

# Klausurvorbereitung CM2 – Lösungsvorschläge

## 1 Praktische Modellierung und Berechnung

### 1.1 Beispiele für Wissens- und Verständnis-Fragen

1.) Erklären Sie die Begriffe Solid Modeling und Direkte Generierung! Was versteht man unter der Top-Down- bzw. Bottom-Up-Arbeitsweise?

- *Solid Model(l)ing:* Modellieren und Simulieren mit Hilfe 3-dimensionaler Objekte.
- *Direkte Generierung:* Erzeugung von einzelnen Finiten Elementen anhand von Keypoints, welche direkt selektiert werden. Es wird weder „mapped“ noch „free“ und nicht automatisch vernetzt!
- *Top-Down-Prinzip:* Von Grobstruktur ausgehend ins Detail vordringen.
- *Bottom-Up-Prinzip:* Mit einzelnen (wichtigen) Details beginnen und daraus Gesamtstruktur zusammensetzen

2.) Nennen Sie die beim Solid Modeling eines Volumens (z.B. Quader) generierten geometrischen Größen! Geben Sie deren Hierarchie-Abfolge an!

*Keypoints → Lines → Areas → Volume*

3.) Erklären Sie die Begriffe Mapped Meshing und Free Meshing an einem Beispiel!

- *Mapped Meshing:* strukturiert; z.B. Rechteckflächen durch regelmäßige, rechteckige Teilelemente (automatisch) vernetzen
- *Free Meshing:* unstrukturiert; z.B. können unregelmäßig geformte Flächen ausschließlich „frei“ (evtl. auch automatisch) vernetzt werden. I. Allg. gibt es dann auch nicht rechteckige Elemente.

4.) Was versteht man unter der h- bzw. der p-Methode? Wie kann man bei den beiden Methoden die Genauigkeit der FE-Berechnung eines Bauteils erhöhen?

- *„h-Methode“:* feinere Vernetzung → mehr und damit kleinere Elemente → Näherungsabweichung wird kleiner → Bauteilverhalten wird genauer abgebildet; Vorteil: h-Methode kann auf Bereiche mit hohem Spannungsgradient beschränkt werden → hält Rechenaufwand in Grenzen!
- *„p-Methode“:* höherer Polynomgrad → Ansatzfunktion wird genauer, Näherungsabweichung kleiner → ...wie h-Methode! Vorteil: einfach und schnell anwendbar; Nachteil: Steifigkeitsmatrix wird komplexer → Rechenaufwand und -zeit steigen!

5.) Was versteht man unter den Befehlen „Add“ bzw. »Glue‘? Erklären Sie die Auswirkung der beiden Befehle am Beispiel zweier Flächen!

- „ADD“: z.B. 2 ungleichgroße, aneinandergrenzende Rechteckflächen werden zu 1 Fläche zusammengefügt; Folgen: 1 Netz über gesamte, nicht mehr regelmäßige Fläche → nicht mehr „mapped“ vernetzbar!
- „GLUE“: z.B. Rechteckflächen wie vor, jedoch „Verklebung“ an Grenzlinie; Folge: „mapped meshing“ ebenfalls unmöglich, aber: Flächen 1 und 2 können VOR dem „gluing“ und zwar „mapped“ vernetzt werden!

6.) Was muß man tun, um eine FE-Berechnung im richtigen Einheitensystem durchzuführen? Erklären Sie anhand des Einheitensystems N-mm-s! Welche Einheiten haben dann Masse und Dichte? Geben Sie ein Beispiel an!

*Man muss ALLE anzugebenden Größen – Maße und Lasten genauso wie Materialkonstanten – in DIESEM Einheitensystem eingeben; also z.B. Abmessungen in mm, Kräfte in N, Momente in Nmm usw.; d.h. aber auch, dass beispielsweise die Masse die Einheit  $\text{Ns}^2/\text{mm}$  ( $= 10^3 \text{ kg} = 1 \text{ t}$ ) und entsprechend die Dichte die Einheit  $\text{Ns}^2/\text{mm}^7$  ( $= 10^{12} \text{ kg}/\text{m}^3 = 10^9 \text{ t}/\text{m}^3 = \text{ANSYS-Eingabe-Einheit!}$ ) erhalten!*

7.) Mit welchen Parametern kann man die Netzfeinheit z.B. einer Fläche steuern? Geben Sie ein Beispiel an!

- Eingabe der Länge aller Elemente entlang einer Linie:  
z.B.  $l = 10 \text{ mm}$ ;  $L = 100 \text{ mm} \rightarrow Z = 10$
- Eingabe der Anzahl der Elemente entlang einer Linie:  
z.B.  $Z = 5$ ;  $L = 100 \text{ mm} \rightarrow l = 20 \text{ mm}$
- Außerdem: Regression bzw. Progression der Elementlängen entlang einer Linie:  
z.B.  $l = 10 \text{ mm}$ ;  $L = 100 \text{ mm}$ ;  $r = 4 \rightarrow Z = 10$ ;  $l_A = 20 \text{ mm}$ ;  $l_E = 5 \text{ mm}$

8.) Was versteht man unter einer Modal-Analyse? Erklären Sie anhand eines Beispiels!

*Untersuchung der Schwingungsfähigkeit eines Modells, d.h. Ermittlung der Eigenresonanz-Frequenzen und der jeweiligen Amplituden: Beispiel Auspuff*

*Aufhängungspunkte und –eigenschaften wie in der Realität; Massenverteilung entsprechend der verwendeten Elemente; FE-Programm berechnet das Verhalten des Auspuffs bei Anregung innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereichs, z.B. durch Abgasstrom mit Hubfrequenz → Ausgabe einer Liste mit Eigenfrequenzen und jeweiligen Schwingungsamplituden, Simulation der Bewegungsabläufe in der Grafik, Darstellung der maximalen Verformungen usw.*

## Checkliste für FEM-Untersuchung „Getriebewelle“

Nr.	Arbeits-Schritt	Beschreibung
1.	<b>Physikalische Modellierung</b>	
1.1	<b>Allgemeine Definitionen (Planung)</b> 1.1.1 Systemgrenzen  1.1.2 Systembeschreibung: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Teilsysteme</li> <li>• Kopplung</li> <li>• Materialien</li> <li>• Belastungen</li> <li>• Randbedingungen</li> <li>• Gesuchte Ergebnisse</li> <li>• System-Skizze</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Systemgrenzen: Zahnräder der zweiten Welle, Gehäuse</li> <li>- Welle mit Durchmesserstufung, 2 Zahnräder, Fest- und Loslager</li> <li>- Welle und Zahnräder fest verbunden, Lager werden nur als Festhaltungen berücksichtigt</li> <li>- Keine Materialbezeichnungen angegeben</li> <li>- Axial- und Radialkräfte an den Zahnrädern, Drehmoment</li> <li>- Fest- und Loslager (statisch bestimmt)</li> <li>- Biegemoment-Verlauf, Spannungen in der Welle, Durchbiegungen</li> <li>- Siehe Skizze in der Aufgabenstellung!</li> </ul>
1.2	<b>Ideallisierungen (Planung)</b> 1.2.1 Geometrie-Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionalität</li> <li>• Vereinfachungsmöglichkeiten</li> </ul> 1.2.2 Material-Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Linearität</li> <li>• Isotropie</li> <li>• Abhängigkeiten</li> </ul> 1.2.3 Belastungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensionalität</li> <li>• Last-Art</li> <li>• Zeitabhängigkeit</li> </ul> 1.2.4 Randbedingungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Starre und elastische Lagerungen</li> <li>• Vorgeschriebene Verschiebungen</li> <li>• Kontaktbedingungen</li> <li>• Kopplungsbedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3-dimensional (in Bezug auf FE-Modellierung, s.u.), Einheitensystem: N – mm – s</li> <li>- Welle kann als Balken betrachtet werden, Zahnräder können entfallen (s. 1.2.3)</li> <li>- Linearelastisches Material (E-Modul konstant)</li> <li>- Isotropie liegt vor</li> <li>- Materialdaten sind konstant</li> <li>- 3-dimensional (Kräfte in Ebene, Biegemomente, Drehmoment)</li> <li>- Statisch; Axialkraft am Teilkreis von Zahnrad II wird ersetzt durch Kraft in Wellenachse und entspr. Moment</li> <li>- Keine</li> <li>- Starres Festlager, starres Loslager</li> <li>- Loslager: Vertikale Verschiebung 0; Festlager: Horizontale und vertikale Verschiebungen 0</li> <li>- Keine</li> <li>- Keine</li> </ul>

## Checkliste für FEM-Untersuchung „Getriebewelle“

Nr.	Arbeits-Schritt	Beschreibung
2.	<b>FEM-Modellgenerierung</b>	
2.1	<b>Geometrie (Pre-Processing)</b> 2.1.1 Solid Modeling: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elementar-Geometrien</li> <li>• CAD-Geometrie-Transfer</li> <li>• Segmentierung</li> <li>• Strategie</li> <li>• Kopplung von Teil-Geometrien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Welle mit 2 unterschiedlichen Querschnitten</li> <li>- Nicht erforderlich</li> <li>- Welle in 3 Lines unterteilen wegen Durchmessersprüngen (keine Skizze erforderlich)</li> <li>- Keypoints generieren, Lines generieren durch Verbinden (Bottom-Up)</li> <li>- Entfällt</li> </ul>
2.2	<b>Elementierung (Pre-Processing)</b> 2.2.1 Element-Typen-Auswahl: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Notwendige Freiheitsgrade</li> <li>• Belastungsmöglichkeiten</li> <li>• Kompatibilität</li> <li>• Mögliche Einschränkungen</li> </ul> 2.2.2 Elementdaten-Definition	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3-dimensionales Balkenelement; muß gewählt werden für Drehmoment-Eingabe (Rot-DOF um Wellenachse)</li> <li>- 3 translatorische und 3 rotatorische DOFs</li> <li>- Knotenkräfte (Zahnrad I, II), Biegemoment (Zahnrad II), Drehmoment um Wellenachse</li> <li>- Entfällt</li> <li>- Entfällt</li> <li>- 2 Real Constants-Sätze für 2 unterschiedliche Wellen-Querschnitte (Querschnittsfläche, Flächenmomente) (IXX=..., IYY=.. etc.)</li> </ul>
2.3	<b>Materialien (Pre-Processing)</b> 2.3.1 Material-Modell: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Typisierung</li> <li>• Linearität</li> <li>• Isotropie</li> <li>• Zeitabhängigkeit</li> <li>• Temperaturabhängigkeit</li> </ul> 2.3.2 Materialdaten-Definition	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Linear-Elastisch (Spannung und Dehnung sind einander direkt proportional)</li> <li>- Ja, da E=konst.</li> <li>- Ja</li> <li>- Nein</li> <li>- Nein</li> <li>- E-Modul = 215000 N/mm<sup>2</sup>, Querdehnzahl = 0.3, Dichte = 7.85E-9 Tonne/mm<sup>3</sup></li> </ul>

## Checkliste für FEM-Untersuchung „Getriebewelle“

Nr.	Arbeits-Schritt	Beschreibung
2.4	<p><b>Netz-Generierung (Pre-Processing)</b></p> <p>2.4.1 Auswahl der Vernetzungsart</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Direkte Generierung</li> <li>• Mapped Meshing</li> <li>• Free Meshing</li> </ul> <p>2.4.2 Netzfeinheit:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einteilung von Berandungslinien</li> <li>• Elementkantenlängen</li> <li>• Elementverzerrungen</li> </ul> <p>2.4.3 Set-Definitionen</p> <p>2.4.4 Spezielle Elemente:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontakt-Elemente</li> <li>• Feder-Dämpfer-Elemente</li> <li>• Einzelmassen</li> </ul>	<p>- Entfällt (Mapped Meshing gewählt)</p> <p>- Ja; gleichmäßige Unterteilung der Lines; Elementlänge so wählen, daß an Zahnrädern und Lagern Nodes sind</p> <p>- Entfällt (s.o.)</p> <p>- Siehe Skizze</p> <p>- Siehe Skizze</p> <p>- Entfällt bei Balkenelementen (ansonsten Kantenverhältnisse kleiner 3 empfehlenswert)</p> <p>- Pkt. 2.4.3 entfällt</p> <p>- Pkt. 2.4.4 entfällt</p> <div style="text-align: center;"> <p style="text-align: right;"><i>Solid Model</i></p> <p style="text-align: right;"><i>Knoten Elemente</i></p> <p style="text-align: right;"><i>Lasten Lager</i></p> </div>

## Checkliste für FEM-Untersuchung „Getriebewelle“

Nr.	Arbeits-Schritt	Beschreibung
3.		<b>Berechnung und Auswertung</b>
3.1	<p><b>Analyse (Solution)</b></p> <p><b>3.1.1 Geometrische Randbedingungen:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Einzuschränkende Freiheitsgrade</li> </ul> <p><b>3.1.2 Statische Analyse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Belastungen</li> <li>• Lastfall-Kombinationen</li> </ul> <p><b>3.1.2 Modale Analyse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eigenform-Anzahl</li> <li>• Lösungs-Algorithmus</li> <li>• Dämpfung</li> </ul> <p><b>3.1.3 Frequenzgang-Analyse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Belastungen</li> <li>• Frequenzbereich</li> <li>• Schrittweite</li> <li>• Lösungs-Algorithmus</li> <li>• Dämpfung</li> </ul> <p><b>3.1.4 Transiente Analyse:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lasten und Lastschritte</li> <li>• Zeitschrittweite</li> <li>• Lösungs-Algorithmus</li> <li>• Dämpfung</li> </ul>	<p>- Knoten 3: <math>U_Y = 0</math>, <math>U_Z = 0</math>, Knoten 19: <math>U_X = 0</math>, <math>U_Y = 0</math>, <math>U_Z = 0</math></p> <p>- Kräfte und Momente siehe auch Skizze oben</p> <p>- Knoten 1: <math>F_Y = -5000 \text{ N}</math>; <math>M_X = 4E6 \text{ Nmm}</math>; Knoten 5: <math>F_Y = 7000 \text{ N}</math>, <math>F_X = 3000 \text{ N}</math>, <math>M_X = -4E6 \text{ Nmm}</math>, <math>M_Z = -3E5 \text{ Nmm}</math></p> <p>- Keine</p> <p>- Pkt. 3.1.2 entfällt</p> <p>- Pkt. 3.1.3 entfällt</p> <p>- Pkt. 3.1.4 entfällt</p>

## Checkliste für FEM-Untersuchung „Getriebewelle“

Nr.	Arbeits-Schritt	Beschreibung
3.2	<p><b>Auswertung (Post Processing)</b></p> <p>3.2.1 Ergebnis-Verifikation:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Plausibilitäts-Kontrolle</li> <li>• Kontrollrechnungen</li> <li>• Netzverfeinerung</li> </ul> <p>3.2.2 Ergebnis-Dokumentation:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Listings</li> <li>• Plot-Darstellungen</li> <li>• Zeitverläufe</li> <li>• Animationen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plausibilitätskontrolle durch Vergleich mit Handrechnung</li> <li>- Siehe Handrechnung unten</li> <li>- Länge der Balkenelemente halbieren und die beiden Lösungen vergleichen</li> </ul> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Knotenverschiebungen, Knotenkräfte, Elementspannungen, Biegemomente, Reaktionskräfte</li> <li>- Gesamt-Verformung in 3D-Ansicht</li> <li>- Entfällt</li> <li>- Entfällt</li> </ul> <p>Handrechnung für Knoten ①, ③, ⑱:</p> <p>① <math>M_z = 0</math> (freies Ende)</p> <p>③ <math>M_z = F Y_{\text{①}} \cdot 100 \text{ mm} = 500\,000 \text{ Nmm}</math></p> $W_b = \frac{\pi d^3}{32} = 2650,7 \text{ mm}^3$ $\sigma_x = \frac{M_z}{W_b} = 188,6 \text{ N/mm}^2$ <p>⑱ <math>M_z = 0</math> (freies Ende)</p>