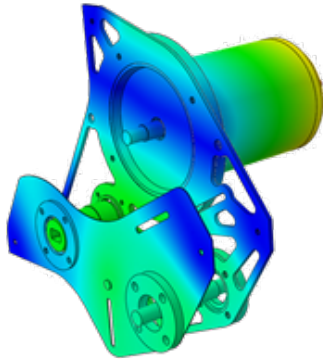


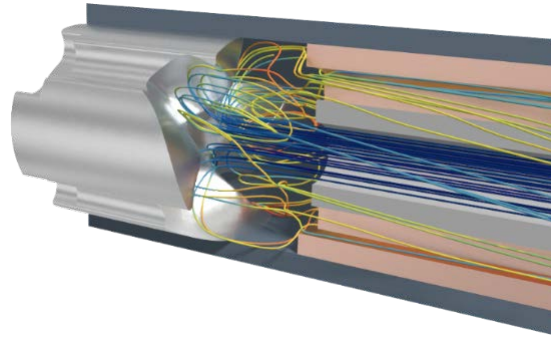
Computer Aided Engineering (CAE)

Vorlesung Maschinenkonstruktionslehre C – WS25/26

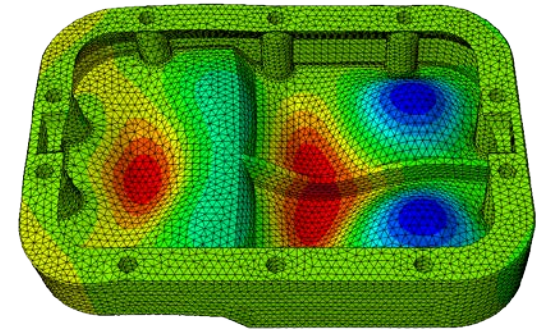
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen



FEM-Analyse der Verschiebung einer Motorhalterung für ein Elektrofahrzeug



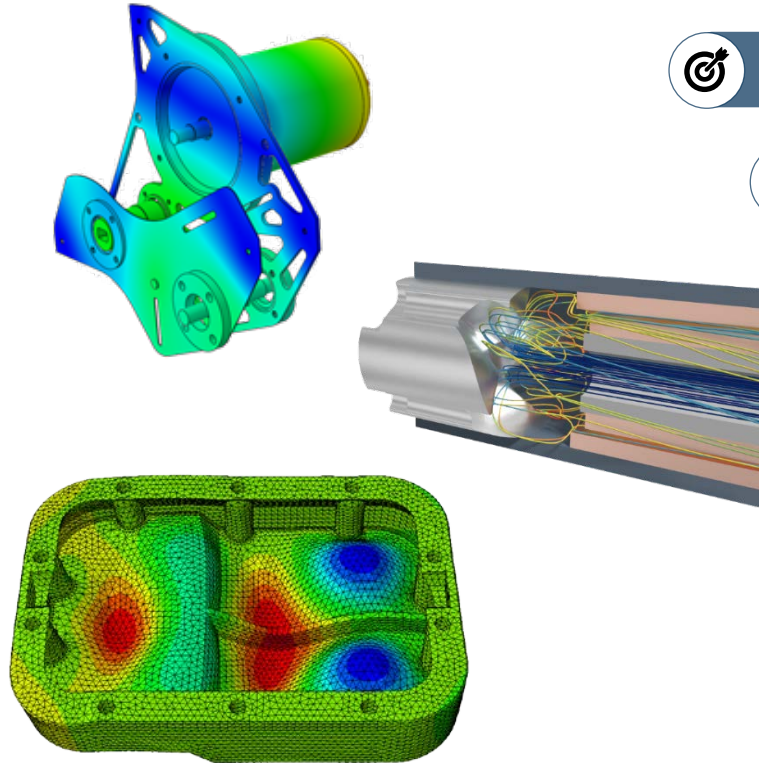
Gekoppelte Thermo- und Strömungssimulation der Kühlung einer kontaktlosen Energieübertragung für E-Motoren



Eigenfrequenzanalyse eines Aktuatorgehäuses

Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis





 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

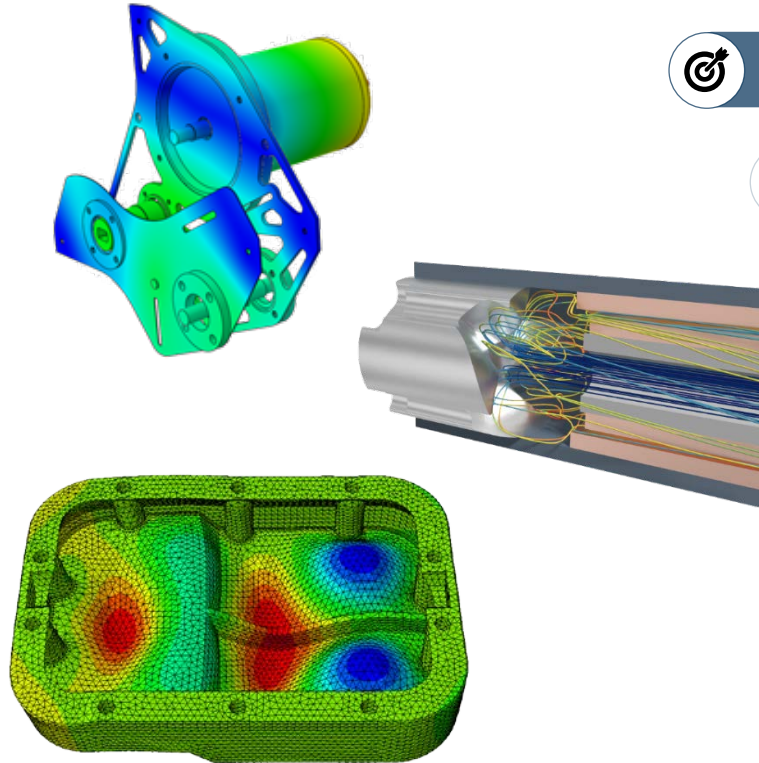
 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen


 Ausblick & Zusammenfassung


Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis





 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung



Lernziele der Vorlesung

Computer Aided Engineering (CAE)

Problem

Systeme mit komplizierten Geometrien und/oder vielen Teilsystemen und Abhängigkeiten lassen sich nur sehr schwer mit den bisher erlernten Dimensionierungsansätzen modellieren und auslegen.

Ziele

- Erläutern können, warum sowohl die Grundlagen der Dimensionierung als auch CAE-Methoden wichtig sind
- Verschiedene CAE-Methoden und deren Anwendungsgebiete nennen können
- Die Grundlagen von FEM und MKS erklären können
- Unterschiede in der Anwendung zwischen FEM und MKS nennen können
- Die Grenzen der CAE-Methoden diskutieren und Ergebnisse kritisch hinterfragen können
- Bewerten können, inwiefern KI als Teil von CAE-Methoden in der Produktentwicklung Potenziale bietet, aber auch Einschränkungen und Risiken mit sich bringt

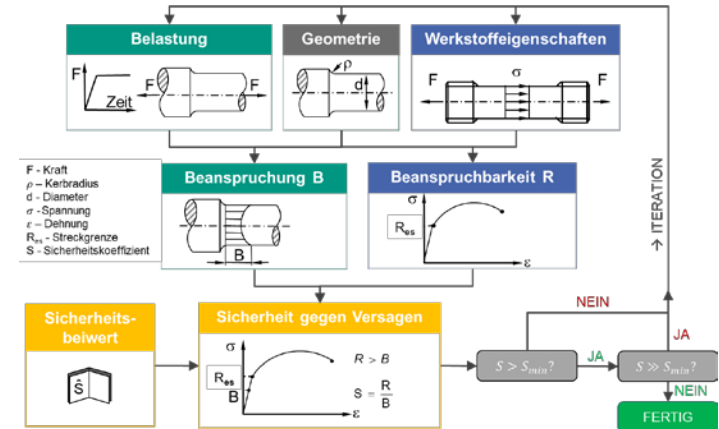
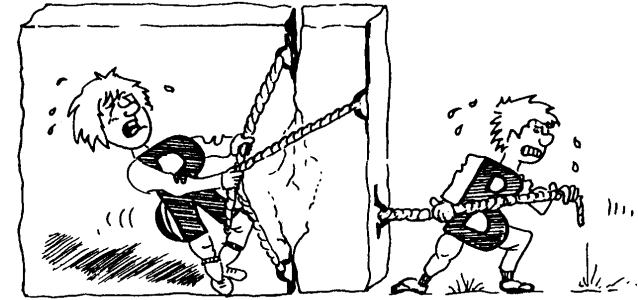
Fazit

CAE-Methoden erweitern die Möglichkeiten von herkömmlicher Modellierung nach dem Nennspannungskonzept in der Produktentwicklung enorm. Durch Erweiterungen um z. B. nicht-lineares Materialverhalten oder Wechselwirkungen mit anderen physikalischen Domänen wird die Beurteilung des realen Trag- und Verformungsverhaltens von komplizierteren Gestaltungen ermöglicht. Speziell die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Mehrkörpersimulation (MKS) sind etablierte Methoden der Strukturberechnung. Sie sind allerdings keine Allzweck-Waffe und die Ergebnisse müssen kritisch hinterfragt werden. Hierfür ist ein Grundverständnis der Dimensionierung unumgänglich

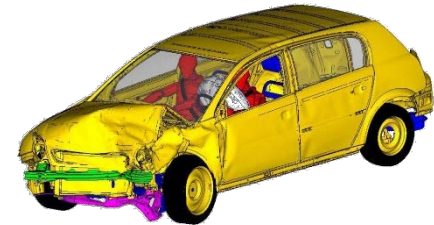
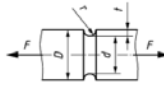
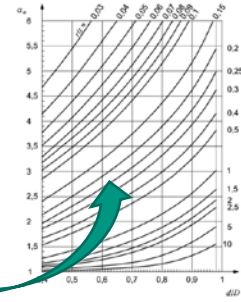
CAE – Einführung

Rückblick auf die Dimensionierung

- Zur **überschlägigen Auslegung** der Größenordnung von Komponenten, beispielsweise für den **Minstdurchmesser** von Wellen, eignen sich **analytische Berechnungsmethoden** basierend auf dem **Nennspannungskonzept**
- Testing** als **empirische Untersuchung** ergänzt diese rechnerischen Ansätze, indem **reale Belastungen** und Versagensmechanismen betrachtet werden
- Aus der **Beanspruchung** sowie der **Beanspruchbarkeit** kann die **Sicherheit** von Systemen gegen Versagen berechnet werden
- Mit Hilfe von **Sicherheitsfaktoren** kann so die **Betriebstauglichkeit** von Systemen nachgewiesen werden



- Für Systeme, deren Geometrie von einfachen Körpern wie Zylindern und Quadern abweicht oder Materialeigenschaften anisotrop oder ortsabhängig sind, müssen häufig **empirisch ermittelte Werte** genutzt werden, bspw. für Kerben
- Um entstehende **Unsicherheiten** durch die Einflüsse zu berücksichtigen, welche nicht in die Berechnung integriert werden können, müssen erhöhte **Sicherheitsfaktoren** gewählt werden. Dadurch können erhöhte Kosten und Gewicht entstehen
- Systeme mit vielen Teilsystemen und Abhängigkeiten sind sehr schwer zu modellieren und zu berechnen, bspw. Crash



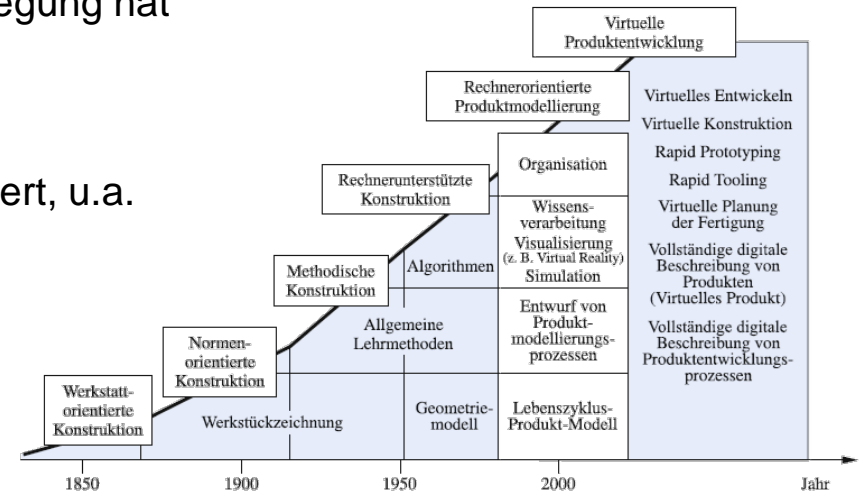
Fazit

Wenn Systeme nach dem Nennspannungskonzept oder anhand empirisch ermittelter Werte dimensioniert werden, **dann** kann die Dimensionierung nicht beliebig genau werden, **weil** sonst der Aufwand sehr stark ansteigt.

CAE – Einführung

In Unternehmen werden rechnergestützte Methoden zur Dimensionierung komplizierterer Bauteile und Systeme eingesetzt

- **Rechnergestützte Methoden** helfen, aufwändige Berechnungen zu ermöglichen
- Der Anteil rechnergestützter Methoden in der Auslegung hat immer weiter zugenommen und ist heute **Standard im Produktentwicklungsprozess**
- Hierbei wurden verschiedene **CAX-Systeme** etabliert, u.a.
 - Computer Aided Design (CAD)
 - **Computer Aided Engineering (CAE)**
 - Computer Aided Manufacturing (CAM)
 - Computer Aided Assembling (CAA)
 - Computer Aided Quality Assurance (CAQ)



Quelle: Roloff/Matek: Maschinenelemente, 2023

- Sollen **rechnergestützte Berechnungsmethoden** im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden, müssen zunächst **Modelle des Systems** existieren
 - Die **überschlägige Dimensionierung** zu Beginn des Entwicklungsprozesses kann auf **sehr einfachen Modellen** erfolgen, z. B. einem glatten Zylinderstab für eine Welle, um eine erste Größenordnung für Teilsysteme zu erhalten
 - Die Erstellung eines **detaillierten Modells**, um eine genauere Dimensionierung durchführen zu können, benötigt Know-how, ist **zeitaufwändig** und unter Umständen zu **kostenintensiv** zu Beginn der Entwicklung
- Rechnergestützte Berechnungsmethoden basieren auf **virtuellen Modellen** des Systems und **mathematischen Modellen** der zugrundeliegenden physikalischen Zusammenhänge
- Um zu verstehen, wie diese funktionieren und die **Ergebnisse interpretieren** zu können, müssen zunächst die **Grundlagen verstanden** werden

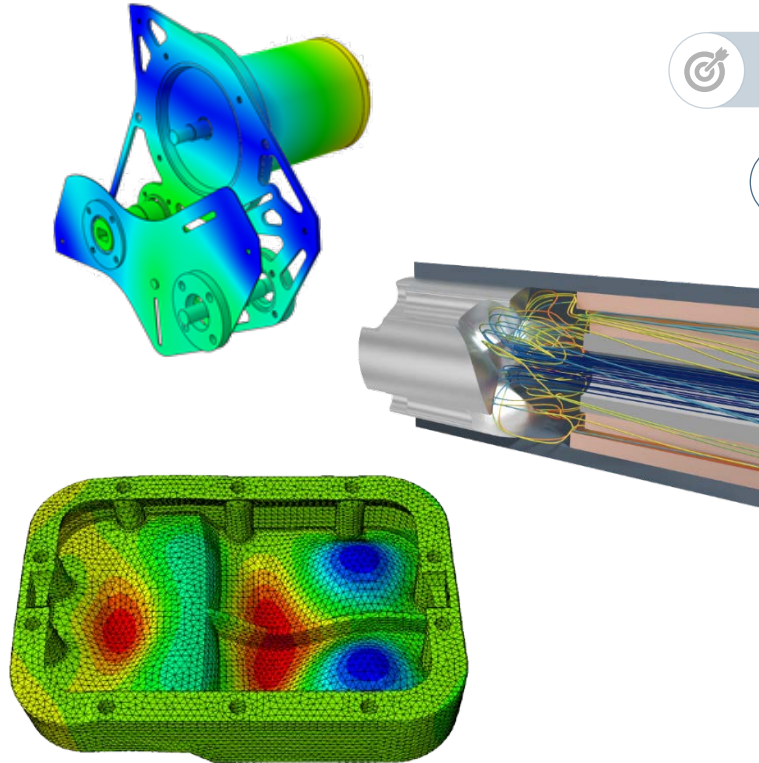
Fazit


Um rechnergestützte Methoden sinnvoll einsetzen zu können, benötigen wir ein **Verständnis** für die **Grundlagen der Dimensionierung**. Nur so können wir die erforderliche **Beurteilungskompetenz** entwickeln, um Simulationsergebnisse richtig **einzuordnen** und ihre **Grenzen zu erkennen**.




Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis




 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung



CAE – CAE in der Produktentwicklung

Anwendung von CAE-Methoden ist keine Garantie für Erfolg

- CAE-Methoden können bereits früh im Produktentstehungsprozess **wertvolle Erkenntnisse** liefern
 - Lässt sich mein Produkt wie geplant **zusammenbauen**?
 - Hält mein Bauteil die geforderte **Last**?
 - Werden alle Einschränkungen der **Fertigungsmethode** eingehalten?
- Voraussetzung: Die **korrekte Anwendung** der CAE-Methoden!



Sinken der Ölbohrplattform
Sleipner A aufgrund
fehlerhafter Simulation (1991)

The reasons for the weaknesses and correspondingly reduced load-bearing capacity were recognized to be:

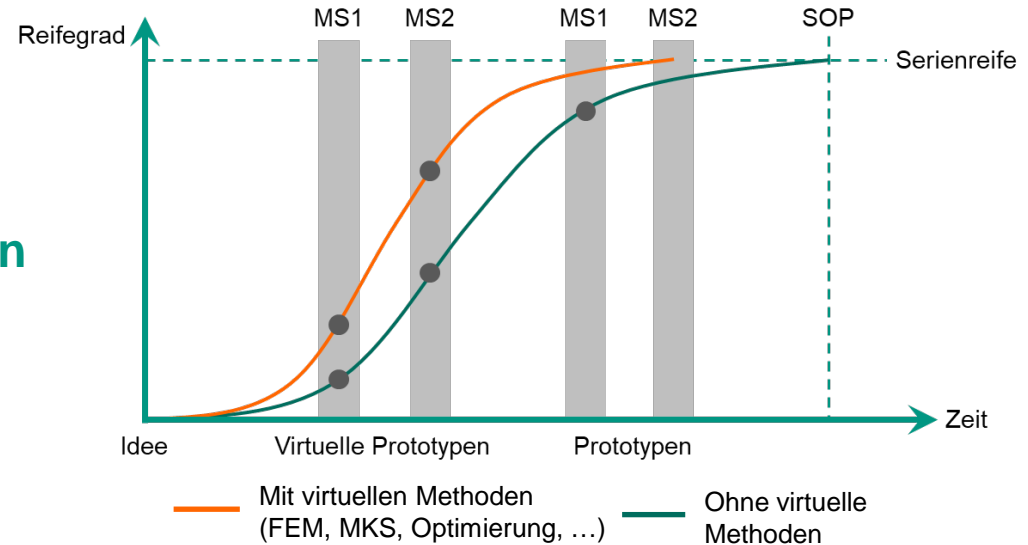
- Unfavorable geometrical shaping of some finite elements in the global analysis (Fig. 4). In conjunction with the subsequent post-processing of the analysis results, this led to underestimation of the shear forces at the wall supports by some 45%.



CAE – CAE in der Produktentwicklung

Durch frühe Erkenntnisse können Kosten gespart werden

- Durch rechnergestützte Methoden kann der **Reifegrad** bereits in der **Konzeptphase** erhöht werden
- Früher Erkenntnisgewinn kann **Kosten verringern und einsparen**
- Teure **Hardware-Prototypen** in späten Phasen der Produktentwicklung **können vermieden werden**



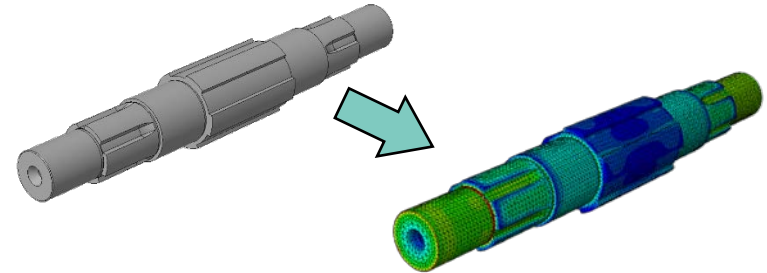
Nach Seifert/Rainer Virtuelle Produktentwicklung für Fahrzeug und Antrieb im Kfz, 2008



CAE – CAE in der Produktentwicklung

Eine frühe Berücksichtigung kann Aufwände reduzieren

- In der heutigen Produktentwicklung finden CAx Methoden Einsatz entlang des **gesamten Prozesses**
- Softwaretools haben häufig **Schnittstellen**, sodass Modelle und Informationen mit geringem Aufwand ausgetauscht werden können
- Grundlage für die Struktursimulationen von Systemen sind häufig **3D-Modelle**, welche mit Hilfe von **CAD-Software** erstellt wurden

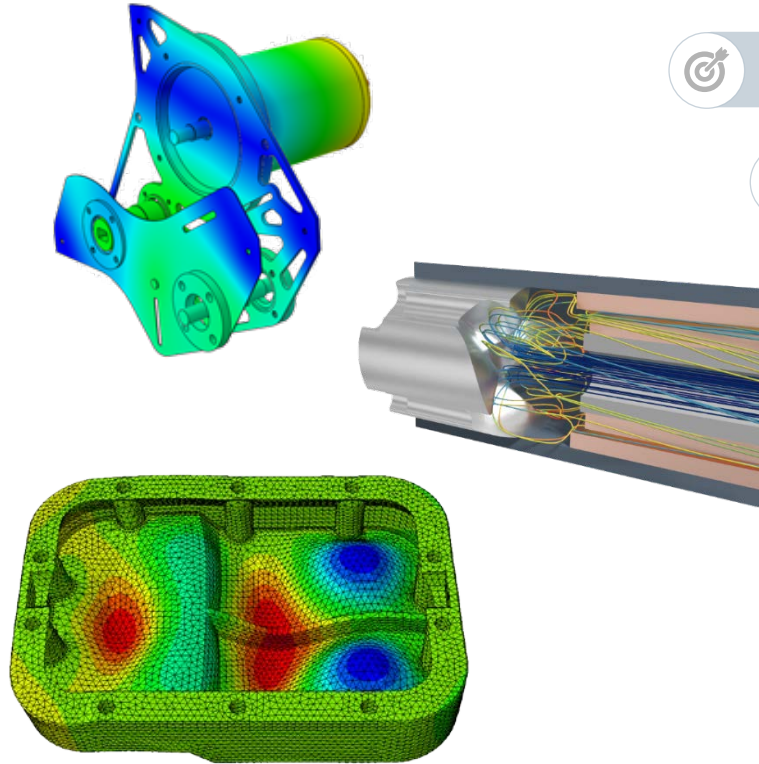


Fazit


Wenn Modelle in **mehreren Schritten** im Produktentwicklungsprozess eingesetzt werden sollen, dann muss von Beginn an auf eine **sinnvolle Modellierung** geachtet werden, weil sonst der **Aufwand für den Austausch** zwischen verschiedener Software sehr groß werden kann.

Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis




 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung

Computer Aided Engineering (CAE)

Übersicht unterschiedlicher Analysemethoden

■ Statische Analyse

- Lineare Verformungs- und Spannungsanalyse
- Nichtlineares Materialverhalten/geometrisches Verhalten

■ Stabilitätsanalyse

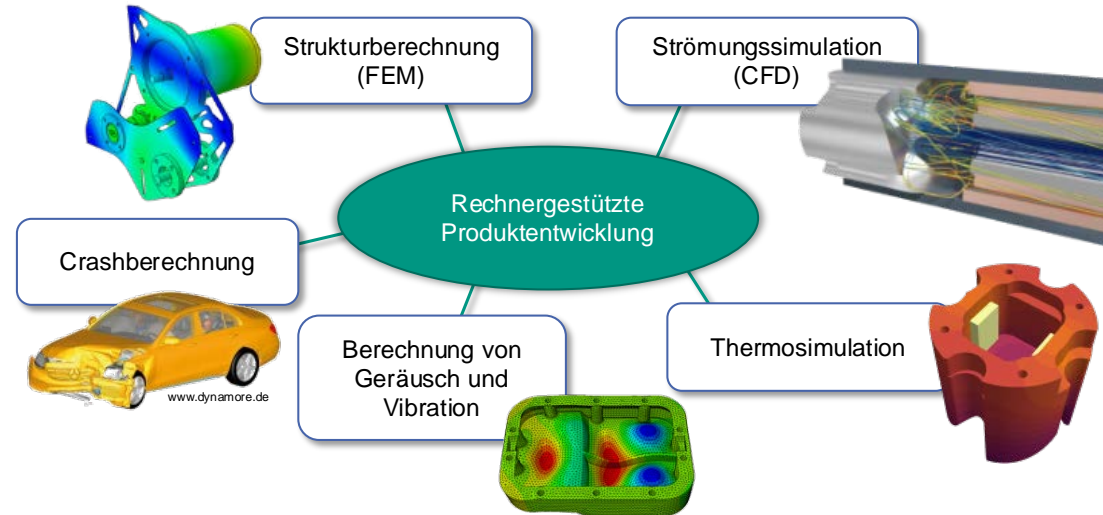
- Beul-Untersuchungen

■ Dynamische Analysen

- Modalanalyse
- Frequenzganganalyse
- Antwortspektrum
- Lebensdauer

■ Bruchmechanik

- Rissentstehung
- Rissfortschritt



Computer Aided Engineering (CAE)

Übersicht unterschiedlicher Analysemethoden

■ Verbundwerkstoffe

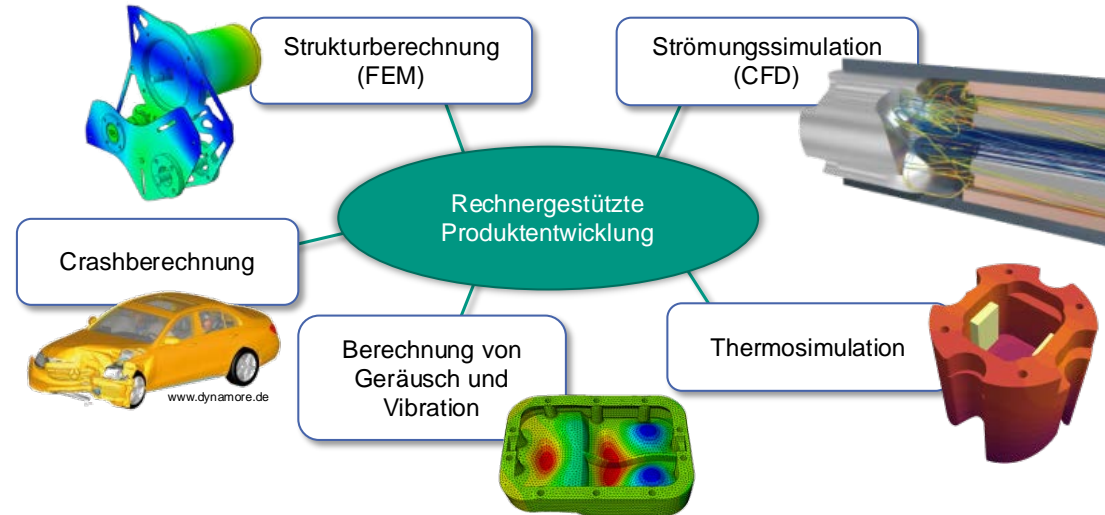
- Lineare/nichtlineare Verformungs- und Spannungsanalyse
- Untersuchung auf Faserbruch und Zwischenfaserbruch
- Delaminationsuntersuchung

■ Impact-Analyse

- Falltests/Crash
- Explosion

■ Thermische Berechnungen

- Wärmeübertragung
- Stationäres und instationäres Verhalten



Computer Aided Engineering (CAE)

Übersicht unterschiedlicher Analysemethoden

■ Elektrische und magnetische Felder

- Magnetfeldberechnung
- Elektromagnetfeldberechnung

■ Strömungsberechnungen

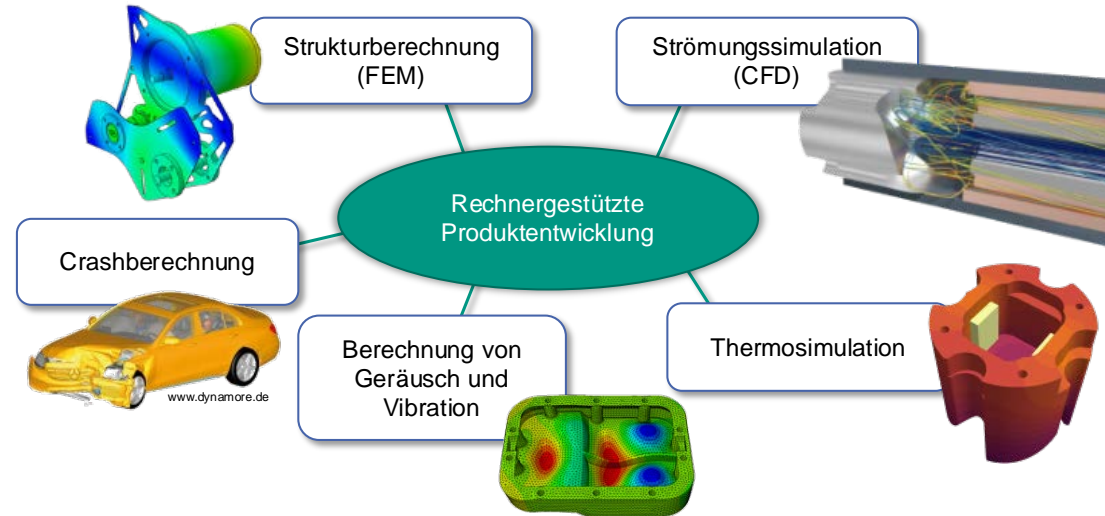
- Stationär, instationär
- Laminar, turbulent

■ Akustische Berechnungen

- Geräuschreduzierung
- Schallverteilung

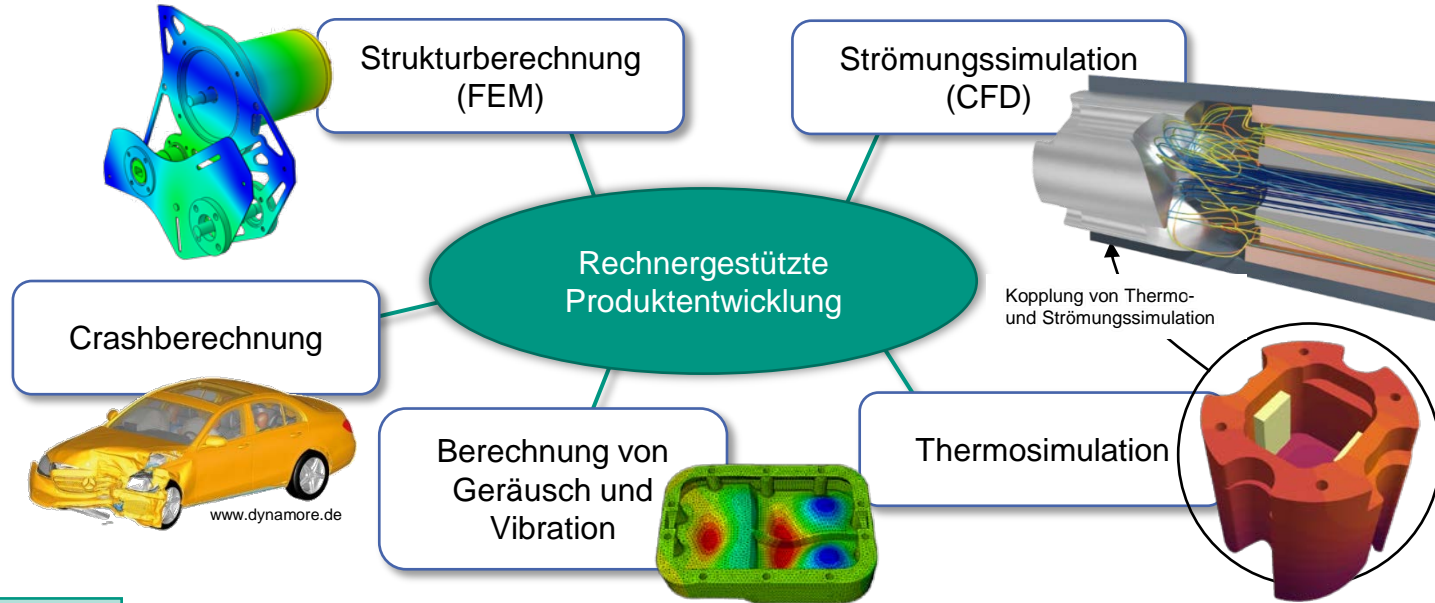
■ Optimierung

- Topologieoptimierung
- Formoptimierung
- Parameteroptimierung



CAE – Rechnergestützte Entwicklung

Übersicht unterschiedlicher Analysemethoden

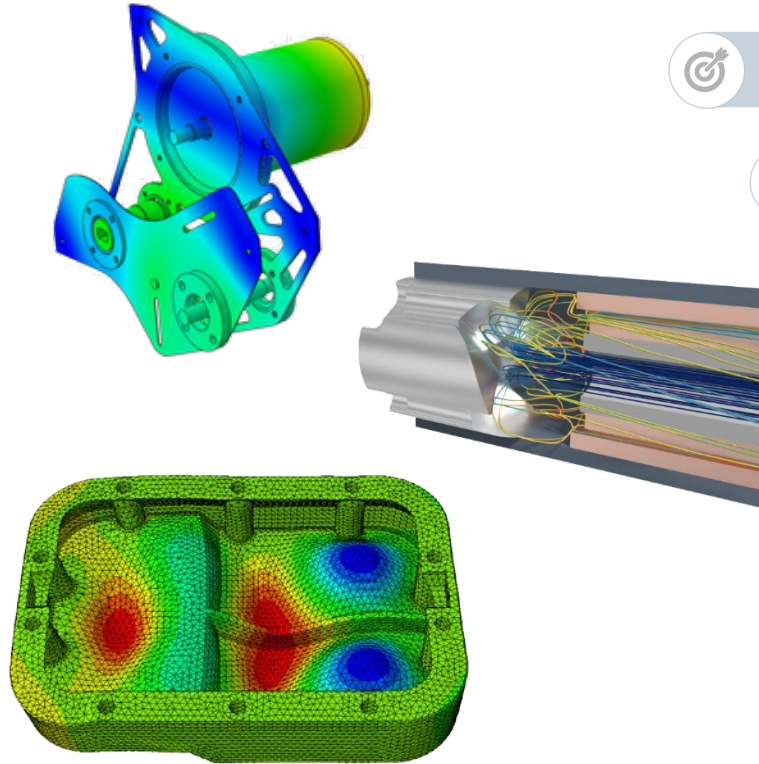



Kernaussage


Das Anwendungsgebiet und die Werkzeuge für die rechnergestützte Produktentwicklung sind vielfältig und beschränken sich nicht auf die strukturelle Dimensionierung. Auch Wechselwirkungen zwischen mehreren physikalischen Domänen, wie bspw. Strukturmechanik und Strömungsmechanik können dabei erfasst werden.

Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis




 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung



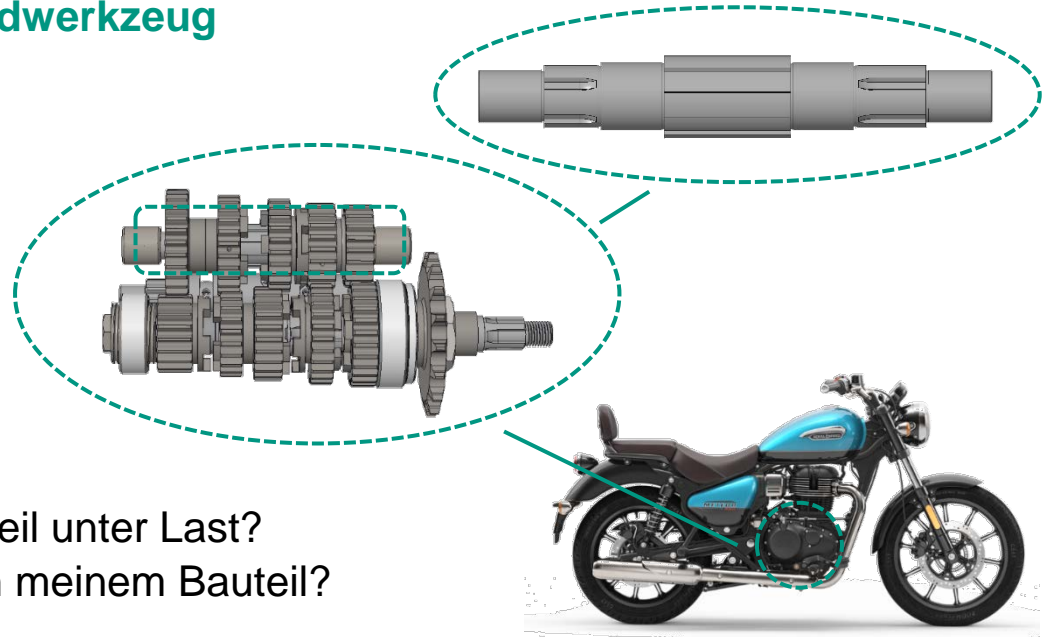
CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Beispiel: Beanspruchung einer Getriebewelle unter Torsion

- Ursprünglich für die Raumfahrt entwickelt, ist die FEM heutzutage ein **Standardwerkzeug** in vielen Branchen der Industrie

Beispiel Getriebewelle

- Ermittlung der Beanspruchung unter Torsionsbelastung
→ Strukturberechnung
- Fragen, die mit Hilfe der FEM beantwortet werden können:
 - Wie stark verformt sich mein Bauteil unter Last?
 - Welche Spannungen herrschen in meinem Bauteil?



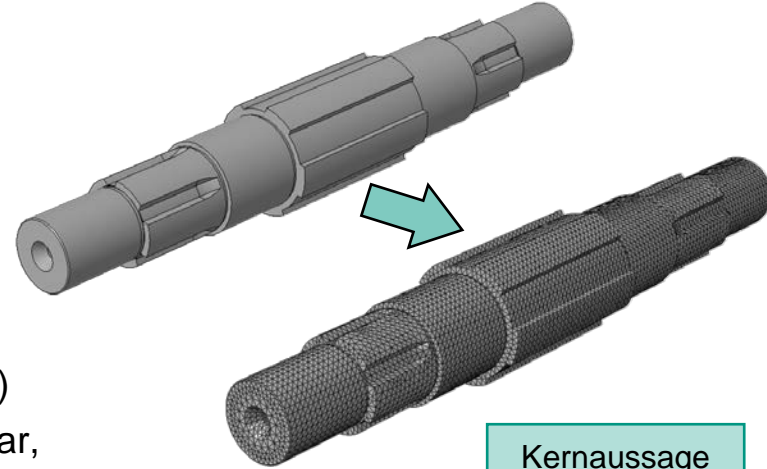
CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Grundlegende Idee

- Die Impulsbilanz (TM2) liefert die zugrundeliegende **Differentialgleichung** für die Strukturberechnung des belasteten Bauteils
- Weil es **keine direkte Lösungsformel** für **beliebige Geometrien** gibt, kann die Differentialgleichung nicht für das **gesamte Bauteil** direkt gelöst werden
- Zum Lösen wird das Bauteilvolumen in kleinere Teilvolumen, die **Finiten Elemente**, aufgeteilt (Diskretisierung/Vernetzung)
- Die Differentialgleichung stellt dann eine **Matrixgleichung** dar, welche durch **numerische Verfahren** gelöst werden kann

$$\begin{array}{ccc} & Ku = f & \\ \text{Steifigkeitsmatrix (gegeben)} & | & \text{Kraftvektor (gegeben)} \\ & \text{Verschiebungsvektor (gesucht)} & \end{array}$$

- Aus der Verschiebung und Materialdaten lassen sich weitere Größen, wie bspw. **Spannungen** ableiten

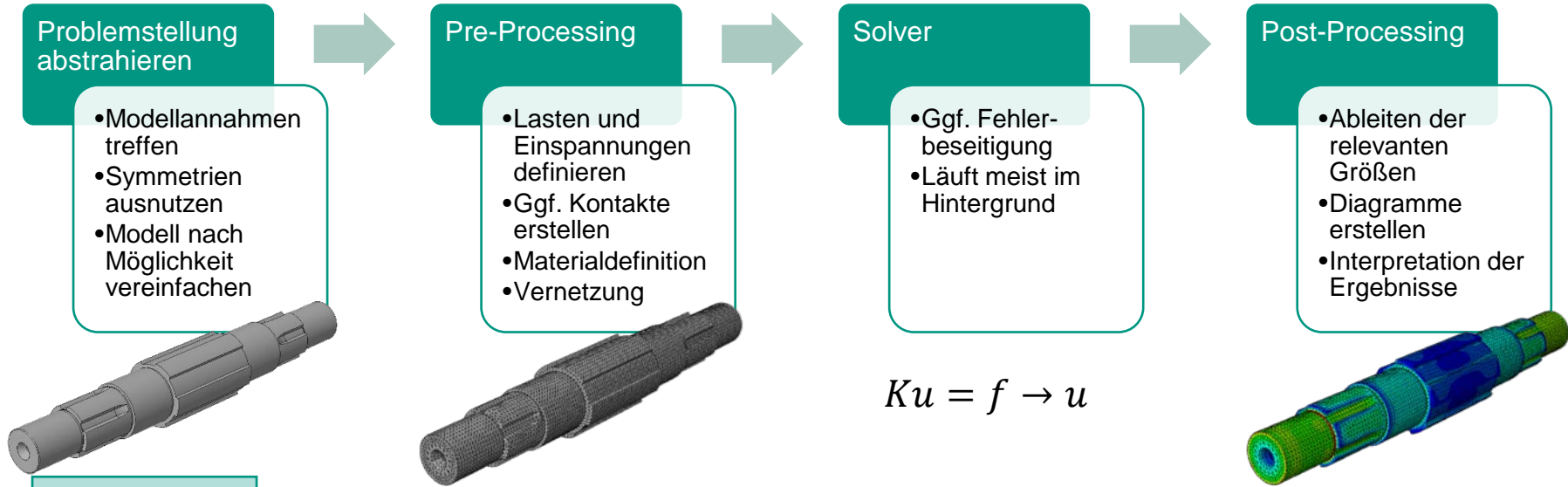


Kernaussage

Der rechnergestützten Strukturberechnung liegt häufig die **Finite-Elemente-Methode** zu Grunde. Hierbei werden „feste oder flüssige Körper in **Elemente endlicher Größe** zerlegt“. Durch die FEM können komplexe Geometrien und Lastfälle auf viele **kleine vereinfachte Probleme** aufgeteilt werden.

CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Ablauf einer FEM-Analyse



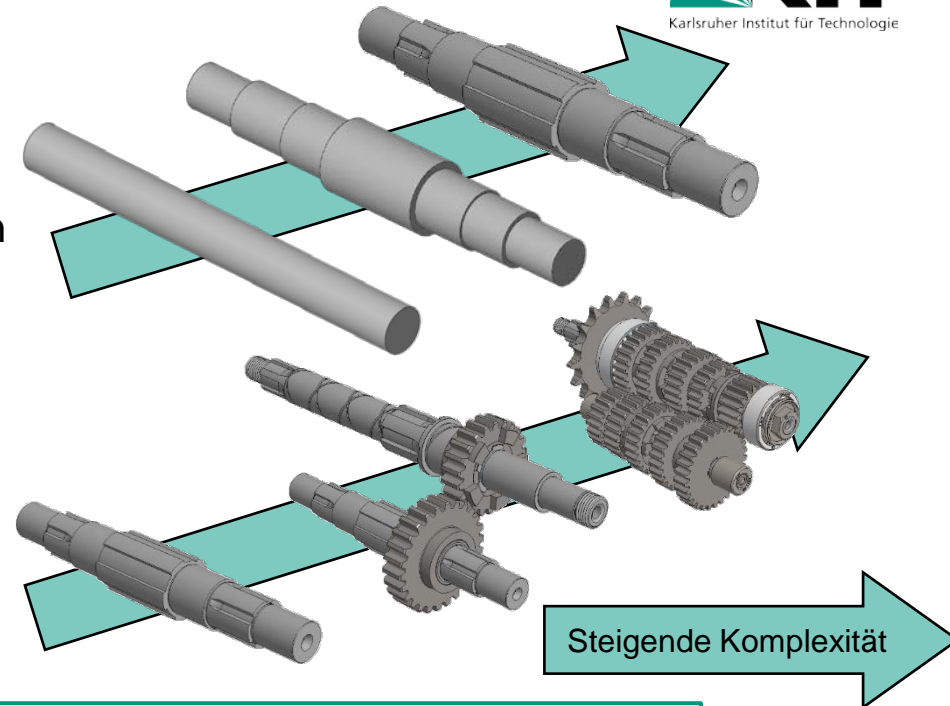
Kernaussage

Der größte Aufwand in der FEM-Analyse liegt in der **Abstraktion der Problemstellung** und im **Pre-Processing**, also dem Bearbeiten der Eingangsdaten. Daher muss **bereits in der CAD-Konstruktion** auf eine **effiziente** und **saubere Modellierung** geachtet werden.

CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Problemstellung abstrahieren

- Abstraktion der Geometrie
 - Welle als „Stab“ modellieren
 - Welle als „Stab mit Absätzen“ modellieren (keine Keilwellen)
 - CAD-Geometrie benutzen
- Wo ziehe ich meine Systemgrenze?
 - Nur die Welle
 - Nur die Welle mit Lagerung im Gehäuse
 - Wellen und zwei Zahnräder im Eingriff
 - Das gesamte Getriebe



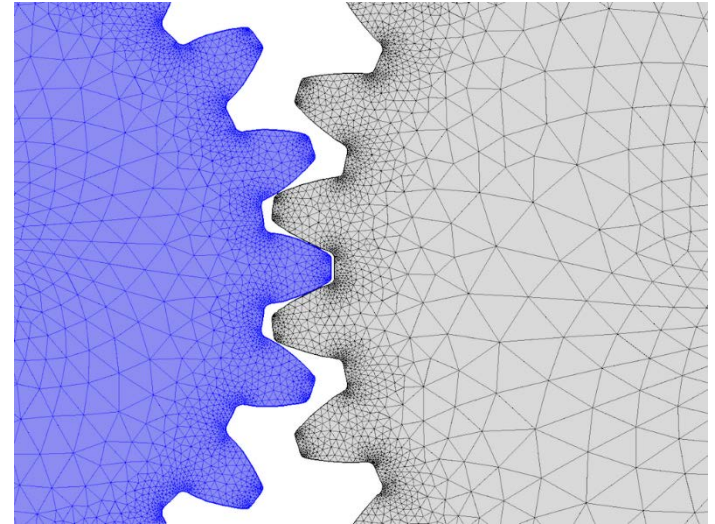
Kernaussage

Modelle sind immer **vereinfachte Darstellungen**.
Der passende Abstraktionsgrad hängt von dem **Zweck des Modells** ab.

CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Pre-Processing

- Im Pre-Processing werden die getroffenen **Modellannahmen** und Abstraktionen in das Simulationsmodell überführt
- Dazu gehört:
 - Definition von Lasten, Einspannungen und weiteren Randbedingungen
 - Materialdefinition
 - Kontaktverhalten zwischen Bauteilen definieren
 - Vernetzung der Bauteile
- Das vorbereitete Simulationsmodell wird im Anschluss dem **Solver** übergeben



Quelle: comsol

CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Solver

- Passiert größtenteils **im Hintergrund**
- **Fehlerbehebung** erfordert oftmals Neustart
- **Rechenzeit** kann von Sekunden bis über Tage und Wochen dauern
- Beschleunigung durch **parallele Rechencluster**



*bwUniCluster 3.0:
8352 CPU-Kerne
112 GPUs*

Standort: KIT

Quelle: wiki.bwhpc.de



CAE – Finite Elemente Methode (FEM)

Post-Processing

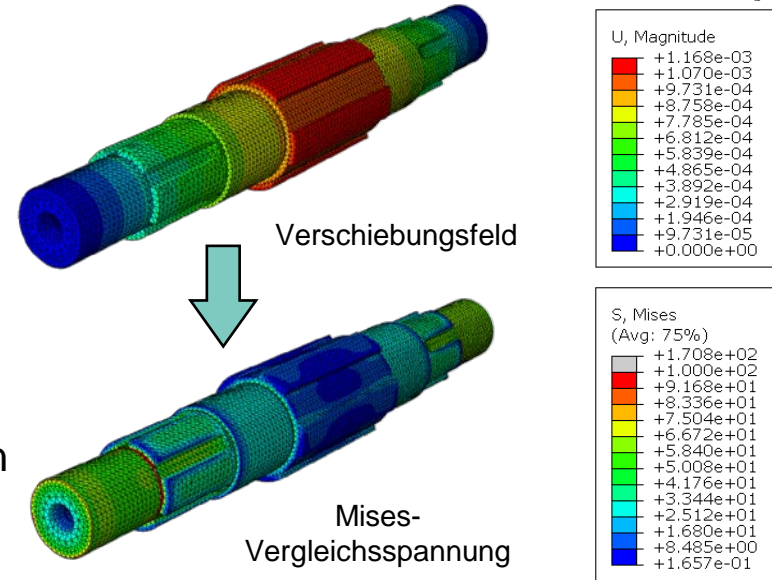
- Durch Lösen des Gleichungssystems wird die Verschiebung für jeden Knoten berechnet

$$Ku = f \rightarrow u$$

- Andere Größen werden daraus abgeleitet, z. B. Spannungen, Verzerrungen

$$\sigma = E \frac{du}{dx}$$

- Darauf aufbauend können z. B. Festigkeitskriterien (statisch, dynamisch) ausgewertet werden

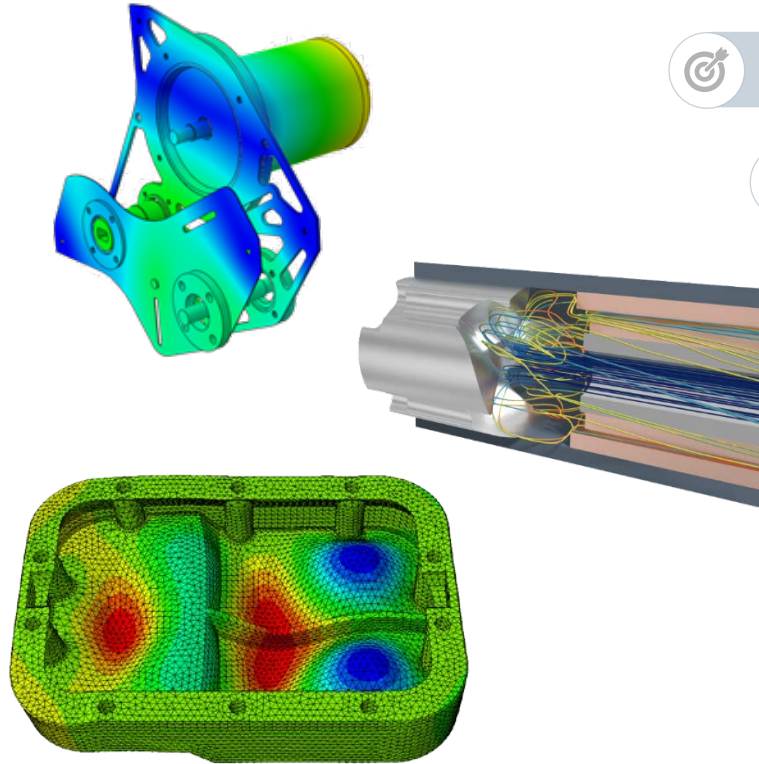


Kernaussage


Für den Einsatz einer FEM-Simulation müssen **immer** die Schritte **Problemstellung abstrahieren**, **Pre-Processing**, **Solver** und **Post-Processing** durchlaufen werden. Um dabei zeitgerecht Ergebnisse zu bekommen, muss darauf geachtet werden, die **passenden Modellannahmen** zu treffen, um einen guten Kompromiss zwischen **Rechendauer** und **geforderter Genauigkeit der Ergebnisse** zu erzielen.


Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis




 Einführung & Lernziele

 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

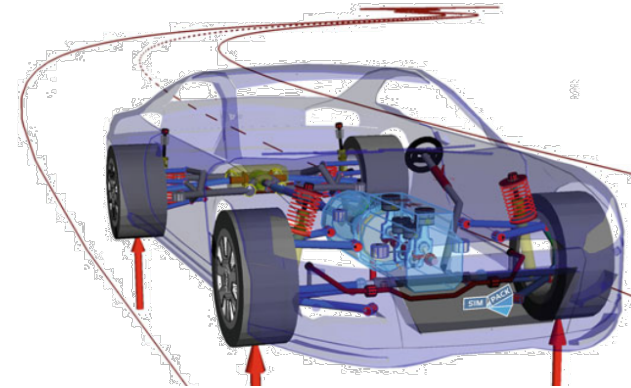
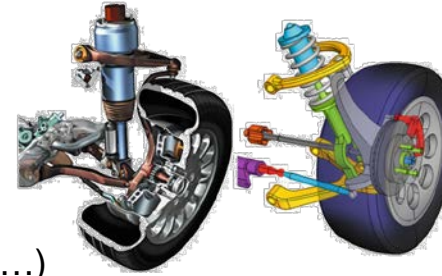
 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung

Mehrkörpersimulation

Einleitung

- Modellierung der Bewegung **mehrteiliger Systeme**
 - Teilsysteme bestehen aus **Starrkörpern**
 - Verbindung durch **masselose Elementen** (Gelenke, Federn ...)
- Lösen von **Bewegungsgleichungen** der einzelnen Körper
- Frühes Erarbeiten von Erkenntnissen über das **Gesamtsystem**
 - Auftretende Schwingungen?
 - Große elastische Verformungen von Bauteilen im Gesamtsystem?
 - Kollision von bewegten Bauteilen?
- Analyse der **Trägheitskräfte** im bewegten System



Kernaussage

Die MKS ermöglicht durch frühen Erkenntnisgewinn eine konstruktive Optimierung des Gesamtsystems, noch bevor der erste physische Prototyp vorliegt.



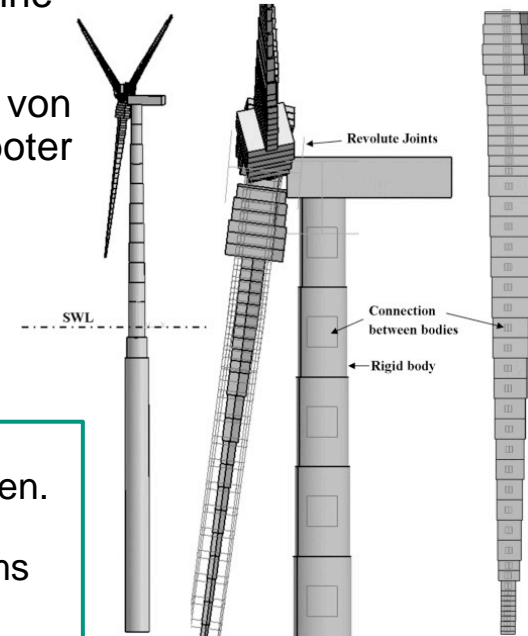
Mehrkörpersimulation

Betrachtung von elastischen Körper

- Wenn **nichtlineare Bewegungen** oder **große elastische Deformationen** auftreten, dann steigt der Aufwand stark an, weil in jedem Zeitschritt eine kontinuumsmechanische Berechnung durchgeführt werden muss
- Insbesondere im Leichtbau wird die Dynamik der Systeme auch stark von den **Verformungen der Körper** beeinflusst, z. B. Helikopterrotor, Roboter
- Solche Körper können in **einzelne Starrkörper** aufgeteilt werden, die untereinander gelenkig verbunden sind (**Lumped Mass Systems**)

Kernaussage

Durch die Mehrkörpersimulation können **bewegte Systeme** analysiert werden. Hierbei werden **Kinematik** (Bewegung) und **Kinetik** (Kräfte etc.) in Zusammenhang gesetzt werden, um das Bewegungsverhalten des Systems zu simulieren.

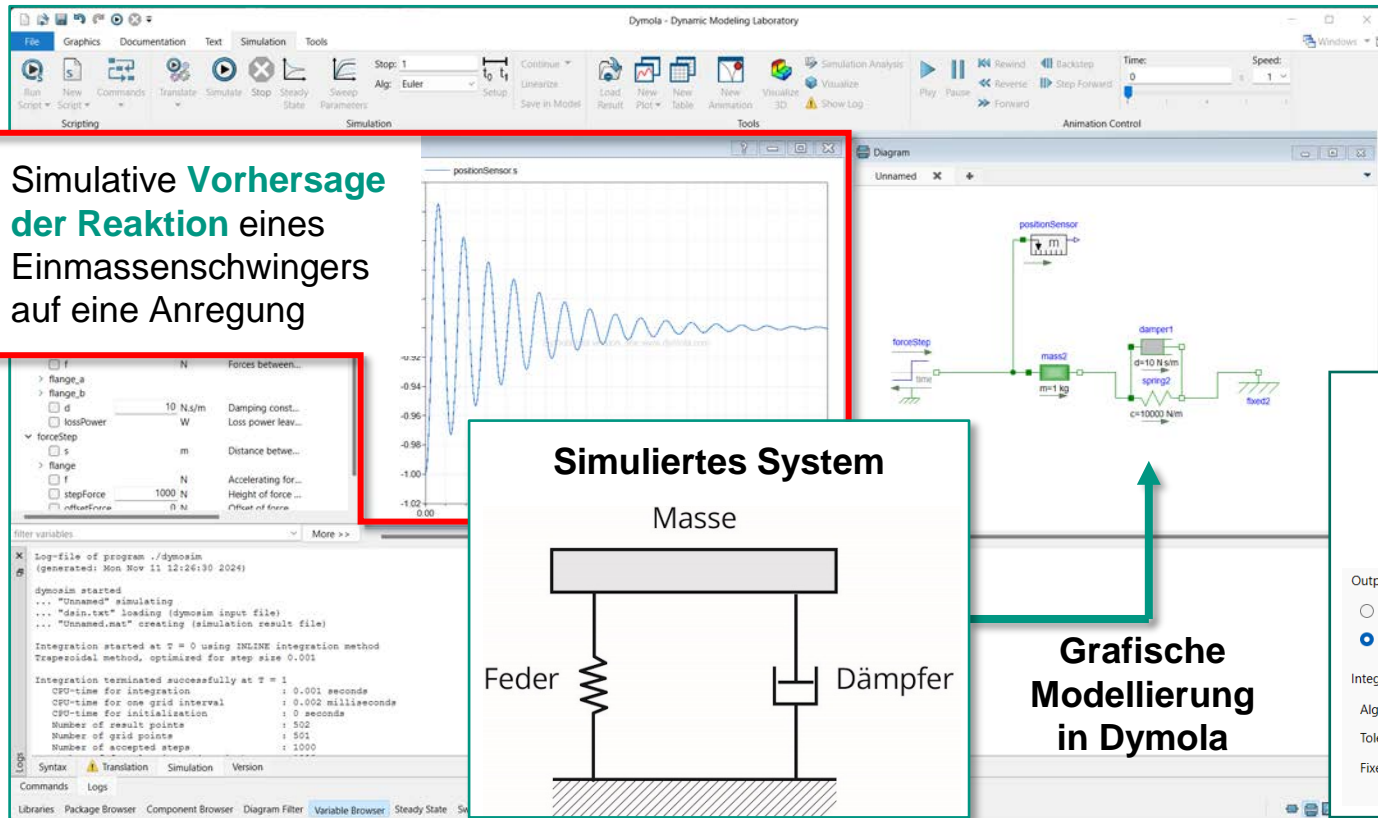


Quelle: Li et al. (2014)

Mehrkörpersimulation

Beispiel Einmassenschwinger (1) – Dymola

Simulative **Vorhersage**
der **Reaktion** eines
Einmassenschwingers
auf eine Anregung



Modellparameter

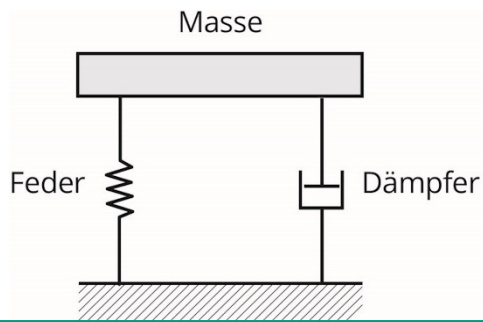
$c = 10000 \text{ N/mm}$

$d = 10 \text{ Ns/m}$

$m = 1 \text{ kg}$

Step: 1000 N

Simuliertes System



Grafische Modellierung in Dymola

Solver-Einstellungen

Solver: Euler

Solver Step Size: 0.001

Output interval

Interval length 0

Number of intervals 500

Integration

Algorithm Euler

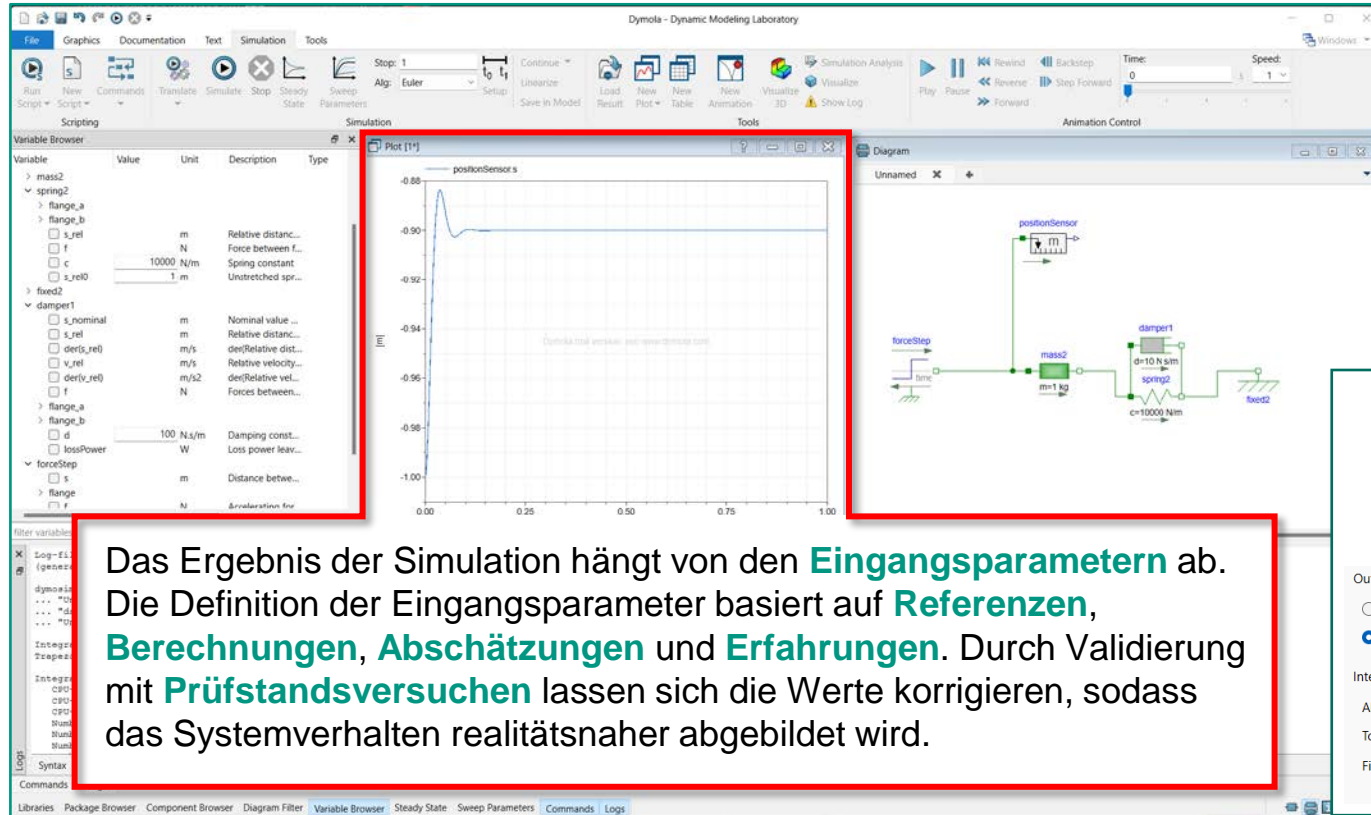
Tolerance 0.0001

Fixed Integrator Step 0.001

Integrator and step-size copied from Realtime tab

Mehrkörpersimulation

Beispiel Einmassenschwinger (2) – Dymola



Modellparameter

$c = 10000 \text{ N/mm}$

$d = 100 \text{ Ns/m}$

$m = 1 \text{ kg}$

Step: 1000 N

Solver-Einstellungen

Solver: Euler

Solver Step Size: 0.001

Output interval

Interval length 0

Number of intervals 500

Integration

Algorithm Euler

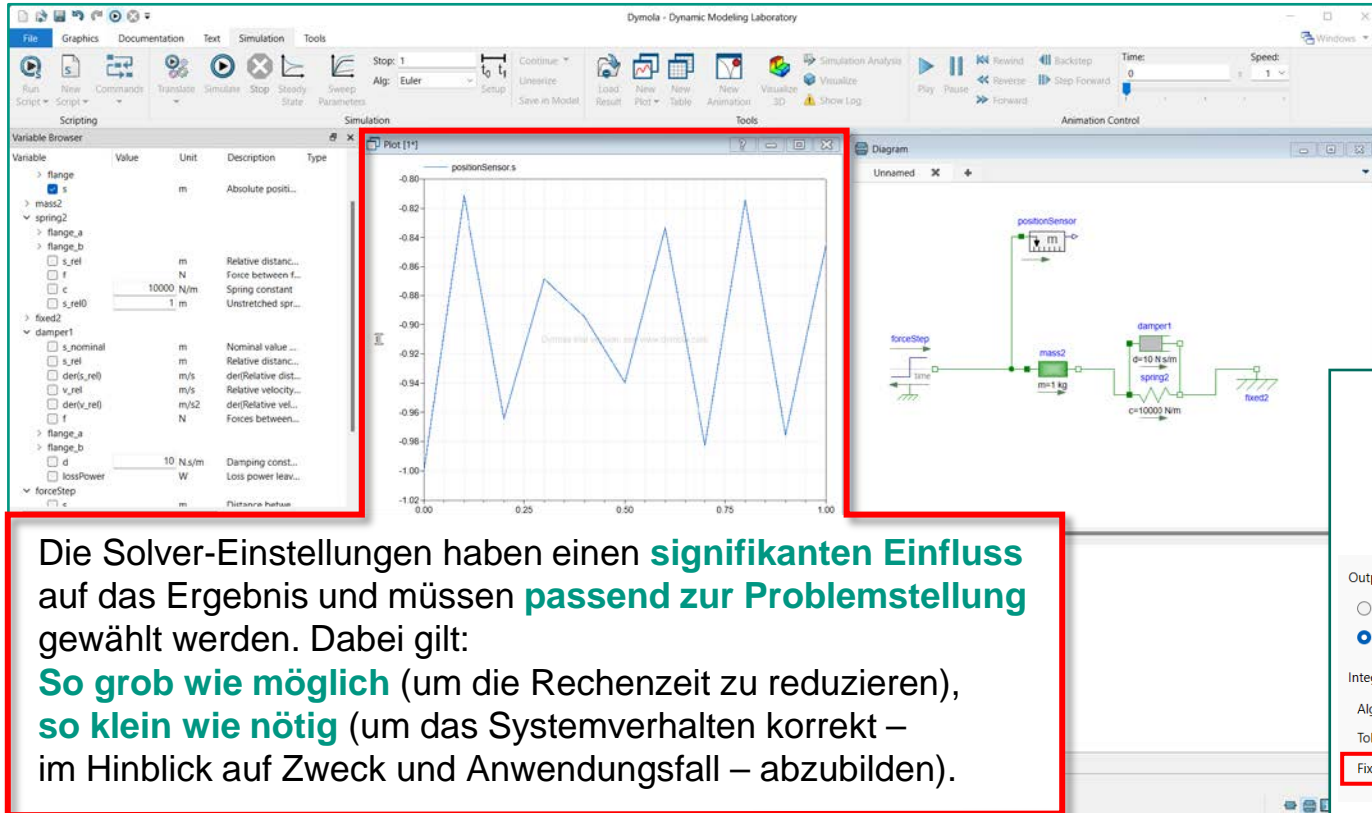
Tolerance 0.0001

Fixed Integrator Step 0.001

Integrator and step-size copied from Realtime tab

Mehrkörpersimulation

Beispiel Einmassenschwinger (3) – Dymola



Modellparameter
 $c = 10000 \text{ N/mm}$
 $d = 10 \text{ Ns/m}$
 $m = 1 \text{ kg}$
Step: 1000 N

Solver-Einstellungen
Solver: Euler
Solver Step Size: 0.1

Output interval

Interval length 0

Number of intervals 500

Integration

Algorithm Euler

Tolerance 0.0001

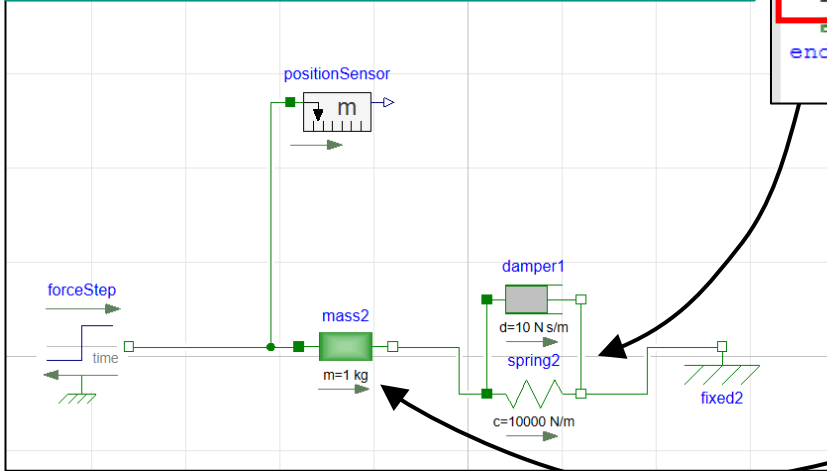
Fixed Integrator Step 0.1

Integrator and step-size copied from Realtime tab

Mehrkörpersimulation

Beispiel Einmassenschwinger (4) – Dymola

Mit Hilfe der Dymola-Umgebung können die **zugrundeliegenden Gleichungen** sehr einfach zusammengesetzt werden. Dabei muss darauf geachtet werden, die Komponenten **passend** zu verbinden.



```
model Spring "Linear 1D translational spring"
  extends Translational.Interfaces.PartialCompliant;
  parameter SI.TranslationalSpringConstant c(final min=0, start=1)
    "Spring constant";
  parameter SI.Distance s_rel0=0 "Unstretched spring length";

  equation
    f = c*(s_rel - s_rel0);
  end Spring;
```

```
model Mass "Sliding mass with inertia"
  parameter SI.Mass m(min=0, start=1) "Mass of the sliding mass";
  parameter StateSelect stateSelect=StateSelect.default
    "Priority to use s and v as states" □;
  extends Translational.Interfaces.PartialRigid(L=0,s(start=0, stateSelect=
    stateSelect));
  SI.Velocity v(start=0, stateSelect=stateSelect)
    "Absolute velocity of component";
  SI.Acceleration a(start=0) "Absolute acceleration of component";

  equation
    v = der(s);
    a = der(v);
    m*a = flange_a.f + flange_b.f;
  end Mass;
```

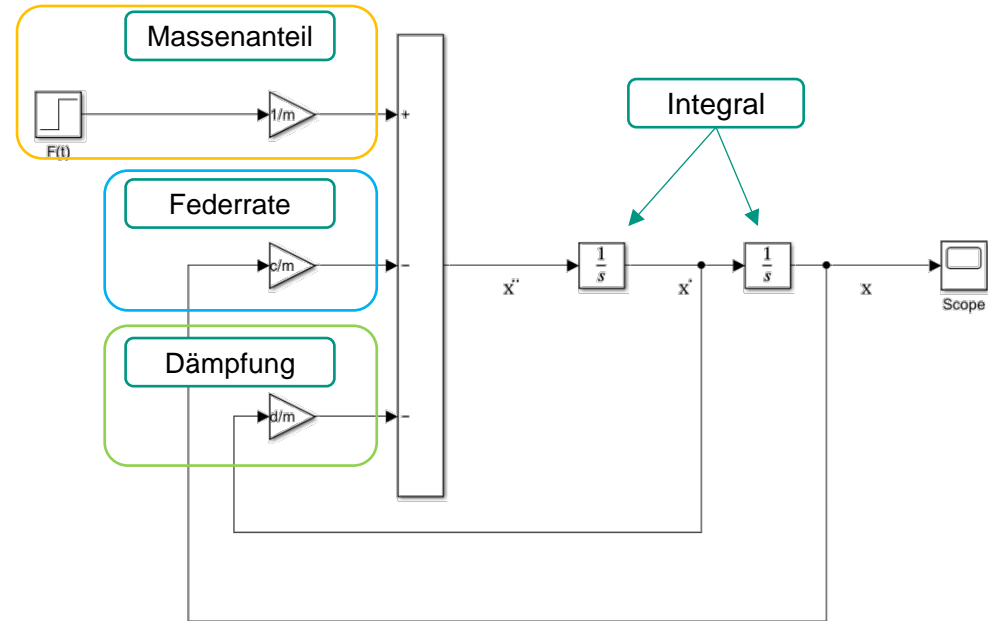
- Neben der **grafischen Modellierung** der Komponenten kann auch direkt die **zugrundeliegende Differentialgleichung** modelliert werden
- Aufstellen der Differentialgleichung eines Einmassenschwingers

$$F(t) = m\ddot{x} + d\dot{x} + cx$$

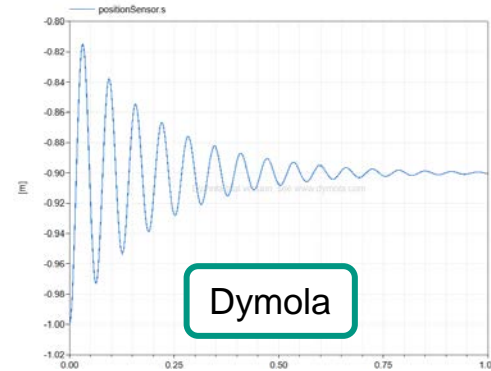
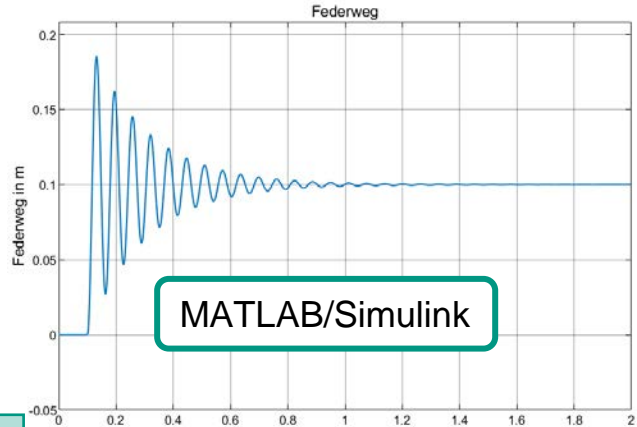
- Auflösen der DGL nach \ddot{x} , um Integration zu ermöglichen, ergibt

$$\ddot{x} = \frac{F(t)}{m} - \frac{d}{m}\dot{x} - \frac{c}{m}x$$

- Plottet man nun die Verschiebung der Masse über die Zeit ...



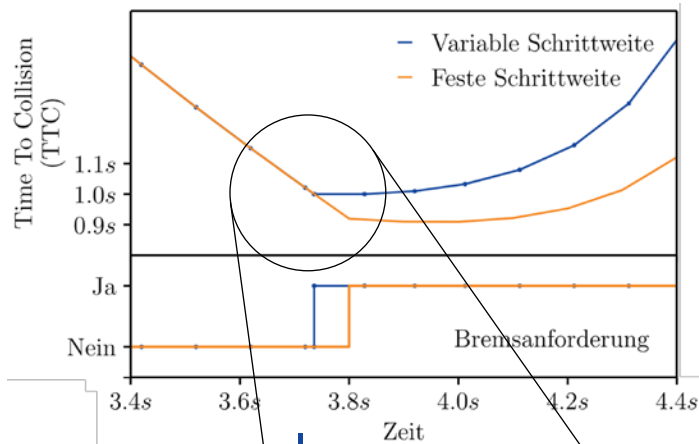
... ergibt sich das genau **gleiche Ergebnis** wie bei der grafischen Modellierung der Komponenten!



- $c = 10000 \text{ N/mm}$
- $d = 10 \text{ Ns/m}$
- $m = 1 \text{ kg}$
- Step: 1000 N

Kernaussage

Systeme lassen sich mit **unterschiedlichen Modellierungsansätzen** modellieren, die gleiche physikalische Ergebnisse liefern. Die Wahl des richtigen Verfahrens hängt von den **Anforderungen an die Modellierung** ab, wie bspw. eine **anschauliche Modellierung der Komponenten** (im Beispiel Dymola) oder eine **direkte Kontrolle des Signalfusses** und **effiziente Rechnung** (im Beispiel MATLAB/Simulink).



- Simulation des **Bremsverhaltens** eines Notbremsassistenten
- Unveränderte Modellierung und Annahmen
- Aufgrund anderer **Solver-Einstellungen** kam das Bremsignal 0,1 s später
- Dadurch ergibt sich bei 100 km/h Geschwindigkeit ein um 2,7 m **längerer Bremsweg**



Schrittweiten-
anpassung

Kernaussage

Sowohl Modellierung des Systems als auch die Einstellungen beeinflussen das Ergebnis. Bei der Nutzung von CAE-Methoden im Entwicklungsprozess sind Simulationsergebnisse mit empirischen Untersuchungen abzugleichen.

Quelle: Marius Feilhauer: "Simulationsgestützte Absicherung von Fahrerassistenzsystemen", Dissertation, Stuttgart 2018

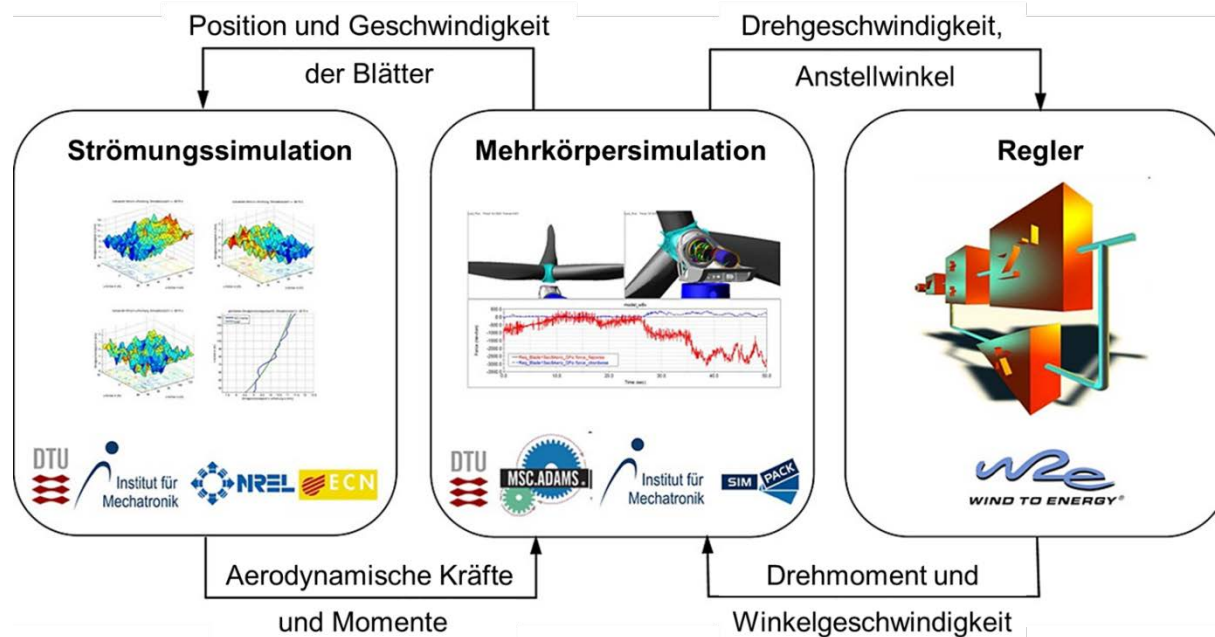
Mehrkörpersimulation

Vergleich zwischen MKS und FEM

Kategorie	MKS	FEM
Anwendungszweck	Betrachtung von Bewegungen und Kraftgrößen	Betrachtung von Verformungen und Spannungen
Anzahl Körper	Groß	Klein (oft nur 1)
Starrkörperbewegung	Groß	Von untergeordneter Bedeutung
Modellelemente	Einzelkörper, Kopplungselemente	Finite Elemente
Übertragung von Kräften	Über Kopplungselemente	Über Elementknoten
Anzahl der Freiheitsgrade	Niedrig (starre Körper) - Mittel (flexible Körper)	Hoch



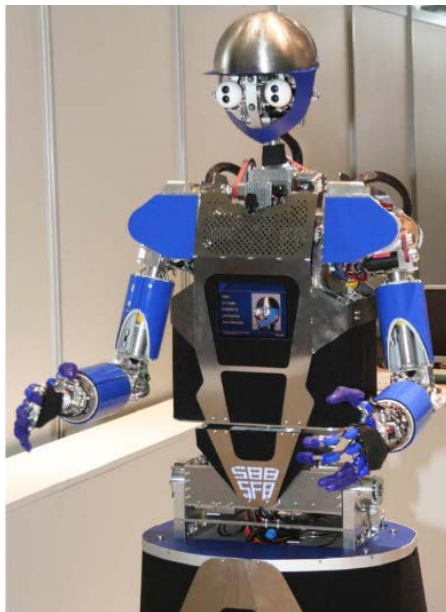
- Die MKS und rechnergestützte Methoden allgemein lassen sich nicht nur gesondert einsetzen, sondern können auch mit weiteren rechnergestützten Methoden **gekoppelt** werden:



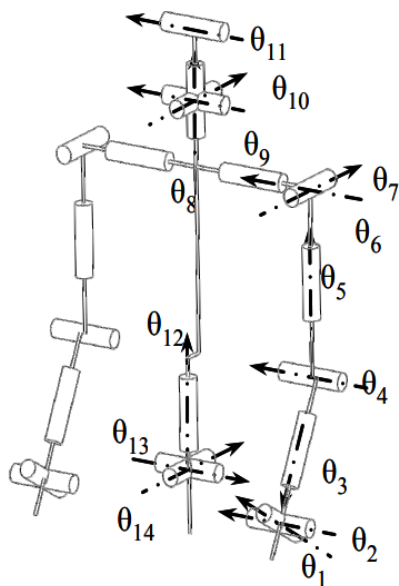
Quelle: nach Zierath et al. (2015)

Mehrkörpersimulation

Beispiel Kopplung Mehrkörpersimulation – Topologieoptimierung



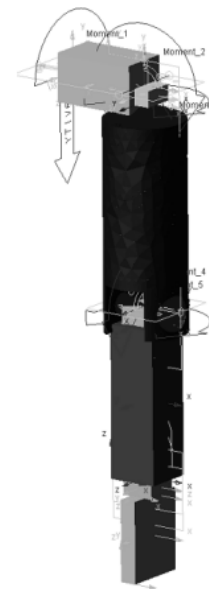
Armar III



Kinematik



Mehrkörpermodell



Oberarm als
flexibler Körper

Unterarm als
starrer Körper

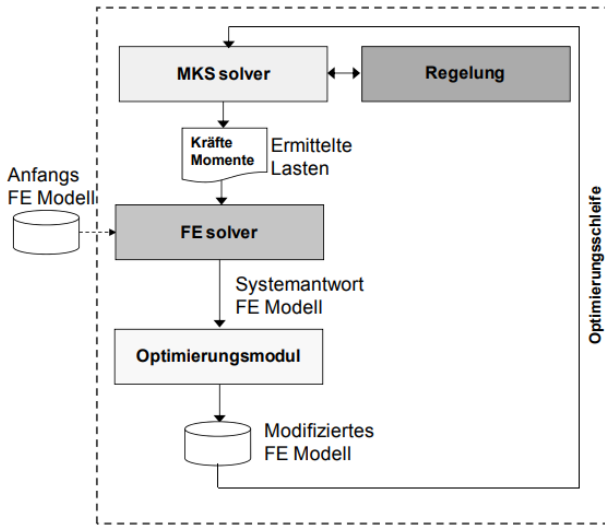
Hand als
starrer Körper

Vereinfachtes Mehrkörpermodell
für die Topologieoptimierung

Quelle: Ottnad (2009)

Mehrkörpersimulation

Beispiel Kopplung Mehrkörpersimulation – Topologieoptimierung

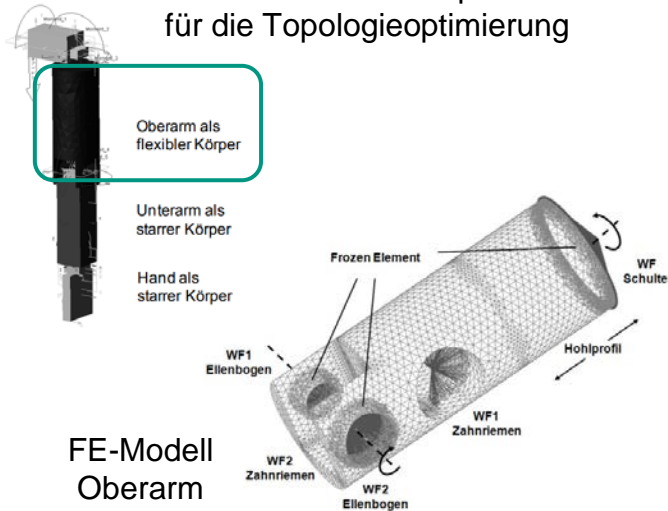


Erweiterte Optimierungsschleife

Kernaussage

Simulationsergebnisse von FEM und MKS können als Grundlage für Gestalt- und Systemoptimierungen herangezogen werden

Vereinfachtes Mehrkörpermodell für die Topologieoptimierung

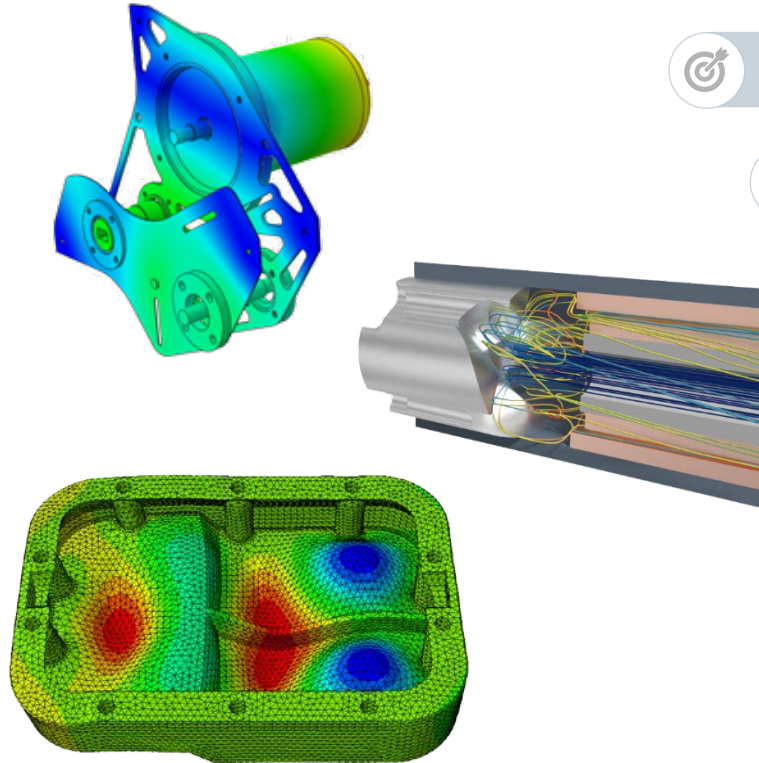



Leichtbau-Designvorschlag als Ergebnis der erweiterten Topologieoptimierung


Quelle: Ottvad (2009)


Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis




 Einführung & Lernziele


 CAE in der Produktentwicklung

 Anwendungsbereiche von CAE-Methoden

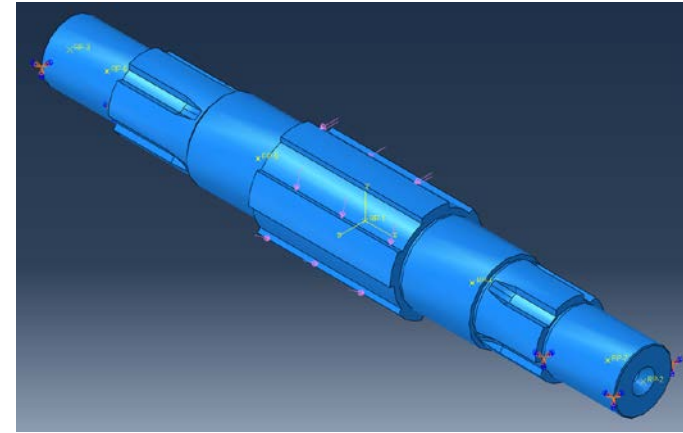
 Finite-Elemente Methode

 Mehrkörpersimulation

 Herausforderungen

 Ausblick & Zusammenfassung

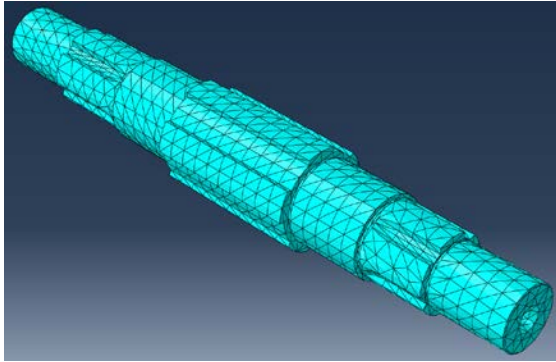
- Es gibt eine Vielzahl an Modellierungsmöglichkeiten, z. B.:
 - **Lagerung**: Festsetzen von Flächen, Kopplung von Flächen mit Referenzpunkten
 - **Kraft**: Punktlast mit Kopplung an Fläche, Flächendruck, Hertz'sche Pressung
- Eine **detailliertere Modellierung** des Lastfalls und der RB helfen, die Verschiebungen und Spannungen realistischer abzubilden
- Dies hat allerdings zur Folge, dass die Modellierung bedeutend aufwendiger wird und die Rechenzeit steigt



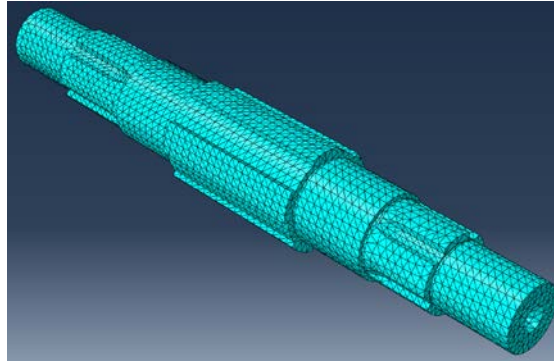
Modellierung einer belasteten Welle durch Festsetzen der Lagerflächen sowie Aufbringen des Moments über Druck auf Flanken

Kernaussage

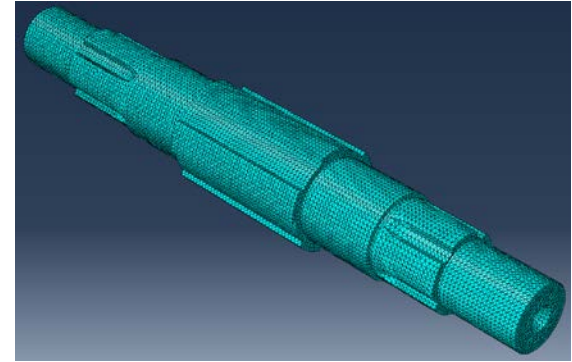
Es gibt **keine „richtige oder falsche“ Modellierung**. Die **Wahl** einer für den Anwendungsfall **geeigneten Modellierung** hängt von der notwendigen **Ergebnisqualität** und weiteren **Rahmenbedingungen**, wie bspw. der Verfügbarkeit von Daten oder der Rechendauer ab.



4 mm Kantenlänge
(12.468 Elemente)



2 mm Kantenlänge
(50.635 Elemente)

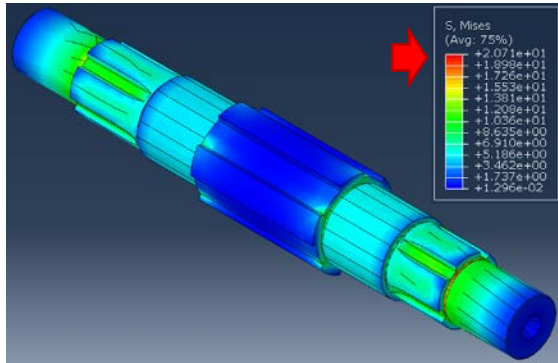


1 mm Kantenlänge
(252.488 Elemente)

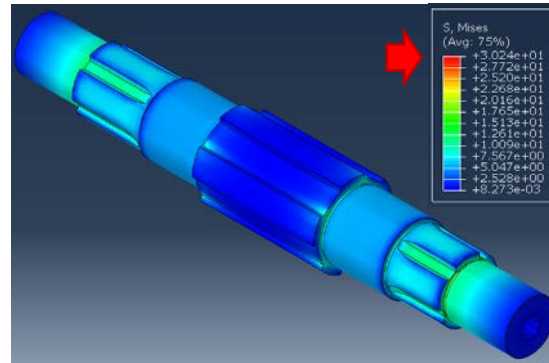
- Ein wichtiger Aspekt der Modellierung in der FEM ist die Vernetzung
 - Bei einem feineren Netz können Verschiebungen detaillierter dargestellt werden, da mehr Punkte abgebildet werden
 - Jedoch geht dieser Vorteil mit einem starken Anstieg an Rechenzeit einher
 - Eine feinere Vernetzung führt jedoch nicht zwangsläufig zu einem genaueren oder „richtigeren“ Ergebnis

CAE – Herausforderungen

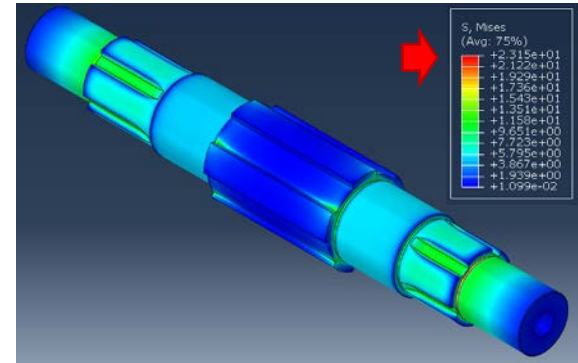
Die Darstellung der Ergebnisse kann trügerisch sein



4 mm Kantenlänge
(12.468 Elemente)



2 mm Kantenlänge
(50.635 Elemente)



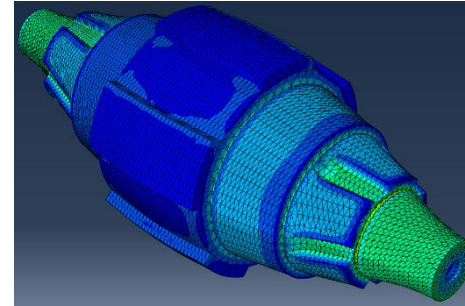
1 mm Kantenlänge
(252.488 Elemente)

- Bei der Auswertung der Darstellung fällt auf, dass alle drei Ergebnisse ähnlich aussehen
 - Aber: **Spannung variiert** um ca. 46%!
 - Mittleres Ergebnis weist eine numerische Ungenauigkeit auf, welche die max. Spannung lokal überhöht
- Frage bleibt offen, welches näher an der Realität liegt, da die max. Spannung an einem einzelnen Knoten mit **starkem Gradienten** anliegt

CAE – Herausforderungen

Interpretation der Ergebnisse

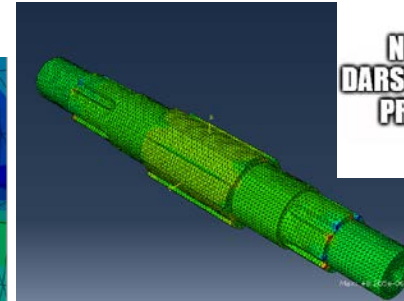
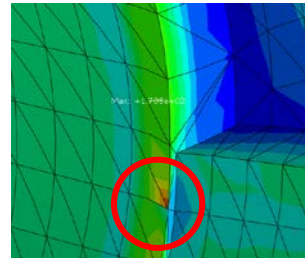
- Darstellung der Ergebnisse zeigt eine maximale Spannung von 170.8 MPa
- Welle zeigt scheinbar **deutliche Aufweitung**
- Verschiebung in radiale Richtung **verschwindend gering** (ca. 10 nm)
 - Darstellung ist mit **Skalierungsfaktor** versehen
- Detaillierte Analyse zeigt, dass die **maximale Spannung** in Folge einer **numerischen Ungenauigkeit** entsteht



**RIESIGE
VERFORMUNG**



**NUR EIN
DARSTELLUNGS-
PROBLEM**



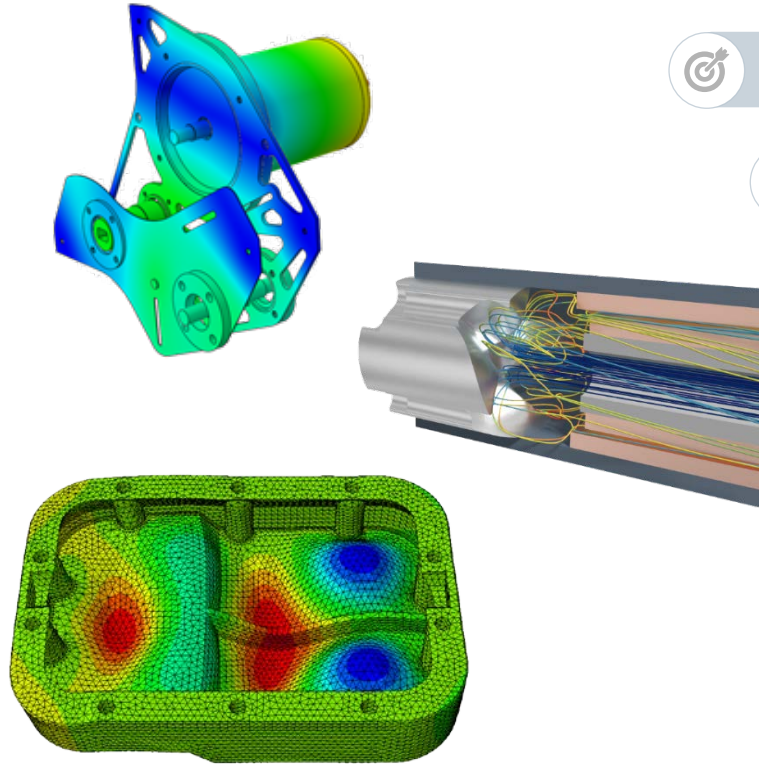
Kernaussage





Die Voraussetzung, aus der Nutzung von CAE-Methoden aussagekräftige Erkenntnisse zu gewinnen, sind eine adäquate Modellierung und Interpretation der Ergebnisse



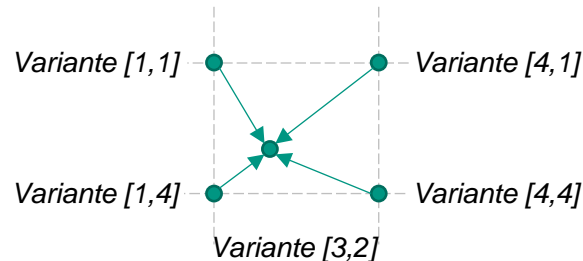
Maschinenkonstruktionslehre C – CAE

Inhaltsverzeichnis



-  Einführung & Lernziele
-  CAE in der Produktentwicklung
-  Anwendungsbereiche von CAE-Methoden
-  Finite-Elemente Methode
-  Mehrkörpersimulation
-  Herausforderungen
-  Ausblick & Zusammenfassung

- Werden verschiedene **Varianten** und **Konfigurationen** von Systemen analysiert, kann die **Anzahl** an **Simulationen** je nach Anzahl der Parameter **stark ansteigen**
- Zur **Reduzierung** des **Rechenaufwands** kann Künstliche Intelligenz eingesetzt werden, indem durch die KI eine **Vorauswahl der Parametersätze** getroffen wird
- Mit Hilfe einer **statistischen Versuchsplanung** (häufig auch **Design of Experiments** bzw. DoE) können so genannte **Corner Cases**, das sind Extremfälle an den Rändern des Parameterraums, ausgewählt und analysiert werden
- **Wenige einzelne Berechnungen** können durch verschiedene Ansätze (Machine Learning, neuronale Netze) genutzt werden, um einen größeren Lösungsraum durch **Interpolation** zu untersuchen



- Generatives Design bezeichnet einen Entwicklungsprozess, bei dem auf Basis **definierter Rahmenbedingungen** (z. B. Lasten, Materialien, Fertigungsverfahren) **automatisch** eine **Vielzahl** an möglichen **Designvarianten** erzeugt und bewertet wird.
- Neue Ansätze kombinieren das herkömmliche Generative Design mit Methoden der **künstlichen Intelligenz**, z. B. für
 - die Identifizierung neuer **Designkonzepte** und **Materialkombinationen** durch **KI-Algorithmen**
 - die Automatisierung repetitiver Aufgaben wie **Aufbereitung von Optimierungsergebnissen**, **Durchführung von Simulationen** oder **Ableiten von technischen Zeichnungen**



Kernaussage

Bestehende CAE-Methoden werden **kontinuierlich weiterentwickelt** und um künstliche Intelligenz erweitert und bieten so für die Zukunft ein großes Potential

Generative KI entwickelt sich schnell weiter und wird bereits in vielen Bereichen eingesetzt



Können diese Modelle auch für die Dimensionierung technischer Systeme eingesetzt werden?

Dimensionierung einer Getriebewelle

■ Input-Prompts

■ Aufgabe 1

Berechne das zulässige Torsionsmoment für eine **statische Torsionsbelastung**. Berücksichtige dabei die Kerbe für einen abgesetzten Rundstab mit folgenden gegebenen Werten:

Sicherheitsfaktor: 1,5

0,2%-Dehngrenze: 900 N/mm²

Plastische Formzahl für Torsion: 1,33

Durchmesser Welle d1 = 26mm

Durchmesser Welle d2 = 30mm

Kerbradius = 1,5mm

■ Aufgabe 2

Berechne das zulässige Biegemoment für eine **wechselnde Biegebelastung**. Berücksichtige dabei die Kerbe für einen abgesetzten Rundstab mit folgenden gegebenen Werten:

Sicherheitsfaktor: 2

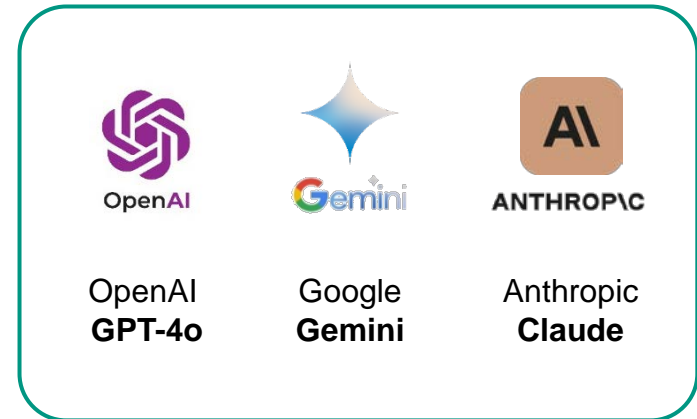
Wechselfestigkeit für Biegung: 550 N/mm²

Durchmesser Welle d1 = 26mm

Durchmesser Welle d2 = 30mm

Kerbradius = 1,5mm

Vergleich von 3 Modellen



CAE – Ausblick

Fallstudie Generative KI – Verschiedene LLM führen zu unterschiedlichen Ergebnissen

	Übung (Rechnung nach DIN)	OpenAI – GPT-4o	Google – Gemini	Anthropic – Claude 3.5 Sonnet
Kerbformzahl Torsion	1,42	2,13	1,23	1,6
Zul. Torsionsmoment	1270,61 Nm	971,88 Nm	1137,00 Nm	1296,23 Nm
Kerbwirkungszahl Biegung	1,8	$(\beta_{k,b} = \alpha_{k,t})$	$(\beta_{k,b} = \alpha_{k,t})$	1,8
Zul. Biegemoment	263,49 Nm	222,42 Nm	294,5 kNm	264,26 Nm

- Große Unterschiede in der Berechnung der Kerbformzahl
- Claude 3.5 Sonnet mit dem besten Ergebnis
- GPT-4o und Gemini nutzen **statische Kerbformzahl** für Torsion in der **dynamischen Berechnung**, was **fehlerhaft** ist und zu einer Überschätzung des zul. Biegemoments führt.



Kernaussage

Den Ergebnissen von KI in der Produktentwicklung ist nicht blind zu vertrauen, sie müssen stets **kritisch hinterfragt** werden. Zur Bewertung der Ergebnisse ist **Beurteilungskompetenz** durch das **Verständnis der Grundlagen** unumgänglich



■ Google Gemini

Statische Torsionsbelastung

Wechselnde Biegebelastung

3. Berechnung des zulässigen Biegemoments:

Schließlich berechnen wir das zulässige Biegemoment M_b mit der Biegeformel:

$$M_b = \sigma_{\text{zul}} \cdot W_b$$

Dabei ist W_b das Biege Widerstandsmoment des abgesetzten Rundstabs. Es kann mit der Formel für den Biege widerstandsmoment eines Vollzylinders berechnet werden, wobei der Kerbeinfluss durch die Kerbwinkelzahl berücksichtigt wird:

$$W_b = (\pi \cdot (d_1^4 - d_2^4)) / (32 \cdot kt)$$

$$W_b = (\pi \cdot (26 \text{ mm}^4 - 30 \text{ mm}^4)) / (32 \cdot 1,23)$$

$$W_b = 1352,74 \text{ mm}^3$$

Einsetzen in die Biegeformel:

$$M_b = 218,75 \text{ N/mm}^2 \cdot 1352,74 \text{ mm}^3$$

$$M_b = 294,5 \text{ kNm}$$

Umrechnungsfehler von Nmm auf Nm!!

Das polare Widerstandsmoment für jeden Bereich berechnen wir mit der Formel:

$$J_p = (\pi \cdot d^4) / (32)$$

Für Bereich 1:

$$J_{p1} = (\pi \cdot (d_1)^4) / (32) = (\pi \cdot (26 \text{ mm})^4) / (32) = 201,06 \text{ mm}^4$$

Für Bereich 2:

$$J_{p2} = (\pi \cdot (d_2)^4) / (32) = (\pi \cdot (30 \text{ mm})^4) / (32) = 339,29 \text{ mm}^4$$

Falsche Formel für polares Widerstandsmoment →
Folglich auch falsche Einheit



Wechselnde Biegebelastung

Um das zulässige Biegemoment für eine wechselnde Biegebelastung unter Berücksichtigung der Kerbe zu berechnen, gehen wir schrittweise vor:

1. Kerbfaktor berechnen: Zunächst müssen wir den Kerbfaktor β_k bestimmen. Dafür benötigen wir die Formzahl α und die Kerbempfindlichkeit η . Da diese nicht gegeben sind, müssen wir sie abschätzen oder aus Tabellen entnehmen. Für diese Berechnung nehmen wir einen typischen Wert an: $\beta_k \approx 1,8$ (geschätzter Wert für einen abgesetzten Rundstab unter Biegung)
2. Kerbwirkungszahl berechnen: $K_w = 1 / \beta_k = 1 / 1,8 \approx 0,556$
3. Zulässige Biegespannung berechnen: $\sigma_{b,zul} = \sigma_{bW} \cdot K_w / S$
 $\sigma_{b,zul} = 550 \text{ N/mm}^2 \cdot 0,556 / 2$
 $\sigma_{b,zul} = 152,9 \text{ N/mm}^2$
4. Widerstandsmoment berechnen: Wir verwenden den kleineren Durchmesser d_1 , da dieser der kritische Querschnitt ist. $W_b = \pi \cdot d_1^3 / 32$
 $W_b = \pi \cdot 26^3 / 32$
 $W_b = 1.728,31 \text{ mm}^3$
5. Zulässiges Biegemoment berechnen: $M_{b,zul} = \sigma_{b,zul} \cdot W_b$
 $M_{b,zul} = 152,9 \text{ N/mm}^2 \cdot 1.728,31 \text{ mm}^3$
 $M_{b,zul} \approx 264,26 \text{ Nm}$

Das zulässige Biegemoment für die gegebene wechselnde Biegebelastung beträgt also etwa 264,26 Nm.

Bitte beachten Sie, dass diese Berechnung auf einer Schätzung des Kerbfaktors basiert. Für eine genauere Berechnung wären präzisere Angaben zur Formzahl und Kerbempfindlichkeit erforderlich, die aus spezifischen Diagrammen oder Tabellen für die gegebene Geometrie entnommen werden müssten.

Möchten Sie, dass ich einen bestimmten Teil der Berechnung näher erläutere oder haben Sie Fragen zu den getroffenen Annahmen?

- Das Modell **Claude** scheint das beste Ergebnis zu produzieren
- Exakt gleicher Kerbwirkungsfaktor wie nach DIN
 - Dieser wurde laut Text jedoch nur **geschätzt**
→ Haben wir hier nur Glück gehabt?

Kernaussage

Generative KI Modelle könnten in Zukunft ein **hilfreiches Tool** für die Dimensionierung technischer Systeme darstellen. Die Ergebnisse sind zu **hinterfragen**. Dies setzt ein **Grundverständnis der Dimensionierung** und Beurteilungskompetenz, sowohl zum Ergebnis als auch zum Vorgehen, voraus.



Lernziele der Vorlesung

Computer Aided Engineering (CAE)

Problem

Systeme mit komplizierten Geometrien und/oder vielen Teilsystemen und Abhängigkeiten lassen sich nur sehr schwer mit den bisher erlernten Dimensionierungsansätzen modellieren und auslegen.

Ziele

- Erläutern können, warum sowohl die Grundlagen der Dimensionierung als auch CAE-Methoden wichtig sind F6+8
- Verschiedene CAE-Methoden und deren Anwendungsgebiete nennen können F17
- Die Grundlagen von FEM und MKS erklären können F20+27
- Unterschiede in der Anwendung zwischen FEM und MKS nennen können F36
- Die Grenzen der CAE-Methoden diskutieren und Ergebnisse kritisch hinterfragen können F44
- Bewerten können, inwiefern KI als Teil von CAE-Methoden in der Produktentwicklung Potenziale bietet, aber auch Einschränkungen und Risiken mit sich bringt F52

Fazit

CAE-Methoden erweitern die Möglichkeiten von herkömmlicher Modellierung nach dem Nennspannungskonzept in der Produktentwicklung enorm. Durch Erweiterungen um z. B. nicht-lineares Materialverhalten oder Wechselwirkungen mit anderen physikalischen Domänen wird die Beurteilung des realen Trag- und Verformungsverhaltens von komplizierteren Gestaltungen ermöglicht. Speziell die Finite-Elemente-Methode (FEM) und die Mehrkörpersimulation (MKS) sind etablierte Methoden der Strukturberechnung. Sie sind allerdings keine Allzweck-Waffe und die Ergebnisse müssen kritisch hinterfragt werden. Hierfür ist ein Grundverständnis der Dimensionierung unumgänglich