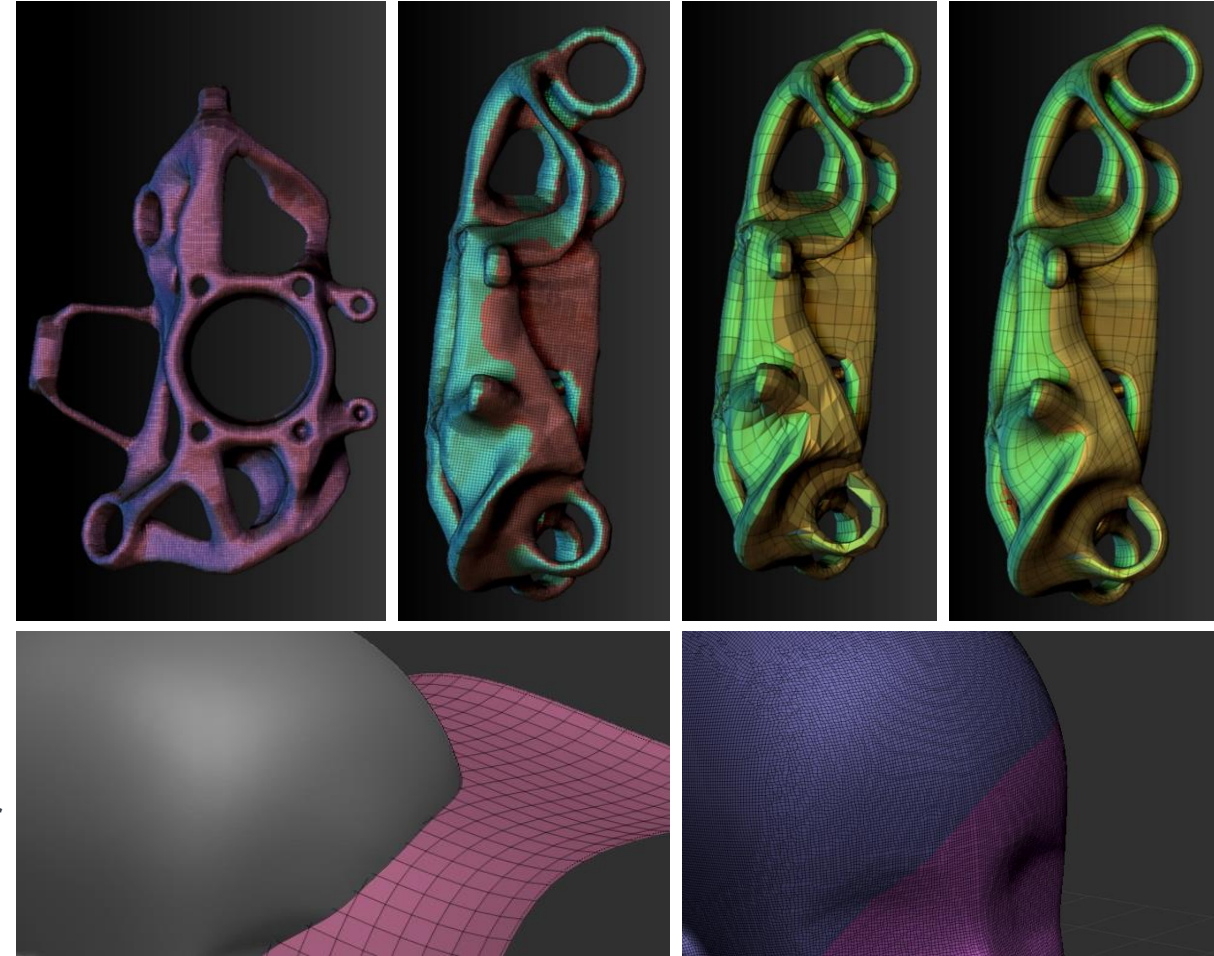
## Next Steps:

- Finalisierung Radträger Guss

## TRENNFLÄCHE POLIGONKÖRPER)

Abgrenzung nach Trennfläche druch:

- » Selektion aller sichtbaren Polygone einer Ansicht
  - » (+) gr. Freiheiten bei der Topologieoptimierung
  - » (-) manuelle Selektion notwendig
  - » (-) Export Trennfläche nicht möglich
  
- » Zuvor definierte Trennfläche zur
  - » (+) komplexe, fertigungsgerechte Trennfläche möglich
  - » (+) Trennfläche als Konstruktionselement verfügbar
  - » (-) definierte Trennfläche als Restriktion der Topologieoptimierung



**DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!**



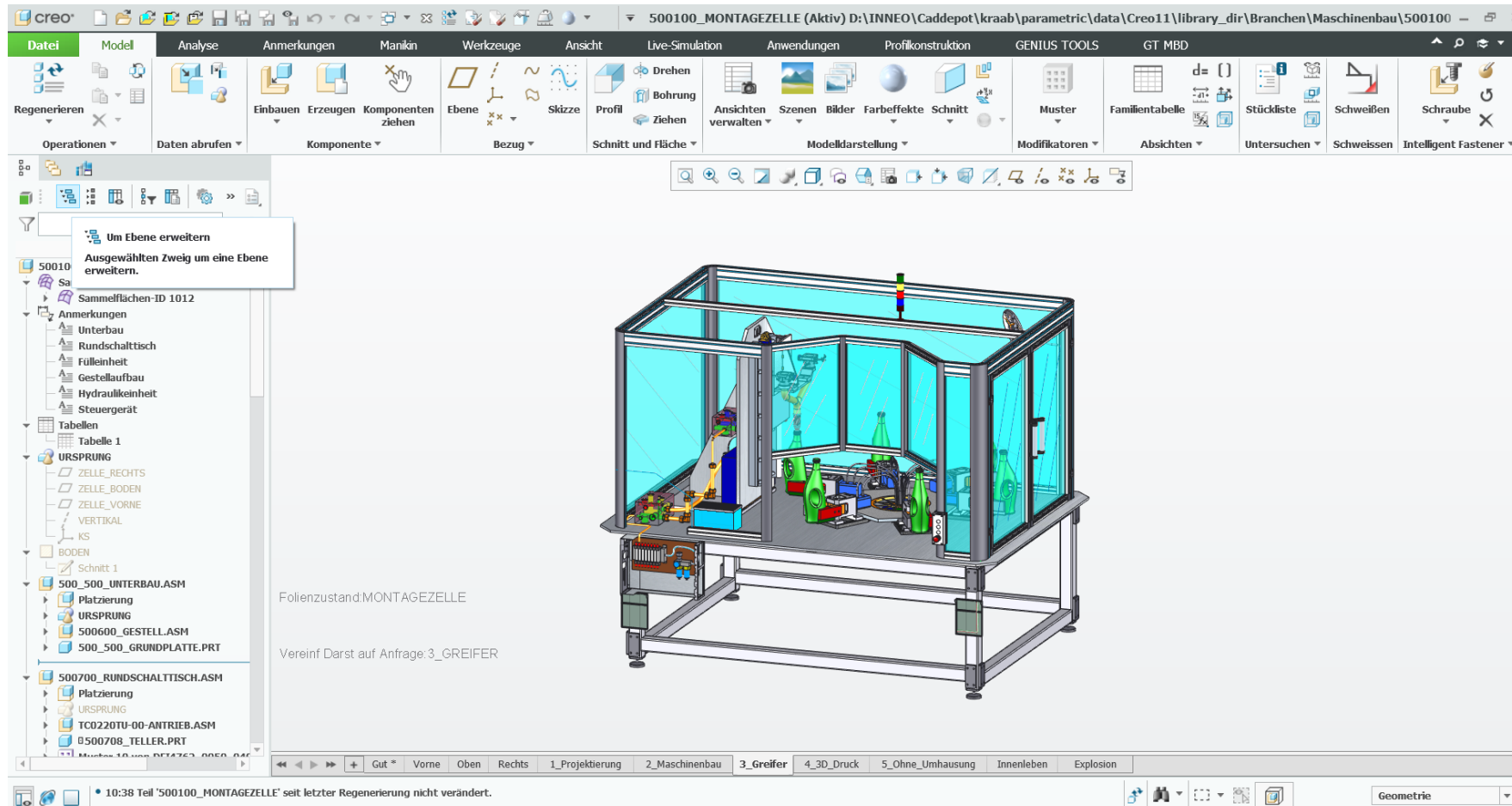
# Creo Parametric 11

## Die Highlights der neuen Version

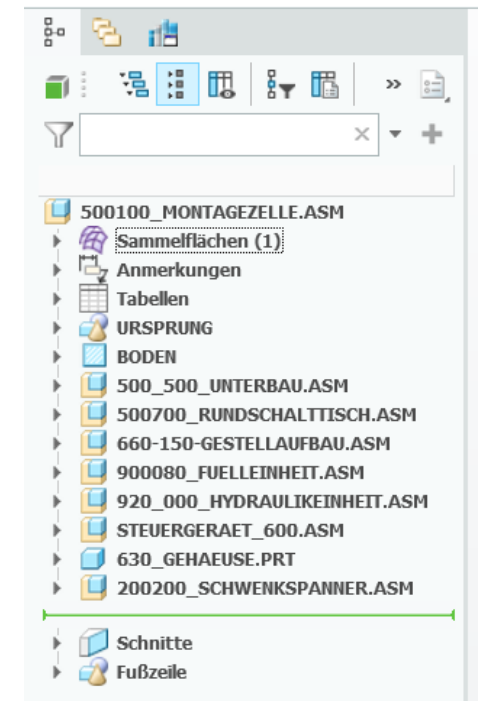
**Klaus Raab**  
**Solution Architect**  
+49 7961 890-146  
[kraab@inneo.com](mailto:kraab@inneo.com)



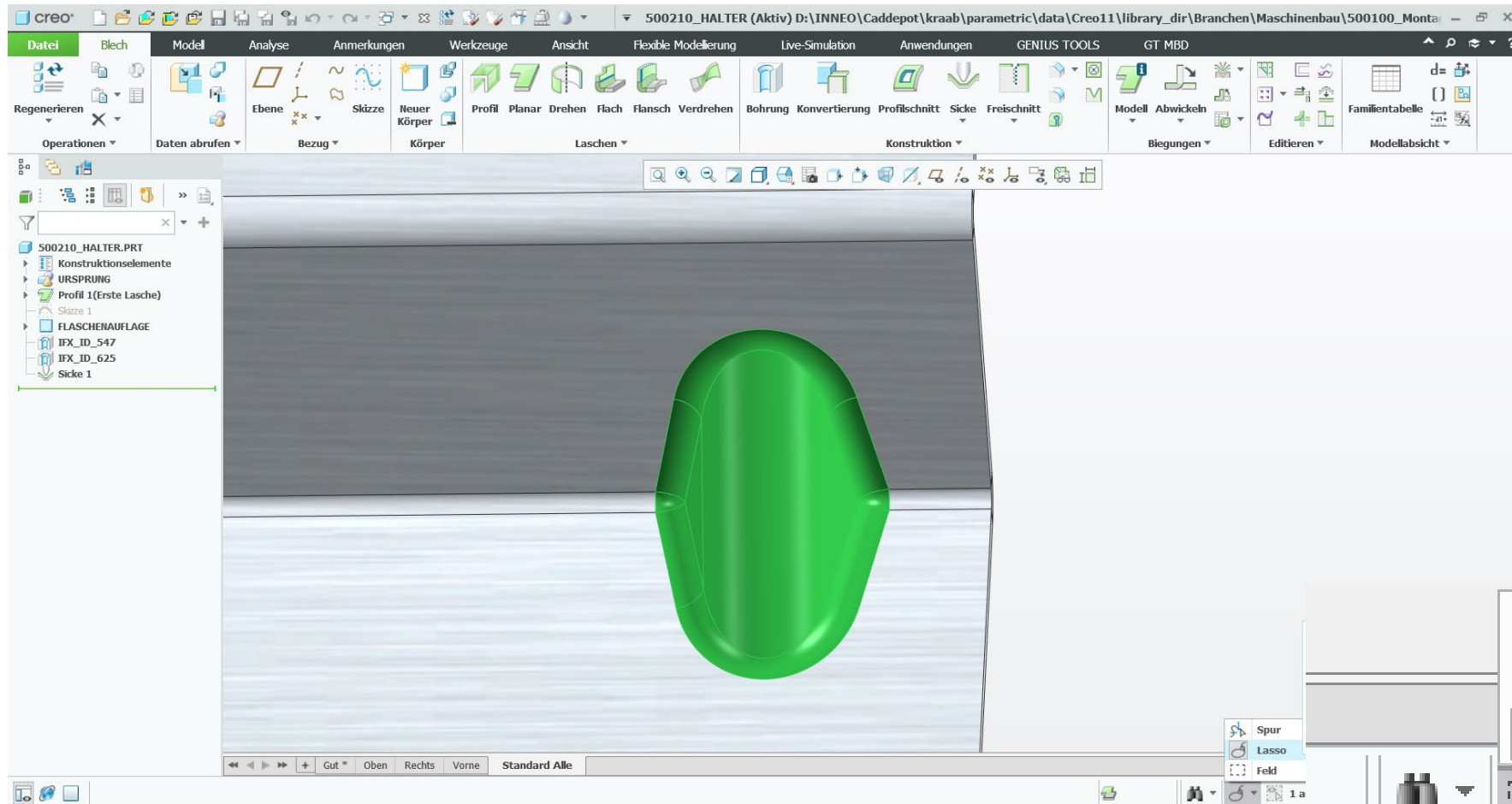
## Im Modellbaum wird nur eine Ebene aufgeklappt



- ✓ Schnellere Darstellung der Baugruppenstruktur
- ✓ Beim Verkleinern wird die oberste Ebene beibehalten

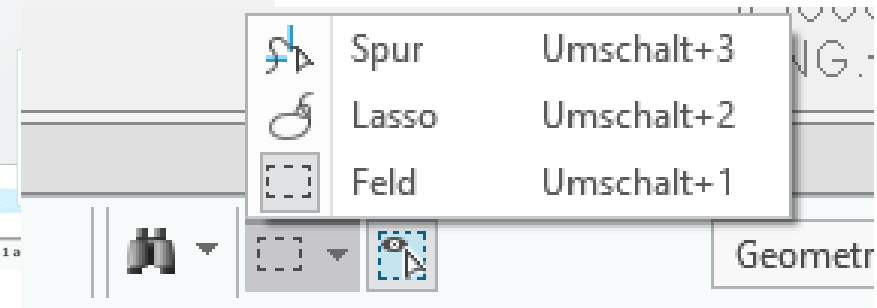


## Flächenauswahl über Feld, Spur oder Lasso zum Einfärben

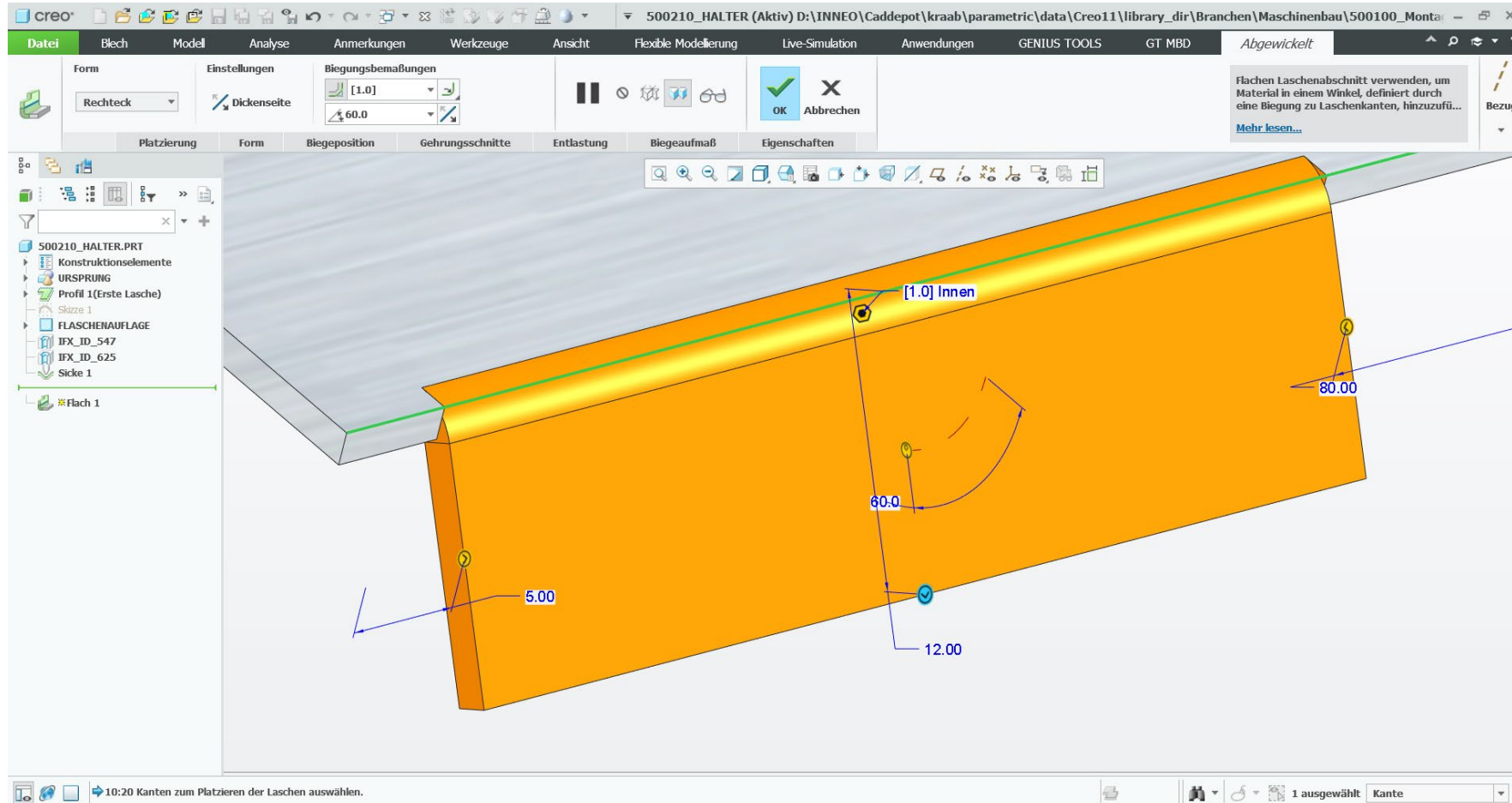


✓ Schnellere Auswahl mehrerer einzelner Referenzen für die Anwendung von Farben

✓ Einfacher Auswahl semantischer Referenzen (Maschinenlesbar) für 3D Anmerkung in der modelbasierenden Definition (MBD)

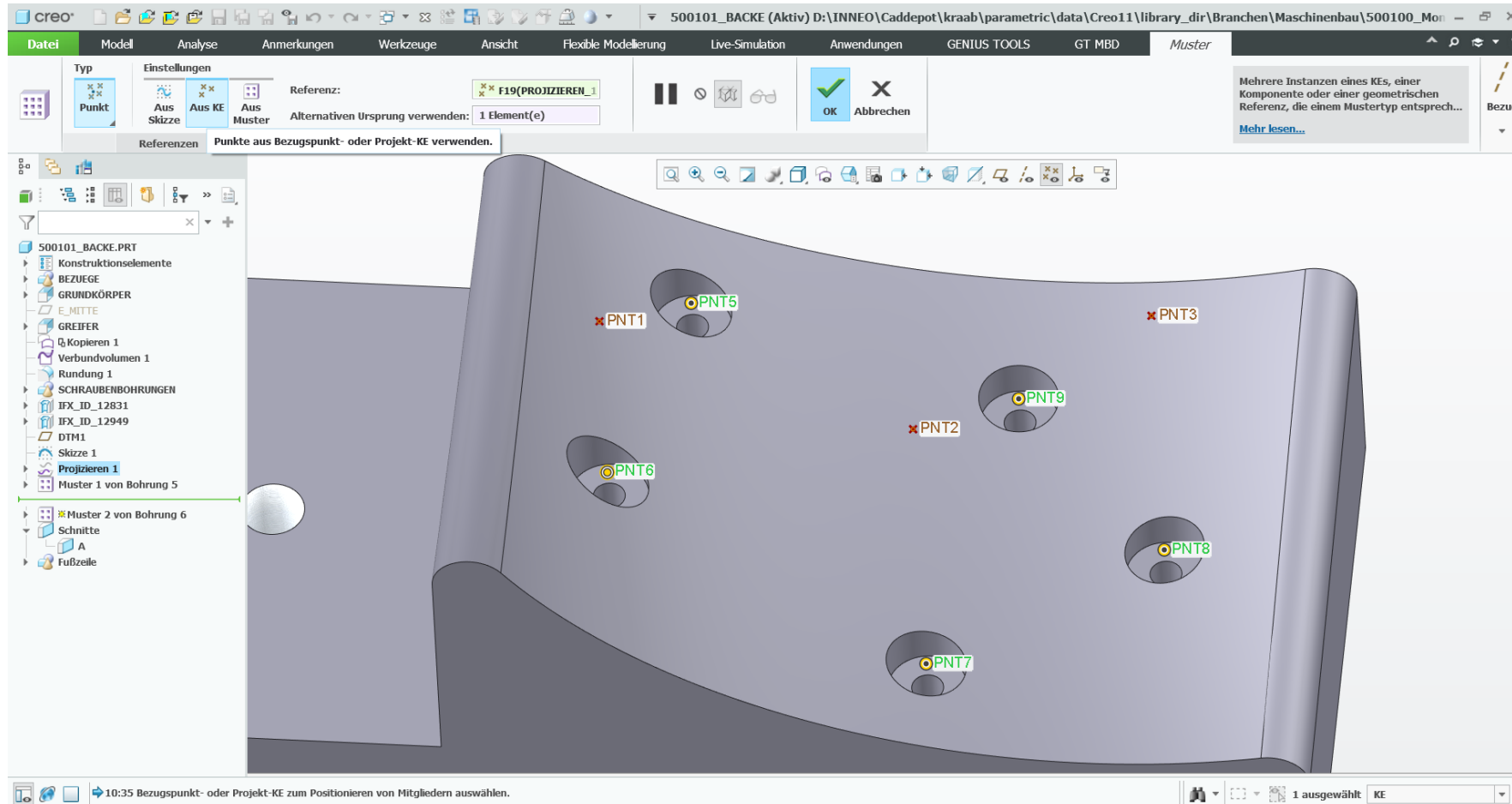


## Neue Darstellung der Handles für KE-Bemaßungen



- ✓ Bessere Darstellung der Möglichkeit zum Ziehen
- ✓ Erleichtern die Unterscheidung beim Ziehen

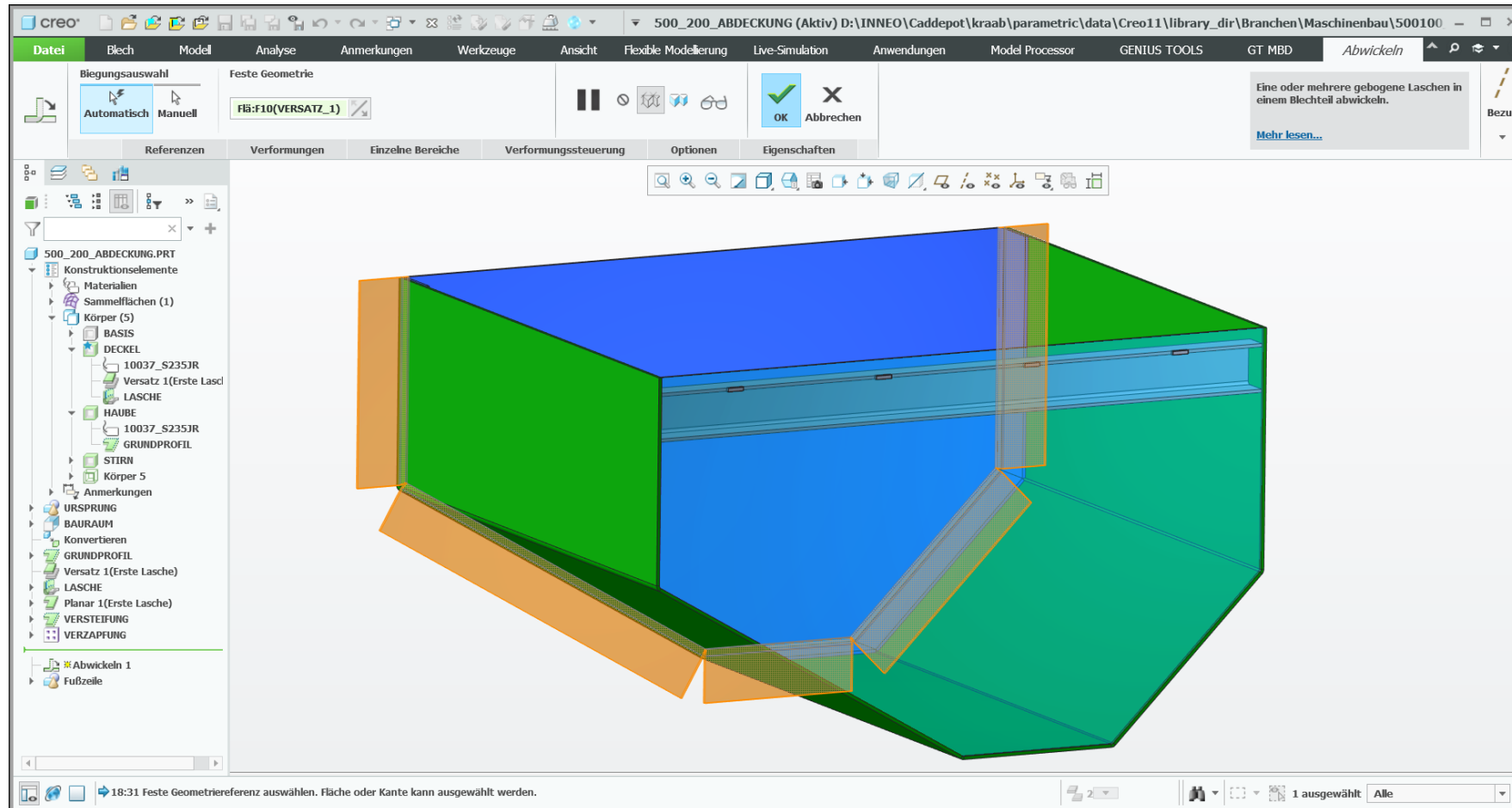
## Muster über Referenz von projizierten Punkten



- ✓ Referenz aus Konstruktionselement Projizierte Punkte

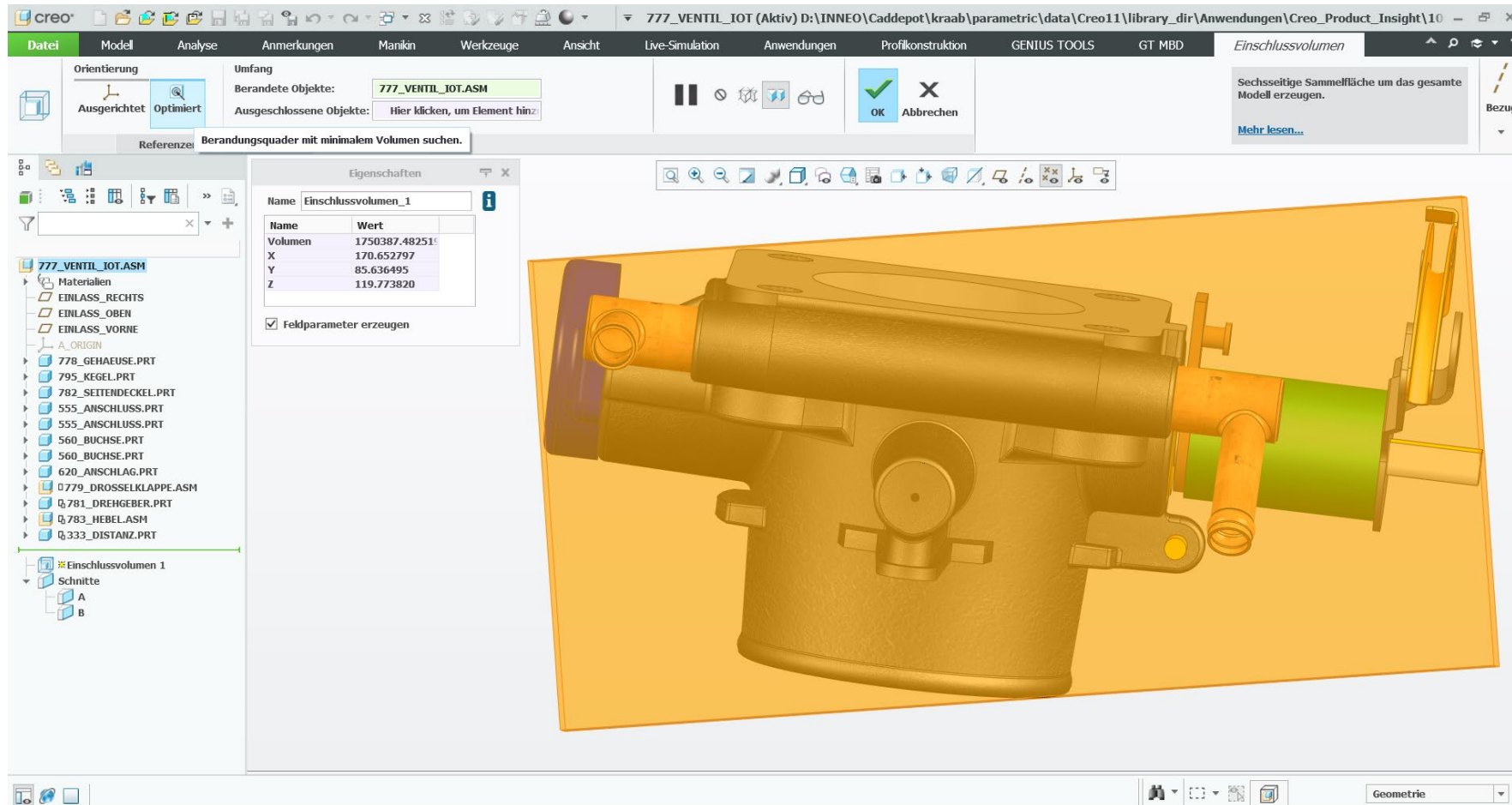


## Mehrkörper - Konstruktion von Blechteilen



- ✓ Master Modell Technologie
- ✓ Mehrere Blechkörper in einem Bauteil
- ✓ Können als Einzelteile separiert werden
- ✓ Unterschiedliche Körper können unterschiedliche Blechdicken haben

## Berandungsquader mit minimalem Volumen



- ✓ Orientierungsoptimierte kleinste Verpackungseinheit
- ✓ Komponenten können ein und ausgeschlossen werden
- ✓ Schnelles parametrisches Regenerieren durch Nutzen von mehreren Rechenkernen

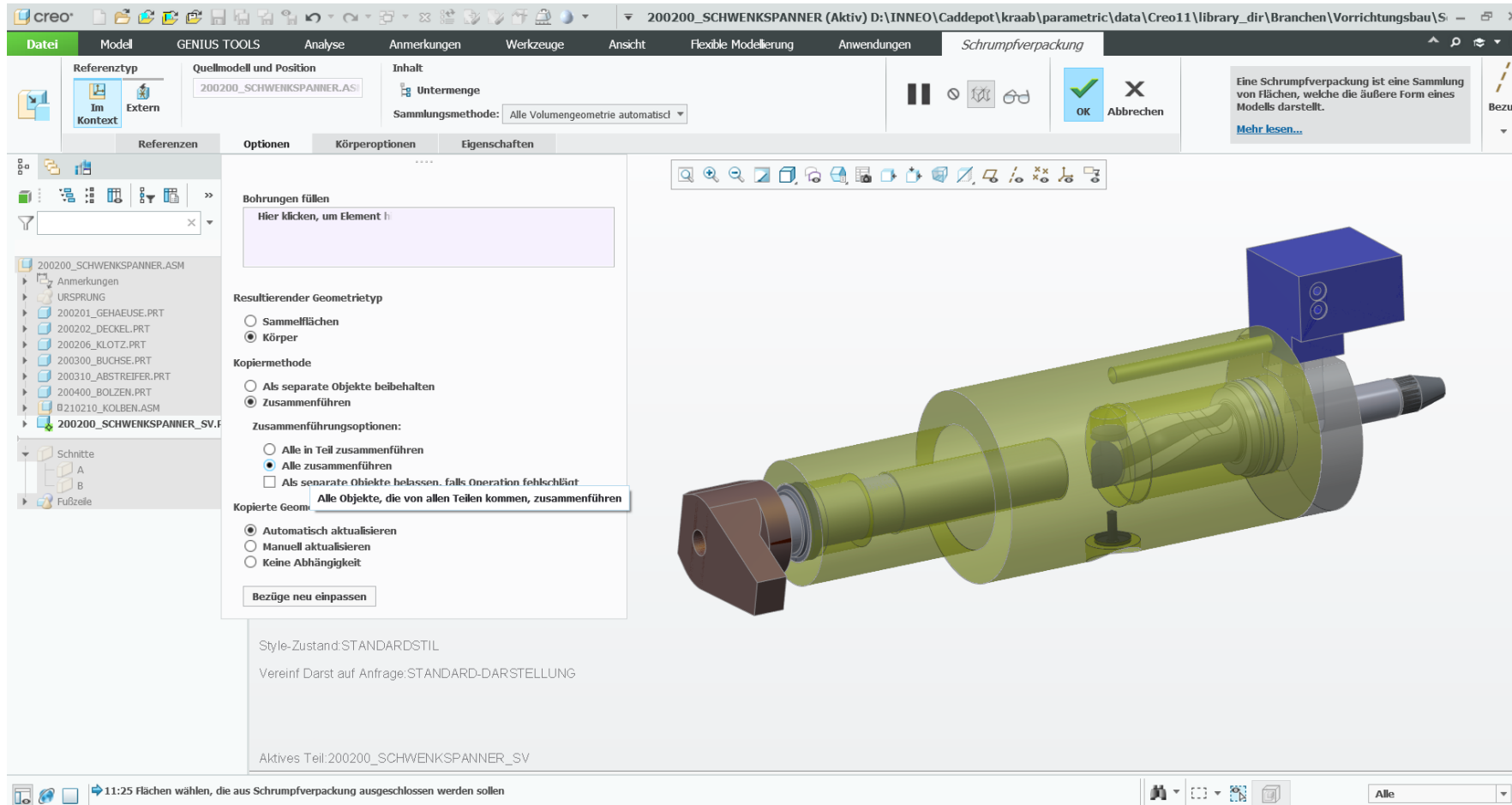
## Leistungsbericht der resultierenden Regenerierungszeit

The screenshot displays the 'Leistungsbericht' (Performance Report) window in Creo Parametric 11. The report is titled '777\_VENTIL\_IOT.ASM Leistungsdetails' and shows a list of components and their regeneration times. The 'Nach Struktur' (By Structure) view is selected, showing a hierarchical list of components. A 'Berechnen' (Calculate) button is visible at the top of the report window. A 3D model of a mechanical assembly is shown in the background, with a green cylinder and a yellow handle highlighted.

Component	Zeit [Sek]
777_VENTIL_IOT.ASM	0.74
778_GEHAEUSE.PRT	0.52
782_SEITENDECKEL.PRT	0.07
783_HEBEL.ASM	0.05
779_DROSSELKLAPPE.ASM	0.02
555_ANSCHLUSS.PRT	0.02
Vorbereitung der Regenerierung	0.01
560_BUCHSE.PRT	0.01
781_DREHGEBER.PRT	0.01
560_BUCHSE.PRT	0.01
333_DISTANZ.PRT	0.00
795_KEGEL.PRT	0.00
620_ANSCHLAG.PRT	0.00
Komponente 555_ANSCHLUSS.10.00	0.00
Komponente 782_SEITENDECKE.00	0.00
Komponente 795_KEGEL.PRT	0.00
Komponente 778_GEHAEUSE.PI0.00	0.00
A_ORIGIN	0.00
EINLASS_VORNE	0.00
EINLASS_OBEN	0.00

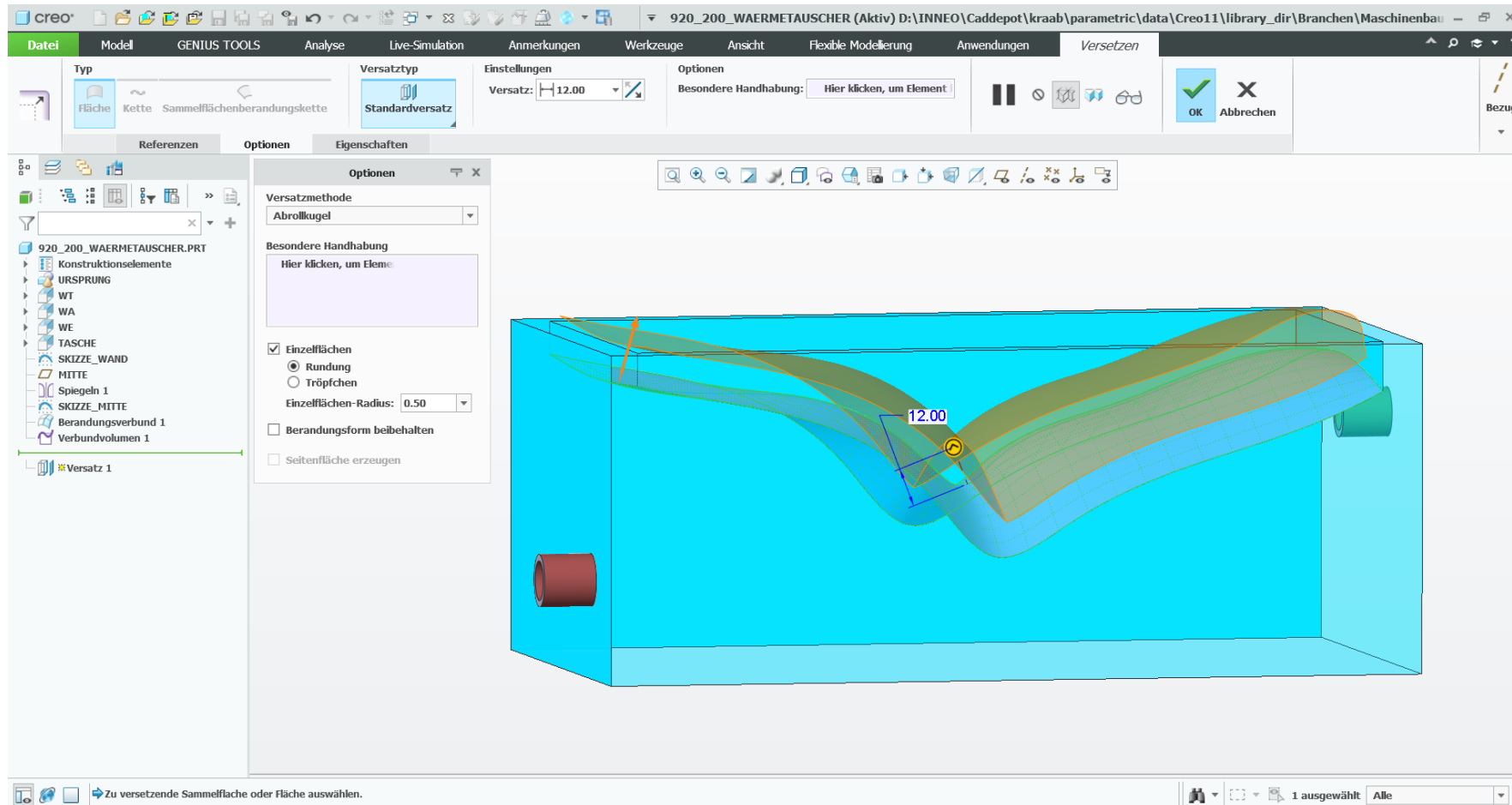
✓ Erkennen der Objekte, welchen Beitrag sie zum Regenerieren haben

## Multibody-Unterstützung bei Schrumpfverpackung



- ✓ Skalieren der Schrumpfverpackung aus der Baugruppe für den 3D Druck
- ✓ Verwendung von Flexiblen Modellieren im Teilemodus
- ✓ Übernahme der Teile als Körper für die Berechnung mit der Generativen Topologie-Optimierung

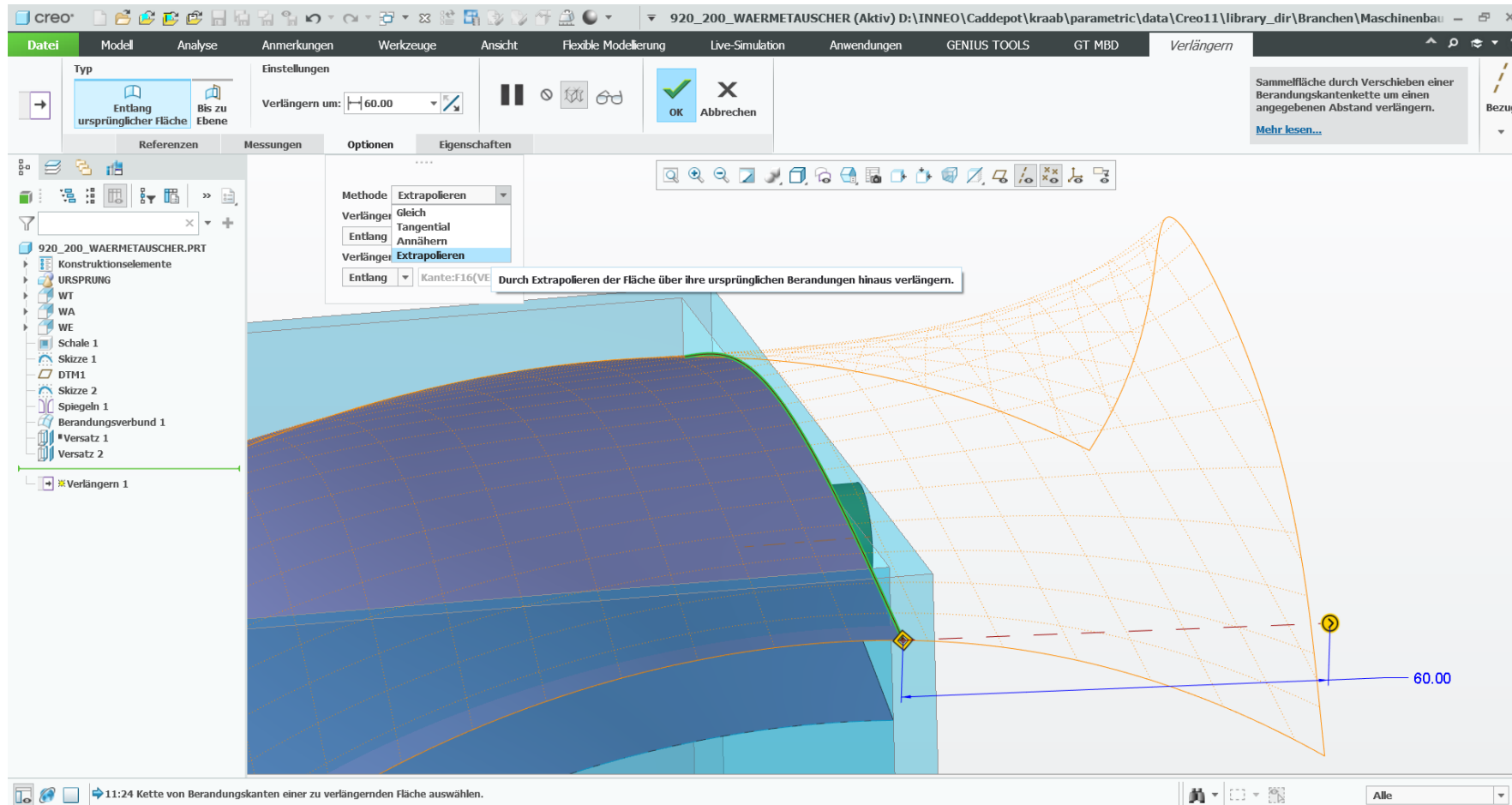
## Versatzfläche über Abrollkugel



✓ Verbesserter  
Flächenversatz

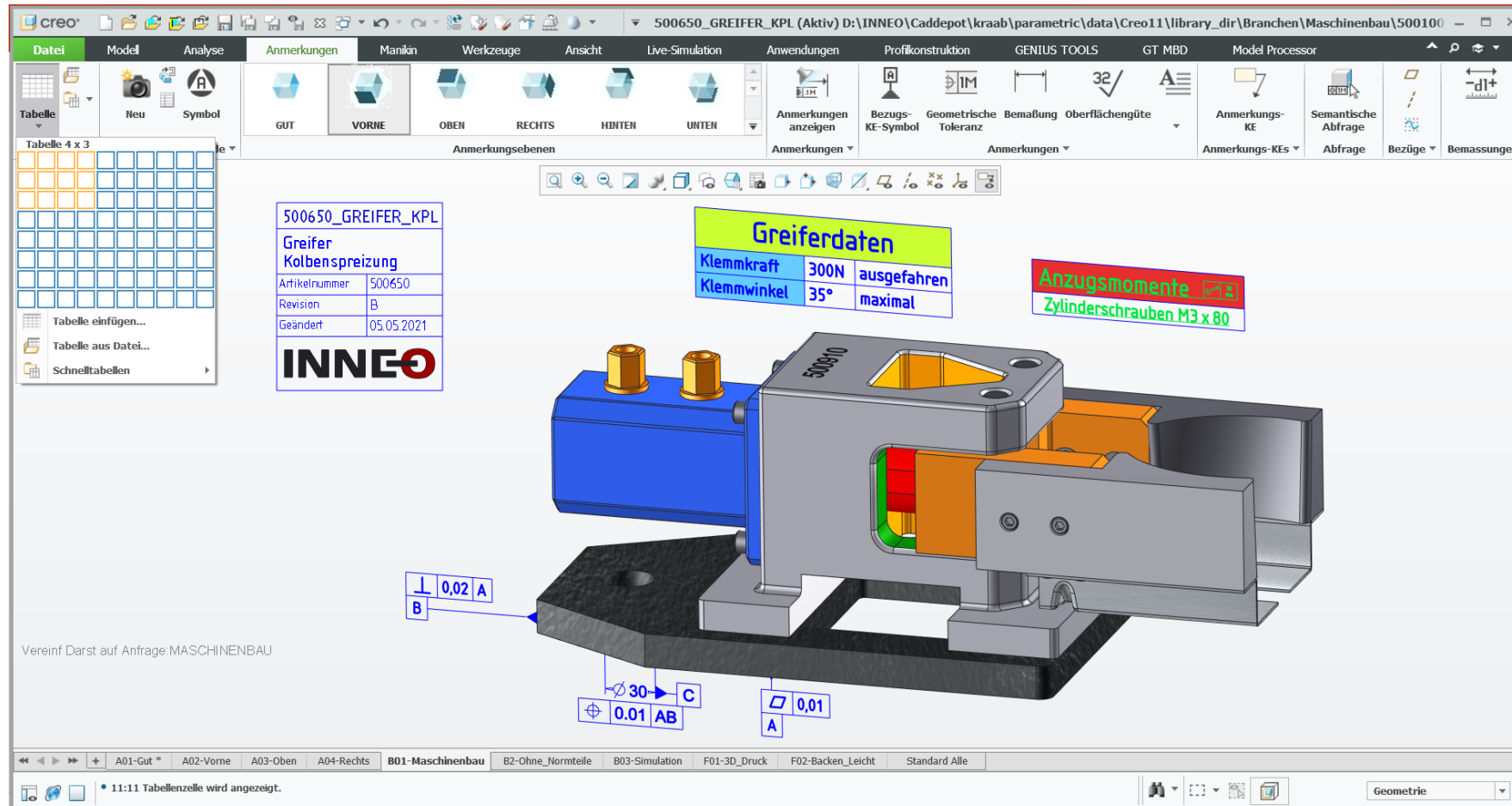


## Flächenverlängerung mit der Option Extrapolieren



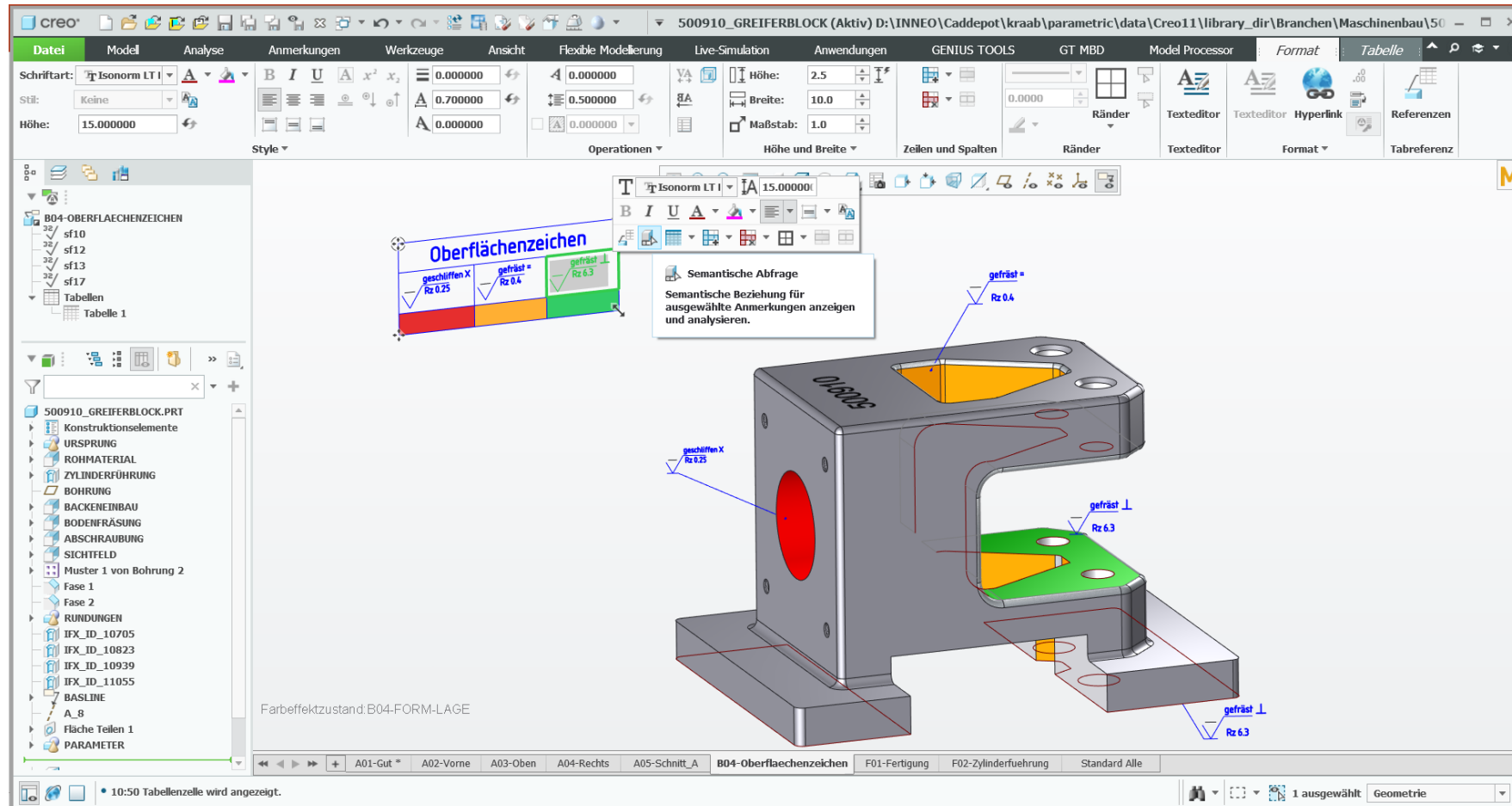
- ✓ Mit dieser Einstellung entsteht eine weniger wellige Flächenverlängerung
- Die extrapolierte Fläche erhält eine neue Flächen-ID

## Verwendung von Tabellen für Model Based Definition



- ✓ Tabellen können Flach zum Bildschirm oder in den Anmerkungsebenen positioniert werden
- ✓ Tabellenzellen können komfortabel für Hyperlinks und semantische Verweise verwendet werden

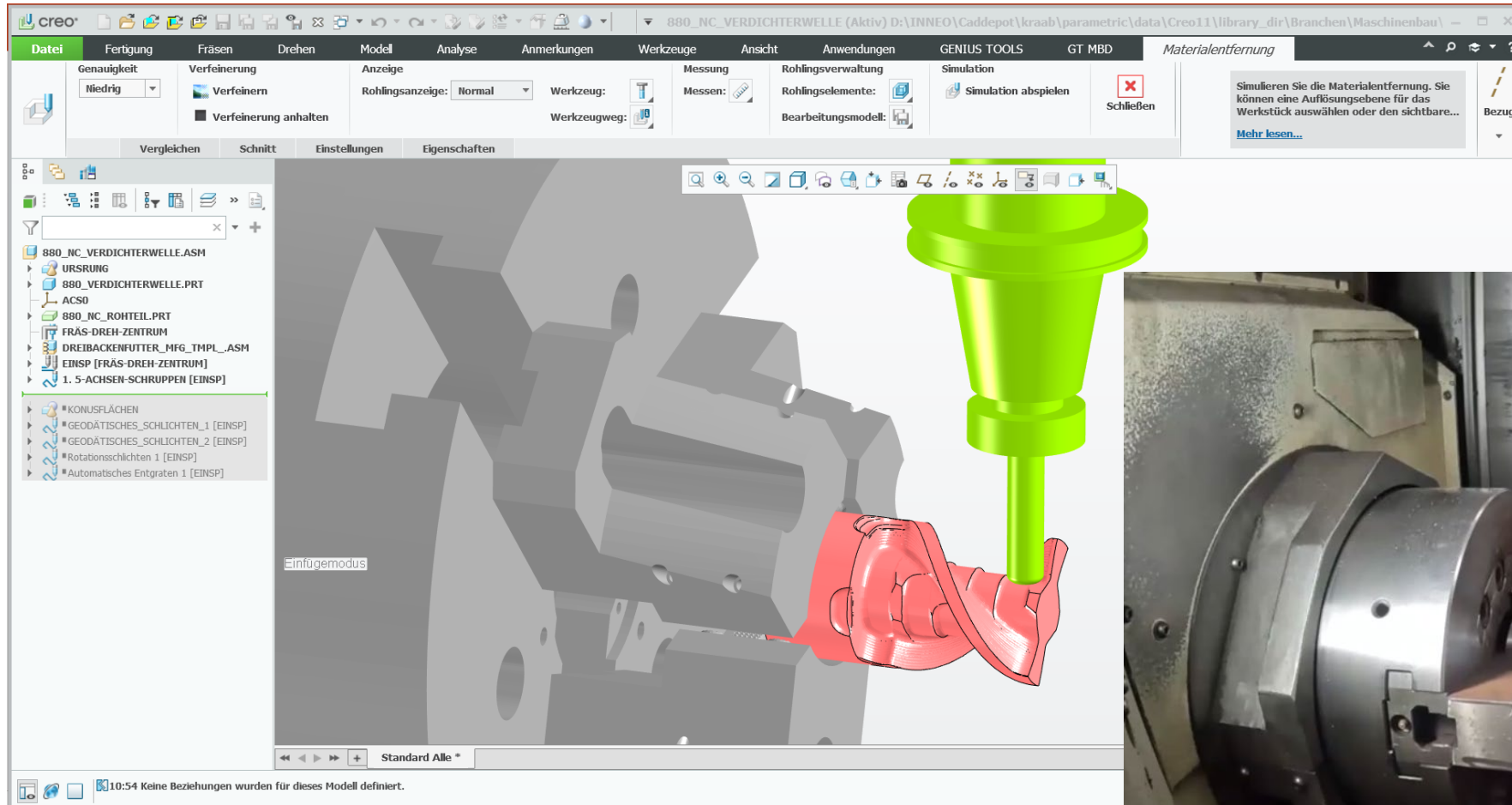
## Verwendung von Tabellen für Model Based Definition



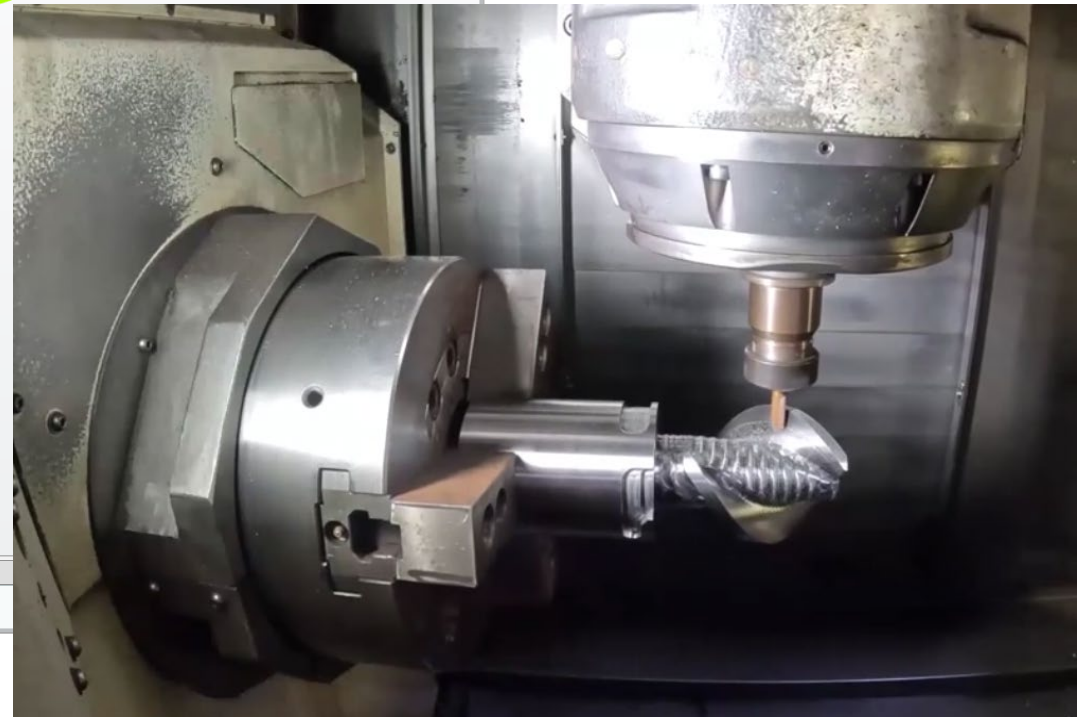
✓ Tabellenzellen können für semantische Verweise verwendet werden

✓ Der Export von Step 242 Edition 3 wird unterstützt

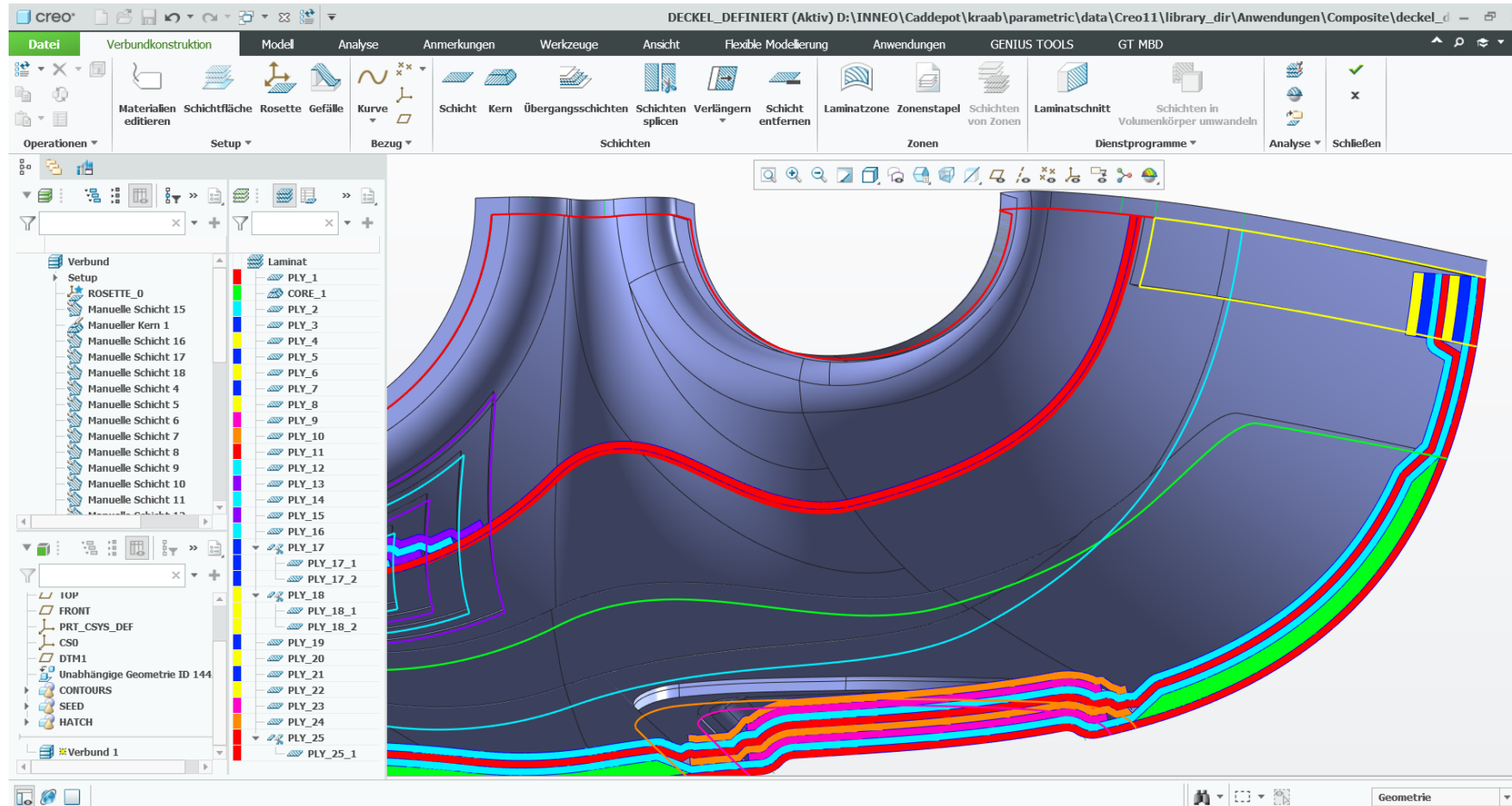
## Creo NC 4 Achsen Rotations- Dreh Fräsbearbeitung



- ✓ HGZ-Schruppen und Schichten
- ✓ Bearbeitung über 360°
- ✓ Kollisionsprüfung zu Spannmittel



## Konstruktion für Verbundwerkstoffe (Composite)



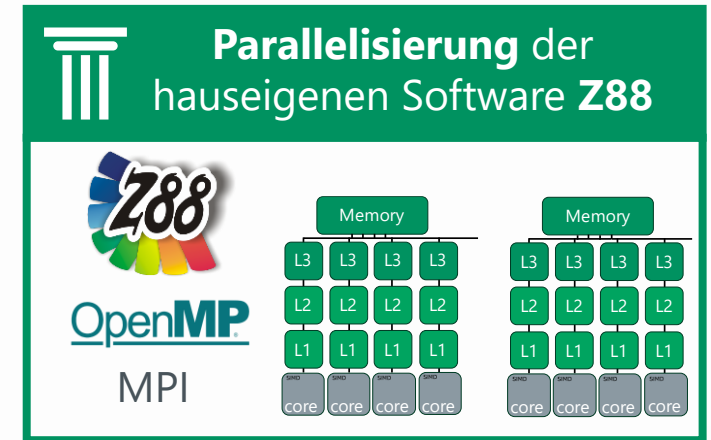
- ✓ Die zonenbasierte Konstruktion ermöglicht die konzeptionelle Top-Down-Konstruktion von Verbundwerkstoffen unter Verwendung von Zonenregionen und Zonenstapelrezepten zur automatischen Erstellung von Schichten.



# Gate2HPC

## Parallel Computing für KMU:

*Die Erweiterung von Z88 im Gate2HPC-Projekt*



Peter Grohmann

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

11.09.2024



Lehrstuhl für  
Konstruktionslehre und CAD  
Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel

Bayerisches Staatsministerium für  
Wissenschaft und Kunst



Kofinanziert von der  
Europäischen Union

# Gate2HPC

- **Gefördert durch:** Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)
- **Schwerpunkt:** Digitalisierung
- **Förderbereich:** 1 – Innovation und Wettbewerbsfähigkeit
- **Fördermaßnahme:** 2 – Technologietransfer von Hochschulen in KMU
- **Projektlaufzeit:** Juni 23 – Mai 27



## Nutzen von Methoden der Künstlichen Intelligenz



Bereitstellung von vorgefertigten **Notebooks**



**Bild**  
(z. B. Anomalie-erkennung)



**Sprache**  
(z. B. Large-Language-Models)



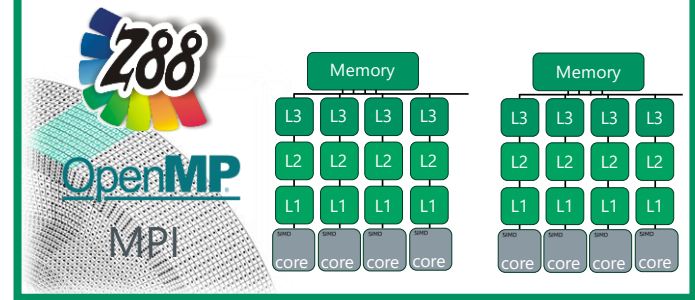
**Logische Schlussfolgerungen**  
(z. B. Datenanalyse)



## Ansteuerung von FE-Programmen



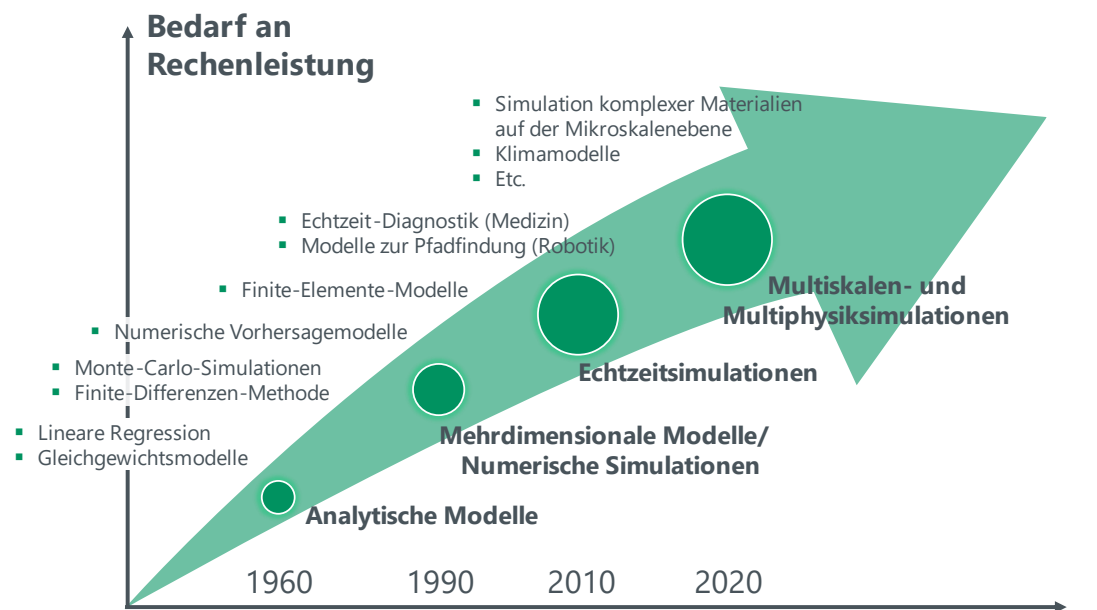
## Parallelisierung der hauseigenen Software Z88



**Konverter**



### Problemstellung



**Steigender Bedarf an Rechenleistung für Simulationen und ML/KI-Awendungen**

Lösung durch...

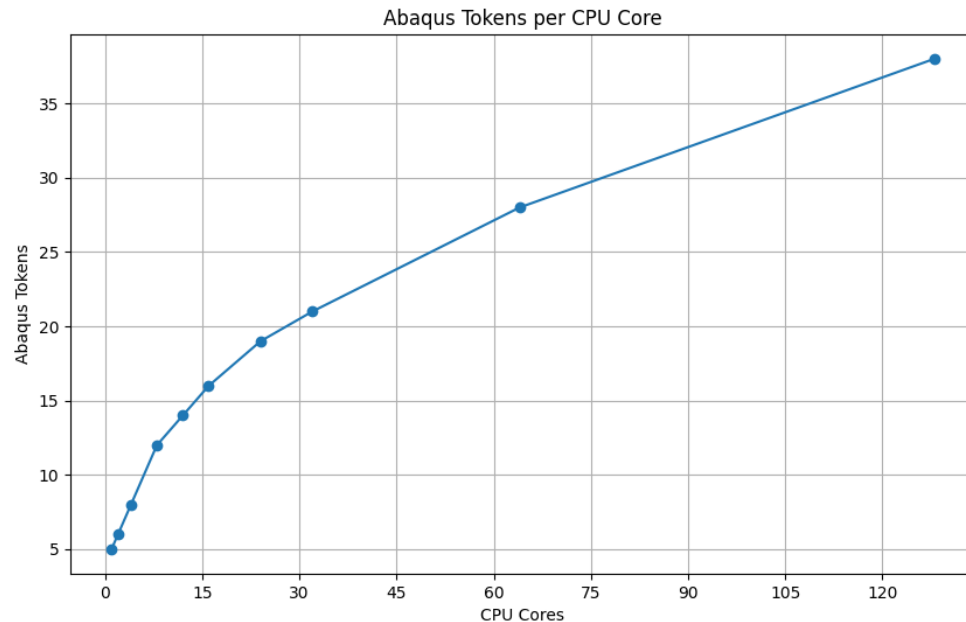
...den Einsatz von HPC

### HPC-Hürden

- Software
  - Lizenzgebühren
  - Kostenpunkt Tokens
- Hardwarekosten
  - Anschaffungskosten
  - Wartung
- Niedrige Usability
- Datenschutz und Sicherheit
- Schwankender Anwendungsbedarf
- Fehlendes Know-How
- Etc.

### Token-basiertes Lizenzierungssystem:

- Anzahl der benötigten Abaqus-Tokens richtet sich nach Anzahl der verwendeten CPU-Kerne. Je mehr für eine Berechnung genutzt werden, desto mehr Tokens werden benötigt.



$$\text{Benötigte Tokens} = 5 \times N^{0,422}$$

$N$  : Anzahl der genutzten CPU-Kerne

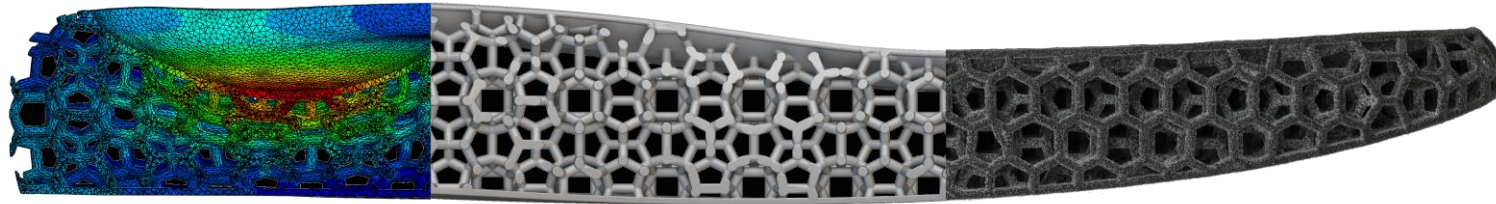
Quelle: <https://deviceanalytics.com/abaqus-token-calculator/>

### HPC-Hürden

- Software
  - Lizenzgebühren
  - Kostenpunkt Tokens
- Hardwarekosten
  - Anschaffungskosten
  - Wartung
- Niedrige Usability
- Datenschutz und Sicherheit
- Schwankender Anwendungsbedarf
- Fehlendes Know-How
- Etc.



# MonoMat

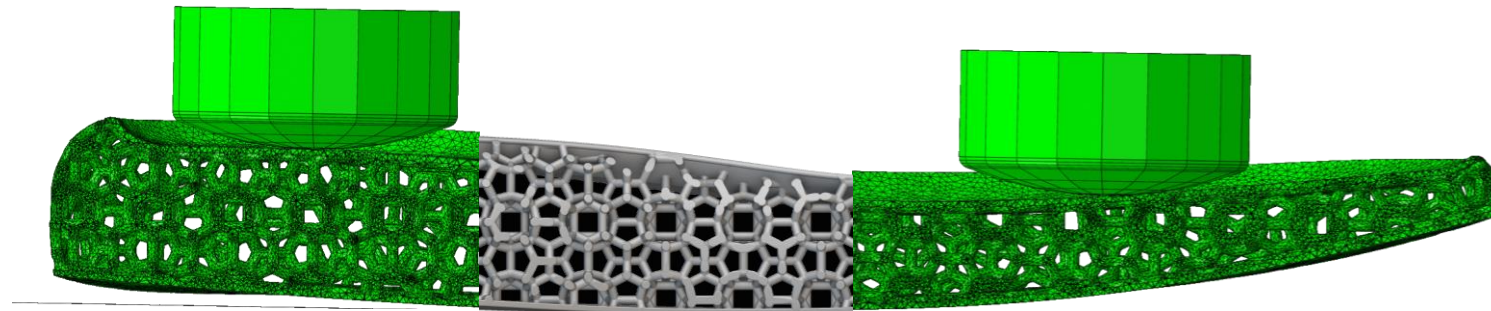
 | Kaskadierter Monomaterialansatz  
zur automatisierten ressourceneffizienten Fertigung digitalisierter,  
personalisierter Anwendungen in Medizin, Sport und Lifestyle

## HPC-Hürden

- Software
  - Lizenzgebühren
  - Kostenpunkt Tokens
- Hardwarekosten
  - Anschaffungskosten
  - Wartung
- Niedrige Usability
- Datenschutz und Sicherheit
- Schwankender Anwendungsbedarf
- Fehlendes Know-How
- Etc.



# MonoMat

 | Kaskadierter Monomaterialansatz  
zur automatisierten ressourceneffizienten Fertigung digitalisierter,  
personalisierter Anwendungen in Medizin, Sport und Lifestyle

**Rechenzeit einer Rechnung:**  $\approx 72$  Stunden

**Verwendete Hardware:** Intel Core i9-10980XE CPU, 128 GB DDR4

**Erforderliche Abaqus-Tokens je Rechnung:**  $\approx 16$  Tokens

Quelle: Thomas Peter Schütt (Modellaufbau und Abaqus-Rechnungen)

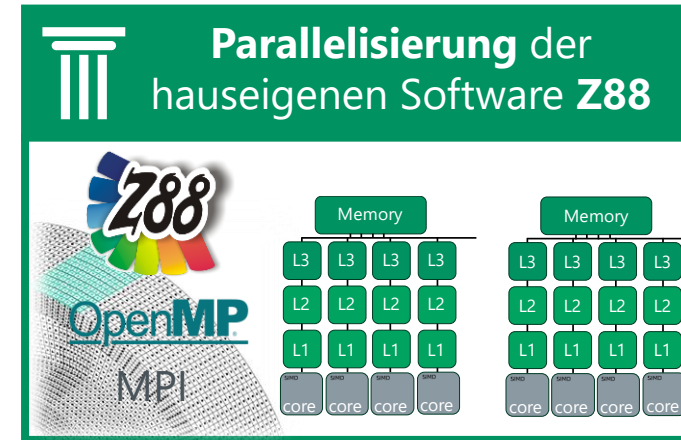
## HPC-Hürden

- Software
  - Lizenzgebühren
  - Kostenpunkt Tokens
- Hardwarekosten
  - Anschaffungskosten
  - Wartung
- Niedrige Usability
- Datenschutz und Sicherheit
- Schwankender Anwendungsbedarf
- Fehlendes Know-How
- Etc.

### Problemstellung

- Lehrstuhleigenes lizenzkostenfreies FE-Programmsystem Z88 nicht HPC-fähig.
  - Hindernis für die effiziente Berechnung komplexer FE-Simulationen.
  - Hindernis für die Weiterentwicklung der Forschungssoftware.

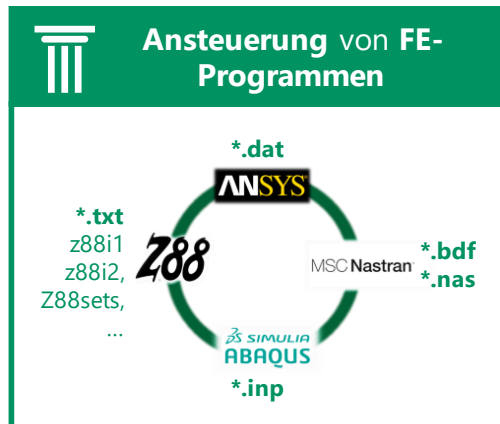
### Lösung durch...



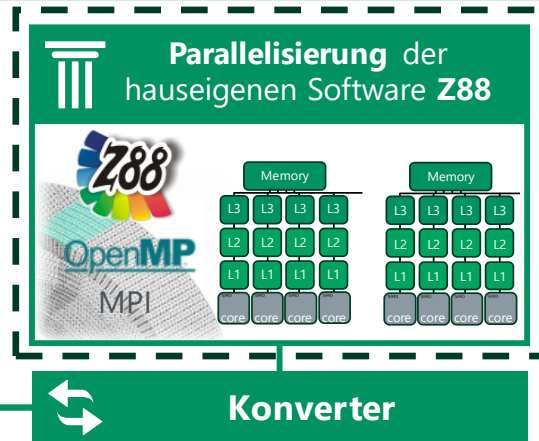
**Bereitstellung eines lizenzkostenfreien HPC-fähigen FE-Programmiersystems**

# Gate2HPC

- **Gefördert durch:** Europäischer Fonds für regionale Entwicklung (EFRE)
- **Schwerpunkt:** Digitalisierung
- **Förderbereich:** 1 – Innovation und Wettbewerbsfähigkeit
- **Fördermaßnahme:** 2 – Technologietransfer von Hochschulen in KMU
- **Projektlaufzeit:** Juni 23 – Mai 27



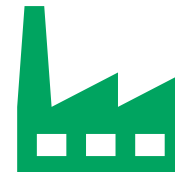
**Schaffung von Interoperabilität**



**Leistungsfähiges Lizenzkostenfreies FE-Programmsystem**



**Förderung der Zusammenarbeit und des Wissensaustausches**



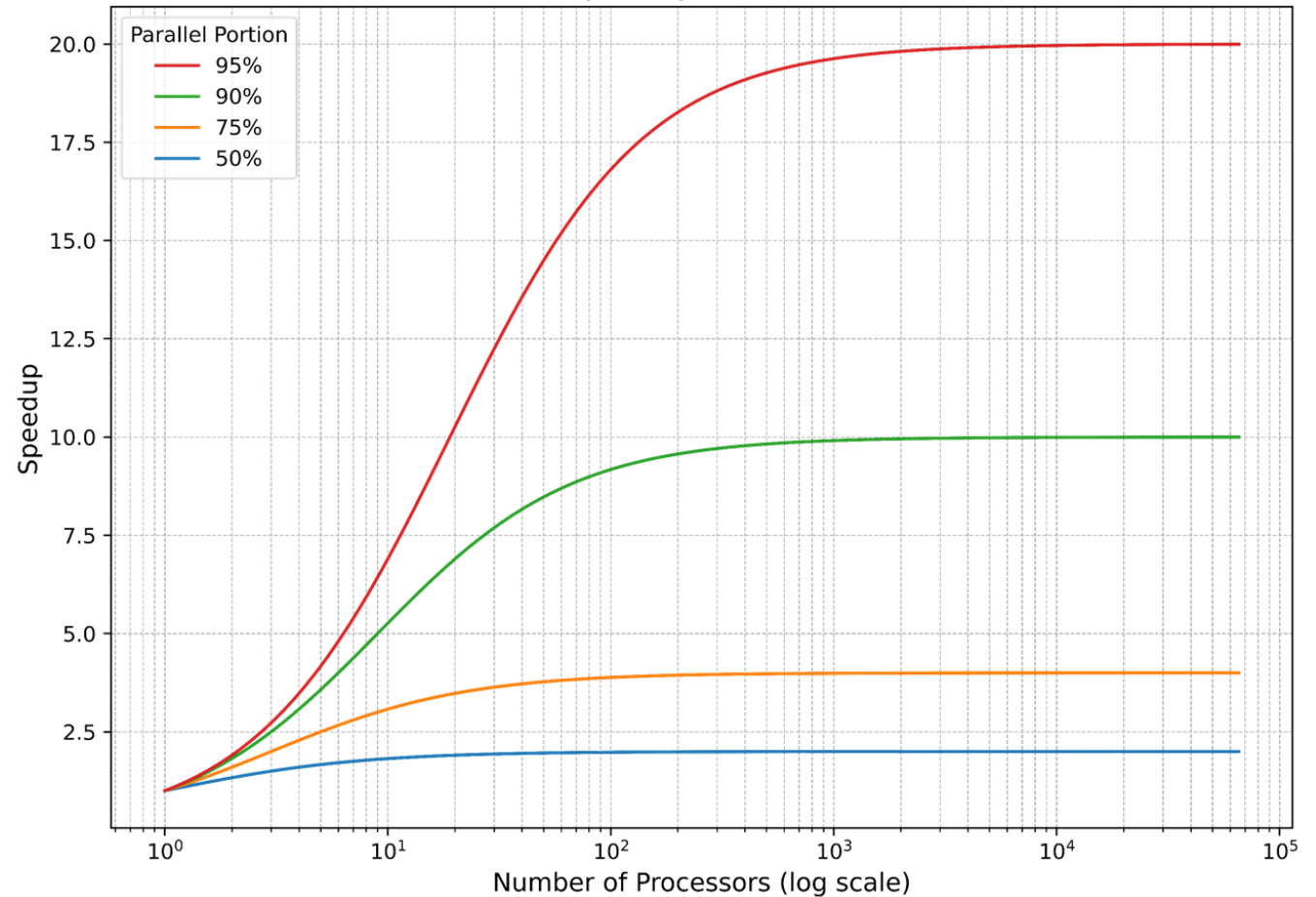
**Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der teilnehmenden Unternehmen insbesondere von KMU.**



$$S_{Amdahl} = \frac{1}{(1 - P) + \frac{P}{N}}$$

- $S$ : Speedup
- $P$ : Proportion of parallel code
- $N$ : Number of processors

Amdahl's Law - Speedup vs Number of Processors



### Overhead

#### Nachrichtengekoppelte Parallelität

Gemeinsames Arbeiten an Daten,  
Datenaustausch, Kommunikation

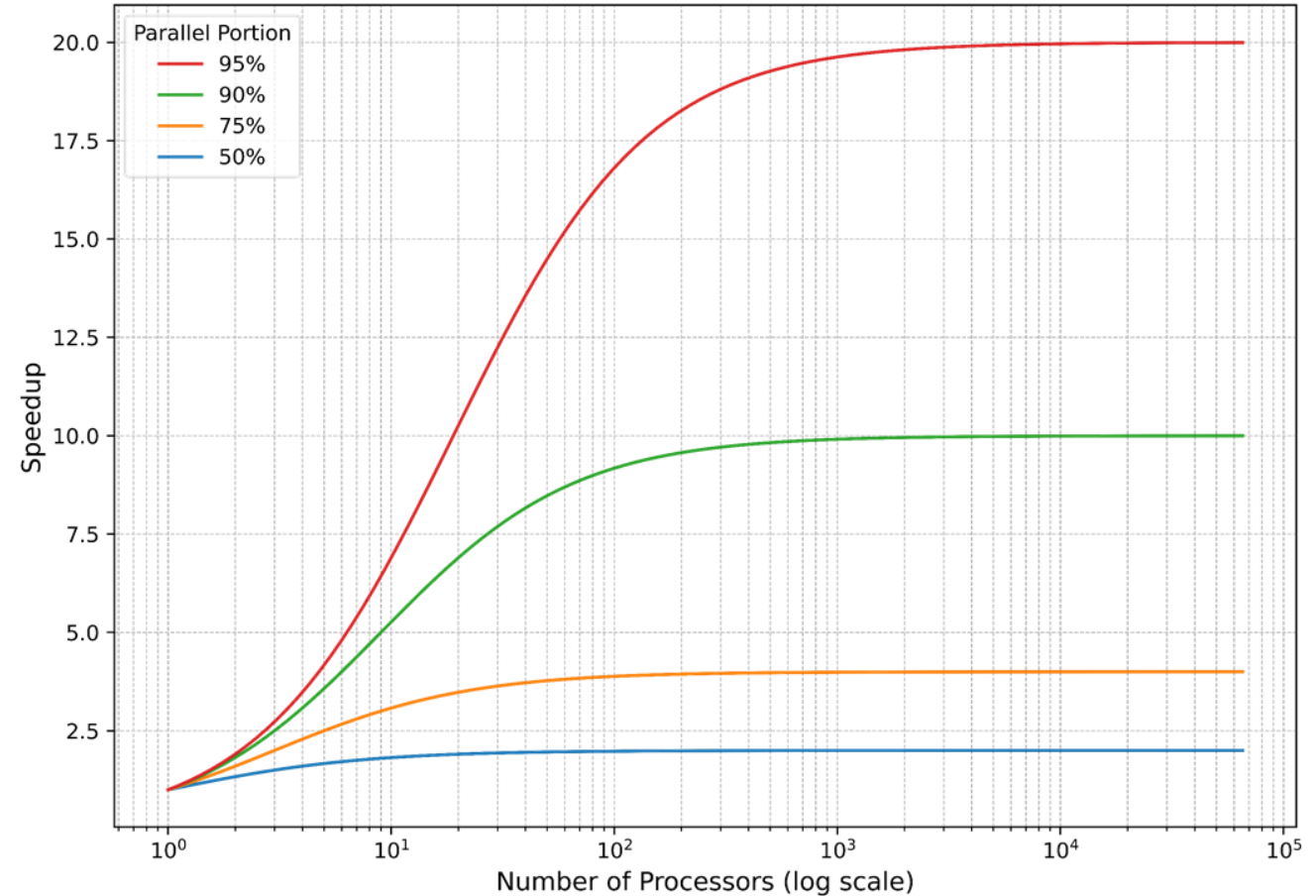
#### Geteilter Speicherparallelismus

Schreiben gemeinsamer Daten  
in den gemeinsamen Speicher

#### Problem der Synchronisation

Prozesse, die auf langsamere Prozesse  
warten müssen, um z.B. zu vermeiden dass  
der langsamere Prozess falsche Daten erhält

Amdahl's Law - Speedup vs Number of Processors





### Overhead

#### Nachrichtengekoppelte Parallelität

Gemeinsames Arbeiten an Daten, Datenaustausch, Kommunikation

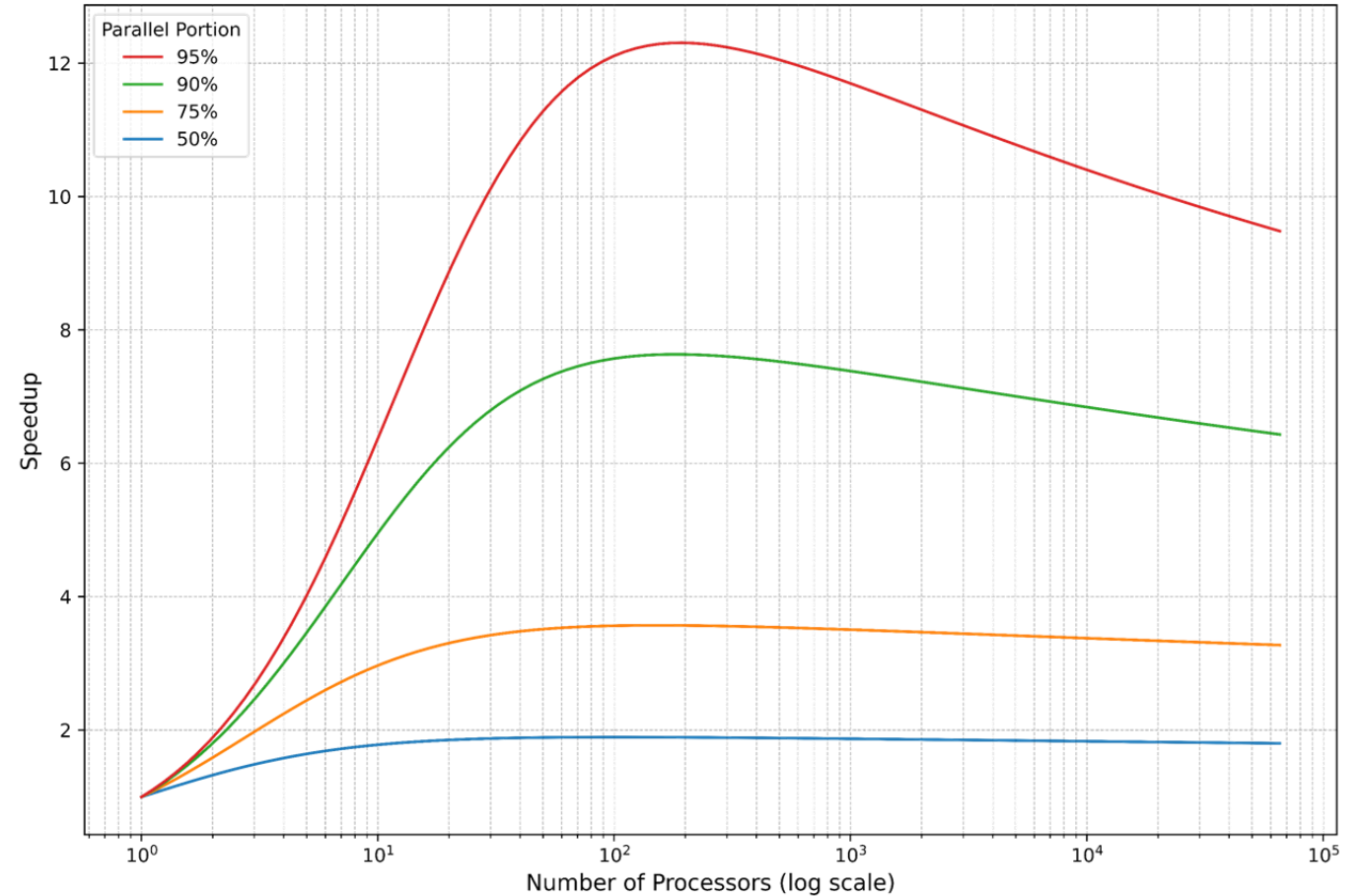
#### Geteilter Speicherparallelismus

Schreiben gemeinsamer Daten in den gemeinsamen Speicher

#### Problem der Synchronisation

Prozesse, die auf langsamere Prozesse warten müssen, um z.B. zu vermeiden dass der langsamere Prozess falsche Daten erhält

Amdahl's Law with Overhead\* - Speedup vs Number of Processors



\*Annahme eines logarithmisch ansteigenden Overheads

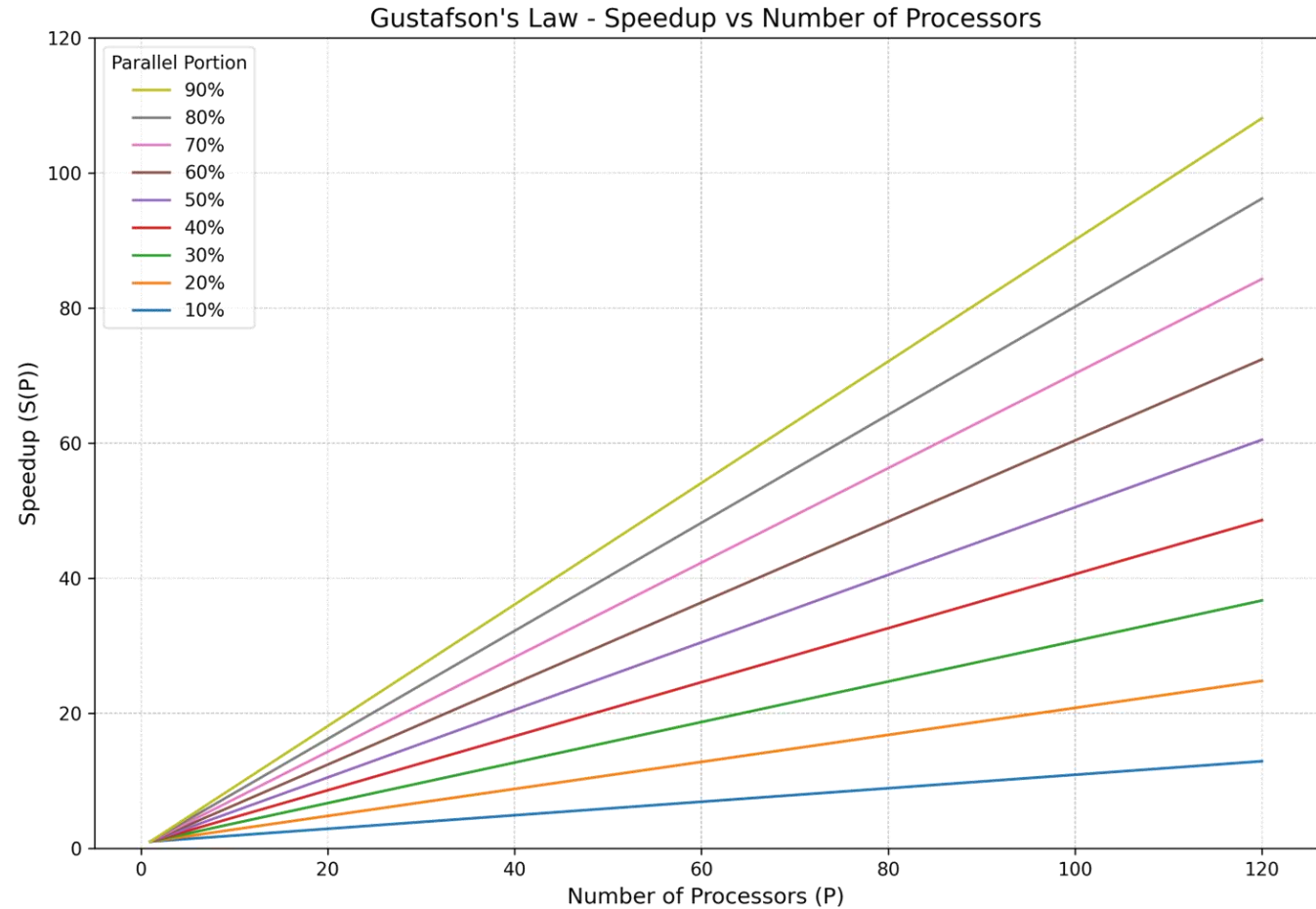


# Grundlagen der Parallelisierung

## Gustafsons Gesetz

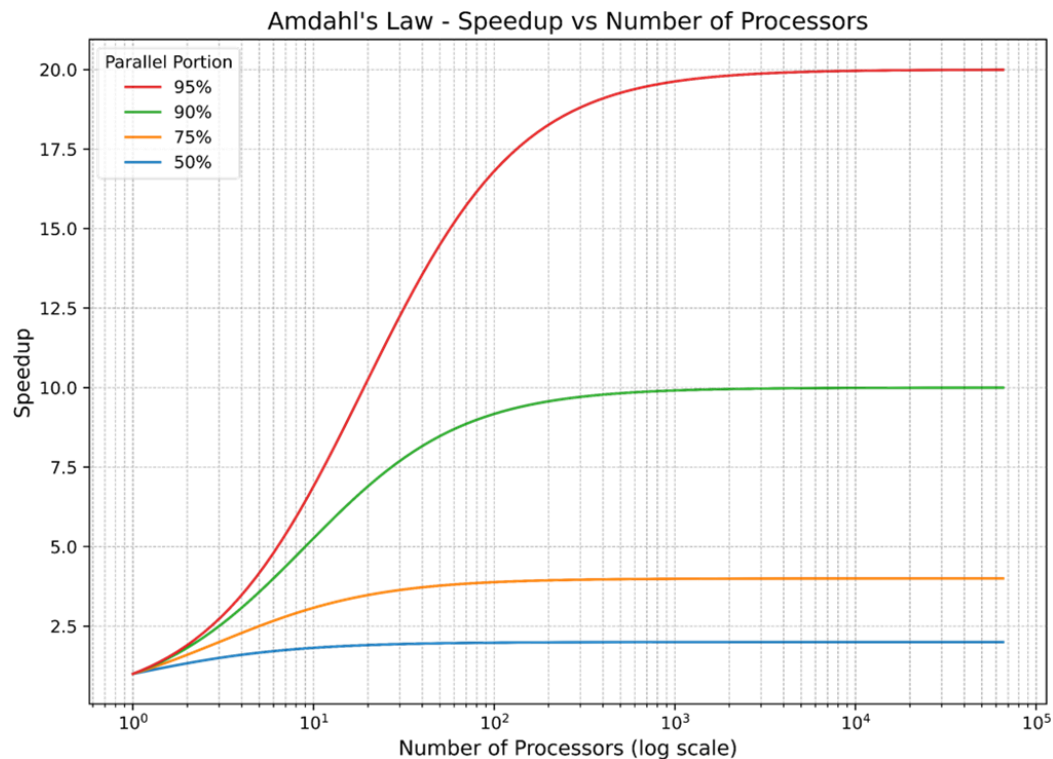
$$S_{Gustafson} = (1 - p) + p \times N$$

- $S$ : Speedup
- $p$ : Proportion of parallel code
- $N$ : Number of processors

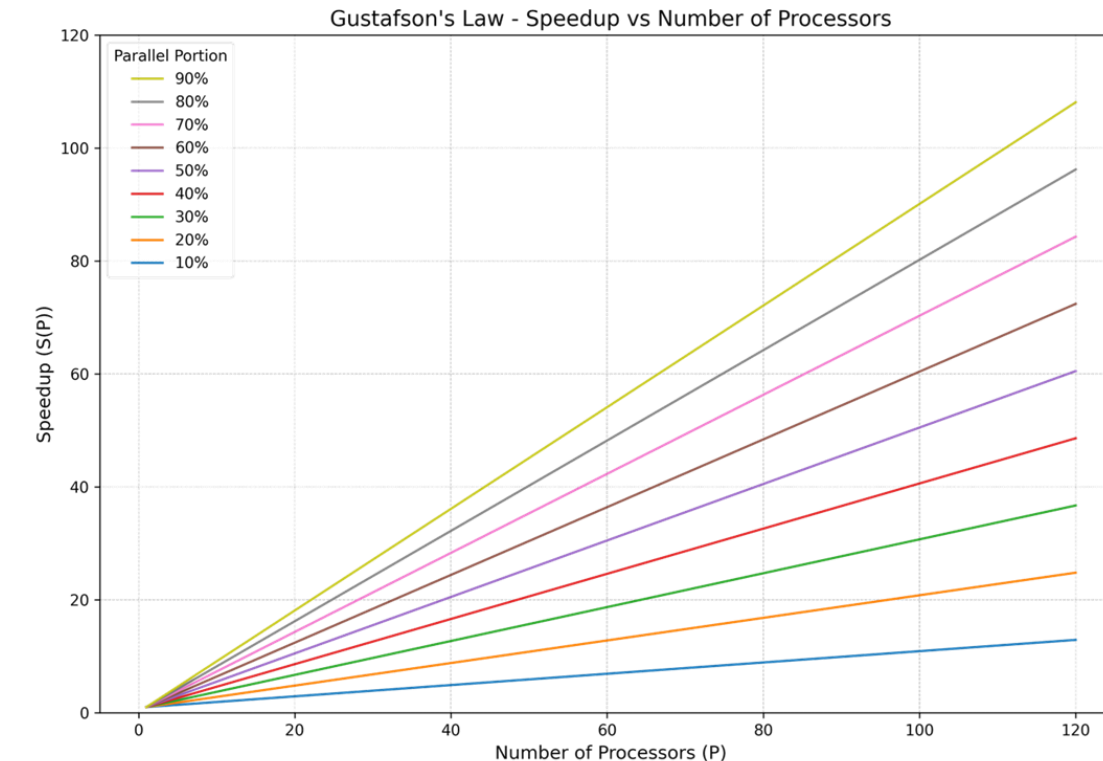


# Grundlagen der Parallelisierung

## Grenzen der Parallelisierung



Der Geschwindigkeitsgewinn durch Parallelisierung wird durch den festen sequentiellen Anteil begrenzt, der nicht parallelisierbar ist, wodurch der Speedup bei einer höheren Anzahl von Prozessoren abnimmt.



Der Geschwindigkeitsgewinn durch Parallelisierung kann nahezu linear mit der Anzahl der Prozessoren wachsen, da bei wachsender Problemgröße der parallele Anteil dominiert und der sequentielle Anteil relativ klein bleibt.



### High Performance Computing

**Ziel:** Leistungsfähigkeit einer einzelnen Anwendung oder Simulation zu maximieren. Hierbei treten häufig starke Abhängigkeiten zwischen den Berechnungen, die durchgeführt werden müssen auf.

**Probleme die mehr oder weniger viele Abhängigkeiten beinhalten.**

**Beispiel:** Lösen von Differenzialgleichungen (Fluidmechanik, Finite-Elemente-Methode, Wettermodelle,...).



### High-Throughput Computing

**Ziel:** Maximierung des Durchsatzes von mehreren unabhängig laufenden Aufgaben oder Prozessen innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens.

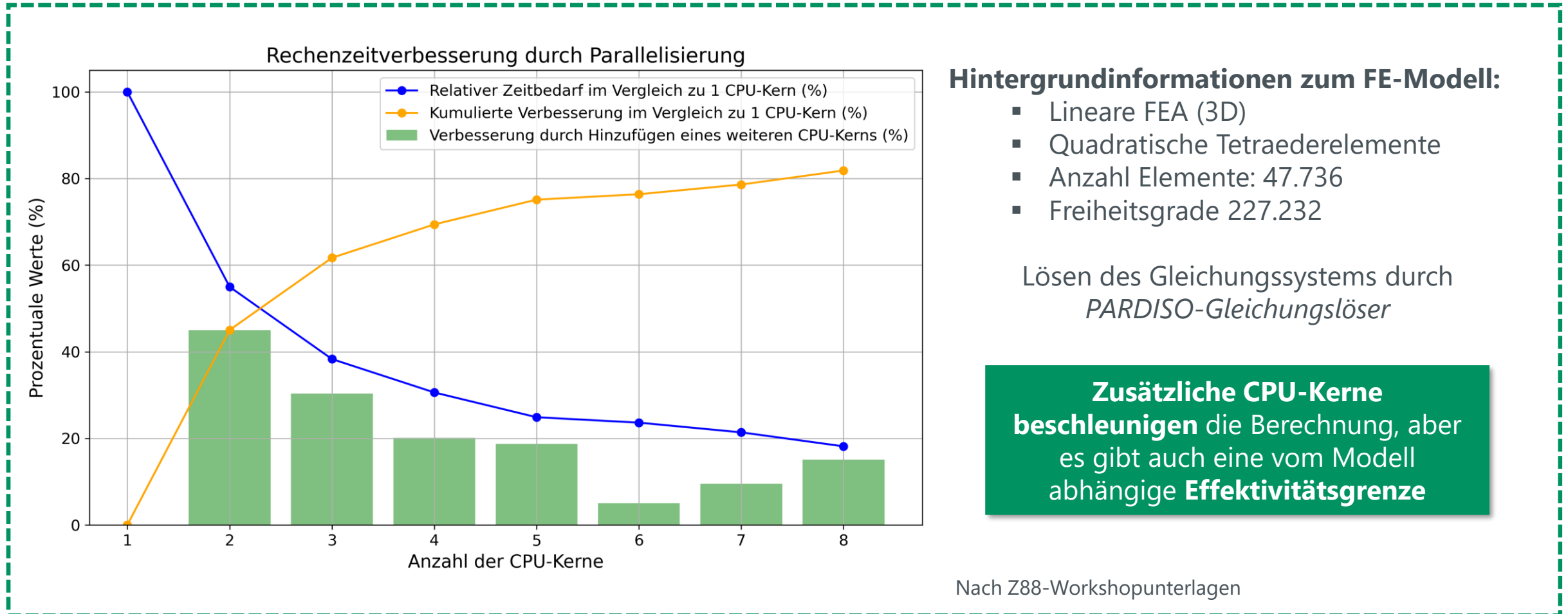
**Probleme die „peinlich bzw. inhärent“ parallel sind**

**Beispiel:** Datenanalyse, Textverarbeitung, Bildanalyse, Brute-Force Password knacken



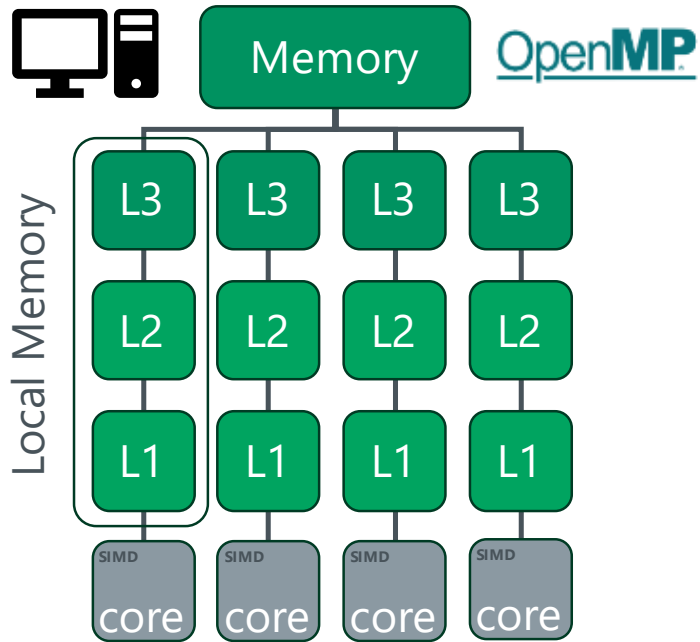
# Grundlagen der Parallelisierung

## Auswirkungen auf die Praxis: Lösen eines FE-Beispiels





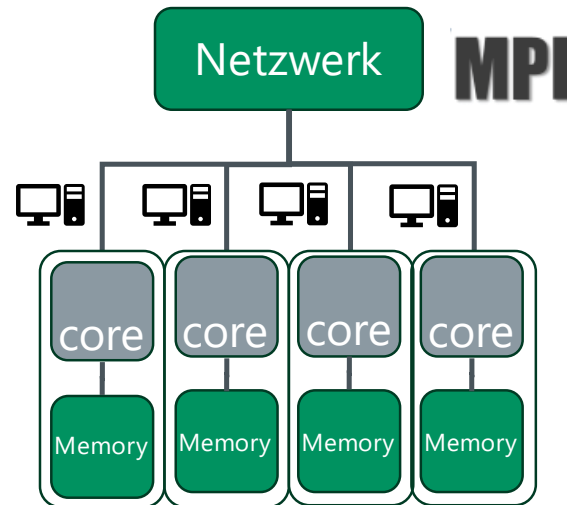
### Shared-Memory- Programmierung



Mehrere Prozesse nutzen denselben Speicherbereich

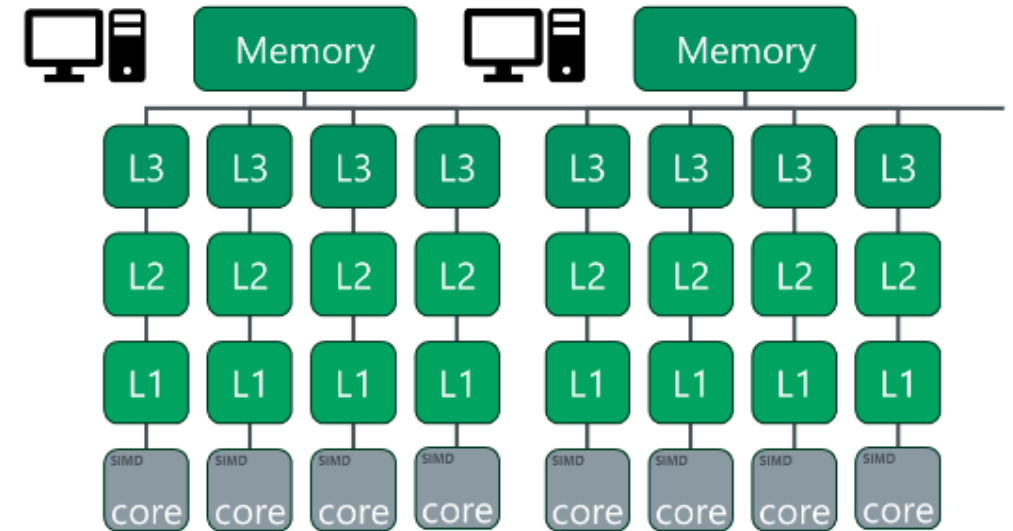
Nach [1]

### Distributed-Memory- Programmierung



Jeder Prozess hat seinen eigenen Speicherbereich

### Hybrid-Ansatz (OpenMP + MPI)



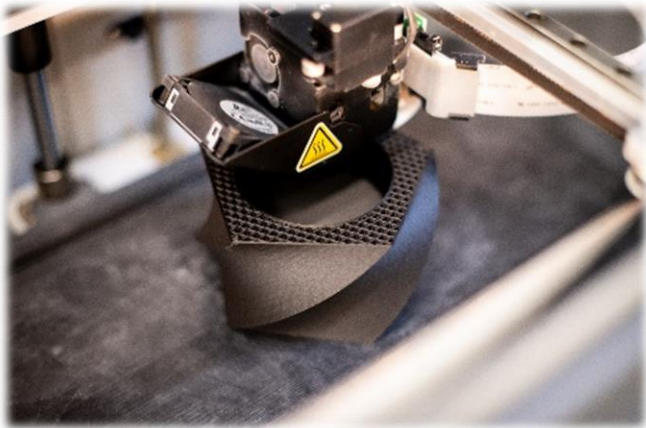
Threads teilen sich Speicher innerhalb eines Knotens, während Prozesse eigenen Speicher zwischen Knoten nutzen



Weiterführende Informationen etwa zu **Lehrveranstaltungen**, aktuellen **Projekten, Studien- und Abschlussarbeiten** oder **Industrieraufträgen**:

[www.lscad.de](http://www.lscad.de)

[konstruktionslehre.cad@uni-bayreuth.de](mailto:konstruktionslehre.cad@uni-bayreuth.de)



**Wir freuen uns über Ihr Interesse!**



**Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!**



- [1] Bader, R., Hager, G., Weinberg, V., & Wittmann, M. (2023). Advanced OpenMP Programming. LRZ; RRZE; NHR@FAU.
- [2] Lago, R. (2022). Intel® oneAPI Base and HPC Toolkits: Diagnostics & Profiling Tools.
- [3] Shadrina, A. (2023, June). Parallelizing heterogenous applications with Intel® OpenMP and OpenMP offloading: Advanced Topics. Workshop presented at LRZ. Email: [alina.shadrina@intel.com](mailto:alina.shadrina@intel.com)
- [4] Coles, J. (2021, November 3). The Roofline Model. Presented at the HPC Code Optimisation Workshop.
- [5] Nguyen, Duc Thai. *Parallel-Vector Equation Solvers for Finite Element Engineering Applications*. Boston, MA: Springer US, 2002. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1337-7>.
- [6] Rauber, Thomas, und Gudula Rüniger. *Parallele Programmierung*. eXamen.press. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-13604-7>.

# Anhang

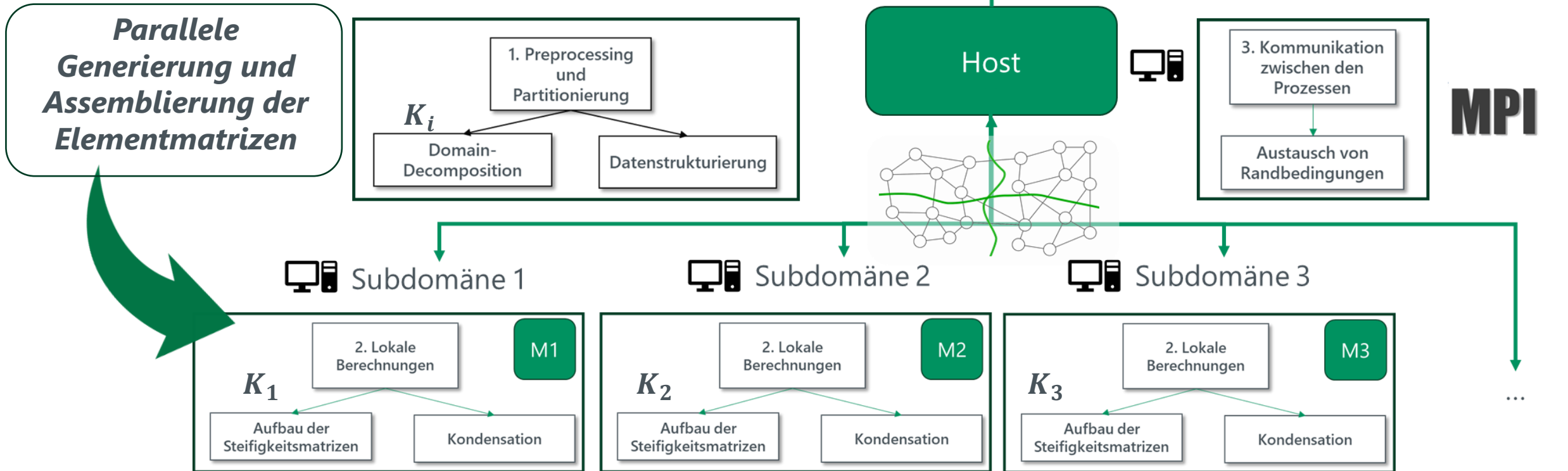




# Grundlagen der Parallelisierung

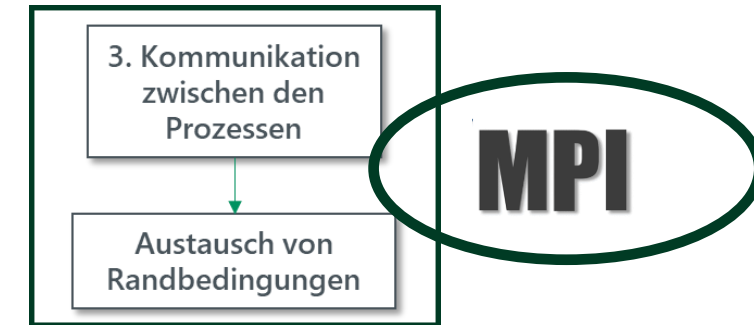
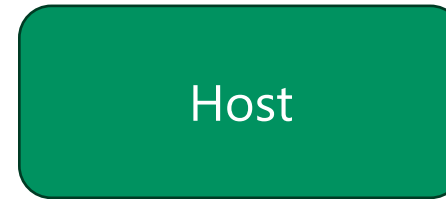
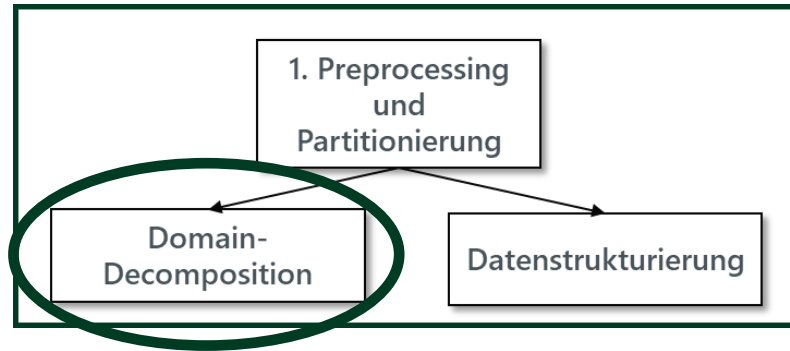
## Aufteilen der Arbeit und Daten in der FEM

### Möglicher Ansatz

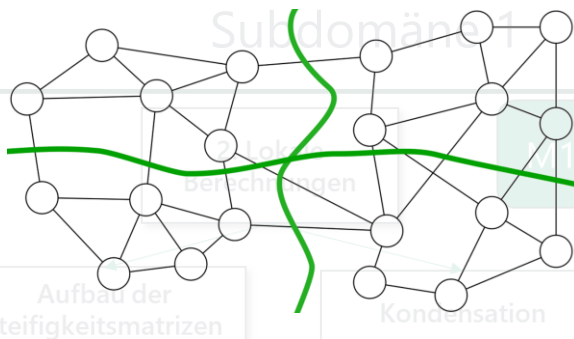


# Grundsätze der Optimierung

## Domain-Decomposition Methoden

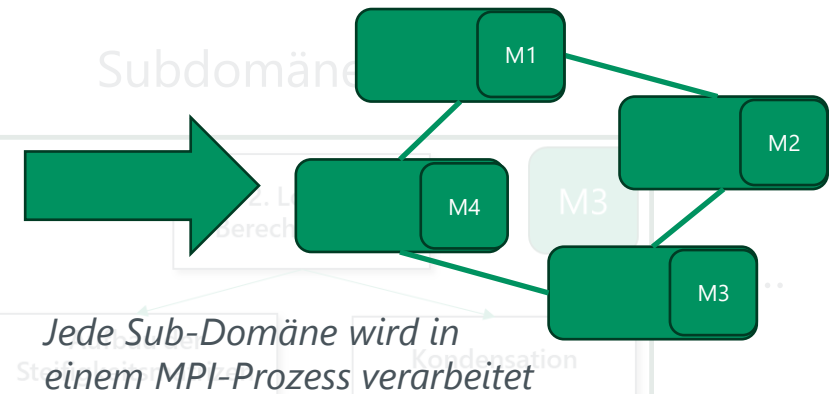


## Netzpartitionierung



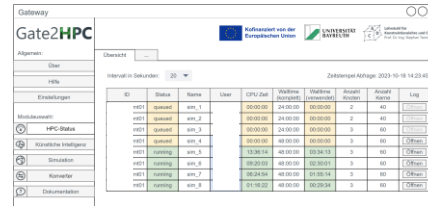
### Ziele:

- Ähnliche Arbeitsbelastung in jeder Unterdomäne
- Minimierung der maximalen Anzahl von Nachbarschaftsverbindungen zwischen Teilgebieten
- Minimierung der Gesamtzahl benachbarter Sub-Domänen jeder Sub-Domäne



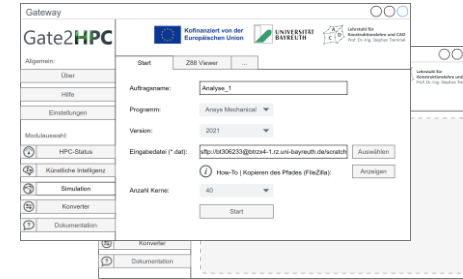
# Das Projekt Gate2HPC

## Gateway



ID	Status	Name	User	CPU Zeit	Wartung	Wartung	Anzahl	Anzahl	Log
hpc1	stehend	sim_1	...	00:00:00	24:00:00	00:00:00	2	40	
hpc2	stehend	sim_2	...	00:00:00	24:00:00	00:00:00	2	40	
hpc3	stehend	sim_3	...	00:00:00	24:00:00	00:00:00	2	40	
hpc4	stehend	sim_4	...	00:00:00	48:00:00	00:00:00	2	40	
hpc5	stehend	sim_5	...	13:35:14	48:00:00	00:34:12	2	40	
hpc6	stehend	sim_6	...	00:00:00	48:00:00	00:00:00	2	40	
hpc7	stehend	sim_7	...	00:00:00	48:00:00	00:00:00	2	40	
hpc8	stehend	sim_8	...	01:16:22	48:00:00	00:28:34	2	40	

HPC-Status



Simulation

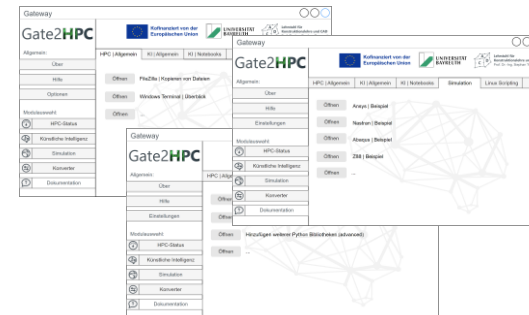
Startbildschirm  
(Verbindung)



Künstliche  
Intelligenz



Dokumentation

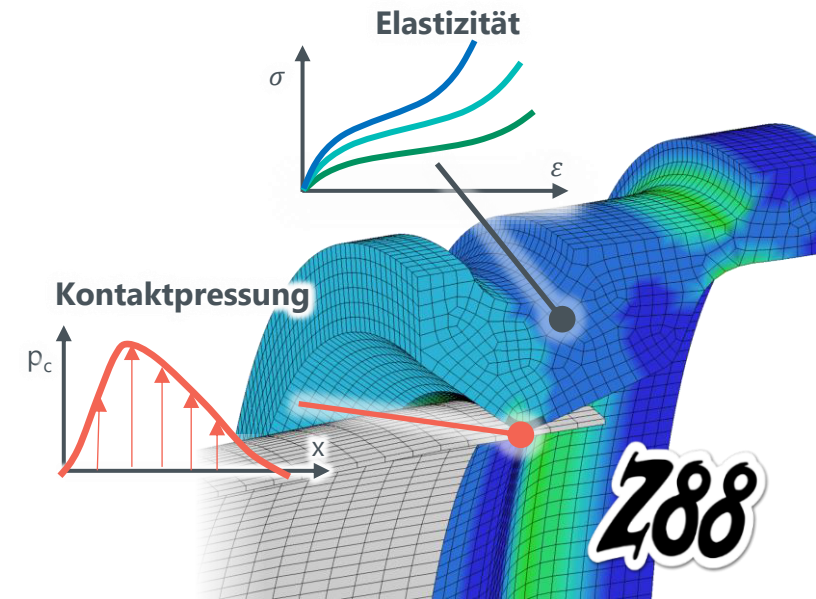


# FE-Modellbildung und Simulation hyperelastischen Materialverhaltens

Florian Hüter

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

Bayreuth, 11. September 2024



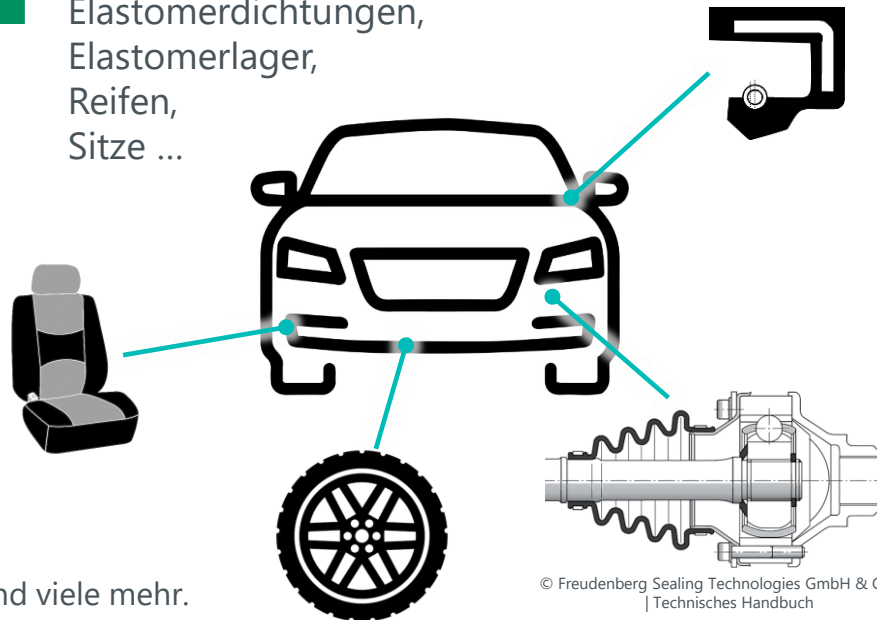
200



### Finite-Elemente-Analyse zur Ausschöpfung der Optimierungspotentiale von Elastomerbauteilen

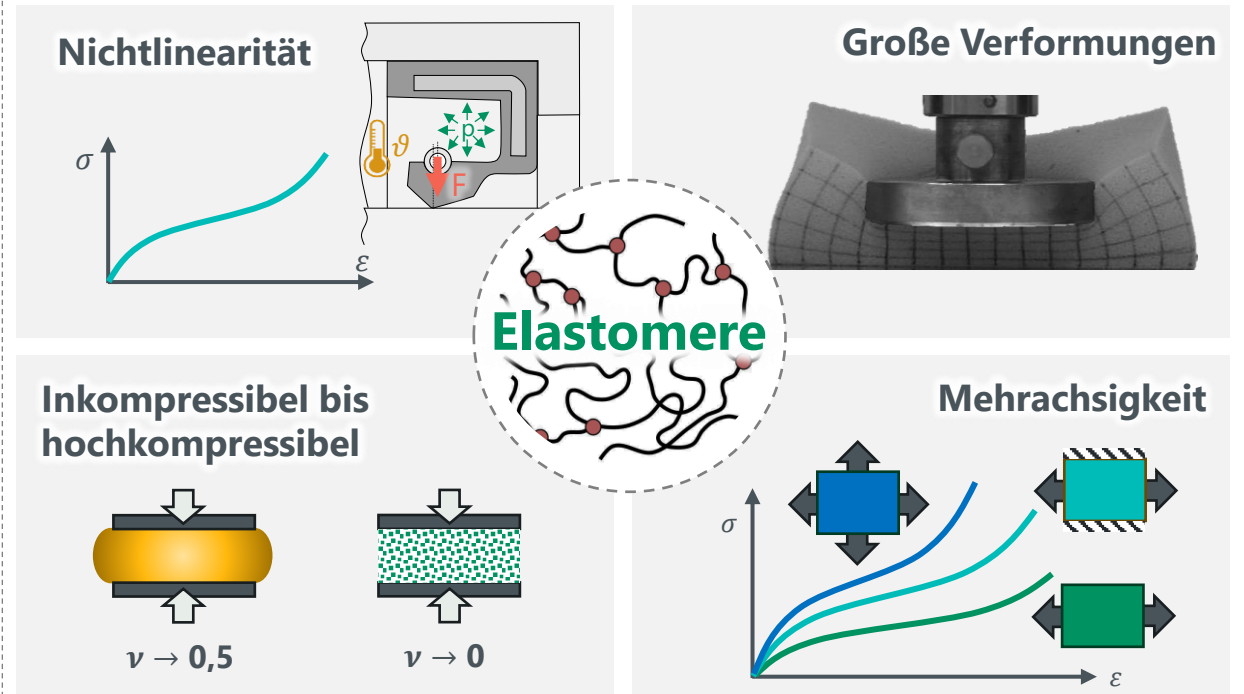
#### Elastomere im Fahrzeugbau

- Elastomerdichtungen, Elastomerlager, Reifen, Sitze ...



... und viele mehr.

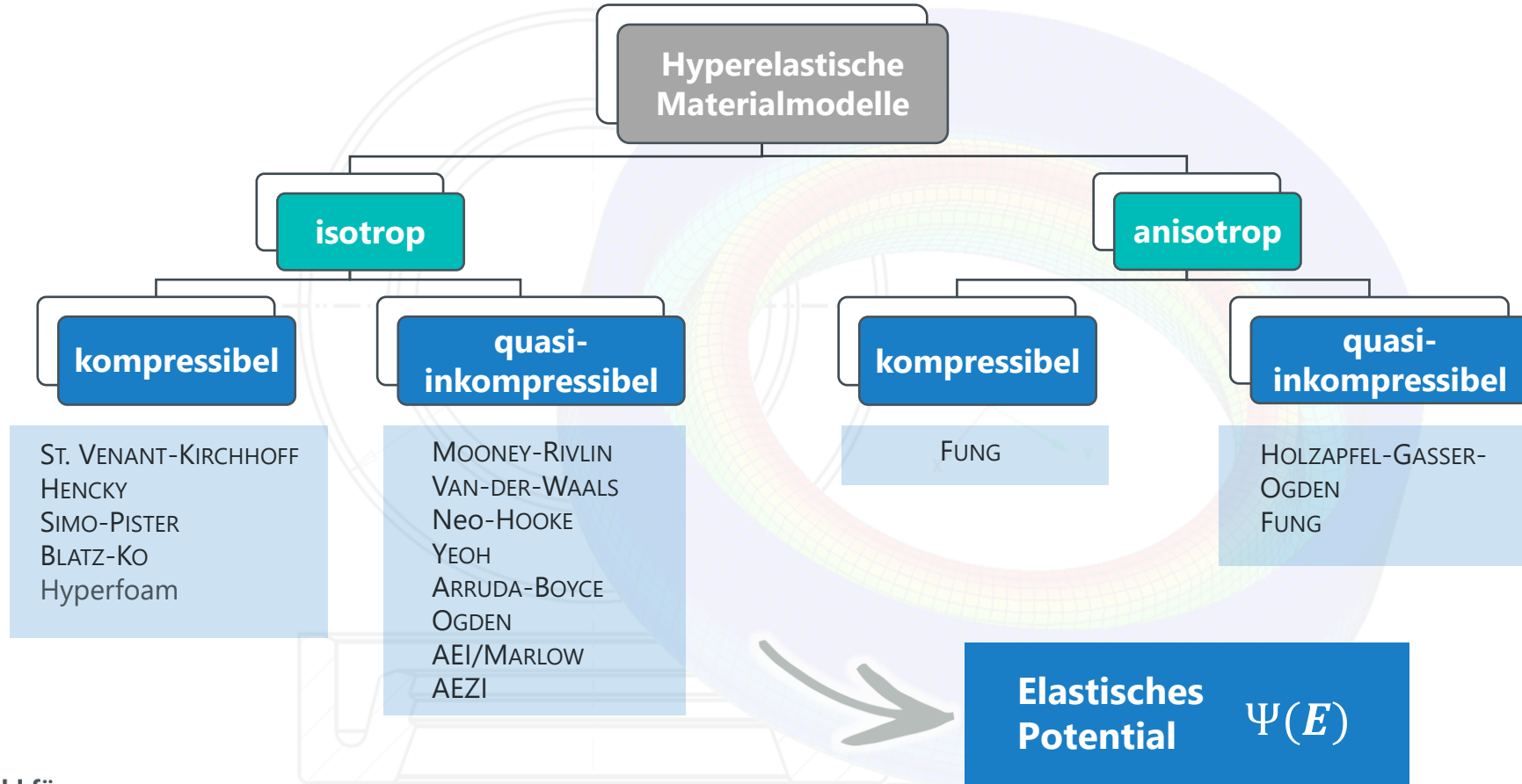
#### Hyperelastisches Materialverhalten





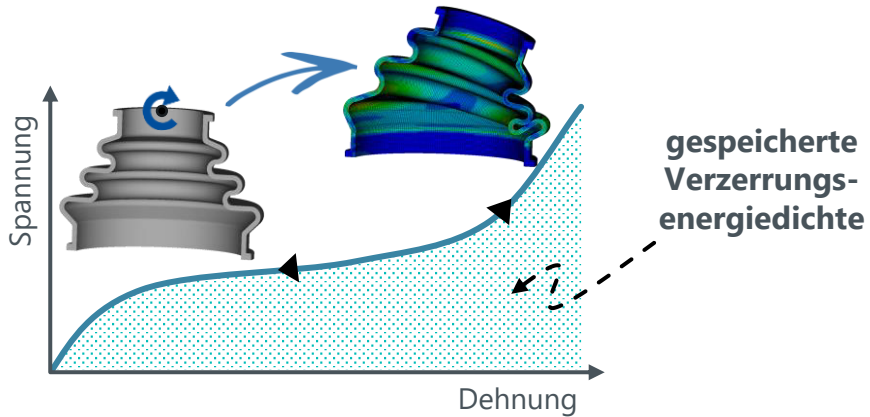
# Hyperelastische Materialmodelle

## Überblick hyperelastische Materialmodelle



### Einführungen des Elastischen Potentials $\Psi$

#### Perfekt elastisches Verhalten



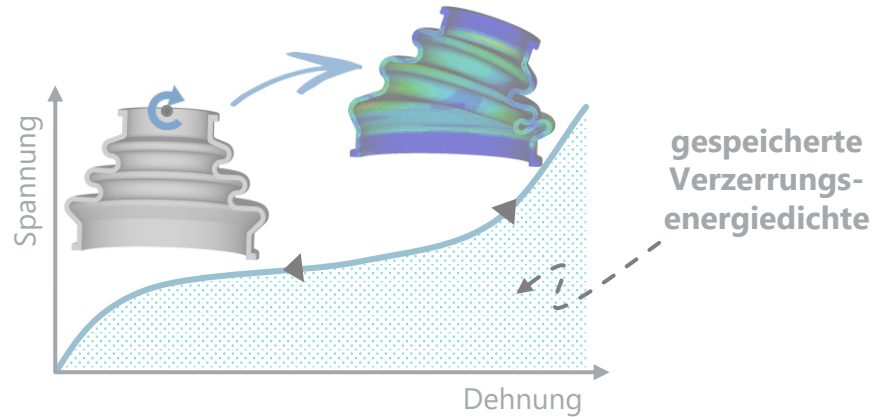
#### ■ Elastisches Potential

$$\Psi(E) = \int_0^E S(E) dE \quad \rightarrow \quad S = \frac{\partial \Psi}{\partial E} \quad \rightarrow \quad \mathbb{C} = \frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial E \partial E}$$



### Konstruktion des Elastischen Potentials $\Psi$

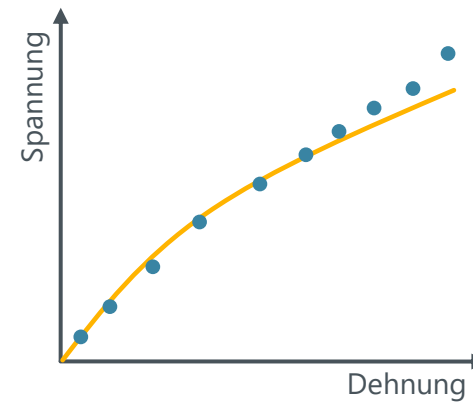
#### Perfekt elastisches Verhalten



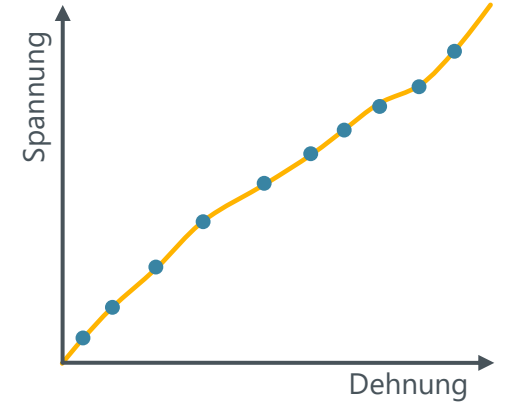
#### ■ Elastisches Potential

$$\Psi(E) = \int_0^E S(E) dE \quad S = \frac{\partial \Psi}{\partial E} \quad C = \frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial E \partial E}$$

#### Konstruktionsansätze für $\Psi$



#### Approximationsansätze



#### Interpolationsansätze

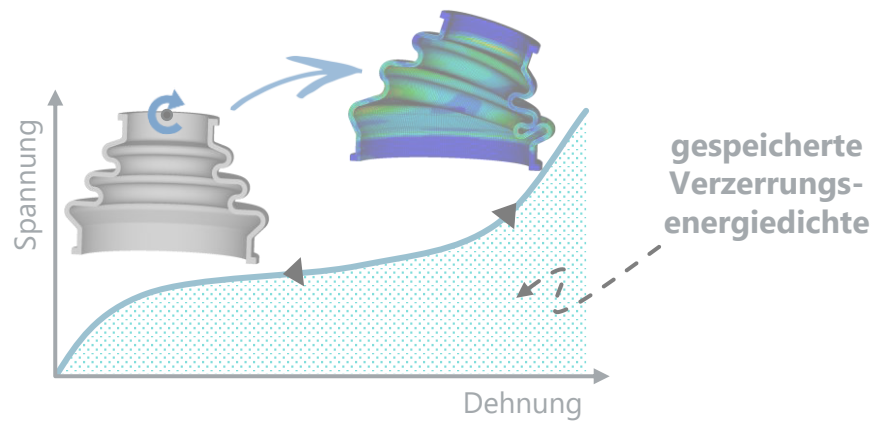


Verschiedene Kriterien zur Konstruktion



### Konstruktion des Elastischen Potentials $\Psi$

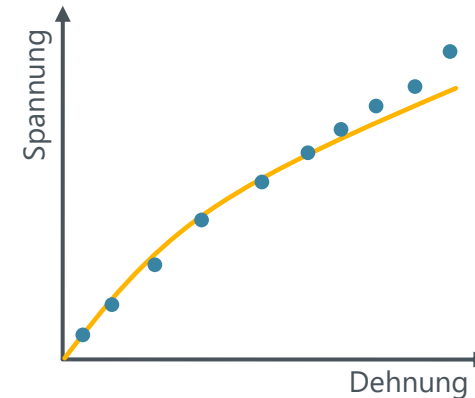
#### Perfekt elastisches Verhalten



#### Elastisches Potential

$$\Psi(E) = \int_0^E S(E) dE \quad S = \frac{\partial \Psi}{\partial E} \quad C = \frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial E \partial E}$$

#### Konstruktionsansätze für $\Psi$



#### Approximationsansätze

##### Funktionsansatz

$$\Psi = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3)$$

##### Ableitung

$$S = \frac{\partial \Psi}{\partial E}$$

##### Approximation der Messdaten mittels Curve Fitting

$$\sum_{i=1}^M \{ \sigma_{\text{Mess}}^{(i)} - \sigma_{\text{Modell}}(\varepsilon_{\text{Mess}}^{(i)}) \}^2 \rightarrow \min$$

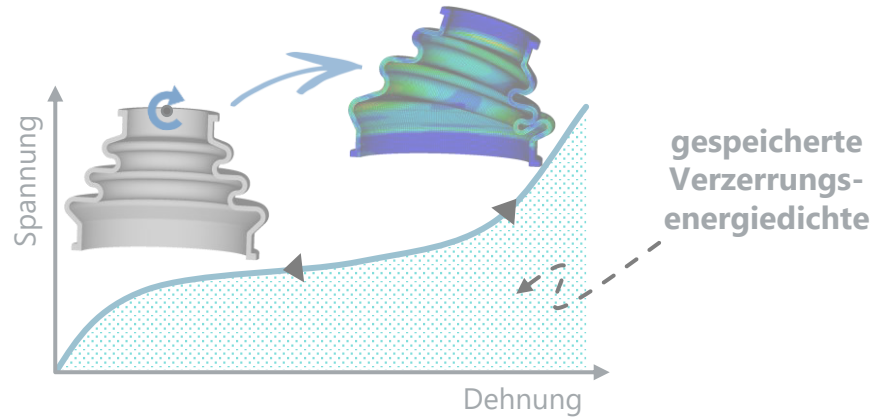


Verschiedene Kriterien zur Konstruktion



### Konstruktion des Elastischen Potentials $\Psi$

#### Perfekt elastisches Verhalten



#### Elastisches Potential

$$\Psi(E) = \int_0^E S(E) dE \quad \rightarrow \quad S = \frac{\partial \Psi}{\partial E} \quad \rightarrow \quad \mathbb{C} = \frac{\partial S}{\partial E} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial E \partial E}$$

#### Konstruktionsansätze für $\Psi$

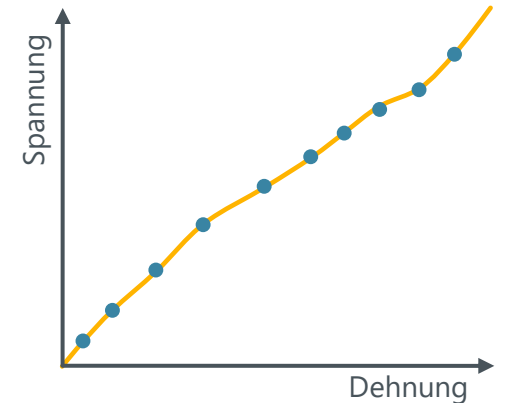
##### Interpolationsansatz

$$\Psi(E) = \int \text{spline}(\sigma_{\text{Mess}}^{(i)}, \varepsilon_{\text{Mess}}^{(i)}) dE$$

##### Ableitung

$$S = \frac{\partial \Psi}{\partial E}$$

##### Reproduktion der Messdaten



#### Interpolationsansätze



Zusätzliche Annahmen erforderlich zur Modellvorhersage für andere Belastungsmoden





### Allgemeines Erste-Invariante-Modell (AEI)

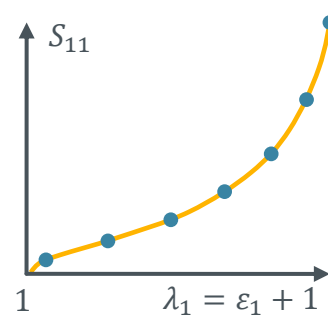
#### Originalansatz: inkompressibel

##### ■ Erste-Invariante-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi(I_1) \quad \text{mit } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

##### ■ MARLOW-Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi(I_1) = \int_3^{I_1(\lambda_1)} \frac{\frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}} dI_1$$



isotrop & inkompressibel



### Allgemeines Erste-Invariante-Modell (AEI)

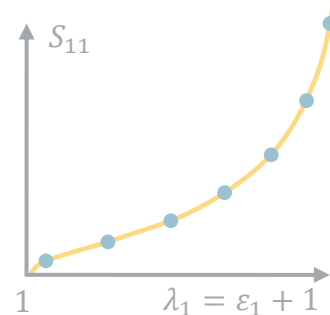
#### Originalansatz: inkompressibel

##### Erste-Invariante-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi(I_1) \quad \text{mit } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

##### MARLOW-Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi(I_1) = \int_3^{I_1(\lambda_1)} \frac{\frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}} dI_1$$



isotrop & inkompressibel

#### Erweiterung: kompressibel

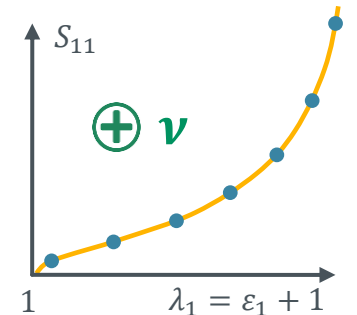
##### Erweiterung: FLORY-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1) + \Psi^{\text{vol}}(J) \quad \text{mit } J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 \\ \bar{I}_1 = I_1 J^{-2/3}$$

##### Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1) = \int_3^{\bar{I}_1} \frac{\frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}} d\bar{I}_1$$

$$\Psi^{\text{vol}}(J) = \int_1^J \frac{S_{11} \lambda_1^2}{3 \lambda_1^{1-2\nu}} dJ$$



### Allgemeines Erste-Invariante-Modell (AEI)

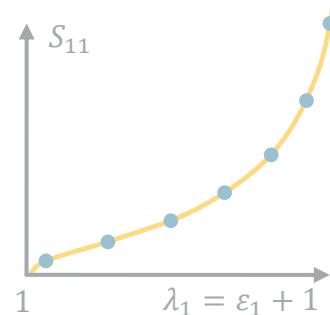
#### Originalansatz: inkompressibel

##### Erste-Invariante-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi(I_1) \quad \text{mit } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

##### MARLOW-Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi(I_1) = \int_3^{I_1(\lambda_1)} \frac{\frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}} dI_1$$



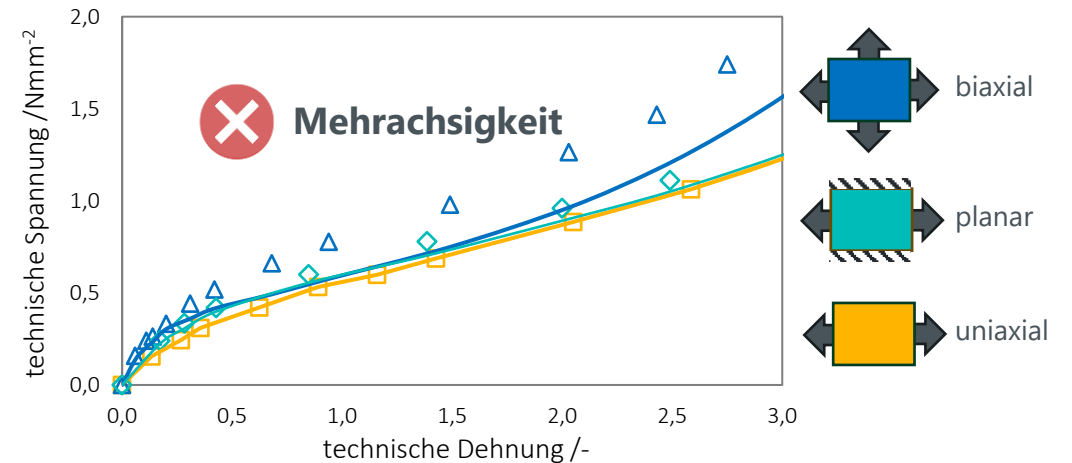
 isotrop & inkompressibel

#### Erweiterung: kompressibel

##### Erweiterung: FLORY-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1) + \Psi^{\text{vol}}(J) \quad \text{mit } J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$$

$$\bar{I}_1 = I_1 J^{-2/3}$$



### Allgemeines Erste-Zweite-Invariante-Modell (AEZI)

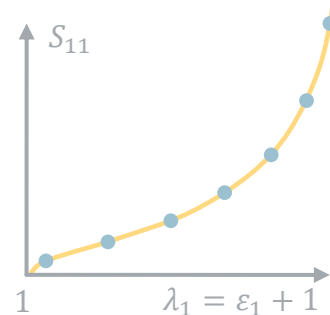
#### Originalansatz: inkompressibel

##### Erste-Invariante-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi(I_1) \quad \text{mit } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

##### MARLOW-Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi(I_1) = \int_3^{I_1(\lambda_1)} \frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2 \frac{dI_1}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}}$$

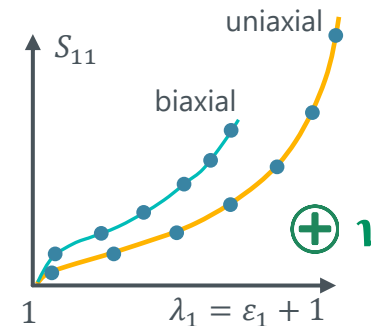


 isotrop & inkompressibel

#### Erweiterung: kompressibel + Mehrachsigkeit

##### Erweiterung: RIVLIN-SAUNDERS-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \underbrace{\Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1)}_{\text{MARLOW}} + \underbrace{\Psi^{\text{vol}}(J)}_{\text{kompressibel}} + \underbrace{\Psi^{\text{iso},2}(\bar{I}_2)}_{\text{Mehrachsigkeit}}$$



mit

$$J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2$$

$$\bar{I}_1 = I_1 J^{-2/3}$$

$$\bar{I}_2 = I_2 J^{-4/3}$$



### Allgemeines Erste-Zweite-Invariante-Modell (AEZI)

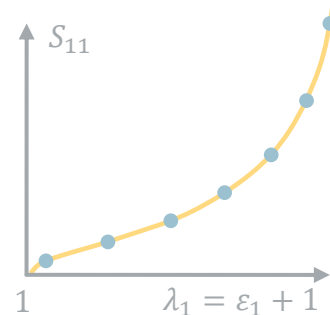
#### Originalansatz: inkompressibel

##### Erste-Invariante-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi(I_1) \quad \text{mit } I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$$

##### MARLOW-Kalibrierungsvorschrift

$$\Psi(I_1) = \int_3^{I_1(\lambda_1)} \frac{\frac{1}{2} S_{11} \lambda_1^2}{\lambda_1^2 - \lambda_1^{-1}} dI_1$$

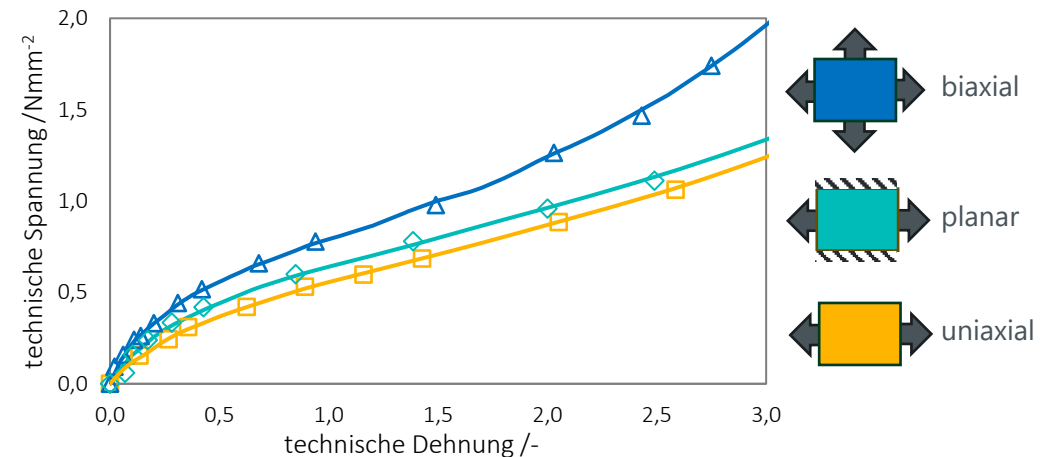


 isotrop & inkompressibel

#### Erweiterung: kompressibel + Mehrachsigkeit

##### Erweiterung: RIVLIN-SAUNDERS-Ansatz

$$\Psi(E) \longrightarrow \Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1) + \Psi^{\text{vol}}(J) + \Psi^{\text{iso},2}(\bar{I}_2)$$





### Herausforderungen bei Quasi-Inkompressibilität

#### Finite-Elemente-Analyse

##### ■ FE-Gleichungssystem

$$\mathbf{K}_T(u^{(i)}) \cdot \Delta u^{(i+1)} = \Delta F^{(i)} \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

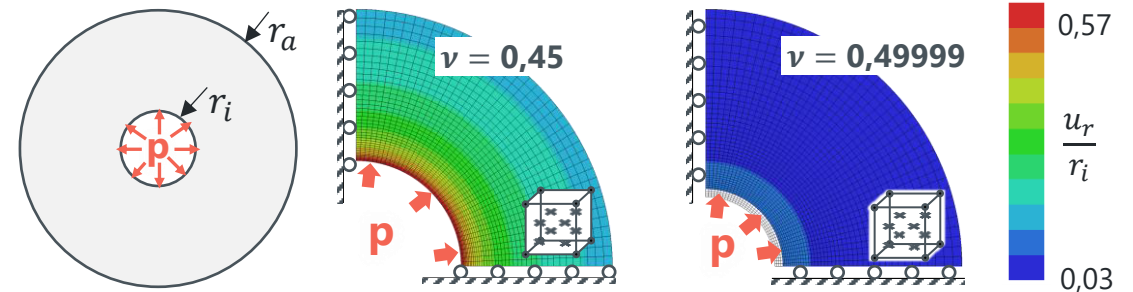
##### ■ Isotropes Hooke'sches Gesetz (ebene Verzerrung)

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \frac{2G}{1-2\nu} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 1-2\nu \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{pmatrix}$$

→ ∞ für  $\nu \rightarrow 0,5$

#### Volumetrische Elementversteifung

##### ■ Dickwandiger Zylinder unter Innendruck



##### ■ Erklärung



Mangelnde Approximation des Verschiebungsfeldes



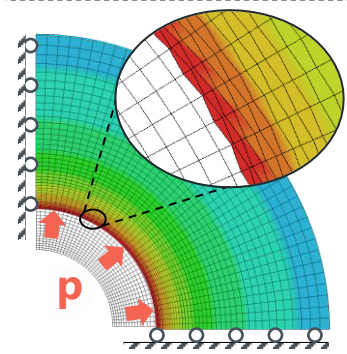
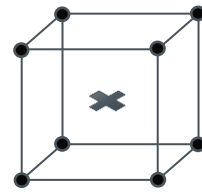
Exakt  
Lineares Hex.  
GAUßpunkt



### Abhilfemaßnahmen für Volumetrische Elementversteifung

#### Reduzierte Integration

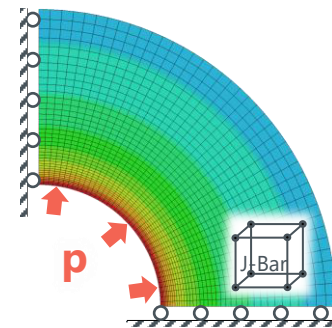
- Integrationsordnung um 1 weniger als voll
- Keine unechten Volumendehnungen
- Hourglass-Stabilisierung



#### J-Bar-Methode

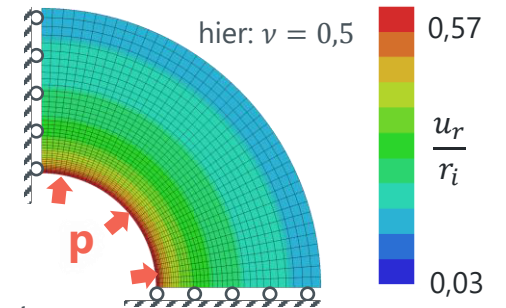
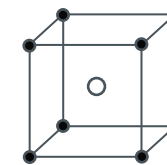
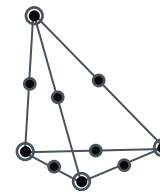
- Elementweise Mittelung der Volumendehnung

$$\tilde{J} := \frac{1}{V^e} \iiint_{V^e} J dV \quad \Psi^{\text{iso}}(\bar{I}_1) + \Psi^{\text{vol}}(\tilde{J})$$



#### Hybridelementformulierung

- Einführung zusätzlicher Druckfreiheitsgrade  
→ Entkoppelung der Druckreaktion von den unechten Volumendehnungen



○ Druckknoten    ● Verschiebungsknoten

- LAGRANGE-Gleichungssystem

$$\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_T & \mathbf{G}_{pu} \\ \mathbf{G}_{up} & -\mathbf{M}_{pp} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u \\ \Delta p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta F \\ -r_p \end{pmatrix}$$

 Analogie Kontakt

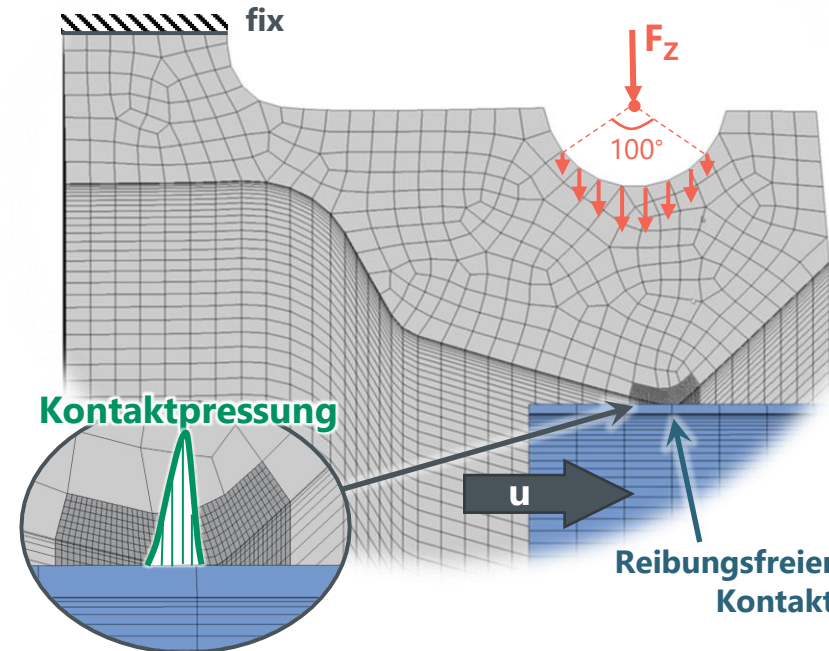


# Anwendungsbeispiel

## Montage eines Radial-Wellendichtrings

Simmerring® | BAUM | 80 × 100 × 10 mm | 75 FKM 585

**FREUDENBERG**  
SEALING TECHNOLOGIES



- 16MnCr5, 56.5 HRC
- FKM 75 Shore A
- Vergleich verschiedener Materialmodelle



Welle

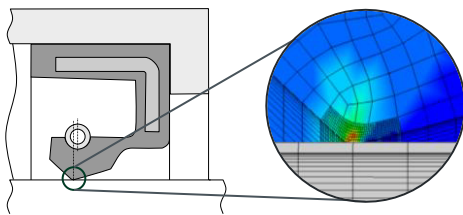


Dichtkante



Dichtlippe

Montage RWDR aus FKM



Lehrstuhl für  
Konstruktionslehre und CAD

<https://products.fst.com/eu/de/kategorien/radial-wellendichtring-simmerring-baum/produkte/398029>  
<https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT:840937636/RWDR-Dynamik-II-Wechselwirkungsverhalten-der-Systemparameter?cHash=5a5bf6b2cee0875247861ec0482e2919>

JENNEWAIN Dissertation (2016), ISBN:978-3-95974-015-9

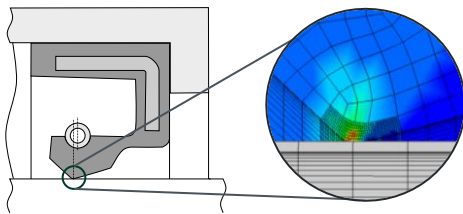
HÜTER Dissertation (2024), ISBN:9783844095333

# Anwendungsbeispiel

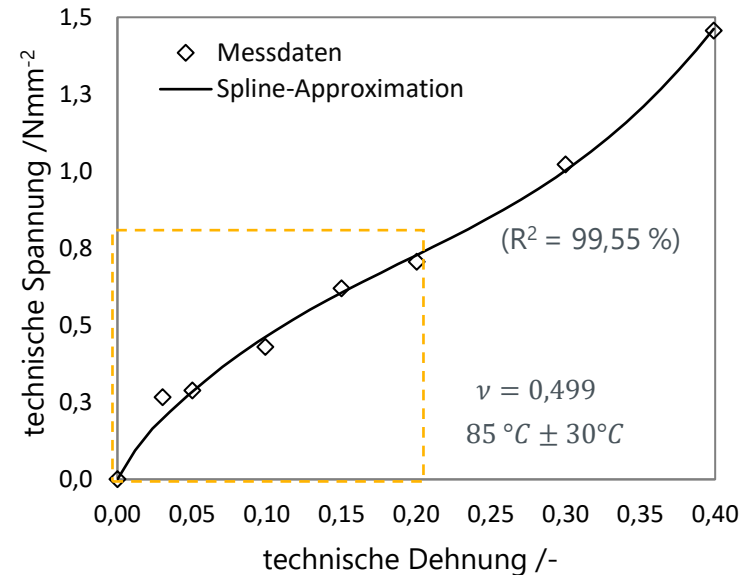
## Montage eines Radial-Wellendichtrings

**Simmerring® | BAUM | 80 × 100 × 10 mm | 75 FKM 585**

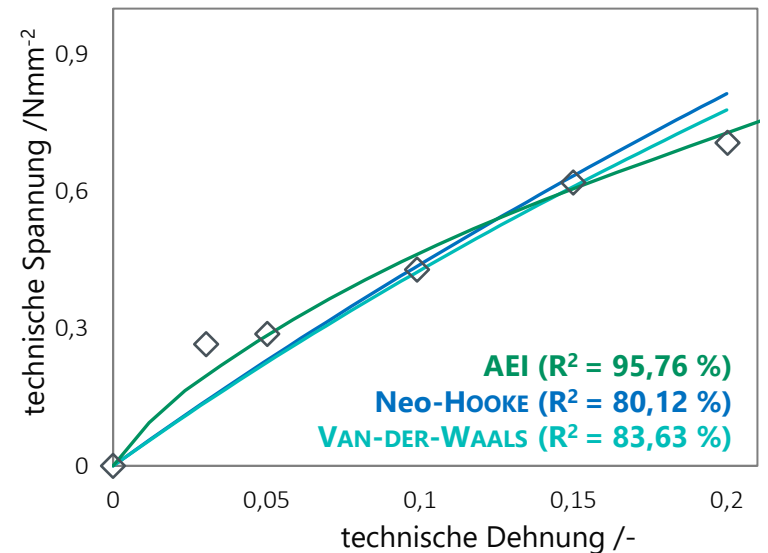
### Montage RWDR aus FKM



### FKM 75 Shore A



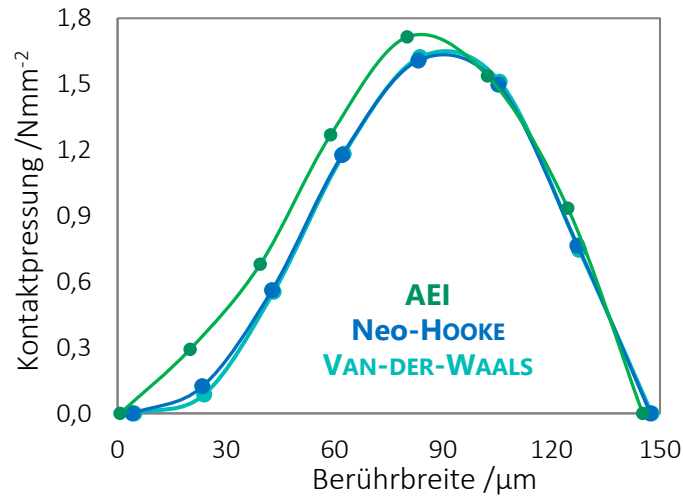
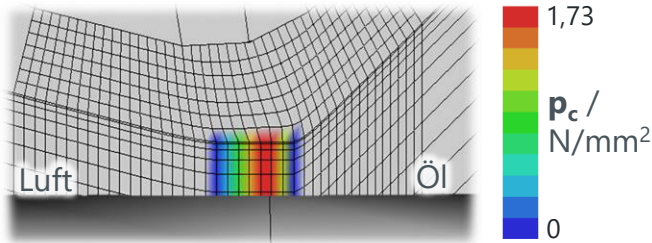
### Modellvorhersage



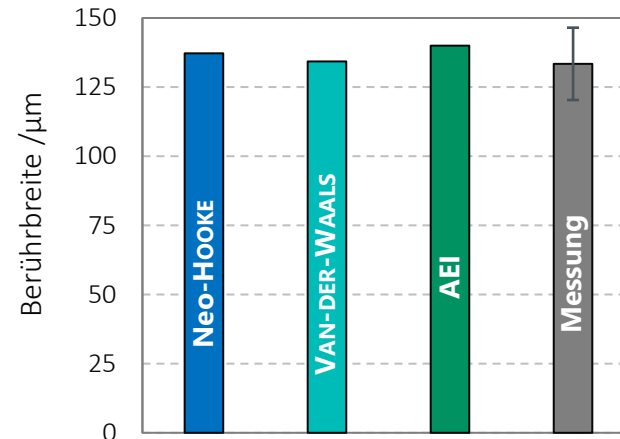
# Anwendungsbeispiel

## Montage eines Radial-Wellendichtrings

### Kontaktpressungsverteilung

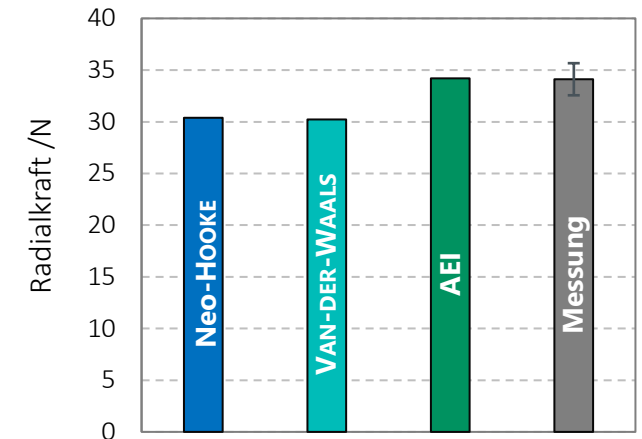


### Berührbreite



Messung: FVA 574 II, N=12, P=98 %

### Radialkraft



Messung: FVA 574 II, N=8, P=98 %

### Abschätzung der Temperaturerhöhung

- Empirischer Ansatz nach ENGELKE:

$$M_R \approx f_{\text{Grenz}} F_R \frac{d_1}{2} + \frac{\pi^2 \eta_{\text{Öl}} n_W \Delta b_c d_1^3}{2 \cdot \sum R_p} \quad \Delta\theta \approx \gamma \cdot \frac{2n_W \cdot M_R}{d_1 \cdot \Delta b_c}$$

Bei 1.000 U/min:

**+20 °C** ✓

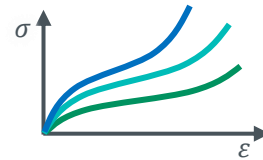




## Zusammenfassung

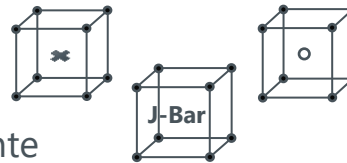
### ■ Modellierung hyperelastischen Materialverhaltens

- Untersuchung und Bewertung verschiedener Materialmodelle
- Approximationsansätze vs. Interpolationsansätze
- Entwicklung eines eigenen Materialmodells für Kompressibilität und Mehrachsigkeit



### ■ FEA von Elastomerbauteilen mit Kontakt

- Volumetrische Elementversteifung
- Abhilfemaßnahmen: Reduzierte Integration, J-Bar, Hybridelemente



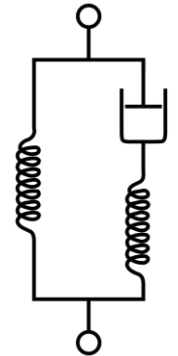
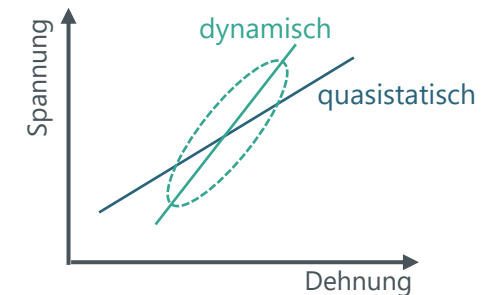
### ■ Validierung anhand eines Anwendungsbeispiels

- Montagevorgang eines Radial-Wellendichtrings

## Ausblick

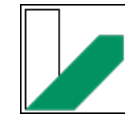
- Viskoelastizität
- FE-Dynamik & Zeitintegration
- Temperatureinfluss

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{D}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{K}\mathbf{u} = \mathbf{F}$$



- BOWER, A.F.: Applied Mechanics of Solids. CRC Press, Boca Raton, 2009.
- BELYTSCHKO, T.; LIU, W.K.; MORAN, B. et al.: Nonlinear Finite Elements for Continua and Structures. John Wiley & Sons, Chichester, 2014.
- WRIGGERS, P.: Nichtlineare Finite-Element-Methoden. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
- BATHE, K.-J.: Finite-Elemente-Methoden – Aus dem Englischen übersetzt von Peter Zimmermann. Springer, Berlin, 2002.
- BORST, R. de; CRISFIELD, M.A.; REMMERS, J.J.C. et al.: Nichtlineare Finite-Elemente-Analyse von Festkörpern und Strukturen. WILEY-VCH, Weinheim, 2014.
- BERGSTRÖM, J.: Mechanics of Solid Polymers – Theory and Computational Modelling. William Andrew, San Diego, 2015.
- MARLOW, R.S.: A general first-invariant hyperelastic constitutive model. In: BUSFIELD, J.; MUHR, A. (Hrsg.): Constitutive Models for Rubber III – Proceedings of the Third European Conference on Constitutive Models for Rubber. A. A. Balkema Publishers, London, 2003, S. 157-160.
- HÜTER, F.; RIEG, F.: Extending Marlow's general first-invariant constitutive model to compressible, isotropic hyperelastic materials. In: Engineering Computations 38 (2021), Heft 6, S. 2631-2647.
- HOLZAPFEL, G.A.: Nonlinear Solid Mechanics – A Continuum Approach For Engineering. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 2000.
- HÜTER, F.; SINGER, D.: Simulation hyperelastischer Materialien mit Z88 – Kalibrierung hyperelastischer Materialmodelle. In: TREMMEL, S.; ALBER-LAUKANT, B. (Hrsg.): Tagungsband 23. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag am 14. September 2022. Universität Bayreuth, Bayreuth, 2022.
- HÜTER, F.: Hyperelastizität in der FEM – Bewertung der Vorhersagegüte unterschiedlicher Materialmodelle. In: TREMMEL, S.; ALBER-LAUKANT, B.; ROSNITSCHKE, T. (Hrsg.): Tagungsband 24. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag am 19. September 2023. Universität Bayreuth, Bayreuth, 2023.
- HÜTER, F.: Modellbildung und Simulation hyperelastischen Materialverhaltens in der nichtlinearen Finite-Elemente-Analyse, Fortschritte in Konstruktion und Produktion Heft 62, Shaker Verlag, Düren, 2024.
- LAMBERT-DIANI, J.; REY, C.: New phenomenological behavior laws for rubbers and thermoplastic elastomers. In: European Journal of Mechanics - A/Solids 18 (1999), Heft 6, S. 1027-1043.
- RIVLIN, R.S.; SAUNDERS, D.W.: Large elastic deformations of isotropic materials VII. Experiments on the deformation of rubber. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences 243 (1951), Heft 865, S. 251-288.
- FLORY, P.J.: Thermodynamic relations for high elastic materials. In: Transactions of the Faraday Society 57 (1961).





UNIVERSITÄT  
BAYREUTH

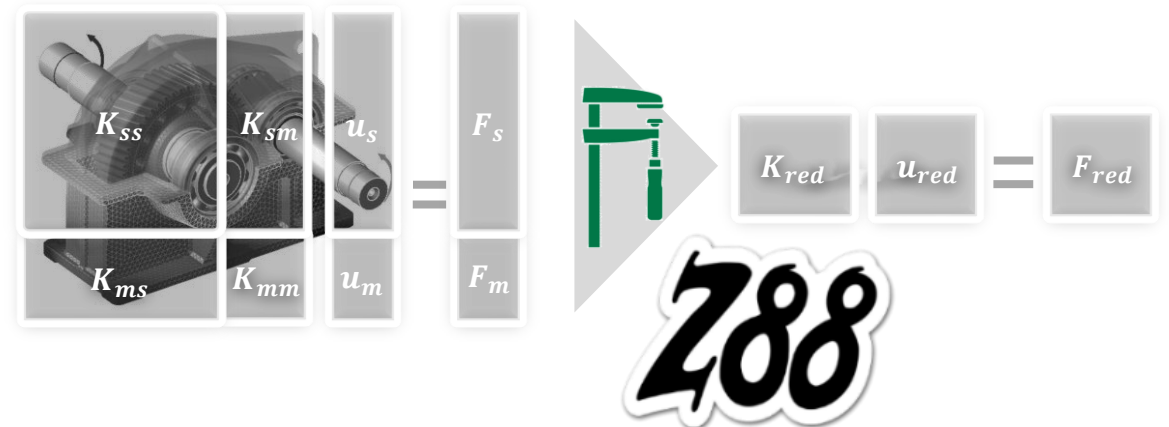
Florian Hüter, 2024

# Statische Reduktion von FE-Strukturen nach GUYAN – Effizienzsteigerung durch den Schur-Komplement-Ansatz

Florian Hüter, Johannes Wittmann

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

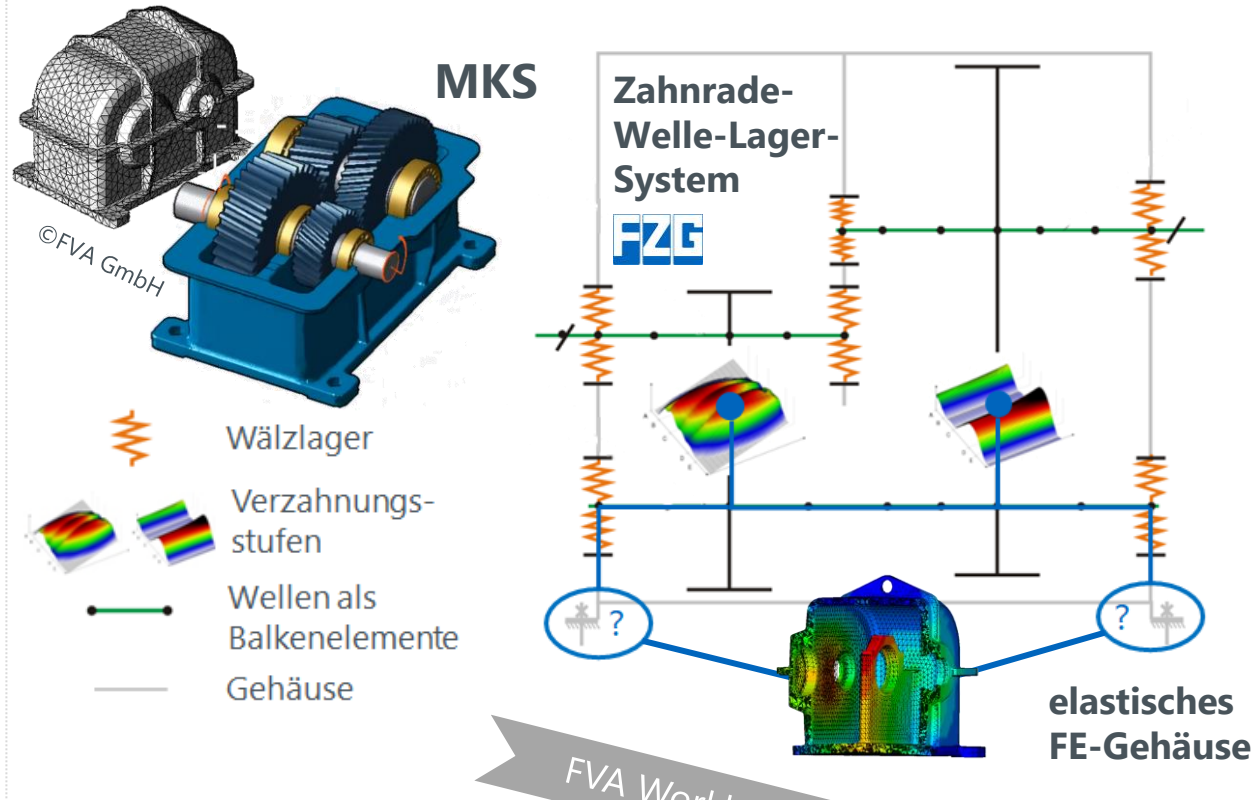
Bayreuth, 11.09.2024



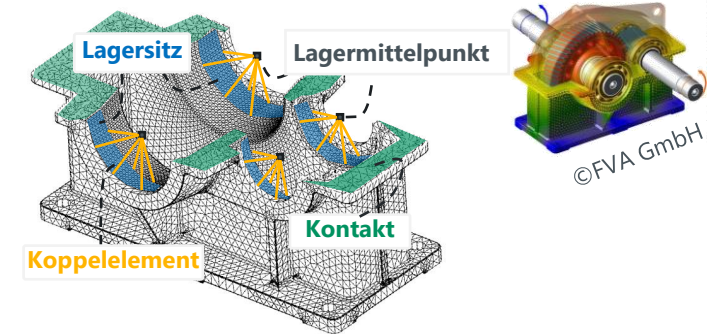
# Statische Reduktion von FE-Strukturen

Motivation: Reduktion elastischer Körper für MKS

## Quasi-statische Gesamtsystem-Simulation mit RIKOR



## Reduktion Gehäusestruktur



- recheneffiziente Berücksichtigung des elastischen Gehäuseeinflusses durch Reduktion der FE-Gehäusestruktur auf Freiheitsgrade der Lagersitze

$$\begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_s \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s \\ F_m \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} K_{red} \\ u_{red} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{red} \end{bmatrix}$$

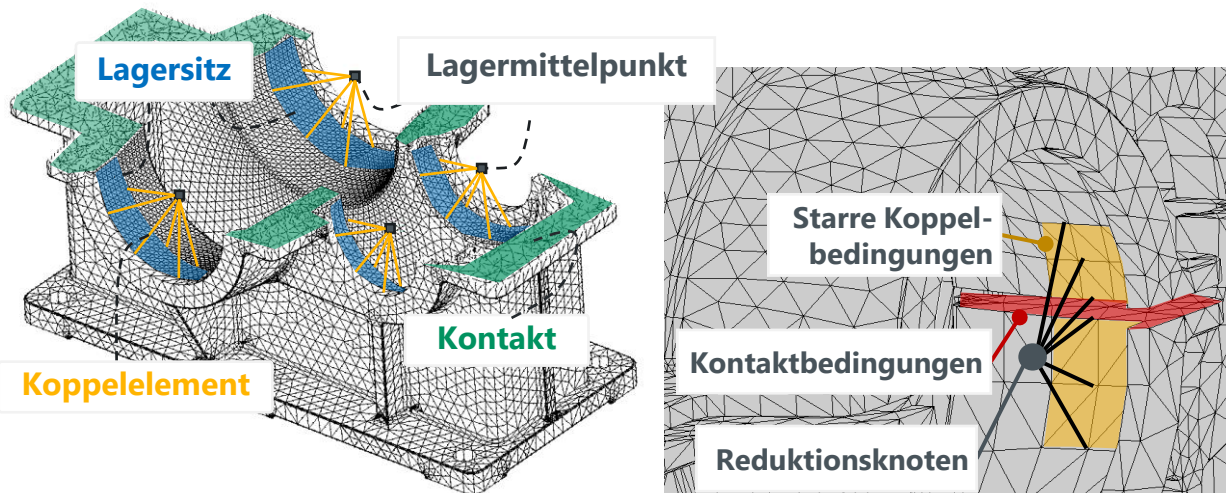




# Statische Reduktion von FE-Strukturen

## Statische Reduktion mit kinematischen Zwangsbedingungen

### Reduktion von geteilten FE-Gehäusen auf Lagersitze



#### FE-Struktur mit kinematischen Zwangsbedingungen

- Kontaktbedingungen
- Koppelbedingungen

### FE-Gleichungssystem

■ FE-Gleichungssystem  $K \cdot u = F$

■ Zwangsbedingungen  $G \cdot u = g$

➔ Zusammenbau zum FE-Gesamtsystem:

#### LAGRANGE-Methode

$$\begin{bmatrix} K & G^T \\ G & -\frac{1}{\beta} I \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ g \end{pmatrix}$$

Straf-  
parameter

#### Penalty-Methode

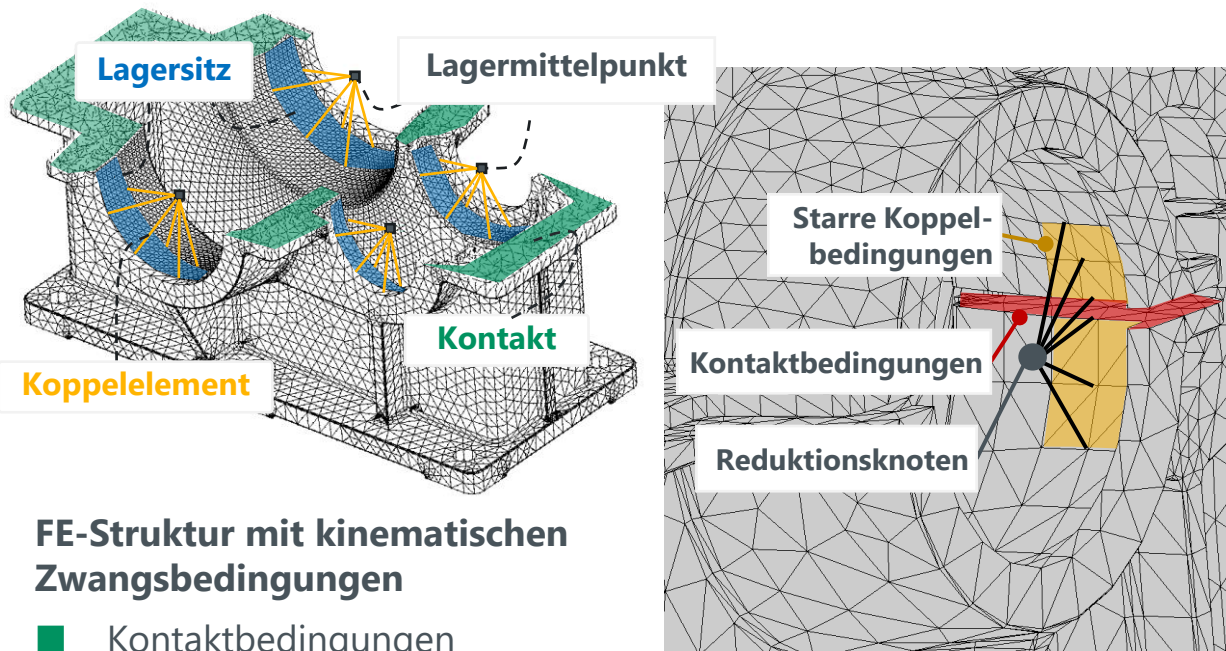
$$[K + \beta G^T G] \cdot u = F + \beta G^T g$$



# Statische Reduktion von FE-Strukturen

## Statische Reduktion mit kinematischen Zwangsbedingungen

### Reduktion von geteilten FE-Gehäusen auf Lagersitze



#### FE-Struktur mit kinematischen Zwangsbedingungen

- Kontaktbedingungen
- Koppelbedingungen

### FE-Gleichungssystem

■ FE-Gleichungssystem  $K \cdot u = F$

■ Zwangsbedingungen  $G \cdot u = g$

➔ Zusammenbau zum FE-Gesamtsystem:

#### Strafparameter bestimmen

- Globales Kriterium:

$$\beta = \beta_{rel} \cdot \max(K_{ii})$$

- Lokales Kriterium:

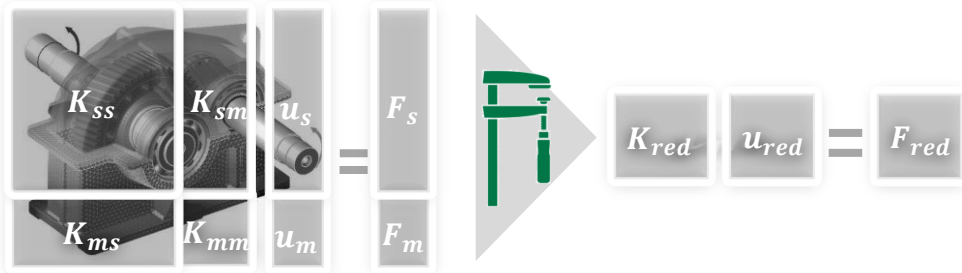
$$\beta = \beta_{rel} \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\min(K_{ii})}{\sqrt{N_{dim} \cdot t}}$$

$$\beta_{rel} \approx 10^{3...4}$$



### Idee der statischen Reduktion

- **Ziel:** FE-Gleichungssystem auf relevante Freiheitsgrade (=Master-FG) reduzieren



- **Ansatz:** Elimination der irrelevanten Freiheitsgrade (=Slave-FG) aus dem Gleichungssystem
- **Algorithmen:**
  - Direktelimination
  - Transformationsmatrix-Ansatz
  - SCHUR-Komplement-Ansatz

### Direktelimination d. Slave-FG

- **Partitionierung** in Master-FG und Slave-FG:

$$\text{FE-System} \quad \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_s \\ F_m \end{pmatrix}$$

$$\Rightarrow u_s = K_{ss}^{-1} F_s - K_{ss}^{-1} K_{sm} u_m$$

- **Elimination** der Slave-Freiheitsgrade (Slave-FG):

**Reduziertes  
FE-System**

$$K_{red} u_m = F_{red}$$

mit

$$K_{red} := K_{mm} - K_{ms} K_{ss}^{-1} K_{sm}$$

$$F_{red} := F_m - K_{ms} K_{ss}^{-1} F_s$$

- *Steifigkeitsmatrix ist dünnbesetzt*
- *Reduzierte Matrix ist dichtbesetzt wegen Inverse*



### Recovery des Gesamtverschiebungsfeldes

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}_s \\ \mathbf{u}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{F}_s - \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \mathbf{u}_m \\ \mathbf{u}_m \end{pmatrix}$$

$$= \underbrace{\begin{bmatrix} -\mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{K}_{sm} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}} \mathbf{u}_m + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss}^{-1} \mathbf{F}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Transformationsmatrix  $\mathbf{T}$

### Reduktion mittels Transformationsmatrix

$$\delta \mathbf{u}^T (\mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{F}) = 0 \rightarrow \delta \mathbf{u}_m^T \mathbf{T}^T (\mathbf{K} \mathbf{T} \mathbf{u}_m - \mathbf{F}) = 0$$

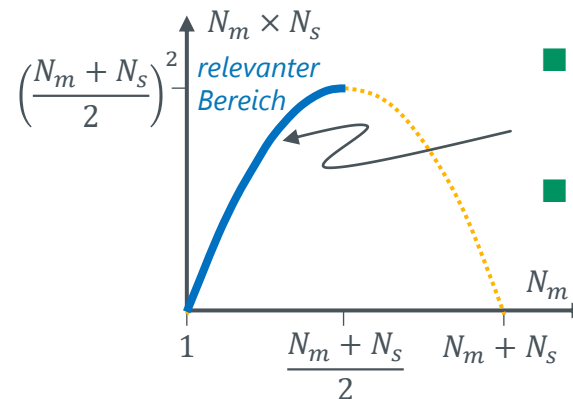
$$\Rightarrow \underbrace{\mathbf{T}^T \mathbf{K} \mathbf{T}}_{\mathbf{K}_{red}} \cdot \mathbf{u}_m = \underbrace{\mathbf{T}^T \mathbf{F}}_{\mathbf{F}_{red}}$$

### Bestimmung der Transformationsmatrix

- $\mathbf{K}_{ss}^{-1}$  nicht explizit durch Invertierung ermitteln
- effizienter Ansatz mittels GAUß-JORDAN-Verfahren:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{T}_s \\ \mathbf{T}_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{sm} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix}$$

### Bestimmung der Transformationsmatrix



- Speicheraufwand  $N_m \times N_s$  steigt mit zunehmender Anzahl an Master-FG  $N_m$
- und damit die Anzahl zu berechnender Matrixeinträge

Verfahren für große  $N_m$  sehr aufwendig!



### Matrix-Reduktion durch LR-Zerlegung

- **Idee:** unvollständige Matrixfaktorisierung
  - Direct Sparse Matrix Solver basieren auf einer Matrix-Faktorisierung (LR, LDL, CHOLESKY)
  - Führt man die Faktorisierung der Matrix nur für die Slave-FG durch, so entspricht der noch unfaktorisierte Matrixteil (=SCHUR-Komplement  $S$ ) genau der reduzierten Matrix
- **Exemplarisch:** unvollständige LR-Zerlegung

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{ss}R_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 \\ K_{ms}R_{ss}^{-1} & S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{ss} & L_{ss}^{-1}K_{sm} \\ 0 & I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

SCHUR-Komplement  $S \equiv K_{red} = K_{mm} - K_{ms}K_{ss}^{-1}K_{sm}$

### Reduzierter Kraftvektor

- (1) Vorwärts-Einsetzen:  $L_{ss}X = F_s \rightarrow X$
- (2) Matrix-Vektor-Produkt:  $(K_{ms}R_{ss}^{-1}) \cdot X \rightarrow Y$
- (3) Vektor-Subtraktion:  $F_m - Y \rightarrow F_{red}$

### Recovery Verschiebungsfeld

- (1) Matrix-Vektor-Produkt:  $(L_{ss}^{-1}K_{sm}) \cdot u_m \rightarrow X$
- (2) Vorwärts-Einsetzen:  $L_{ss}Y = F_s \rightarrow Y$
- (3) Rückwärts-Einsetzen:  
 $R_{ss}[\tilde{X} \ \tilde{Y}] = [X \ Y] \rightarrow [\tilde{X} \ \tilde{Y}]$
- (4) Vektor-Subtraktion:  
 $\tilde{Y} - \tilde{X} \rightarrow u_s$



- Hauptrechenaufwand für Matrixfaktorisierung
- Speichereffiziente Sparse-Matrix-Speicherung





### Matrix-Reduktion durch LR-Zerlegung

- **Idee:** unvollständige Matrixfaktorisierung
  - Direct Sparse Matrix Solver basieren auf einer Matrix-Faktorisierung (LR, LDL, CHOLESKY)
  - Führt man die Faktorisierung der Matrix nur für die Slave-FG durch, so entspricht der noch unfaktorierte Matrixteil (=SCHUR-Komplement  $S$ ) genau der reduzierten Matrix
- **Exemplarisch:** unvollständige LR-Zerlegung

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} L_{ss}R_{ss} & K_{sm} \\ K_{ms} & K_{mm} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_{ss} & 0 \\ K_{ms}R_{ss}^{-1} & S \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{ss} & L_{ss}^{-1}K_{sm} \\ 0 & I \end{bmatrix} \end{aligned}$$

SCHUR-Komplement  $S \equiv K_{red} = K_{mm} - K_{ms}K_{ss}^{-1}K_{sm}$

### Reduzierter Kraftvektor

- (1) Vorwärts-Einsetzen:  $L_{ss}X = F_s \rightarrow X$
- (2) Matrix-Vektor-Produkt:  $(K_{ms}R_{ss}^{-1}) \cdot X \rightarrow Y$
- (3) Vektor-Subtraktion:  $F_m - Y \rightarrow F_{red}$

### Eigenschaften

- kein Aufbau der Transformationsmatrix  
→ rechenzeit- und speicherintensivster Schritt aus Algorithmus 1 entfällt hier!
- Hauptrechenaufwand für Matrixfaktorisierung von  $K_{ss}$  auch in Algorithmus 1 vorhanden
- Unvollständige Matrixfaktorisierung mit bekannten Sparse Direct Solver (z. B. PARDISO) möglich



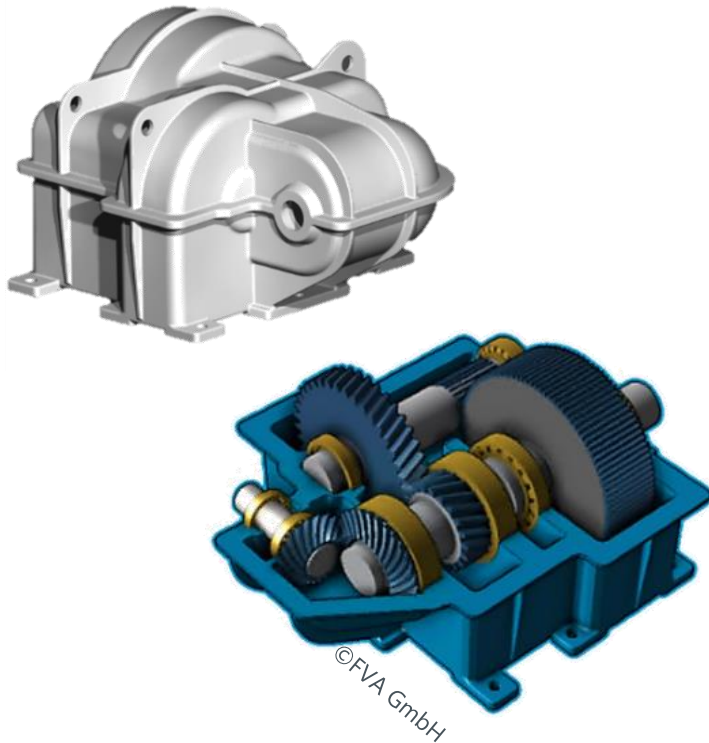
**rechen- & speichereffizienter, insbesondere bei großen  $N_m$**



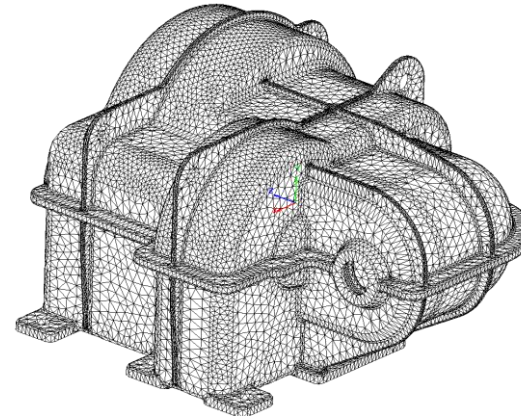
# Vergleich der Reduktionsalgorithmen

Anwendungsbeispiel: Getriebegehäuse

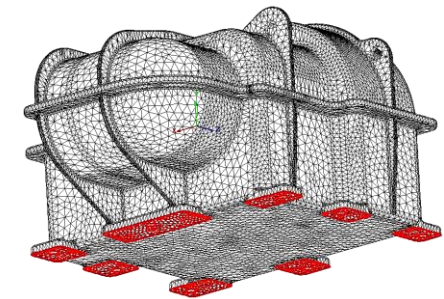
## 3-stufiges Getriebe



## Statische Reduktion auf Lagerstellen



- Festhaltung an Fundamentanbindung



### Modelleigenschaften

- GG-Gehäuse mit 8 Lagerstellen
- 218.134 quad. Tet.
- 1.151.328 Freiheitsgrade

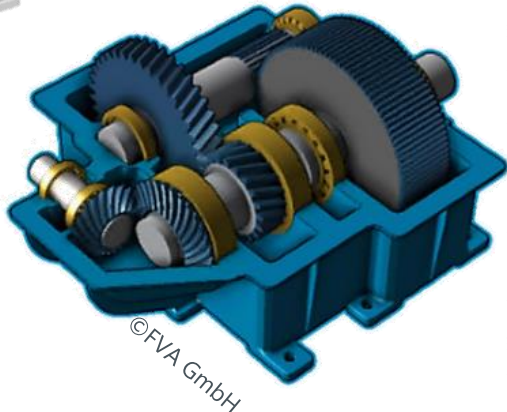
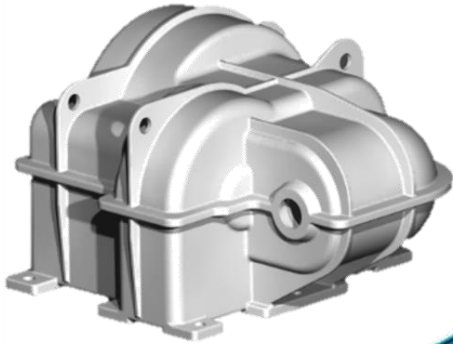
Z88



# Vergleich der Reduktionsalgorithmen

Anwendungsbeispiel: Getriebegehäuse

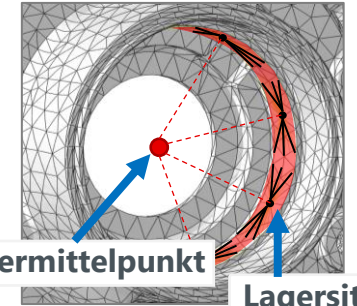
## 3-stufiges Getriebe



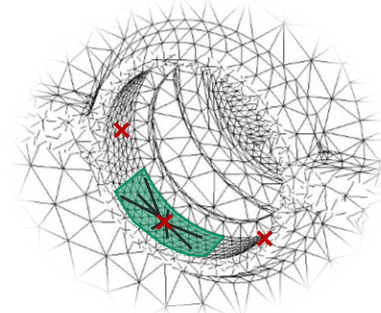
## Statische Reduktion auf Lagerstellen

### ■ Modellierung der Gehäuse-Lager-Anbindung

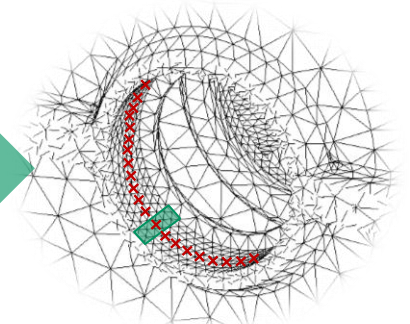
- Modellierungsstrategie zur Abbildung der Lagerovalisierung nach FVA 711 II
- Unterteilung in Lagersitzsegmente
- Starre Koppelbedingung zwischen Segment-Knoten & Reduktionsknoten



➔ Variation der Anzahl der Lagersitzsegmente



schrittweise Erhöhung der Segmentanzahl



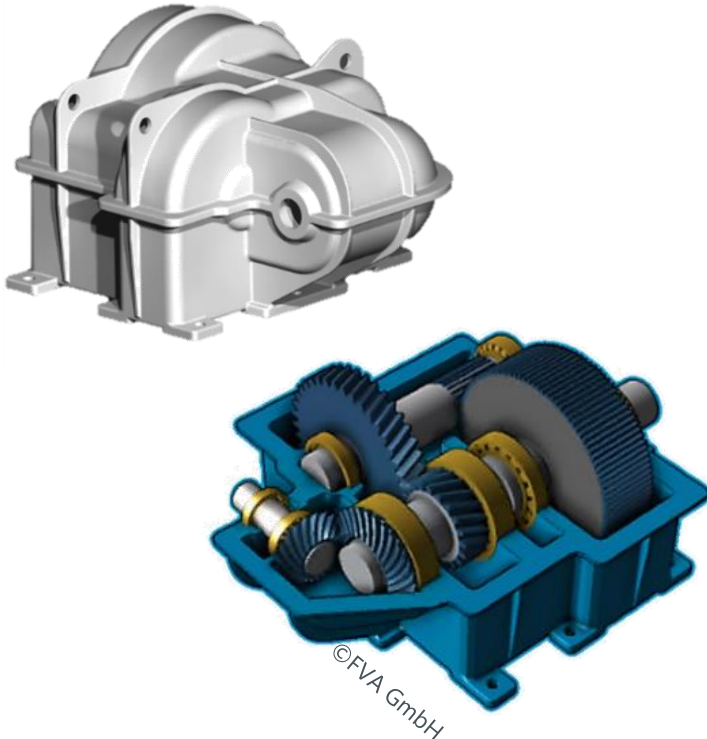
Z88



# Vergleich der Reduktionsalgorithmen

Anwendungsbeispiel: Getriebegehäuse

## 3-stufiges Getriebe



## Statische Reduktion auf Lagerstellen



Reduktion auf  
die 8 Lagerstellen

Vergleich beider Algorithmen bzgl.  
Rechenzeit & Speicheraufwand:

- (1) Transformationsmatrix-Ansatz
- (2) SCHUR-Komplement-Ansatz

### System

- Installierter RAM: 128 GB
- Prozessor: Intel® Core™ i9-10980XE CPU@3.00GHz

288

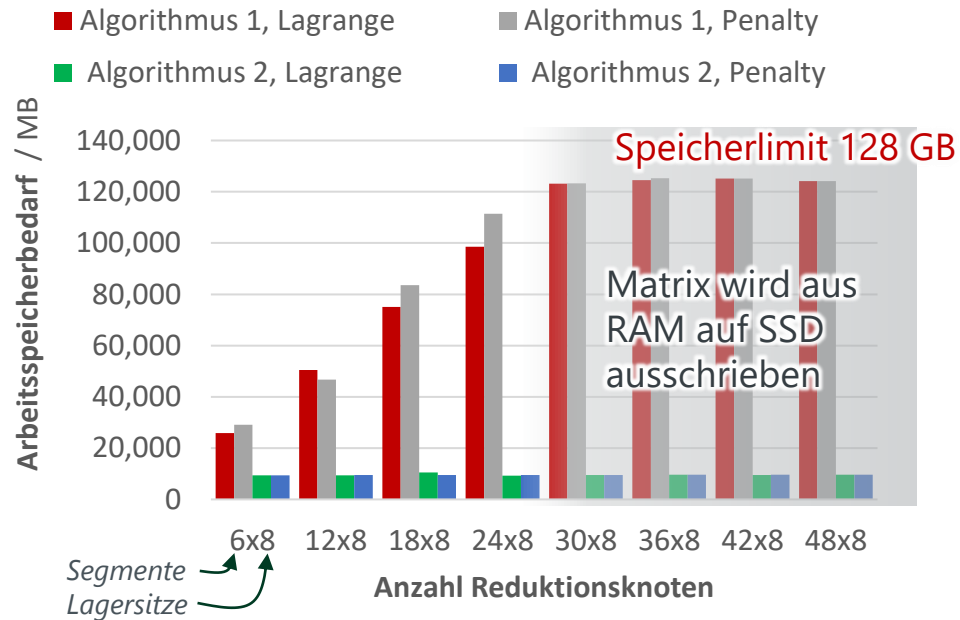




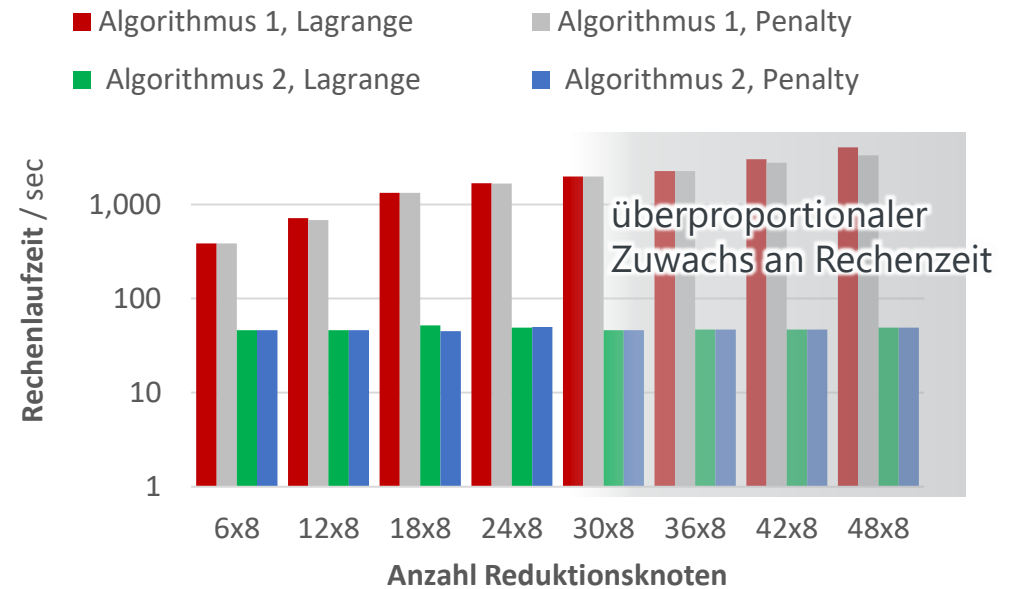
# Vergleich der Reduktionsalgorithmen

## Anwendungsbeispiel: Getriebegehäuse

### Arbeitsspeicherbedarf



### Rechenzeit



Z88



Algorithmus 2 deutlich rechenzeit- und speichereffizienter, insbesondere bei großer Anzahl an Master-FG





### Zusammenfassung

- **Motivation:** Reduktion von FE-Strukturen für recheneffiziente MKS
- **GUYAN-Reduktion** für quasi-statische Problemstellungen
- Verschiedene **Reduktionsalgorithmen:**
  - (1) Transformationsmatrix-Ansatz
  - (2) SCHUR-Komplement-Ansatz
- Algorithmus 2 deutlich **rechen- & speichereffizienter**, insbesondere bei vielen Master-FG, da Aufbau der Transformationsmatrix umgangen wird

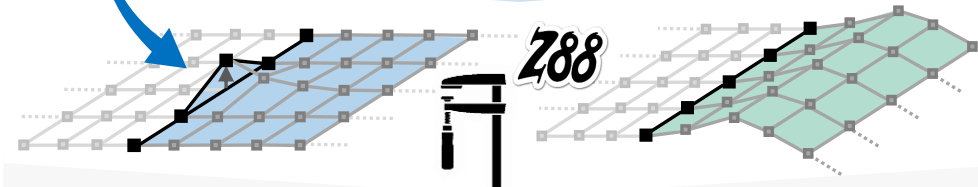
### Ausblick: beschleunigte dynamische Reduktion

- **Eigenschwingungsanalyse**

$$(K - \omega^2 M)\Phi_i = 0$$

- **Statische Reduktion**  **beschleunigt**

$$K_{\text{red}} = K_{ee} - K_{ei}K_{ii}^{-1}K_{ie}$$



- **Dynamische Reduktion**

$$u = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -K_{ii}^{-1}K_{ie} & \Phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ q_k \end{bmatrix} = T_{\text{HCB}}q$$

Freiheitsgrade

*i* intern  
*e* extern  
*k* modal



*Billenstein, D.:* Finite-Elemente-Strategien zur Berücksichtigung des elastischen Umfeldes in der Topologieoptimierung – Beitrag zur steifigkeitsoptimierten Auslegung von Antriebstechnikkomponenten auf Basis von Z88. Dissertation. Shaker Verlag, Düren, 2019.

*Cook, R.D.; Malkus, D.S.; Plesha, M.E. et al.:* Concepts and Applications of Finite Element Analysis. John Wiley & Sons, Hoboken, 2001.

*Guyan, R.J.:* Reduction of stiffness and mass matrices. In: AIAA Journal 3 (1965), Heft 2, S. 380.

*Hüter, F.; Hammerl, G.; Mieth, F. et al.:* Erweiterung der statischen Reduktion zur Berücksichtigung von verklebten Kontakten (Statische Reduktion mit verklebtem Bauteilkontakt) – Forschungsvorhaben Nr. 979 I. Abschlussbericht. Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, Frankfurt am Main Ausgabe 2024.

*Palazzolo, A. B.:* Vibration theory and applications with finite elements. John Wiley & Sons, Inc, Chichester, West Sussex, United Kingdom, 2016.

*Qu, Z.-Q.:* Model Order Reduction Techniques. Springer London, London, 2004.

*Schweigert, D.; Wittmann, J.; Stahl, C. et al.:* Erweiterung der Detailtiefe bei der Berücksichtigung von elastischen Gehäusestrukturen in der Getriebeauslegung mit RIKOR (RIKORplusZ88 II) – Forschungsvorhaben Nr. 711 II. Abschlussbericht. FZG TU München; Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, Frankfurt am Main Ausgabe 2021.

*Weinberger, U.; Glenk, C.; Stahl, C. et al.:* Einbindung elastischer Gehäusestrukturen in die Getriebeauslegung mit RIKOR und Visualisierung des Getriebegesamt-systems in der FVA Workbench (RIKORplusZ88) – Forschungsvorhaben Nr. 711 I. Abschlussbericht. Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme, Technische Universität München; Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD, Universität Bayreuth, Frankfurt am Main Ausgabe 2017.

*Wittmann, J.:* Struktur-dynamische Finite-Elemente-Analyse zur Berechnung von Antriebstechnik-Komponenten – Beitrag zur Eigenschwingungsanalyse und Frequenzganganalyse mit Bauteilkontakt, Fortschritte in Konstruktion und Produktion Heft 63, Shaker, Düren, 2024.

*Davis, T.A.:* Direct methods for sparse linear systems, Fundamentals of algorithms, Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, 2006.





# Flexibel installierte Drähte mit Formgedächtnis

## Eine alternative Aktorik für kompakte Bauräume?

11.09.2024

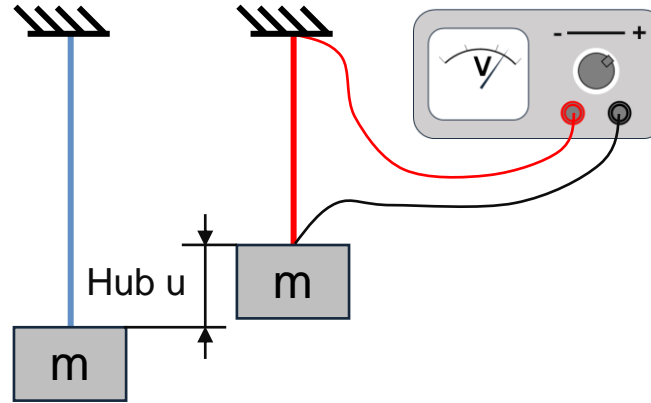
25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag

Robin Löffler, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck



- Technisch wichtigste Bauform
- Muskelartige Bewegung
- Beste Materialausnutzung bei Zugbelastung
- Elektrisch sinnvoll aktivierbar
- Kostengünstige Herstellung



- Fähigkeit der Gestalterinnerung
  - Reversible Martensit-Austenit-Phasenumwandlung durch Erwärmung
- „Intelligentes“ Material
  - Aktor- und Sensorfunktion
- NiTi-Legierung

## Flexibel installierte Drähte mit Formgedächtnis

## Eine alternative Aktorik für kompakte Bauräume?

- Bewegung durch Gestalterinnerung
  - Bis zu 5 % Kontraktion (in Drahtform)
- Höchste Energiedichte (in Drahtform)

- Flexible installierter Draht an Bauraum anpassbar
  - Einsatz von Umlenkstellen
- Substitutionspotential für bestehende Antriebe



# Beispiele FGL-Aktorbaugruppen

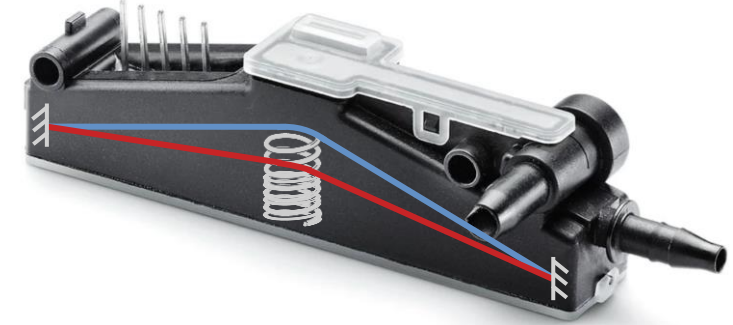
## Surface Book Microsoft

- Entriegelung Bildschirm

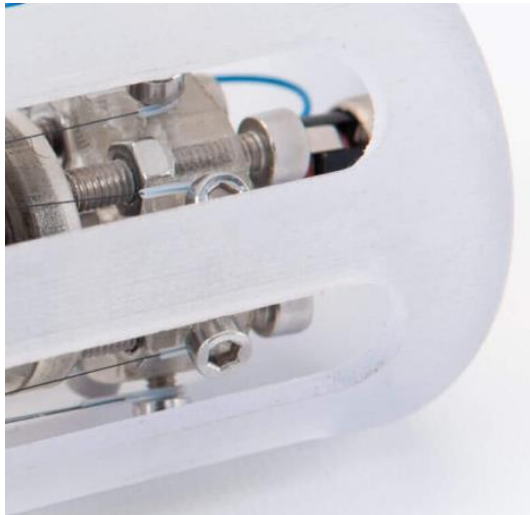


## Pneumatikventil Actuator Solutions

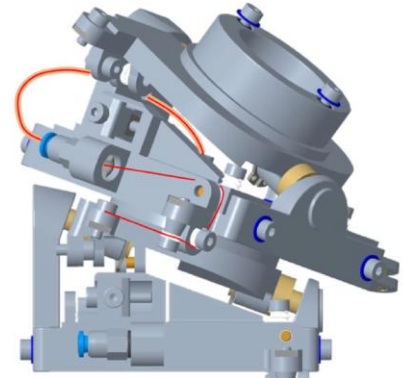
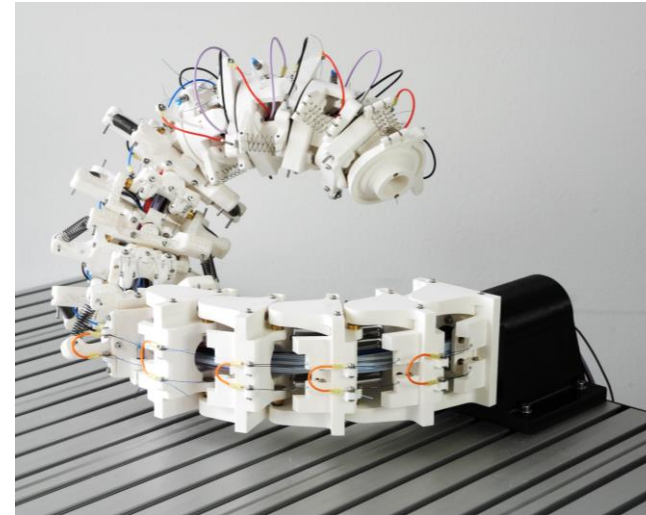
- Massagefunktion Autositz



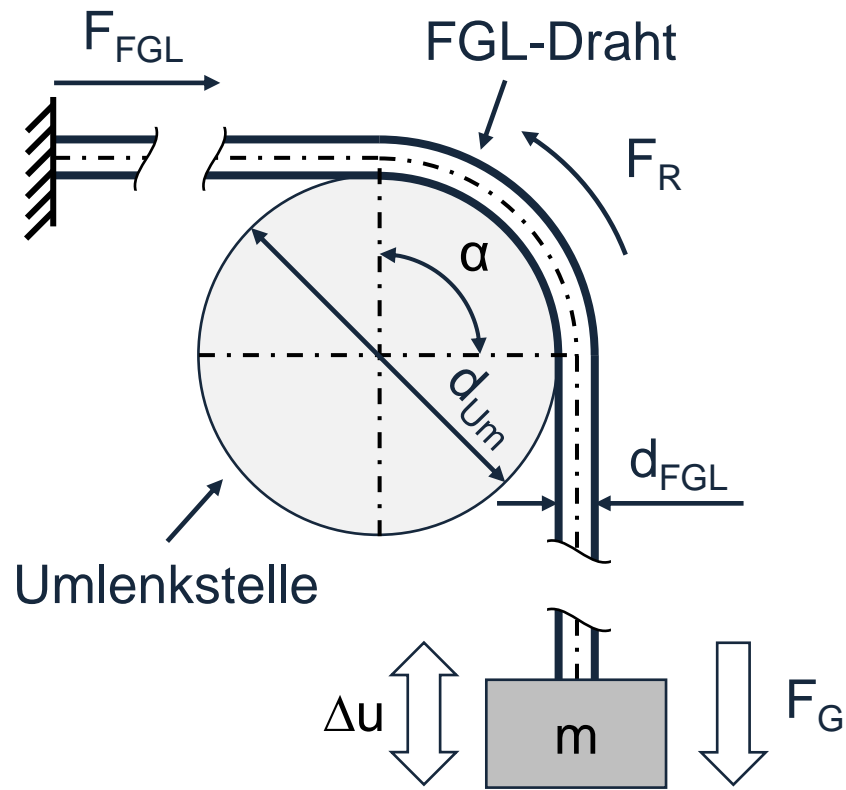
## Druckluftfreier Vakuumsauger



## Bionischer Eulenhals

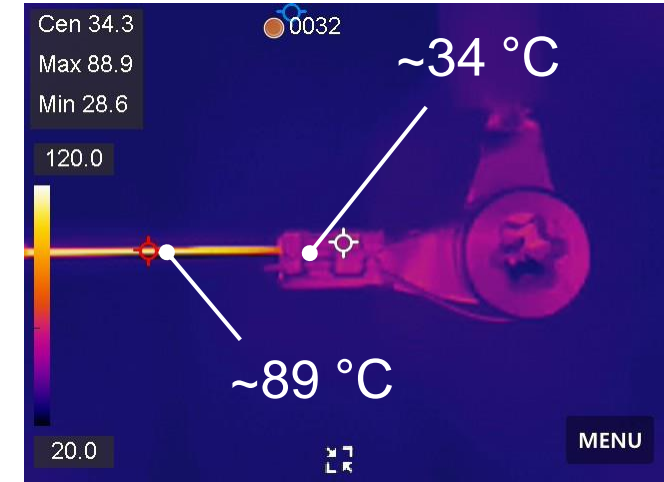
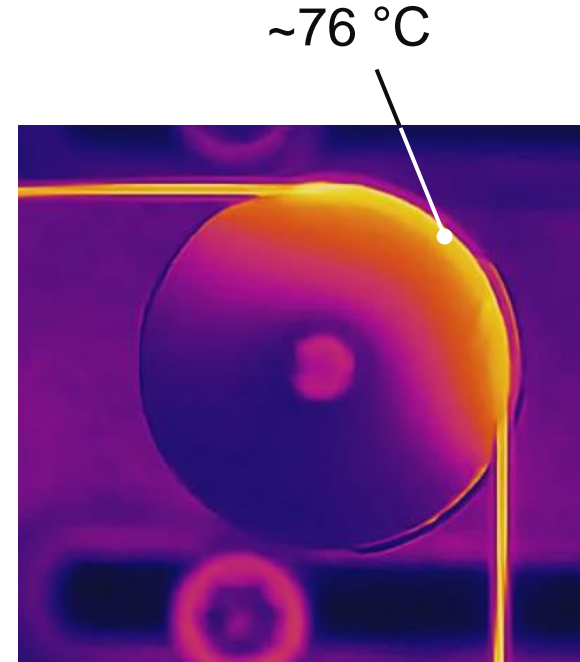


Quellen:  
<https://techcommunity.microsoft.com/t5/surface-it-pro-blog/redefining-the-laptop-an-engineer-8217-s-tour-of-microsoft/ba-p/328919>  
<https://www.actuator solutions.de/products/pneumatics-and-fluidics/>  
<http://imsl.de/vakuumsauggreifer/>  
<https://baybionik.de/teilprojekte/p8-eulenhalsgelenk/>



### Mechanische Einflüsse

- Reibung
  - Zug- und Randfaserspannungen in FGL-Draht
- } Überlastung des Drahts

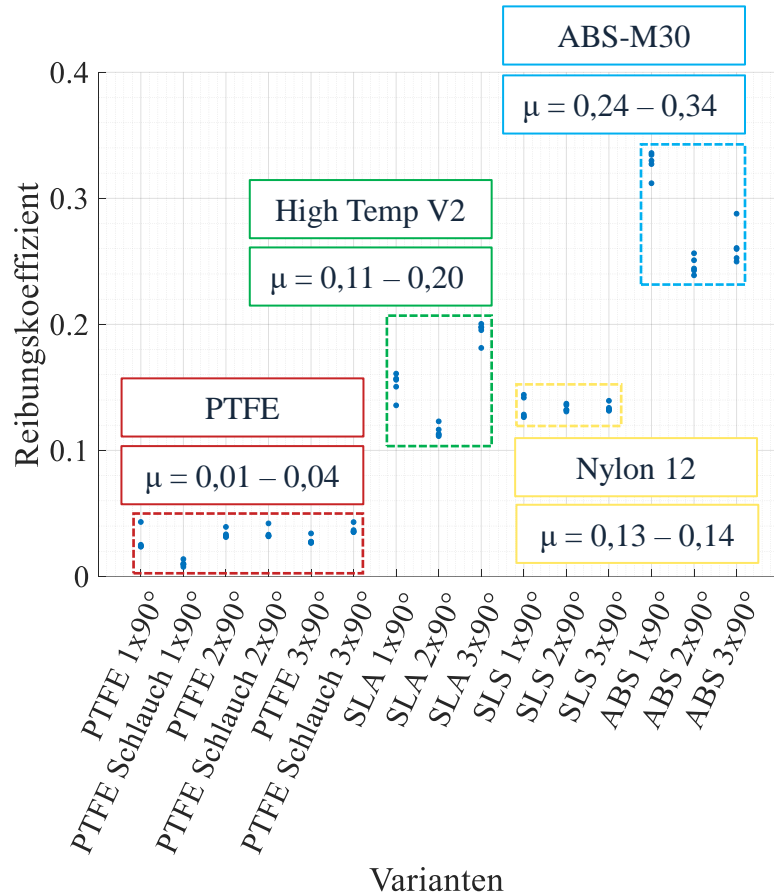


### Thermische Einflüsse

- Wärmesenken durch
    - Umlenkstelle/n
    - Crimpkontakte
- } Hubverlust und Überhitzung

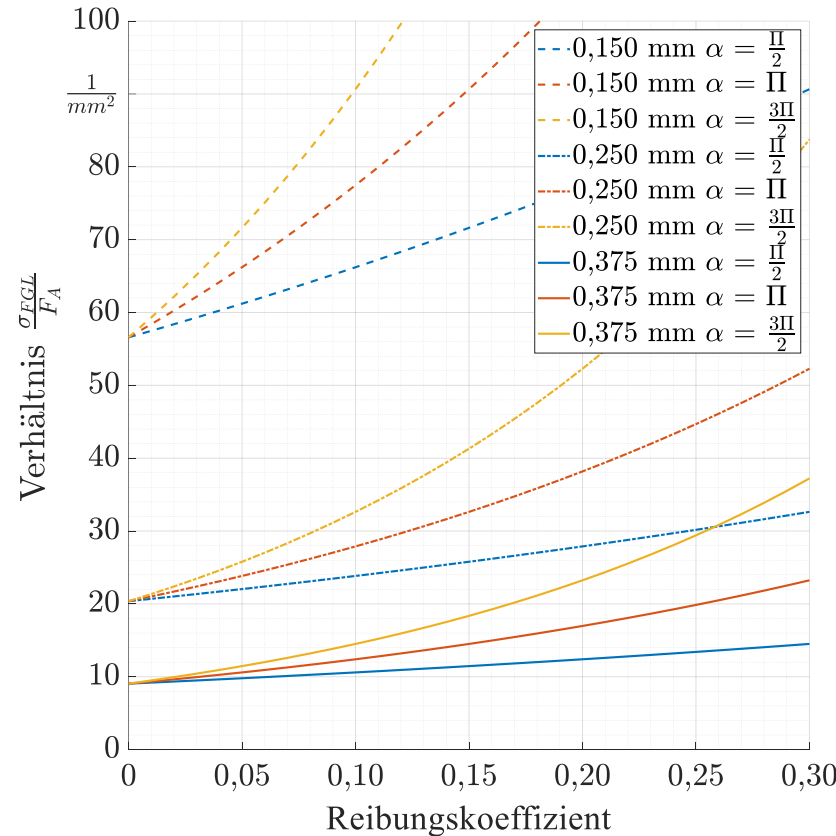
## Reibungskoeffizienten

- Verschiedene Materialpaarungen
- Insbesondere AM-Materialien



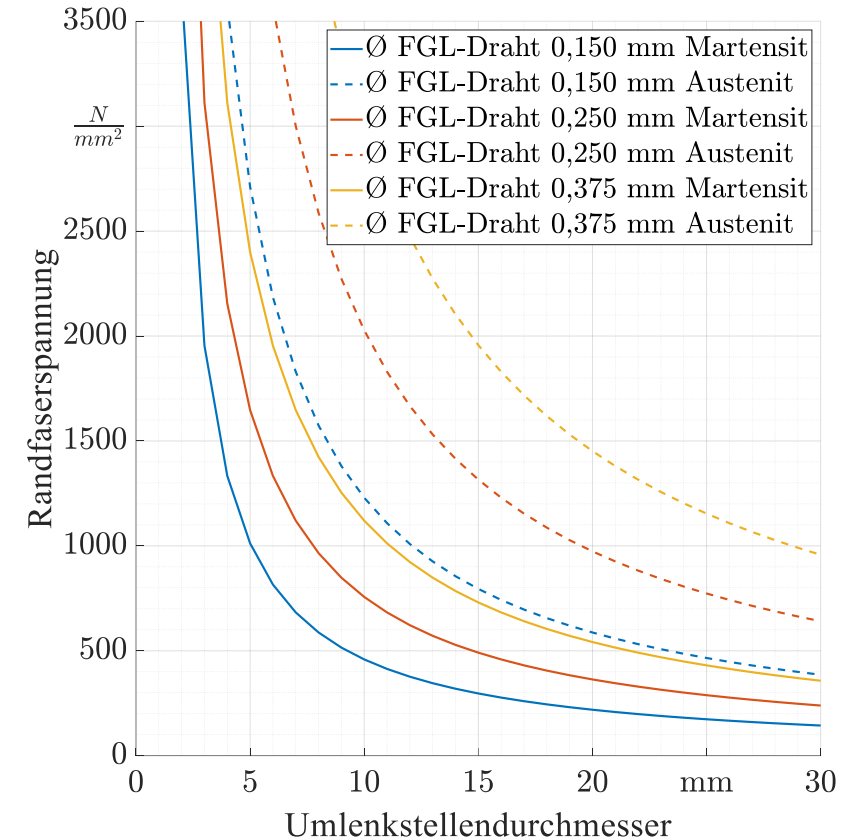
## Ø FGL-Draht

- Abhängig von max. Zugspannung, Aktorkraft, Reibungskoeffizient und Umschlingungswinkel



## Randfaserspannung FGL-Draht

- Abhängig von Draht- und Umlenkstellendurchmesser sowie E-Modul



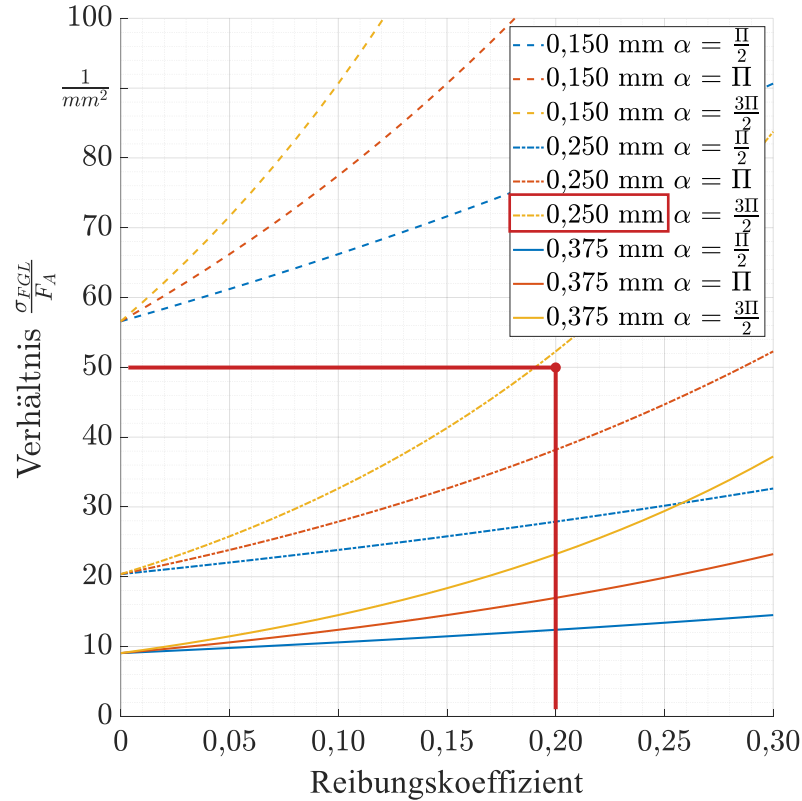
# Vorgehensweise zur Auslegung einer FGL-Aktorbaugruppe

Anforderungsliste (Beispiel, unvollständig)

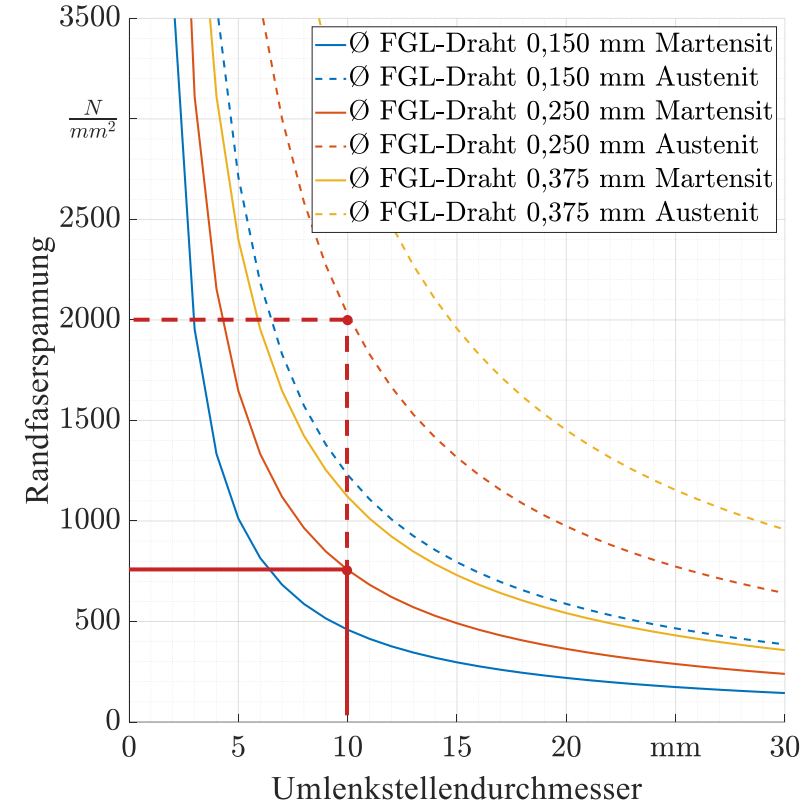
Ldf. Nr.	Art	Anforderung	Wert
1	F	Hub	8 mm
2	F	$F_A$	10 N
3	F	$\sigma_{ZD,max}$	500 N/mm <sup>2</sup>
4	Z	Bauraum	30 x 30 x 30 mm
5	Z	Material	High Temp V2
...	...	...	...

$\frac{\sigma_{FGL}}{F_A} = 50 \frac{1}{mm^2}$   
 $\alpha = 270^\circ = \frac{3\pi}{2}$   
 $\mu = 0,11 - 0,20$

1. Umlenkgeometrie/n durch Bauraum und Hub festlegen
2. Reibungskoeffizient durch Material ermitteln
3. Verhältnis  $\frac{\sigma_{FGL}}{F_A}$  berechnen
4.  $\emptyset$  FGL – Draht bestimmen
5.  $\sigma_{FGL,B,Austenit}$  bestimmen
6.  $\sigma_{FGL,Gesamt} = \sigma_{FGL,ZD} + \sigma_{FGL,B}$  berechnen
7. Lebensdauer durch Versuche verifizieren



$\emptyset$  FGL – Draht = 0,250 mm



$\sigma_{FGL,B,Austenit} = 2000 \frac{N}{mm^2}$

Abschätzung der Tankvorgänge eines KFZ (gesamte Lebensdauer)

Ø-Alter PKW (Deutschland 2023)	~10 Jahre (10,3 Jahre)
Ø-Jahresfahrleistung PKW Benzin-Motor (Deutschland 2023)	~10.000 km (9.580 km)
Kraftstoffverbrauch kombiniert	~5,5 l/100 km
Tankgröße	45 l
Anzahl <u>theoretischer</u> Tankvorgänge	122
Schätzung <u>tatsächlicher</u> Tankvorgänge	250 - 500



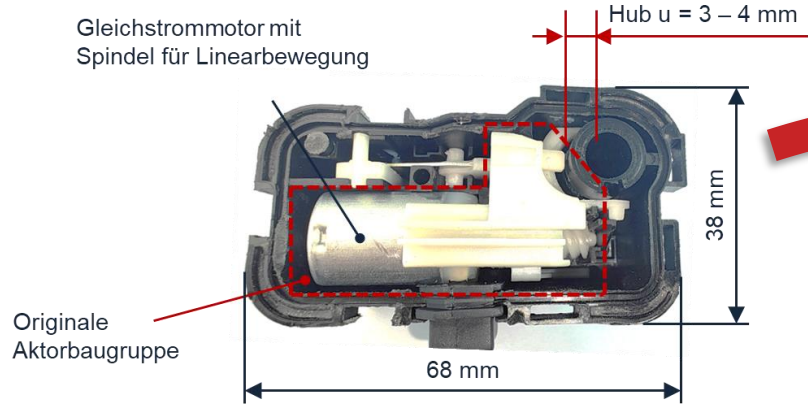
Volkswagen Golf VIII



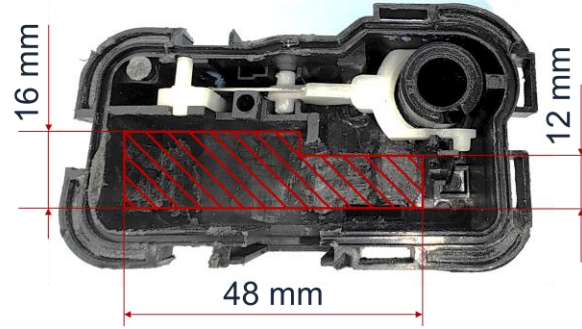
Stellmotor Tankdeckelentriegelung



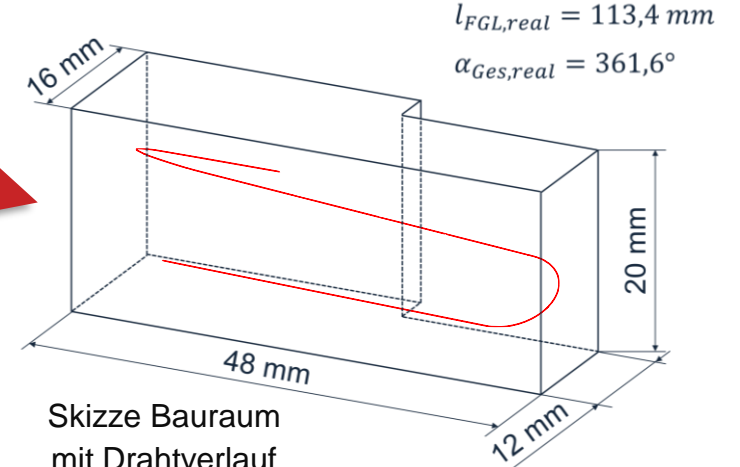
# Beispielentwicklung: Tankdeckelentriegelung KFZ



Ursprüngliche Baugruppe

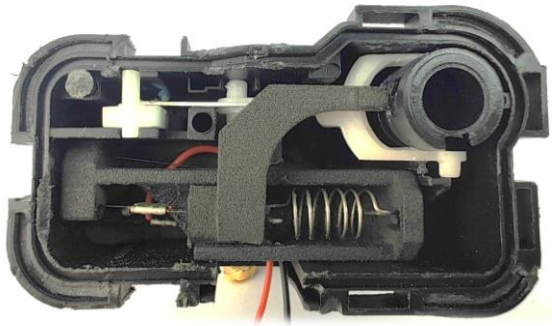


Bauraum für Substitutions-Aktorbaugruppe

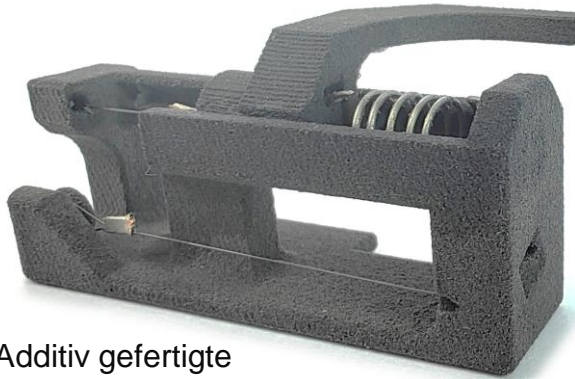


Skizze Bauraum mit Drahtverlauf

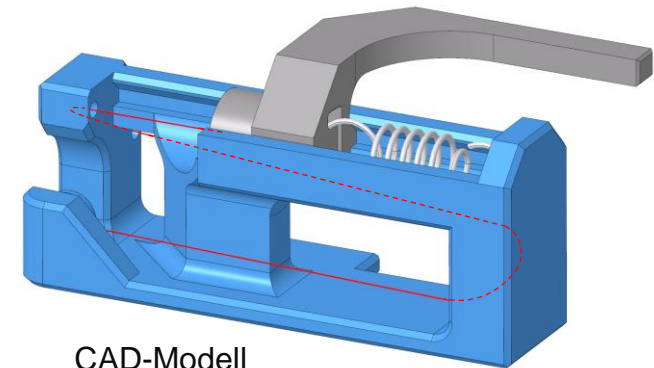
	Aktorbaugruppe Elektromotor	Aktorbaugruppe FGL	Optimierung
Gewicht	25,4 g	5,1 g	80 %
Bauteilanzahl	~ 32	8	75 %
Elektr. Leistung	~ 1,2 W	1,2 W	0 %
Geräusche	Gering	Keine	-



Neue Baugruppe mit FGL-Aktorik



Additiv gefertigte Aktorbaugruppe (SLS – Nylon 12)

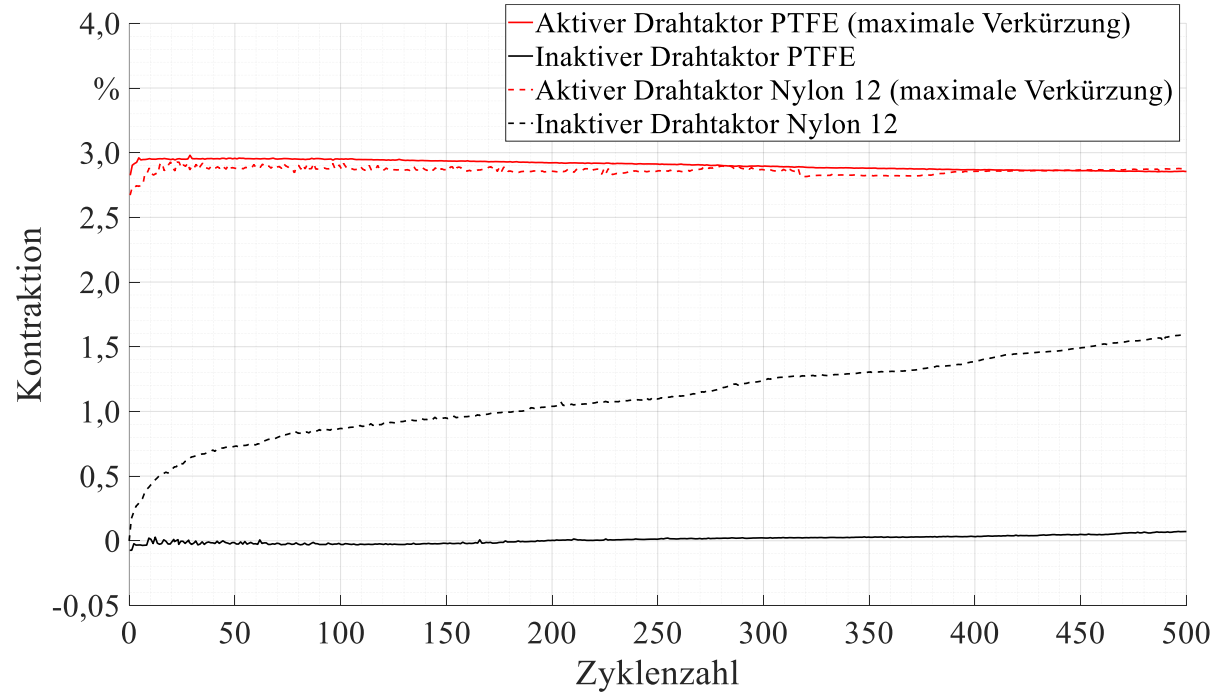


CAD-Modell der Aktorbaugruppe

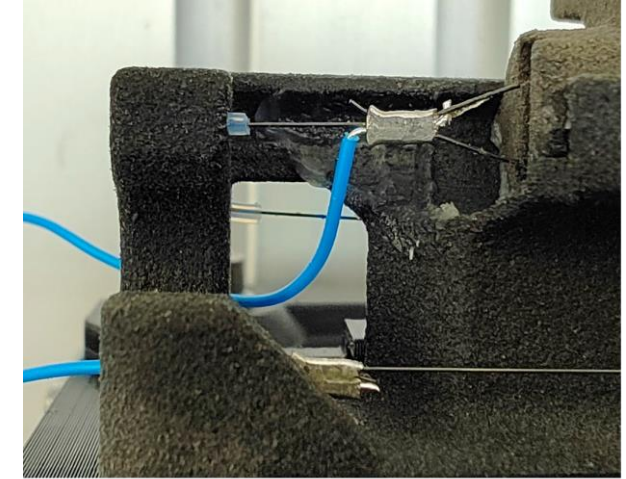
# Beispielentwicklung: Tankdeckelentriegelung KFZ



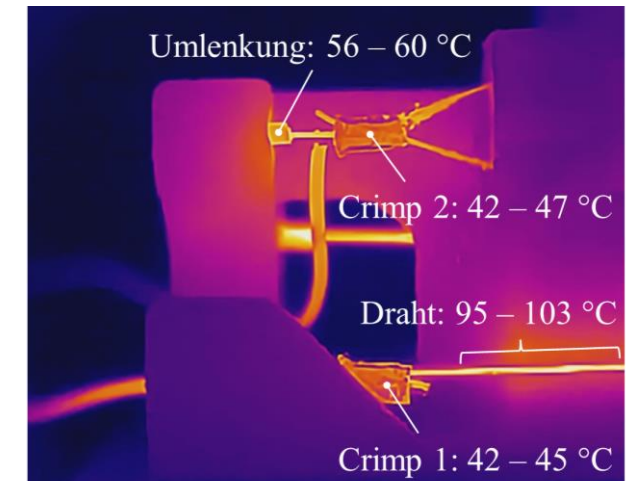
Messaufbau zur Lebensdaueruntersuchung der Substitutions-Aktorbaugruppe



Vergleich der Reibpartner PTFE und Nylon 12 mit FGL-Drahtaktoren bezüglich der Kontraktion über die gesamte Lebensdauer der Aktorbaugruppe



Mechanische-/elektrische Anschlussstellen und eine Umlenkstelle



Thermografieaufnahme des gezeigten Bereichs und relevante Temperaturen

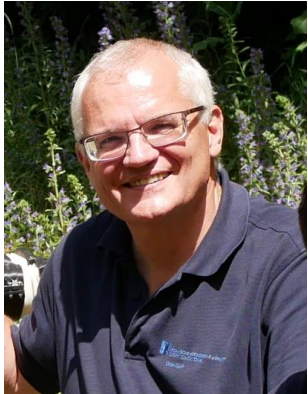
# Vielen Dank für die Aufmerksamkeit



Robin Löffler, M.Sc.



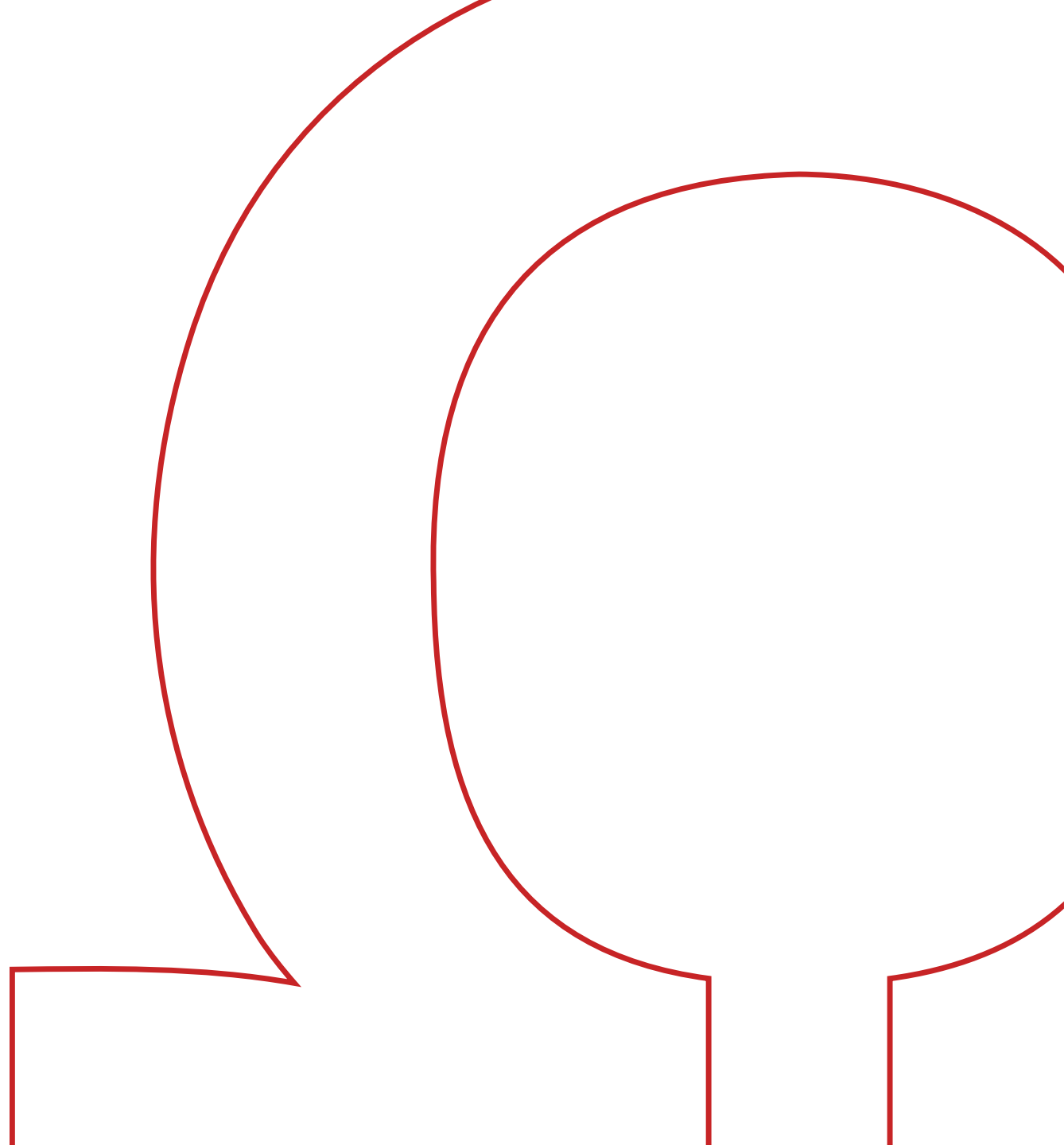
[robin.loeffler@th-nuernberg.de](mailto:robin.loeffler@th-nuernberg.de)



Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck



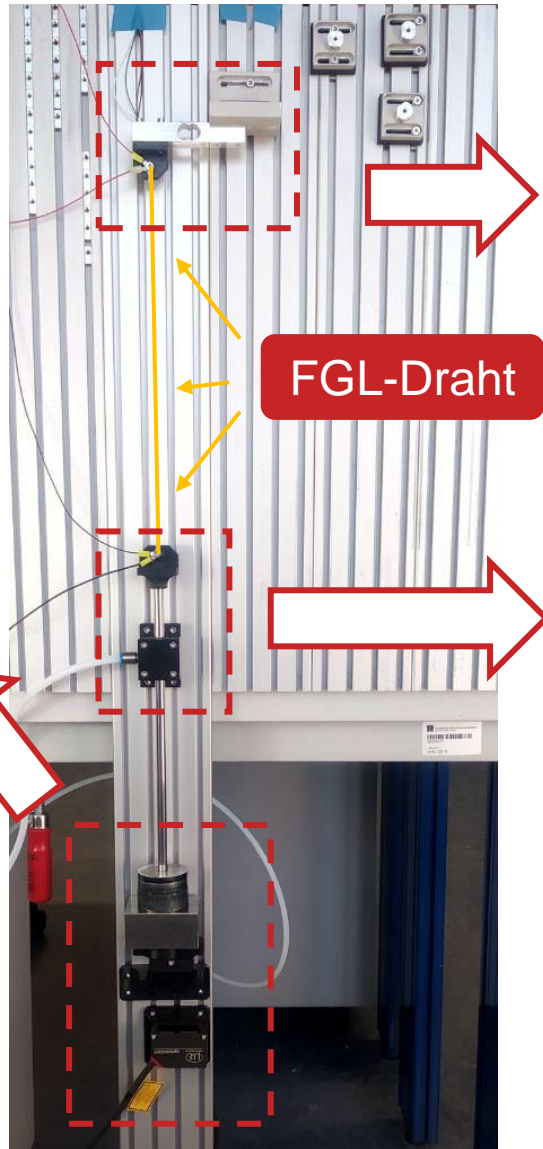
[ruediger.hornfeck@th-nuernberg.de](mailto:ruediger.hornfeck@th-nuernberg.de)



# Zusatzfolien



# Erfassung der Einflussgrößen (Prüfstand)



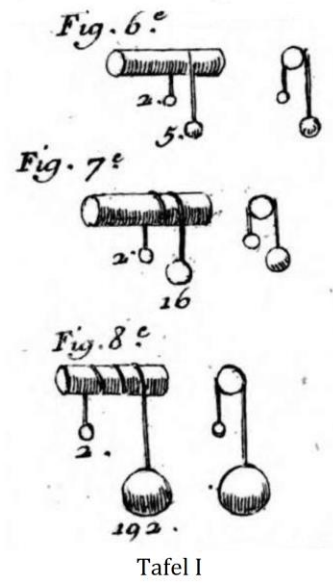
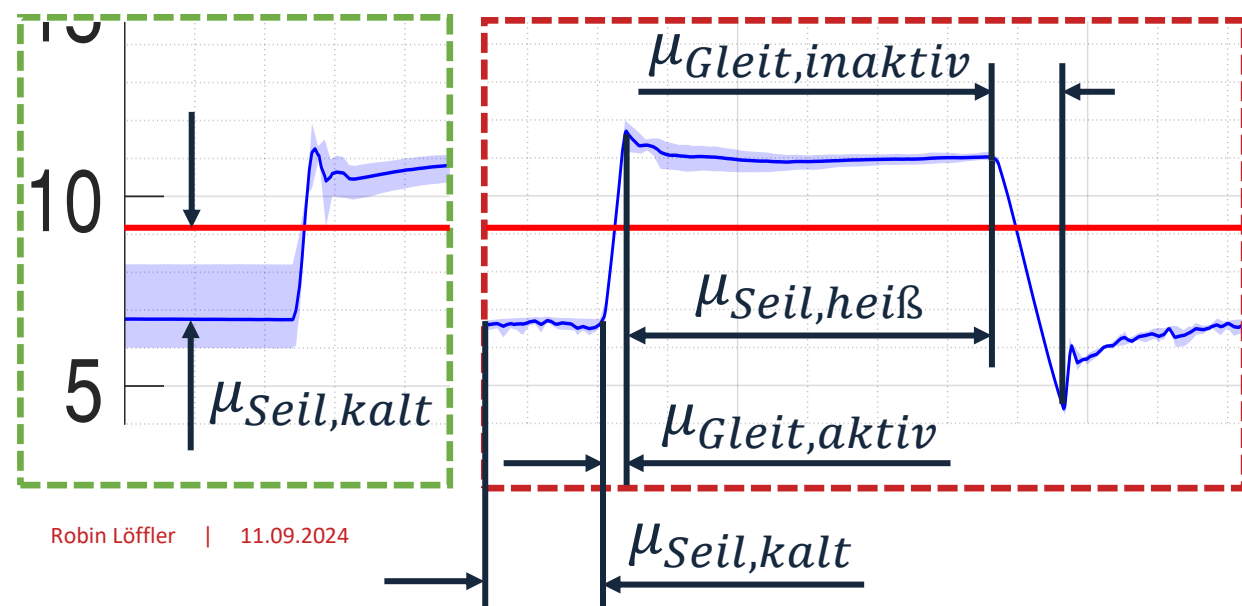
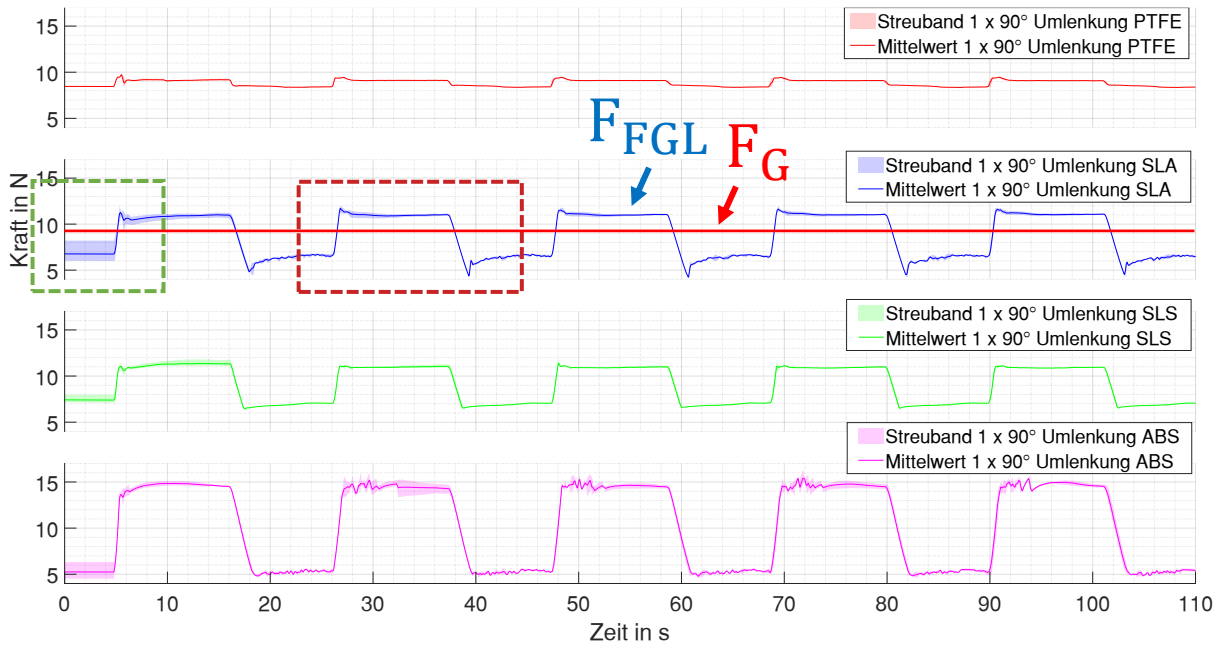
## Messbare Einflussgrößen

- Reibungsbehaftete Kraft
- Gesamthub bzw. Kontraktion
- Temperatur Umlenkstellen
- Temperatur FGL-Draht (qualitativ)
- Temperatur Umgebung

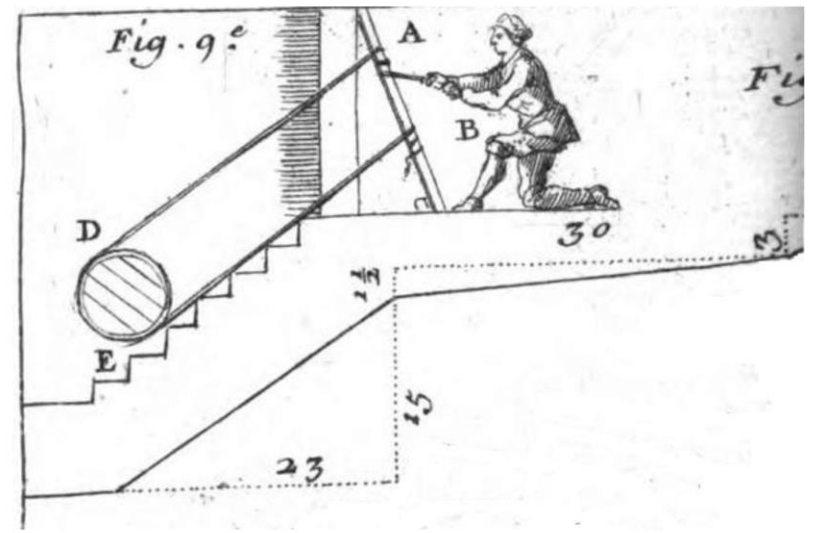




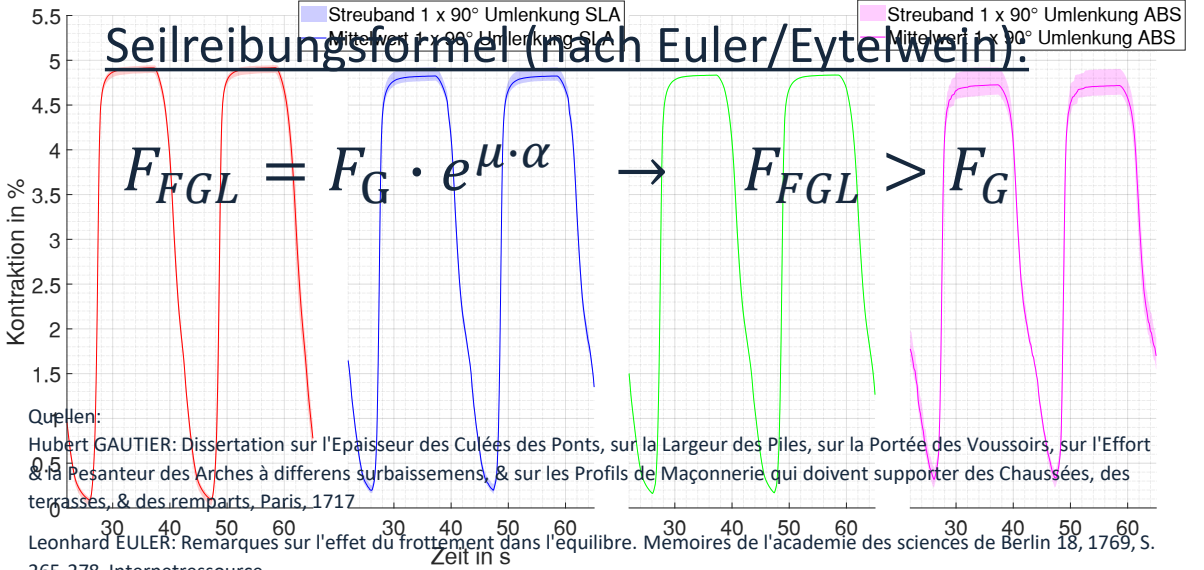
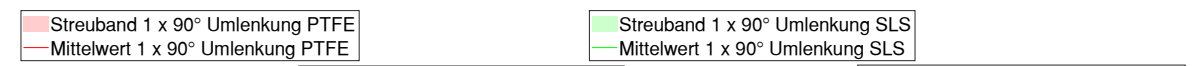




Tafel I



Tafel III

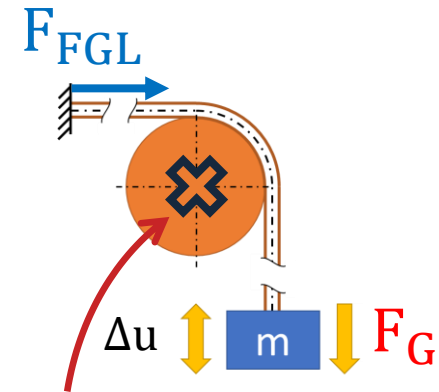
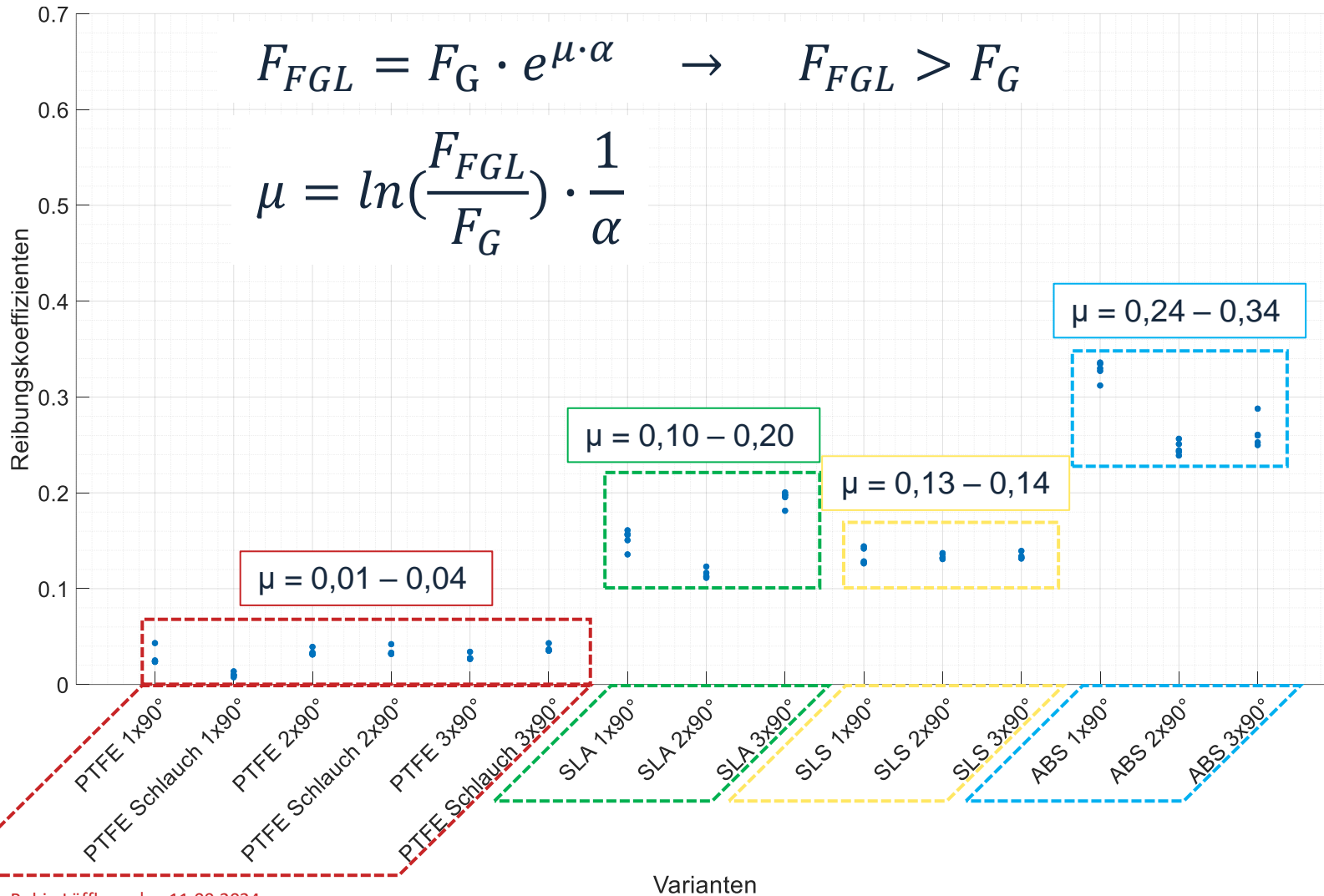


Quellen:  
 Hubert GAUTIER: Dissertation sur l'Épaisseur des Culées des Ponts, sur la Largeur des Piles, sur la Portée des Voussoirs, sur l'Effort & le Pesanteur des Arches à differens surbaissemens, & sur les Profils de Maçonnerie qui doivent supporter des Chaussées, des tergasses, & des remparts, Paris, 1717  
 Leonhard EULER: Remarques sur l'effet du frottement dans l'équilibre. Memoires de l'academie des sciences de Berlin 18, 1769, S. 265-278, Internetressource  
 Johann Albert EYTELWEIN: Handbuch der Statik fester Körper. Mit vorzüglicher Rücksicht auf ihre Anwendung in der Architektur. Band 2, In der Realschulbuchhandlung, Berlin, 1808, S.21-23

Seilreibungsformel (nach Euler/Eytelwein):

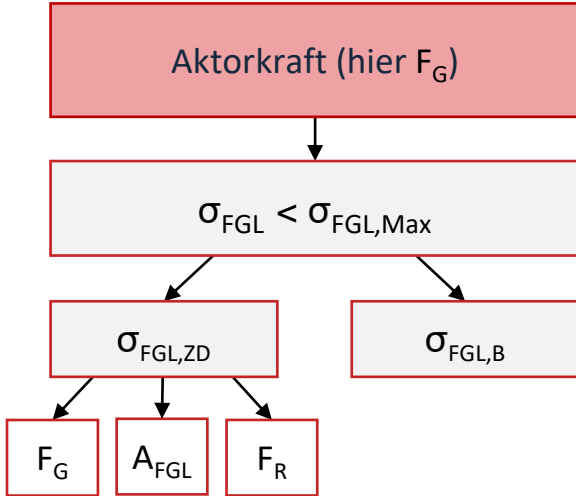
$$F_{FGL} = F_G \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \quad \rightarrow \quad F_{FGL} > F_G$$

$$\mu = \ln\left(\frac{F_{FGL}}{F_G}\right) \cdot \frac{1}{\alpha}$$



Fixierte Umlenkstelle/n

### Relevante Berechnungsgrößen (Nutzer):



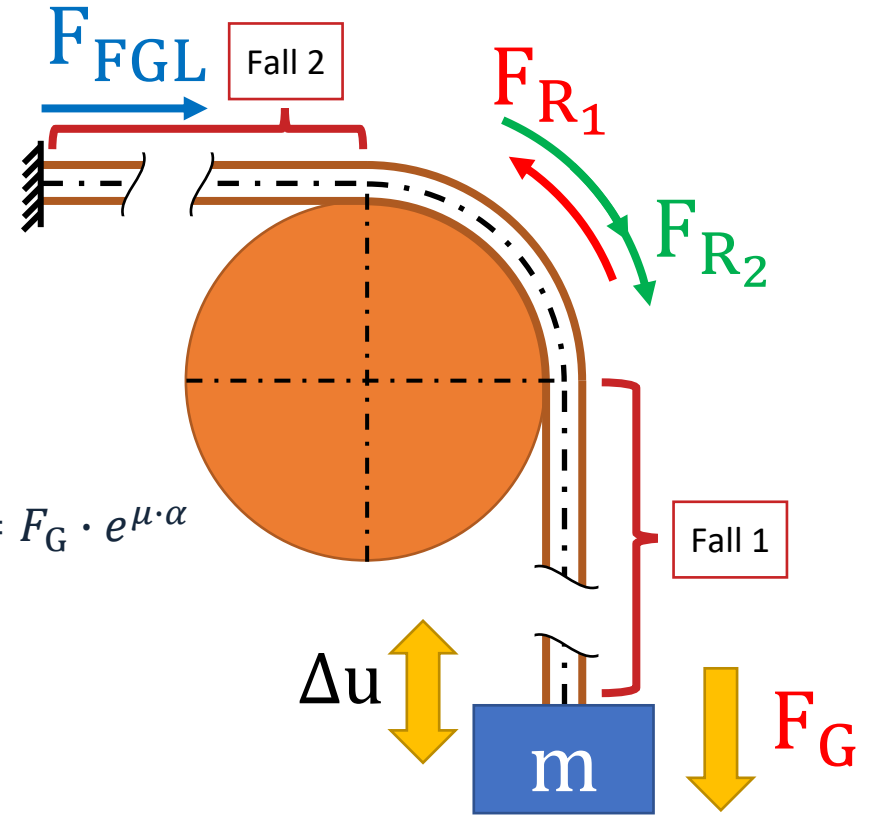
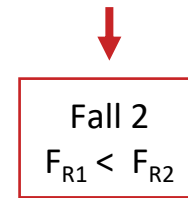
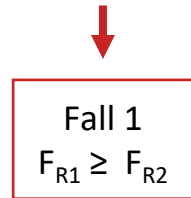
$$\sigma_{FGL} = \sigma_{FGL,ZD} + \sigma_{FGL,B}$$

$$\sigma_{FGL,ZD} = \frac{F_G}{A_{FGL}} \quad \text{oder}$$

$$\sigma_{FGL,ZD} = \frac{F_G + F_R}{A_{FGL}}$$

$$F_{FGL} = F_G$$

$$F_{FGL} = F_G + F_R = F_G \cdot e^{\mu \cdot \alpha}$$

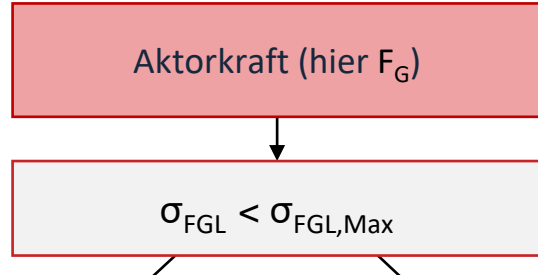


Zugspannungen in Abhängigkeit von  $\alpha$  und  $\mu$  bei  $F_G = 9,09 \text{ N}$

Umschlingungs- winkel	$\sigma_{FGL,ZD}$ ( $\mu = 0,05$ )	$\sigma_{FGL,ZD}$ ( $\mu = 0,15$ )	$\sigma_{FGL,ZD}$ ( $\mu = 0,30$ )
$\alpha = 90^\circ (\frac{\pi}{2})$	200,26 N/mm <sup>2</sup>	234,48 N/mm <sup>2</sup>	296,61 N/mm <sup>2</sup>
$\alpha = 180^\circ (\pi)$	216,76 N/mm <sup>2</sup>	296,61 N/mm <sup>2</sup>	475,27 N/mm <sup>2</sup>
$\alpha = 270^\circ (\frac{3\pi}{2})$	234,48 N/mm <sup>2</sup>	375,45 N/mm <sup>2</sup>	761,30 N/mm <sup>2</sup>

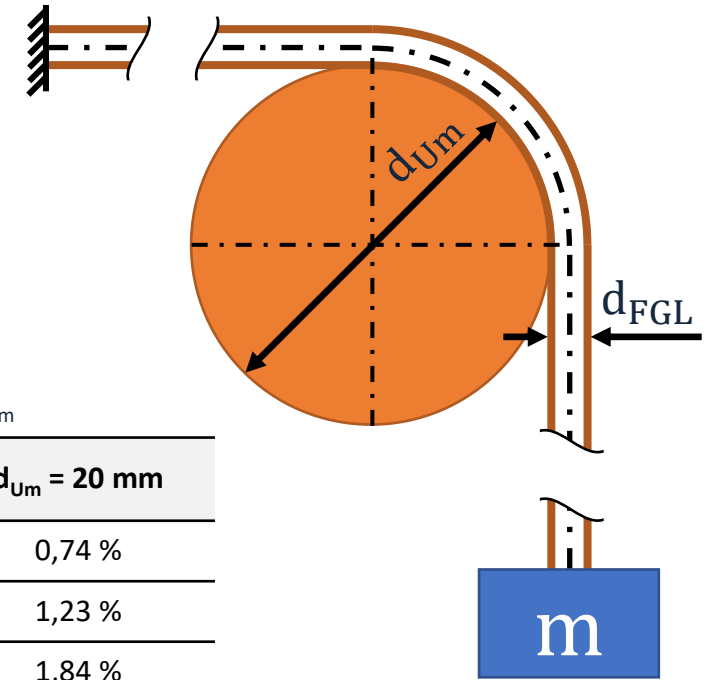


### Relevante Berechnungsgrößen (Nutzer):



$$\sigma_{FGL,B} = E_{Martensit/Austenit} * \epsilon_B$$

$$\epsilon_B = \frac{\frac{d_{FGL}}{2}}{\frac{d_{Um}}{2} + \frac{d_{FGL}}{2}}$$



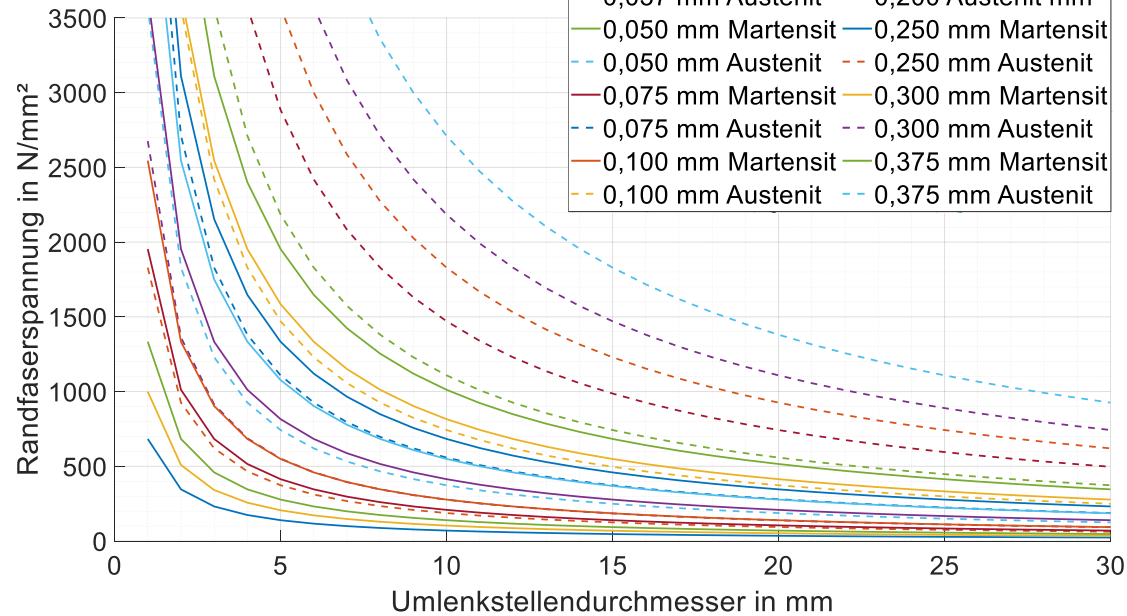
Randfaserdehnung in Abhängigkeit von  $d_{FGL}$  und  $d_{Um}$

	$d_{Um} = 10 \text{ mm}$	$d_{Um} = 20 \text{ mm}$
$d_{FGL} = 0,15 \text{ mm}$	1,48 %	0,74 %
$d_{FGL} = 0,25 \text{ mm}$	2,44 %	1,23 %
$d_{FGL} = 0,375 \text{ mm}$	3,61 %	1,84 %

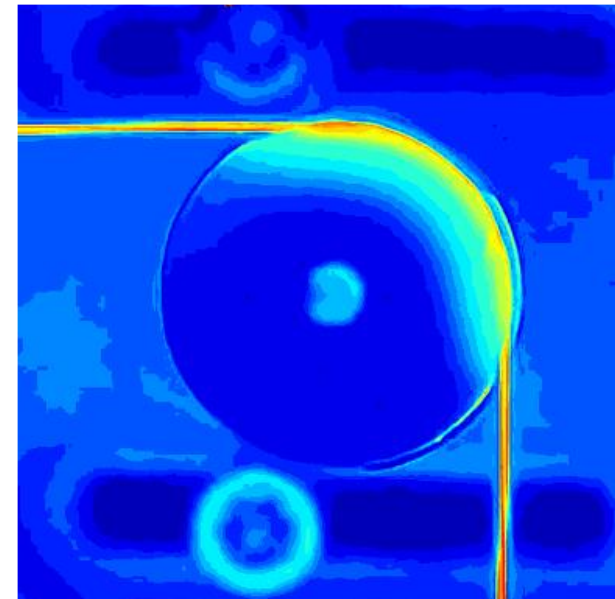
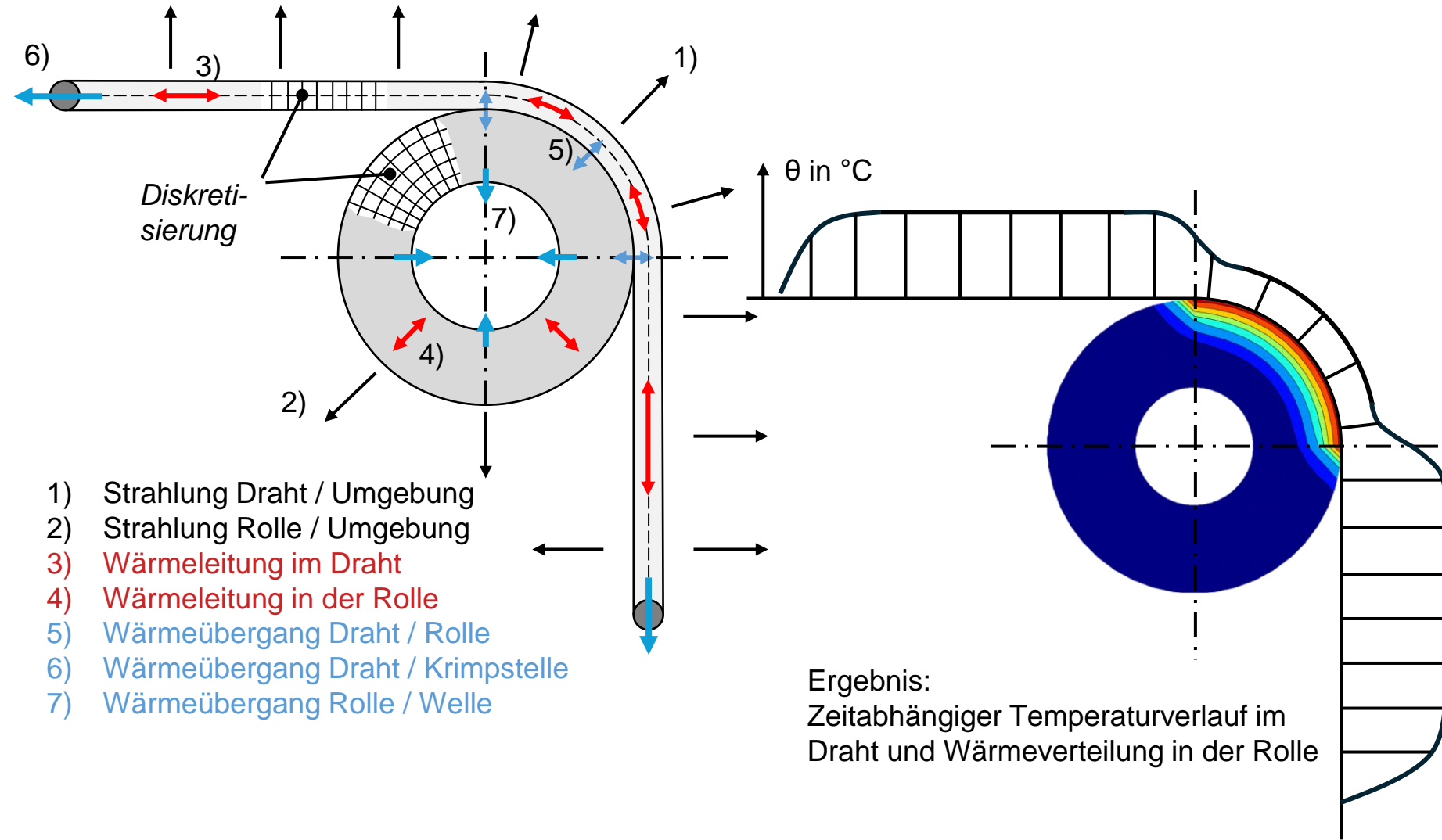
Randfaserspannung in Abhängigkeit von  $d_{FGL}$ ,  $d_{Um}$  und E

		Randfaserspannung $E_{Martensit} = 28.000 \text{ N/mm}^2$	Randfaserspannung $E_{Austenit} = 75.000 \text{ N/mm}^2$
$d_{FGL} = 0,15 \text{ mm}$	$d_{Um} = 10 \text{ mm}$	413,79 N/mm <sup>2</sup>	1108,37 N/mm <sup>2</sup>
$d_{FGL} = 0,25 \text{ mm}$	$d_{Um} = 10 \text{ mm}$	682,93 N/mm <sup>2</sup>	1829,27 N/mm <sup>2</sup>
$d_{FGL} = 0,375 \text{ mm}$	$d_{Um} = 10 \text{ mm}$	1012,05 N/mm <sup>2</sup>	2710,84 N/mm <sup>2</sup>
$d_{FGL} = 0,15 \text{ mm}$	$d_{Um} = 20 \text{ mm}$	208,44 N/mm <sup>2</sup>	558,31 N/mm <sup>2</sup>
$d_{FGL} = 0,25 \text{ mm}$	$d_{Um} = 20 \text{ mm}$	345,68 N/mm <sup>2</sup>	925,93 N/mm <sup>2</sup>
$d_{FGL} = 0,375 \text{ mm}$	$d_{Um} = 20 \text{ mm}$	515,34 N/mm <sup>2</sup>	1380,37 N/mm <sup>2</sup>

- 0,025 mm Martensit — 0,150 mm Martensit
- - 0,025 mm Austenit - - 0,150 mm Austenit
- 0,037 mm Martensit — 0,200 mm Martensit
- - 0,037 mm Austenit - - 0,200 mm Austenit
- 0,050 mm Martensit — 0,250 mm Martensit
- - 0,050 mm Austenit - - 0,250 mm Austenit
- 0,075 mm Martensit — 0,300 mm Martensit
- - 0,075 mm Austenit - - 0,300 mm Austenit
- 0,100 mm Martensit — 0,375 mm Martensit
- - 0,100 mm Austenit - - 0,375 mm Austenit







# Datenblatt Smarter Laser-Triangulations-Wegsensor MICRO-EPSILON optoNCDT 1420

Modell	ILD1420-10	ILD1420-25	ILD1420-50	ILD1420-100	ILD1420-200	ILD1420-500
Messbereich	10 mm	25 mm	50 mm	100 mm	200 mm	500 mm
Messbereichsanfang	20 mm	25 mm	35 mm	50 mm	60 mm	100 mm
Messbereichsmitte	25 mm	37,5 mm	60 mm	100 mm	160 mm	350 mm
Messbereichsende	30 mm	50 mm	85 mm	150 mm	260 mm	600 mm
Messrate <sup>1)</sup>	5-stufig einstellbar: 4 kHz / 2 kHz / 1 kHz / 0,5 kHz / 0,25 kHz					
Linearität	< ±8 µm	< ±20 µm	< ±40 µm	< ±80 µm	< ±160 µm	< ±500 ... ±1000 µm
Reproduzierbarkeit <sup>2)</sup>	0,5 µm	1 µm	2 µm	4 µm	8 µm	20 ... 40 µm
Temperaturstabilität <sup>3)</sup>	±0,015 % d.M. / K			±0,01 % d.M. / K		
Lichtpunktdurchmesser (±10 %)	MBA	90 x 120 µm	100 x 140 µm	90 x 120 µm	750 x 1100 µm	750 x 1100 µm
	MBM	45 x 40 µm	120 x 130 µm	230 x 240 µm	-	-
	MBE	140 x 160 µm	390 x 500 µm	630 x 820 µm	-	-
	kleinster Durchmesser	45 x 40 µm bei 24 mm	55 x 50 µm bei 31 mm	70 x 65 µm bei 42 mm	-	-
Lichtquelle	Halbleiterlaser < 1 mW, 670 nm (rot)					
Laserklasse	Klasse 2 nach DIN-EN 60825-1: 2015-07 <sup>4)</sup>					
Zulässiges Fremdlicht <sup>5)</sup>	50.000 lx		30.000 lx		10.000 lx	
Versorgungsspannung	11 ... 30 VDC					
Leistungsaufnahme	< 2 W (24 V)					
Signaleingang	1 x HTL Laser on/off; 1 x HTL Multifunktionseingang: Trigger in, Nullsetzen, Mastern, Teachen					

Signaleingang	1 x HTL Laser on/off; 1 x HTL Multifunktionseingang: Trigger in, Nullsetzen, Mastern, Teachen	
Digitale Schnittstelle	RS422 (16 bit) / PROFINET <sup>8)</sup> / EtherNet/IP <sup>8)</sup>	
Analogausgang	4 ... 20 mA / 1 ... 5 V mit Kabel PCF1420-3/U (16 bit; frei skalierbar innerhalb des Messbereichs) <sup>7)</sup>	
Schaltausgang	1 x Fehlerausgang: npn, pnp, push pull	
Anschluss	integriertes Kabel 3 m, offene Enden, min. Biegeradius feste Verlegung 30 mm oder integriertes Pigtail 0,3 m mit 12-pol. M12 Stecker (passende Anschlusskabel siehe Zubehör)	
Montage	Verschraubung über zwei Befestigungsbohrungen	
Temperaturbereich	Lagerung	-20 ... +70 °C (nicht kondensierend)
	Betrieb	0 ... +50 °C (nicht kondensierend)
Schock (DIN EN 60068-2-27)	15 g / 6 ms in 3 Achsen, je 1000 Schocks	
Vibration (DIN EN 60068-2-6)	20 g / 20 ... 500 Hz in 3 Achsen, je 2 Richtungen und je 10 Zyklen	
Schutzart (DIN EN 60529)	IP65	
Material	Aluminiumgehäuse	
Gewicht	ca. 60 g (inkl. Pigtail), ca. 145 g (inkl. Kabel)	
Bedien- und Anzeigeelemente	Select Taste: Zero, Teachen, Werkseinstellung; Webinterface für Setup <sup>8)</sup> : Auswählbare Presets, Peakauswahl, Videosignal, frei wählbare Mittelung, Datenreduktion, Setupverwaltung; 2 x Farb-LED für Power / Status	

d.M. = des Messbereichs

MBA = Messbereichsanfang, MBM = Messbereichsmitte, MBE = Messbereichsende

Angaben gültig für weiße, diffus reflektierende Oberflächen (Micro-Epsilon Referenz-Keramik für LD-Sensoren)

<sup>1)</sup> Werkseinstellung 2 kHz, Ändern der Werkseinstellung erfordert IF2001/USB Konverter (siehe Zubehör)

<sup>2)</sup> Messrate 2 kHz, Median 9

<sup>3)</sup> Der spezifizierte Wert wird nur durch Montage auf eine metallische Sensorhalterung erreicht. Ein guter Wärmeabfluss vom Sensor zur Halterung muss gewährleistet sein.

<sup>4)</sup> Auf Anfrage auch mit Laserklasse 1 (≤ 0,39 mW) erhältlich

<sup>5)</sup> Lichtart: Glühlampe

<sup>6)</sup> Anbindung über Schnittstellenmodul (siehe Zubehör)

<sup>7)</sup> Bei Modellen mit Laserklasse 1 erfolgt die D/A-Wandlung mit 12 bit

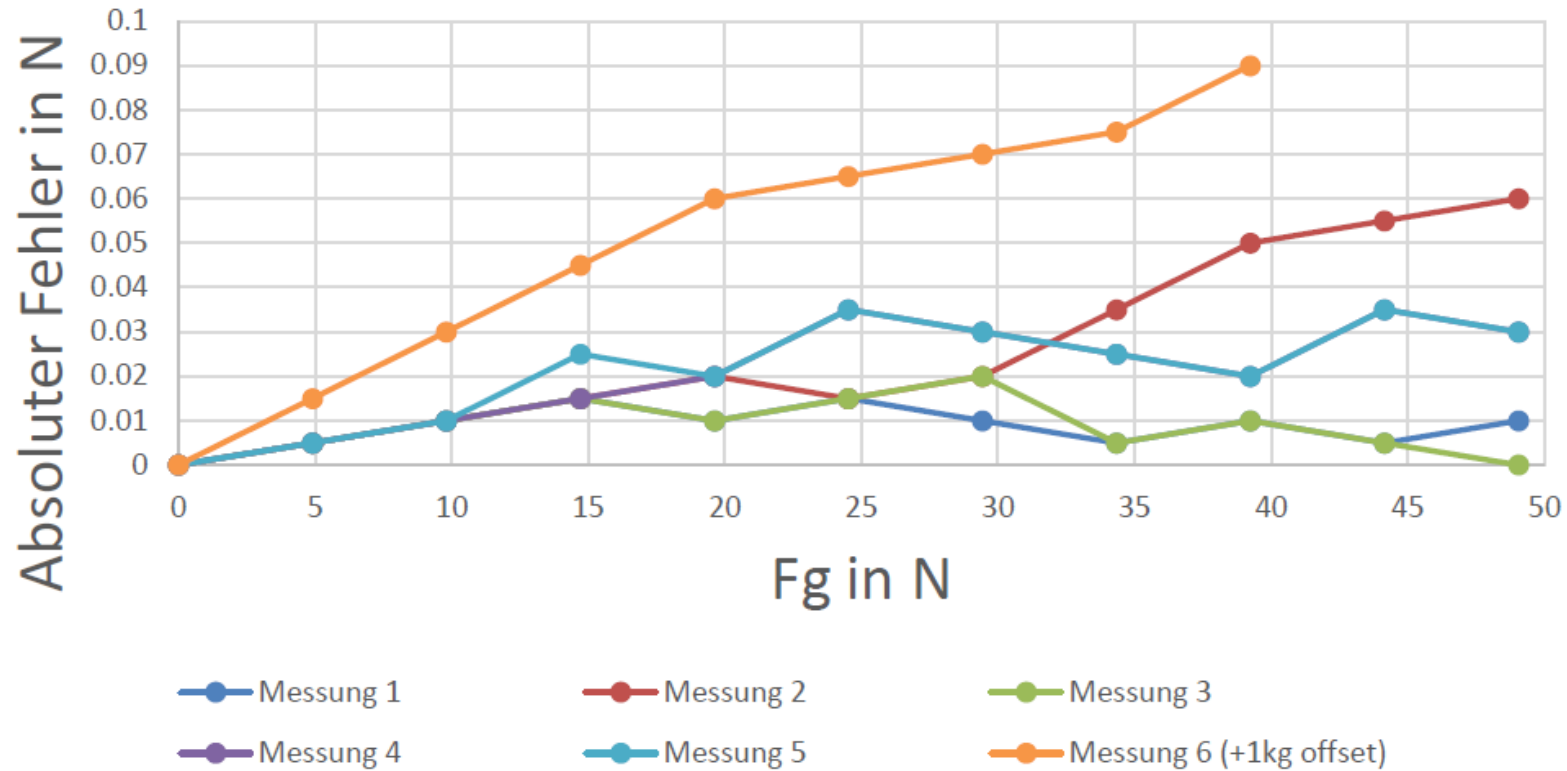
<sup>8)</sup> Anschluss an PC über IF2001/USB (siehe Zubehör)



# Datenblatt Wägezelle Sauter CK 6-0P1

Maximum capacity ( Emax )	kg	0.6	1	2, 3, 5, 6
Output sensitivity ( = FS )	mV/V	1.0±0.15	1.5±0.15	1.2±0.15
Combined Error	of FS	0.03%		
Temperature effect on zero	%FS/10°C	±1.0	±1.0	±0.3
Temperature effect on Sensitivity	%FS/10°C	±0.03		
Minimum dead load	of Emax	0%		
Safe overload	of Emax	150 %		
Ultimate overload	of Emax	300%		
Zero output	mV/V	± 0.1		
Excitation, recommended voltage	V	5 ~ 9		
Excitation maximum	V	10		
Input resistance	Ω	1055 ± 10		
Output resistance	Ω	1000 ± 10		
Insulation resistance	MΩ	≥2000 ( at 50VDC )		
Compensated temperature	°C	-10 ~+40		
Operating temperature	°C	-10 ~ +40		
Storage temperature	°C	-20 ~ +65		
Element material		Aluminum		
Creep	%FS/5	±0.03		
Non-linearity	%FS	±0.03		
Repeatability	%FS	±0.03		
Hysteresis	%FS	±0.03		

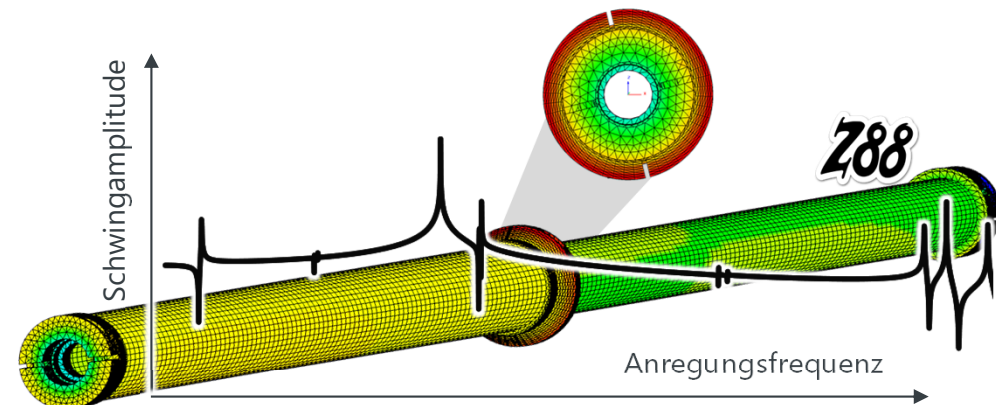
## Messreihe Kraftsensor



# Modal- und Frequenzganganalyse interagierender Bauteilkomponenten am Beispiel einer Elastomer-Gelenkwelle und eines Industriegetriebes

Johannes Wittmann, Florian Hüter

25. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag  
Bayreuth, 11.09.2024



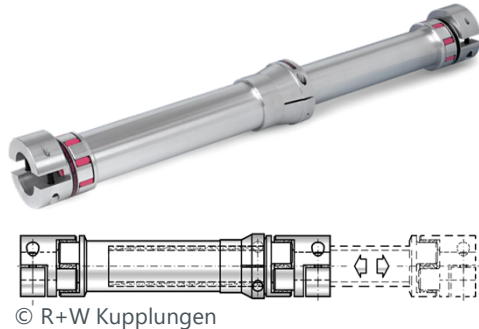
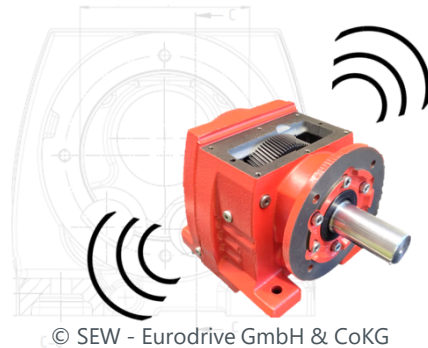


# Motivation

## Auslegung von Antriebstechnik-Komponenten

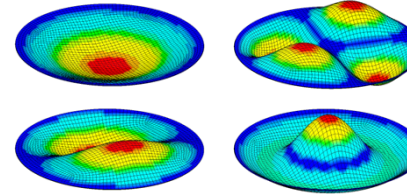
### Maschinendynamik

- Vibroakustik
- Ressourceneffizienz
- Versagenssicherheit

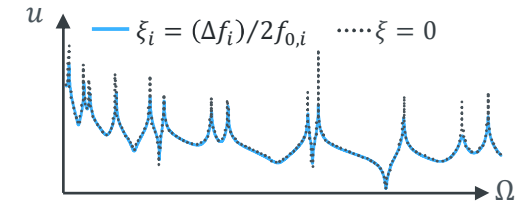


### Numerische Schwingungsanalyse

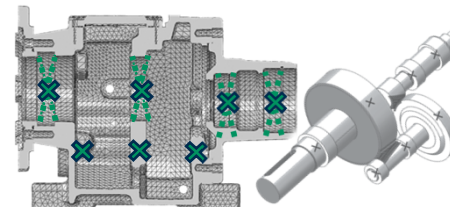
#### Eigenschwingungen



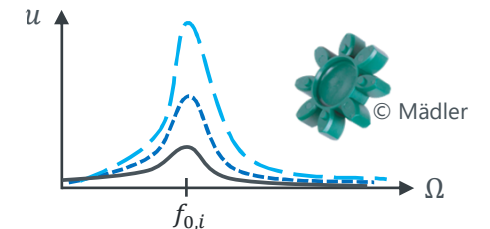
#### Amplitudengang



#### Umfeldebefluss



#### Dämpfung

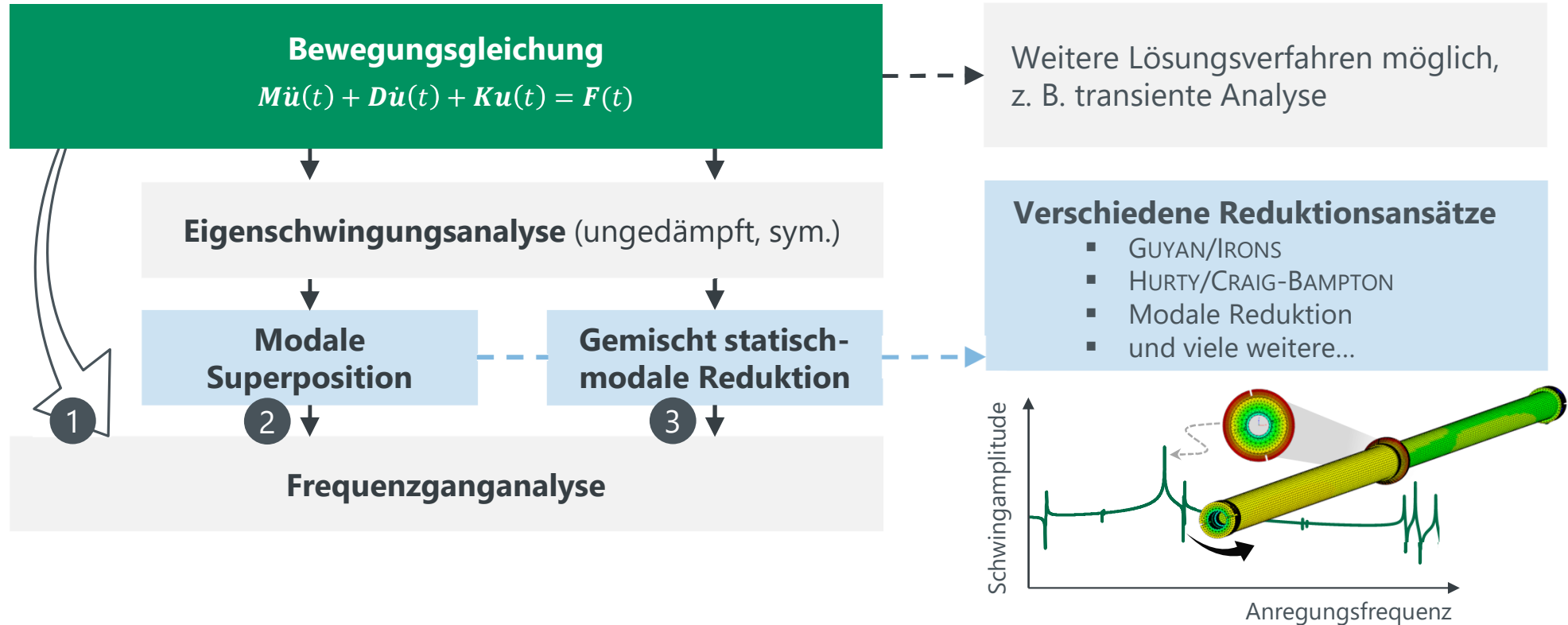


→ **Strukturdynamische FE-Strategien zur Effizienzsteigerung in der antriebstechnischen Auslegung**



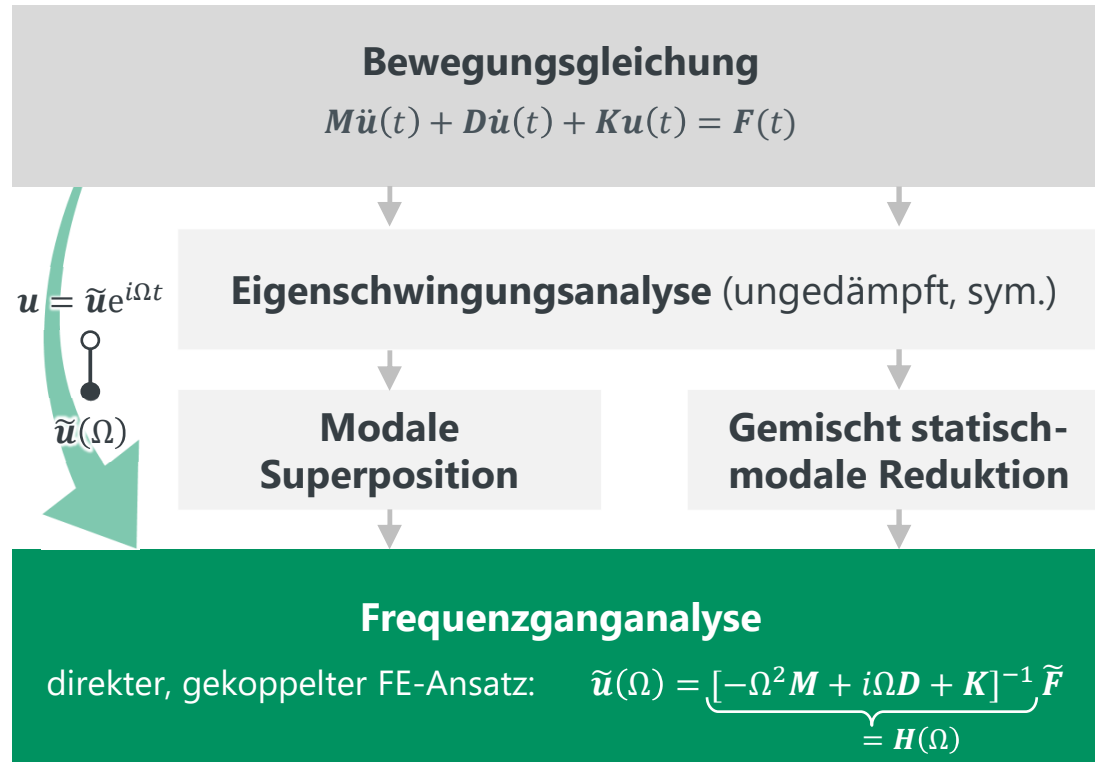
# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Überblick der untersuchten Methoden




# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

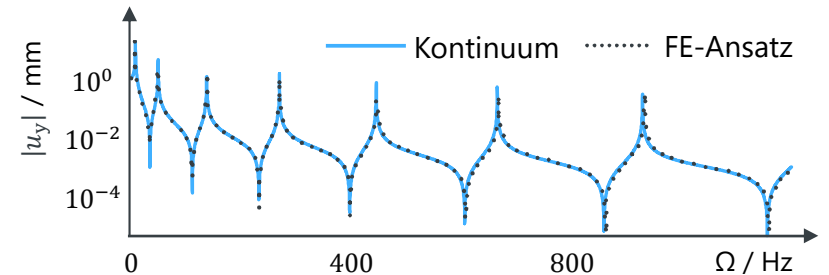
## Frequenzganganalyse: direkter FE-Ansatz



### Harmonische Anregung



$$\tilde{u}(\Omega) = \frac{4F_0L^3}{EI_y} \sum_{v=1}^{\infty} \frac{1}{(\kappa_v L)^4} \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{\Omega}{\omega_v}\right)^2}$$



→ **Übereinstimmung FEA vs. Analytik**

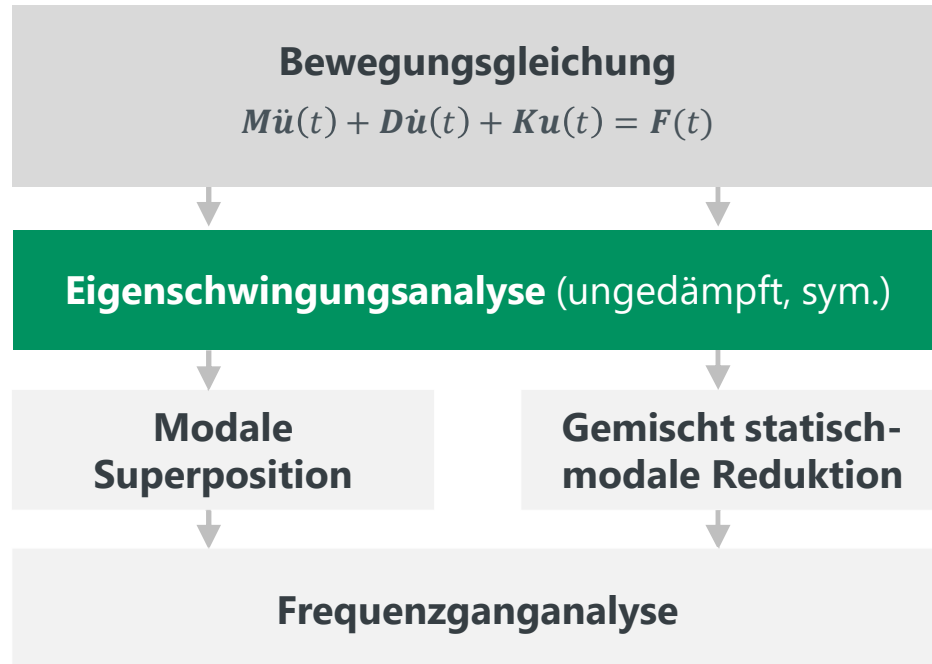


unpraktikable Speicher- / Rechenanforderungen



# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Eigenschwingungsanalyse des Kontinuums



### Eigenwertproblem

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0 \quad \text{symmetrisch, ungedämpft}$$

### Eigenwerte, Eigenfrequenzen und Eigenmoden

$$\Lambda_j = \omega_j^2, \quad f_j = \omega_j / 2\pi, \quad \Phi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$$

### Lösungsalgorithmen in der FEA

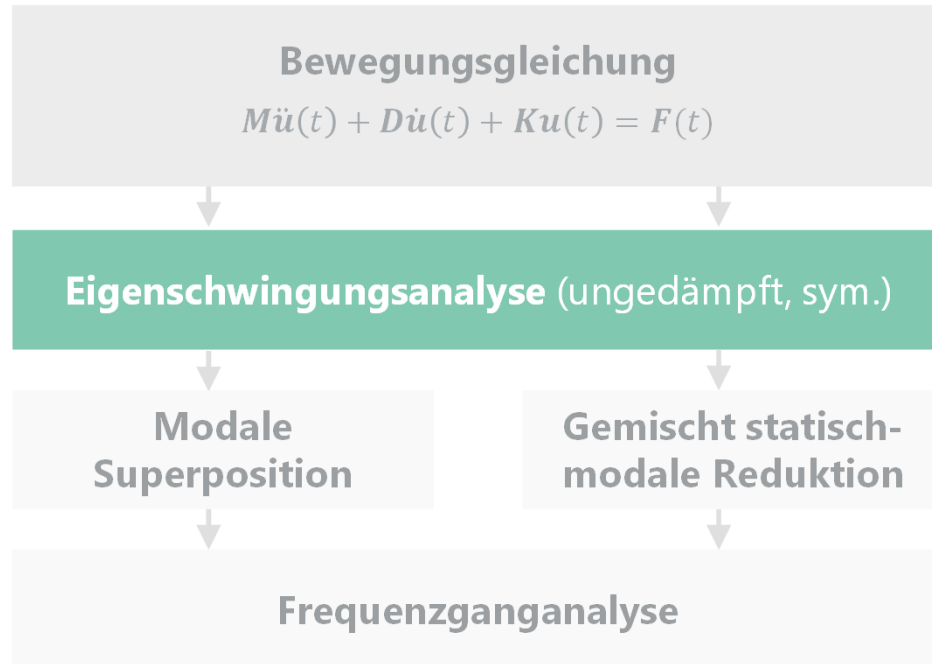
- LANCZOS und STURM 
- LEHOUCQ ET AL.: *Implicitly Restarted ARNOLDI Method*

$$(K - \sigma_S M)^{-1} M \Phi = \nu_S \Phi \quad \text{mit} \quad \nu_S = \frac{1}{\lambda - \sigma_S}$$



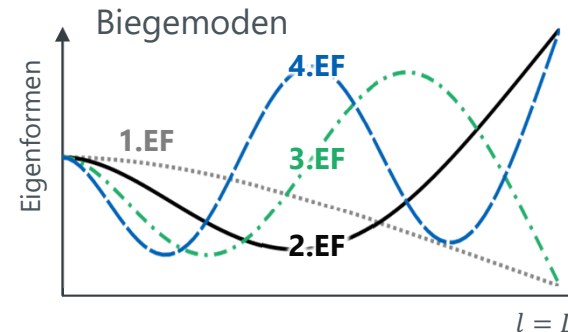
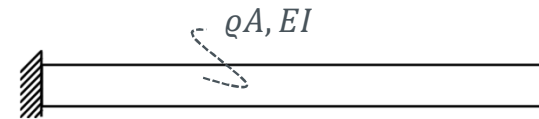
# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Eigenschwingungsanalyse des Kontinuums



### Validierungsbeispiel: Biegeschwingung

#### Analytische Lösung: EULER-BERNOULLI-Balken



$$1 + \cos(\kappa L) \cosh(\kappa L) = 0$$

$$\omega_v = \kappa_v^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

$$f_1 = 7,8 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 49,1 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 137,5 \text{ Hz}$$

$$f_4 = 269,4 \text{ Hz}$$

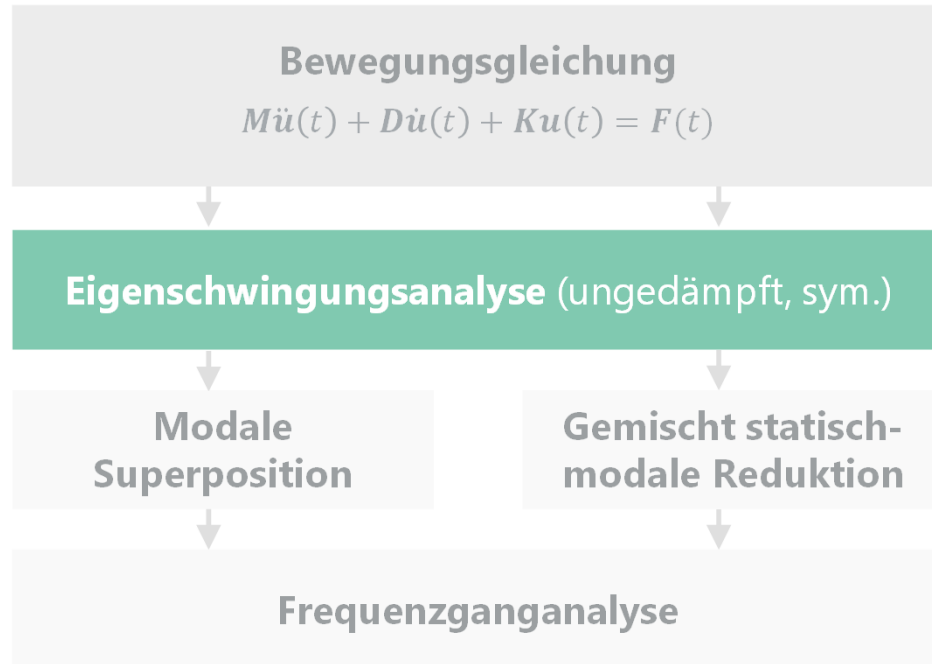
$$f_v = \dots$$





# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Eigenschwingungsanalyse - Experimentell

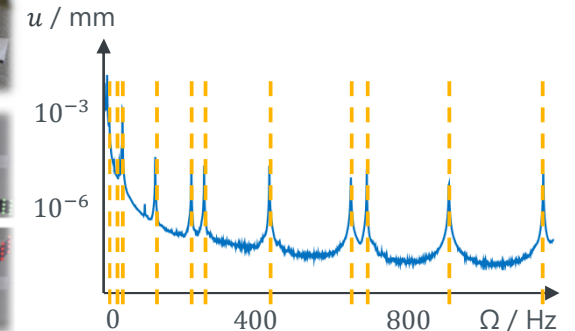
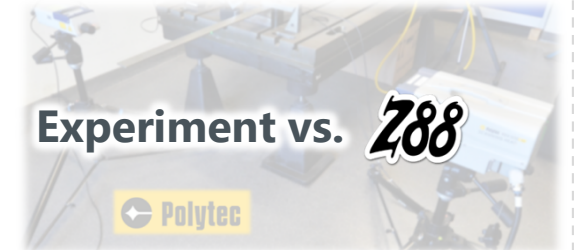
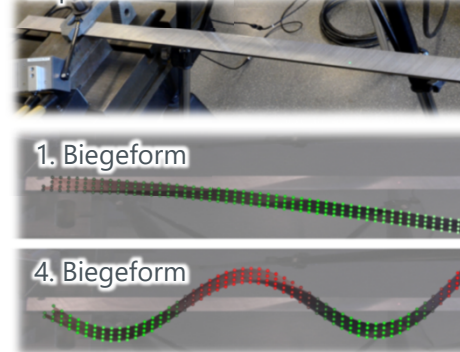


### Validierungsbeispiel: Biegeschwingung

#### Amplitudengang Flachstahl

- 90MnCrV8
- 800 × 50 × 6 mm

Impulshammer

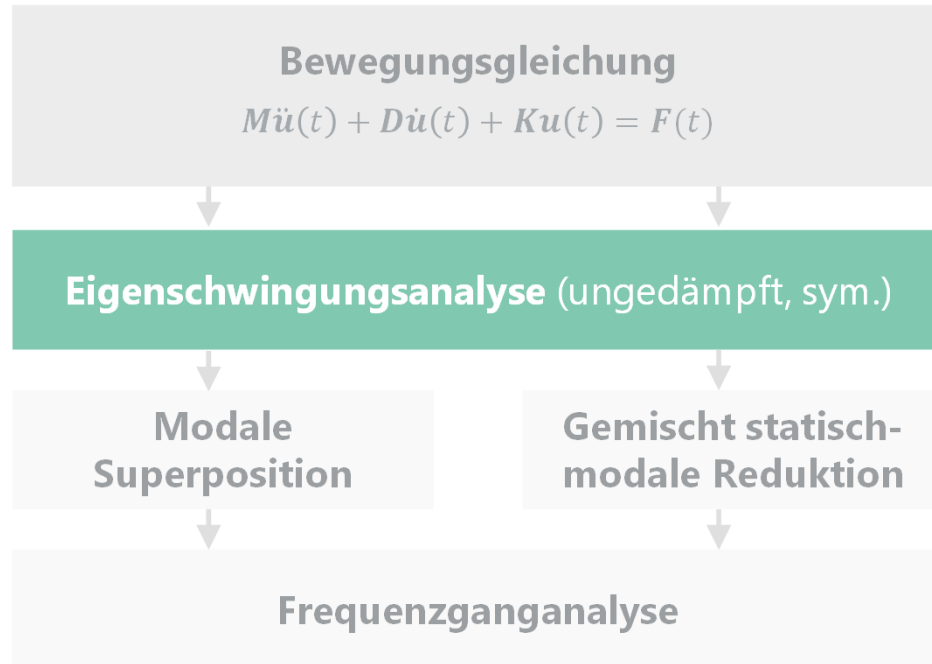


→ Gute Übereinstimmung der Eigenfrequenzen aus FEA und experimenteller Messung



# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Eigenschwingungsanalyse - Experimentell

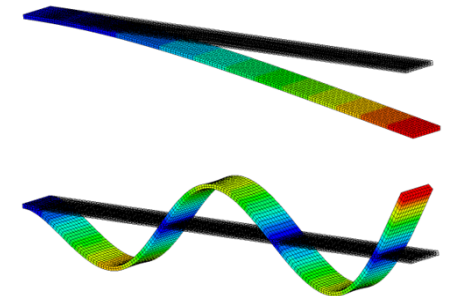
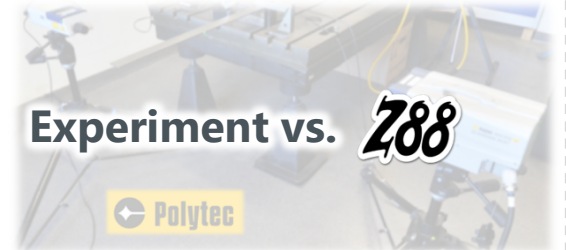
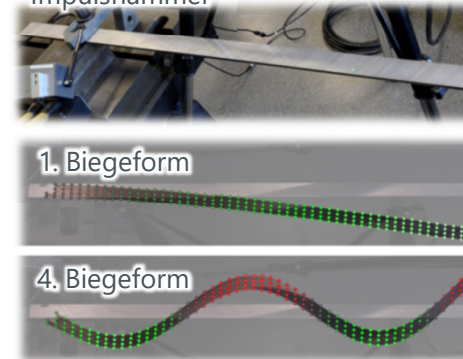


### Validierungsbeispiel: Biegeschwingung

#### Amplitudengang Flachstahl

- 90MnCrV8
- 800 × 50 × 6 mm

Impulshammer

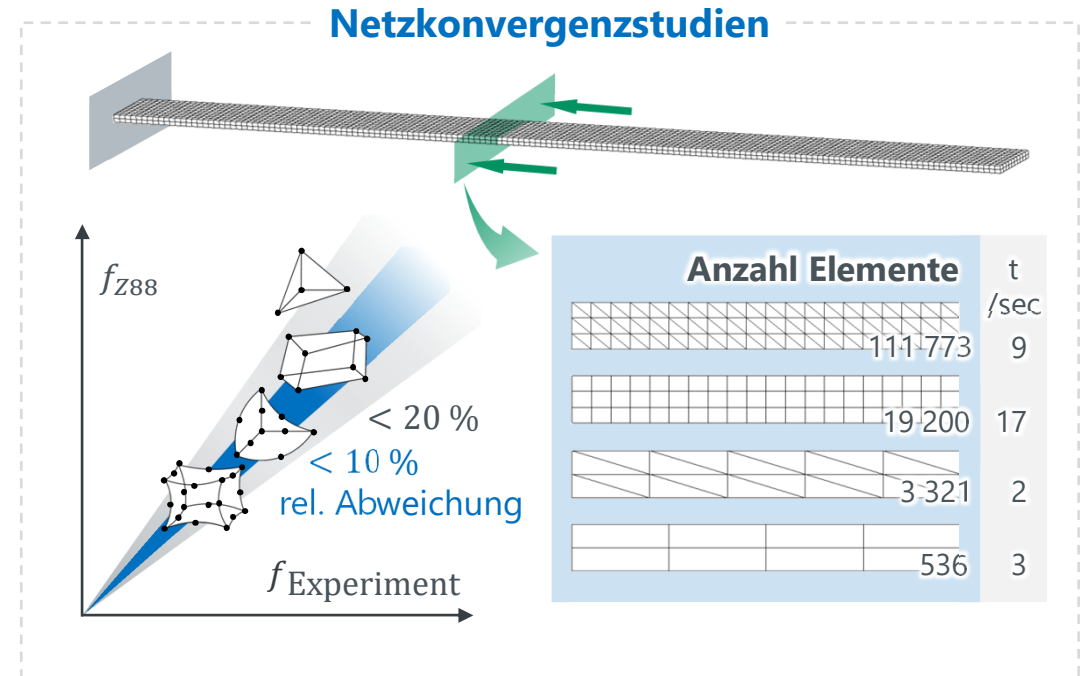
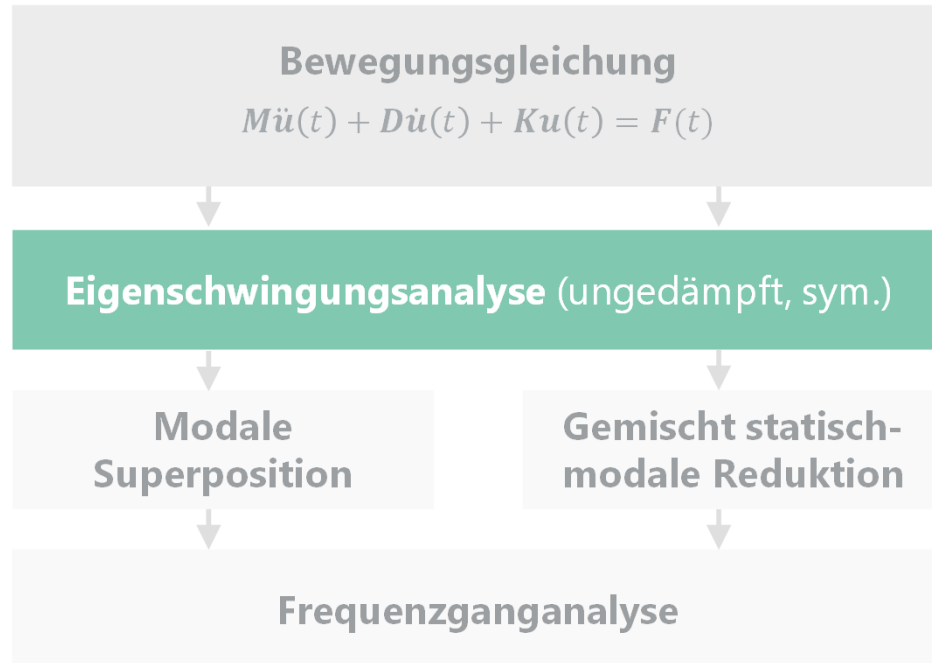


→ **Gute Übereinstimmung der Eigenschwingformen aus FEA und experimenteller Messung**



# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Eigenschwingungsanalyse - Netzeinfluss



→ **Empfehlung: quadratischer Elementansatz führt zu kleinen Abweichungen bei kleiner Anzahl an finiten Elementen**

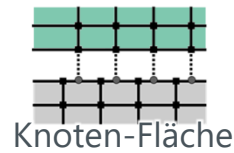


### Verklebter Kontakt

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0 \quad \text{symmetrisch, ungedämpft}$$

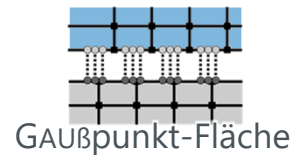
- LAGRANGE-Ansatz mit Störparameter

$$\left( \begin{bmatrix} K & G^T \\ G & -1/\beta I \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \Phi = 0$$



- Penalty-Methode

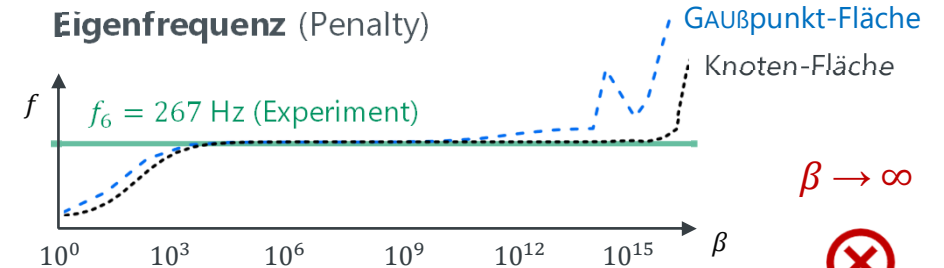
$$((K + \beta G^T G) - \omega^2 M)\Phi = 0$$



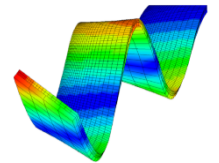
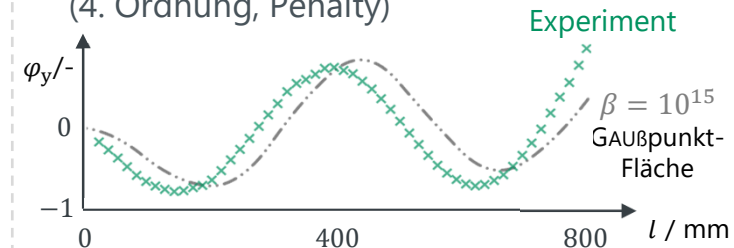
**Betriebspunkt-Linearisierung:** Kontaktzustand ändert sich in der Eigenschwingungsanalyse nicht

### Einfluss Kontaktsteifigkeit

Eigenfrequenz (Penalty)



Biegeschwingung  
(4. Ordnung, Penalty)

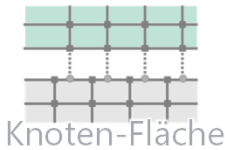


### Verklebter Kontakt

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0 \quad \text{symmetrisch, ungedämpft}$$

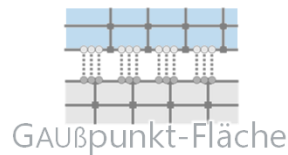
- LAGRANGE-Ansatz mit Störparameter

$$\left( \begin{bmatrix} K & G^T \\ G & -1/\beta I \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right) \Phi = 0$$



- Penalty-Methode

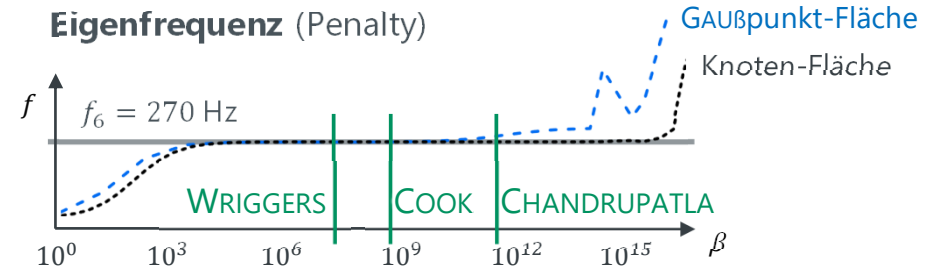
$$((K + \beta G^T G) - \omega^2 M)\Phi = 0$$



**Betriebspunkt-Linearisierung:** Kontaktzustand ändert sich in der Eigenschwingungsanalyse nicht

### Einfluss Kontaktsteifigkeit

Eigenfrequenz (Penalty)

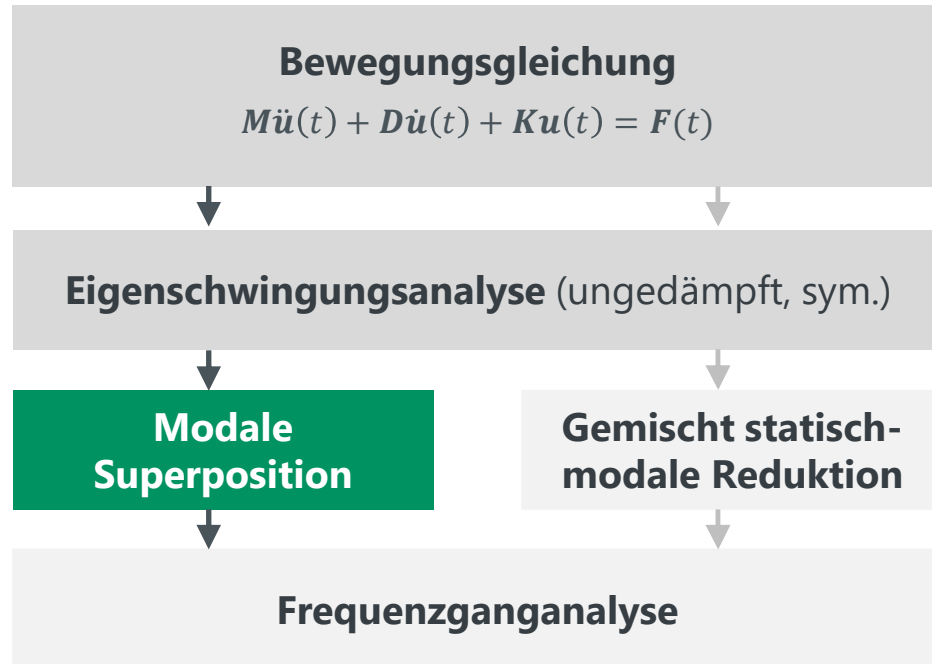


### Kriterien numerischer Kontaktsteifigkeit

- CHANDRUPATLA:  $\beta = 10^{2..4} \cdot \max K_{ii}$
- COOK ET AL., WISSMANN:  $\beta \leq 10^{\frac{d_w}{2}} \approx 10^{7..8}$
- WRIIGERS, NOUR-OMID:  $\beta = \frac{k_{\min}}{\sqrt{n_{FG} \cdot t^2}}$







### Modale Reduktion

- **Eigenschwingungsanalyse** (ungedämpft, sym.)

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0$$

- **Modale Superposition relevanter Eigenformen**

$$u = \Phi \cdot q \rightarrow \sum_{j=1}^{k \ll n} \varphi_j \cdot q_j$$

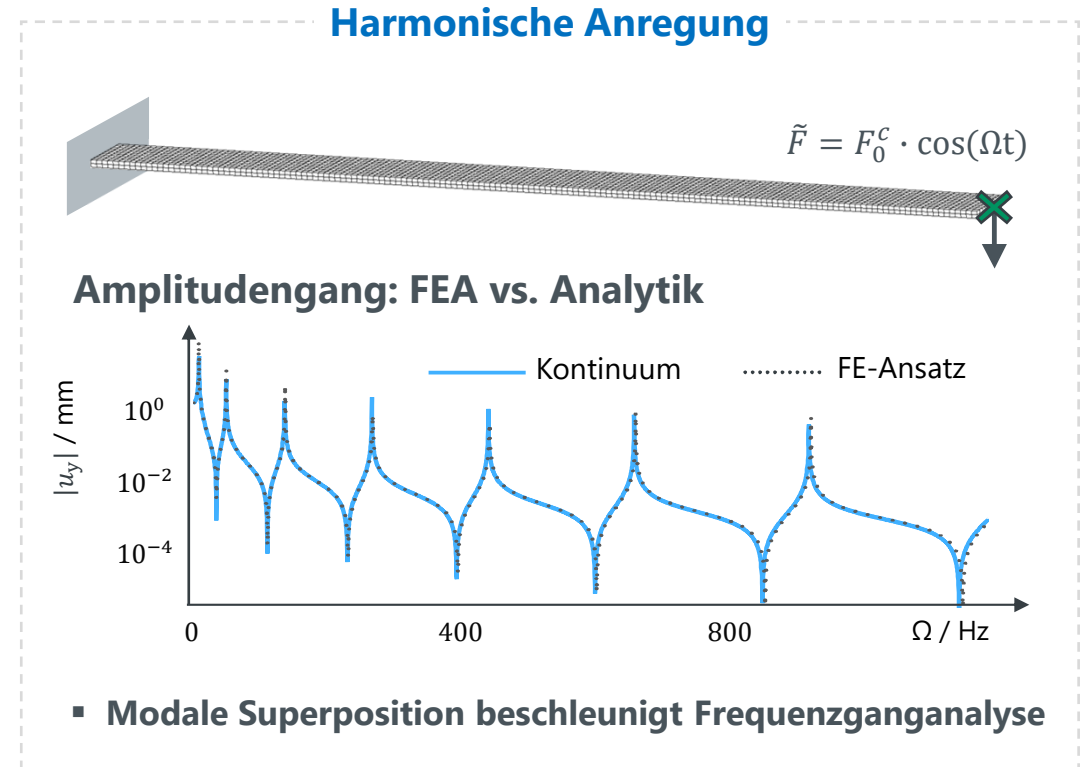
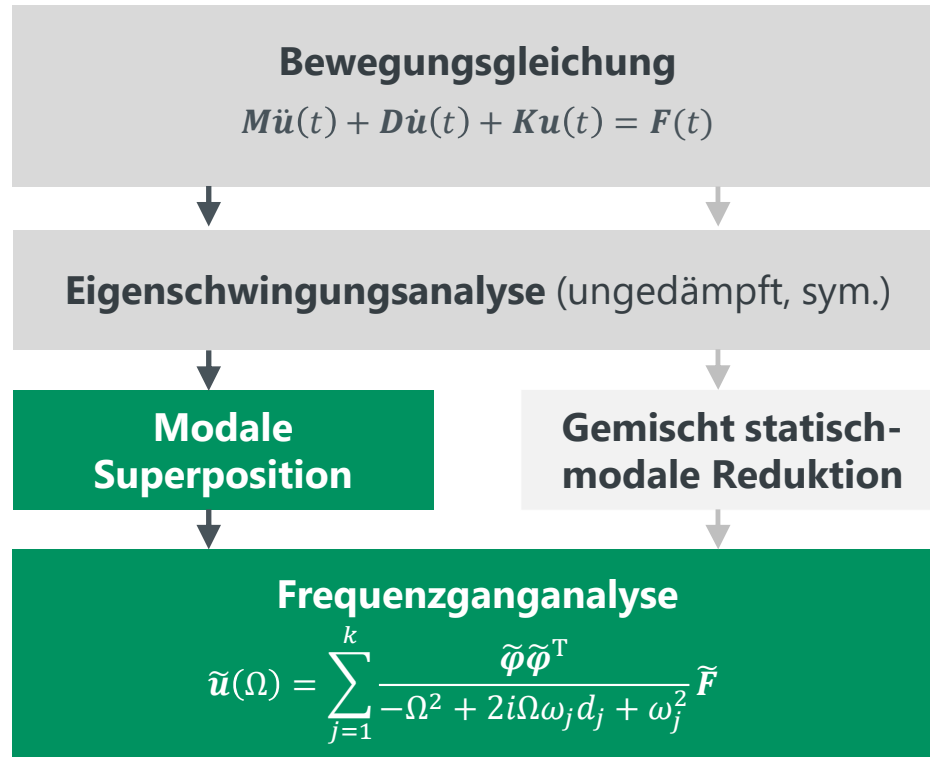
- **Bewegungsgleichung entkoppelt**

$$\ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \omega_j^2 q_j = f_j$$



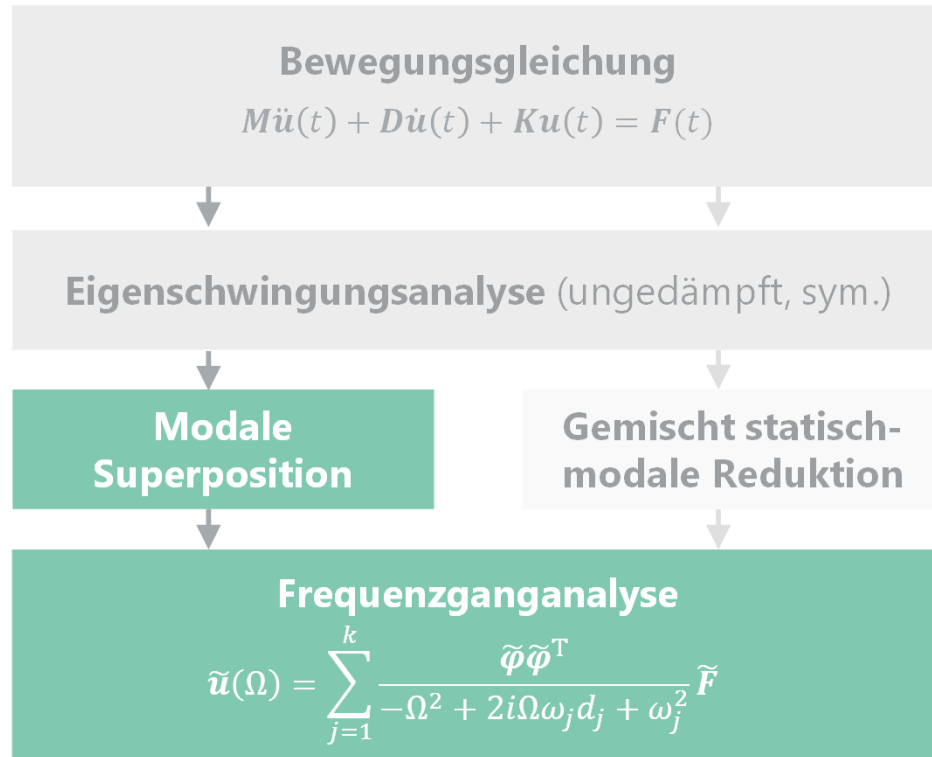
# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Harmonische Analyse mit Modaler Reduktion

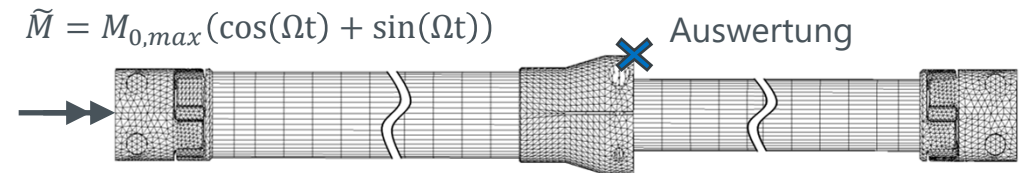


# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

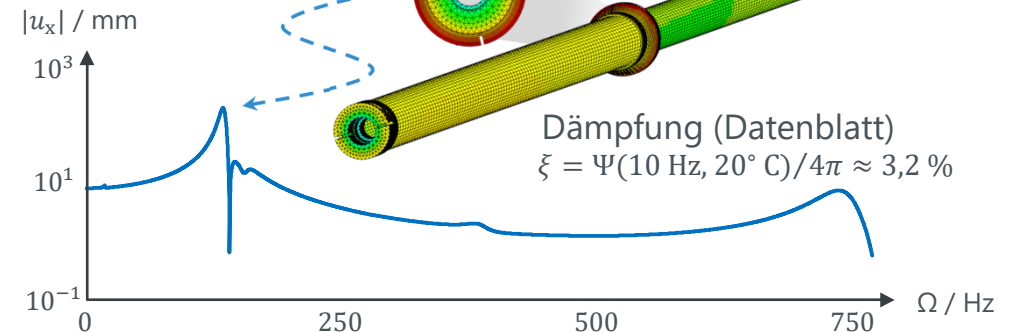
## Harmonische Analyse der schwingungsdämpfenden Gelenkwelle



### Anwendungsbeispiel: R+W-Gelenkwelle

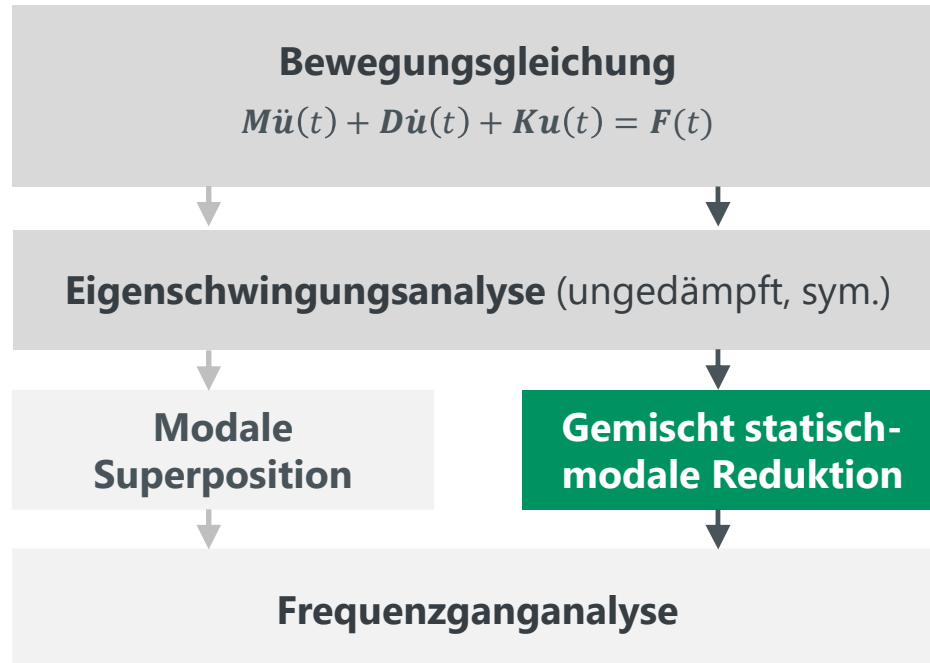


### Amplitudengang



# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Reduktionsmethoden: Gemischt statisch-modale Reduktion



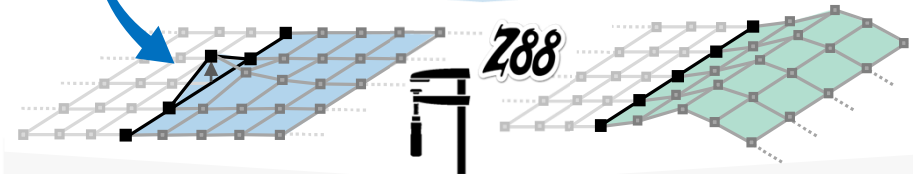
### Reduktion nach CRAIG-BAMPTON

- **Eigenschwingungsanalyse** (interne FHG)

$$(K - \omega^2 M)\Phi_i = 0$$

- **Statische Kondensation nach GUYAN**

$$K_{\text{red}} = K_{ee} - K_{ei}K_{ii}^{-1}K_{ie}$$



- **Dynamische Reduktion**

$$u = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -K_{ii}^{-1}K_{ie} & \Phi_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_e \\ q_k \end{bmatrix} = T_{\text{HCB}}q$$

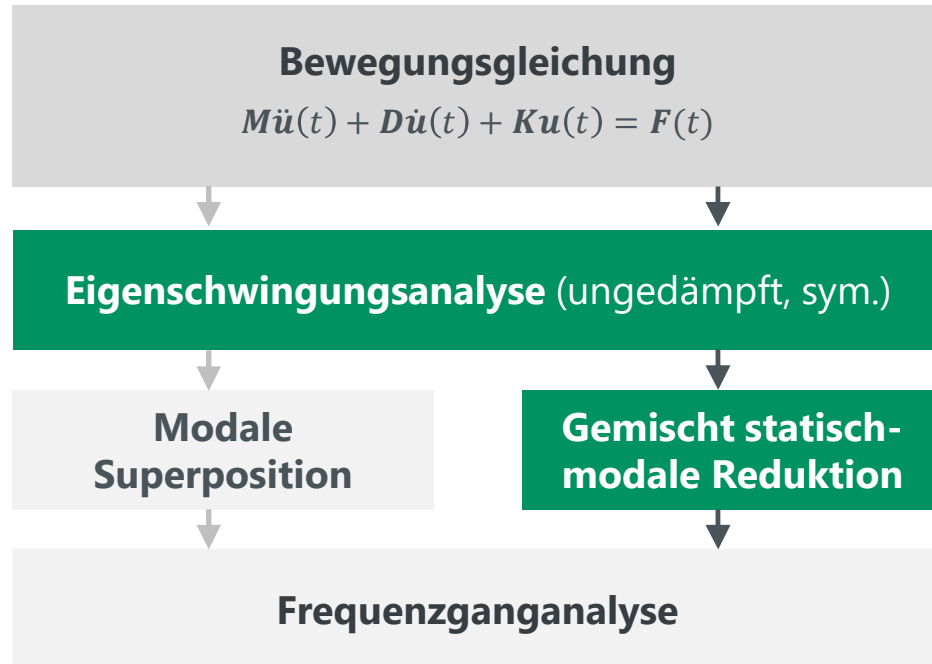
Freiheitsgrade

*i* intern  
*e* extern  
*k* modal



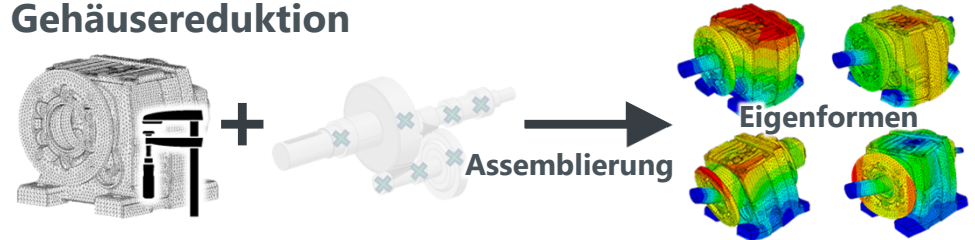
# Strukturdynamische Finite-Elemente-Analyse

## Schwingeigenschaften Stirnradgetriebe

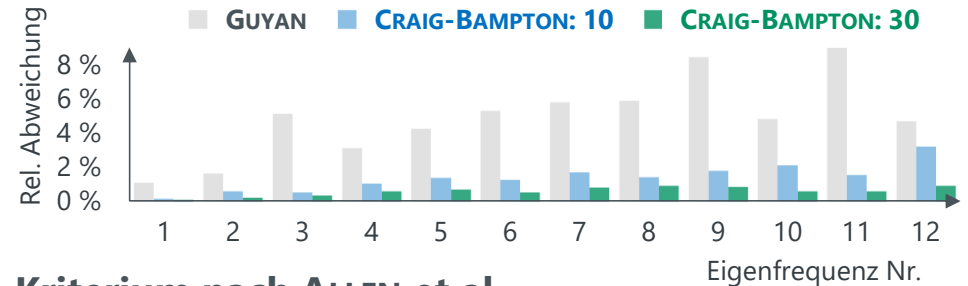


### Eigenschwingungen im Gesamtgetriebe

#### ▪ Gehäusereduktion



#### ▪ Eigenfrequenzen im Gesamtmodell



#### ▪ Kriterium nach ALLEN et al.

$$f_k \approx 2f_{12} \rightarrow f_k \geq 6,7 \text{ kHz bzw. } k \approx 30$$





### Zusammenfassung

- **Eigenschwingungsanalyse mit Kontakt**
  - Untersuchung d. Einflusses von FE-Netz & Kontakt
  - Validierung durch experimentelle Modalanalyse
- **FE-Frequenzganganalyse**
  - Absicherung des direkten FE-Ansatzes durch die analytische Beschreibung nach EULER-BERNOULLI
  - Beschleunigung durch dynamische Reduktion
- **Dynamische Reduktionsmethoden**
  - Modale Reduktion und Superposition
  - Reduktion nach CRAIG-BAMPTON
- **Übertragung auf Anwendungsbeispiele**
  - Elastomer-Gelenkwelle
  - Getriebegehäuse eines Stirnradgetriebes

### Ausblick

- **Automatisierte Schrittweite in der Frequenzganganalyse**
- **Effizienzsteigerung transienter Strukturodynamik**
  - dynamische Reduktion
  - modale Superposition
- **Einfluss Nichtlinearität auf Eigenschwingungen**

