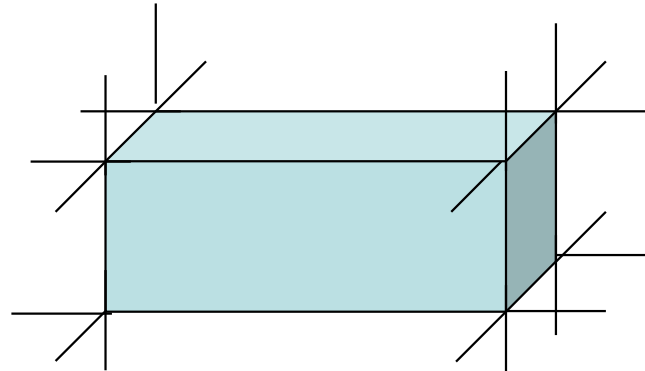


## Was macht FEM?

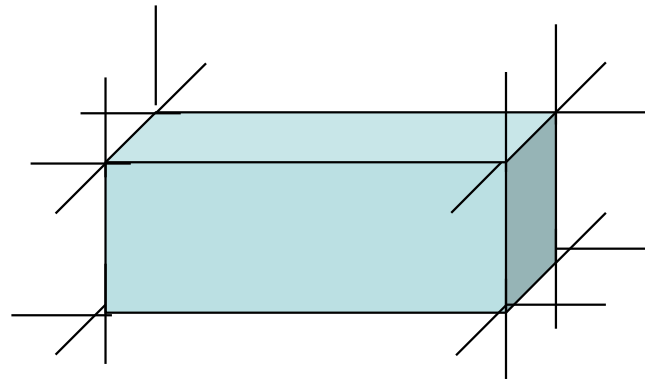
- Bauteil wird in viele Elemente zerlegt.
- Jedes Element wird aus Knoten aufgespannt



- Die meisten Knoten gehören zu mehreren Elementen.
- Für jedes Element werden die Verschiebungen der Knoten berechnet, sodass sich ein (ungefähres) Gleichgewicht aus den äußeren Kräften am Element und den inneren Spannungen im Element ergibt
- Wenn die Verschiebungen der Knoten berechnet sind, kennt die FEM den kompletten Spannungszustand des Elements

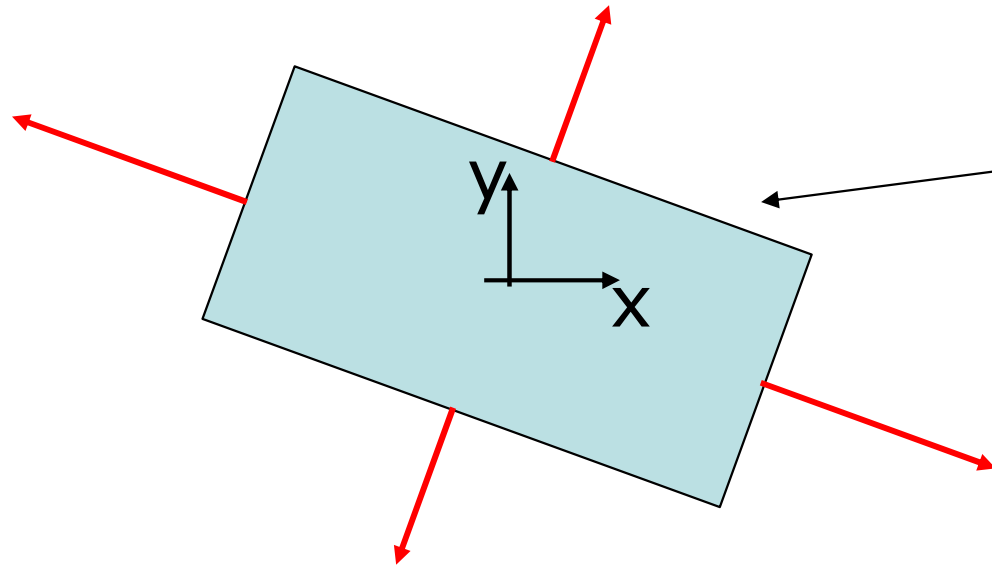
## Spannungszustand

- Normalspannungen und Tangentialspannungen in Koordinatenrichtung



- Dasselbe in beliebige Richtungen
- Die Hauptspannungen (Betrag und Richtung!)
- Die Vergleichspannungen, die sich daraus berechnen lassen
- (Die Spannungsanalyse im Inventor gibt uns nicht alle Informationen im Postprocessing weiter!) -> NASTRAN

Mit NASTRAN erneut probieren:



In der FEM klappt es in der Regel nicht, Bauteile nur durch Kräfte zu belasten und nicht einzuspannen. Warum?

Bauteil wird in zwei Richtungen senkrecht zueinander durch Normalspannungen belastet. Wie ist der Spannungszustand in einem dazu gedrehten x,y-Koordinatensystem

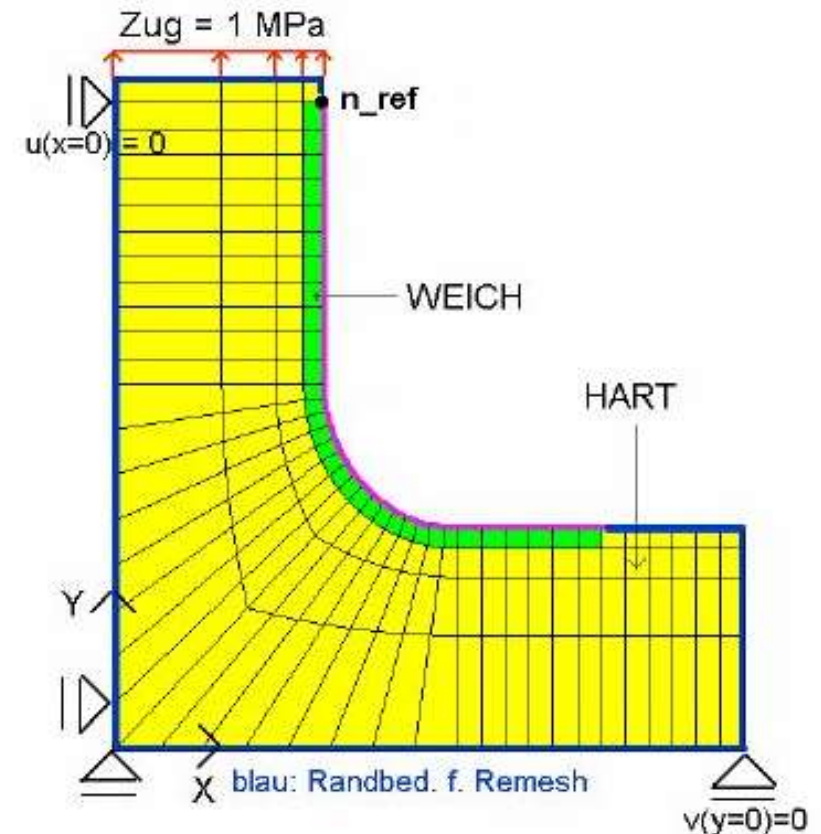
Was kann NASTRAN besser? Mehr Möglichkeiten für Lasten und Einspannungen, besseres Netz und Nichtlinearitäten

Die Grundregeln der linear-elastischen FEM gelten weiterhin:

- Einspannungen und Belastungen sollen die reale Situation möglichst akkurat abbilden
- Die Qualität der Ergebnisse hängt maßgeblich von der Netzfeinheit (im interessanten Bereich, z. B. eine kritischen Kerbgeometrie) ab, allerdings auch die Rechenzeit
- Das Thema Rechenzeit gewinnt in der nichtlinearen FEM nochmal deutlich an Gewicht, da bei Nichtlinearitäten das FEM-Modell nur schrittweise und iterativ, in unangenehmen Fällen in Dutzenden Einzelschritten gelöst werden kann
- Bitte daher immer mit einer linear-elastischen Analyse starten und die Nichtlinearität erst einführen, wenn alle sonstigen Eingaben (Materialien, Einspannungen und Lasten) verifiziert sind.

### „Faustregeln“ für das Vernetzen:

- Wo Spg.-Gradienten (Kerben!) sind, brauche ich mehr Elemente, um diese abzubilden (1 Element  $\rightarrow$  1 Spannung)
- Eindeutig zu wenige Elemente habe ich, wenn ich am Ergebnis (Spgs.-plot) noch die Netzstruktur erkennen kann
- In einer Viertelkreiskontur sollten mindestens 10 Elemente, besser 20 oder mehr Elemente die Oberfläche bilden (die Rechner sind heutzutage sehr schnell!), wenn mich die Spannung dort interessiert



NASTRAN bietet die Möglichkeit, an ausgewählten Stellen (Kerben) die Vernetzung gezielt zu verfeinern!

### Finite Elemente 2D oder 3D?

- Wenn die Geometrie im wesentlichen zweidimensional ist, z. B. ein Blech mit konstanter Dicke, so ist es sinnvoll, die FE-Berechnung zweidimensional durchzuführen, um Rechenzeit zu sparen
- Ähnlich gilt dies auch für rotationssymmetrische Modelle (Drehteile!). Dafür gibt es im NASTRAN spezielle Analysetools, um hier Rechenzeit zu sparen
- In CAD-Programmen (3D-CAD) wird praktisch ausschließlich 3D-FEM verwendet, deshalb hier im Labor ausschließlich 3D-FEM

- Im linear-elastischen Fall gilt die Beziehung zwischen Spannung und Dehnung  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ , womit beide über den E-Modul proportional sind und daher eine Unterscheidung, ob eine Belastung aus einer eingepprägten Kraft oder Moment ( $F \Rightarrow N, Q, M \Rightarrow \sigma, \tau$ ) oder aus einem vorgegebenen Verformung ( $\Delta l \Rightarrow \varepsilon \Rightarrow \sigma, \tau$ ) oft nicht sauber durchgeführt wird.
- Dies ist aus mehreren Gründen unverständlich und oft schlicht falsch
  - Die Proportionalität endet mit der Streckgrenze, danach sind die Auswirkungen sehr unterschiedlich
  - Die jeweils richtige Strategie zur Anpassung an die Belastung ist komplett unterschiedlich
  - In Versuch und Berechnung ist es immer möglich, die richtige Art der Belastung (Kraft oder Verschiebung) auf das Bauteil aufzubringen

- Der Standardfall der Belastung ist die kraftgesteuerte Belastung. Hier gibt es eingeprägte Kräfte und Momente, die das betroffene Bauteil ertragen muss
- Beispiele dafür sind Gewichtslasten, aber auch magn. und elektrische Anziehungskräfte oder Windlasten, die direkt oder indirekt auf ein Bauteil einwirken können
- Typisch für eine kraftgesteuerte Belastung ist, dass gegen Versagen eine höhere Streckgrenze und Zugfestigkeit oder ein größerer Querschnitt hilft (=übliche „Ingenieurerfahrung“)





- Als weggesteuert bezeichnet man Belastungen, die nicht über eine Kraft, sondern über eine Verformung auf das Bauteil wirken
- Beispiele dafür sind vorgegebene Verformung durch Wärmedehnungen, durch Montageverformungen, Volumenänderungen durch Gefrieren, etc.
- Typisch für weggesteuerte Verformungen ist, dass der wesentliche Werkstoffkennwert gegen Versagen nicht ein Festigkeitskennwert, sondern die Bruchdehnung bzw. die Gleichmaßdehnung (Vermeidung der Bildung einer Einschnürung) ist



- Gegen weggesteuerte Belastungen hilft
  - Reduzierung der vorgegebenen Verformung (falls möglich)
  - Verwendung eines zäheren Werkstoffes (höhere Bruchdehnung, nicht höhere Festigkeit)
  - Verwendung eines Materials mit geringerem E-Modul
  - Das belastete Bauteil geometrisch weicher machen
- Gegen weggesteuerte Belastung hilft **nicht**
  - Vergrößerung des belasteten Querschnitts
  - Verwendung eines höherfesten Werkstoffs
  - Erhöhung der Steifigkeit (Material oder Geometrie)
- Weggesteuerte Belastung läuft gegen übliche „Ingenieurerfahrung“ und ist damit eine „Ingenieurfalle“!

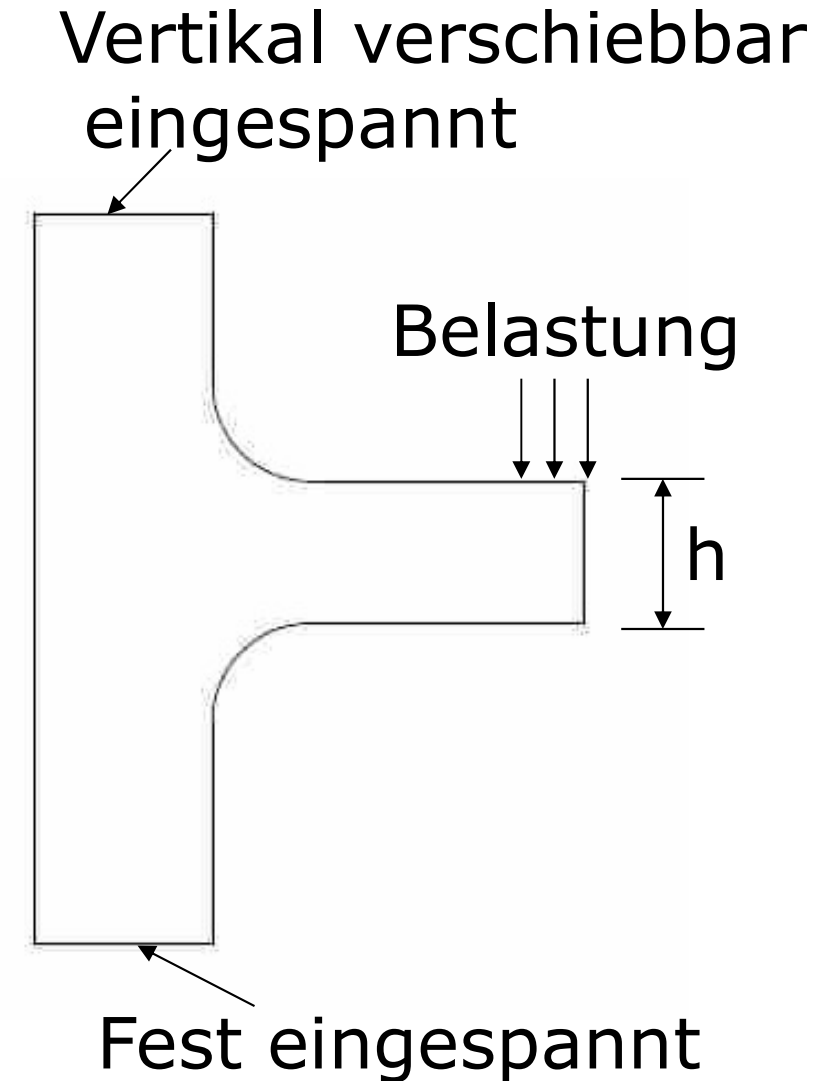
- Eine große Stärke der FE-Rechnung ist die Möglichkeit, „Nichtlinearitäten“ in der Berechnung zu berücksichtigen.
- Als Nichtlinearitäten bezeichnet man alle Effekte, die während der Berechnung/Belastung des Bauteils zu einer Änderung der Eigenschaften führen.
- Bei linear-elastischer FEM gilt: Doppelte Belastung = doppelte Spannung = doppelte Verformung(\*), wie es den Gleichungen aus der Festigkeitslehre entspricht

(\*) Ausnahmen siehe Gleichungen der Festigkeitslehre

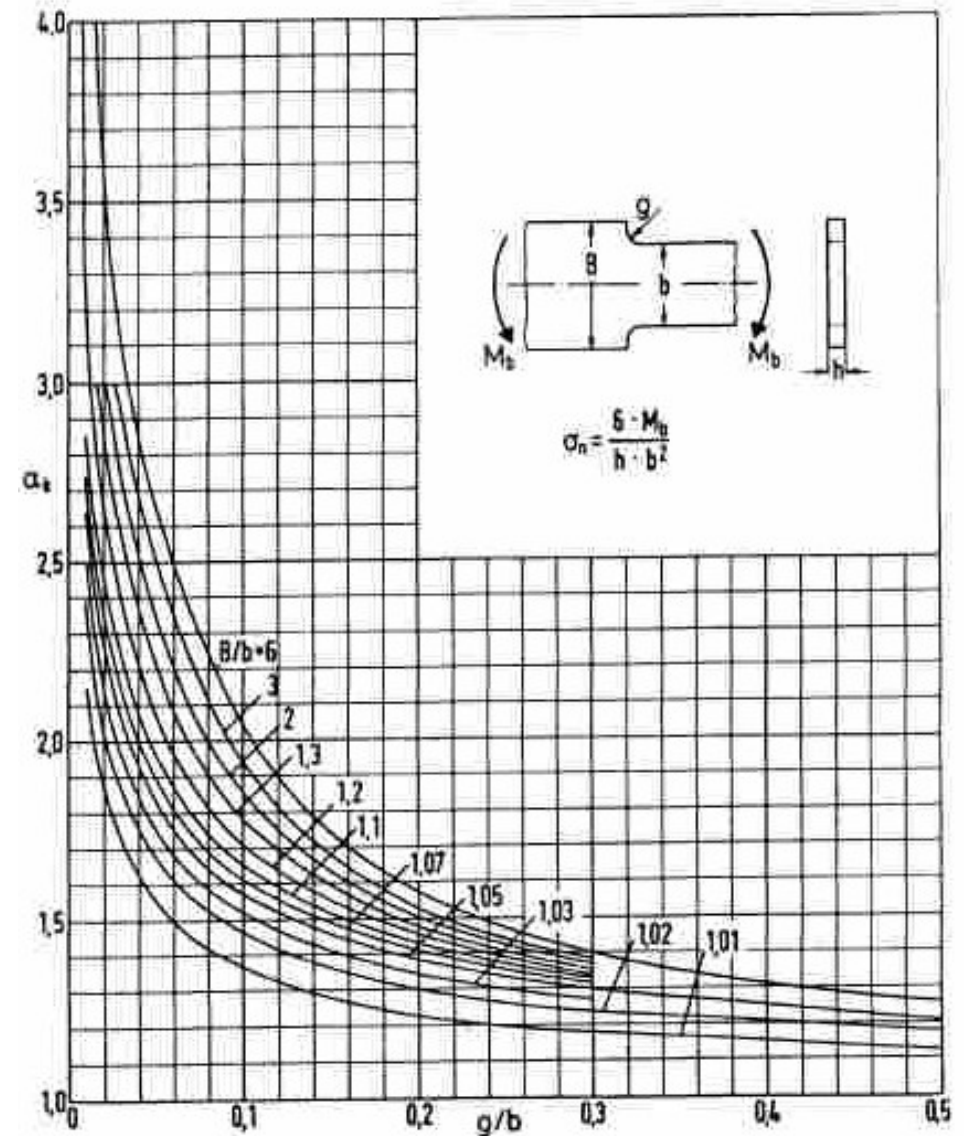
- Viele Fragenstellungen lassen sich aber mit linear-elastischer FEM problemlos bearbeiten, z. B. Auslegung von Bauteilen im elastischen Bereich, Variantenvergleich zum Finden der Konstruktion mit der geringsten Belastung, Auslegung von metallischen Bauteilen mit relativ kleinen Verformungen  
→ Thema heute und von FEM in CAD-Programmen

Die nebenstehende Geometrie soll in den Inventor übertragen werden.

- Legen Sie die Geometrieparameter sinnvoll fest (passend zu dem Kerbformzahldiagramm auf Folie 19).
- Belastung: Kraftgesteuert und weggesteuert, oben und unten eingespannt wie abgebildet
- Alu ( $E = 70000 \text{ MPa}$ ,  $\mu = 0,3$ )
- Mit dem FEM-Modul im Inventor die Spannungen berechnen (Vergleich mit Ergebnis aus  $\alpha_k$ ) und anschließend soll diese Geometrie mit Zugdreiecken optimiert werden und ebenfalls die Spgn. berechnet und verglichen werden

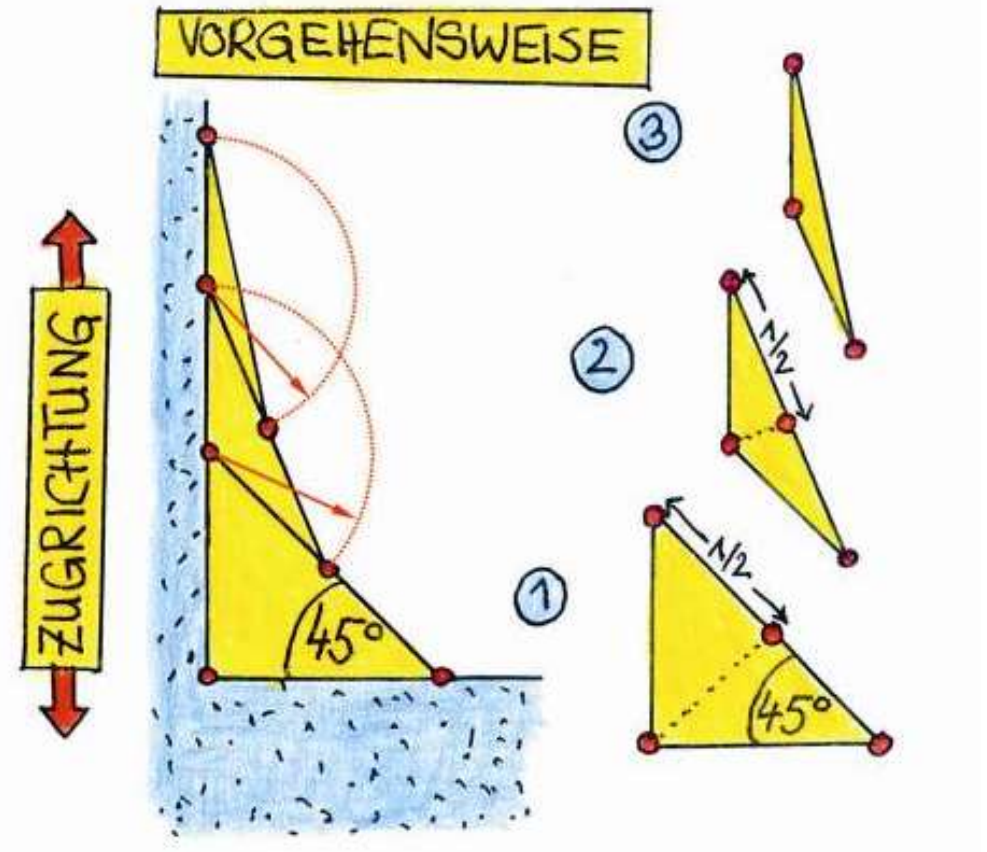


Kerbformzahldiagramm zur Berechnung der maximalen Spannungen in der Viertelkreiskerbe mithilfe der klassischen Festigkeitslehre als Vergleich/Benchmark der FE-Rechnung





- Optimierung mit Zugdreieck
  - Zugrichtung beachten
  - Ausgehend vom unteren  $45^\circ$ -Winkel kleben wir ein Zugdreieck in die scharfe Ecke
  - Es entsteht eine neue, weniger gefährliche Kerbe, die wir wie abgebildet überbrücken
  - 3 Zugdreiecke reichen, die Knickstellen mit Ausnahme der unteren werden noch ausgerundet
  - Der  $45^\circ$ -Knick unten erweist sich sogar als optimal (s. Schubviereck)



Als Bericht (Abgabe je Gruppe bis 12.12.) werden folgende Teile benötigt:

- Darstellung der berechneten Geometrien, Belastungen und Einspannungen
- Darstellung, dass die verwendete Einspannung das tut, was beabsichtigt ist
- Darstellung des Netzes und Begründung, warum ausreichend und Angabe der Rechenzeit. Vergleich Vernetzung Inventor und NASTRAN.
- Darstellung der Spannungsverteilung der FE-Rechnung und Plausibilisierung mithilfe einer Festigkeitsrechnung und der Kerbformzahl.
- Darstellung Unterschied kraftgesteuerte Belastung und weggesteuerte Belastung bei Verdoppelung von  $h$  (mit Begründung)

- Nichtlineare FEM bedeutet wesentlich mehr Rechenzeit, weil die Belastung in der Software in Schritten aufgebracht werden muss und bei jedem Teilschritt gecheckt werden muss, ob sich die Eigenschaften bis hierin schon geändert haben und ggf. dieser Teilschritt mit den geänderten Eigenschaften erneuten gerechnet werden muss, ggf. iterativ.
- Beispiele Nichtlinearitäten:
  - Geometrische Nichtlinearität (meist unproblematisch)

Wenn Verformungen etwas größer werden (z. B. Simulation von Umformprozessen), dann ändern sich mit der Verformung z. B. Belastungsrichtung oder Hebelarme. Dies kann mithilfe der geometrischen Nichtlinearität in der Simulation abgebildet werden. Zu finden häufig unter solchen Bezeichnungen wie „Große Verformung“. In NASTRAN als Analysetyp „Nichtlineare Statik“



- Materialnichtlinearität
- Nichtlinearität über Kontaktänderungen

Folgende Nichtlinearitäten sollen in diesen Terminen angewendet werden:

- Geometrische Nichtlinearität (meist unproblematisch, manchmal Voraussetzung für andere Nichtlinearitäten):
  - Die berechnete Verformung wirkt sich auf das Ergebnis aus: Hebelarme ändern, neue Kontakte entstehen, etc.
  - In der Workbench „versteckt“: Analyseeinstellungen → Große Verformung EIN
- Materialnichtlinearität, z.B. Plastische Verformung
  - Insbesondere bei zähen Werkstoffen und weggesteuerter Belastung sind plastische Verformungen in kleineren Bereichen oft unkritisch, aber die linear-elastisch berechneten Spannungen sind viel zu hoch, um dies als unkritisch zu bewerten → Beispiel 1.

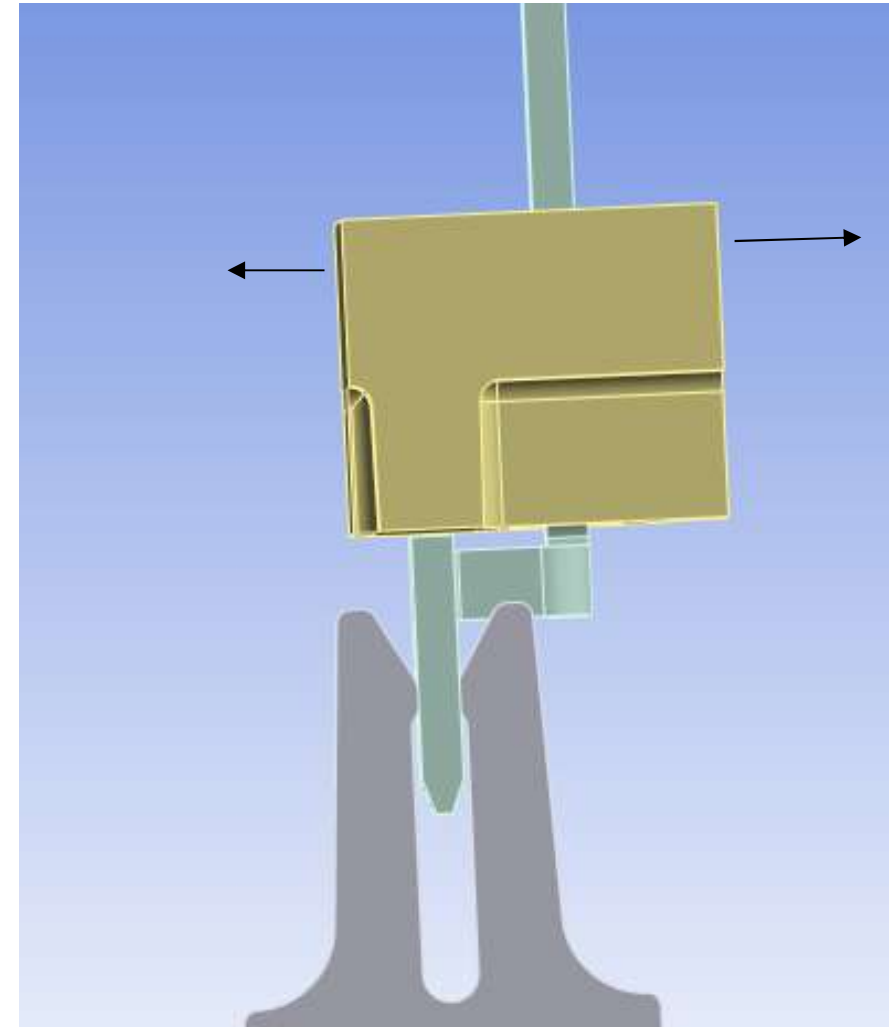
Folgende Nichtlinearitäten sollen in diesem Termin angewendet werden:

- Ein sich infolge einer Belastung schließender Kontakt und die damit einhergehende Änderung der Belastung soll simuliert werden
  - Voraussetzung dafür: Geometrische Nichtlinearität
  - Hier oft Erfahrung und Anpassung der Modellierung notwendig → Beispiel 2.

## Materialnichtlinearität

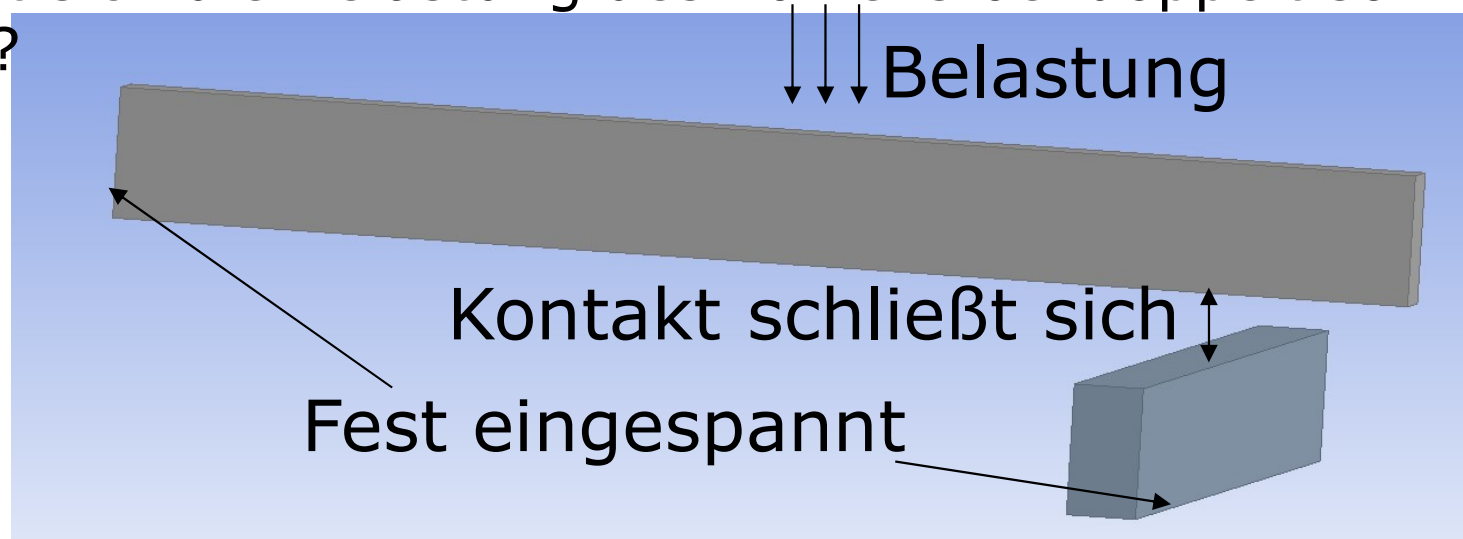
- Gegeben ist die nebenan abgebildete Geometrie einer Pin-Kontaktierung
- Die Materialien sind Kunststoff (E-Modul 20000 MPa,  $\mu = 0,4$ ) und Bronze (E-Modul 115000 MPa,  $\mu = 0,32$  und  $R_e = 420$  Mpa, Bruchdehnung  $> 25\%$ )
- Folgende Fragen :
  - Wie groß ist die Pressung in der Gabel bei der Kontaktierung? Wird die Gabel dabei plastisch verformt?
  - Entstehen bei einem Versatz von  $\pm 0,4$  mm beim Fügen unzulässig große Belastungen?

Versatz um  $\pm 0,4$  mm



## Nichtlinearität durch sich schließenden Kontakt

- Gegeben ist die nebenan abgebildete einfache Geometrie
- Linear-elastisches Material
- Folgendes soll modelliert werden:
  - Der Balken biegt sich infolge der Belastung.
  - Bei welcher Last schließt sich der Kontakt?
  - Wie ändert sich die Belastung des Balkens bei doppelt so großer Last?



Als Bericht (Hochladen auf Moodle bis 12.12. je Gruppe) werden folgende Teile benötigt:

- Darstellung der berechneten Geometrien, Belastungen und Einspannungen und Materialdefinitionen
- Darstellung, dass die verwendete Einspannung das tut, was beabsichtigt ist
- Darstellung des Netzes und Angabe der Rechenzeit
- Beantwortung der Fragen in Wort und Bild