

Studiengang Mechatronik

Modul 16:

FEM – Finite Elemente Methode

- Vorlesung -

Prof. Dr. Enno Wagner

13. Oktober 2025

Übersicht

- Stand des Bachelor-Studiums Mechatronik
- Information / Organisation zur Lehrveranstaltung
- Einführung in die Finite Elemente Methoden

Modultafel Grundstudium

4. Semester	30 ECTS	18 Lasertechnik + Labor	19 Signale und Signalverarbeitung + Labor	20 *Mechatronik 2: Control Systems	21 Sensoren und Aktoren + Labor	22 Mechatronische Konstruktion	
3. Semester	30 ECTS	12 Elektronik + Labor	13 Betriebswirtschafts- lehre	14 Mechatronik 1: Systemtheorie	15 *Microcontroller Technology + Labor	16 *Academic Skills	17 Finite Elemente Methode
2. Semester	30 ECTS	9 Elektrotechnik + Labor	7 Mathematik Vertiefung	10 Technische Mechanik 2	8 Einführung in die wissenschaftlich- technische Programmierung + Labor	6 Physik 2 + Labor	11 Konstruktion 2
1. Semester	30 ECTS	2 Mathematik Grundlagen		3 Technische Mechanik 1	1 Einführung in die Informatik	4 Physik 1 + Labor	5 Konstruktion 1

Modultafel Hauptstudium

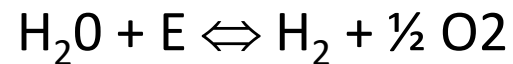
7. Semester	30 ECTS	Mechatronikprojekt30			Bachelorarbeit mit Kolloquium31		
6. Semester	30 ECTS	Praktische Baugruppen und Schaltungsentwicklung + Labor24	Interdisziplinäres Studium Generale25	*Automotive Mechatronics + Labor26	*Robotics and Autonomous Systems + Labor27	Wahlpflichtmodul 128	Wahlpflichtmodul 229
5. Semester	30 ECTS	Berufspraktisches Semester23					

Organisatorisches zum WP-Modul

- Lehrveranstaltung: Wahlpflicht-Modul im **Bachelorstudiengang**
- Name des Moduls: „Brennstoffzellen und Wasserstoff“
- Credit-Points: 5
- Vorlesung (2 SWS): Termin: dienstags, 2. Block, 10:00 – 11:30 Uhr
- Labor (2 SWS): Termin: dienstags, 3. Block, nach Vereinbarung
- Prüfungen:
 - Labortestate => bestanden (Vorleistung)
 - Klausur => benotet (Prüfungsleistung)

Themen des WP-Moduls

- Erneuerbare Energien und Speichersysteme
- Grundlagen Energiespeicherung mit Wasserstoff:



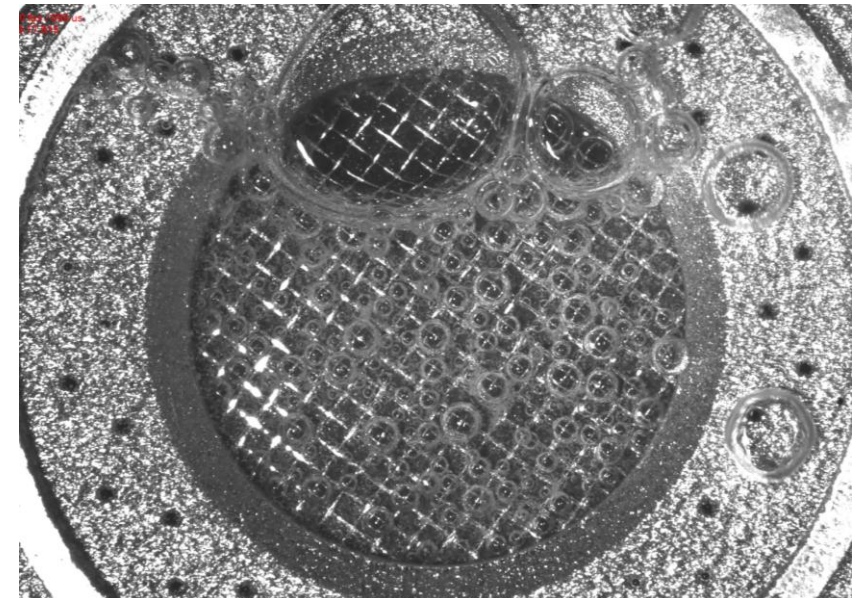
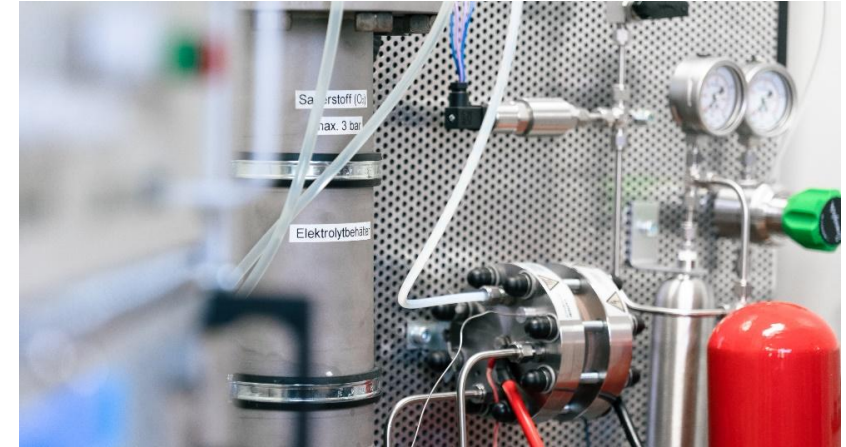
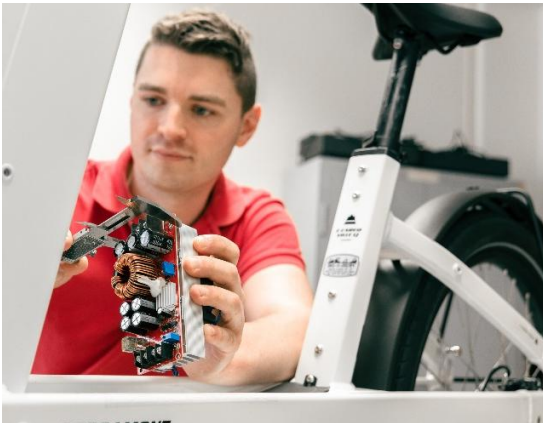
- Elektrolyse: Herstellung von grünem Wasserstoff
- Brennstoffzelle: Verstromung von Wasserstoff
- Aufnahme von Kennlinien im Labor
- Anwendungen der Wasserstofftechnik:
Geräte und Anlagen, Fahrzeuge, Haustechnik, etc.
- Energieatlas Deutschland: Erneuerbare Energielandschaft
- Energiepolitische Einordnung und Diskussion



Bild: Energiepark Mainz

Brennstoffzellen- und Wasserstofflabor

- Wasserstoffherstellung mittels Druck-Elektrolyse
- Konstruktion und Aufbau eines Cargo e-bike mit Brennstoffzellenantrieb
- Grundlagenforschung Elektrolyse: Gasblasenanalyse



***H2compress* – Verdichterstation für grünen Wasserstoff**

- Konstruktion eines kompakten Wasserstofftankgerätes
- Entwicklungsprojekt mit Industriepartnern
- Frankfurt UAS / Gaskatel: Druckelektrolyseur
- Sera Hydrogen: Wasserstoffverdichter 700 bar
- Anwendungen: Gewerbebetriebe mit Kleintransportern mit Brennstoffzellenantrieb
- Förderung: Land Hessen: ~ 500.000 €



LOEWE



Bild: Opel

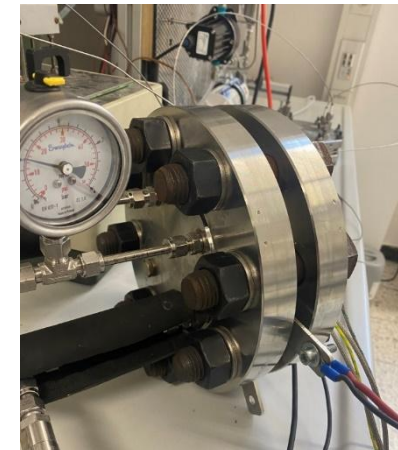


Bild: Frankfurt UAS



Bild: Sera Hydrogen

Literaturempfehlung

Enno Wagner: **Das System Brennstoffzelle**
Wasserstoffanwendungen ganzheitlich entwickeln
HANSER, München 2023

Seit September 2023 im Handel erhältlich

- Als Printausgabe
- Als e-Book

Auch in unserer Bibliothek



Modul 16:

FEM – Finite Elemente Methode

Name des Kurses:

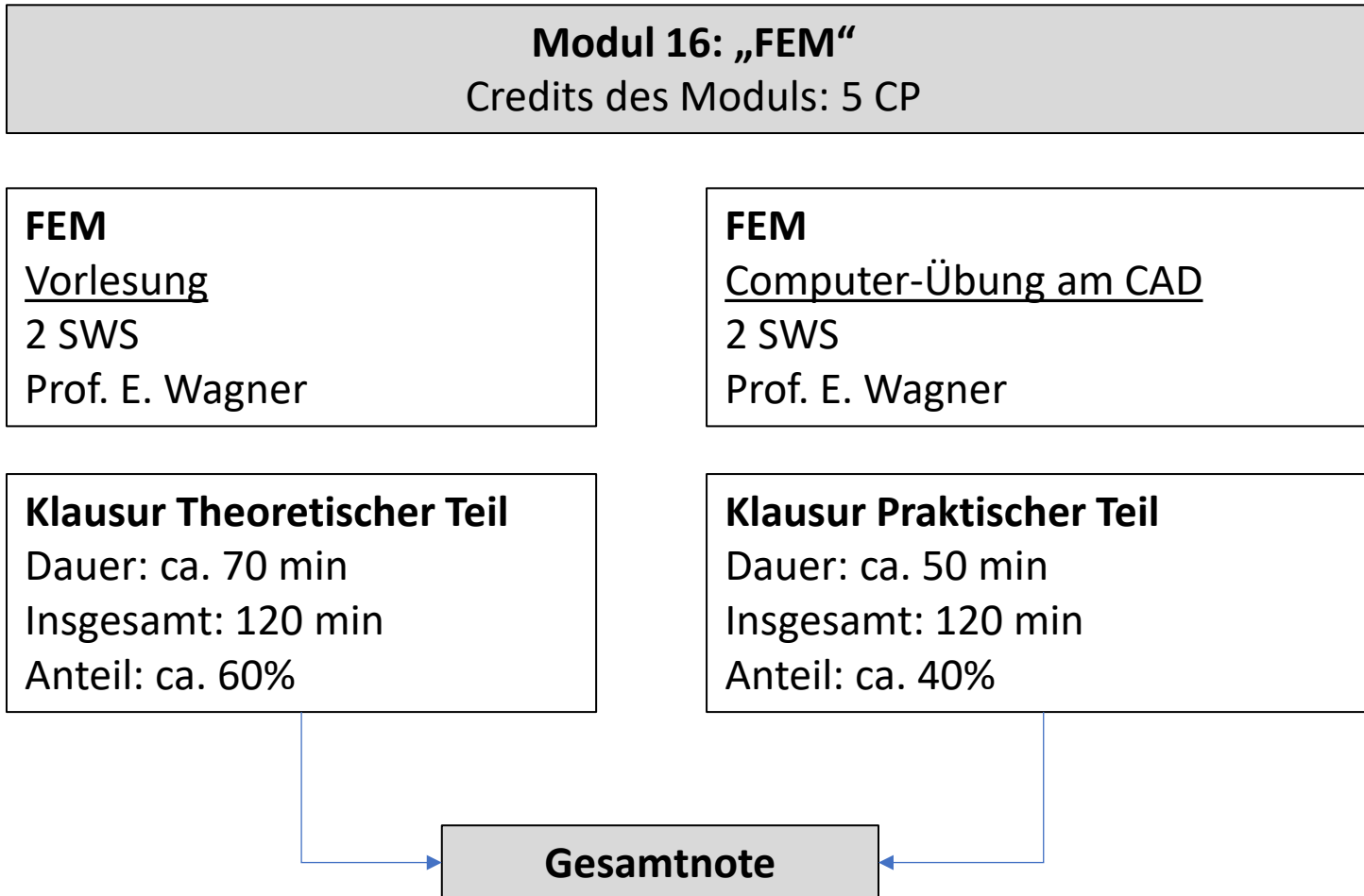
E. Wagner: Finite Elemente Methoden - WiSe 24-25

Kürzel: FEM_WiSe_25-26

Zugangsschlüssel:

FEM#2025-26

- Name der Lehrveranstaltung: „FEM“
- Lehrender: Prof. Dr. Enno Wagner
- Zielgruppe: Studierende Mechatronik, 3. Semester
- Voraussetzung: Modul 3 „Technische Mechanik 1“
- Umfang der Vorlesung: 4 SWS
- Vorlesung: Montag, 14:15 – 15:45 Uhr, in Raum 1-333
- Übung: Montags,
 - Gruppe A: 16:00 – 17:30 Uhr Raum 9-106
 - Gruppe B: 17:45 – 19:15 Uhr Raum 9-106
- Start der Übungen: nächste Woche (27.10.2025 im 5. + 6. Block)
- Gruppeneinteilung im campUAS



Modulhandbuch:

Lernziele / Lernergebnisse

Die Studierenden erwerben Kenntnisse über die FE-Methode und Fertigkeiten in der Anwendung einer FE-Software zur Auslegung von Bauteilen und Baugruppen sowie in der Interpretation der Ergebnisse.

Modulhandbuch:

Kompetenzen

Nach erfolgreicher Teilnahme an dem Modul sind die Studierenden in der Lage, den Einsatz der FE Methode bei der Entwicklung mechatronischer Systeme sinnvoll zu planen und einzusetzen. Sie können ihre Ergebnisse in wissenschaftlich adäquater Form darstellen und begründen. Die Studierenden können Bauteile und Baugruppen auslegen und ihre Ergebnisse diskutieren.

Modulhandbuch

- Einführung in die Finite-Elemente-Methode: Grundgleichungen der FE-Methode, Elementtypen, Ansatzfunktionen, Matrixsteifigkeitsmethode
- Berechnung einfacher, linear elastischer Strukturen
- Anwendung einer FE-Software anhand von Beispielbauteilen und baugruppen
- Handhabung der FE-typischen Eingaben (Elementtyp, -größe, Materialeigenschaften, Randbedingungen)
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse

Einführung in die Grundlagen der FE-Methode

- Finite-Elemente-Strukturen unter Anwendung von Stabelementen
- Energieprinzip
- Näherungsverfahren und Formfunktion
- Systemsteifigkeitsmatrix
- Thermodynamische Simulation
- Anwendung einer FEM-Software

- Dankert, J., Dankert, H.: *Technische Mechanik*;
Springer Vieweg, 7. Auflage, Wiesbaden 2013
- Klein, B.: *FEM – Grundlagen und Anwendungen der FEM*;
Vieweg Wiesbaden 2007
- Jung, M., Langer, U. Methoden der finiten Elemente für
Ingenieure, Springer Vieweg, 2. Auflage, 2013
- Albrecht, H.: Grundlagen Finite Elemente, CAE - FEM;
Skript Frankfurt UAS, 2019
- Vogel, M.: Creo Parametric und Creo Simulate;
Hanser Verlag, München 2012



Einführung

FEM - Finite Elemente Methode

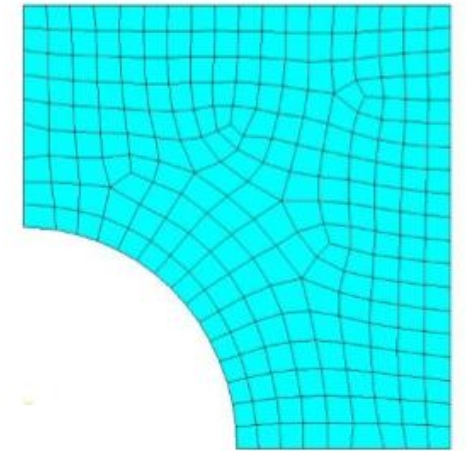
Was stellen Sie sich unter der Finiten Elemente-Methode vor ?

Wo kommt diese zur Anwendung?

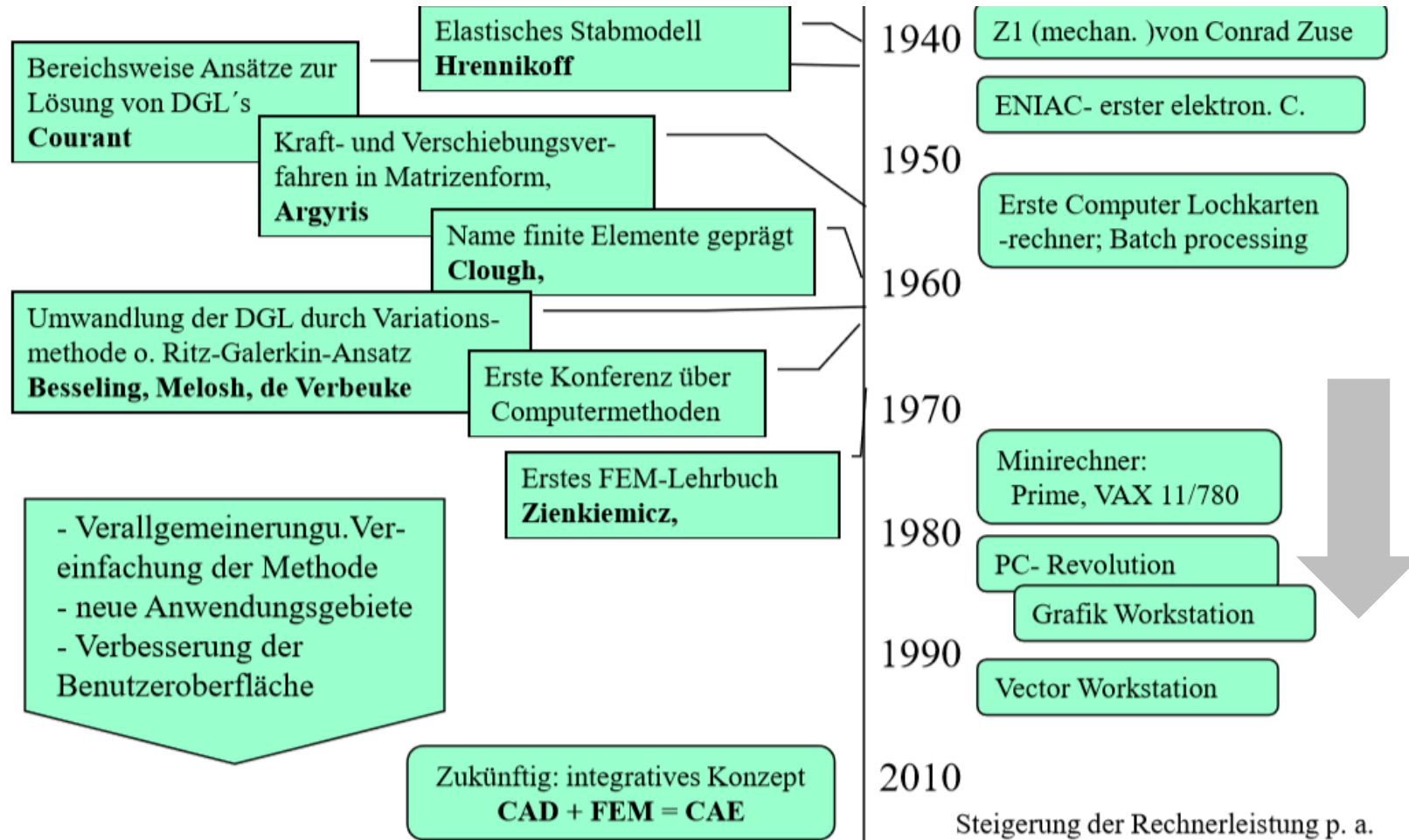
=> Kurzes Brainstorming in Kleingruppen

Finite Elemente (FE)

- Numerisches Verfahren, mit einer Vielzahl kleiner Elemente mit endlicher / begrenzter Ausdehnung => finite Elemente
- Lösung aller relevanten physikalischen Gleichungen in den FE
- Festigkeits- und Verformungsuntersuchungen von Festkörpern
- Elektrische Felder und räumliche Temperaturverteilung
- Komplexe Geometrien (analytisch praktisch nicht berechenbar)
- Unterteilung in endlich viele Teilgebiete (Teilkörper)
- Lösung über Ansatzfunktion
- Unterschied: Integralrechnung (analytisch) mit infinitesimal kleinen Gebieten



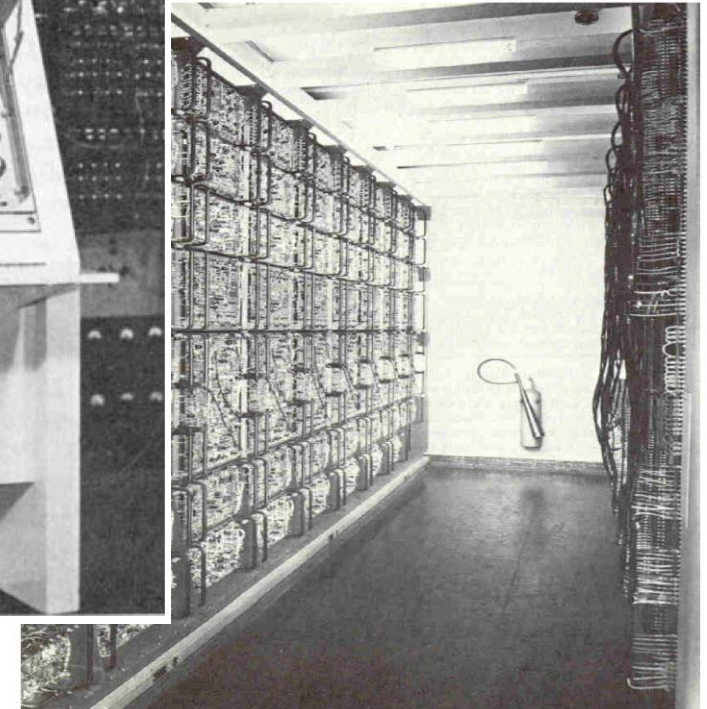
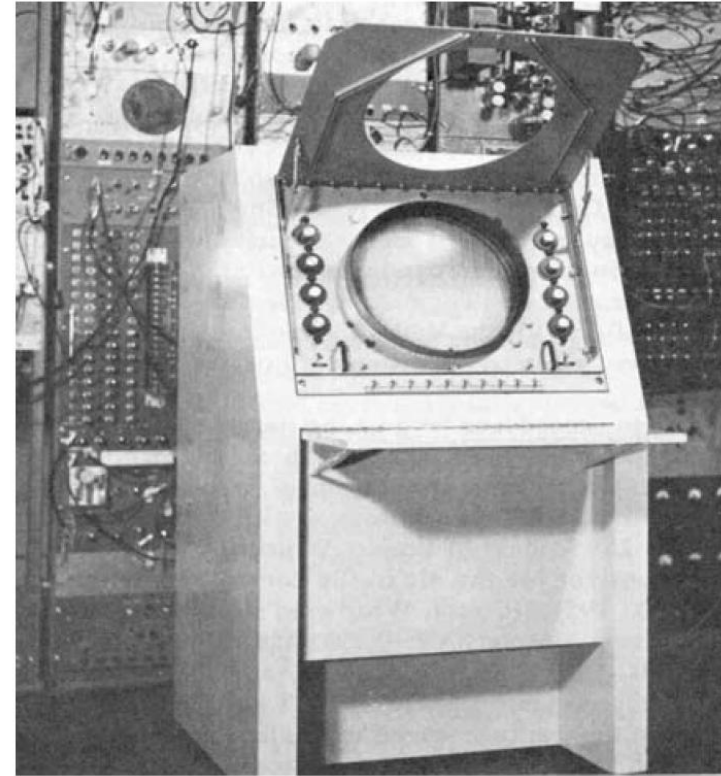
Geschichte der Finiten Elemente



Quelle: Skript, Prof. Albrecht, SS2019

Whirlwind Arithmetic Unit

- Um 1950, MIT, Cambridge, USA
- Ursprung: Servomechanism Laboratory
- Ziel: **Simulation Flugzeuge, Stabilitätskontrolle**
- Ausgründung: MIT Digital Computer Laboratory, in den 1950ern
- Speicher: 20 Wörter, später 256 Wörter
- Gestaltungsziel: 1024 => 2024 Wörter
- 15.500 Vakuum-Röhren



Quelle:
The Engineering Design Revolution
©David E. Weisberg 2008

Heute

- Begriff: Computer aided engineering => CAE
- CAE-Systeme sind fester Bestandteil der Ingenieurausbildung
- Integration aus CAD und FEM => CAE
- Vielfältigste Anwendungsbereiche
 - Automobilbau
 - Medizintechnik
 - Mechatronik
 - Gerätetechnik
 - Strömungsmechanik
 - Thermodynamik



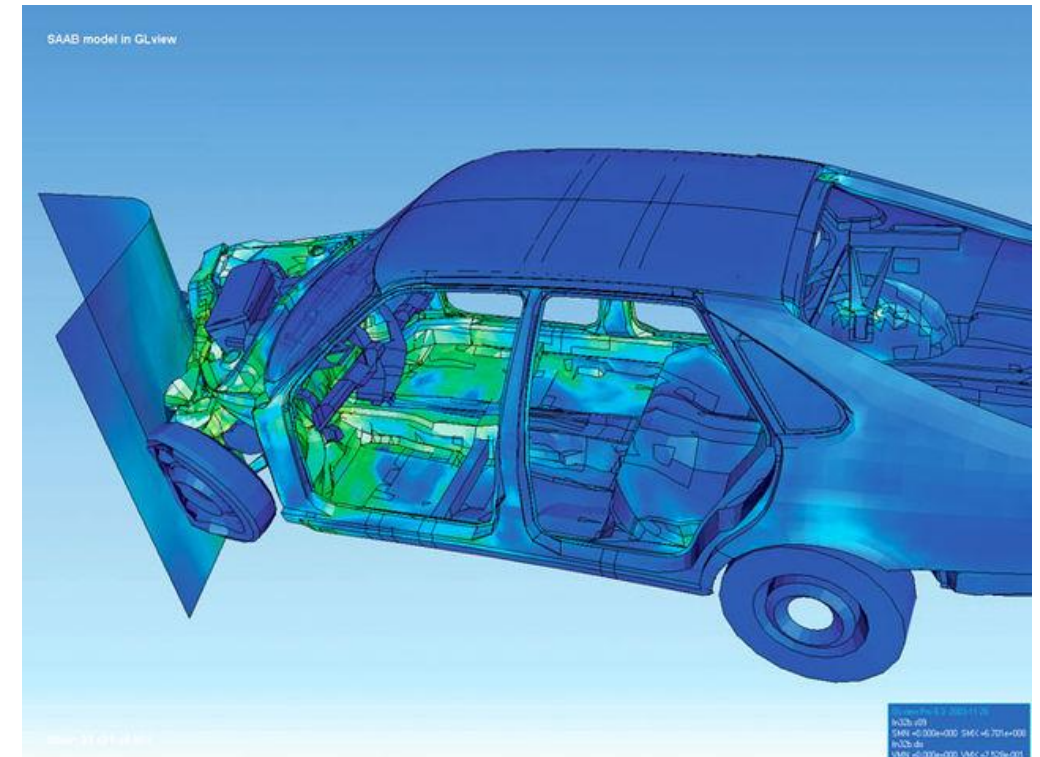
Quelle:
Skript Prof.
Albrecht, FEM
Grundlagen,
Seminarplaner
CADFEM 2011

Versuch



Quelle: Wikimedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=crash+test&title=Special:MediaSearch&go=Go&type=image>

FEM Simulation



Quelle: Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:FAE_visualization.jpg

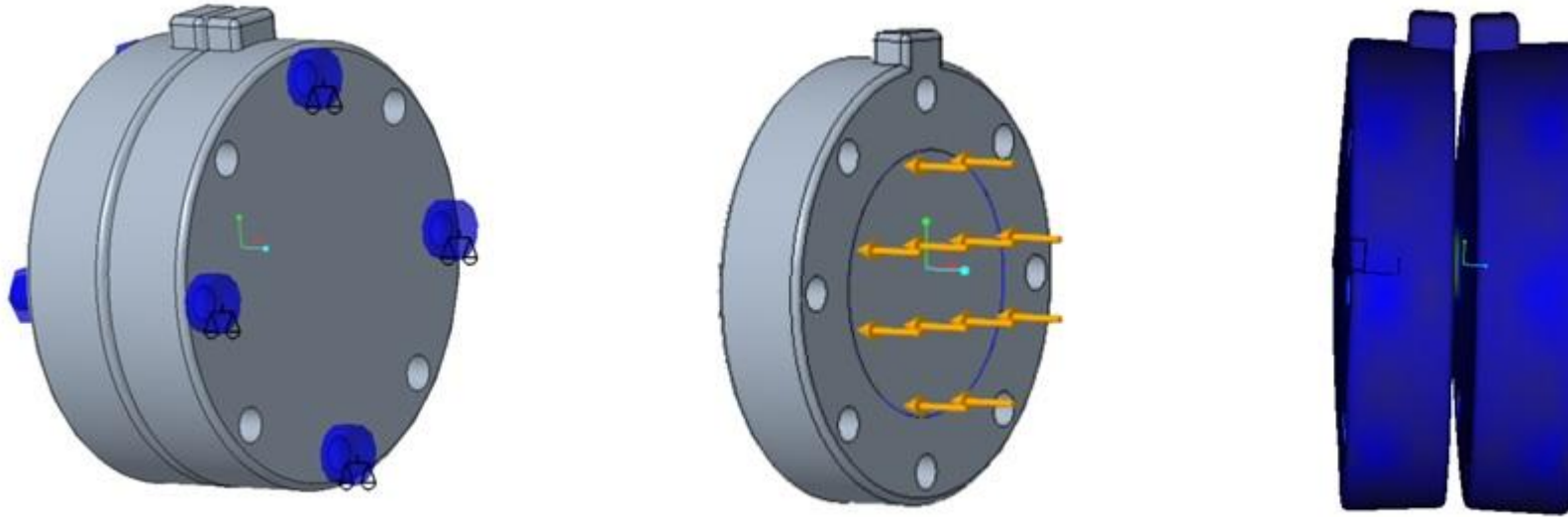
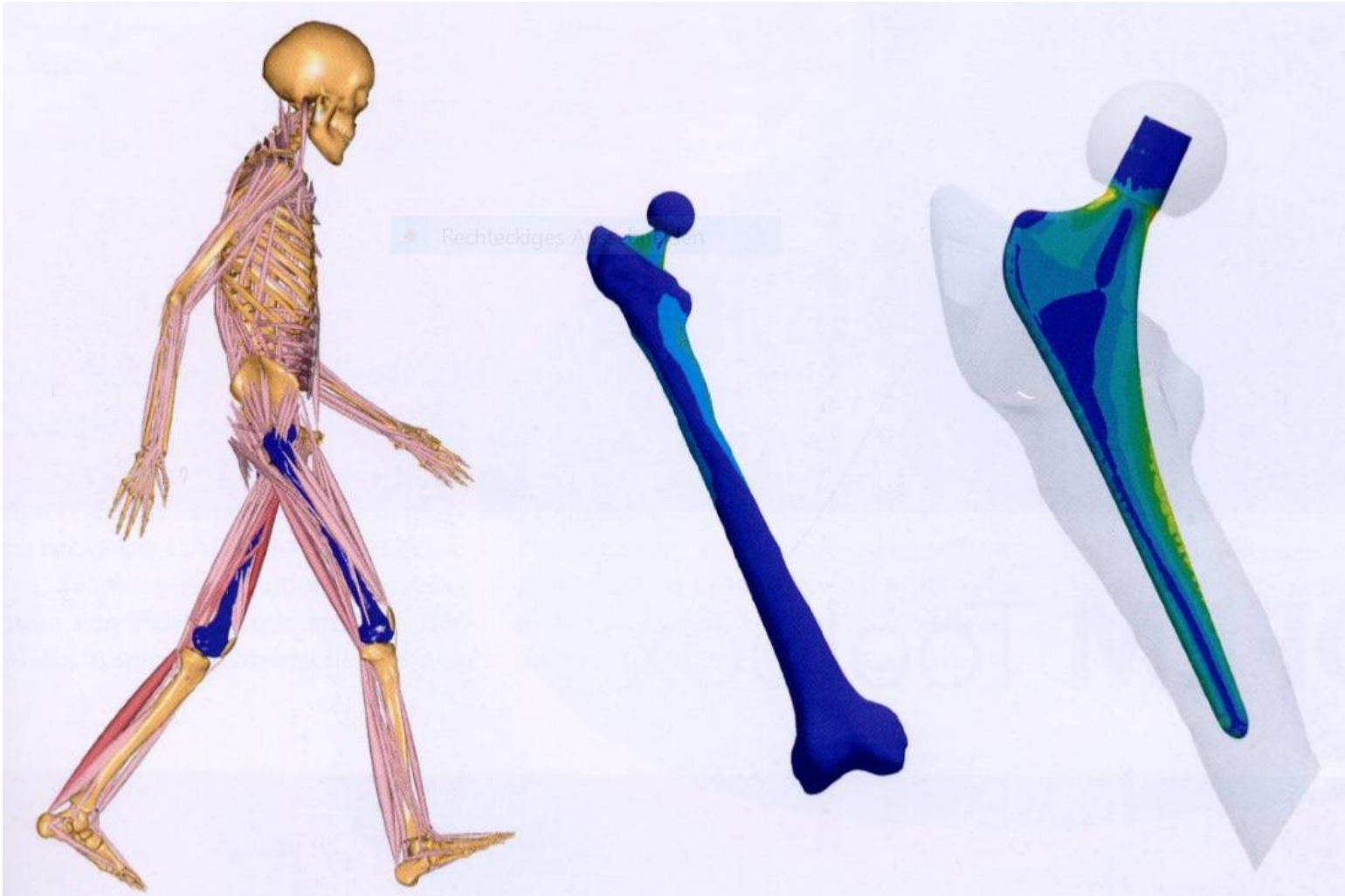


Bild:
Frankfurt UAS

FEM Analyse

- Durchbiegung der Endplatten eines Druck-Elektrolyseurs
- Auslegung auf bis zu 100 bar
- Simulation im Zusammenbau



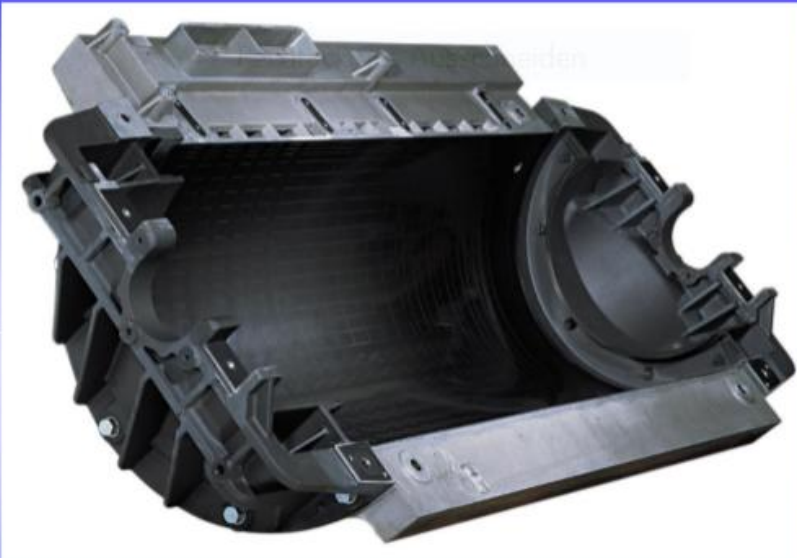
Berechnung von Gelenk- und Muskelkräften

Quelle:

Skript Prof. Albrecht, FEM Grundlagen,
Seminarplaner CADFEM 2011

3. LASER - Belichter - Hohlbett

LASER image setter - indrum



Funktionen:

- Anlage und Fixierung der zu belichtenden Druckplatte
- justagefreie Aufnahme von Bauteilen
- Steifigkeit für die Belichtungsbaugruppe

Geometrie:

- R 275 + 1 mm
- Zylindrizität 25 µm auch unter Belastung im Betrieb
- Winkel 180 °
- Länge 1100 mm (nur Zylinderfläche)

Schnittstellen:

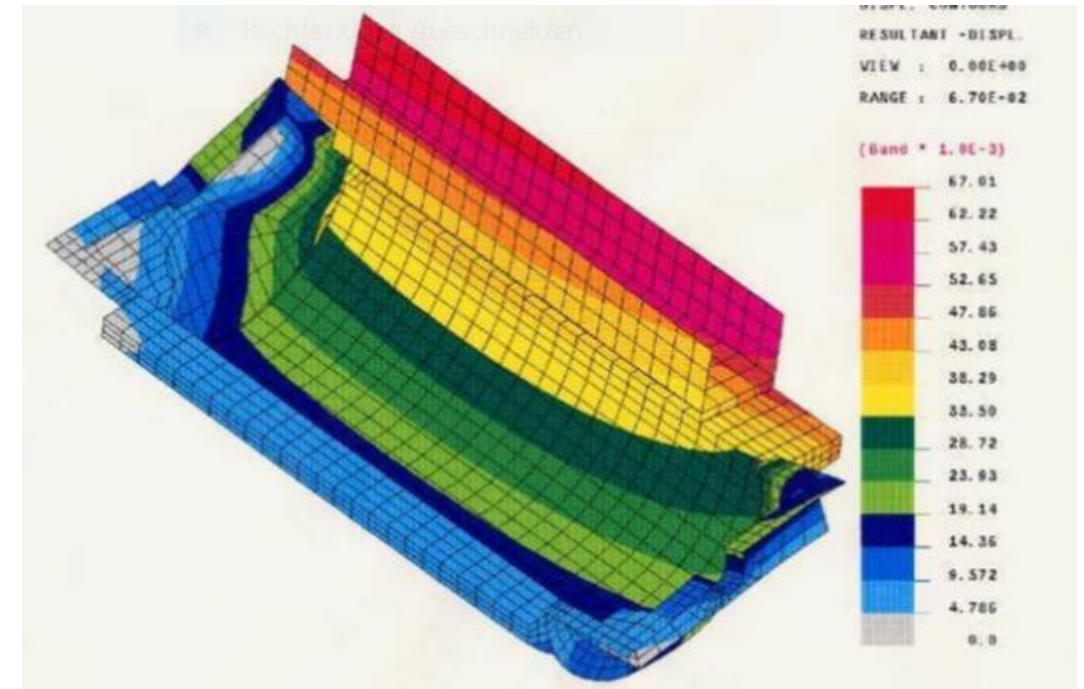
Optikmodul, Führungen Scanmodul, Führungen MAT, Registerstanze, Grundgestell (dazu schwingungs isoliert ab 20 Hz)

KP 15.02.2000

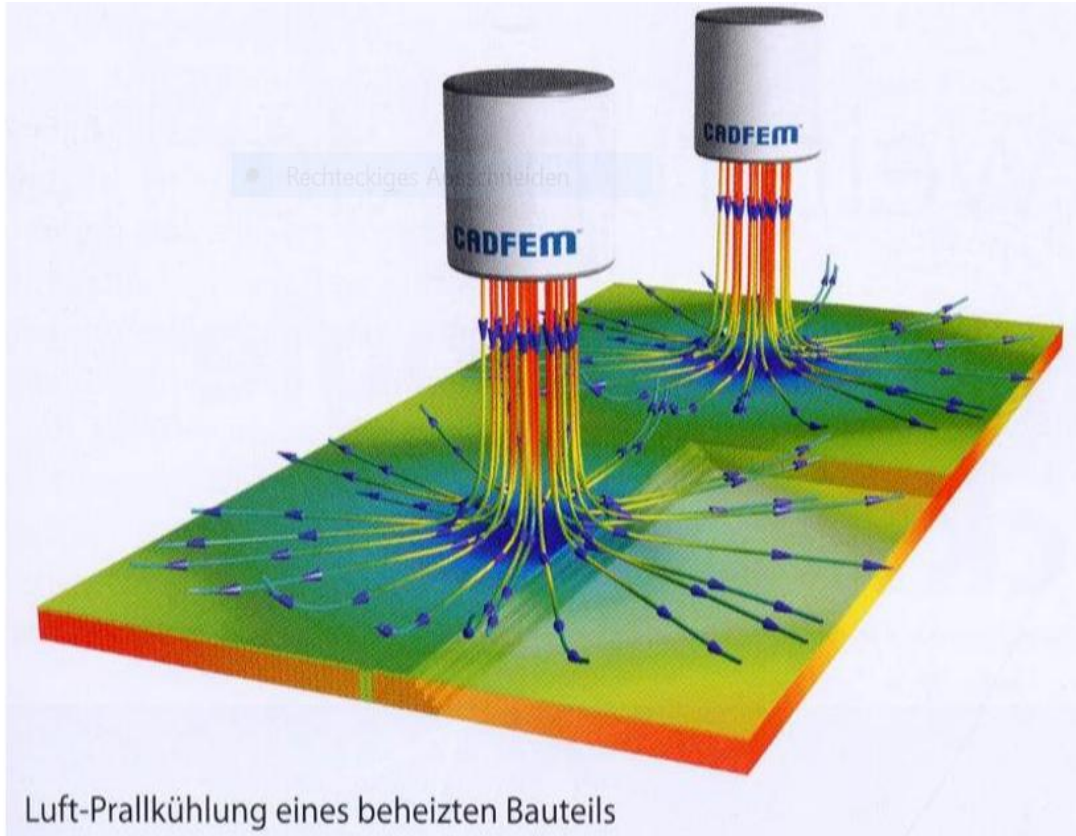
Prof. Dr. H. Albrecht

10

Simulation von Verschiebungen, Vergleichsspannungen und Eigenfrequenzen



Quelle: Skript Prof. Albrecht, FEM Grundlagen, 2019



Luft-Prallkühlung

- Strömungstechnische Simulation der Luft
- Wärmeleitung in der angeströmten Platte

Quelle:

Skript Prof. Albrecht, FEM Grundlagen,
Seminarplaner CADFEM 2011

Sicherheit

⇒ Vermeidung von aufwendigen Tests

⇒ neue Qualität von Entwicklungen, die nicht testbar sind

• Rechteckiges Ausschneiden

Wirtschaftlichkeit

⇒ kürzere Entwicklungszeiten durch Simulation und damit Verringerung von zeitintensiven Musterbau- und Testzyklen

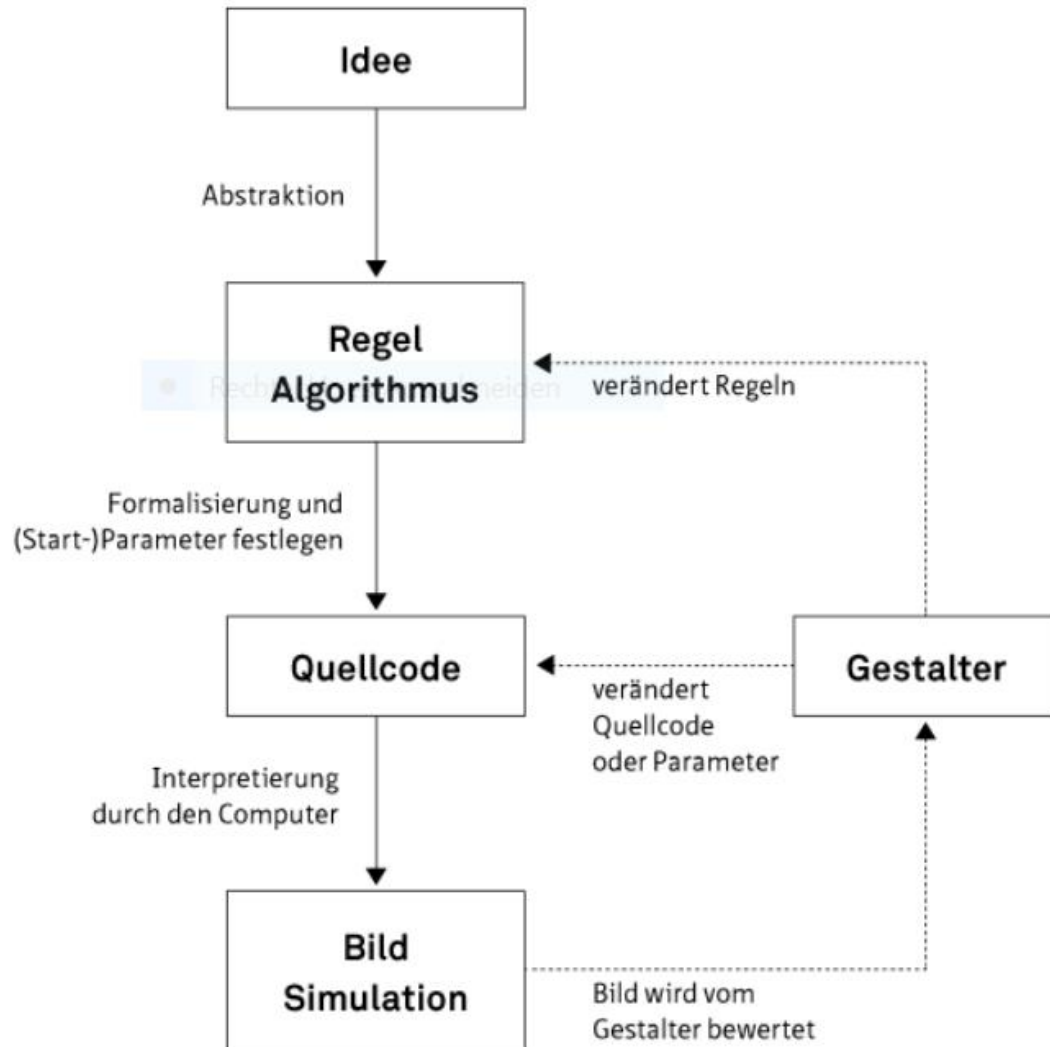
⇒ optimierte Bauteile hinsichtlich:

- Masse
- Steifigkeit
- Spannungsverteilung
- Schwingungsverhalten

Quelle:
Skript Prof. Albrecht,
FEM Grundlagen, 2019

... und wie sieht die Zukunft der FE – Methoden aus ?

- Ursprung in der Architektur
- Basis ist ein erster Entwurf (CAD)
- Über einen Algorithmus erfolgt eine Computersimulation
- Veränderung durch Computer
- Entscheidung / Auswahl durch Konstrukteur

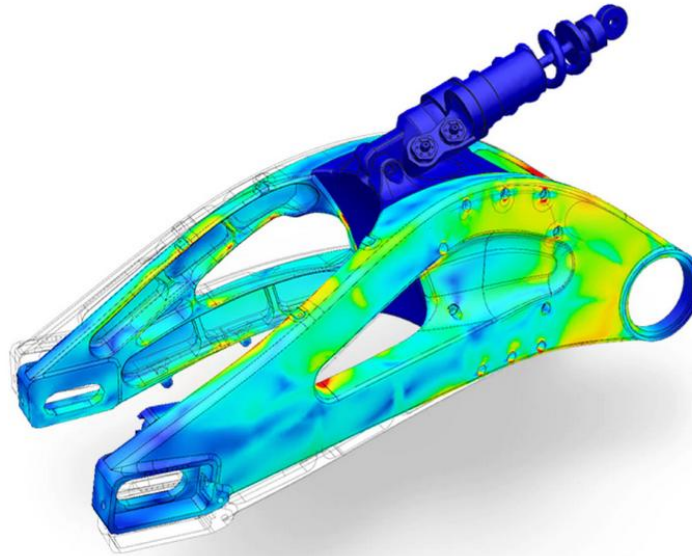


Quelle:

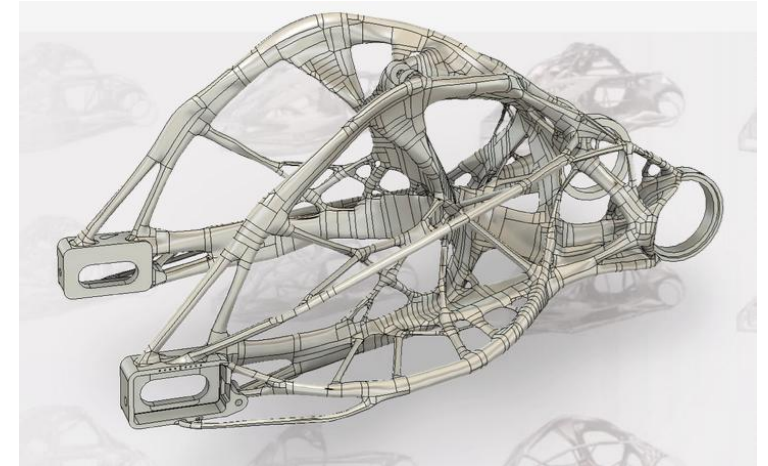
Bohnacker, H., Laub, J., Groß, B., Lazzeroni, C.: Generative Gestaltung, www.generative-gestaltung.de, 2009



CAD Konstruktion



FEM Simulation



Generatives Design

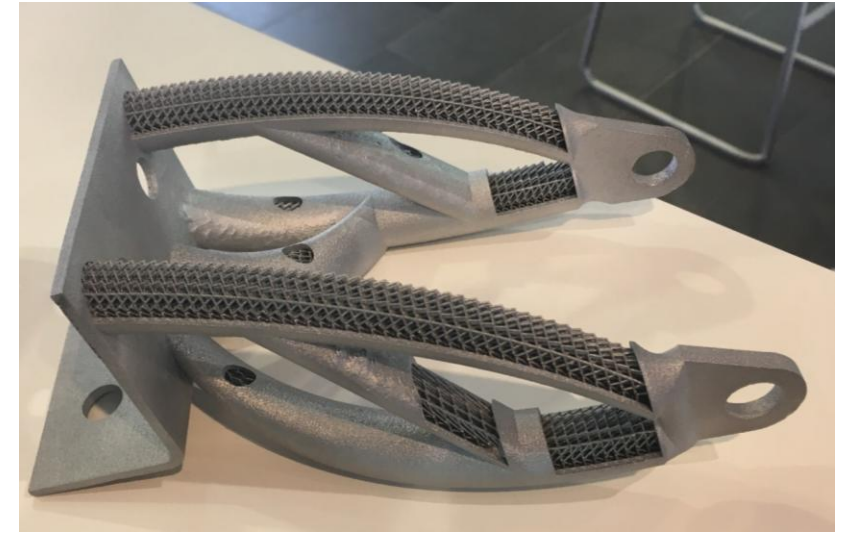
Beispiel Konzept E-Fahrzeug e.GO der RWTH Aachen



Herkömmliche Fertigung aus mehreren Blechteilen. Mittels verschiedensten, aufwendigen Arbeitsschritten hergestellt



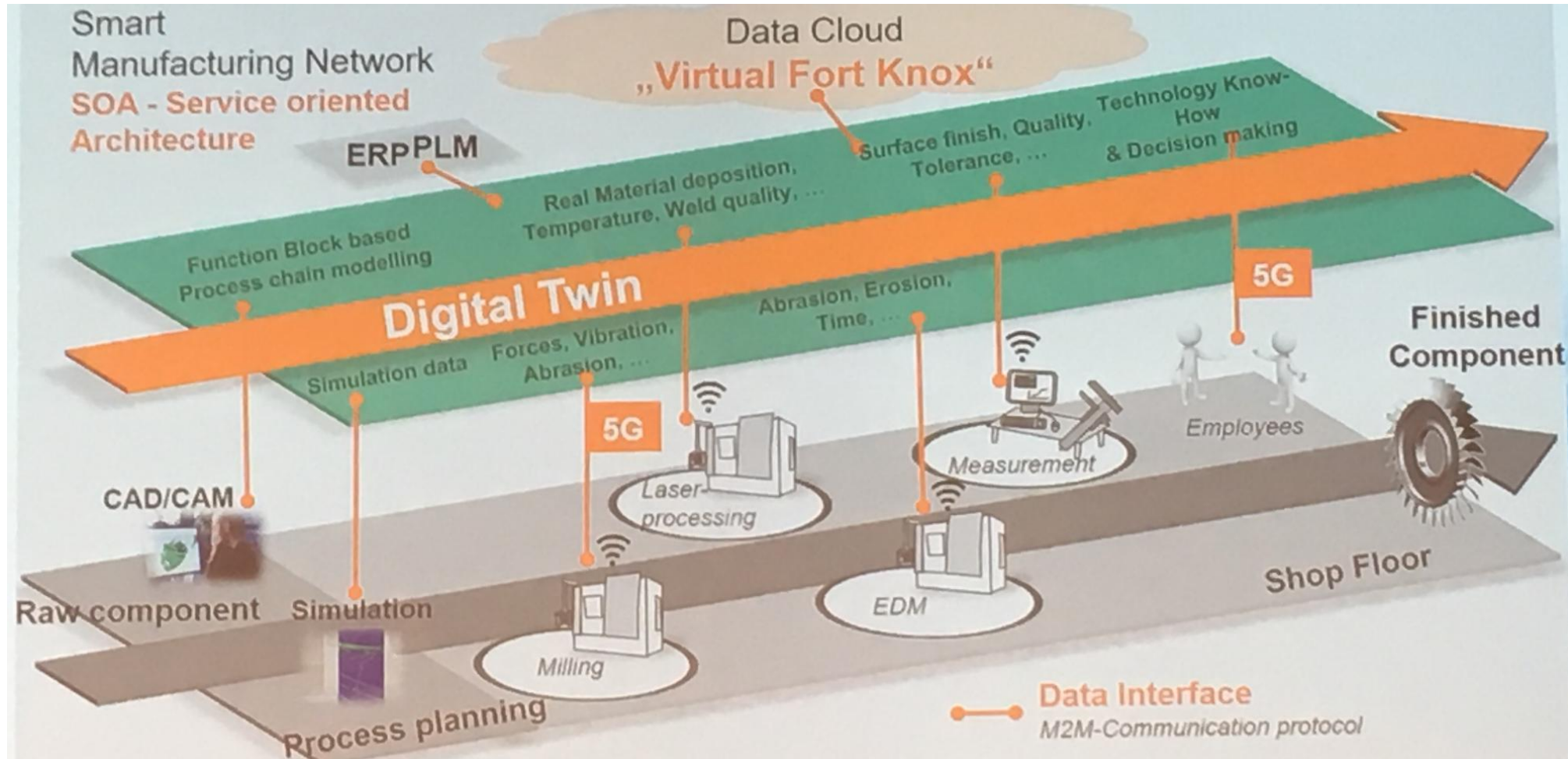
Kostengünstiges Gußteil, Prototyp mittels 3D-Druck hergestellt



Computeroptimiertes Leitbauteil, mit „intelligenter“ Struktur, nur mittels 3D-Druck herstellbar

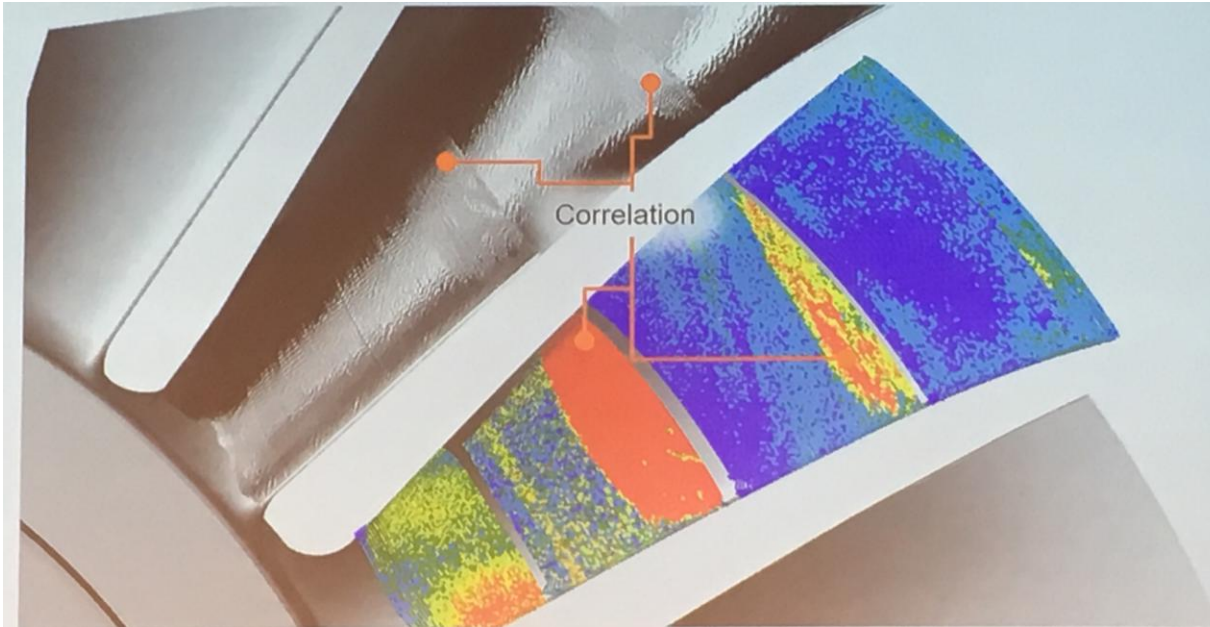
Quelle: Eigene Aufnahmen auf der Autodesk University, Darmstadt 2019

Entwicklung der digitalen Fabrik – smart factory



Quelle:
Fraunhofer IPT,
Vortrag Autodesk
University,
Darmstadt 2019

Visualisierung der Bauteil-Vibrationen / Mapping



Quelle:

Fraunhofer IPT, Autodesk University,
Darmstadt 2019

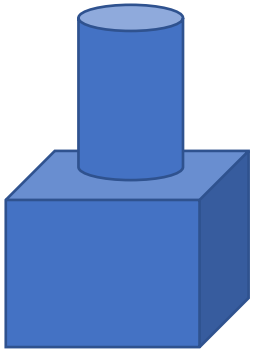
- Intuitives Lernen des Arbeiters wird auf die Maschine übertragen (Machine learning)
- Hochauflösende Simulation der mechanischen und thermischen Eigenschaften des Bauteils
- Korrelation der Daten aus Simulation und Messdaten aus der Fertigung
- Dokumentation aller Fertigungsdaten

Fragen ?

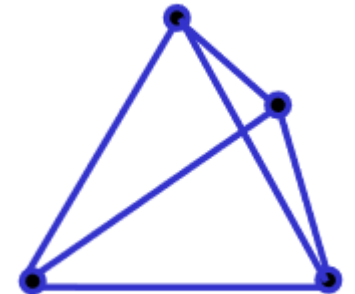
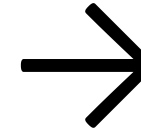
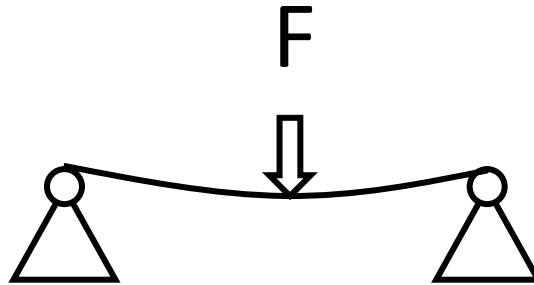
FEM

Grundlagen und Vorgehen

Vereinfachte Vorstellung:



+



CAD Konstruktion

**Technische Mechanik /
Thermodynamik**

FEM

Voraussetzungen für die Nutzung von FEM-Berechnungsprogrammen:

- Umwandlung des physikalischen Modells in ein mathematisches Modell
=> Basiswissen, mathematische Näherungsverfahren
- Abstraktionsfähigkeit => Reduktion auf das Wesentliche
- Physikalische Kenntnisse (auf dem Gebiet Mechanik / Thermodynamik)
- Fertigkeiten im Umgang mit der FEM-Berechnungsprogramm
=> Studium der Handbücher und Besuch von Lehrgängen

1.) Nutzung spezieller FE-Berechnungsprogramme:

- NASTRAN
- ABAQUS
- ANSYS
- MARC

=> Generierung des FE-Netzes: im FE-Programm /auf Basis importierter CAD-Geometriedaten

2.) Nutzung von CAD-Programmen mit integriertem FE-Berechnungsprogramm:

- CATIA
- NX
- CREO (ProEngineer)
- SOLIDWORKS
- Autodesk Fusion 360

=> Diese Programme besitzen in der Regel nicht den Umfang an Analysemethoden und Elementtypen wie spezielle FE-Berechnungsprogramme

Wichtige Eingaben des Benutzers in das FE-Berechnungsprogramm:

- Randbedingungen (Belastungen, Lagerbedingungen)
- Materialkenngrößen
- Elementtyp
- Art des Analyseverfahrens

Detaillierte Angaben zum
Vorgehen folgen in der Übung

Statik	Dynamik	Potential	
		stationär	instationär
$[K] \cdot \{u\} = \{F\}$ [K] Steifigkeitsmatrix {u} Verschiebungsvektor {F} Restvektor (Kräfte)	$[M] \cdot \{\ddot{u}\} + [c] \cdot \{\dot{u}\} + [K] \cdot \{u\} = \{F\}$ [K] Steifigkeitsmatrix {u} Verschiebungsvektor {F} Restvektor (Kräfte) [M] Massenmatrix [c] Dämpfungsmatrix	$[K] \cdot \{P\} = \{F\}$ [K] Leitfähigkeitsmatrix {P} Potentialvektor {F} Restvektor (Quellen)	$[K] \cdot \{P\} + [C] \cdot \{P\} = \{F\}$ [K] Leitfähigkeitsmatrix {P} Potentialvektor {F} Restvektor (Quellen) [C] Kapazitätsmatrix
Quelle: Skript Prof. Albrecht, FEM Grundlagen, 2019		• elektrisches (Fluss-)Feld / elektrostatisches Feld • Temperaturfeld (zusätzlich konvektive Randb.) • drehungsfreie Strömung (Sickerströmung) • Akustik • Magnetfeld (quellenfrei)	

lineare Statik (z.B. Feder):

Federsteifigkeit

$$k \cdot u = F$$

wenn erforderliche Kraft bei gleicher Verschiebung zeitabhängig ist,

d.h. $F = F(t)$

→ Trägheitskraft

$$m \cdot \ddot{u} \quad \text{und}$$

→ Dämpfungskraft

$$c \cdot \dot{u}$$

$$m \cdot \ddot{u} + c \cdot \dot{u} + k u = f(t)$$

häufig angewendetes Verfahren: $f(t) = 0$ und $c = 0$

d.h. Struktur schwingt ohne äußere Krafteinwirkung

$$m \cdot \ddot{u} + k \cdot u = 0$$

Ergebnis: Eigenfrequenzen und Eigenformen

(bei welcher Frequenz schwingt die Struktur in welcher Form?)

Quelle:

Skript Prof. Albrecht,
FEM Grundlagen, 2019

Analytischer Ansatz bei komplizierten Strukturen und Diskontinuitäten in der Geometrie oft nicht möglich oder sehr aufwendig.

Bei FEM:

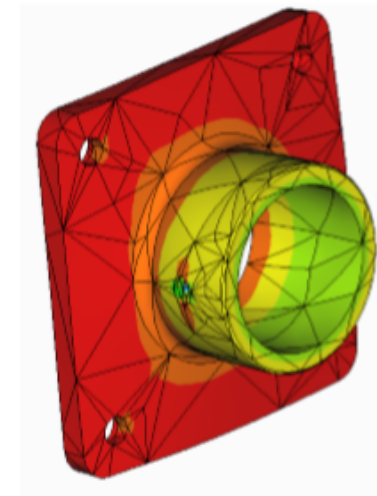
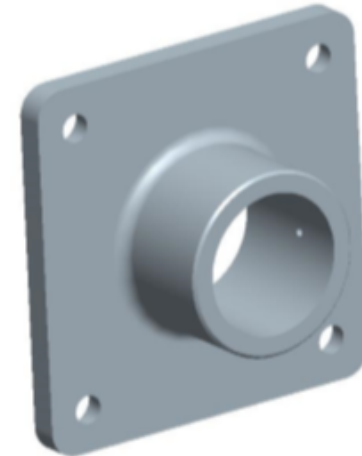
- Gesamtstruktur in **finite Elemente** aufgeteilt
- An Schnittstellen (**Knoten**) gelten Gleichgewichtsbedingungen
- Berechnungswerte werden an angrenzende Elemente übertragen
- Modularer Aufbau, Strukturen mit endlichen Freiheitsgraden, beliebig verfeinerbar => Näherung

Die Grundgleichung der Statik lautet:

$$\mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{u}$$

Jedes einzelne Element kann mit dieser Gleichung beschrieben werden.

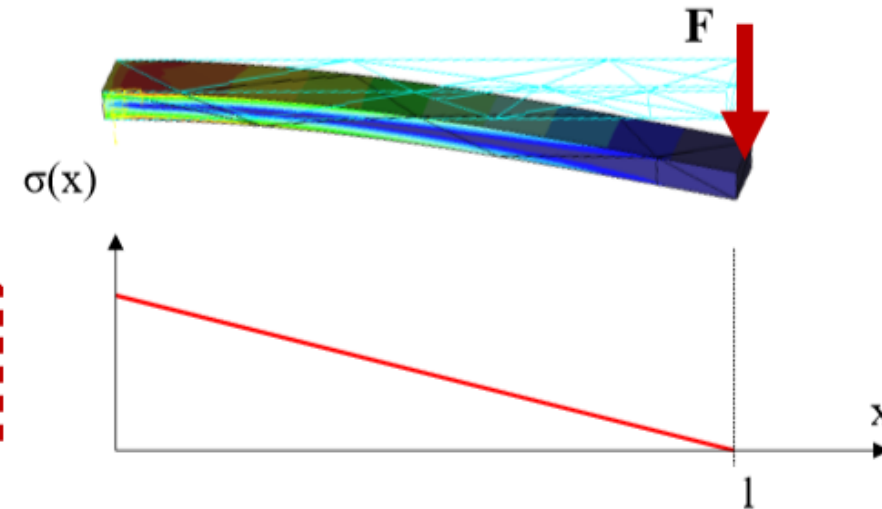
Daraus werden zunächst die Verschiebungen u und dann die Spannungen berechnet



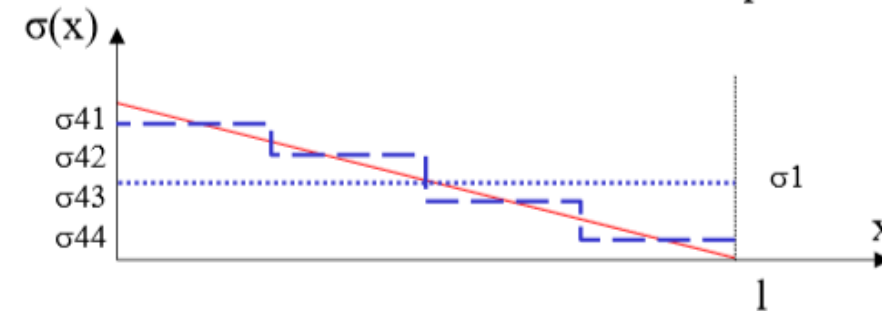
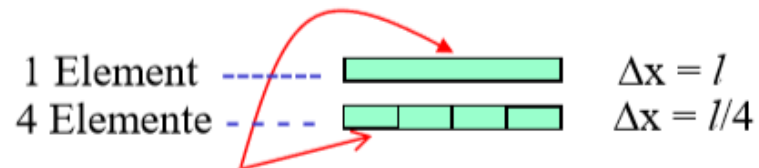
Beispiel Biegebalken

Analytisch bestimmte Spannung in
Abhängigkeit vom Weg x

$$\sigma(x) = \frac{M_b(x)}{W_b} = \frac{F(l-x)}{W_b}$$



Mit FEM bestimmte Spannung in Abhängigkeit
vom Weg x bei Verwendung von:



für Bereich Δx (Element) wird u bestimmt

$$\Rightarrow \varepsilon_{\text{Bereich}} = \frac{u}{\Delta x} = \text{konst}$$

$$\Rightarrow \sigma_{\text{Bereich}} = \varepsilon * E = \text{konst}$$

Quelle:
Skript Prof. Albrecht,
FEM Grundlagen, 2019

Übung ab nächste Woche (20.10.2025)

Beispiel Biegebalken am FEM-Rechner

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

Hinweis

Diese Folien sind ausschließlich für den internen Gebrauch im Rahmen der Lehrveranstaltung an der Frankfurt University of Applied Sciences bestimmt. Sie sind nur zugänglich mit Hilfe eines Passwortes, dass in der Vorlesung bekannt gegeben wird.