

FreeCAD Anleitung IV

FEM (Finite Elemente Methode)

JÜRGEN GRÄBER



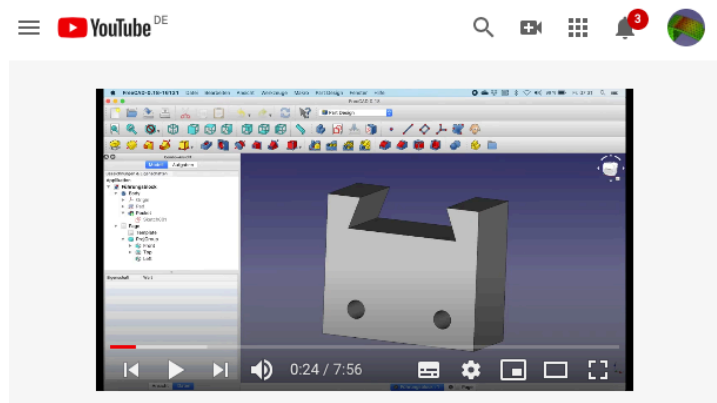
2020-5-22

Inhaltsverzeichnis

Video-Tutorial	1
FEM – Finite Elemente Methode	2
Vorbemerkung	2
Kapitel 1	3
Brett (einseitig fixiert)	3
• Brett als Körper modellieren	3
• Arbeitsbereich FEM	3
• Material wählen	3
• Fixierungen und Kraft festlegen	3
• FEM-Netz erzeugen	3
• Berechnung durchführen	3
• Ergebnisse anzeigen	3
Kapitel 2	7
Brett (beidseitig gelagert)	7
• Eine FEM für ein beidseitig gelagertes Brett erstellen.	7
• Fixierungen ändern.....	7
Kapitel 3	11
Eigengewichtsanalyse	11
• Eine Eigengewichtsanalyse für einen einfach fixierten Körper (Aluminium) durchführen.....	11
Nachbetrachtung	13
Schülerexperiment	15

Video-Tutorial

Videos zur FreeCAD-Anleitung findest du hier:
(Leider noch keine zu diesen FEM-Kapiteln)



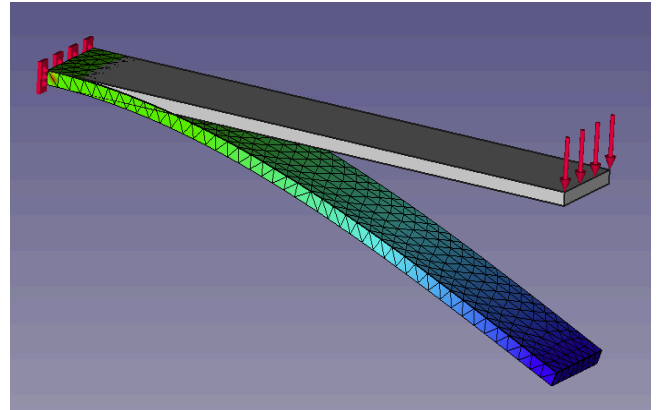
<https://www.youtube.com/watch?v=hJanMQTHAOI&list=PL2pwOSjXuHVD7ZGsTPb4MeIAwQs5a3ohm>

FEM – Finite Elemente Methode

Vorbemerkung

Der Arbeitsbereich **FEM** bietet die Möglichkeit, auf selbst modellierte Körper die Finite-Elemente-Analyse (FEA) anzuwenden.

Unter der Einwirkung einer äußeren Kraft (Kapitel 1 und 2) oder durch das Eigengewicht des Körpers (Kapitel 3) kommt es zu Verformungen und Spannungen im Körper. Diese werden berechnet und farblich dargestellt.



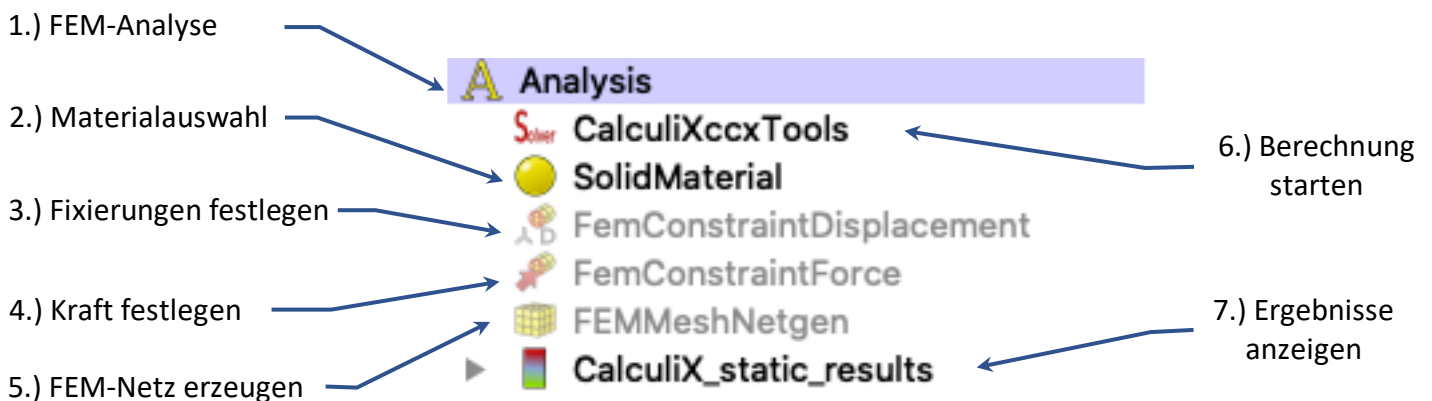
Arbeitsablauf

Die Schritte zur Durchführung einer Finite-Elemente-Analyse sind:

- I. **Modellierung der Geometrie:**
Erstellung der Geometrie mit FreeCAD oder Import aus einer anderen Anwendung.

- II. **Erstellen einer Analyse:**
 - a. Wahl des Materials
 - b. Hinzufügen von Simulationsbeschränkungen wie Lasten und festen Stützpunkten zum geometrischen Modell.
 - c. Erstellen eines Finite-Elemente-Netzes für das geometrische Modell
 - d. Berechnung der Verschiebungen und Spannungen
 - e. Visualisierung der Analyseergebnisse

In der Baumansicht von FreeCAD sieht das später so aus:



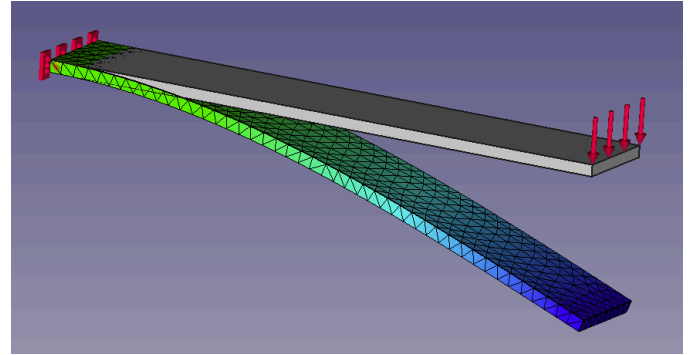
Kapitel 1

Brett (einseitig fixiert)

Darum geht's:

Eine FEM für ein einfach fixiertes Brett erstellen

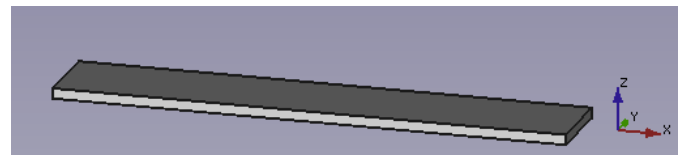
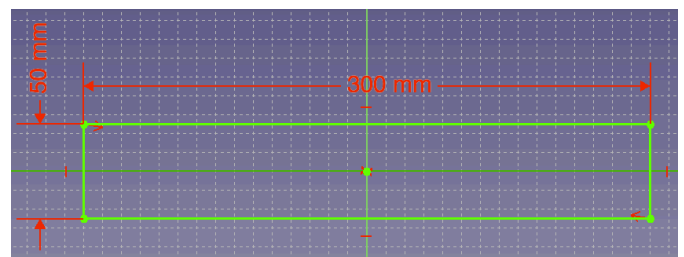
- Brett als Körper modellieren
- Arbeitsbereich FEM
- Material wählen
- Fixierungen und Kraft festlegen
- FEM-Netz erzeugen
- Berechnung durchführen
- Ergebnisse anzeigen




1.) Brett als Körper erstellen

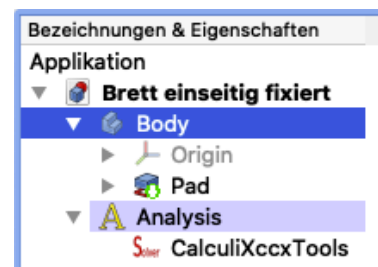
- Erstelle eine Rechteckskizze (symmetrisch zum Ursprung) und bemaße sie:
Länge: 300 mm
Breite: 50 mm
- Schließe die Skizze und polstere sie auf 6 mm auf.

Dein Brett sollte so aussehen.




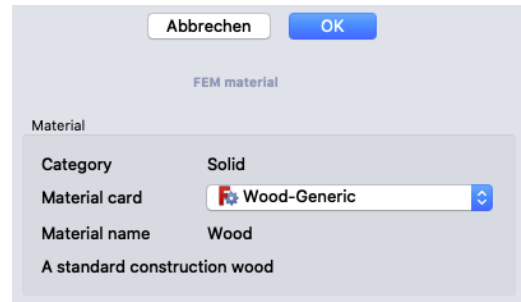
3.) Arbeitsbereich FEM

- Wechsle in den Arbeitsbereich **FEM**
- M1 auf „Body“ in der Baumansicht
- M1 auf  erstellt einen Container für die FEM-Analyse.
In diesem Container werden alle Vorgaben und Ergebnisse abgelegt.
(siehe Vorbemerkungen)




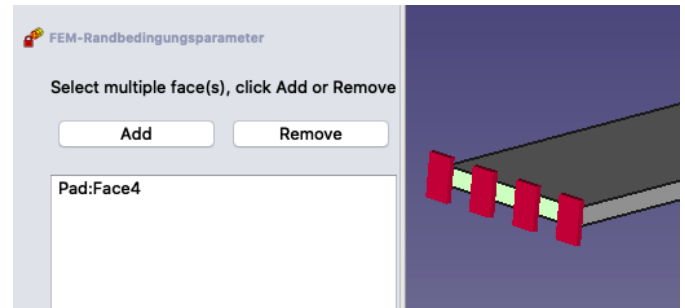
4.) Material auswählen

- M1 auf 
- Wähle als Material „Wood-Generic“ aus.




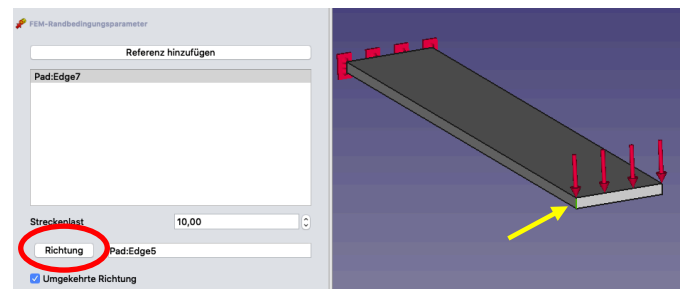
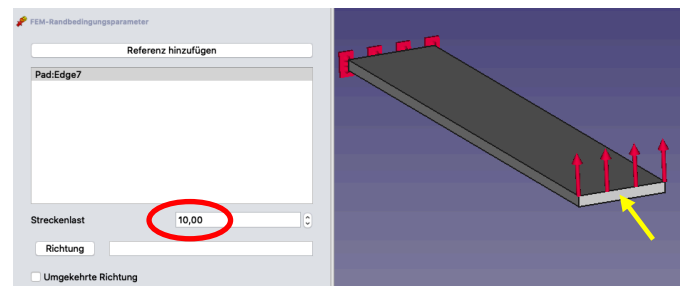
5.) Fixierung des Bretts

- Drehe das Brett mit der Maus so, dass du die **linke** Stirnseite sehen kannst.
- M1 auf 
- M1 auf die linke Stirnseite (färbt sich grün)
- M1 auf „Add“ (rote Fixierungen werden angezeigt)
- Bestätige mit OK.




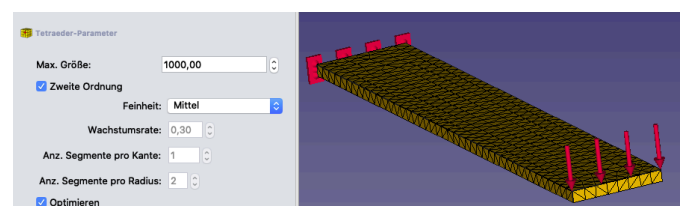
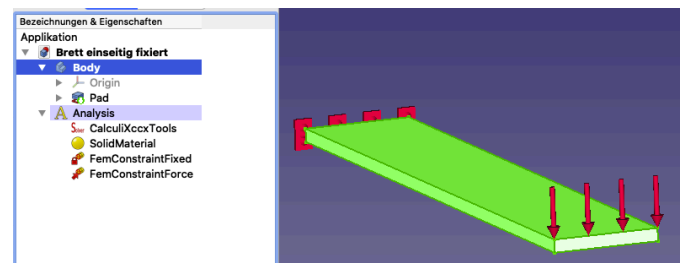
6.) Kraft

- Drehe das Brett mit der Maus so, dass du die **rechte** Stirnseite sehen kannst.
- M1 auf 
- M1 auf die obere Kante (färbt sich grün und die roten Kraftpfeile werden angezeigt)
- Streckenlast: 10,00 Newton (1 kg)
- M1 auf „Richtung“
- M1 auf die linke vertikale Kante
- M1 bei „Umgekehrte Richtung“ (Die roten Kraftpfeile müssen jetzt nach unten zeigen)
- Bestätige mit OK.



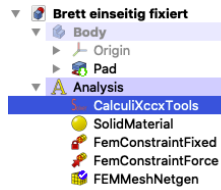
7.) FEM-Netz erstellen

- M1 auf Body
- M1 auf 
- Bestätige mit OK.
(Die Standardeinstellungen kannst du in diesem Fall erst einmal übernehmen)
Das FEM-Netz ist damit erstellt.

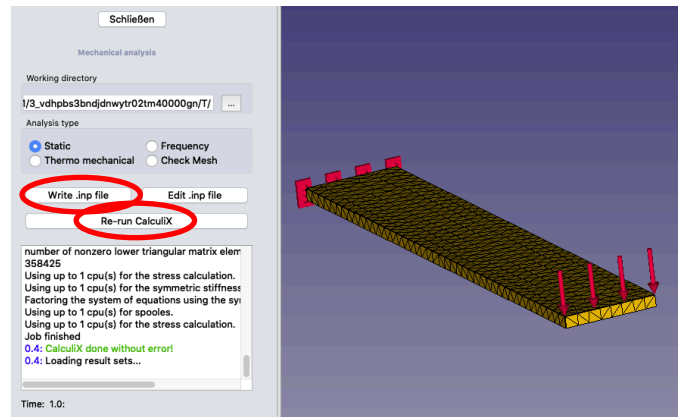


8.) FEM-Berechnung

- M11 auf „CalculiXccxTools“

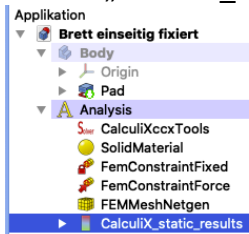


- M1 auf „Write .inp file“
- M1 auf Re-run CalculiX
- M1 auf Schließen



9.) Ergebnisse anzeigen: Biegung

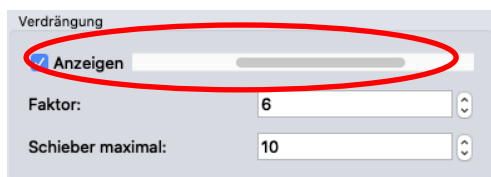
- M1 auf „CalculiX_static-results“



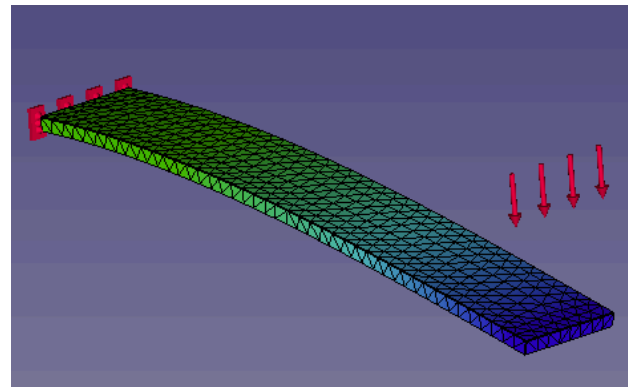
- M1 auf 
- M1 auf „Z-Verschiebung“



Das Brett wird sich um 8,33 mm nach unten biegen.



Mit dem Schieber kann man die Biegung des Bretts stärker darstellen.
(Die wirkende Kraft ändert sich dabei nicht!)



Der blaue Bereich bewegt sich am weitesten nach unten.

10.) Ergebnisse anzeigen: Zugspannung

- M1 auf "Max Principal stress"

Ergebnistyp

Kein
 Absolute Verschiebung
 X-Verschiebung
 Y-Verschiebung
 Z-Verschiebung
 Peeq
 Temperature

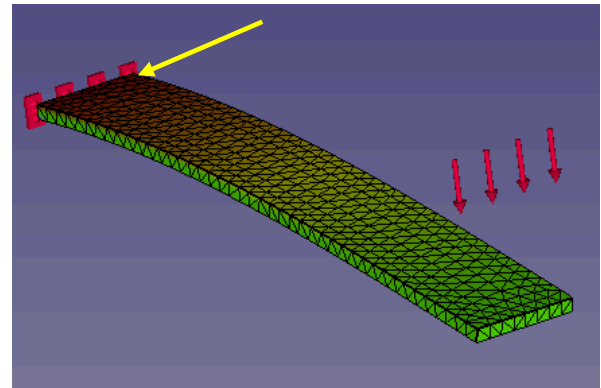
Von-Mises Spannung
 Max Principal stress
 Min Principal stress
 Max shear stress(Tresca)
 Mass Flow Rate
 Network Pressure

Min: -532,86 kPa ✓

Durchschnitt: 1714,09 kPa ✓

Max: 10,21 MPa ✓

Die maximale Zugbelastung beträgt 10,21 MPa



Die Zugspannung ist auf der Oberseite am stärksten. (Rotfärbung)

11.) Betrag der Kraft ändern

- Zunächst müssen die alten FEM-Ergebnisse gelöscht werden:

M1 auf 

- M1 auf „FEMConstraintForce“
- Force: 50 N (5 kg)
- Führe die FEM-Berechnung erneut durch → Schritt 8.)

Brett einseitig fixiert

- Body
- Origin
- Pad
- Analysis
 - CalculiXccxTools
 - SolidMaterial
 - FemConstraintFixed
 - FemConstraintForce**
 - FEMMeshNetgen
 - CalculiX_static_results

Eigenschaft	Wert
Basis	
Force	50,00
Reversed	true
Scale	6
Label	FemConstraintForce

12.) Ergebnisse:

Biegung in Z-Richtung

Ergebnistyp

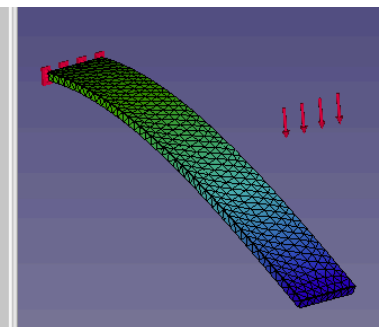
Kein
 Absolute Verschiebung
 X-Verschiebung
 Y-Verschiebung
 Z-Verschiebung
 Peeq
 Temperature

Von-Mises Spannung
 Max Principal stress
 Min Principal stress
 Max shear stress(Tresca)
 Mass Flow Rate
 Network Pressure

Min: -41,65 mm ✓

Durchschnitt: -16,03 mm ✓

Max: 0,00 mm ✓



Zugspannung

Ergebnistyp

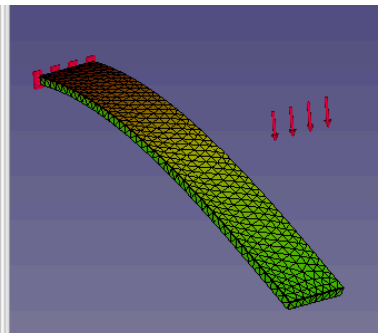
Kein
 Absolute Verschiebung
 X-Verschiebung
 Y-Verschiebung
 Z-Verschiebung
 Peeq
 Temperature

Von-Mises Spannung
 Max Principal stress
 Min Principal stress
 Max shear stress(Tresca)
 Mass Flow Rate
 Network Pressure

Min: -2664,31 kPa ✓

Durchschnitt: 8570,46 kPa ✓

Max: 51,03 MPa ✓

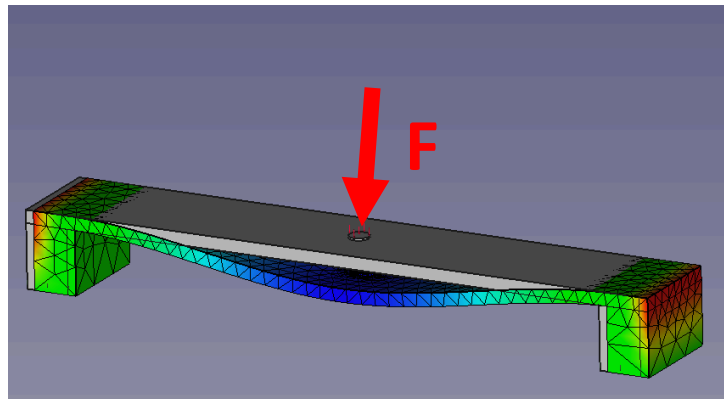


Kapitel 2

Brett (beidseitig gelagert)

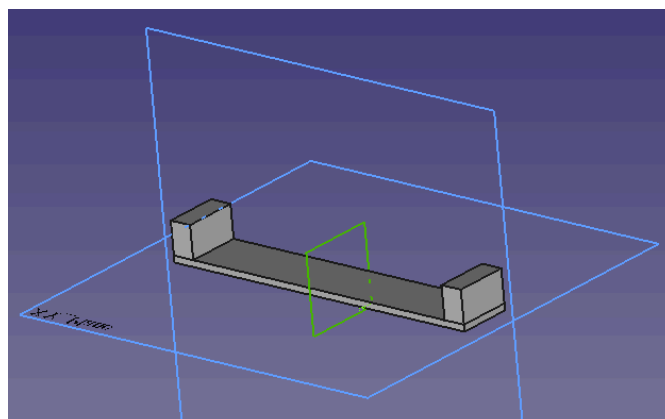
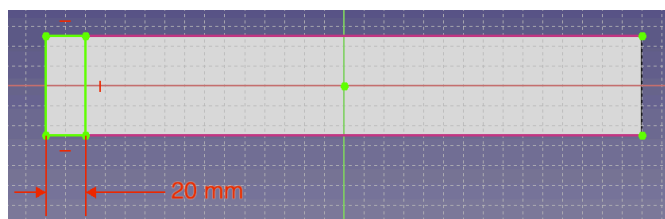
Darum geht's:

- Eine FEM für ein beidseitig gelagertes Brett erstellen.
- Fixierungen ändern.



1.) Auflagen konstruieren

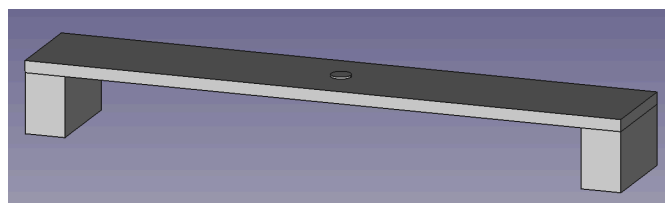
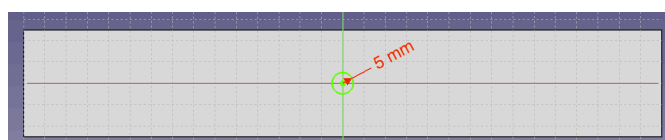
- Erstelle eine bündige Rechteckskizze auf der Unterseite des Bretts (aus Kapitel 1). Breite: 20 mm (Ober- und Unterkante zur Bezugskante machen)
- Schließe die Skizze und polstere sie auf 30 mm auf.
- Spiegele den entstandenen Quader an der YZ-Ebene auf die andere Brettseite.
- Dein Brett sollte mit den beiden Auflagen so aussehen.




2.) Angriffsfläche für die Kraft konstruieren

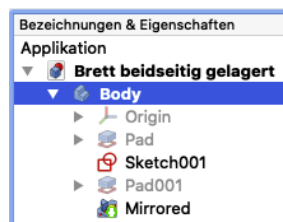
Auf diese kleine Erhöhung wird später die Kraft wirken.

- Konstruiere auf der Oberseite des Bretts einen Kreis um den Ursprung mit Radius 5mm.
- Schließe die Skizze und polstere sie auf 1mm auf.




3.) Arbeitsbereich FEM

- Wechsle in den Arbeitsbereich **FEM**
- M1 auf „Body“ in der Baumansicht
- M1 auf 



4.) Material auswählen

- M1 auf 
- Wähle als Material „Wood-Generic“ aus.


5.) Fixierung des Bretts

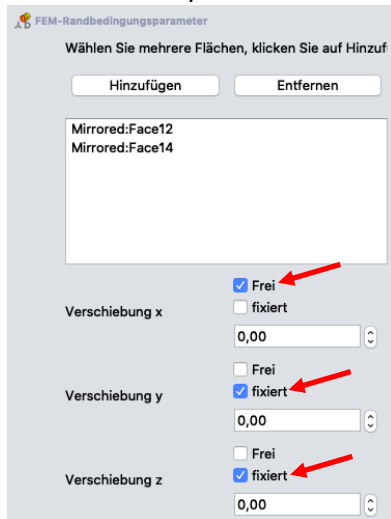
Wirkt eine Kraft auf die Mitte des Bretts, biegt es sich nach unten durch und zieht die beiden Auflagen nach Innen.

Die beiden Unterseiten der Auflagen müssen daher in x-Richtung beweglich und in y- und z-Richtung fixiert werden.

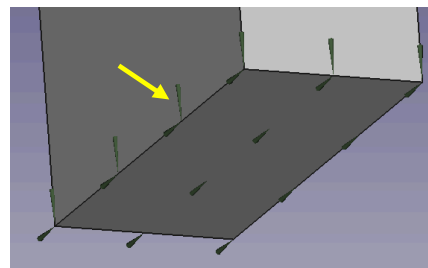
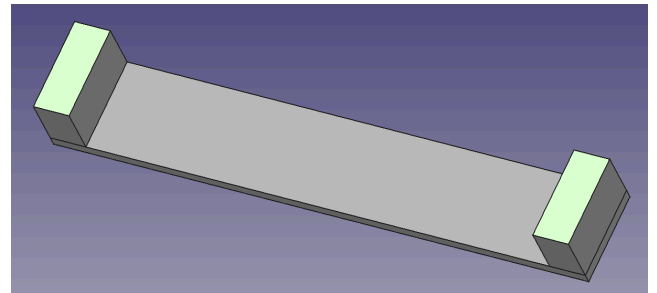
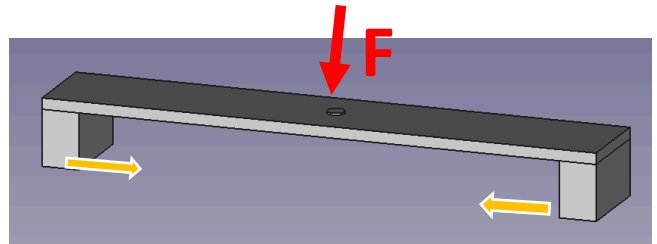
- Drehe das Brett mit der Maus so, dass du die Unterseite kannst.



- M1 auf 
- M1 auf die beiden Unterseiten der Quader (färben sich grün)
- M1 auf „Hinzufügen“
Setze die entsprechenden Häkchen:




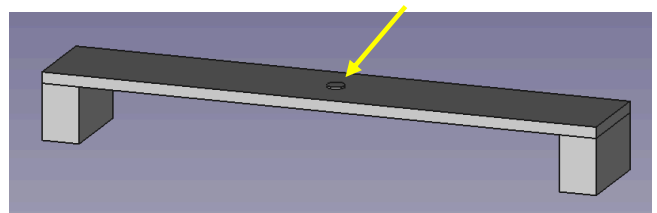
- Bestätige mit OK.
Die Bewegungs-Beschränkungen werden mit grünen Pfeilen angezeigt.



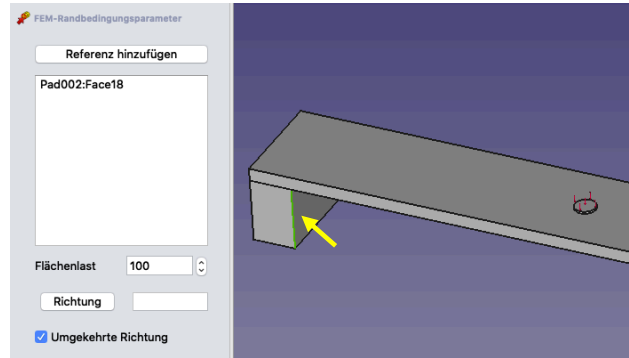
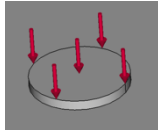
6.) Kraft festlegen

- Drehe das Brett so, dass du die Oberseite sehen kannst.


- M1 auf 
- M1 auf die obere Kreisfläche (färbt sich grün und die roten Kraftpfeile werden angezeigt. Diese zeigen noch nach oben.)



- Streckenlast: 100,00 Newton (10 kg)
- M1 auf „Richtung“
- M1 auf eine (beliebige) vertikale Kante
- M1 bei „Umgekehrte Richtung“
(Die roten Kraftpfeile müssen jetzt nach unten zeigen)
- Bestätige mit OK.



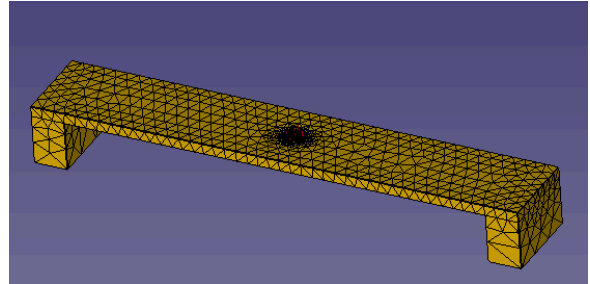
7.) FEM-Netz erstellen

- M1 auf Body
- M1 auf 



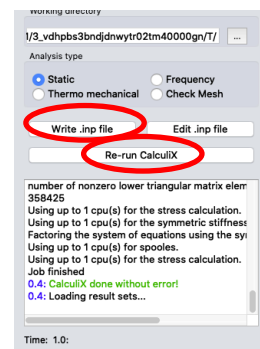
Standardeinstellungen übernehmen

- Bestätige mit OK.




8.) FEM-Berechnung

- M11 auf „CalculiXccxTools“
- M1 auf „Write .inp file“
- M1 auf Re-run CalculiX
- M1 auf Schließen

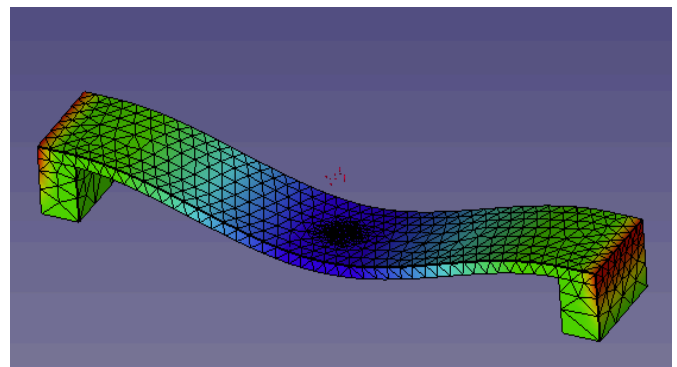


9.) Ergebnisse anzeigen: Biegung

- M1 auf „CalculiX_static-results“
- M1 auf 
- M1 auf „Z-Verschiebung“



Das Brett wird sich um 0,91 mm nach unten biegen.



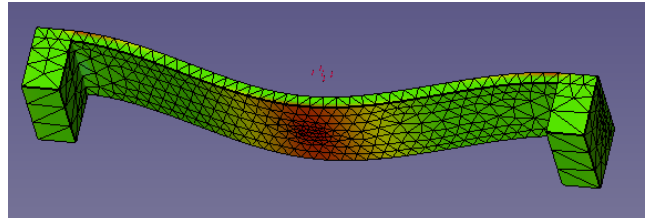
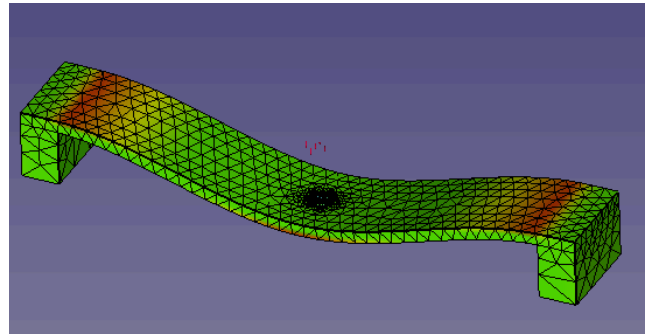
Die seitlichen Kanten werden minimal nach oben gezogen.

10.) Ergebnisse anzeigen: Zugspannung

- M1 auf "Max Principal stress"




Die maximale Zugspannung beträgt 10,91 MPa



Die Zugspannung ist an den rot-orange gefärbten Stellen am größten.

11.) Befestigung/Fixierungen ändern

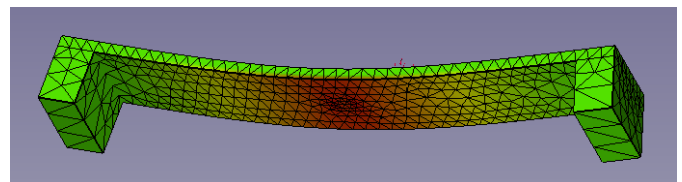
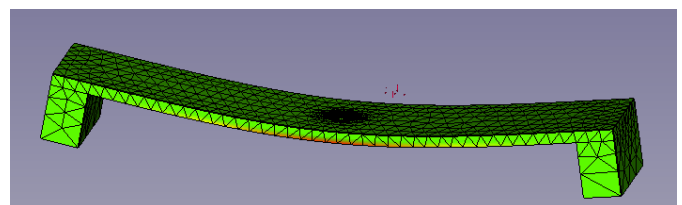
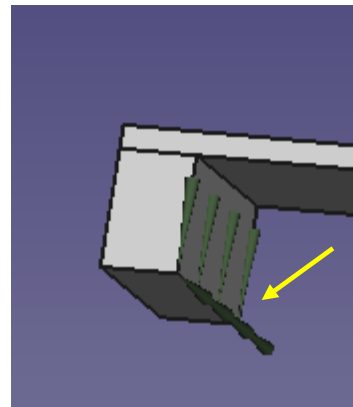
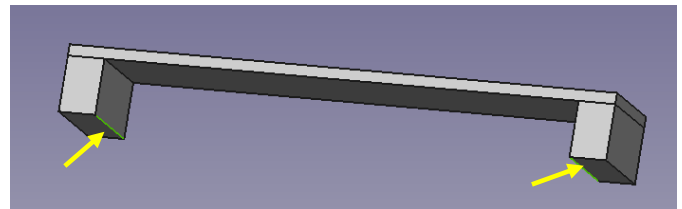
Statt der Fläche werden nur die beiden Innenkanten fixiert.

- M1 auf 
- Damit werden die alten FEM-Ergebnisse gelöscht.
- M1 auf „FEMConstraintFixed“
- Entferne die eingetragenen Fixierungen.
- M1 auf die beiden Innenkanten der Auflagen. (Färben sich grün)
- M1 auf Hinzufügen

Die Fixierungen werden mit grünen Pfeilen dargestellt.

- Führe die FEM-Berechnung erneut durch
→ Schritt 8.)

Ergebnis (Zugspannungen)

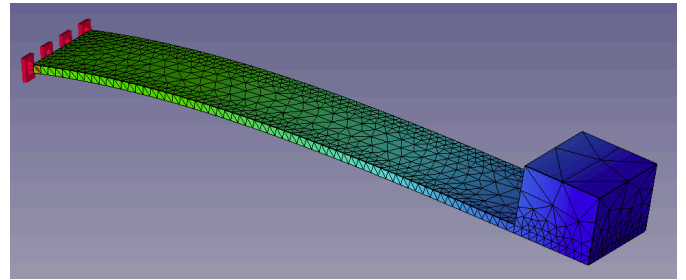


Kapitel 3

Eigengewichtsanalyse

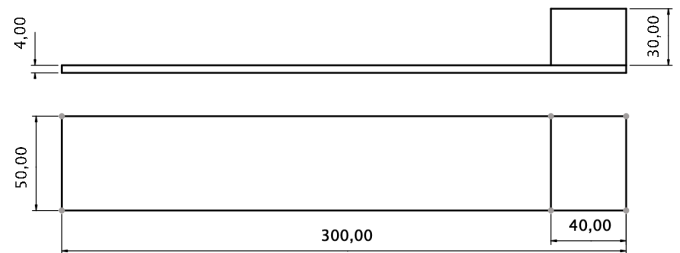
Darum geht's:

- Eine Eigengewichtsanalyse für einen einfach fixierten Körper (Aluminium) durchführen.

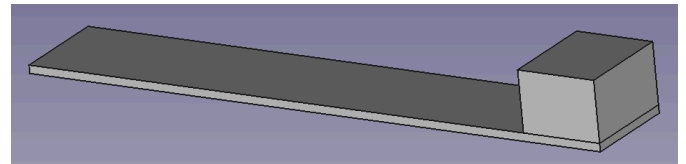


1.) Körper modellieren


- Modellierte im Arbeitsbereich **Part Design** den Körper entsprechend der technischen Zeichnung.




Der zusätzliche Klotz am rechten Ende des Bretts soll den Effekt des Eigengewichts verstärken.

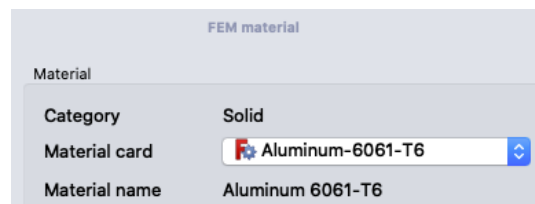


2.) Arbeitsbereich FEM


- Wechsle in den Arbeitsbereich **FEM**
- M1 auf „Body“ in der Baumansicht
- M1 auf  erstellt einen Container für die FEM-Analyse.

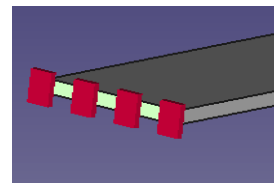
3.) Material auswählen

- M1 auf 
- Wähle als Material „Aluminium-6061-T6“ aus.



4.) Fixierung des Bretts

- Drehe das Brett mit der Maus so, dass du die **linke** Stirnseite sehen kannst.
- M1 auf 
- M1 auf die linke Stirnseite (färbt sich grün)
- M1 auf „Add“
- Bestätige mit OK.



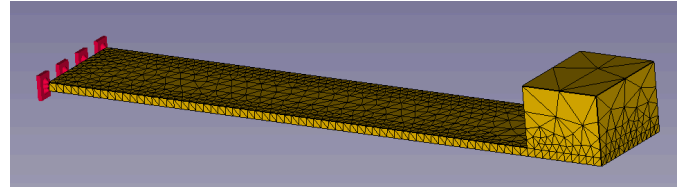
6.) Eigengewicht



- M1 auf
- Bestätige mit OK.

7.) FEM-Netz erstellen

- M1 auf Body
- M1 auf 
- Bestätige mit OK.




8.) FEM-Berechnung

- M11 auf „CalculiXccxTools“
- M1 auf „Write .inp file“
- M1 auf Re-run CalculiX
- M1 auf Schließen

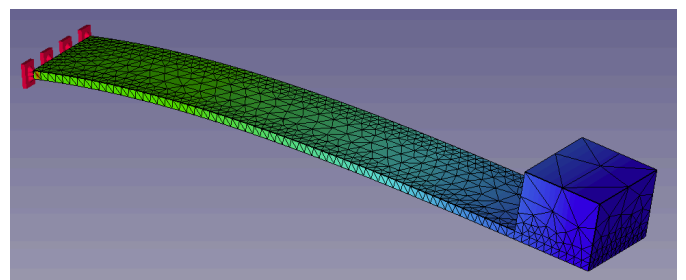
9.) Ergebnisse anzeigen

- M1 auf „CalculiX_static-results“

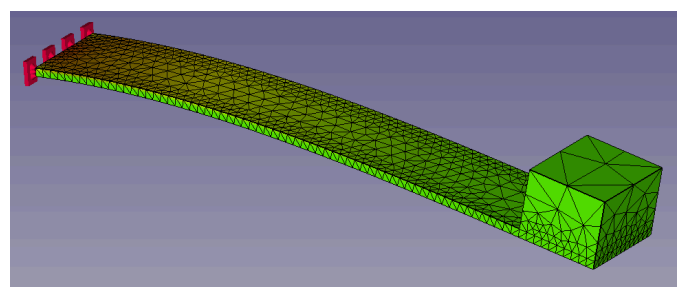
- M1 auf 

Ergebnisse:

Biegung



Zugspannung



Nachbetrachtung

Die FEM-Methode ist in erster Linie eine qualitative Methode, um anzuzeigen, wo in einem Bauteil Biegungen und Spannungen auftreten.

Den berechneten Werten für Biegungen und Spannungen können nicht uneingeschränkt vertraut werden. Sie hängen offensichtlich von dem verwendeten Material ab. Im NwT-Unterricht kommen verschiedenste Holz- und Brettarten zum Einsatz. Bei der Auswahl des Materials steht hier jedoch nur die Holzart „Wood-Generic“ zur Verfügung. Daraus wird schnell klar, dass es sich nur um grobe Werte handeln kann. Auch die Maserrichtung wird hier nicht berücksichtigt.

Auch die Wahl des FEM-Netzes, bzw. seiner Maschengröße, kann die berechneten Werte unterschiedlich stark beeinflussen. Dazu zwei Beispiele:

Beispiel 1: Brett: 86cm x 20 cm x 1,8 cm / Material: Holz / Belastung: 100 N

a) FEM-Berechnung mit max. Maschengröße 30

The screenshot shows the FEM software interface for a beam analysis. On the left, the 'Ergebnistyp' (Result Type) panel is visible, with 'Max Principal stress' selected. The results are: Min: -1365,73 kPa, Durchschnitt: 4454,41 kPa, and Max: 26,78 MPa. The 'Verdrängung' (Displacement) panel shows 'Anzeigen' checked, 'Faktor: 1', and 'Schieber maximal: 100'. On the right, the 'Tetraeder-Parameter' dialog box is open, showing 'Max. Größe: 30,00' and 'Zweite Ordnung' checked. The beam model is shown with a coarse mesh.

b) FEM-Berechnung mit max. Maschengröße 5

The screenshot shows the FEM software interface for a beam analysis with a finer mesh. On the left, the 'Ergebnistyp' panel shows 'Max Principal stress' selected. The results are: Min: -1407,11 kPa, Durchschnitt: 4321,26 kPa, and Max: 27,75 MPa. The 'Verdrängung' panel shows 'Anzeigen' checked, 'Faktor: 1', and 'Schieber maximal: 100'. On the right, the 'Tetraeder-Parameter' dialog box is open, showing 'Max. Größe: 5,00' and 'Zweite Ordnung' checked. The beam model is shown with a much finer mesh.

Beobachtung: Die beiden Werte für die max. Zugspannung sind sehr ähnlich.

Beispiel 2: Zapfen (wird an der rechten vorderen Kante belastet)

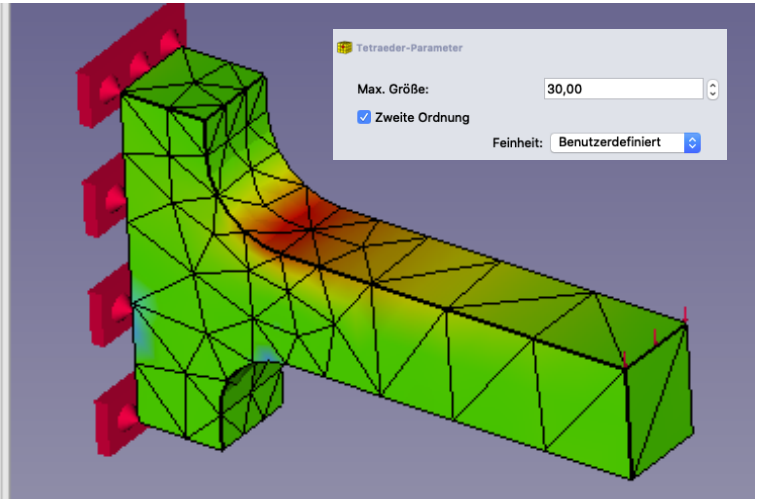
a) FEM-Berechnung mit max. Maschengröße 30

- Min Principal stress
- Max shear stress (Tresca)
- Mass Flow Rate
- Network Pressure

Min: -32,03 kPa ✓

Schnitt: 65,12 kPa ✓

Max: 478,33 kPa ✓



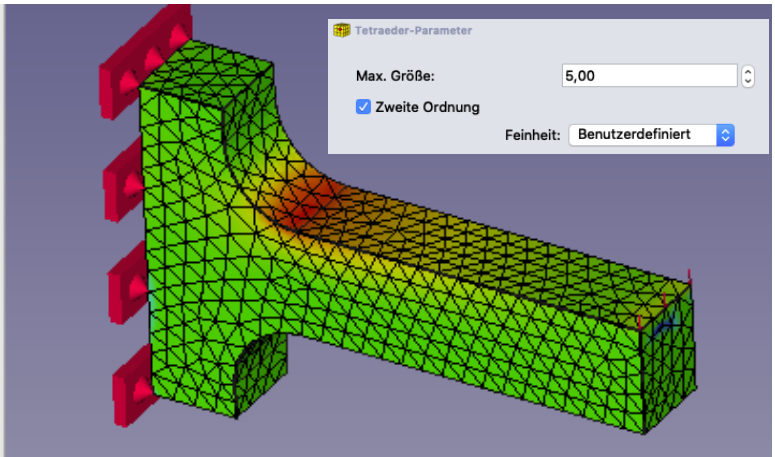
b) FEM-Berechnung mit max. Maschengröße 5

- Max Principal stress
- Min Principal stress
- Max shear stress (Tresca)
- Mass Flow Rate
- Network Pressure

Min: -72,67 kPa ✓

Schnitt: 54,65 kPa ✓

Max: 510,91 kPa ✓



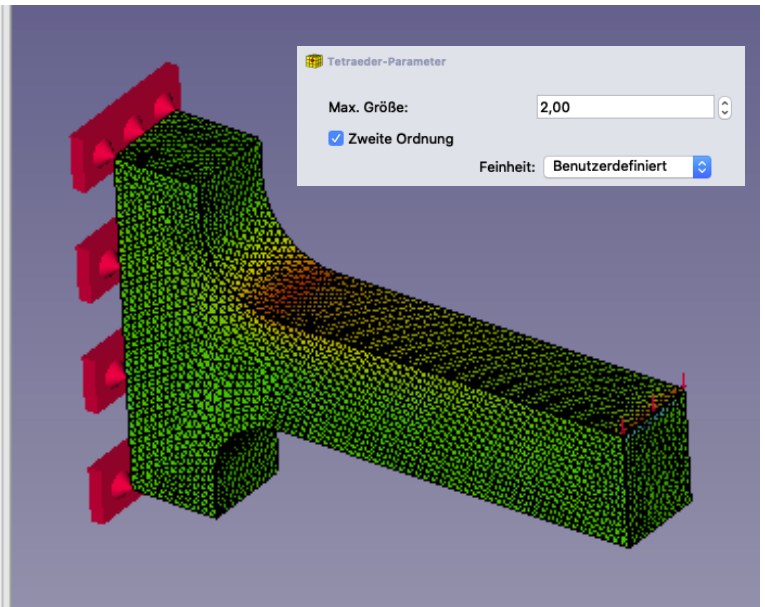
c) FEM-Berechnung mit max. Maschengröße 2

- Max Principal stress
- Min Principal stress
- Max shear stress (Tresca)
- Mass Flow Rate
- Network Pressure

Min: -132,66 kPa ✓

Schnitt: 53,18 kPa ✓

Max: 575,00 kPa ✓



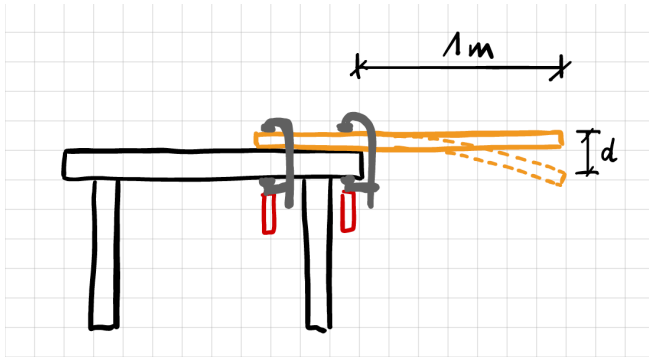
Dieses Beispiel zeigt, wie sich die Werte für die maximal Zugspannung doch erheblich ändern.

Schülerexperiment

Material:

- Dachlatte (48mm x 24 mm) mit einer Länge von ca. 1,50 m
- Massestück 10 kg
- Schraubzwingen

Aufbau:



- Achte auf den Tisch!
Er könnte umfallen...
- Belaste die Dachlatte behutsam!
Bruchgefahr...

Durchführung:

Teil A:

- Belaste die Dachlatte am rechten Ende mit dem Massestück von 10 kg.
- Miss die Strecke, um die sich die Dachlatte maximal durchbiegt.

Teil B:

- Modellierte die Dachlatte in FreeCAD (Nur den überstehenden und beweglichen Teil von 1 m)
- Führe eine FEM-Analyse durch.

Auswertung:

- Vergleiche die Werte für die maximale Biegung.

Beispielhafte Auswertung:

Teil A: Messung: 92,5 cm – 84, 2 cm = **8,3 cm**

Teil B: FEM-Analyse ergibt: **5,8 cm**.

Werte liegen immerhin in der ähnlichen Größenordnung!

