

Skript zum

**Praktikum: Finite Elemente
Methode (FEM) mit Schwerpunkt
Luft- und Raumfahrtstrukturen**

Autoren: Dipl.-Ing. Stephan Endler
BinWei M.Sc.
Peng He M.Sc.
Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Version: 1.12
Stand: Wintersemester 2011/12

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis	XIV
1 Einführung	1
2 Theoretische Grundlagen	2
2.1 Statik	2
2.1.1 Stabelement.....	4
2.1.2 Balkenelement	4
2.1.3 Weitere Elementtypen.....	5
2.2 Dynamik	6
2.3 Beispiel - Statik	8
2.3.1 Analytisches Balkenmodell	9
2.3.2 FEM Balkenmodell - Handrechnung	11
2.3.3 FEM-Fehlerfaktor	14
2.4 Beispiel - Dynamik	14
2.4.1 Analytisches Balkenmodell	15
2.4.2 FEM Balkenmodell – Handrechnung.....	20
2.4.3 FEM-Fehlerfaktor	26
3 ANSYS Benutzeroberfläche	27
3.1 Starten von ANSYS	27
3.2 ANSYS Graphische Benutzer Oberfläche (GUI)	28
3.2.1 Ausgabefenster	28
3.2.2 Eingabefenster	29
3.3 Grundlagen (Abläufe im Hintergrund).....	29
3.3.1 ANSYSDatenbasis und Dateien.....	29
3.3.2 Befehlseingabe	30
3.3.3 Eingabekonventionen.....	30
3.3.4 Einheitensystem.....	31
3.4 Wichtige Funktionen und Einstellungen	31
3.4.1 Anzeigen des Log – Files und Error – Files	31
3.4.2 Steuern der Darstellung	32
3.4.3 ANSYS Selektierlogik.....	35

3.4.3.1	Selektieren in der GUI.....	35
3.4.3.2	Wichtige Selektierbefehle über die APDL	36
3.4.4	Verwendung des *GET - Befehls.....	41
3.4.5	Häufig verwendete Befehle	42
3.4.6	Bedingungen und Schleifen	44
3.4.6.1	*DO – Schleifen.....	44
3.4.6.2	*IF – Bedingung	45
3.4.7	Erstellen von Komponenten	46
3.4.8	ANSYS Hilfe	47
4	Ablauf einer FE-Analyse in ANSYS.....	49
4.1	Schritt 1: Preprocessor	49
4.1.1	Geometrie erzeugen.....	49
4.1.1.1	Geometrie Importieren.....	49
4.1.1.2	ANSYS Geometriemodeller	49
4.1.2	Definition der Elementtypen	51
4.1.3	Definition der Materialmodelle	52
4.1.4	Geometriezusatzinformationen	52
4.1.5	Vernetzen der Geometrie	53
4.2	Schritt 2: Solution.....	54
4.2.1	Lösungseinstellungen	54
4.2.2	Aufbringen der Lasten und Randbedingungen	55
4.2.3	Starten der Berechnung - Lösen der Gleichungen	55
4.3	Schritt 3: Postprozessor	56
4.3.1	Erstellen von Ergebnis Plots	56
4.3.1.1	Erstellen von Listen.....	57
5	Übungsbeispiele.....	59
5.1	Beispiel 1: Balkenbiegung	59
5.1.1	Balkenmodell unter Angabe der Querschnittsfläche und der Flächenträgheitsmomente	60
5.1.1.1	Preprocessing.....	60
5.1.1.2	Solution.....	67
5.1.1.3	Postprozessor.....	70
5.1.2	Balkenmodell unter Verwendung von Querschnitts- „Sections“	71
5.1.2.1	Preprocessing.....	71

5.1.2.2	Postprozessor.....	73
5.1.3	Modellierung des Balkens mit Schalenelementen	74
5.1.3.1	Preprocessing.....	74
5.1.3.2	Solution.....	81
5.1.3.3	Postprocessing.....	83
5.1.3.4	Verwendung der Pfad – Funktion.....	84
5.1.4	Balkenmodellierung mit Volumenelementen	87
5.1.4.1	Preprocessor	87
5.1.4.2	Solution.....	95
5.1.4.3	Postprocessing	96
5.2	Beispiel 2: Fachwerkmodell mit Balkenelementen	97
5.2.1	Aufgabe.....	97
5.2.2	Vorgehensweise	97
5.2.3	Ergebnis Lastfall 1.....	99
5.2.4	Ergebnis Lastfall 2.....	99
5.3	Beispiel 3: Einfacher Rotationskörper	100
5.4	Beispiel 4: Einfaches ebenes (Schalen/Platten) Modell.....	103
5.4.1	Beginn eines Inputfiles	104
5.4.2	Preprocessor.....	104
5.4.3	Solution	110
5.4.4	Postprozessor	111
5.5	Beispiel 5: Faserverbund Modellierung	112
5.5.1	Preprocessor.....	113
5.5.2	Solution	116
5.5.3	Postprozessor	116
5.6	Beispiel 6: Erzeugen von Koppelbedingungen.....	118
5.6.1	Der CP – Befehl.....	118
5.6.1.1	Preprocessor	121
5.6.1.2	Solution.....	122
5.6.1.3	Postprocessor.....	122
5.6.2	Der CPINTF – Befehl	123
5.6.2.1	Preprocessing	123
5.6.2.2	Solution.....	124
5.6.2.3	Postprocessing	125
5.6.3	Der CERIG – Befehl.....	126

5.6.3.1	Proprocessor	128
5.6.3.2	Solution.....	129
5.6.3.3	Postprocessing	130
5.7	Beispiel 7: Geometrieimport aus Catia – Volumenmodell	132
5.7.1	Aufbereitung der CAD-Daten	132
5.7.2	Importieren der CAD-Daten in ANSYS.....	132
5.7.2.1	GUI-Methode	132
5.7.2.2	Inputfile Code	133
5.7.3	Vernetzen in ANSYS	134
5.7.4	FEM-Berechnung.....	135
5.8	Beispiel 8: Nichtlinearitäten.....	135
5.8.1	Geometrische Nichtlinearitäten.....	135
5.8.1.1	Preprozessor.....	135
5.8.1.2	Solution.....	135
5.8.1.3	Postprozessor.....	137
5.8.2	Werkstoff Nichtlinearitäten.....	139
5.8.2.1	Preprozessor.....	139
5.8.2.2	Solution.....	141
5.8.2.3	Postprozessor.....	142
5.9	Beispiel 9: Beulanalyse einer ebenen Rechteckplatte.....	144
5.9.1	Lineare Beulanalyse und Vergleich mit HSB-Handrechnung	144
5.9.1.1	Preprocessing:.....	145
5.9.1.2	Solution.....	149
5.9.1.3	Postprocessor.....	150
5.9.2	Nichtlineare Beulanalyse (zum Selbststudium)	151
5.9.2.1	Lasten	151
5.9.2.2	Solution.....	152
5.9.2.3	Postprozessor.....	152
5.10	Beispiel 10: Dynamik.....	155
5.10.1	Modalanalyse	155
5.10.1.1	Solution.....	155
5.10.1.2	Postprozessor.....	156
5.10.2	Harmonische Analyse	158
5.10.2.1	Preprozessor.....	158
5.10.2.2	Solution.....	159

5.10.2.3	Postprozessor (/post26).....	161
5.10.2.4	Postprozessor (/post1).....	165
5.10.3	Transiente Analyse.....	167
5.10.3.1	Vorgehen.....	167
5.10.3.2	Preprocessor.....	168
5.10.3.3	Solution.....	168
5.10.3.4	Postprocessor.....	173
5.11	Beispiel 11: Sandwichplatte unter Temperaturlast.....	174
5.11.1	Preprocessor.....	175
5.11.2	Solution	178
5.11.3	Postprocessing	181
5.11.4	Weitere Möglichkeit der Sandwichmodellierung	181
Anhang A	Liste wichtiger ANSYS – Befehle.....	184
Anhang B	Abschlussübungen	189
B.1	Flügelmodell	189
Geometrieerstellung Flügel.....	189	
B.2	Reflektormodell	193
Anhang C	Sonstiges.....	198
C.1	Umrechnung Radian -> Degree	198
Anhang D	Referenz-Literaturverzeichnis.....	199

Abbildungsverzeichnis

Abbildung2-1:	Freiheitsgrade eines Stabelements.....	4
Abbildung2-2:	Freiheitsgrade eines Balkenelements	4
Abbildung2-3:	Freiheitsgrade eines Balkenelements	7
Abbildung 2-4:	Einseitig fest eingespannter Balken, belastet mit einer Querkraft	8
Abbildung2-5:	Vereinfachtes Balkenmodell	9
Abbildung2-6:	Aufteilung des Doppel-T-Trägerquerschnitts in Rechteckquerschnitte.....	10
Abbildung2-7:	Flächenträgheitsanteile durch Abstand zur Biegeachse (Satz von Steiner).....	10
Abbildung2-8:	FEM-Balkenmodell, diskretisiert mit 5 Knoten und 4 Elementen	11
Abbildung2-9:	FEM-Balkenmodell, Freiheitsgrade.....	12
Abbildung2-10:	Einseitig fest eingespannter Balken, unbelastet	14
Abbildung2-11:	Schnittmodell am differentiellen Balkenelement	15
Abbildung2-12:	Eigenfunktionen analytisches Balkenmodell.....	19
Abbildung2-13:	FEM-Balkenmodell, diskretisiert mit 5 Knoten und 4 Elementen	20
Abbildung2-14:	FEM-Balkenmodell, Freiheitsgrade.....	20
Abbildung2-15	Eigenformen aus FEM Berechnung mit 4 Elementen	24
Abbildung2-16	Eigenformen aus FEM Berechnung mit 10 Elementen	25
Abbildung2-17	Eigenformen aus FEM Berechnung mit 100 Elementen	25
Abbildung3-1:	ANSYS Product Launcher Hauptfenster.....	27
Abbildung3-2:	ANSYS Benutzeroberfläche.....	28
Abbildung3-3:	Log- oder Error-File anzeigen lassen.....	31
Abbildung3-4:	Steuern der Darstellung 1	32
Abbildung3-5:	Steuern der Darstellung 2	33
Abbildung3-6:	Steuerung der Darstellung 3	34
Abbildung3-7:	Darstellungssteuerung mit dem /ESHAPE – Befehl 1	34
Abbildung3-8:	Darstellungssteuerung mit dem /ESHAPE – Befehl 2	34
Abbildung 3-9:	Methoden zum Aufbau eines Selektionssets in der GUI.....	36
Abbildung3-10:	Flächenunterteilung in Komponenten	46
Abbildung3-11:	Aufruf der ANSYS Hilfe	47
Abbildung4-1:	Geometrie erstellen / bearbeiten.....	50

Abbildung4-2:	Geometrie erstellen / bearbeiten.....	51
Abbildung4-3:	Definition der Materialmodelle	52
Abbildung4-4:	Vernetzen des Modells	53
Abbildung4-5:	Auswahl des Analysetyps	54
Abbildung4-6:	Aufbringen von Lasten.....	55
Abbildung4-7:	Starten der Berechnung.....	55
Abbildung4-8:	Postprozessor.....	56
Abbildung4-9:	Erstellen eines Ergebnisplots im .png - Format	57
Abbildung4-10:	Auflistung der Knotenverschiebungen in y - Richtung.....	57
Abbildung4-11:	Auflistung von Reaktionskräften (links) und Knotenkräften (rechts).....	58
Abbildung5-1:	Einseitig fest eingespannter Balken, belastet mit einer Querkraft.....	59
Abbildung5-2:	Balkenmodell 1: Freiheitsgrade „beam4“ Balkenelement.....	60
Abbildung5-3:	Balkenmodell 1: Geometriemodell.....	60
Abbildung5-4:	Balkenmodell 1: Keypoints (KP) erstellen	61
Abbildung5-5:	Balkenmodell 1: Linien (L) erstellen	61
Abbildung5-6:	Balkenmodell 1: Elementtypendefinition (ET).....	62
Abbildung5-7:	Balkenmodell 1: Geometriezusatzinformationen / Real Constants	63
Abbildung5-8:	Balkenmodell 1: Materialmodelldefinition	64
Abbildung5-9:	Balkenmodell 1: Definition der Vernetzungsfeinheit.....	65
Abbildung5-10:	Balkenmodell 1: Zuweisen von Elementattributen.....	65
Abbildung5-11:	Balkenmodell 1: Vernetzen der Geometrie	66
Abbildung 5-12:	Balkenmodell 1: Definition der Randbedingungen.....	67
Abbildung5-13:	Balkenmodell 1: Definition der Lasten	68
Abbildung5-14:	Balkenmodell 1: fertiges Modell.....	68
Abbildung5-15:	Balkenmodell 1: Auswahl des Analysetyps.....	69
Abbildung5-16:	Balkenmodell 1: Starten der Analyse	69
Abbildung5-17:	Balkenmodell 1: Ergebnisdarstellung.....	70
Abbildung5-18:	Balkenmodell 1: Balkenverformung in z-Richtung	70
Abbildung5-19:	Balkenmodell 1: Definition der Elementtypen	71
Abbildung5-20:	Balkenmodell 2: Geometriezusatzinformationen / Sections	73
Abbildung5-21:	Balkenmodell 2: fertiges Modell.....	73
Abbildung5-22:	Balkenmodell 2: Balkenverformung in z-Richtung	73

Abbildung5-23:	Balkenmodell 3: Schalenelement	„shell181“	74
Abbildung5-24:	Balkenmodell 3: Skizze Keypoints für Schalenmodell	75	
Abbildung5-25:	Balkenmodell 3: Keypoints für Schalenmodell erzeugen	76	
Abbildung5-26:	Balkenmodell 3: Flächen erzeugen	77	
Abbildung5-27:	Balkenmodell 3: Fertige Geometrie.....	77	
Abbildung5-28:	Balkenmodell 3: Alle Flächen selektieren.....	78	
Abbildung5-29:	Balkenmodell 3: Liniensummerierung.....	78	
Abbildung5-30:	Balkenmodell 3: Elementtyp selektieren	79	
Abbildung5-31:	Balkenmodell 3: Shellsection erstellen	80	
Abbildung5-32:	Balkenmodell 3: Elementgröße definieren	80	
Abbildung5-33:	Balkenmodell 3: Vernetzen	81	
Abbildung5-34:	Balkenmodell 3: Lagerung	82	
Abbildung5-35:	Balkenmodell 3: Einzelkraft aufbringen.....	82	
Abbildung5-36:	Balkenmodell 3: Verformungen.....	83	
Abbildung5-37:	Balkenmodell 3: Verschiebung in z – Richtung über Elementgröße.....	84	
Abbildung 5-38:	Anlegen eines Pfades	85	
Abbildung 5-39:	Projizieren der Ergebniswerte auf einen Pfad	85	
Abbildung 5-40:	Plotten eines Pfades	86	
Abbildung5-41:	Balkenmodell 4: Freiheitsgrade „solid45“ Volumenelement	87	
Abbildung5-42:	Balkenmodell 4: Geometrieerstellung	87	
Abbildung5-43:	Balkenmodell 4: Rechtecke erstellen.....	88	
Abbildung5-44:	Balkenmodell 4: Flächen verbinden.....	88	
Abbildung5-45:	Balkenmodell 4: Mit Schalenelementen vernetzte Stirnfläche.....	90	
Abbildung5-46:	Balkenmodell 4: Extrusionsoptionen	91	
Abbildung5-47:	Balkenmodell 4: Extrusionsoptionen 2	91	
Abbildung5-48:	Balkenmodell 4: vernetztes Modell	92	
Abbildung5-49:	Balkenmodell 4: Netzprüfung.....	92	
Abbildung5-50:	Balkenmodell 4: Netzprüfung 2.....	93	
Abbildung5-51:	Balkenmodell 4: Netzprüfung 3.....	93	
Abbildung5-52:	Balkenmodell 4: Netzprüfung 4.....	94	
Abbildung5-53:	Balkenmodell 4: Knoten verbinden 1	94	
Abbildung5-54:	Balkenmodell 4: Knoten verbinden 2	95	

Abbildung5-55:	Balkenmodell 4: Lagerung	95
Abbildung5-56:	Balkenmodell 4: Last aufbringen	96
Abbildung5-57:	Balkenmodell 4: Verformungen.....	96
Abbildung5-58:	Skizze des Fachwerks mit Bemaßungen	97
Abbildung5-59:	Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall1	99
Abbildung5-60:	Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall2	99
Abbildung5-61:	Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall2 ohne Basislinien.....	99
Abbildung 5-62:	Skizze des Rotationskörpers	100
Abbildung5-63:	Festlegen der Symmetriearchse	101
Abbildung5-64:	Darstellung der Verformungen und Spannungen.....	103
Abbildung5-65:	Schalenmodell: Skizze	103
Abbildung5-66:	mögliche Koordinatensysteme	104
Abbildung5-67:	Schalenmodell: Grundgerüst für Vernetzung	107
Abbildung5-68:	Schalenmodell: Lokale Koordinatensysteme	107
Abbildung5-69:	Schalenmodell: Korrespondierende Linien	108
Abbildung5-70:	Schalenmodell: Vernetzung	110
Abbildung5-71:	Schalenmodell: Verschiebungen in x-Richtung	111
Abbildung5-72:	Faserverbundmodell: Keyoptions	114
Abbildung5-73:	Faserverbundmodell: Parameter der Section	114
Abbildung5-74:	Faserverbundmodell: Elementkoordinatensysteme entlang der Faserorientierung.....	115
Abbildung5-75:	Faserverbundmodell: Lagenaufbau anzeigen lassen	116
Abbildung5-76:	Faserverbundmodell: Spannungen in den unterschiedlichen Schichten.....	118
Abbildung5-77:	Koppeln verschiedener Freiheitsgrade, oben: u_x , unten: u_x, u_y	119
Abbildung5-78:	Gelenkig verbundene Stäbe	120
Abbildung5-79:	Spannungen bei gelenkiger Verbindung	122
Abbildung5-80:	Spannungen bei starrer Verbindung	122
Abbildung 5-81:	3 Platten, vernetzt	124
Abbildung 5-82:	3 Platten gekoppelt und gelagert.....	124
Abbildung 5-83:	z – Verschiebungen bei 1g.....	125
Abbildung 5-84:	Spannungen in x – Richtung (/eshape,1)	125
Abbildung5-85:	Unterschied zwischen CP/CPINTF und CERIG	126

Abbildung5-86:	Verlauf der Lochleibungskräfte	127
Abbildung5-87:	Idee der „radialen“ Kopplung mit CERIG und Zylinderkoordinaten	127
Abbildung5-88:	Modell einer Lasteinleitungsstelle mittels Bolzen	129
Abbildung5-89:	Spannungsplot in globaler x – und y – Richtung	130
Abbildung5-90:	Spannungsplot in radialer – und tangentialer Richtung	130
Abbildung5-91:	Volumenmodell: IGES GUI Import	133
Abbildung5-92:	Volumenmodell: Vernetztes Modell.....	134
Abbildung5-93:	Geometrische Nichtlinearität: Solution – Parameter	137
Abbildung5-94:	Geometrische Nichtlinearität: Verformungen in der z-Achsenrichtung.....	138
Abbildung5-95:	Geometrische Nichtlinearität: Verformungsvergleich in der z-Achsenrichtung Nichtlinear - Linear	138
Abbildung5-96:	Werkstoff Nichtlinearität: Spannungs-Dehnungs-Diagramm	139
Abbildung5-97:	Werkstoff Nichtlinearität: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – GUI	140
Abbildung5-98:	WerkstoffNichtlinearität: Solution – Parameter; Registrierkarte Nonlinear (erweiterte Optionen)	141
Abbildung5-99:	Werkstoff Nichtlinearität: Verlauf der Verschiebung in x- Richtung über der Kraft	142
Abbildung5-100:	Werkstoff Nichtlinearität: Variable Viewer	143
Abbildung 5-101:	Werkstoff Nichtlinearität: Auswahlfenster	143
Abbildung5-102:	Lineare Beulanalyse: Geometriedefinition.....	144
Abbildung5-103:	Lineare Beulanalyse: Auszug aus dem HSB zur Beulberechnng.....	145
Abbildung5-104:	Lineare Beulanalyse: Unbehinderte Querkontraktion.....	146
Abbildung5-105:	Lineare Beulanalyse: Vernetztes Modell	148
Abbildung5-106:	Lineare Beulanalyse: Liste der ersten 10 Beulformen mit den kritischen Beulspannungen und Plot der ersten Beulform	150
Abbildung5-107:	Lineare Beulanalyse: Auszug HSB zur Beulberechnung.....	151
Abbildung5-108:	Nichtlineare Beulanalyse: Verlauf der Verformungen senkrecht zur Plattenoberfläche über der Beulspannung	153
Abbildung5-109:	Nichtlineare Beulanalyse: Plots der Beulformen	154
Abbildung5-110:	Modalanalyse: Optionen für die Analyse Einstellen	156
Abbildung5-111:	Modalanalyse: Darstellung der sich entsprechenden Eigenformen.....	157

Abbildung5-112:	Modalanalyse: Beispiele für Verformungen die Beam nicht abbilden kann.....	157
Abbildung5-113:	Modalanalyse: Optionen für Animation.....	158
Abbildung5-114:	Harmonische Analyse: Optionen für die Analyseeinstellungen	160
Abbildung5-115:	Harmonische Analyse: Optionen für den Frequenzbereich	160
Abbildung5-116:	Harmonische Analyse: Zuweisen der Dämpfungsrate	161
Abbildung5-117:	Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm – Schwingung mit Dämpfung	162
Abbildung5-118:	Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm – Schwingung ohne Dämpfung	162
Abbildung5-119:	Harmonische Analyse: gleichzeitige Darstellung der Amplituden zweier Knoten bei $x=l/2$ und $x=l$	163
Abbildung5-120:	Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm mit logarithmischer Y-Achse.....	163
Abbildung5-121:	Harmonische Analyse: Axes Modifications.....	164
Abbildung5-122:	Harmonische Analyse: set,list Ausgabe.....	165
Abbildung5-123:	Harmonische Analyse: Real- und Imaginärteil der Amplitude.....	165
Abbildung5-124:	Transiente Analyse: Endlicher Kraft-Impuls	167
Abbildung5-125:	Transiente Analyse: Auswahlfenster für die Methode	168
Abbildung5-126:	Transiente Analyse: Auswahlfenster für die Hauptfreiheitsgrade	169
Abbildung5-127:	Transiente Analyse: Ablauf der Laststufen über die Zeit.....	170
Abbildung 5-128:	Transiente Analyse: Time and Time Step Options	171
Abbildung 5-129:	Transiente Analyse: Einlesen der Loadstep-Files	173
Abbildung5-130:	Transiente Analyse: Darstellung des ungedämpften Schwingungsverhaltens	173
Abbildung5-131:	Transiente Analyse: Darstellung des gedämpften Schwingungsverhaltens	174
Abbildung5-132:	Sandwichplatte	174
Abbildung5-133:	Diskretisiertes Modell der Sandwichplatte.....	177
Abbildung5-134:	Lagerung der Sandwichplatte.....	178
Abbildung5-135:	Temperaturverteilung der drei Lastfälle	180
Abbildung5-136:	Thermoelastische Verformungen bei Lastfall 1-3.....	181
Abbildung 5-137:	Varianten der Sandwichmodellierung	182
Abbildung 5-138:	Vergleich der Verschiebungen (u_z) und Spannungen (s_x)	182

Abbildung0-1:	Position des Punktes zur Reaktionskraftbestimmung	190
Abbildung0-2:	Reflektor CAD – Modell.....	193
Abbildung0-3:	Wichtige Abmessungen	194

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	FEM-Balkenlösung (gerundet)	13
Tabelle 2-2:	Analytisches Balkenmodell – erste 8 Wellenzahlen	18
Tabelle 2-3:	Analytisches Balkenmodell – erste 8 Eigenfrequenzen des Balkenmodells.....	18
Tabelle 2-4:	Analytisches Balkenmodell – erste 8 α_j des Balkenmodells	19
Tabelle 2-5:	Eigenfrequenzen aus FEM Berechnung.....	23
Tabelle 2-6:	Eigenformen aus FEM Berechnung	24
Tabelle 2-7:	Die Unterschiede zwischen analytischer- und FEM Berechnung (%) für eine 4 Elemente Berechnung	26
Tabelle 2-8:	MAC: Vgl. der analytischer Berechnung und FEM mit 4 Elementen	26
Tabelle 3-1:	Beispiel konsistenter Einheitensysteme	31
Tabelle 3-2:	Methoden zum Aufbau eines Selektionssets mit APDL Befehlen.....	37
Tabelle 3-3:	Methoden zum Aufbau eines Selektionssets mit APDL Befehlen.....	39
Tabelle 3-4:	Selektionsmatrix mit APDL Befehlen für die Methode „attached to“.....	39
Tabelle 3-5:	Wichte Befehle beim Arbeiten mit Komponenten	47
Tabelle 4-1:	Wichtige Elementtypen	51
Tabelle 5-1:	Zusammenfassung Balkenparameter	59
Tabelle 5-2:	KP - Koordinaten	100
Tabelle 5-3:	Keypoints.....	106
Tabelle 5-4:	Lagenaufbau Faserverbund	112
Tabelle 5-5:	Werkstoffkennwerte UD-Lage.....	112
Tabelle 5-6:	Keypoint Koordinaten und Nummern	120
Tabelle 5-7:	Linienerstellung durch Keypoints.....	120
Tabelle 5-8:	Werkstoff Nichtlinearität: Stützpunkte des Spannungs-Dehnungs-Diagramms	140
Tabelle 5-9:	Abmessungen: lineares Beulmodell.....	144
Tabelle 5-10:	Lineare Beulanalyse: Freiheitsgrade Zusammenfassung	147
Tabelle 5-11:	Nichtlineare Beulanalyse: Spannungen an den Diagrammpunkten	153
Tabelle 5-12:	Maße und Materialien der Sandwichplatte	175

Tabelle 5-13:	Materialdaten Al – Wabe und CFK – T300	175
Tabelle 5-14:	Zusammenstellung der Temperaturlastfälle 1- 3	178
Tabelle 5-15:	Vergleich der Analyseergebnisse der Sandwichmodellierung	183
Tabelle 0-1:	Benötigte Materialdaten Flügelmodell	190
Tabelle 0-2:	Profilkoordinaten.....	191
Tabelle 0-3:	Eckwerte des Temperaturverlaufs über z	193
Tabelle 0-4.	Aufbau und Maße der Komponenten.....	195
Tabelle 0-5:	Materialdaten für Reflektormodell.....	195

1 Einführung

Dieses Skript wurde als Begleitunterlage für das Praktikum Finite Elemente Methode (FEM) mit Schwerpunkt Luft- und Raumfahrtstrukturen erstellt, ist jedoch auch zum Eigenstudium und später als Nachschlagwerk geeignet.

Der Leser soll über eine kurze Vorstellung der FEM Theorie an einfache Beispiele herangeführt werden, mit denen die wesentlichen Berechnungsverfahren für Luft- und Raumfahrtstrukturen repräsentiert werden.

Viel Erfolg!

2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen zur Finiten Elemente Methode(kurz) vorgestellt. Mittels einfacher Beispiele wird die FEM mit analytischen Modellen verglichen.

2.1 Statik

In der statischen Analyse befassen wir uns mit der Bestimmung von Verschiebungen, Schnittkräften, Dehnungen und Spannungen unter Lasten (mech. Last, Zwangsverschiebungen, Temperaturfelder usw.) die so langsam auf die Struktur einwirken, dass dynamische Effekte / Massenträgheiten / Schwingungen keine Rolle spielen. Wir haben dabei allgemeine technische Strukturen vor Augen, und nicht etwa abstrakte Teilelemente wie Balken, Stäbe usw. Weil wir andererseits nicht zu viel auf einmal machen wollen, wollen wir uns zunächst auf den wichtigsten und häufigsten Fall der linearen Strukturen beschränken. Dies heißt, dass Verformungen klein sind gegenüber Abmessungen, dass die Struktur infolge der Belastung und Verformung im Prinzip noch genauso aussieht wie vorher, dass der Werkstoff nicht plastiziert usw. In vielen Fällen und insbesondere für Hochleistungsbauteile und Strukturen geschieht diese Untersuchung mit Hilfe der Finite-Element-Methode.

Das mathematische Modell einer linear statischen Struktur wird durch seine Steifigkeitsmatrix beschrieben. Die Struktur ist in endliche (finite) Elemente eingeteilt, für die wir die Kraft-Verschiebungsbeziehung, also die (Element-) Steifigkeitsmatrix, aufgestellt haben.

In einer Reihe von Transformationen wird aus den Steifigkeitsmatrizen der einzelnen Elemente eine Gesamtsteifigkeitsmatrix erzeugt. Zunächst ist hierbei die gegebene Belastung der Struktur, zumindest formal, unwichtig. Gemeint ist hiermit, dass der Aufbau ohne Berücksichtigung von gegebenen Kräften anfängt. Erst bei den zuletzt eingeführten Randbedingungen taucht die Frage nach den Belastungen auf.

Je nach Art der darzustellenden Struktur verwendet man entsprechend definierte Elemente.

Diese können Teile von Scheiben, Platten, Schalen, Balken, rotationssymmetrischen oder allgemeinen Körpern usw. sein. Das Bemerkenswerte an der Finite-Elemente-Methode ist, dass es für die Formulierung und Anwendung formal nicht darauf ankommt, welchen Strukturtyp man betrachtet. Zum richtigen Umgang zum Beispiel mit Schalen braucht man zwar eine gewisse Erfahrung mit diesen Strukturen, aber diese beschränkt sich mehr auf das Grundsätzliche als auf die Details der Theorie. Nicht zuletzt diese Eigenschaft hat der Methode der finiten Elemente zum Durchbruch als universelles Berechnungswerkzeug verholfen.

Stark vereinfacht sind die Grundschritte der FEM

- Unterteilung der Struktur in finite Elemente; in diesen finiten Elementen ist die Elementsteifigkeitsmatrix bekannt, sie verknüpft Kräfte mit (noch) unbekannten Verschiebungen.

- Aufsummierung der Element-Steifigkeitsmatrizen zur Struktur- oder Gesamtsteifigkeitsmatrix. Diese verknüpft die Belastungen mit den (vielen) diskreten Verschiebungen.
- Berechnung der diskreten Verschiebungen aus dieser Verknüpfungsgleichung und den vorgegebenen Randbedingungen/Lasten.
- Aus den (vielen) diskreten Verschiebungen Berechnung (zum Teil approximativ) der Verschiebungsfelder in den Elementen; daraus Dehnungen und Spannungen in den Elementen.

Dies wird auch an dem - im Sinne der FEM noch recht einfachen Beispiel der versteiften Platte deutlich. Unter verschiedenen Belastungen fragen wir nach Schnitt- und Lagerkräften, Verformungen, Dehnungen und Spannungen. Die Platte wird in finite Plattenelemente und die Versteifungen in Balkenelement aufgeteilt, für die jeweils über physikalisch-mechanisch begründete Annahmen zum Verschiebungsfeld, über Energiesätze die Verknüpfungsmatrix (Steifigkeitsmatrix) zwischen diskreten Verschiebungen (Verschiebungsfreiheitsgraden) und Kräften an den Elementknoten berechnet wird. Die Aufsummierung über alle Elemente bzw. Freiheitsgrade liefert die Gesamtsteifigkeitsmatrix als Verknüpfung zwischen äußeren Kräften und diskreten Verschiebungen an allen Elementknoten. Die Auflösung dieses Gleichungssystems nach den bis auf die Lagerstellen unbekannten Verschiebungen gibt uns zusammen mit den o.g. Annahmen zu den Verläufen der Verschiebungsfelder in den Elementen ein gutes Verformungsbild.

An den Verschiebungsfeldern (in den Elementen) ergeben sich die Dehnungsfelder, und über Werkstoffgesetze die Spannungen. Diese Vorgehensweise ist genauso auf beliebig komplexe Strukturen anwendbar.

Statische Grundgleichung der FEM (auf eine Herleitung wird verzichtet):

$$(2-1) \quad [K]\{U\} = \{F\}$$

Hierbei sind:

$[K]$ Gesamtsteifigkeitsmatrix

$\{U\}$ Verschiebungen

$\{F\}$ Anregungskräfte und -Momente

Im Nachfolgenden werden die Steifigkeitsmatrizen für spezielle Elemente kurz angegeben

2.1.1 Stabelement

Der einfachste Elementtyp ist das Stabelement. Stäbe können nur Kräfte in Achsrichtung aufnehmen. Somit werden nur translatorische Freiheitsgrade in der Stabachse betrachtet. Eine Sonderform der Stäbe sind Seile, die nur Zugkräfte aufnehmen können.



Abbildung 2-1: Freiheitsgrade eines Stabelements

Die Elementsteifigkeitsmatrix für ein Stabelement ist:

$$(2-2) \quad K = \frac{EA}{l} \cdot$$

1	2	FGs
1	-1	1
-1	1	2

2.1.2 Balkenelement

Ein einfaches Biegebalkenelement besteht aus rotatorischen und translatorischen Freiheitsgraden. Da die Biegebelastung hier überwiegt, werden die translatorischen Freiheitsgrade in Balkenrichtung (siehe Stabelement) vernachlässigt.

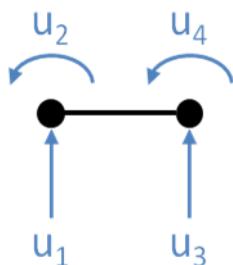


Abbildung 2-2: Freiheitsgrade eines Balkenelements

Die Elementsteifigkeitsmatrix für ein Balkenelement ist:

$$(2-3) \quad K = 2 \frac{EI_y}{l^3} \cdot$$

1	2	3	4	FGs
6	$3l$	-6	$3l$	1
	$2l^2$	-3l	l^2	2
		6	-3l	3
sym.			$2l^2$	4

2.1.3 Weitere Elementtypen

Die Darstellung der Elementsteifigkeitsmatrizen ist bereits so komplex, dass diese seitenfüllend würden. Daher werden diese hier nicht mehr gezeigt. Prinzipiell bestehen diese aber aus den gleichen Elementen wie Stab- und Balkenelemente.

Ein Schalenelement wird in der Regel mit 3 translatorischen und 3 rotatorischen Freiheitsgraden je Knoten modelliert, ein Volumenelement in der Regel mit 3 translatorischen Freiheitsgraden je Knoten.

2.2 Dynamik

In der Strukturdynamik werden zeitlich veränderliche Prozesse betrachtet. Hierfür muss die zuvor betrachtete statische Grundgleichung der FEM zu einer Bewegungsgleichung umformuliert werden. Zu den Verschiebungen und Elementsteifigkeiten müssen nun noch die Ableitungen der Verschiebungen (Geschwindigkeiten und Beschleunigungen) und deren Verknüpfungsmatrizen zu den Anregungen (Dämpfungsmatrix und Massenmatrix) hinzugefügt werden. Man erhält als dynamische Grundgleichung der FEM die Bewegungsgleichung in Matrixschreibweise:

$$(2-4) \quad [M]\{\ddot{U}\} + [D]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{F\}$$

Hierbei sind:

$[M]$ Elementmassematrix

$[D]$ Dämpfungsmatrix (die Dämpfung wird hier zur Vereinfachung vernachlässigt)

$[K]$ Elementsteifigkeitsmatrix

$\{U\}$ Verschiebungen

$\{F\}$ Anregungskräfte und –Momente (Für Modalanalyse keine Anregung)

Für die Lösung des unbekannten Verschiebungsvektors wird ein Ansatz der folgenden Form gewählt:

$$(2-5) \quad \{U\} = \{\phi\}e^{i\omega t}$$

$$(2-6) \quad (-\omega^2[M] + i\omega[D] + [K])\{\phi\} = \{F\}$$

In der Regel kann der Einfluss der Dämpfung auf Eigenfrequenzen und –form (nicht auf das Ausschwing-und Antwortverhalten) vernachlässigt werden:

$$(2-7) \quad (-\omega^2[M] + [K])\{\phi\} = \{F\}$$

ϕ Eigenvektor

ω Eigenkreisfrequenz (rad/s)

$f = \frac{\omega}{2\pi}$ Eigenfrequenz (Hz)

Analog zur Statik wird nachfolgend kurz auf die Massenmatrix eines Balkenelements eingegangen:

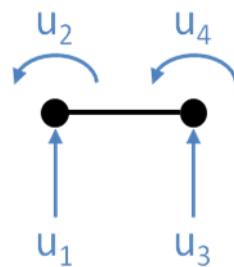


Abbildung 2-3: Freiheitsgrade eines Balkenelements

Elementsteifigkeitsmatrix analog zur Statik:

$$(2-8) \quad K = 2 \frac{EI_y}{l^3} \cdot$$

1	2	3	4	FGs
6	$3l$	-6	$3l$	1
	$2l^2$	-3l	l^2	2
		6	-3l	3
sym.			$2l^2$	4

Die Elementmassematrix für ein Balkenelement ist:

$$(2-9) \quad M = \frac{\rho A l}{420} \cdot$$

1	2	3	4	FGs
156	$22l$	54	$-13l$	1
	$4l^2$	13l	$-3l^2$	2
		156	$-22l$	3
sym.			$4l^2$	4

2.3 Beispiel - Statik

Anhand eines einfachen Beispiels, einem einseitig fest eingespannten Balken, belastet mit einer Querkraft (Skizze siehe: Abbildung 2-4), wird in diesem Kapitel die Modellbildung mit der Finiten Elemente Methode und die numerische Lösung des Problems vorgestellt. Im Vergleich dazu wird die analytische Lösung gezeigt und mit der FEM-Lösung verglichen.

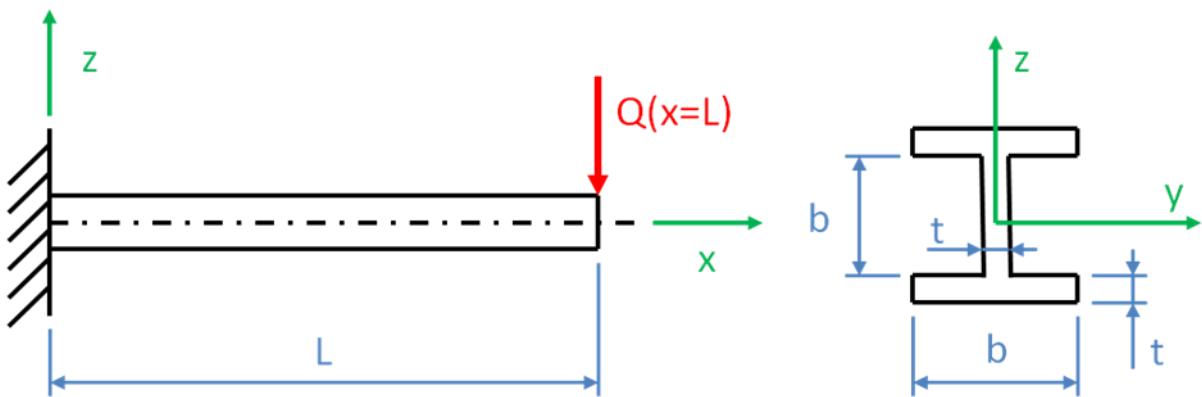


Abbildung 2-4: Einseitig fest eingespannter Balken, belastet mit einer Querkraft

Der Balken hat eine Länge L und den in der Skizze angegeben Querschnitt eines Doppel-T-Trägers.

Im vorliegen Beispiel sollen beispielhaft folgende Werte verwendet werden:

$$(2-10) \quad L = 1000\text{mm}$$

$$b = 100\text{mm}$$

$$t = 5\text{mm}$$

$$Q = 1000\text{N}$$

$$E = 70000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (Aluminium)}$$

2.3.1 Analytisches Balkenmodell

Abbildung 2-5 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Balkenproblems. Hierbei sind L die Balkenlänge, und $Q(x=L)$ die am Ende des Balkens angreifende Querkraft, $w(x)$ der Biegeverlauf / die Verformung in z -Richtung und $w_{\max} = w(x=L)$ die maximale Durchbiegung am Ende des Balkens.

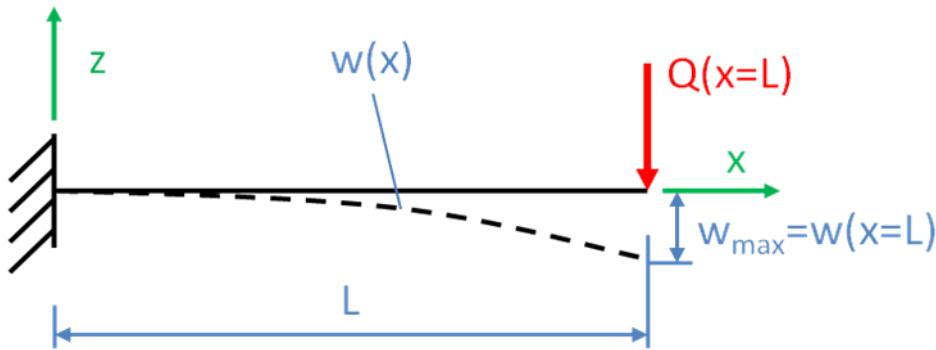


Abbildung 2-5: Vereinfachtes Balkenmodell

Die Biegelinie lässt sich aus dem folgenden Ansatz integrieren:

$$(2-11) \quad EI_y w'''(x) = -Q(x)$$

$$(2-12) \quad \Rightarrow EI_y w''(x) = -Q(x)x + C_1$$

$$(2-13) \quad \Rightarrow EI_y w'(x) = -Q(x) \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2$$

$$(2-14) \quad \Rightarrow EI_y w(x) = -Q(x) \frac{x^3}{6} + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 x + C_3$$

Für den fest eingespannten Balken ergeben sich folgende Randbedingungen:

$$(2-15) \quad w(x = 0) = 0 \Rightarrow C_3 = 0$$

$$(2-16) \quad w'(x = 0) = 0 \Rightarrow C_2 = 0$$

$$(2-17) \quad w''(x = L) = 0 \Rightarrow C_1 = Q(L)L$$

Hieraus folgt die Biegelinie

$$(2-18) \quad \Rightarrow w(x) = \frac{1}{EI_y} \left(-Q \frac{x^3}{6} + QL \frac{x^2}{2} \right)$$

bzw. die maximale Durchbiegung an der Stelle $x=L$:

$$(2-19) \quad \Rightarrow w_{\max} = w(x = L) = \frac{QL^3}{3EI_y}$$

Zur Berechnung der Durchbiegung wird neben der Balkenlänge L und dem (isotropen) Elastizitätsmodul E des Balkenwerkstoffs noch das Flächenträgheitsmoment des Doppel-T-Trägerquerschnitts I_y benötigt. Dieses lässt sich durch Aufteilung des Doppel-T-Querschnitts in einzelne Rechteckquerschnitte berechnen, siehe Abbildung 2-6.

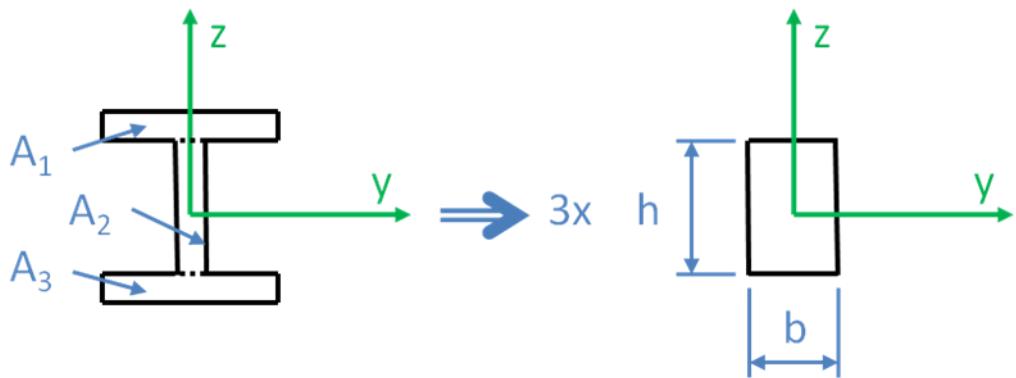


Abbildung 2-6: Aufteilung des Doppel-T-Trägerquerschnitts in Rechteckquerschnitte

Das Flächenträgheitsmoment für die Rechteckquerschnitte ist somit:

$$(2-20) \quad I_{R1} = \frac{bt^3}{12}$$

$$(2-21) \quad I_{R2} = \frac{tb^3}{12}$$

$$(2-22) \quad I_{R3} = I_{R1} = \frac{bt^3}{12}$$

Neben den Rechteckquerschnitten muss noch der Abstand zur Biegeachse beachtet werden (Satz von Steiner):

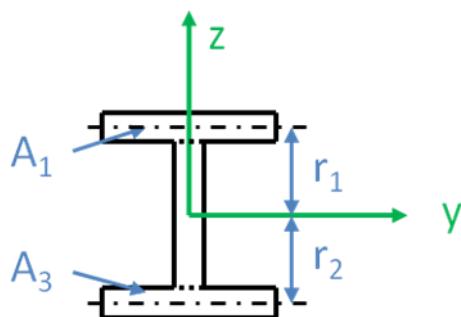


Abbildung 2-7: Flächenträgheitsanteile durch Abstand zur Biegeachse (Satz von Steiner)

Hieraus folgt:

$$(2-23) \quad I_{S1} = r_1 A_1 = r_1^2 b t = r^2 b t$$

$$(2-24) \quad I_{S2} = r_2^2 A_2 = 0$$

$$(2-25) \quad I_{S3} = I_{S1} = r_3^2 A_3 = r_3^2 b t = r^2 b t$$

Das gesamte Flächenträgheitsmoment ist somit:

$$(2-26) \quad I_y = I_{R1} + I_{R2} + I_{R3} + I_{S1} + I_{S2} + I_{S3}$$

$$I_y = \frac{bt^3}{6} + \frac{tb^3}{12} + 2r^2 b t$$

Mit den Werten für das oben festgelegte Beispiel erhält man somit:

$$(2-27) \quad I_y = \frac{100\text{mm} \cdot (5\text{mm})^3}{6} + \frac{5\text{mm} \cdot (100\text{mm})^3}{12} + 2 \cdot \left(\frac{100\text{mm} + 5\text{mm}}{2} \right)^2 \cdot 100\text{mm} \cdot 5\text{mm}$$

$$I_y = 3175000\text{mm}^4$$

Mit diesem Flächenträgheitsmoment lässt sich die Durchbiegung am Balkenende berechnen:

$$(2-28) \quad \Rightarrow w_{max} = \frac{1000N(1000\text{mm})^3}{370000N \cdot 3175000\text{mm}^4} = 1.499812523434571 \text{ mm}$$

2.3.2 FEM Balkenmodell - Handrechnung

Analog zu der zuvor vorgestellten analytischen Handrechnung lässt sich das Balkenproblem beispielsweise mit 5 Knoten und 4 Elementen diskretisieren und ebenfalls händisch lösen. Diese Diskretisierung ist in Abbildung 2-8 dargestellt.

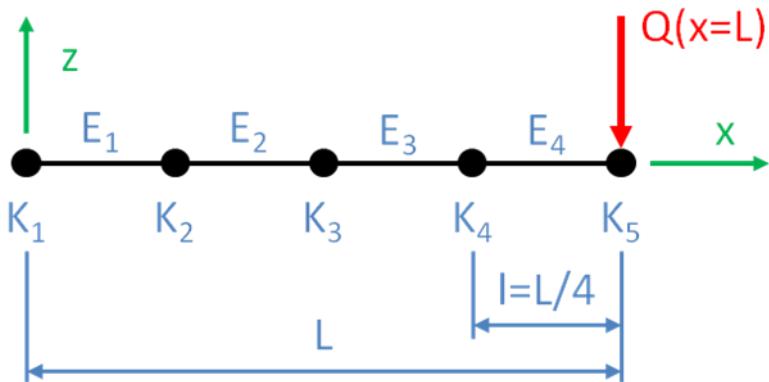


Abbildung 2-8: FEM-Balkenmodell, diskretisiert mit 5 Knoten und 4 Elementen

An diesem Modell wirken an den Knoten je ein translatorischer Freiheitsgrad in z-Richtung und ein rotatorischer Freiheitsgrad um die y-Achse (der Translationsfreiheitsgrad in x-Richtung wurde auf Grund der fehlenden Belastung in diese Richtung vernachlässigt), siehe Abbildung 2-9.

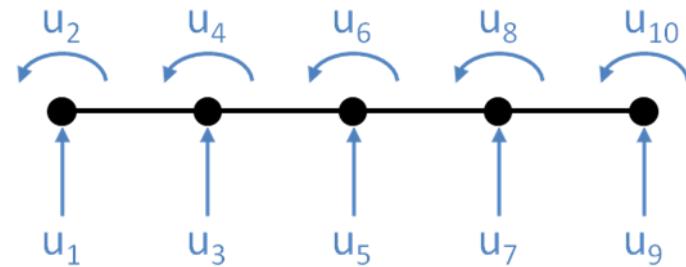


Abbildung 2-9: FEM-Balkenmodell, Freiheitsgrade

Hierfür lässt sich die Elementsteifigkeitsmatrix für das mit 10 Freiheitsgraden (FGs) diskretisierte Modell aus den Elementsteifigkeitsmatrizen eines einzelnen Balkenelements zusammensetzen:

$$(2-29) \quad K = 2 \frac{EI_y}{l^3} \cdot$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	FGs
6	$3l$	-6	$3l$	0	0	0	0	0	0	1
	$2l^2$	$-3l$	l^2	0	0	0	0	0	0	2
		$6+6$	$-3l+3l$	-6	$3l$	0	0	0	0	3
			$2l^2+2l^2$	$-3l$	l^2	0	0	0	0	4
				$6+6$	$-3l+3l$	-6	$3l$	0	0	5
					$2l^2+2l^2$	$-3l$	l^2	0	0	6
						$6+6$	$-3l+3l$	-6	$3l$	7
							$2l^2+2l^2$	$-3l$	l^2	8
symmetrisch								6	-3l	9
									$2l^2$	10

Aus der Querkraftbelastung am Balkenende erhält man den folgenden Anregungsvektor mit 10 Anregungskräften und Momenten:

$$(2-30) \quad \{F\} = \{f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 f_7 f_8 f_9 f_{10}\}^T \\ = \{f_1 f_2 0 0 0 0 0 -Q 0\}^T$$

An der Stelle der festen Einspannung wird diese repräsentiert, in dem die entsprechenden Freiheitsgrade gleich 0 gesetzt werden.

$$(2-31) \quad \{U\} = \{u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8 u_9 u_{10}\}^T \\ = \{0 0 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8 u_9 u_{10}\}^T$$

Setzt man nun Gleichung(2-29), Gleichung(2-30) und Gleichung(2-31) in die statische Grundgleichung der FEM (2-1) ein, ist dieses Gleichungssystem lösbar und liefert die folgende Lösung, siehe Tabelle 2-1 (berechnet mit Matlab, Code siehe Anhang).

Tabelle 2-1: FEM-Balkenlösung (gerundet)

u_1 [mm]	u_2 [rad]	u_3 [mm]	u_4 [rad]	u_5 [mm]	u_6 [rad]	u_7 [mm]	u_8 [rad]	u_9 [mm]	u_{10} [rad]
0	0	-0,1289	-0,0010	-0,4687	-0,0017	-0,9491	-0,0021	-1,4998	-0,0022

(rad= Radian, Umrechnung Grad-> Radian siehe Anhang)

Die Verformung am Balkenende ist damit:

$$(2-32) \quad \Rightarrow w_{max} = |u_9| = 1.499812523434532 \text{ mm}$$

2.3.3 FEM-Fehlerfaktor

Vergleicht man die Ergebnisse der analytischen Rechnung (siehe Gleichung (2-28)) mit der FEM-Rechnung (siehe Gleichung (2-32)) erhält man den folgenden Fehlerfaktor für die verwendete Diskretisierung:

$$(2-33) \quad \Delta w_{max} = \frac{w_{max}|_{analytisch} - w_{max}|_{FEM}}{w_{max}|_{analytisch}} = 2.576e^{-14}$$

2.4 Beispiel - Dynamik

Auch für die Dynamik wird im Folgenden ein einfaches Beispiel vorgestellt. In Konsistenz mit dem Statik Beispiel wird auch hier ein einseitig fest eingespannter Balken betrachtet. Für die Berechnung der Eigenformen und -frequenzen wird allerdings keine äußere Kraft verwendet. Analog zur Skizze in Abbildung 2-10 soll folgendes Problem modelliert werden.

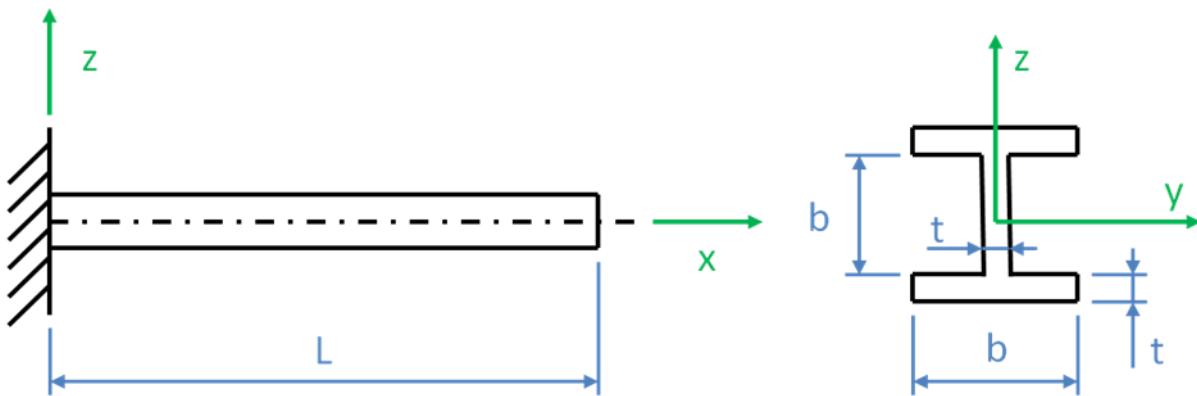


Abbildung 2-10: Einseitig fest eingespannter Balken, unbelastet

Der Balken hat eine Länge L und den in der Skizze angegeben Querschnitt eines Doppel-T-Trägers.

Im vorliegen Beispiel sollen beispielhaft folgende Werte verwendet werden:

$$(2-34) \quad L = 1000\text{mm}$$

$$b = 100\text{mm}$$

$$t = 5\text{mm}$$

$$E = 70000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \text{ (Aluminium)}$$

$$\rho = 2750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Aluminium)}$$

2.4.1 Analytisches Balkenmodell

Die allgemeine Differentialgleichung (DGL) der Balkenschwingung lässt sich in 4 Schritten herleiten:

- Schritt 1: Freischneiden am differentiellen Element, siehe Abbildung2-11
- Schritt 2: Schwerpunktsatz in z-Richtung aufstellen und linearisieren, Größen zweiter Ordnung vernachlässigen
- Schritt 3: Drallsatz in negativer y-Richtung aufstellen und vereinfachen ($ds = dx$), Größen zweiter Ordnung vernachlässigen
- Schritt 4: Gleichung 2 (Drallsatz) von Gleichung 1 (Schwerpunktsatz) abziehen und vereinfachen

(Die Einzelschritte der Herleitung werden nicht näher erläutert)

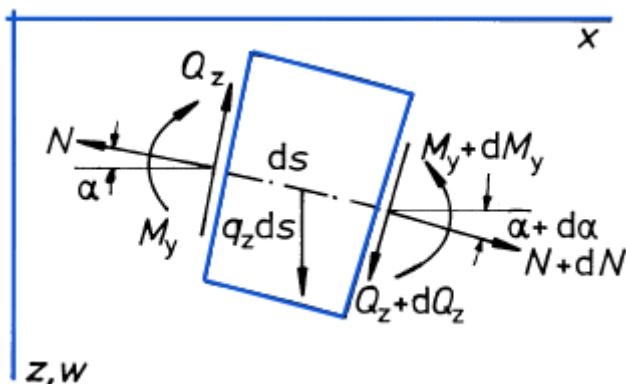


Abbildung2-11: Schnittmodell am differentiellen Balkenelement

Die allgemeine Differentialgleichung (DGL) der Balkenschwingung ist hiernach:

$$(2-35) \quad -(EI_y \omega'')'' + (\rho I_y \ddot{\omega}')' + (N \omega')' + Q = \rho A \ddot{\omega}$$

Der erste Term berücksichtigt die Biegung / die elastischen Eigenschaften des Balkens. Der zweite Term repräsentiert die rotatorische Trägheit, der dritte Term die Normalkraft und der vierte Term die eingeprägte Querkraft.

Im Falle einer freien Schwingung lässt sich die Schwingungsgleichung noch weiter vereinfachen. In diesem Fall sind die Normalkraft und die Querkraft gleich Null, die rotatorische Trägheit kann vernachlässigt werden und EI_y kann als konstant betrachtet werden. Hierfür erhält man eine vereinfachte Schwingungsgleichung:

$$(2-36) \quad -EI_y \omega''' = \rho A \ddot{\omega}$$

Zum Lösen der DGL wird der Produktansatz von Bernoulli verwendet:

$$(2-37) \quad \begin{aligned} \omega(x, t) &= \hat{\omega}(x)T(t) \\ \omega'''' &= \hat{\omega}''''T \\ \ddot{\omega} &= \hat{\omega}\ddot{T} \end{aligned}$$

Durch Separation der Variablen erhält man:

$$(2-38) \quad -\frac{EI_y}{\rho A} \frac{\hat{\omega}''''}{\hat{\omega}} = \frac{\ddot{T}}{T} = const = -\omega_j^2$$

Nach der Schlussweise von Bernoulli erhält man eine DGL vierter Ordnung nach dem Ort

$$(2-39) \quad \hat{\omega}'''' + \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^4 \hat{\omega} = 0, \quad \lambda_j^4 = \frac{\rho A}{EI_y} \omega_j^2 L^4$$

und eine DGL zweiter Ordnung nach der Zeit

$$(2-40) \quad \ddot{T} + \omega_j^2 T = 0$$

Für dieses Differentialgleichungssystem kann folgender Lösungsansatz verwendet werden:

$$(2-41) \quad \hat{\omega}(x) = c \cdot e^{\beta x}$$

In die DGL einsetzen ergibt:

$$(2-42) \quad \beta^4 - \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^4 = 0$$

Daraus folgt nach der Eulerformel:

$$(2-43) \quad \hat{\omega}(x, t) = C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)$$

In die Formel für die Gesamtauslenkung eingesetzt ergibt sich damit:

$$(2-44) \quad \begin{aligned} \omega(x, t) &= \sum_{j=1}^{\infty} \left[C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) \right. \\ &\quad \left. + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) \right] [A_j \cos(\omega_j t) + B_j \sin(\omega_j t)] \end{aligned}$$

Die benötigten Ableitungen von Gleichung (2-43) sind:

$$(2-45) \quad \hat{\omega}'(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right) [-C_{1j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{2j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

$$(2-46) \quad \hat{\omega}''(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^2 [-C_{1j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - C_{2j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

$$(2-47) \quad \hat{\omega}'''(x, t) = \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^3 [C_{1j} \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - C_{2j} \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{3j} \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + C_{4j} \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right)]$$

Die Eigenformen ergeben sich aus den Randbedingungen für den fest eingespannten Balken:

$$(2-48) \quad \begin{aligned} \omega(0, t) &= 0 \\ \alpha = \omega'(0, t) &= 0 \\ M(L, t) = -EI_y \omega''(L, t) &= 0 \\ Q(L, t) = -EI_y \omega'''(L, t) &= 0 \end{aligned}$$

Aus den Randbedingungen folgt:

$$(2-49) \quad \omega(0, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j [C_{1j} + C_{3j}] \rightarrow C_{1j} = -C_{3j}$$

$$(2-50) \quad \omega'(0, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right) [C_{2j} + C_{4j}] \rightarrow C_{2j} = -C_{4j}$$

$$(2-51) \quad \omega''(L, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^2 [-C_{1j} (\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)) - C_{2j} (\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j))]$$

$$(2-52) \quad \omega'''(L, t) = 0 = \sum_{j=1}^{\infty} T_j \left(\frac{\lambda_j}{L}\right)^3 [-C_{1j} (-\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j)) - C_{2j} (\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j))]$$

In Matrixschreibweise ergibt sich:

$$(2-53) \quad \begin{pmatrix} -[\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)] & -[\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j)] \\ -\sinh(\lambda_j) + \sin(\lambda_j) & -[\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)] \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} C_{1j} \\ C_{2j} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Triviale Lösung:

$$(2-54) \quad C_{1j} = C_{2j} = 0$$

Nicht-triviale Lösung:

$$(2-55) \quad \begin{aligned} [\cosh(\lambda_j) + \cos(\lambda_j)]^2 + \sin^2(\lambda_j) - \sinh^2(\lambda_j) &= 0 \\ \cos(\lambda_j) \cosh(\lambda_j) + 1 &= 0 \end{aligned}$$

Die Berechnung der Wellenzahlen λ_j ist im Anhang A.2 zu finden (Matlab Code).

Wellenzahlen mit einer Ordnung $j > 5$ ($j=6,7,8,\dots$) lassen sich auch mit einer Approximation darstellen:

$$(2-56) \quad \lambda_j = \frac{(2j-1)\pi}{2}$$

Die Lösungen nach Gleichung (2-55), sowie die Approximation sind jeweils für die ersten 8 Wellenzahlen in Tabelle 2-2 dargestellt.

Tabelle 2-2: Analytisches Balkenmodell – erste 8 Wellenzahlen

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6	λ_7	λ_8
Lösung	1.8751	4.6941	7.8548	10.9955	14.1372	17.2788	20.4204	23.5619
Approx.	1,5708	4,7124	7,8540	10,9956	14,1372	17,2788	20,4204	23,5619

Mit Hilfe der Wellenzahlen lassen sich die Eigenfrequenzen berechnen:

$$(2-57) \quad \omega_j^2 = \frac{\lambda_j^4 EI_y}{L^4 \rho A} \quad \text{Eigenkreisfrequenz (rad/s)}$$

$$(2-58) \quad f_j = \frac{\omega_j}{2\pi} \quad \text{Eigenfrequenz (Hz)}$$

Tabelle 2-3: Analytisches Balkenmodell – erste 8 Eigenfrequenzen des Balkenmodells

j	1	2	3	4	5	6	7	8
ω_j	816,1	5114,6	14321,2	28063,3	46391,2	69300,5	96791,5	128863,4
f_j	129,9	814,0	2279,3	4466,4	7383,4	11029,5	15404,9	20509,2

Ebenso lässt sich mit Hilfe der Wellenzahlen die Schwingungsgleichung (siehe Gleichung (2-44)) lösen. Hierfür werden noch die Eigenformen benötigt:

$$(2-59) \quad C_{2j} = C_{1j} \frac{\sin(\lambda_j) - \sinh(\lambda_j)}{\cos(\lambda_j) + \cosh(\lambda_j)} = C_{1j} \alpha_j$$

Die ersten 8 Lösungen für α_j sind somit:

Tabelle 2-4: Analytisches Balkenmodell – erste 8 α_j des Balkenmodells

j	1	2	3	4	5	6	7	8
α_j	-0,734	-1,018	-0,9992	-1,000003	-0,999999	-1,0000001	-0,9999999973	-1,0

Hiermit lässt sich die Schwingungsgleichung für jede Wellenzahl berechnen:

$$(2-60) \quad \omega(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} T_j * C_{1j} \left[\cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + \alpha_j \left\{ \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) \right\} \right]$$

Die Eigenfunktionen sind damit:

$$(2-61) \quad \omega_j(x) = \cos\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - \cosh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) + \alpha_j \left\{ \sin\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) - \sinh\left(\lambda_j \frac{x}{L}\right) \right\}$$

Diese lassen sich mit Matlab plotten:

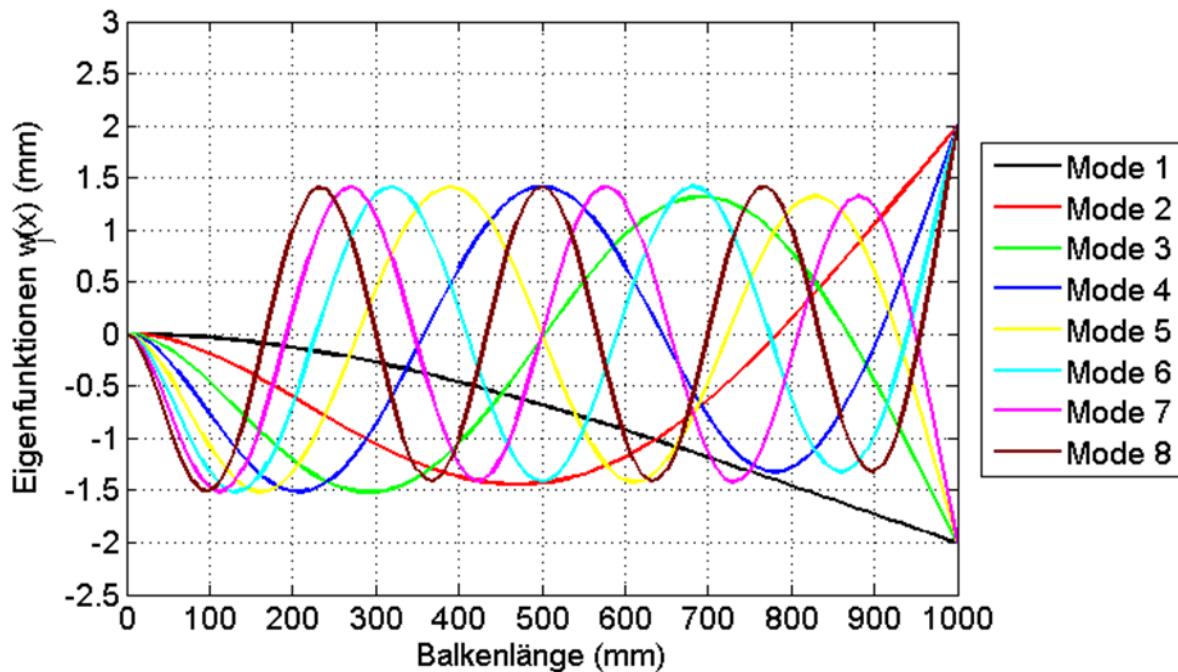


Abbildung 2-12: Eigenfunktionen analytisches Balkenmodell

2.4.2 FEM Balkenmodell – Handrechnung

Analog zu der zuvor vorgestellten, analytischen Handrechnung lässt sich das Balkenproblem auch im dynamischen Fall beispielsweise mit 5 Knoten und 4 Elementen diskretisieren und ebenfalls händisch lösen. Diese Diskretisierung ist in Abbildung2-13 dargestellt.

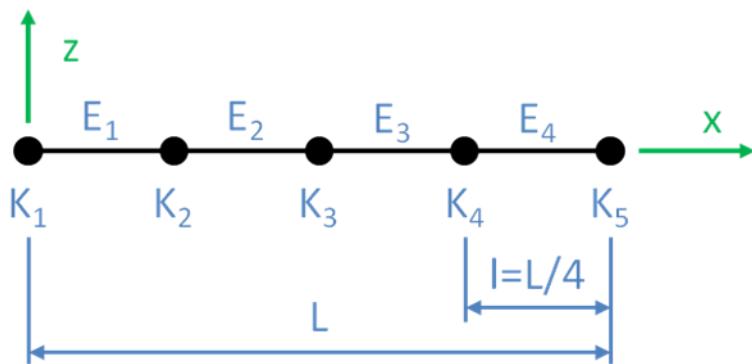


Abbildung2-13: FEM-Balkenmodell, diskretisiert mit 5 Knoten und 4 Elementen

An diesem Modell wirken an den Knoten je ein translatorischer Freiheitsgrad in z-Richtung und ein rotatorischer Freiheitsgrad um die y-Achse (der Translationsfreiheitsgrad in x-Richtung wurde auf Grund der fehlenden Belastung in diese Richtung vernachlässigt), siehe Abbildung2-14.

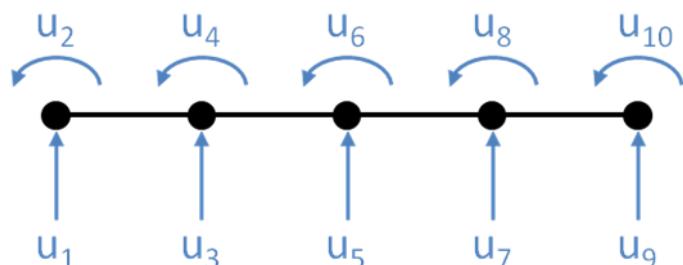


Abbildung2-14: FEM-Balkenmodell, Freiheitsgrade

Hierfür lässt sich die Elementsteifigkeitsmatrix für das mit 10 Freiheitsgraden (FGs) diskretisierte Modell aus den Elementsteifigkeitsmatrizen eines einzelnen Balkenelements zusammensetzen:

(2-62)

$$K = 2 \frac{EI_y}{l^3} \cdot$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	FGs
6	3l	-6	3l	0	0	0	0	0	0	1
2l ²	-3l	l ²	0	0	0	0	0	0	0	2
	6+6	-3l+3l	-6	3l	0	0	0	0	0	3
		2l ² +2l ²	-3l	l ²	0	0	0	0	0	4
			6+6	-3l+3l	-6	3l	0	0	0	5
				2l ² +2l ²	-3l	l ²	0	0	0	6
					6+6	-3l+3l	-6	3l	0	7
						2l ² +2l ²	-3l	l ²	0	8
symmetrisch							6	-3l	0	9
								2l ²	0	10

Im Unterschied zurstatischen Berechnung, spielt die Masse in der dynamischen Berechnung eine Rolle. Um die Masse des Balkens zu berücksichtigen muss daher dessen Gesamtmaschenmatrix aufgestellt werden. Dies geschieht analog zum Aufstellen der Gesamtsteifigkeitsmatrix durch zusammensetzen der Elementmassenmatrizen, siehe Gleichung (2-63).

(2-63)

$$M = \frac{\rho A l}{420} \cdot$$

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	FGs
156	22l	54	-13l	0	0	0	0	0	0	1
	4l ²	13l	-3l ²	0	0	0	0	0	0	2
		156+156	-22l+22l	54	-13l	0	0	0	0	3
			4l ² +4l ²	13l	-3l ²	0	0	0	0	4
				156+156	-22l+22l	54	-13l	0	0	5
					4l ² +4l ²	13l	-3l ²	0	0	6
						156+156	-22l+22l	54	-13l	7
							4l ² +4l ²	13l	-3l ²	8
								156	-22l	9
									4l ²	10
symmetrisch										

Die Randbedienungen sind wie Folgen:

$$(2-64) \quad \{F\} = \{f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6 f_7 f_8 f_9 f_{10}\}^T$$

$$= \{f_1 f_2 0 0 0 0 0 0 0 0\}^T$$

$$(2-65) \quad \{U\} = \{u_1 u_2 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8 u_9 u_{10}\}^T$$

$$= \{0 0 u_3 u_4 u_5 u_6 u_7 u_8 u_9 u_{10}\}^T$$

Durch Einsetzen in die folgenden Gleichungen, lassen sich die Eigenformen und Eigenfrequenzen berechnen:

$$(2-66) \quad \{U\} = \{\phi\} e^{i\omega t}$$

$$(2-67) \quad (-\omega^2 [M] + [K]) \{\phi\} = \{F\}$$

$$(2-68) \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

ϕ	Eigenvektor
ω	Eigenkreisfrequenz (rad/s)
f	Eigenfrequenz (Hz)

Tabelle 2-5: Eigenfrequenzen aus FEM Berechnung

j	1	2	3	4	5	6	7	8
ω_j	823.68	5167.76	14564.93	28733.46	53442.88	85829.48	136068.22	223259.28
f_j	131.09	822.47	2318.08	4573.07	8505.70	13660.19	21655.93	35532.82

Tabelle 2-6: Eigenformen aus FEM Berechnung

j	1	2	3	4	5	6	7	8
ϕ_{u1}	0	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_{u2}	0	0	0	0	0	0	0	0
ϕ_{u3}	-0.19	-0.83	-1.45	-1.44	-0.66	0.17	0.71	0.12
ϕ_{u4}	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.04	0.04	0.00
ϕ_{u5}	-0.68	-1.43	-0.04	1.48	0.09	-1.18	-0.25	0.19
ϕ_{u6}	0.00	0.00	0.01	0.00	-0.03	-0.01	0.05	0.01
ϕ_{u7}	-1.32	-0.27	1.17	-1.28	0.43	0.59	-0.99	0.35
ϕ_{u8}	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.02	-0.03	0.01	0.03
ϕ_{u9}	-2.00	2.00	-2.00	2.00	-2.00	2.00	-2.00	2.00
ϕ_{u10}	0.00	0.01	-0.02	0.02	-0.03	0.04	-0.06	0.08

Die Folgende Abbildung enthält die Eigenformen aus der FEM Berechnung. Mit Erhöhung der Element Anzahl, können die Eigenformen aus der FEM Berechnung den Eigenformen aus der analytische Berechnung angenähert werden.

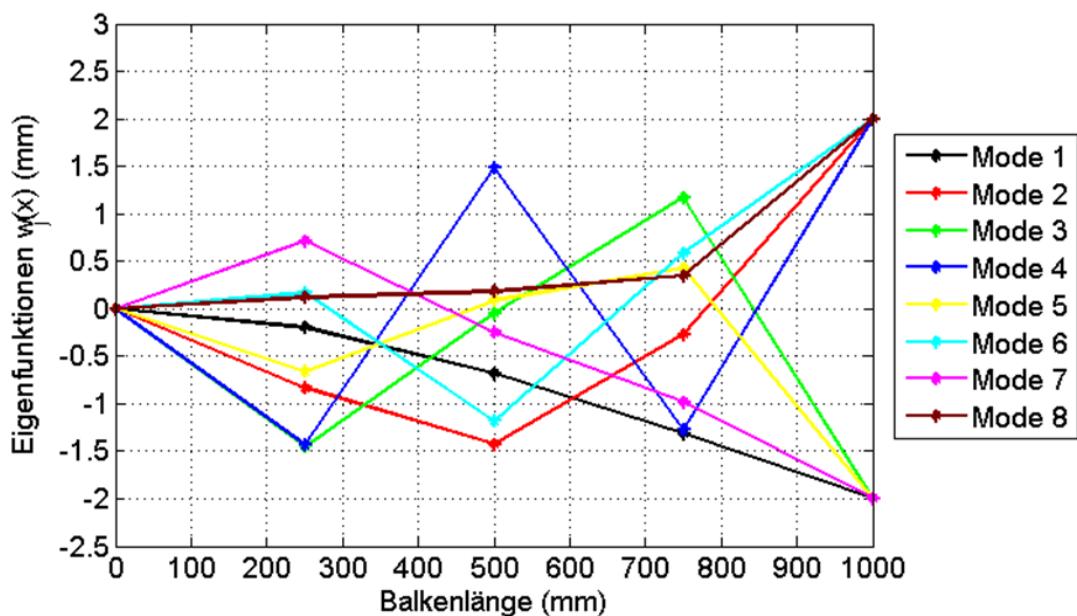


Abbildung 2-15 Eigenformen aus FEM Berechnung mit 4 Elementen

Diese Abbildung zeigt, dass die Moden mit 4 Elementen nicht aufgelöst werden können. Daher wurde zur Veranschaulichung die Gleiche Rechnung noch für 10 und für 100 Elemente durchgeführt:

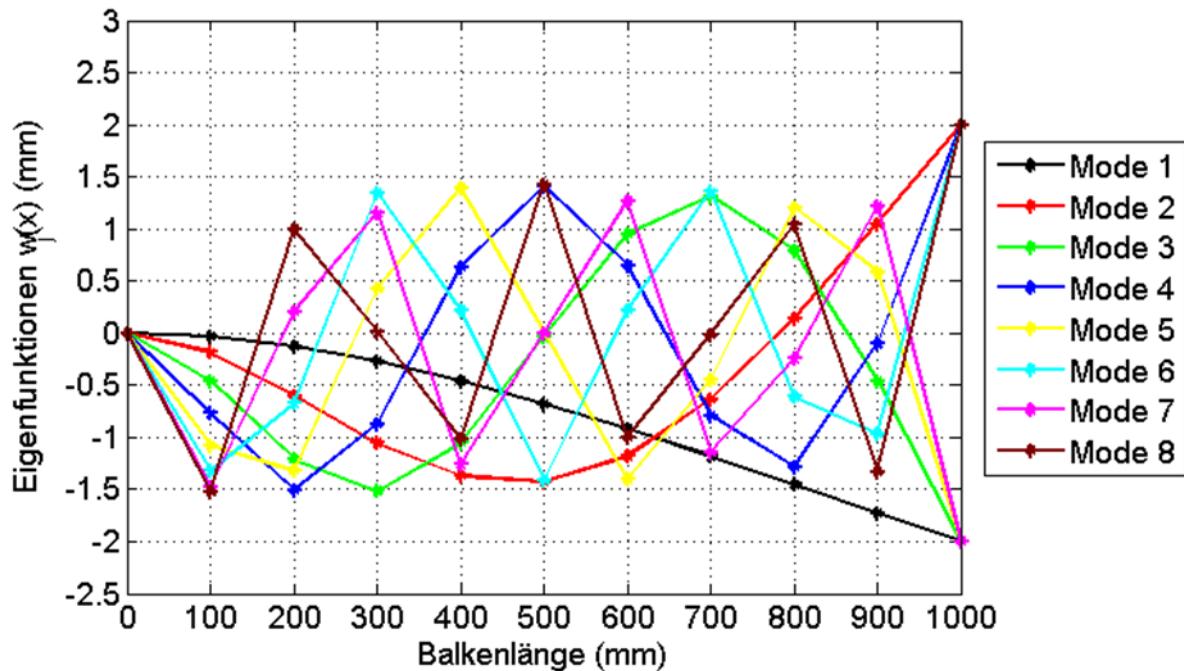


Abbildung 2-16 Eigenformen aus FEM Berechnung mit 10 Elementen

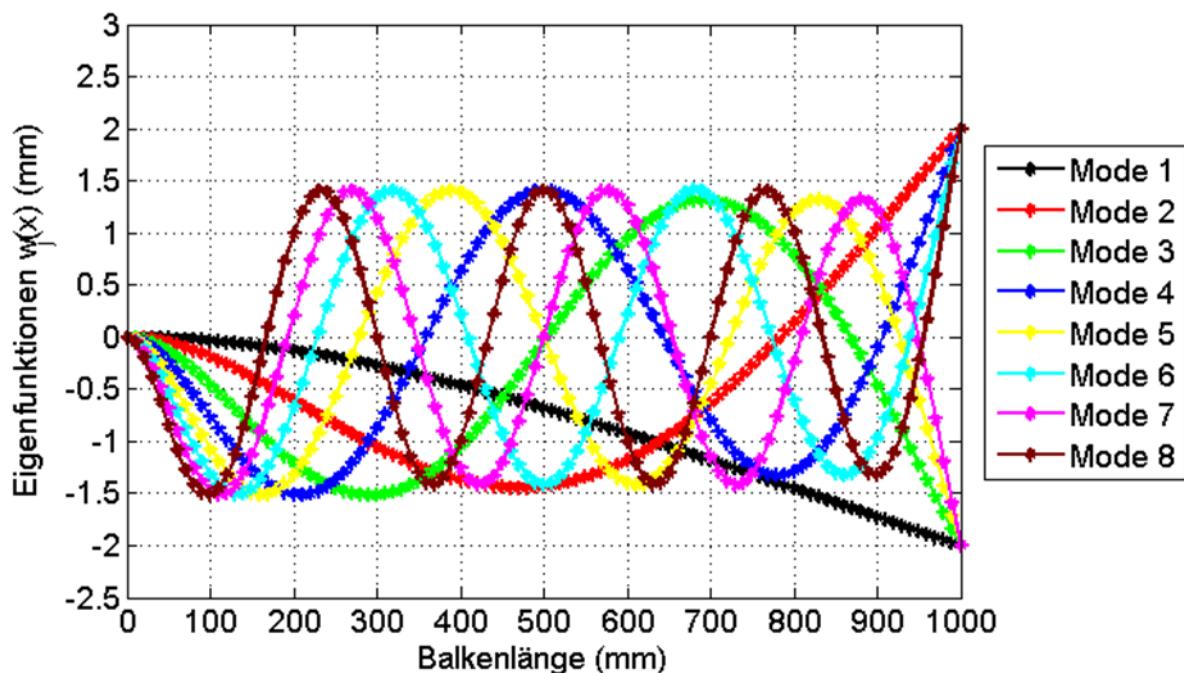


Abbildung 2-17 Eigenformen aus FEM Berechnung mit 100 Elementen

2.4.3 FEM-Fehlerfaktor

Die analytische Berechnung hat unendlich viele Freiheitsgrade und kann unendliche Eigenfrequenzen ausrechnen. Aber bei einer FEM Berechnung entscheidet die Anzahl der Knoten, wie viele Eigenformen dargestellt werden können. Je höher die Modenordnung, umso mehr Knoten werden benötigt.

$$(2-69) \quad \Delta f = \frac{f_{\text{analytische}} - f_{\text{FEM}}}{f_{\text{analytische}}}$$

Tabelle 2-7: Die Unterschiede zwischen analytischer- und FEM Berechnung (%) für eine 4 Elemente Berechnung

Δf_1	Δf_2	Δf_3	Δf_4	Δf_5	Δf_6	Δf_7	Δf_8
0.0033	0.1165	0.7742	1.4522	14.1489	22.7208	39.2954	71.6698

Die ersten vier Eigenfrequenzen von analytischer- und FEM Berechnung passen hier gut zusammen. Die höheren Eigenfrequenzen zeigen auf Grund der ungeeigneten Elementgröße große Fehler in der FEM Berechnung.

Um die Eigenformen von Berechnung und Experiment zu vergleichen kann der Kennwert MAC (Modal Assurance Criterion) verwendet werden.

$$(2-70) \quad MAC = \frac{\{\phi\}_a^T \cdot \{\phi\}_t}{\|\{\phi\}_a\| \cdot \|\{\phi\}_t\|}$$

$\{\phi\}_a$: rechnerische Eigenform

$\{\phi\}_t$: getestete Eigenform

Das MAC sollte möglichst nahe bei 1 liegen. Werte unter 0,8 gelten als nur mäßig oder schlecht übereinstimmend.

Tabelle 2-8: MAC: Vgl. der analytischer Berechnung und FEM mit 4 Elementen

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8
MAC	0.9999	0.9999	0.9999	0.9997	0.9974	0.9871	0.9704	0.7779

Die Eigenformen können nur auf den Knoten verglichen werden. Das MAC der ersten vier Eigenformen sind fast 1 und ihre Eigenformen sind grundsätzliche richtig darstellen. Die Eigenformen der Moden 5 bis 7 sind auf den Knoten übereinstimmen aber auf Grund der fehlenden Knoten, können die Eigenformen nicht richtig dargestellt werden. Das MAC von Mode 8 ist unter 0,8 und gilt somit als schlecht übereinstimmend.

3 ANSYS Benutzeroberfläche

In diesem Kapitel sind die wesentlichen Elemente von ANSYS kurz erklärt.

3.1 Starten von ANSYS

ANSYS wird über den „Mechanical APDL Product Launcher“ gestartet:

(Windows) Start – Alle Programme – ANSYS 12.1 – Mechanical APDL Product Launcher

Im ANSYS Produkt Launcher müssen einige Grundeinstellungen getätigt werden. Diese sind (siehe auch Abbildung3-1):

- Simulationsumgebung
- Lizenz (unterschiedliche Lizenzen mit unterschiedlichen max. Freiheitsgraden)
- Arbeitsverzeichnis (Achtung: Immer auf der lokalen Festplatte arbeiten!!!)
- Jobname

Weitere Einstellungen zur Performance der Simulation können auf den weiteren Registerkarten eingestellt werden. Für einfache Simulationen wie hier im Praktikum sind die Standardeinstellungen völlig ausreichend.

Sind alle Einstellungen getätigt, wird die ANSYS GUI mit einem Klick auf „Run“ gestartet.

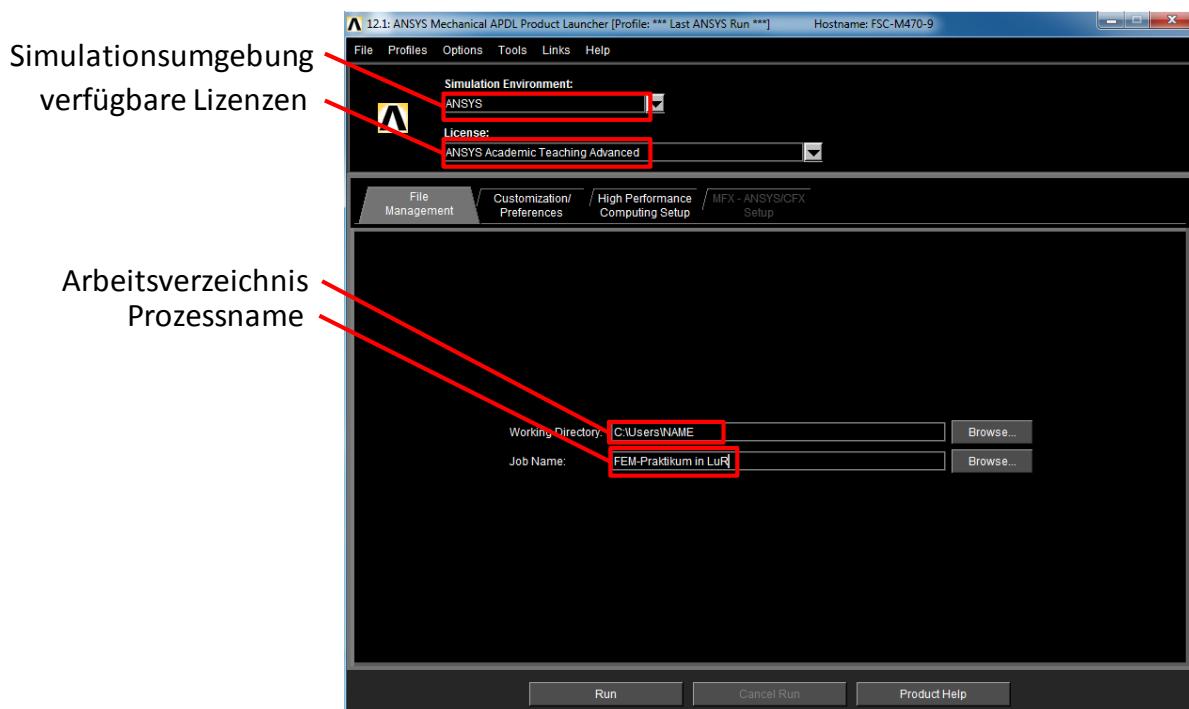


Abbildung3-1: ANSYS Product Launcher Hauptfenster

3.2 ANSYS Graphische Benutzer Oberfläche (GUI)

Die graphische Benutzeroberfläche von ANSYS ist in 2 Fenster geteilt, das Eingabefenster (Hauptoberfläche) und das Ausgabefenster (Output Fenster), siehe Abbildung3-2.

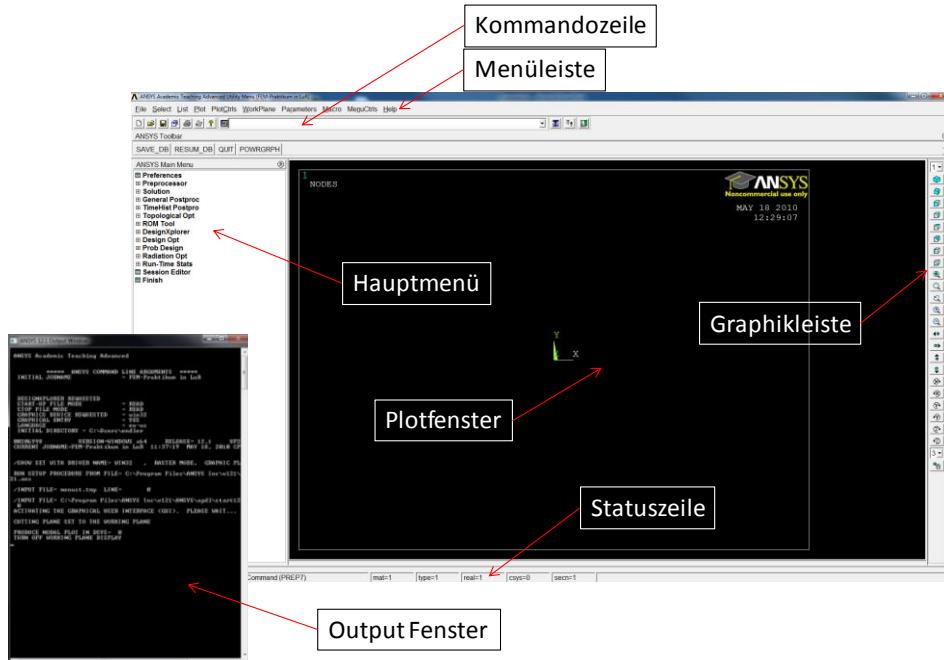


Abbildung3-2: ANSYS Benutzeroberfläche

3.2.1 Ausgabefenster

Das Output Fenster wird direkt beim Start von ANSYS geöffnet. Beim Schließen dieses Fensters wird ANSYS ebenfalls beendet. Im Fenster wird angezeigt:

- Alle eingegebenen Befehle
- Warnungen und Fehlermeldungen
- Informationen zum Modell in der Lösungsphase (z.B. Masse, Analysetype, etc.)

Oft bietet es sich an, dieses Fenster zumindest einige Zeilen groß auf dem Bildschirm sichtbar zu haben. Das Ausgabefenster niemals während der Benutzung von ANSYS schließen, da dies das Beenden des Programms zur Folge hat.

3.2.2 Eingabefenster

Das Eingabefenster besteht im wesentlichen aus den Elementen:

- **Kommandozeile:**
Eingabe der Befehle bzw. Kommandos bei Bedienung über APDL
- **Menüleiste:**
Wichtige Befehle und Kommandos in ANSYS (Speichern, Einlesen, Auslesen, Hilfe, Anzeigeoptionen)
- **Graphikleiste:**
Steuerung der graphischen Darstellung im Plotfenster.
- **Hauptmenü:**
Auswahl der Befehle bei Bedienung über die GUI, Befehle werden in ANSYS automatisch in APDL übersetzt und in <jobname>.log im Arbeitsverzeichnis abgelegt.
- **Statuszeile:**
Anzeige des aktuellen Status bezgl. Material, Elementtyp, Koordinatensystem, etc.
- **Plotfenster:**
Graphische Darstellung des Modells

3.3 Grundlagen (Abläufe im Hintergrund)

3.3.1 ANSYSDatenbasis und Dateien

Zum einen erzeugt ANSYS automatisch einige Dateien und zum anderem lassen sich verschiedene Dateien erzeugen, die später verwendet werden können. Nachfolgend eine kompakte Zusammenstellung der wichtigsten Dateien:

- jobname.db: Enthält die gesamte Datenbasis des Modells
- jobname.cdb: Alle Informationen der Datenbasis bis auf die Geometriedaten
- jobname.igs: Nur die Geometriedaten der Datenbasis
- jobname.rxx: Enthält die Ergebnisse einer Strukturanalyse. Bei anderen Berechnungsarten werden andere Endungen verwendet
- jobname.log: Datenbasiserzeugung, d.h. beinhaltet alle Kommandos
- jobname.err: Alle Fehlermeldungen
- jobname.out: Inhalte des Output-Fensters

3.3.2 Befehlseingabe

Die Befehlseingabe ist bei ANSYS auf verschiedene Arten möglich. Hier im Praktikum werden im Wesentlichen drei Möglichkeiten verwendet:

- Über die grafische Oberfläche
- Eingabe über die Kommandozeile
- Einlesen einer Eingabe-Datei

Egal auf welche Weise gesteuert wird, ANSYS arbeitet mit Kommandos, die direkt eingegeben oder im Hintergrund erzeugt werden. Diese werden in der ANSYS-Kommandosprache APDL (ANSYS Programming Design Language) erzeugt.

3.3.3 Eingabekonventionen

Werden Befehle direkt über die Kommandozeile oder in eine Eingabe-Datei geschrieben, sind hierbei einige Konventionen zu beachten:

- Die Eingabe der Befehle ist case-insensitiv, d.h. es besteht keine Unterscheidung zwischen Groß- und Kleinschreibung. Dies kann jedoch gut dazu genutzt werden die Eingabe-Datei zu strukturieren, z.B. alle Befehle klein und alle Variablengroß.
- Es ist klar zwischen Punkt und Komma zu unterscheiden. Punkte werden bei Zahlen zur Trennung des Vor- und Nachkommabereiches benutzt; Kommata stehen in Befehlen zur Trennung der Teile. Eine kleine Verwechslung mit großer Wirkung...
- Die Eingabe von Zehner-Potenzen erfolgt in der Art (Zahl)*10**Potenz oder in der Art (Zahl)e(Potenz)
- Zeilen, die mit einem ! beginnen werden nicht eingelesen, d.h. es handelt sich um Kommentarzeilen. Wird im Laufe einer Zeile ein ! gesetzt, ist der Text danach ebenfalls Kommentar.
- Wird ein Befehl nicht vollständig ausgeschrieben, bzw. Materialparameter nichtkomplett definiert, werden automatisch 'Default-Werte' angenommen. Dies ist oft recht praktisch, da die Eingabe kürzer wird, birgt aber die Gefahr, dass der Wert ungewollt auf einen voreingestellten Wert gesetzt wird.

3.3.4 Einheitensystem

Bei der klassischen ANSYS Anwendung werden keine Einheiten definiert, d.h. es ist eine konsistente Verwendung der Einheiten erforderlich. Z.B. Eingabe in [N] und [mm] liefert Ergebnisse u.a. auch in [N/mm²]. Tabelle 3-1 zeigt Beispiele für konsistente Einheitensysteme.

Tabelle 3-1: Beispiel konsistenter Einheitensysteme

Masse	Länge	Zeit	Kraft	Spannung	Dichte	E-Modul	Frequenz
t	mm	s	N=t*mm/s ²	MPa=N/mm ²	t/mm ³	MPa=N/mm ²	Hz=1/s
kg	m	s	N=kg*m/s ²	Pa=N/m ²	kg/m ³	N/m ²	Hz=1/s
lbf	in	s	lbf	psi=lbf/in ²	lbf/in ³	lbf/in ²	Hz=1/s

3.4 Wichtige Funktionen und Einstellungen

3.4.1 Anzeigen des Log – Files und Error – Files

ANSYS ist über die graphische Benutzeroberfläche mittels Maus zu bedienen. Alle ausgeführten Aktionen werden dabei von ANSYS im Hintergrund im sogenannten *Log File* in APDL – Form aufgezeichnet. Aus diesem *Log File* können nun die zu den über die GUI ausgeführten Aktionen gehörenden Befehle entnommen werden. Besonders bei der Erstellung sog. *Macros* o. *Input files* ist dies besonders hilfreich. Neben dem oben gezeigten Vorgehen kann das *Log File* auch im Arbeitsverzeichnis gefunden werden (jobname.log). Neben dem *Log File* wird ebenfalls ein sog. *Error File* von ANSYS automatisch erstellt, welches sämtliche Warnungen und Fehlermeldungen des Programms aufzeichnet. Darin sind oftmals detailliertere Angaben zu Warnungen und Fehlermeldungen als in jenen, welche über die GUI angezeigt werden. Das *Error File* ist ebenfalls auch im Arbeitsverzeichnis zu finden.

Menüleiste: *File – List – Log File* oder: *List – Files – Log File ...*
File – List – Error File oder: *List – Files – Error File ...*

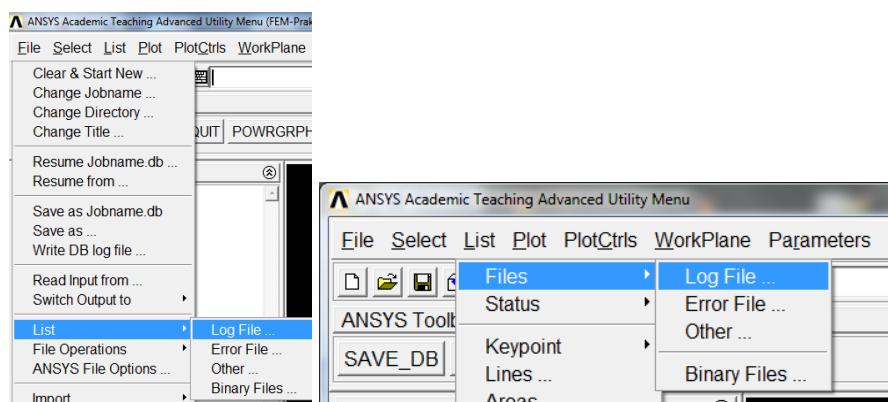


Abbildung3-3: Log- oder Error-File anzeigen lassen

Alle im Log File angezeigten Befehle lassen sich mittels Copy – Paste in ein beliebiges Textfile kopieren und mit

Menüleiste: *File – Read Input from ...*

wieder einlesen. Alternativ können diese Befehle auch wieder per Copy – Paste in die Befehlsleiste eingefügt werden.

3.4.2 Steuern der Darstellung

Über die Befehl *PlotCtrls* in der Menüleiste kann bestimmt werden welche Modellteile oder Symbole angezeigt werden. Dazu gehören z.B. Symbole für Randbedingungen, Reaktionskräfte, Koordinatensysteme, Materialien, Elementtypen usw. Ein gezieltes Ein- oder Ausblenden mancher Symbole kann für eine übersichtliche Darstellung des FE – Modells sorgen. Mit dem Befehl *Numbering* unter *PlotCtrls* kann die Nummerierung der einzelnen Keypoints, Linien, Flächen, Knoten, Elemente, etc. dargestellt werden.

Mit dem Befehl *Plot* in der Menüleiste kann ebenfalls ausgewählt werden welche Objekte (Keypoints, Linien, Flächen, Elemente, Knoten, ...) angezeigt werden sollen.

Anzeige von Symbolen und Nummerierungen:

Menüleiste: *PlotCtrls – Symbols*

PlotCtrls – Numbering

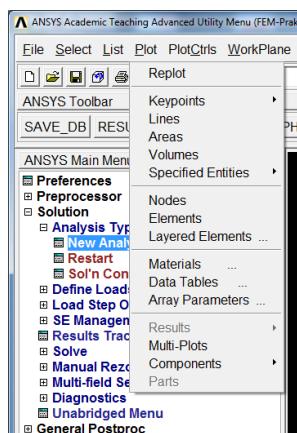


Abbildung3-4: Steuern der Darstellung 1

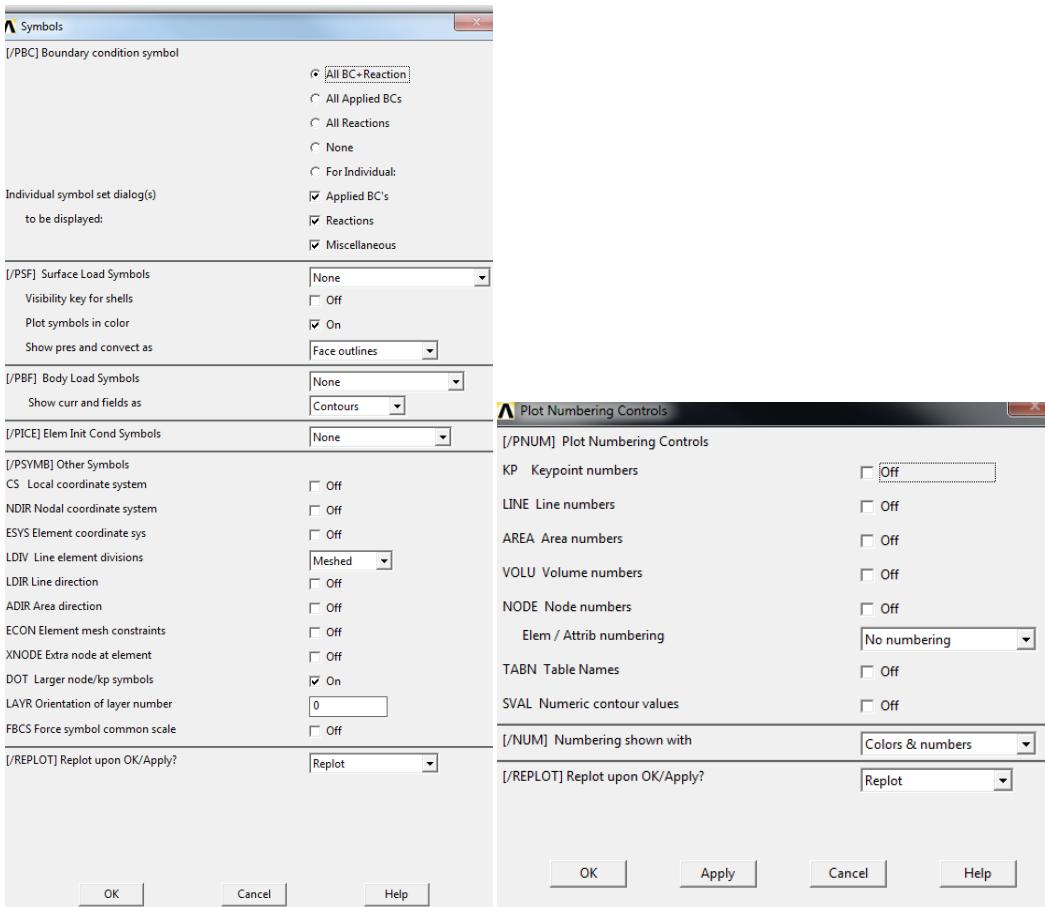


Abbildung3-5: Steuern der Darstellung 2

Eine weitere Möglichkeit zur Steuerung der Darstellung bietet der Menüpunkt *PlotCtrls – Style*. Eine wichtige Funktion in diesem Menüpunkt ist *Size and Shape*.

Mit der Option *Size and Shape* lässt sich die Darstellung von 1D - und 2D – Elementen (Balken – und Schalenelementen) in ihren wahren Dicken bzw. Querschnittsformen steuern. Schalenelemente und Balkenelemente werden in ANSYS standardmäßig mit einer Dicke von „0“ also als Linie bzw. Fläche dargestellt. Will man jedoch die ihnen zugewiesene Wandstärke bzw. Querschnittsgeometrie darstellen, so kann dies über die Einstellungen unter *Size and Shape* geschehen.

Dazu im Feld *SCALE* unter */ESHAPE* den gewünschten Vergrößerungsfaktor zur Darstellung der Geometrie eingeben. Der Faktor 0 entspricht 0% und ist die Standardeinstellung von ANSYS. Der Wert 1 entspricht einer Vergrößerung von 100% und somit einer Darstellung der Geometrie in den realen Abmessungen (Wandstärke, Querschnitt).

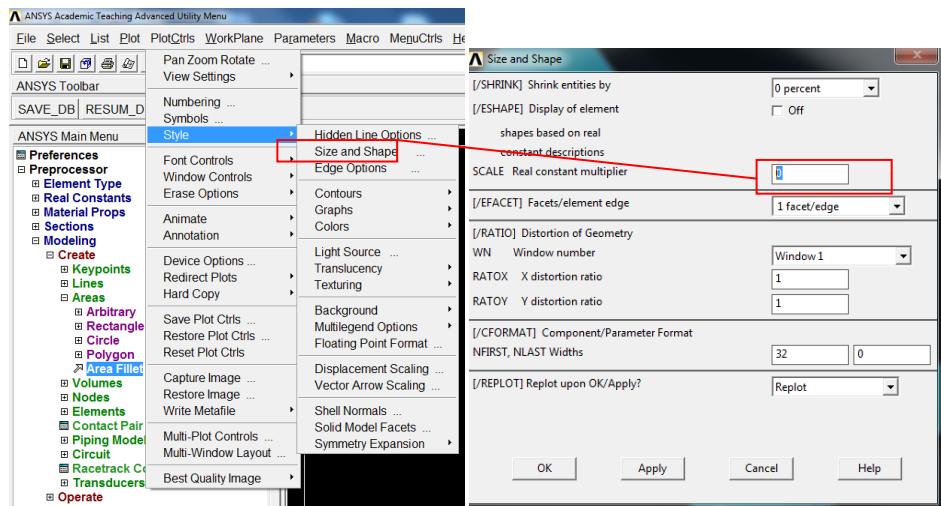


Abbildung3-6: Steuerung der Darstellung 3

Anstelle der Einstellung über die GUI kann dies ebenfalls mit dem */ESHAPE*-Befehl in der Form */ESHAPE, Scale* erreicht werden. Dabei muss für *Scale* der gewünschte Skalierungsfaktor eingegeben werden. In Abbildung3-7 ist exemplarisch der Unterschied der Darstellung bei den Vergrößerungsfaktoren 0% (0) und 100% (1) gezeigt.

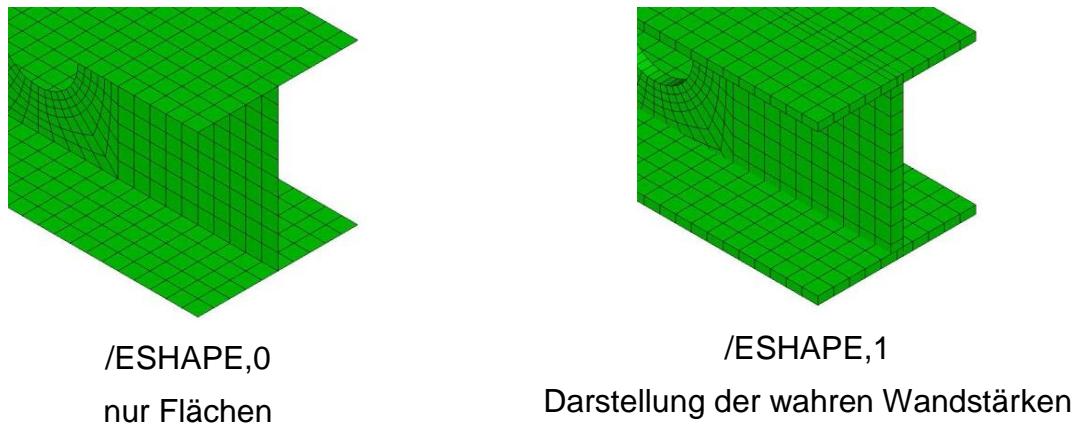


Abbildung3-7: Darstellungssteuerung mit dem */ESHAPE* – Befehl 1

Bei Balkenelementen besteht ebenfalls die Möglichkeit mit Hilfe des */ESHAPE* – Befehls den wahren Querschnitt anzeigen zu lassen. In Abbildung3-8 ist dies ebenfalls exemplarisch dargestellt.

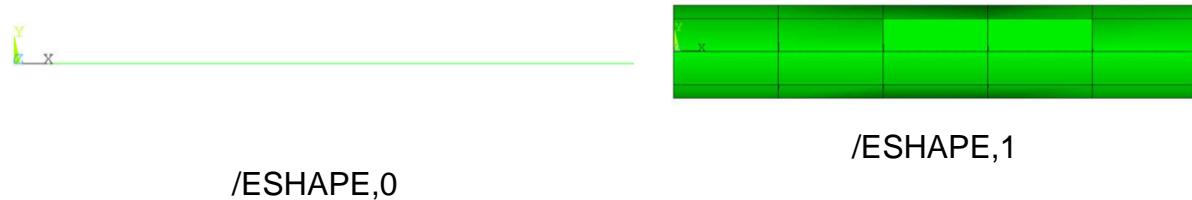


Abbildung3-8: Darstellungssteuerung mit dem */ESHAPE* – Befehl 2

Die Verwendung des /ESHAPE – Befehls empfiehlt sich auch bei der Darstellung von Ergebnissen im Postprocessor. Vor allem Spannungsgradienten über die Dicke können bei Schalenelementen nur sinnvoll bei einer Darstellung der realen Wandstärke (100%) angezeigt werden. Bei Balkenelementen können eventuelle Spannungsverläufe über den Querschnitt ebenfalls nur bei einer Darstellung des Querschnitts in realer Dimensionen, also 100%, sinnvoll dargestellt werden.

3.4.3 ANSYS Selektierlogik

Die Selektierlogik ermöglicht, eine Teilmenge von Knoten, Elementen, Keypoints, Linien usw. zu selektieren, um mit einer kleinen Menge von Größen zu arbeiten, ohne die restlichen Daten zu zerstören. Das Selektieren einer Teilmenge ist sinnvoll, um Lasten oder Auflager zu definieren, Ergebnisse zu prüfen, Geometrien in einem bestimmten Bereich zu überprüfen usw.

3.4.3.1 Selektieren in der GUI

In der GUI lassen sich Selektionen über

Menüleiste: *Select - Entities*

treffen. Hierbei ist zunächst die Entität des Auswalssets (*Keypoints, Linien, Flächen, Volumen, Elemente, Knoten*) zu bestimmen. Hierauf folgen die Art der Auswahl und die Methode zum Aufbau des Selektionssets.

Die Art der Auswahl lässt sich über folgende Optionen bestimmen:

- *by num/pick*: durch das Anklicken der entsprechenden Positionen auf dem Bildschirm oder durch direkte Eingabe der Objektnummer in das Eingabefenster; hier gilt die Reihenfolge (durch Komma trennen): *Anfangsnummer, Endnummer, Zählerparameter (kann entfallen)*
- *by location*: selektieren von Objekten nach ihrer Lage, bei Flächen und Volumen gilt die Lage des Schwerpunkts. Die Eingabe erfolgt achsenbezogen in der Reihenfolge: *Anfangswert, Endwert*
- *by attributes*: z.B. nach Elementeigenschaften (Material-Nr., Elementtyp –Nr., Real Konstanten-Nr.)
- *attached to*: selektiert alle Größen die zu bereits selektierten Größen gehören z.B. *select keypoints attached to lines*, selektiert alle Keypoints, welche zu den momentan aktiven Linien gehören
- *everything below*: selektiert alle Größen, die in der Hierarchie unter den betreffenden Größen stehen z.B. *select everything below selected areas*, selektiert alle Linien, Keypoints, Elemente und Knoten, welche zu den momentan aktiven Flächen gehören

Die Methoden zum Aufbau eines Selektionssets sind in folgender Abbildung zusammengefasst.

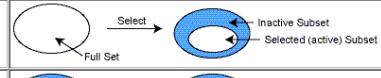
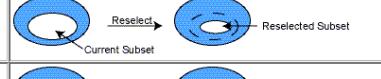
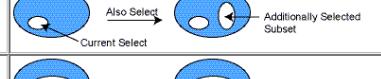
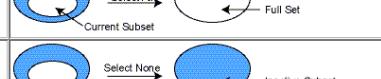
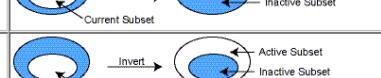
Select. Selects items from the full set of data.	
Reselect. Selects (again) from the selected subset.	
Also Select. Adds a different subset to the current subset.	
Unselect. Subtracts a portion of the current subset.	
Select All. Restores the full set.	
Select None. Deactivates the full set (opposite of Select All).	
Invert. Switches between the active and inactive portions of the set.	

Abbildung 3-9: Methoden zum Aufbau eines Selektionssets in der GUI

3.4.3.2 Wichtige Selektierbefehle über die APDL

Sämtliche Selektivorgänge können neben der GUI auch über die Eingabe der entsprechenden Befehle in der Befehlszeile ausgeführt werden.

Keypoints: **KSEL**,

Linien: **LSEL**

Flächen: **ASEL**

Volumen: **VSEL**

Elemente: **ESEL**

Knoten: **NSEL**

Alle diese Befehle haben den gleichen grundsätzlichen Aufbau:

XSEL,Type,Item,Comp,VMIN,VMAX,Zähler

Type: Methoden zum Aufbau eines Selektionssets, siehe Tabelle3-2

Item: Art der Auswahl (worüber soll selektiert werden?), siehe Tabelle 3-3

Comp: Komponente des Auswahlparameters (Abhängig von **Item**)

VMIN,VMAX,Zähler	Anfangsnummer/ Anfangswert, Endnummer/ Endwert, Zählerparameter (kann entfallen), alle Abhängig von Item und Comp
-------------------------	---

Ober – und Untergrenze des Auswahlintervalls.

Beispiel: von Elementnummer 1 bis 8

esel,s,elem,,1,8

Knoten in einem Bereich von x=10 bis x=20

nsel,s,loc,x,10,20

Soll nicht über ein Intervall sondern über einen diskreten Wert selektiert werden, so kann der Wert für VMAX weggelassen werden.

Beispiel: Elemente mit der Materialnummer 3

esel,s,mat,,3

Knoten bei y=0

nse1,s,loc,y,0

Sollte ein Auswahlparameter (ITEM) mehrere Komponenten besitzen muss die jeweilige gewünschte Komponente hier angegeben werden. Z.B. bei der Selektion über Koordinaten (location) muss hier angegeben werden welche Koordinatenrichtung betrachtet werden soll. Bei vielen weiteren Selektierbefehlen kann dieses Feld freigelassen werden (s. ANSYS Hilfe)

Tabelle 3-2: Methoden zum Aufbau eines Selektionssets mit APDL Befehlen

Methode	TYPE	Beschreibung
select	s	selektieren aus der gesamten Datenmenge
reselect	r	um aus der momentan selektierten Teilmenge eine weitere Teilmenge zu selektieren
also select	a	um eine andere Teilemenge zu der momentan selektierten hinzuzufügen
unselect	u	um einen Teil der momentan selektierten Menge abzuwählen
select all	all	um die Gesamtmenge wieder zu aktivieren
invert	inv	um zwischen den aktiven und inaktiven Teilmengen umzuschalten
unselect	none	um das gesamte Set abzuwählen
status	stat	aktueller Selektierstatus

picking	p	Auswahl über anklicken mit der Maus
---------	----------	-------------------------------------

Tabelle 3-3: Methoden zum Aufbau eines Selektionssets mit APDL Befehlen

Methode	Item	Beschreibung
<i>by pick</i>	p	Selektion über graphische Auswahl
<i>by num</i>	ELEM NODE AREA LINE KP	Selektion über Entitätsnummerierung: <i>Elementnummer</i> <i>Knotennummer</i> <i>Flächennummer</i> <i>Liniennummer</i> <i>Keypointnummer</i>
<i>by location</i>	LOC	Selektion über Angabe von Koordinaten
<i>by attributes</i>	TYPE MAT SEC REAL	Selektion nach Elementeigenschaften: <i>Elementtyp</i> <i>Materialnummer</i> <i>Section - Nummer</i> <i>Realconstant – Nummer</i>

Für die Methoden „*attached to*“ und „*everything below*“ werden andere Selektionsbefehle verwendet.

Tabelle 3-4 zeigt eine Befehlsmatrix für die Methode „*attached to*“, um beispielsweise alle Knoten auf einer Linie, alle Elemente einer Fläche, oder alle Flächen eines Volumens auszuwählen.

Tabelle 3-4: Selektionsmatrix mit APDL Befehlen für die Methode „*attached to*“

		bereits selektierte Objekte					
		KEYPOINT	LINE	AREA	VOLUME	ELEMENT	NODE
zu selektierendes Unterobjekt	KEYPOINT	-	ksll,				ksln
	LINE	lslk,	-	lsla,			
	AREA		asll,	-	aslv,		
	VOLUME			vsla,	-		
	ELEMENT		esll,	esla,	eslv,	-	esln,
	NODE	nslk,	nsll,	nsla,	nslv,	nsle,	-

Beispiele:

Auswahl aller Knoten einer bereits selektierten Linie:

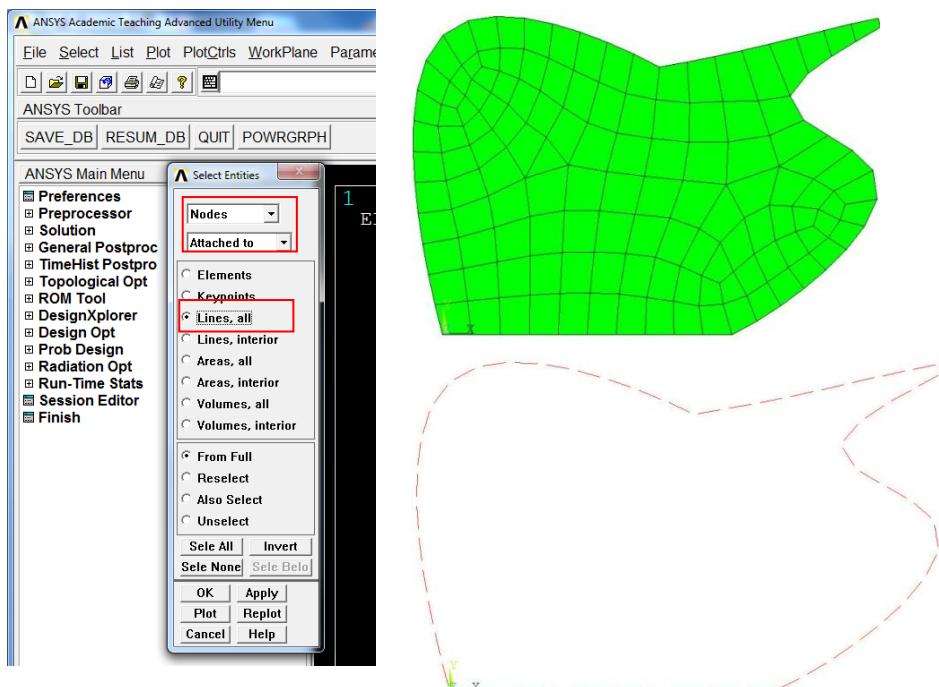
nsll,s (*nodes select on line*)

Auswahl aller Elemente einer bereits selektierten Fläche

esla,s (*elements select on area*)

Beispiele für das Selektieren nach der Methode „attached to“

Besonders bei Geometriiformen, welche das Selektieren über Koordinaten nicht zulassen oder in Fällen, in denen die genauen Abmessungen einer Geometrie oder eines FE – Netzes nicht bekannt sind eignet sich das Selektieren über die Methode „attached to“. Dies bedeutet, dass man zunächst ein anderes Objekt (Hilfsobjekt) des Modells (z.B. Linie), mit bekannten Eigenschaften, selektiert, welches das gewünschte Objekt (z.B. Knoten) beinhaltet. Als Beispiel hierfür sollen im Folgenden alle Knoten auf dem Rand der gezeigten Fläche selektiert werden. Da eine direkte Selektion über die Koordinaten der Randknoten nicht möglich ist wird dabei der Umweg über die Randlinie (Hilfsobjekt) gegangen. Anschließend werden alle Knoten welche auf der Linie liegen (daher: „attached to“) selektiert.



Select – Entities –

LSLA,s

selektieren aller
Linien der Fläche

Nodes – Attached to –

Lines,all

NSLL,s,1

selektieren aller
Knoten auf den
Linien

Eine weitere Herangehensweise wäre das Selektieren aller Knoten der Fläche ohne die Knoten auf dem Flächenrand. Dies kann durch folgende Befehle geschehen:

NSLA,s,0 Selektieren aller Knoten der Fläche ohne die Randknoten. Dies wird durch den Eintrag „0“ am Ende des NSLA - Befehls erreicht. Setzt man den Eintrag auf „1“ so werden auch die Randknoten selektiert.

NSEL,inve Invertieren der Auswahl

Als dritte Möglichkeit würde sich hier die Option „EXT“ im NSEL – Befehl anbieten. Dabei werden alle Knoten auf dem Rand (EXT: exterior) automatisch selektiert.

NSEL,s,ext

Alle drei gezeigten Möglichkeiten stellen nur einige wenige Möglichkeiten dar um auf da selbe Ergebnis zu kommen. Sie besitzen alle ihre Vor – und Nachteile und es muss von Fall zu Fall entschieden werden welche Herangehensweise am sinnvollsten ist.

3.4.4 Verwendung des *GET - Befehls

Mit dem *GET-Befehl kann eine Vielzahl an Werten ausgelesen und als Parameter gespeichert werden. Auf diese Weise können sowohl im Preprocessing, Solution als auch Postprocessing Werte wie Anzahl oder Nummern von Volumen, Flächen, Elementen Keypoints, Knoten sowie Spannungs – und Verschiebungswerte etc. ausgelesen und einem Parameter zugewiesen werden. Einige wichtige Beispiele zur Verwendung des *GET – Befehls sind in den nachfolgenden Beispielen kurz erläutert. Für weitere Erläuterungen existiert in der ANSYS Hilfe eine ausführliche Dokumentation zu diesem Befehl.

Beispiel 1: Man möchte die Anzahl ausgewählter Keypoints bestimmen und einem Parameter zuweisen.

GUI:

Parameters – Get Scalar Data ...
- Model data – For selected set –
Current KP set – No. of Keypoints

APDL:

*GET,KP_NUM,kp,,count
KP_NUM: Parameterbezeichnung

Beispiel 2: Es soll die Flächennummer einer ausgewählten Fläche bestimmt und einem Parameter zugewiesen werden. Hierbei wird die maximale Flächennummer bestimmt. Diese ist hier identisch der aktuellen Flächennummer, da nur eine Fläche selektiert wurde.

GUI:

APDL:

*GET,NUM_A,area,,num,max

NUM_A: Parameter

Beispiel 3: Ermittlung der Spannung an einem Knoten in x-Richtung.

GUI:

APDL:

Parameters – Get Scalar Data ... - *GET,N_TENS,node,N,s,x

Results data – Nodal results – Stress – N: Knotennummer

X-Direction SX

N_TENS: Parametername

Über *Parameters – Scalar Parameters* kann man den Parameter und den ihm zugeordneten Wert anzeigen lassen. Die so erzeugten Parameter können in allen Schritten der FE – Analyse ohne weitere Bearbeitung verwendet werden.

3.4.5 Häufig verwendete Befehle

In diesem Kapitel sollen einige nützliche sowie sehr oft verwendete Befehle während der Erstellung von ANSYS Inputfiles kurz erläutert werden.

RETURN:

Mit Hilfe des *_RETURN*-Befehls kann bei der Modellierung direkt nach der Erstellung eines Geometrieelements z.B. Fläche, Linie oder Keypoint, dessen Nummer einem Parameter zugewiesen werden ohne den *GET – Befehl zu verwenden. Dies ist vor allem von Vorteil, wenn ein späteres Selektieren des Geometrieelements sehr aufwendig bis unmöglich ist. Dabei ist es wichtig, dass der *_RETURN*-Befehl unmittelbar nach dem Befehl zur Geometrieerstellung folgt.

Beispiel:

K,1,0,0,0

Keypoints 1 und 2 erstellen

K,2,5,0,0

L,1,2

Linie aus KP1 und KP2 erstellen

L_num=_RETURN

Zuweisen der Liniennummer dem Parameter
L_num

/EOF: Der /EOF-Befehl (EOF: end of file) stoppt die Ausführung eines Inputfiles. Er eignet sich vor allem für die Fehlersuche in einem Inputfile. Beim Einlesen als Datei wird das Inputfile nur bis zum /EOF – Befehl ausgeführt. Wird das Inputfile über „copy-paste“ in die Befehlszeile geladen, kann der /EOF – Befehl zum Absturz von ANSYS führen.

/NERR: Durch den /NERR-Befehl kann die Anzahl der angezeigten Warnungen und Fehlermeldungen festgelegt werden. Des Weiteren kann festgelegt werden ab welcher Anzahl an Warnungen und Fehlermeldungen die Eingabe abgebrochen wird.

/UIS: Mit dem /UIS-Befehl kann das Verhalten der GUI gesteuert werden. Beispielsweise kann eingestellt werden, dass nur eine gewisse Anzahl an Warnungen oder Fehlermeldungen angezeigt werden (/UIS,MSGPOP,).

***DIM:** Mit *DIM ist es möglich einen Array zu definieren. Der Befehl lautet allgemein:

**DIM,Par,Type,IMAX,JMA,KMAX,Var1,Var2,Var3,CSYSID*

PAR: Name des Array

Type: Arraytyp (z.B. ARRAY, TABLE,...)

IMAX: Zeilenanzahl, JMAX: Spaltenanzahl, KMAX: 3. Dimension

***USE:** Der *USE Befehl ermöglicht das Einlesen eines im Arbeitsverzeichnis existierenden Inputfiles. Soll während der Ausführung eines ANSYS Inputfiles an einer bestimmten Stelle ein weiteres Inputfile aufgerufen und ausgeführt werden, so kann dies über den Befehl *USE,Dateiname.mac geschehen. Die Datei, welche aufgerufen werden soll muss dabei die Endung .mac (Macro) besitzen.

***VWRITE:** Der *VWRITE Befehl ermöglicht das Ausschreiben eines Parameters (Skalar) in eine Textdatei. Somit können unterschiedliche Werte aus ANSYS ausgelesen und mit anderen Softwaretools (z.B. MatLab, Excel, etc.) weiterverwendet werden. Bevor jedoch der *VWRITE Befehl verwendet werden kann, muss die entsprechende Textdatei im Arbeitsverzeichnis erstellt werden. Das übliche Vorgehen dabei ist:

*COPEN,Dateiname,Dateiendung,,append, *COPEN erstellt eine Textdatei im Arbeitsverzeichnis, dabei muss der Dateiname und die Dateiendung angegeben werden. Mit dem Zusatz „append“ wird festgelegt, dass nachfolgende Einträge an den bestehenden Inhalt der Datei angefügt werden. Eine 0 anstelle von „append“ bewirkt ein Überschreiben des bestehenden Inhalts.

*GET,PAR_1,node,,num,max

*GET,PAR_2,node,n_n,u,y

Hier wird eine Knotenanzahl sowie eine Verschiebung in y – Richtung mit *GET den Parametern PAR_1 und PAR_2 zugewiesen.

*VWRITE,u_y,n_n

(F19.9,F19.9)

Ausschreiben der beiden Parameter PAR_1, PAR_2 in die erstellte Textdatei. Der Ausdruck in Klammern bestimmt das Format der Ausgabe. F steht dabei für *Fortran* Format, 19 für die Stellen vor und 9 für die Stellen nach dem Komma.

*CFCLOS

Schließen der Textdatei

Für detaillierte Informationen zu diesem Befehl existiert ein ausführliches Kapitel in der ANSYS Hilfe. Um Vektoren oder Matrizen auszulesen muss der *MWRITE Befehl verwendet werden. Genaueres kann dazu in der ANSYS Hilfe nachgelesen werden.

3.4.6 Bedingungen und Schleifen

Wie in vielen anderen Programmiersprachen üblich, so bietet auch ANSYS die Möglichkeit der Erstellung von Schleifen und Bedingungen. Hierzu sollen vor allem sogenannte *DO* – Schleifen sowie *IF* – *ELSE* Bedingungen vorgestellt werden. Besonders während der Geometrieerstellung im Preprocessor als auch beim Auslesen von Analyseergebnissen im Postprocessor sind diese Schleifen und Bedingungen äußerst hilfreich und ersparen somit viel Programmieraufwand.

3.4.6.1 *DO – Schleifen

Eine DO – Schleife bewirkt das Ausführen einer bestimmten Aktion bis die Laufvariable einen bestimmten Endwert erreicht hat. Die DO – Schleife wird folgendermaßen definiert:

**DO, Par, IVAL, FVAL, INC*

Par: Name des Parameters der als Schleifenindex verwendet werden soll

IVAL: Initialwert / Startwert des Schleifenindex

FVAL: Endwert / Stoppwert des Schleifenindex

INC: Inkrement zur Erhöhung des Schleifenindex

Als Beispiel ist nachfolgend eine DO – Schleife erstellt, die in 10 Schleifen, (i=1 bis 10) jeweils einen Keypoint mit der Nummer i (1-10) an den Koordinaten 1*i*x, 2*i*y, 3*i*z erstellt.

**DO, i,1,10,1*

K, I,i*x,2*i*y,3*i*z

**ENDDO*

3.4.6.2 *IF – Bedingung

Die IF – Bedingung kann auch als WENN – DANN - Bedingung betrachtet werden. Es werden im Allgemeinen zwei Werte (Zahlen, Parameter,...) miteinander verglichen und dadurch eine bedingte Aktion ausgeführt. Die Definition dieses Befehls sieht generell wie folgt aus.

**IF, VAL1, OPER1, VAL2, BASE1*

VAL1,VAL2 : Numerische Werte zum bedingten Vergleich
OPER1: Vergleichsoperation (z.B., ist gleich, größer als, kleiner als, ungleich, etc.)
BASE1: Aktion basierend auf OPER1, falls dieser Ausdruck wahr ist.
(z.B. STOP, EXIT, CYCLE, THEN,...)

Als Beispiel hierfür soll eine IF – THEN Abfrage mit diesem Befehl erstellt werden. Es soll überprüft werden ob Par_1 größer als Par_2 ist. Falls dies der Fall ist, soll eine Fläche mit Kantenlänge Par_1 erstellt werden. Ist dies nicht der Fall, so soll ein Kreis mit Radius Par_2 erstellt werden.

```
Par_1=10
Par_2=25
*IF,Par_1,GT,Par_2,THEN
RECTNG,0,Par_1,Par_2
    *ELSEIF,Par_1,LT,Par_2,THEN
        CYL4,0,0,Par_2,0,Par2,360
*ENDIF
```

Auch hier sei darauf hingewiesen, dass zu diesem Befehl eine sehr ausführliche Dokumentation in der ANSYS Hilfe vorhanden ist.

3.4.7 Erstellen von Komponenten

Nach der Erstellung des FE – Modells ist es für die weiteren Analyseschritte oft hilfreich einzelne Modellteile (Linien, Flächen, Elemente, Knoten,...) zu sogenannten Komponenten (Components) zusammenzufassen. Diese können im Anschluss über bestimmte Selektbefehle direkt ausgewählt werden und erleichtern so das Selektieren verschiedener Teile des FE – Modells deutlich.

Der Befehl zur Erstellung von Komponenten lautet allgemein:

CM, Component – Name, Entity

Dabei kann der *Component – Name* frei gewählt werden. Mit *Entity* wird festgelegt welche Modellteile in dieser Komponente zusammengefasst werden sollen (z.B. Flächen, Elemente, Knoten, etc.) Über die GUI wird eine Komponente durch

Select – Comp/Assembly – Create Component

erstellt

In Abbildung3-10 sind exemplarisch 4 Flächen (Quadrate) in 3 verschiedene Komponenten zusammengefasst. Diese sind zum einen an den unterschiedlichen Farben zu erkennen, zu anderen wird im Fenster links oben eine Liste mit den vorhandenen Komponenten angezeigt. Die Anzeige der Komponenten erfolgt über den Befehl *CMPLLOT*. Zur Auswahl verschiedener Komponenten wird der CMSEL Befehl verwendet. Dabei können, ähnlich der bereits bekannten Selektierlogik in ANSYS, einzeln ausgewählt werden. Einzelne Komponenten können in einem weiteren Schritt noch zu sogenannten Gruppierungen zusammengefasst werden.

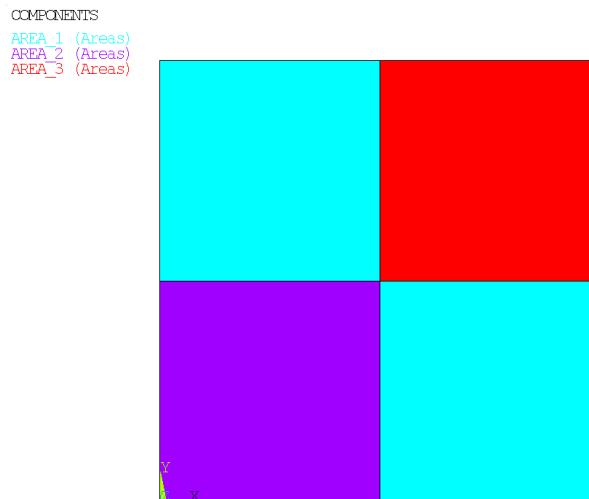


Abbildung3-10: Flächenunterteilung in Komponenten

Die wichtigsten Befehle im Umgang mit Komponenten sind in Tabelle 3-5 zusammengefasst. Ausführliche Beschreibungen hierzu finden sich auch in der ANSYS Hilfe.

Tabelle 3-5: Wichte Befehle beim Arbeiten mit Komponenten

Befehl	Beschreibung des Befehls
CM,Name,Entity	Erstellen einer Komponente
CMSEL,Type,Name,Entity	Selektieren von Komponenten
CMPLLOT,Label,ENtity,Keyword	Plotten von Komponenten
CMGRP,Anname,Cname1,..,Cname8	Gruppieren von einzelnen Komponenten zu einem Assembly
CMLIST,Name,Key,Entity	Auflisten der vorhandenen Komponenten
CMDELE,Name	Löschen von Komponenten

3.4.8 ANSYS Hilfe

ANSYS verfügt über eine ausführliche Hilfe Funktion. Diese kann auf verschiedene Arten aufgerufen werden. Ist der Befehl bekannt, kann direkt die Befehlszeile verwendet werden:

help, Befehl

oder über die Menüleiste aufgerufen werden.

Help – Help Topics

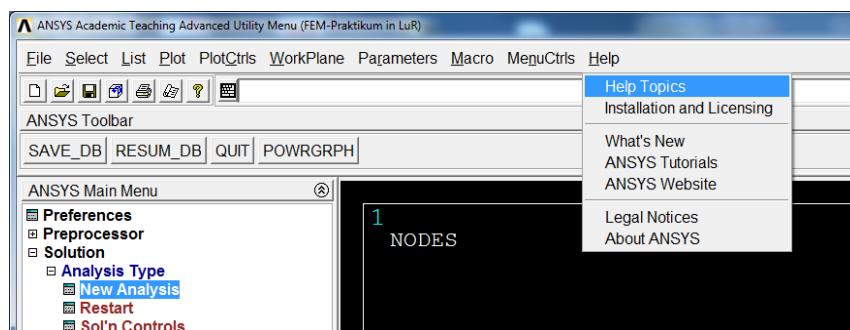


Abbildung3-11: Aufruf der ANSYS Hilfe

In der ANSYS Hilfe finden sich zum Beispiel ausführliche Elementbeschreibungen und Befehlsreferenzen. Weiterhin ist eine sehr gutes „Theorie Manual“ hinterlegt.

4 Ablauf einer FE-Analyse in ANSYS

Eine FEM-Berechnung läuft in 3 Hauptschritten mit nachfolgenden exemplarischen Inhalten ab:

- Preprocessor
 - Definition der Elementtypen (Balken-, Schalen-, Volumenelemente,...)
 - Definition der Materialeigenschaften (Kennwerte, Materialverhalten, etc.)
 - Erstellen o. Einlesen der Geometrie (Punkte, Linien, Flächen, Volumen)
 - Diskretisierung des Modells (Vernetzen der Geometrie)
- Solution
 - Aufbringen der Lasten und Randbedingungen auf das FE-Modell (Kräfte, Lagerstellen, Temperaturen, Beschleunigungen, etc.)
 - Einstellung der Solveroptionen
 - Lösen der Gleichungen
- Postprozessor
 - Anzeigen der Simulationsergebnisse
 - (Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen, Reaktionskräfte,...)

Am Beispiel der ANSYS Benutzeroberfläche wird auf diese Schritte im Folgenden kurz eingegangen.

4.1 Schritt 1: Preprocessor

4.1.1 Geometrie erzeugen

Als erster Schritt einer FE – Analyse muss im sog. Preprocessor die Geometrie importiert werden. Sind noch keine Geometrieeinformationen vorhanden, können diese direkt in ANSYS erzeugt werden (einfacher Geometriemodelle).

4.1.1.1 Geometrie Importieren

In ANSYS lassen sich diverse Geometriiformate importieren, z.B. CATIA V4, V5, IGES, jedoch werden für diese Schnittstellen Zusatzlizenzen benötigt. Außerdem scheitert der Import komplexer Geometrie oftmals. Hier sind externe Schnittstellenprogramme / Postprozessoren deutlich effizienter. Als Beispiel hierfür ist Hypermesh aus dem Altair Hyperworks-Paket zu nennen.

4.1.1.2 ANSYS Geometriemodeller

Die Geometriedaten werden im Wesentlichen über sog. *Keypoints* (Punkte), Linien, Flächen und Volumen erstellt. In einem weiteren Schritt können diese einfachen geometrischen Formen durch Operationen wie Verschneiden, Trimmen, Trennen, Teilen, etc. bearbeitet werden. Dadurch können auch komplexere Geometrie erzeugt werden.

Geometrie erstellen:

Preprocessor – Modeling – Create - ...

Generierung einfacher, geometrischer Formen wie Punkte, Linien, Flächen, Volumen

Geometrie bearbeiten:

Preprocessor – Modeling – Operate - ...

Boolsche Operatoren: Verschneiden, Trimen, Trennen, Teilen, etc.

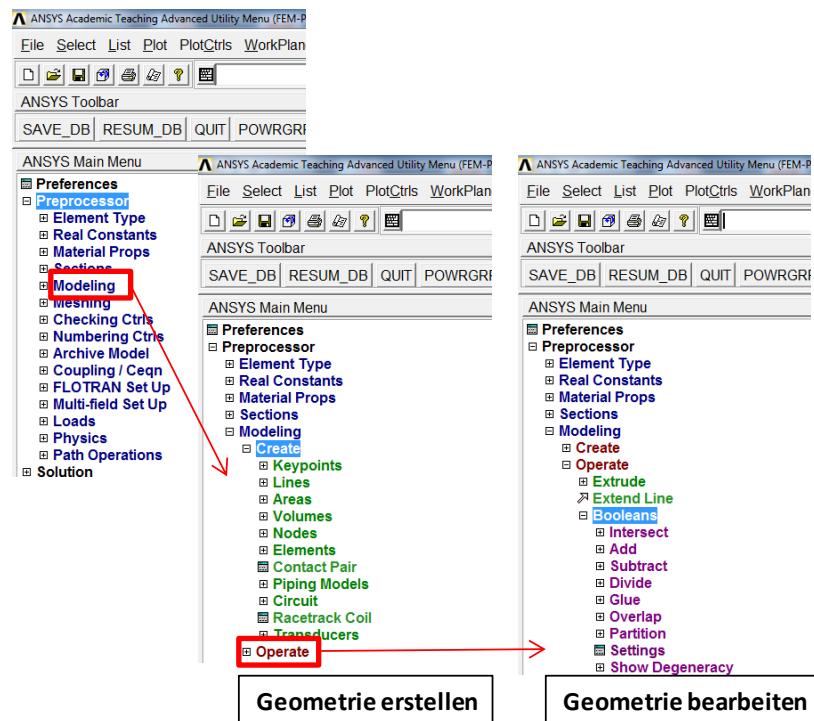


Abbildung4-1: Geometrie erstellen / bearbeiten

4.1.2 Definition der Elementtypen

Nachdem die Geometrie des Modells erstellt wurde, müssen geeignete Elementtypen festgelegt werden. Die dabei wichtigsten Elemente sind Balken-, Schalen- oder Volumenelemente. Die Wahl der Elementtypen hängt dabei stark vom beabsichtigten Detaillierungsgrad der Analyse ab. ANSYS stellt viele verschiedene Elementtypen zur Verfügung. Diese sind mit der historischen Entwicklung entstanden. Nach Stand der Forschung werden weitere Elemente entwickelt und im Programm umgesetzt, wobei die bereits im Programm implementierten erhalten bleiben. Hier ist es dem Anwender überlassen den richtigen Elementtyp für seine Berechnung zu wählen.

Preprocessor - Element Type – Add/Edit/Delete

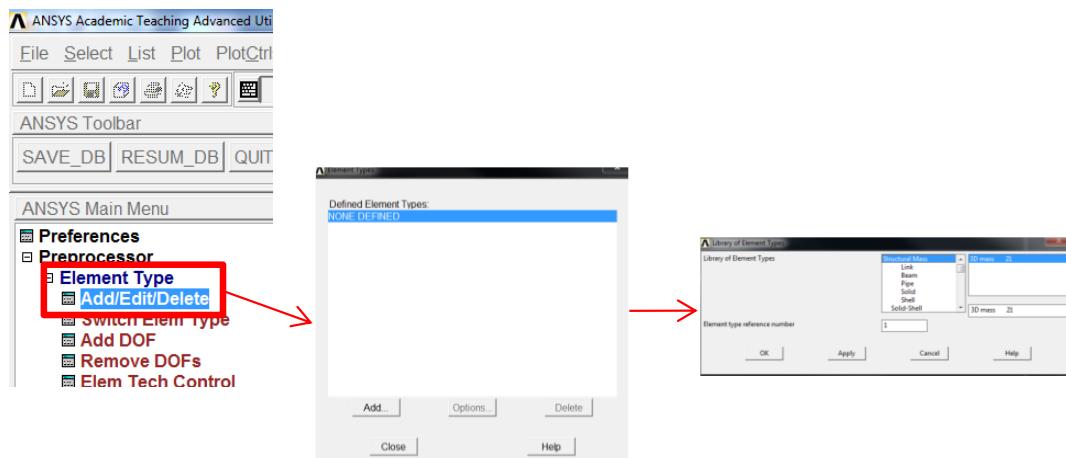


Abbildung 4-2: Geometrie erstellen / bearbeiten

Nachfolgend der Versuch eine Übersicht von Elementtypen, die in der Strukturmechanik verwendet werden, zusammenzustellen.

Tabelle 4-1: Wichtige Elementtypen

Verwendungszweck	Elementtypen
2D-Balkenelement	beam3
3D-Balkenelement	beam4, beam44, beam188, beam189
Scheibenelement	plane42, plane182
Schalenelement	shell63, shell181
3D-Volumenelement	solid45, solid185

Weitere spezielle Elementtypen wie Federelemente, Massenelemente, etc. sind ebenfalls implementiert. Insgesamt sind ca. 200 Elementtypen in ANSYS verfügbar (Stand: ANSYS 12.1)

4.1.3 Definition der Materialmodelle

Neben der Definition der Elementtypen müssen ebenfalls das Verhalten und die Eigenschaften der verwendeten Materialien durch geeignete Materialmodelle modelliert werden. Dabei kann beispielsweise festgelegt werden ob es sich um ein linear-elastisches oder ein nichtlineares Materialverhalten handelt, oder ob der Werkstoff isotrope oder orthotrope Eigenschaften besitzt.

Preprocessor – Material Props – Material Models

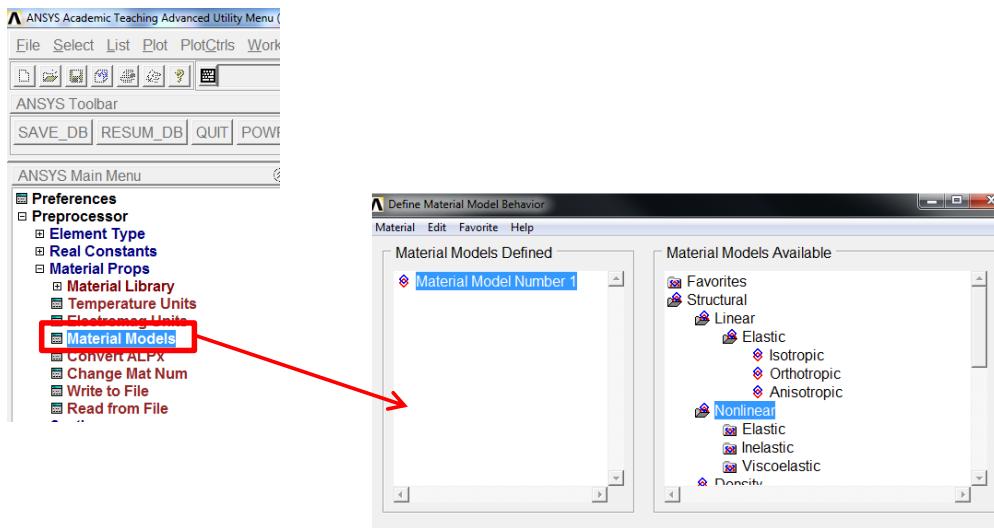


Abbildung4-3: Definition der Materialmodelle

4.1.4 Geometriezusatzinformationen

Einige Elementtypen, insbesondere bei vereinfachten Modellen wie Balken- oder Schalenelementen, müssen zur Komplettierung des Geometriemodells noch Zusatzinformationen eingegeben werden, wie z.B. Querschnitte, Lagenaufbauten, Massen, etc.

Diese werden in ANSYS je nach Elementtyp über „Real-Constants“ oder über „Sections“ angegeben.

- **Real-Constants:**
z.B. Querschnittsflächen, Flächenträgheitsmomente, Dicken, etc.
- **Sections:**
z.B. Querschnittsgeometrie, Lagenaufbauten, etc.

Da diese Geometriezusatzinformationen stark von gewählten Elementtypen abhängen, wird hierauf erst in den Übungsbeispielen eingegangen, siehe Kapitel 5.

4.1.5 Vernetzen der Geometrie

Nachdem die Elementtypen sowie die Materialmodelle bestimmt sind kann die Geometrie vernetzt werden. Dies bedeutet, dass die Ausgangsgeometrie nun durch eine Vielzahl von Elementen diskretisiert wird. Hierzu bietet ANSYS verschiedene Optionen zur Steuerung der Vernetzung, besonders im Hinblick auf Elementgröße und Form.

In diesem Schritt werden außerdem die Elementtypen, Materialmodelle und evtl. zusätzliche Geometrieeinformationen dem Element zugeordnet.

Preprocessor – Meshing – Mesh – Lines/Areas/Volumes/...

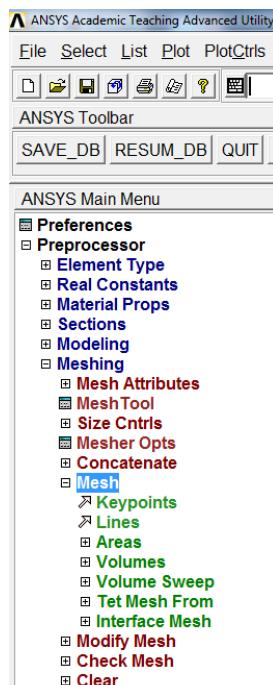


Abbildung4-4: Vernetzen des Modells

4.2 Schritt 2: Solution

Nach Abschluss des „Preprocessings“ beginnt nun der sog. Schritt der Solution, in dem für die Lösung des Problems wichtige Einstellungen getätigt, Lasten aufgebracht und das Problem gelöst wird. Als Standardeinstellung ist eine (lineare) statische Analyse eingestellt.

4.2.1 Lösungseinstellungen

Zunächst muss die Art der Analyse definiert werden, siehe Abbildung 4-5. Zur Auswahl stehen z.B. statische Analyse, Modalanalyse, etc.

Solution – Analysis Type – New Analysis

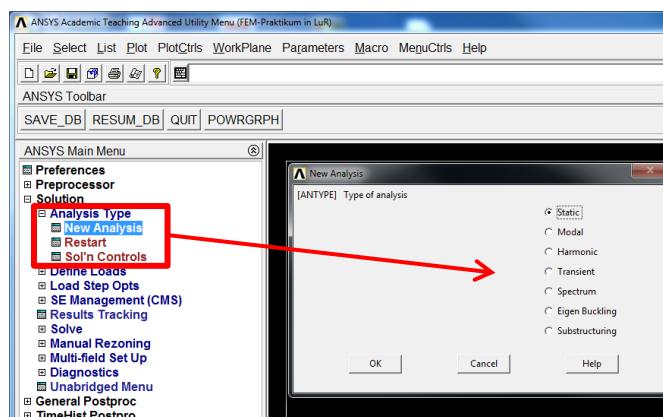


Abbildung 4-5: Auswahl des Analysetyps

Weiterhin müssen erweiterte Solveroptionen, wie die Auswahl des Lösungsalgorithmus, sowie Analysetyp abhängige Einstellungen getätigt werden.

Solution – Analysis Type – Sol'n Controls

Folgende Inputs werden Beispielsweise analysetypabhängig eingegeben:

- **statische Analyse**
Auswahl lineare / nichtlineare Analyse (small / large static displacements), Nichtlinear: Anzahl der Zeitschritte, Abbruchkriterien, etc.
- **Modalanalyse**
Anzahl der zu extrahierenden Moden, Frequenzbereich, etc.

4.2.2 Aufbringen der Lasten und Randbedingungen

Hierbei können nun die unterschiedlichsten Lasten und Randbedingungen auf das diskretisierte Modell aufgebracht werden. Dazu zählen beispielsweise Kräfte, Zwangsverformungen, Temperaturen, Beschleunigungen, Lagerstellen usw.

Solution – Define Loads – Apply – Structural -....

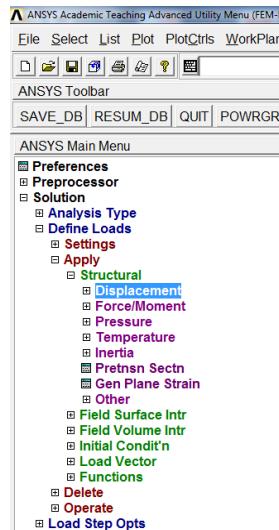


Abbildung4-6: Aufbringen von Lasten

4.2.3 Starten der Berechnung - Lösen der Gleichungen

Sind alle notwendigen Lasten und Randbedingungen auf das Modell aufgebracht kann damit begonnen werden die Berechnung der Gleichungssysteme zu starten. Zuvor muss jedoch noch der Typ der Analyse unter *Analysis Type* (statisch, modal, transient, harmonisch,...) bestimmt werden.

Solution – Solve – Current LS - ...



Abbildung4-7: Starten der Berechnung

4.3 Schritt 3: Postprozessor

Im Postprozessor können nun die aus der Berechnung erhaltenen Ergebnisse wie Verschiebungen, Spannungen, Dehnungen usw. eingelesen und dargestellt werden. Dies geschieht zum einen in Form von graphisch aufbereiteten Plots (*Plot Results*), bzw. kann auch in Form von Zahlenwerten (*List Results*) für eine weitere Verwendung der Ergebnisdaten in anderen Softwaretools erfolgen. Zuletzt ist auch eine eventuelle Animation der Ergebnisse (z.B. modale Analyse) im *Results Viewer* möglich. Weitere Postprozessoren, z.B. zeitabhängiger Postprozessor zum darstellen zeitabhängiger Ergebnisse, sind ebenfalls in ANSYS implementiert.

4.3.1 Erstellen von Ergebnis Plots

Im Postprocessor können über

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solution -...

eine Vielzahl von Ergebnissen zum Anzeigen in Form von Contour – Plots (Farbplots) ausgewählt werden.

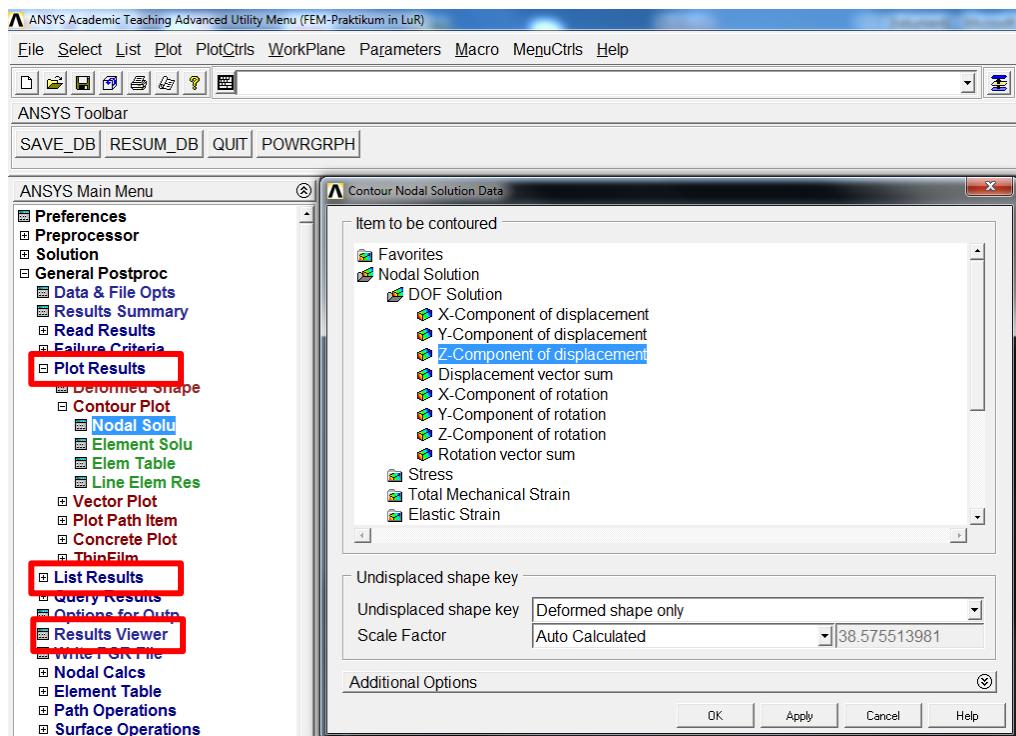


Abbildung4-8: Postprozessor

Eine häufige Funktion zur Dokumentation von Analyseergebnissen ist das Erstellen von Ergebnisplots welche im Arbeitsverzeichnis als Bilddateien gespeichert werden. ANSYS bietet dazu eine Vielzahl an Grafikformaten unter welchen ein solcher Plot gespeichert werden kann (z.B. JPEG, TIFF, PNG). Die Erstellung eines Plots kann dabei über die GUI

PlotCtrls – Redirect Plots – To PNG File...

erstellt werden.

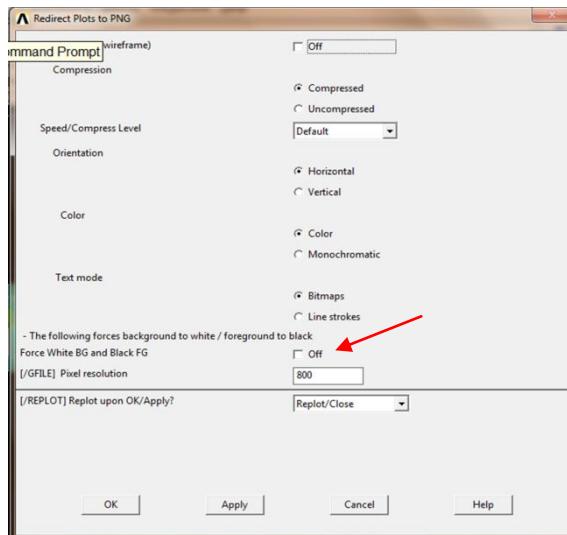


Abbildung4-9: Erstellen eines Ergebnisplots im .png - Format

4.3.1.1 Erstellen von Listen

Zur Dokumentation von Ergebnissen ist es oft hilfreich diese in tabellarischer Form darzustellen. Dabei bietet der Postprocessor (POST1) zahlreiche Möglichkeiten zur Auflistung von beispielsweise knoten- und elementbezogene Ergebnisgrößen Auflagerreaktionen, Verschiebungen oder Spannungen. Ein Beispiel für eine Auflistung der Knotenverschiebungen in y-Richtung kann folgendermaßen aussehen:

General Postproc. – List Results – Nodal Solution - DOF Solution – Y-Comp. of displacement

```
PRNSOL Command
File
PRINT U NODAL SOLUTION PER NODE
***** POST1 NODAL DEGREE OF FREEDOM LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CRSE= 0
THE FOLLOWING DEGREE OF FREEDOM RESULTS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
NODE UV
1 0.0001
2 0.30822E-01
3 0.17900E-02
4 0.64963E-02
5 0.13390E-01
6 0.21741E-01
MAXIMUM ABSOLUTE VALUES
NODE 2
VALUE 0.30822E-01
```

Abbildung4-10: Auflistung der Knotenverschiebungen in y - Richtung

Zur Auflistung von Reaktionskräften oder Knotenkräften kann wie folgt vorgegangen werden.

General Postproc – List Results – Reaction Solu

General Postproc – List Results – Nodal Loads

The image shows two separate command windows, each titled "PRRSOL Command".

Left Window (PRRSOL Command):

```

PRINT REACTION SOLUTIONS PER NODE
***** POST1 TOTAL REACTION SOLUTION LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
      NODE   FX      FY      FZ      MX      MY      MZ
      1     0.0000 -5.0000  0.0000  0.23203E-15 -0.16932E-14 -50.000
TOTAL VALUES
      VALUE  0.0000 -5.0000  0.0000  0.23203E-15 -0.16932E-14 -50.000
  
```

Right Window (PRNLD Command):

```

PRINT SUMMED NODAL LOADS
***** POST1 SUMMED TOTAL NODAL LOADS LISTING *****
LOAD STEP= 1 SUBSTEP= 1
TIME= 1.0000 LOAD CASE= 0
THE FOLLOWING X,Y,Z SOLUTIONS ARE IN THE GLOBAL COORDINATE SYSTEM
      NODE   FX      FY      FZ      MX      MY      MZ
      1     5.0000 -5.0000  0.0000 -0.23203E-15 -0.16932E-14  50.000
      2    -5.0000  0.0000  0.0000  0.23203E-15 -0.16932E-14 -50.000
      3     0.0000  0.0000  0.0000 -0.37626E-15 -0.37626E-15 -0.37626E-15
      4     0.0000  0.0000  0.0000 -0.37626E-15 -0.37626E-15 -0.37626E-15
      5     0.0000  0.0000  0.0000 -0.37626E-15 -0.37626E-15 -0.37626E-15
TOTAL VALUES
      VALUE  0.0000  0.13767E-12  0.0000 -0.63602E-29  0.0000  50.000
  
```

Abbildung4-11: Auflistung von Reaktionskräften (links) und Knotenkräften (rechts)

Will man in einer Auflistung von Knoten, die Reihenfolge der aufgelisteten Knoten nicht nach Knotennummer sondern einem Ergebniswert ordnen, kann dies über

General Postproc – List Results – Sorted Listing – Sort Nodes

erreicht werden.

5 Übungsbeispiele

5.1 Beispiel 1: Balkenbiegung

Ein Modell eines Biegebalkens lässt sich mit ANSYS auf unterschiedliche Weise, je nach gewünschtem Detaillierungsgrad erstellen. Im Nachfolgenden sind hierfür vier Beispiele genannt:

- Balkenmodell unter Angabe der Querschnittsfläche und der Flächenträgheitsmomente
- Balkenmodell unter Verwendung von Querschnitts- „Sections“
- Schalenmodell
- Volumenmodell

Diese Beispiele werden in den folgenden Unterkapiteln näher betrachtet, sowie miteinander und mit den Handrechnungen, siehe Kapitel 2.3, verglichen.

Alle 4 Modellierungsarten sind mit einer Schritt für Schritt Anleitung zur Erstellung der Modelle mit der ANSYS GUI beschrieben. Die Modellierung mit Inputfiles wird im Anhang beschrieben. In allen Fällen soll der bereits zuvor vorgestellte Biegebalken modelliert werden, Abbildung5-1, bzw. Tabelle 5-1.

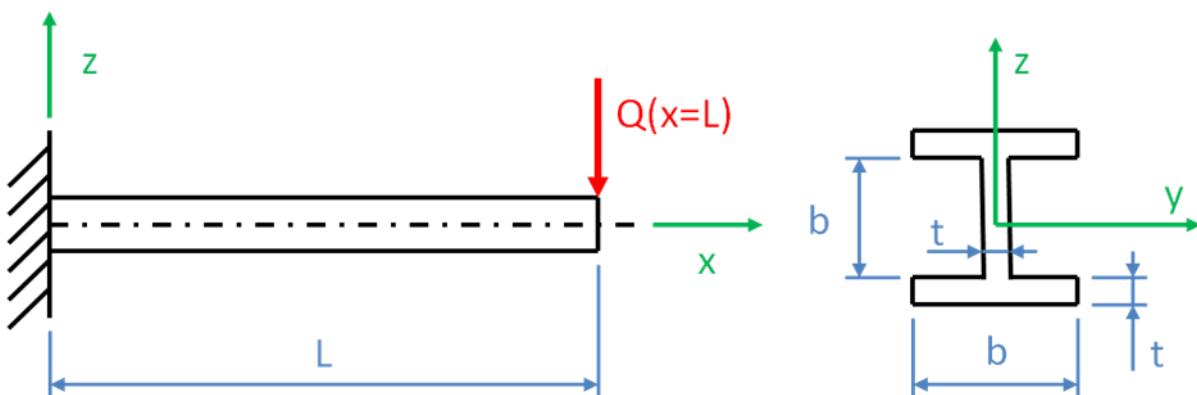


Abbildung5-1: Einseitig fest eingespannter Balken, belastet mit einer Querkraft

Tabelle 5-1: Zusammenfassung Balkenparameter

Balkenparameter	Einheit	Wert
Q (x=L)	N	1000
L	mm	1000
b	mm	100
t	mm	5
Material	-	Aluminium

5.1.1 Balkenmodell unter Angabe der Querschnittsfläche und der Flächenträgheitsmomente

Ein sehr einfaches Balkenmodell lässt sich mit dem „beam4“ Element in ANSYS realisieren. Hierbei handelt es sich um ein 3-D Balkenelement mit 3 translatorischen (u_x , u_y , u_z), sowie 3 rotatorischen (rot_x, rot_y, rot_z) Freiheitgraden je Knoten, siehe Abbildung5-2.

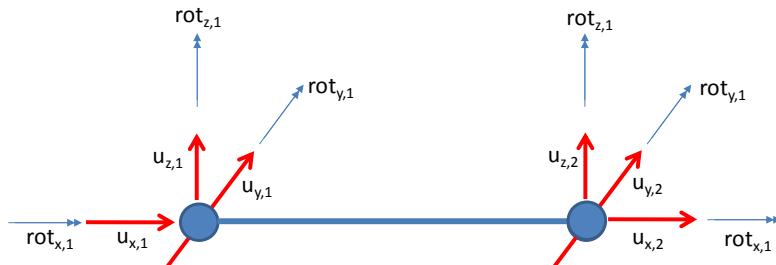


Abbildung5-2: Balkenmodell 1: Freiheitsgrade „beam4“ Balkenelement

Dieses Balkenelement erwartet folgende Eingabeparameter / Elementattribute:

- Querschnittsfläche des Balkens
- Flächenträgheitsmomente des Balkens
- Werkstoffkennwerte

5.1.1.1 Preprocessing

Erstellen der Balkengeometrie

Die Geometrie soll in diesem Modell durch Geometriepunkte, sogenannte Keypoints (KP), und Linien erstellt werden, siehe Abbildung5-3. Dazu zunächst über

Preprocessor – Modeling – Create – Keypoints – In Active CS

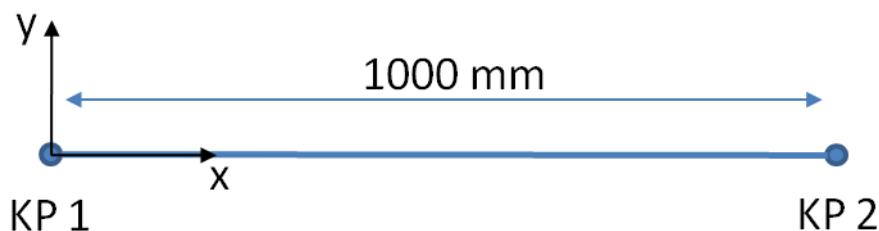


Abbildung5-3: Balkenmodell 1: Geometriemodell

2 KP's mit den Koordinaten KP 1 (0,0,0) und KP 2 (1000,0,0) erstellen:

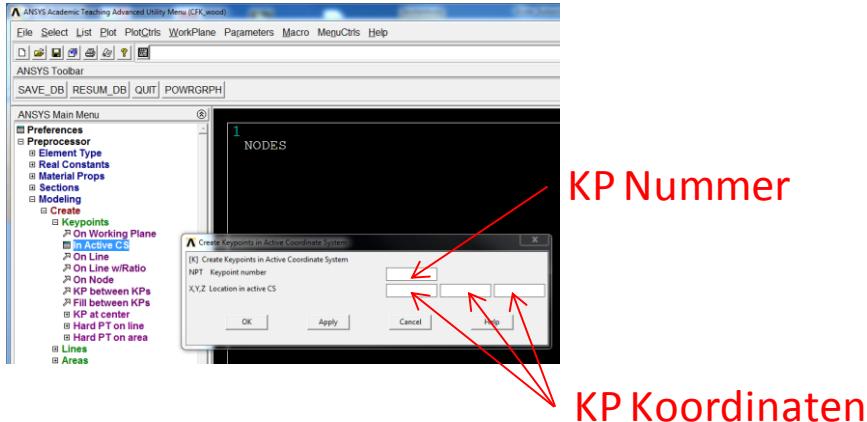


Abbildung5-4: Balkenmodell 1: Keypoints (KP) erstellen

Sind beide KP's erzeugt, können diese über den Befehl

Plot – Keypoints – Keypoints

aus der Menüleiste angezeigt werden. Zur Überprüfung der richtigen Nummerierung der KP's

PlotCtrls – Numbering – Keypoints

aus der Menüleiste auswählen. Sind beide KP's richtig erzeugt kann eine Linie zwischen den beiden über

Preprocessor – Modeling – Create – Lines – Line – Straight Line

und anklicken der beiden KP's erstellt werden:

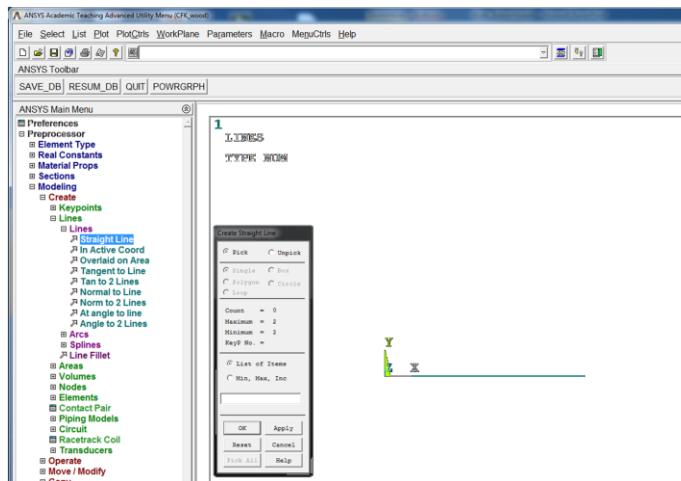


Abbildung5-5: Balkenmodell 1: Linien (L) erstellen

Über den Befehl

Plot – Lines

aus der Menüleiste kann die erstellte Linie angezeigt werden.

Definition der Elementtypen

Als nächster Schritt im *Preprocessing* müssen nun Elementtyp und die notwendigen Element – und Materialeigenschaften definiert werden. Dazu über

Preprocessor – Elementtyp – Add/Edit/Delete

einen neuen Elementtyp anlegen und anschließend aus der linken Spalte *Beam* und danach aus der rechten Spalte *3D elastic 4* wählen.

Anmerkung: Ab ANSYS 13.0 ist der Elementtype Beam4 nicht mehr direkt verfügbar. Die Berechnung kann aber auch mit dem Elementtype Beam 188 durchgeführt werden oder über die Eingabe et,1,4 der BEAM 4 definiert werden.

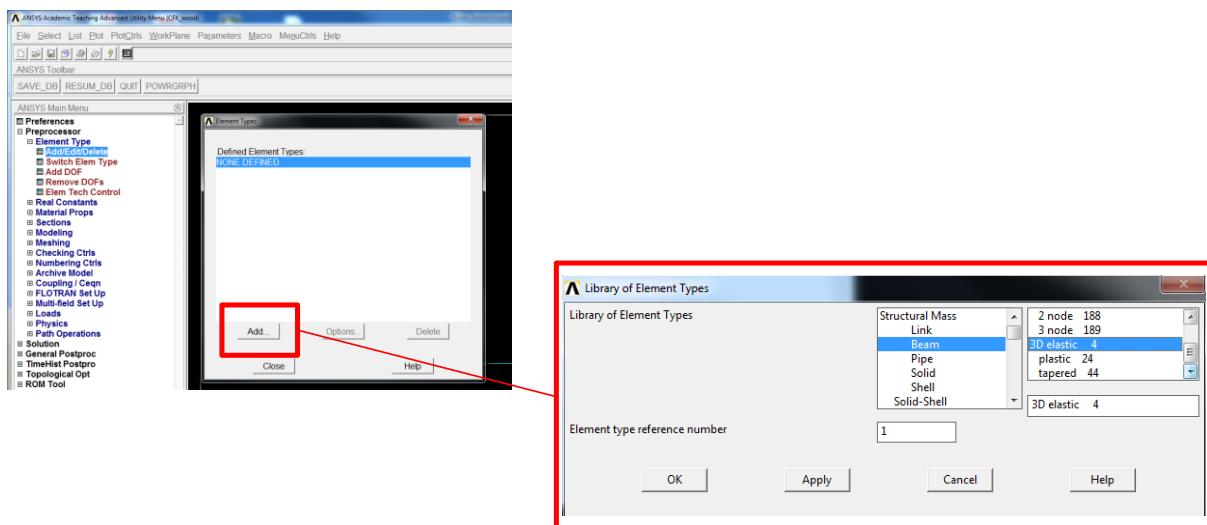


Abbildung5-6: Balkenmodell 1: Elementtypdefinition (ET)

Somit ist *Beam4* als Elementtyp (Elementtyp #1) angelegt.

Geometriezusatzinformationen

Für ein beam4 Element müssen nun die Geometriezusatzinformationen als sog. *Realconstants* definiert werden. Im statischen Fall beschränken sich diese auf die Angabe der Querschnittswerte des Balkens. Dazu über

Preprocessor – Real Constants – Add/Edit/Delete

Ein neues „*Real ConstantSet*“ anlegen. Hier den bereits angelegten Elementtyp *Beam4* auswählen und im nächsten Fenster die notwendigen Werte eintragen, siehe Abbildung5-7. Zu den in diesem Fall notwendigen Werten zählen *AREA*, *IZZ*, *IYY*, *TKZ*, *TKY*.

- AREA: Querschnittsfläche
- IYY: Flächenträgheitsmoment um die y-Achse
- IZZ: Flächenträgheitsmoment um die z-Achse
(für die Berechnung mit einachsiger Belastung unwichtig, jedoch von ANSYS gefordert; kann theoretisch auf 1 gesetzt werden)
- TKZ: äußeres Abmaß des Querschnitts entlang der z – Achse
- TKY: äußeres Abmaß des Querschnitts entlang der y – Achse

(TKZ und TKY definieren Ersatzquerschnitte zum Berechnen von Spannungen)

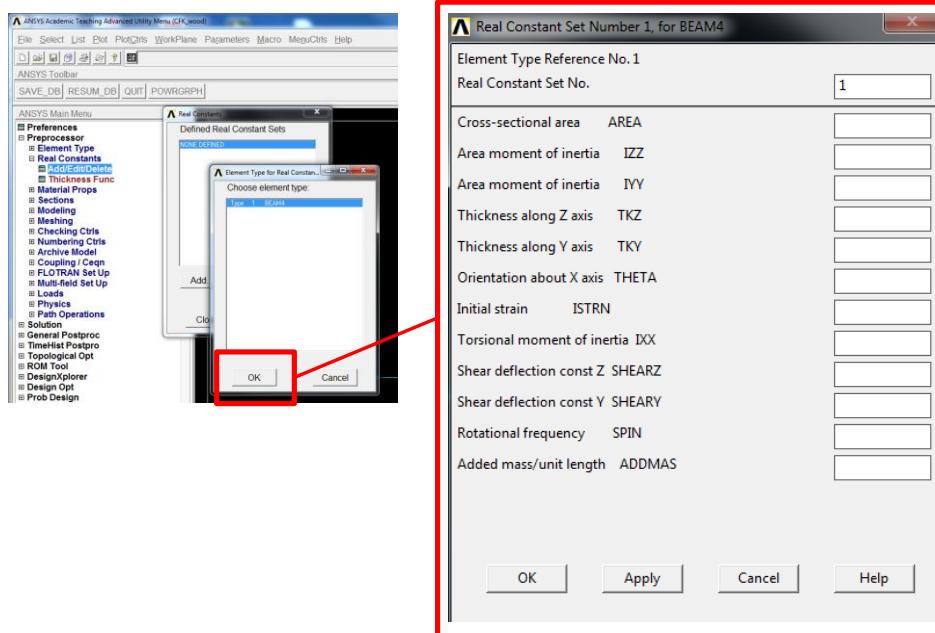


Abbildung5-7: Balkenmodell 1: Geometriezusatzinformationen / Real Constants

Definition eines Materialmodells

Zur vollständigen Beschreibung der Elementeigenschaften müssen nun noch die Materialeigenschaften definiert werden. In diesem Modell soll als Material Aluminium verwendet werden ($E=70.000 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$).

Hierzu über

Preprocessor – Material Props – Material Model

ein neues Materialmodell anlegen.

Unter den verfügbaren Materialmodellen in ANSYS kann aus einer Liste u.a. ein linear isotropes Materialmodell ausgewählt werden, welches für metallische Werkstoffe wie Aluminium anwendbar ist. Für dessen Definition ist die Eingabe der Kennwerte E-Modul (*EX*) und Querkontraktionszahl (*PRXY*) erforderlich.

Structural – Linear – Elastic – Isotropic

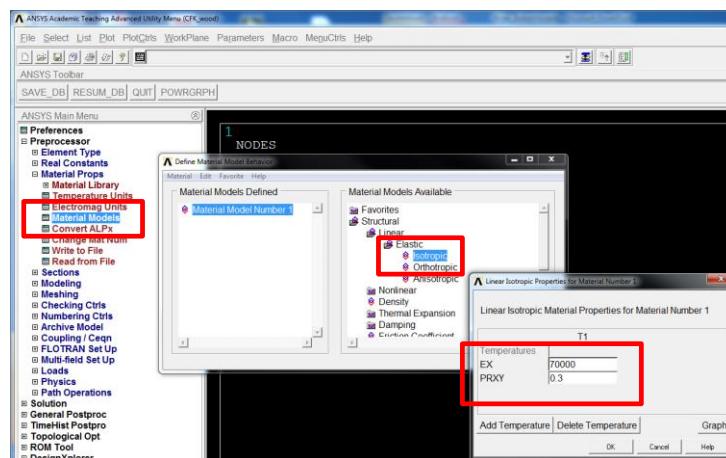


Abbildung 5-8: Balkenmodell 1: Materialmodelldefinition

Vernetzen der Geometrie

Als letzter Schritt im Preprocessor steht die Vernetzung der Geometrie an. In diesem Fall soll nun die erstellte Linie durch eine bestimmte Anzahl von Beam4 Elementen diskretisiert werden. Um einen direkten Vergleich mit der vorgestellten FE – Handrechnung zu ermöglichen sollen auch hier vier Elemente (fünf Knoten) über die Balkenlänge verwendet werden. Hierfür zunächst über

Preprocessor – Meshing – SizeCntrls – ManualSize – Lines – Picked Lines

die Linie auswählen und in vier gleichlange Stücke unterteilen. Hierfür im Feld **NDIV** (number of divisions) den Wert 4 eintragen:

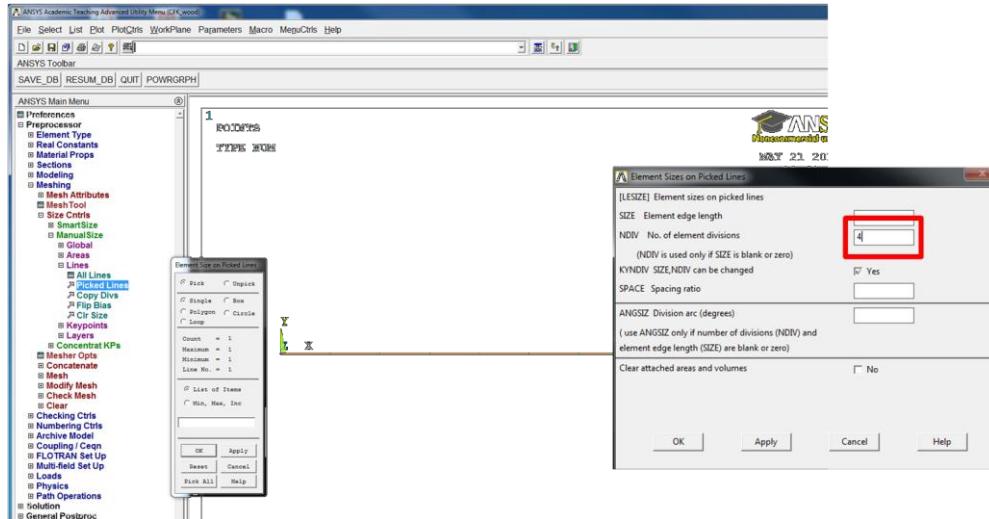


Abbildung5-9: Balkenmodell 1: Definition der Vernetzungsfeinheit

Eine weitere Möglichkeit würde hier die Angabe der Elementlänge anstelle der Anzahl der Elemente entlang der Linie bieten. Hierzu müsste im Feld **SIZE** der Wert 250 (1000mm / 4) eingetragen werden.

Bevor der eigentliche Schritt der Vernetzung folgt, müssen noch die entsprechenden Elementattribute (Elementtyp, Real Constants, Material,...) der zu vernetzenden Geometriekomponente zugewiesen werden. In diesem Fall muss nun der Linie der Elementtyp 1, das Material 1 sowie das Real Constants Set 1 zugewiesen werden.

Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – Picked Lines

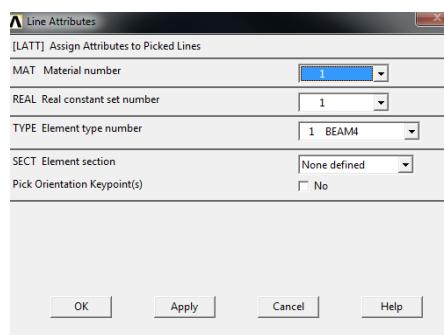


Abbildung5-10: Balkenmodell 1: Zuweisen von Elementattributen

Danach kann über

Preprocessor – Meshing – Mesh – Lines

die Linie selektiert und vernetzt werden.

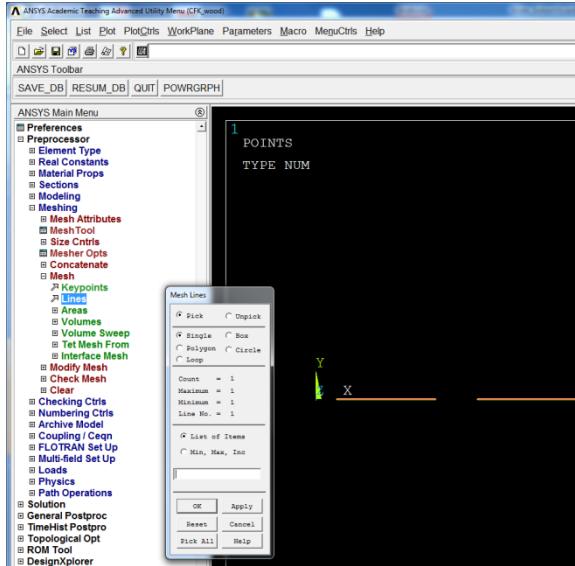


Abbildung 5-11: Balkenmodell 1: Vernetzen der Geometrie

In einem komplexeren Modell:

Anstatt in diesem Schritt alle Geometrieelemente einzeln zu vernetzen, bietet es sich oftmals an alle Geometrieelemente gleichzeitig zu vernetzen. Hierzu ist es aber zwingend erforderlich, dass alle Elementattribute vor der Vernetzung bereits sauber zugewiesen sind. Eine nachträgliche Modifikation ist möglich jedoch deutlich aufwändiger als eine Zuweisung im Vorhinein. Zur Kontrolle der durchgeföhrten Aktionen kann man sich mit Hilfe des Befehls

Plot

aus der Menüleiste Elemente oder Knoten anzeigen lassen. Dabei sollten nun 5 Knoten erzeugt worden sein. Zur besseren graphischen Darstellung der Elemente (jetzt nur als Linie zu erkennen) kann über

PlotCtrls – Style – Size and Shape

der Wert im Feld **SCALE** auf 1 gesetzt werden um sich die tatsächlichen Abmaße der Elemente anzeigen zu lassen. Da wir in den Real Constants keine Angaben über die genaue Form der Querschnittsgeometrie, außer den äußersten Abmaßen, machen konnten, werden die Elemente hier mit einem Rechtecksquerschnitt (Ersatzquerschnitt) dargestellt.

5.1.1.2 Solution

Aufbringen der Randbedingungen und Lasten

Im Schritt der *Solution* werden nun die Randbedingungen und Lasten am Modell definiert. Zunächst soll die feste Einspannung am linken Balkenende modelliert werden. Dazu werden alle Freiheitsgrade (*Degrees of Freedom: DOFs*) am Knoten des linken Balkenendes gesperrt, um somit die dortige feste Einspannung abzubilden. Über

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes

den entsprechenden Knoten durch klicken auf das linke Balkenende selektieren:

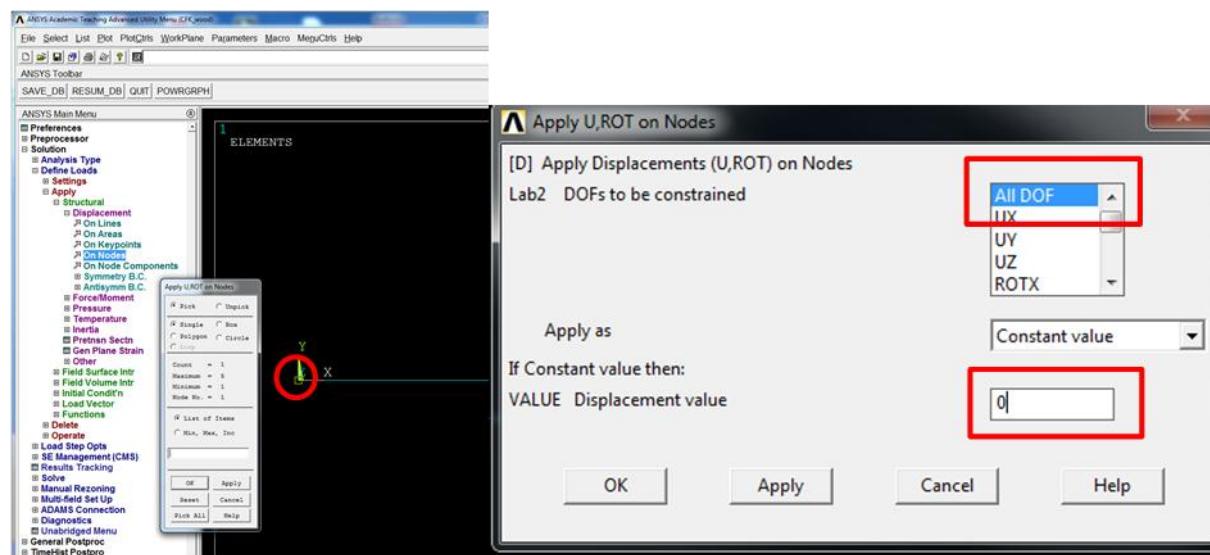


Abbildung 5-12: Balkenmodell 1: Definition der Randbedingungen

Danach aus der Liste „*Lab2 DOFs to be constrained*“ „*ALL DOF*“ wählen und im Feld *VALUE=0* eintragen. Somit ist der Wert aller Verschiebungen an diesem Knoten gleich Null gesetzt, was einer festen Einspannung entspricht. Mit dieser Methode lassen sich außerdem auch Zwangsverschiebungen modellieren. Hierfür muss *VALUE* ungleich Null sein.

Zum Aufbringen der Last am anderen Balkenende über

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moment – On Nodes

den Knoten am rechten Balkenende selektieren und die benötigte Kraft eintragen. Dies geschieht durch Auswahl der Belastungsrichtung („*Lab Direction of force/moment*“), hier *FZ* auswählen, und durch Angabe des Wertes, hier *VALUE=1000* angeben. Somit wird eine Kraft in z – Richtung mit 1000N auf den selektierten Knoten aufgebracht.

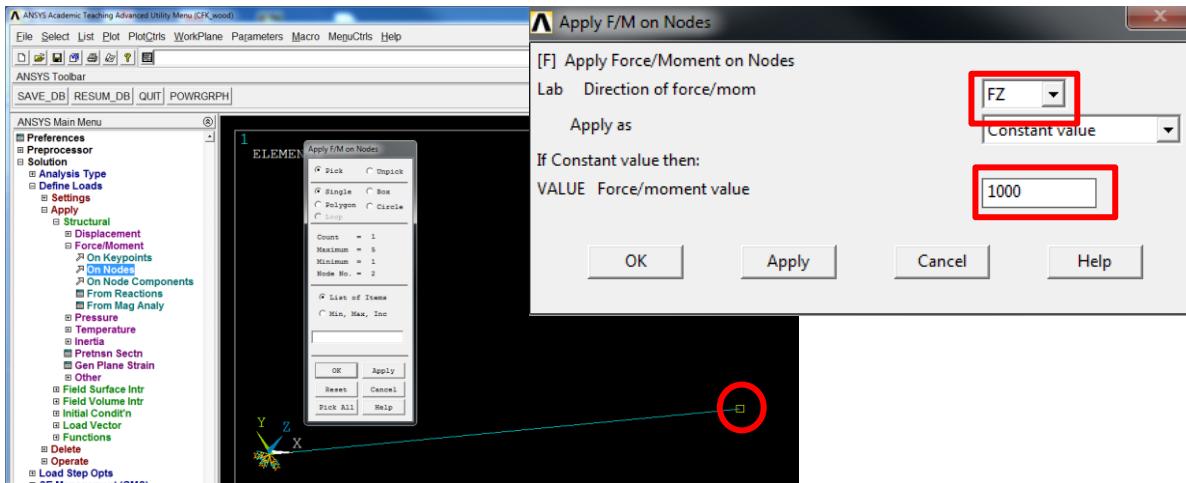


Abbildung5-13: Balkenmodell 1: Definition der Lasten

Das Modell sollte anschließend folgendermaßen aussehen. Eventuell muss die Ansicht über die Graphikleiste angepasst werden um die Darstellung des Modells in der xz – Ebene zu erhalten.

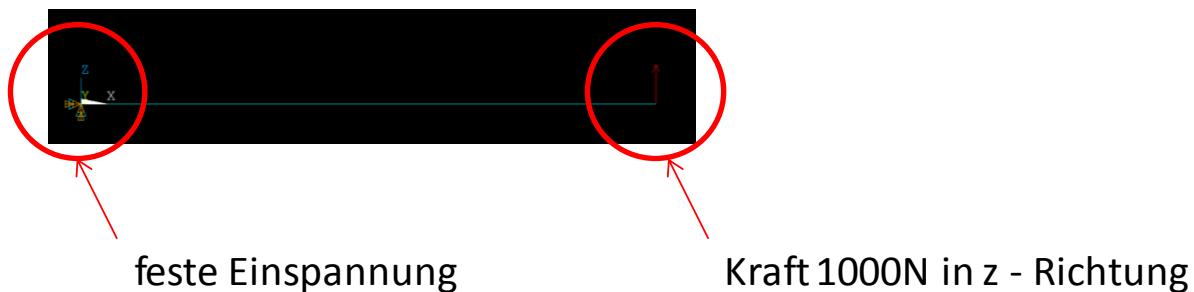


Abbildung5-14: Balkenmodell 1: fertiges Modell

Achtung:

Randbedingungen und Lasten werden Grundsätzlich im Elementkoordinatensystem aufgebracht. Dies muss nicht unbedingt mit dem globalen Koordinatensystem übereinstimmen.

Starten des Solvers

Als letzter Schritt der Solution Phase muss nun noch der Typ der Analyse angegeben werden. Da es sich hier um eine einfache statische Analyse handelt, über

Solution – Analysis Type – New Analysis

den Typ *Static* selektieren.

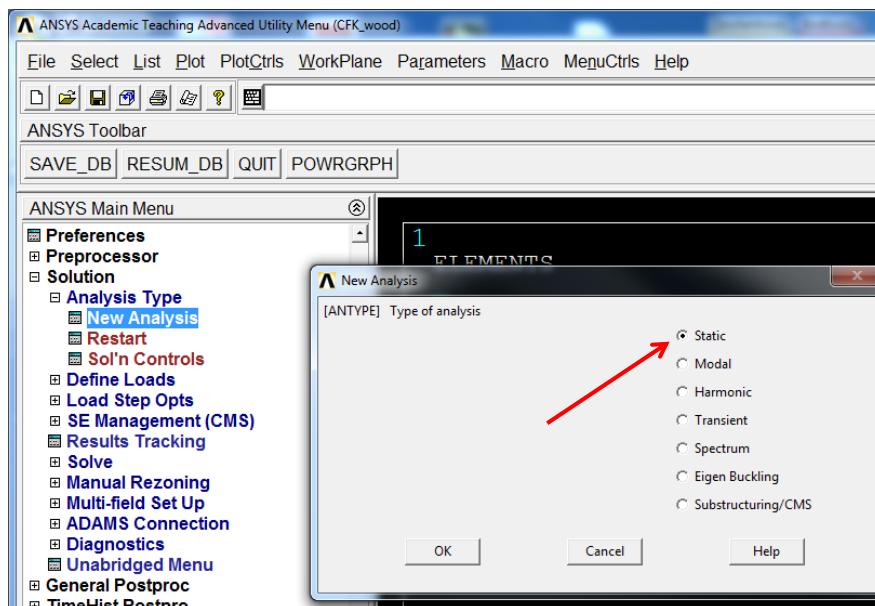


Abbildung5-15: Balkenmodell 1: Auswahl des Analysetyps

Ist dies geschehen, über

Solution – Solve – Current LS

die Analyse starten.

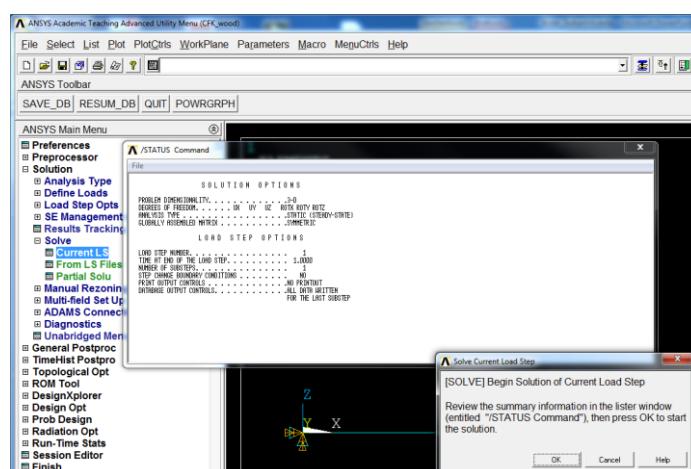


Abbildung5-16: Balkenmodell 1: Starten der Analyse

5.1.1.3 Postprozessor

Ist die Berechnung beendet, können die Ergebnisse in verschiedener Weise dargestellt oder ausgegeben werden. In diesem Fall sollen nun lediglich die Verschiebungen der Knoten in z – Richtung in Form eines sog. *Contour Plots*(graphische Darstellung der Ergebnisse) dargestellt werden. Über

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solu

und anschließender Auswahl der z – Component of Displacement können die Verschiebungen des Balkens in z – Richtung dargestellt werden. Mit den Optionen *Undisplaced Shape Key* und *Scale Faktor* kann die Anzeige des unverformten Modells eingeschaltet oder der Vergrößerungsfaktor der Verschiebungsdarstellung verändert werden.

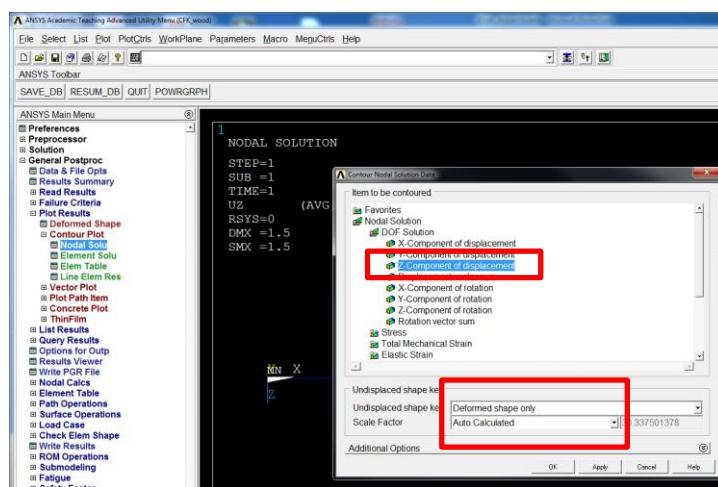


Abbildung5-17: Balkenmodell 1: Ergebnisdarstellung

Das Verschiebungsbild des Balkens in z – Richtung sollte dann folgendermaßen aussehen:

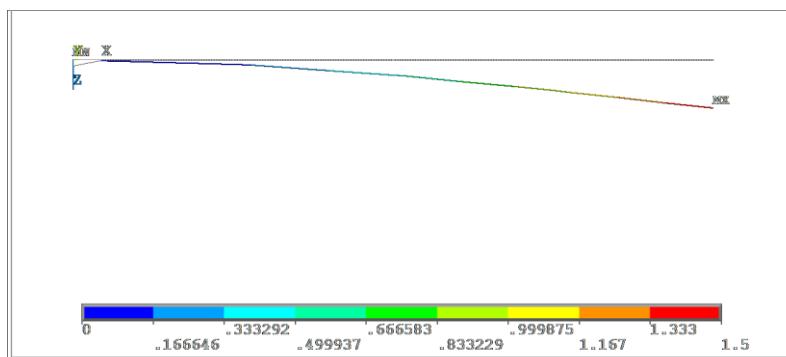


Abbildung5-18: Balkenmodell 1: Balkenverformung in z-Richtung

Zu erkennen ist darin die maximale Verformung des Balkens an der Stelle der Kraft $F(x=1000\text{mm})$ von 1.5mm in z – Richtung.

5.1.2 Balkenmodell unter Verwendung von Querschnitts- „Sections“

Alternativ zu dem einfachen Balkenmodell mit dem „beam4“ Element, lässt das Problem mit dem komplexeren „beam188“ Elementtypen modellieren. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein 3-D Balkenelement mit 3 translatorischen (ux, uy, uz) sowie 3 rotatorischen (rotx, roty, rotz) Freiheitgraden je Knoten und 2 Knoten pro Element. Alternativ kann auch das „beam189“ Element verwendet werden, welches 3 Knoten pro Element hat und dadurch besonders für gekrümmte Geometrien geeignet ist.

Im Gegensatz zum beam4 Element werden bei diesen Elementtypen die Querschnittsinformationen über die Modellierung der Querschnittsgeometrie angegeben, wodurch das Balkenmodell nicht mehr auf einen Ersatzquerschnitt reduziert wird. Dieses Balkenelement erwartet somit folgende Eingabeparameter / Elementattribute:

- Querschnittsgeometrie (Höhe, Breite, Wandstärke,...)
- Werkstoffkennwerte

5.1.2.1 Preprocessing

Geometrieerstellung

Da in diesem Modell die Geometrieerstellung aus dem vorherigen übernommen werden können, soll diese nicht weiter beschrieben werden.

Definition der Elementtypen

Zur Definition der Elementtypen über

Preprocessor – Elementtyp – Add/Edit/Delete

einen neuen Elementtyp anlegen und anschließend aus der linken Spalte *Beam* und danach aus der rechten Spalte „*2 node 188*“ wählen.

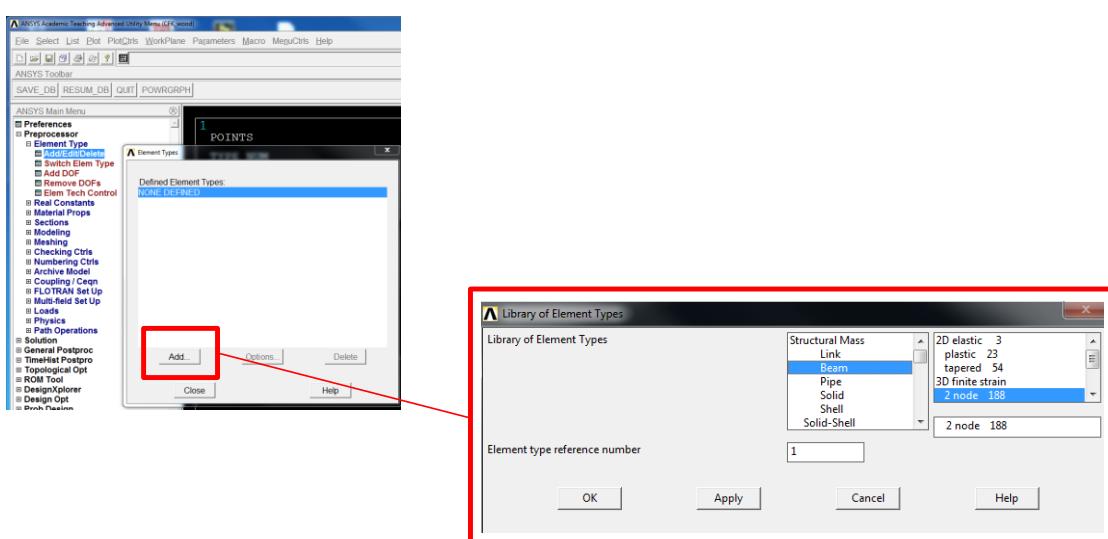


Abbildung 5-19: Balkenmodell 1: Definition der Elementtypen

Geometriezusatzinformationen

Anstatt der zuvor beschriebenen Definition eines *Real Constant Sets* erfordert dieser Elementtyp die Definition einer sogenannten *Section*. Damit bietet ANSYS die Möglichkeit eine genaue Definition der Querschnittsgeometrie an. Konnte zuvor lediglich eine Querschnittsfläche und die Flächenträgheitsmomente angegeben werden, so können hier die exakten, geometrischen Abmessungen wie Gurtbreite, Gurtdicke, Steghöhe, etc. des Querschnitts angegeben werden. Somit erübrigts sich die zuvor notwendige Berechnung des Flächenträgheitsmoments, da dies hier von ANSYS automatisch geschieht. Über

Preprocesoor – Sections – Beam – Common Sections

besteht die Möglichkeit einige Standardquerschnitte wie I, U, L, Kreis, usw. mit den charakteristischen Abmessungen zu definieren, siehe Abbildung5-20. Dazu im Feld *Name* der Section einen geeigneten Namen geben, sowie im Feld *Sub-Type* die gewünschte Querschnittsform auswählen. Anschließend die geforderten Maße für Gurte und Steg in die entsprechenden Felder eintragen

Durch Anklicken des Buttons *Meshview* kann der Querschnitt und dessen Diskretisierungsgrad angezeigt werden. Der Diskretisierungsgrad sollte so gewählt werden, dass 3 Unterteilungen über die Dicke existieren. Dieser Diskretisierungsgrad hat jedoch keinen Einfluss auf die spätere Vernetzung des Balkens als solches, ist jedoch für die Genauigkeit der Berechnung der Verschiebungen oder Spannungen im Querschnitt entscheidend. Im Gegensatz zum vorherigen Modell mit *Beam3* Elementen bietet das *Beam188* Element die Möglichkeit z.B. die Spannungen im Querschnitt besser abzubilden. Grund dafür ist, dass nun die genaue Geometrie des Querschnitts bekannt ist.

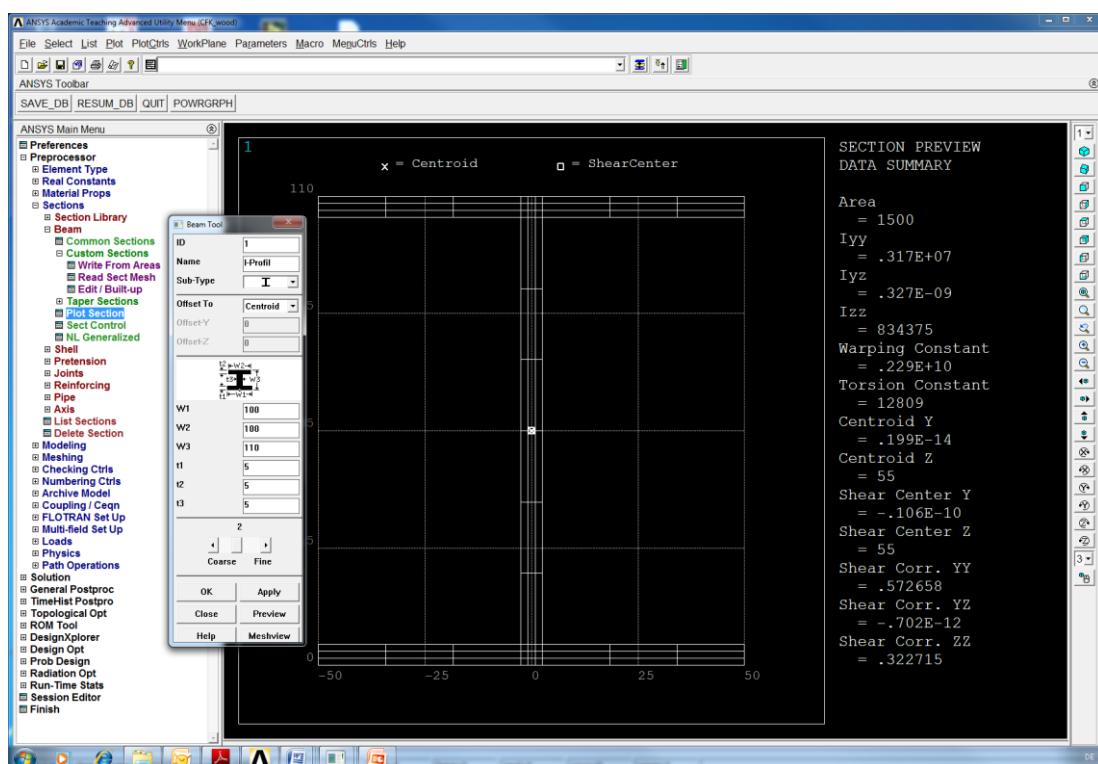


Abbildung5-20: Balkenmodell 2: Geometriezusatzinformationen / Sections

Die weiteren Schritte im Preprocessor sowie den folgenden Schritten Solution und Postprozessorsind denen aus Modell 1 identisch!

Modelldarstellung

Ist die Linie vernetzt kann auch hier über

PlotCtrls – Style – Size and Shape...

der Balken in seinen Abmessungen dargestellt werden.

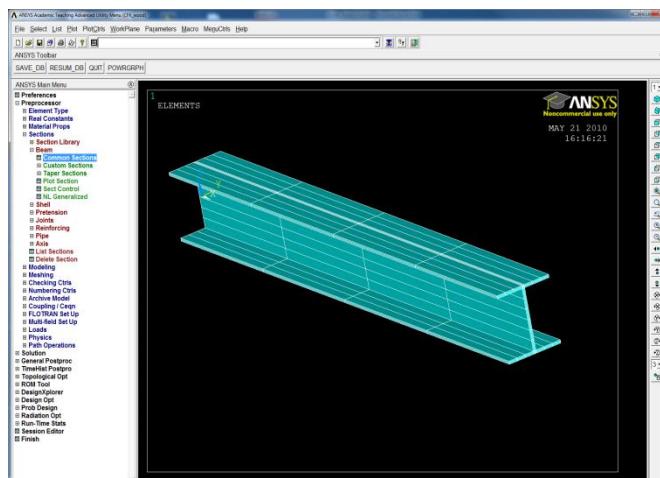


Abbildung5-21: Balkenmodell 2: fertiges Modell

5.1.2.2 Postprozessor

Lässt man sich die Verschiebungen des Balkens in z – Richtung anzeigen so erkennt man eine maximale Verschiebung in z – Richtung von 1.565mm.

General Postproc – Plot Results – ContourPlot – Nodal Solu ...

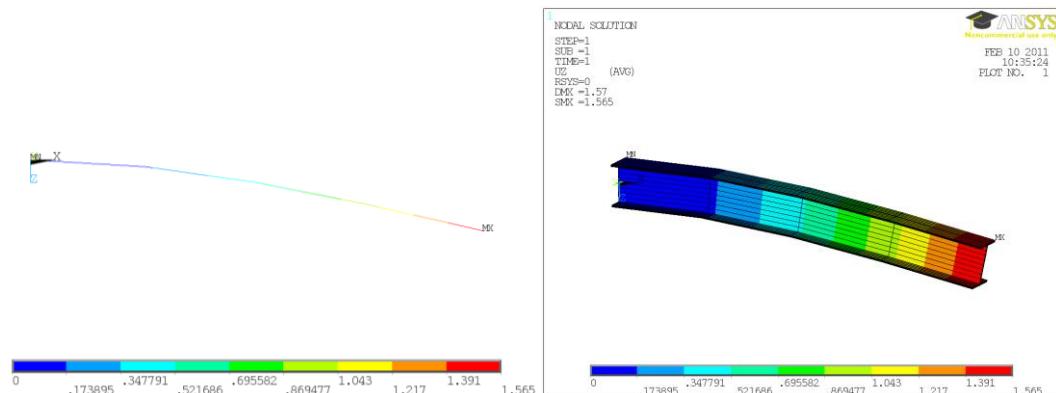


Abbildung5-22: Balkenmodell 2: Balkenverformung in z-Richtung

Die hier etwas genauere, maximale Verformung in z-Richtung ist $u_z=1,565$ mm

5.1.3 Modellierung des Balkens mit Schalenelementen

Ein komplexeres Balkenmodell lässt sich mit dem „shell181“ Schalenelement mit 4 Knoten in ANSYS realisieren. Hierbei handelt es sich um ein 3-D Schalenelement mit 3 translatorischen (ux , uy , uz) sowie 3 rotatorischen (rot_x , rot_y , rot_z) Freiheitgraden je Knoten:

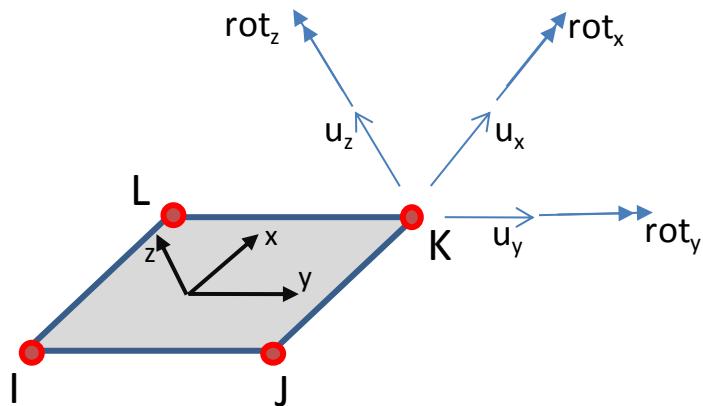


Abbildung 5-23: Balkenmodell 3: Freiheitsgrade „shell181“ Schalenelement

Dieses Schalenelement erwartet folgende Eingabeparameter / Elementattribute:

- Section oder Realconstant Set des Schalenelements zur Definition der Elementdicke
- Materialdaten

5.1.3.1 Preprocessing

Erstellen der Geometrieerstellung

In diesem Beispiel wird der Balken mit Schalenelementen modelliert. Hierzu soll die Geometrie des Balkens aus 5 einzelnen Mittelflächen (4x Gurt, 1x Steg) aufgebaut werden.

Erstellen der Keypoints

Die Erstellung der Flächen geschieht hierbei über Keypoints an den jeweiligen Ecken der 5 Flächen (siehe Skizze).

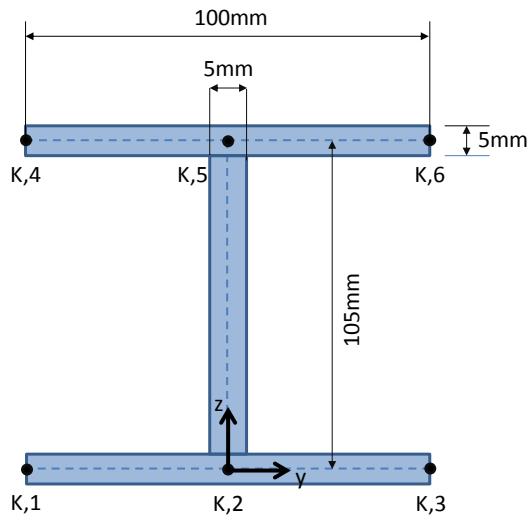


Abbildung 5-24: Balkenmodell 3: Skizze Keypoints für Schalenmodell

Als erster Schritt müssen die oben gezeigten Keypoints über den Bereits bekannten Befehl,

Preprocessor – Create – Keypoints – In Active CS

mit den entsprechenden Abständen zueinander, definiert werden. Die Lage des Koordinatenursprungs sowie die Orientierung des globalen Koordinatensystems in ANSYS kann dabei beliebig gewählt werden. Es empfiehlt sich jedoch die in der obigen Skizze gezeigte Position und Orientierung des Koordinatensystems zu verwenden.

Sind die Keypoints 1 – 6 erstellt, müssen diese um 1000mm in Balkenlängsrichtung (x-Richtung) verschoben und dupliziert werden. Somit können die Keypoints sowohl am Anfangs – als auch Endquerschnitt einfach generiert werden.

Dazu über

Preprocessor – Modelling – Copy – Keypoints

die Keypoints 1 - 6 auswählen und im *Feld Number of Copies* 2 sowie im Feld *X – offset* 1000 eintragen. Somit werden diese dupliziert und um 1000mm in x – Richtung verschoben.

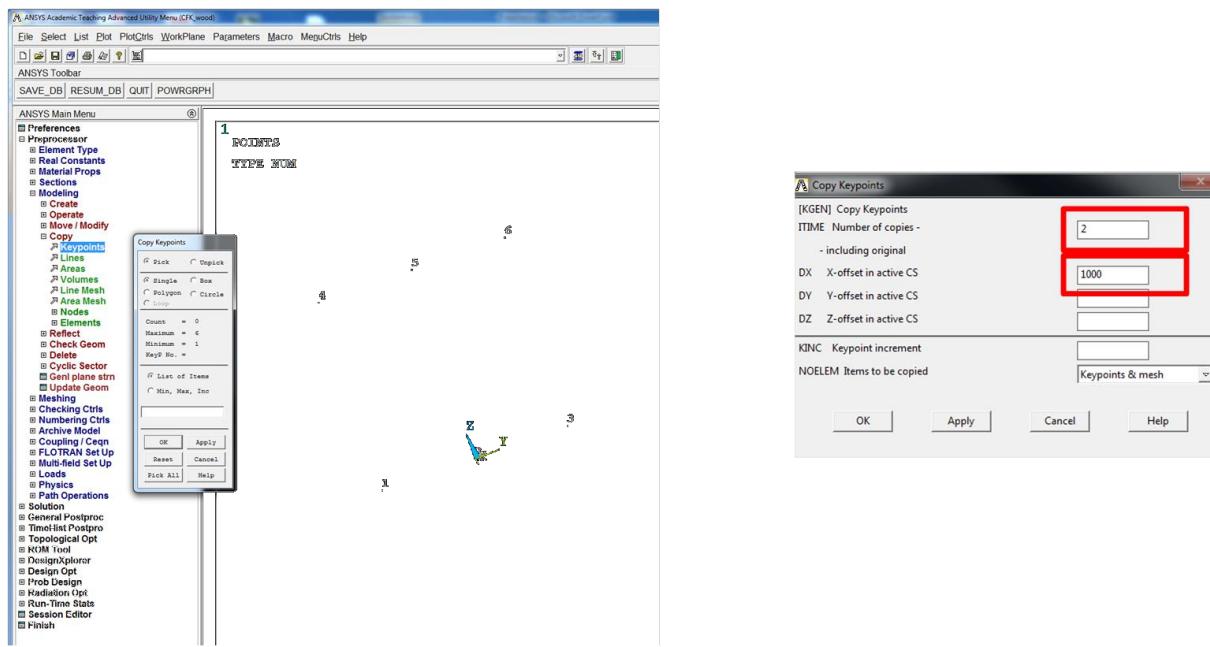


Abbildung5-25: Balkenmodell 3: Keypoints für Schalenmodell erzeugen

Ob die neuen Keypoints richtig erzeugt wurden kann über die Befehle

Plot – Keypoints oder *PlotCtrls – Numbering – Keypoints*

überprüft werden.

Erzeugen der Flächen

Aus den zuvor erzeugten Keypoints können anschließend über

Preprocessor – Modelling – Create – Areas – Arbitrary – Through KPs

die entsprechenden Flächen erzeugt werden. Dazu jeweils die 4 zu einer Fläche gehörenden Keypoints auswählen. Dabei ist auf die Reihenfolge der Auswahl zu achten. Die Auswahl muss derart geschehen, dass sich die zwischen den Keypoints ergebenden Linien nicht schneiden.

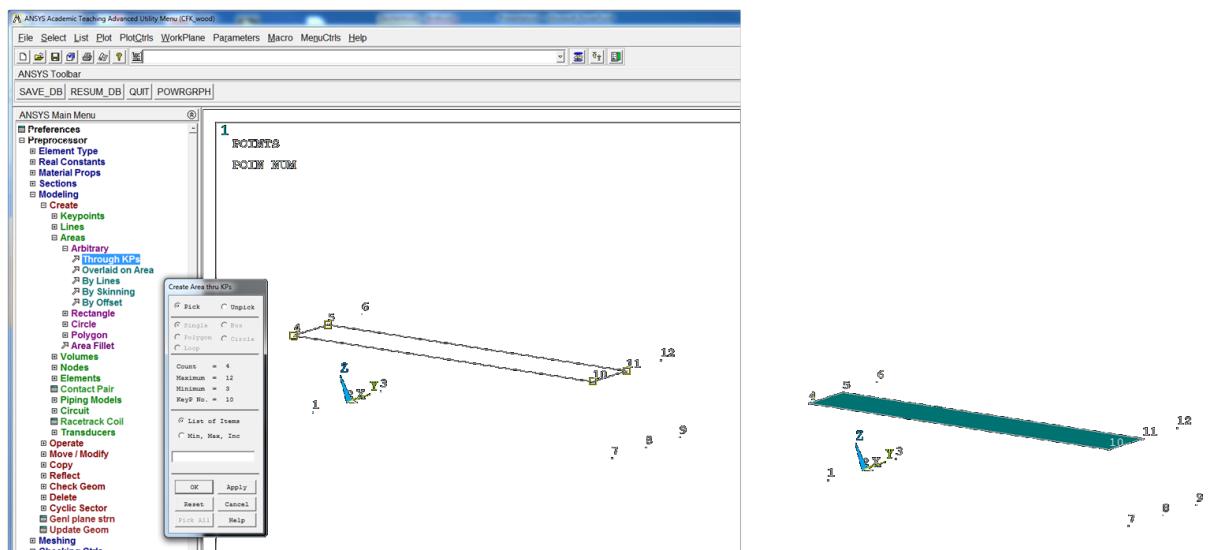


Abbildung5-26: Balkenmodell 3: Flächen erzeugen

Diesen Vorgang für alle 5 Flächen wiederholen.

Die fertige Geometrie sollte danach folgendermaßen aussehen:

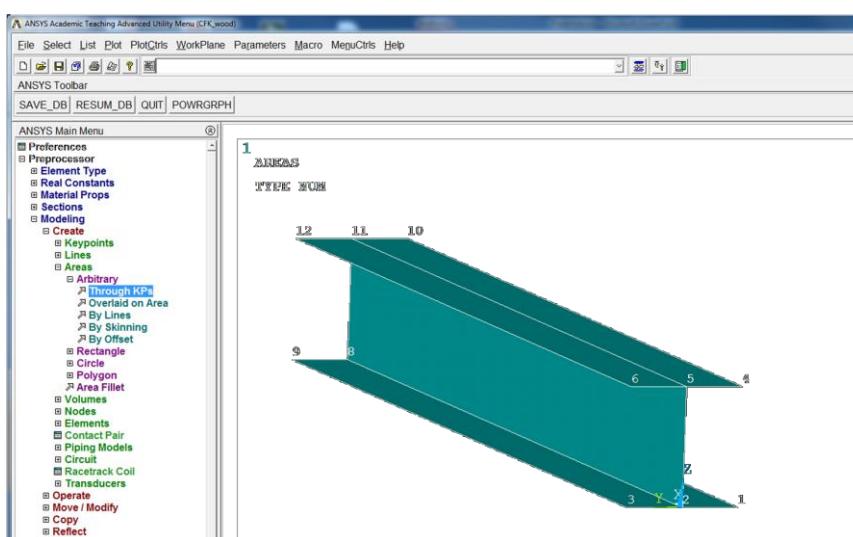


Abbildung5-27: Balkenmodell 3: Fertige Geometrie

Sind die Einzelflächen erstellt, müssen diese im nächsten Schritt miteinander verbunden werden. Somit werden doppelte Linien, z.B. an den Stößen zwischen Steg und Gurt verhindert und die Flächen teilen sich an dieser Stelle eine gemeinsame Linie. Dies ist vor allem zur späteren Steuerung der Elementgrößen bei der Vernetzung wichtig. Dazu über

Preprocessor – Modeling – Operate – Booleans – Glue – Areas

alle Flächen des Balkens selektieren.

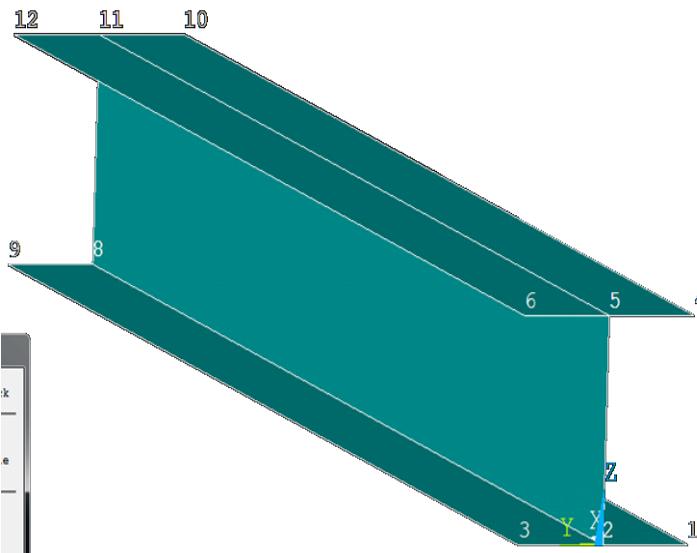


Abbildung5-28: Balkenmodell 3: Alle Flächen selektieren

Ob die Flächen richtig miteinander verbunden wurden und keine doppelten Linien mehr existieren, kann durch die Anzeige der Liniennummern überprüft werden. Es sollte dabei an jeder Linie nur eine Nummer angezeigt werden.

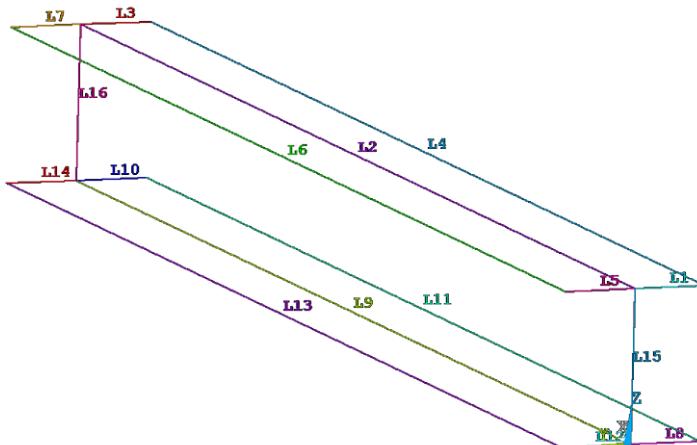


Abbildung5-29: Balkenmodell 3: Linienummerierung

Definition des Elementtyps

Zur Definition des Elementtyps wie in den Beispielen zuvor über

Preprocessor – Elementtype – Add/Edit/Delete

den Elementtyp *Shell – Hyper 4node 181* anlegen

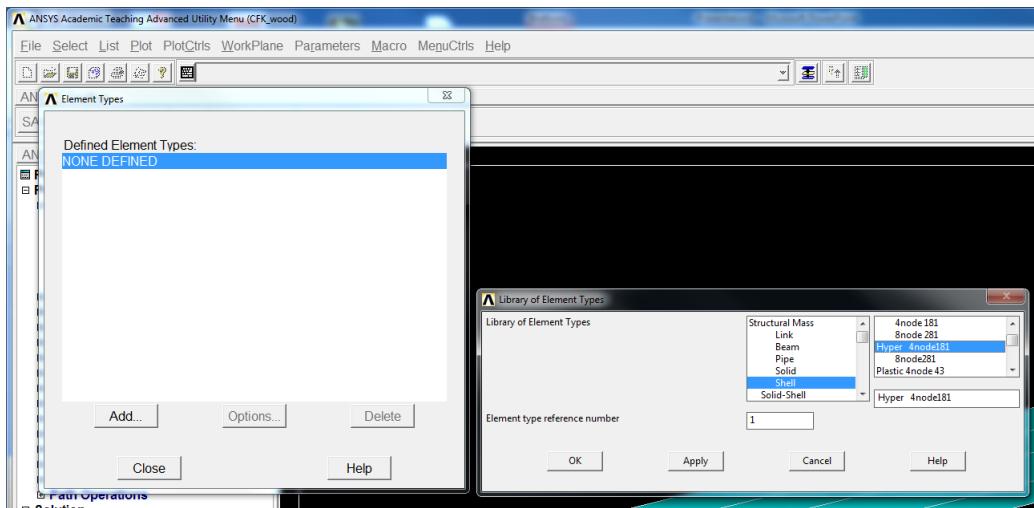


Abbildung5-30: Balkenmodell 3: Elementtyp selektieren

Definition der Materialeigenschaften

Auch hier die Materialeigenschaften wie zuvor (Beispiel 1) beschrieben für Aluminium definieren.

Definition der Section

Als letztes Elementattribut noch die *Section* definieren. Dies geschieht ähnlich wie in Beispiel 1 über

Preprocessor – Sections – Shell – Lay-up – Add Edit

Darin die Dicke der Elemente (*Thickness*), das Material (*Material ID*) sowie den Section Namen (*Name*) angeben.

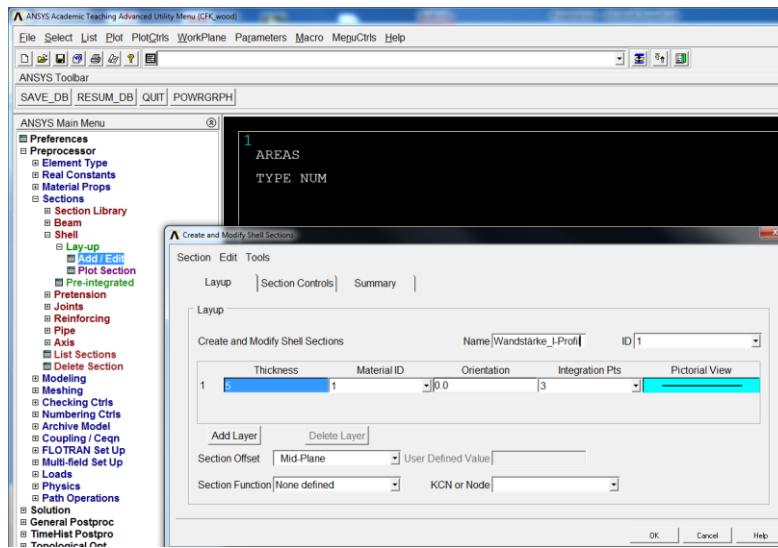


Abbildung5-31: Balkenmodell 3: Shellsection erstellen

Vernetzen der Geometrie

Zur Steuerung der Vernetzung bietet ANSYS verschiedene Möglichkeiten. Zum einen kann die Anzahl der Elemente entlang einer Linie definiert (siehe 1. Beispiel) werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit eine bestimmte maximale Elementgröße (Kantenlänge des Elements) zu definieren. In diesem Beispiel soll nun eine bestimmte, maximale Elementgröße definiert werden.

Um in diesem Beispiel zunächst auch 4 Elemente über die Balkenlänge zu generieren muss über

Preprocessor – Meshing – Size Control – Manual Size – Areas – All Areas

Eine maximale Elementgröße von 250mm (1000mm / 4) festlegen.

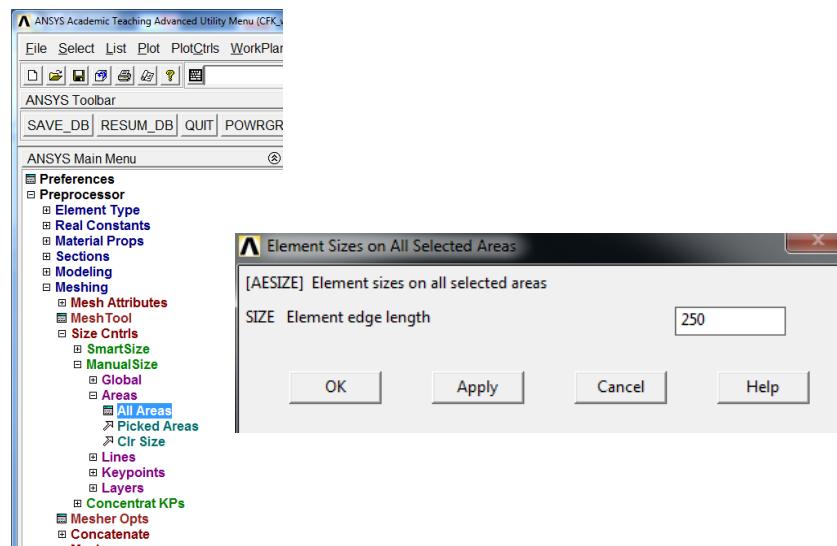


Abbildung5-32: Balkenmodell 3: Elementgröße definieren

Danach kann über den Befehl

Preprocessor – Meshing – Mesh – Areas – Free

und die Auswahl aller Flächen die Vernetzung gestartete werden.

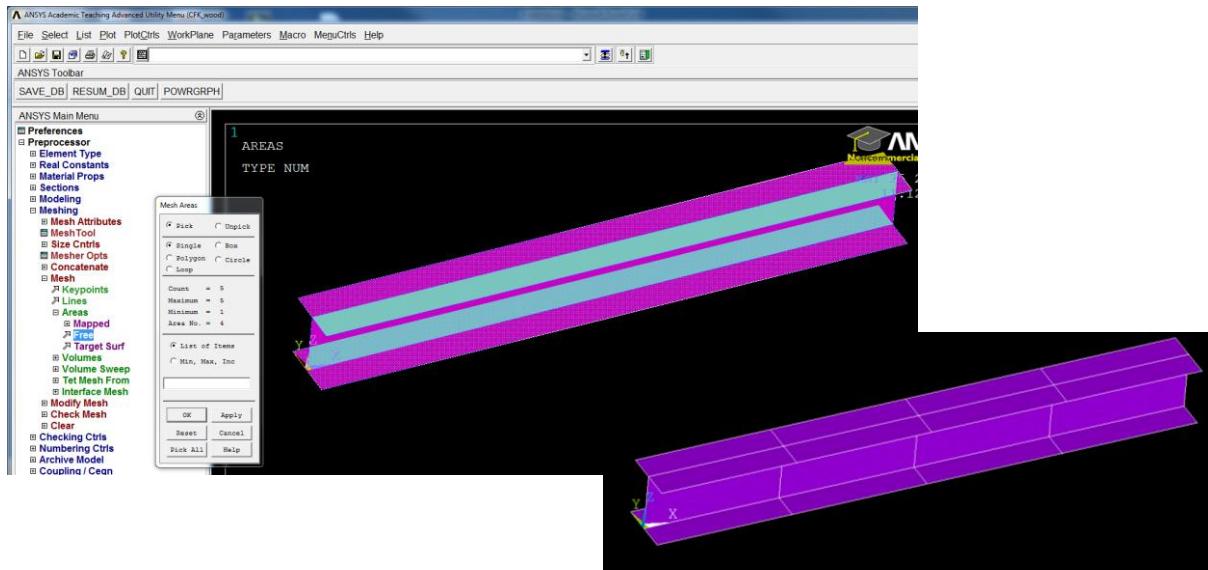


Abbildung5-33: Balkenmodell 3: Vernetzen

5.1.3.2 Solution

Aufbringen der Randbedingungen und Lasten

Feste Einspannung am Balkenende

Im Gegensatz zu den vorherigen Beispielen existieren nun 6 Knoten über den Balkenquerschnitt. Um auch in diesem Fall eine feste Einspannung des Balkens zu modellieren müssen alle Freiheitsgrade dieser Knoten gesperrt werden. Dazu wie in den ersten beiden Beispielen beschrieben über

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes

die sechs Knoten eines Balkenendes auswählen und alle Freiheitsgrade (*All DOF*) sperren. Somit wird der Balken an diesem Ende über den gesamten Querschnitt fest gelagert.

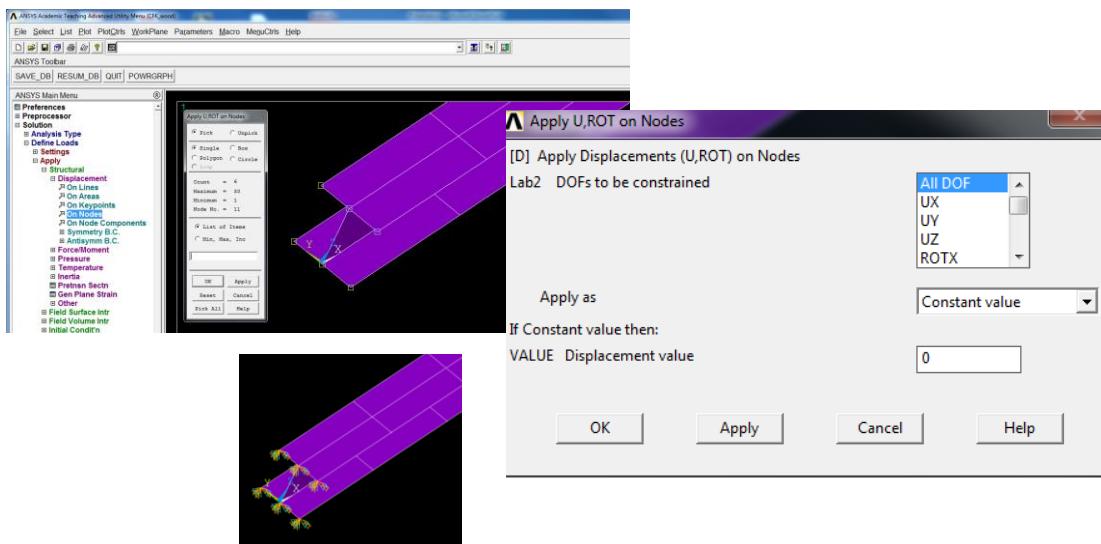


Abbildung5-34: Balkenmodell 3: Lagerung

Bei der Aufbringung der Kraft $F=1000\text{N}$ am anderen Balkenende ergeben sich nun im Gegensatz zu den Beispielen 1 und 2 verschiedene Möglichkeiten die Lasteinleitung zu modellieren. Die Kraft kann an dieser Stelle beispielsweise auf mehrere Knoten verteilt oder lokal auf einen Knoten aufgebracht werden. Somit sollte bei dieser Art der Balkenmodellierung darüber nachgedacht werden, wie die reale Lasteinleitung am besten modelliert werden kann. Im folgenden Beispiel wird die Kraft auf den Knoten an der Oberseite des Stegs aufgebracht. Dies geschieht wie bereits in Beispiel 1 und 2 beschrieben.

Solution – Define Loads – Structural – Force/Moment – On Nodes

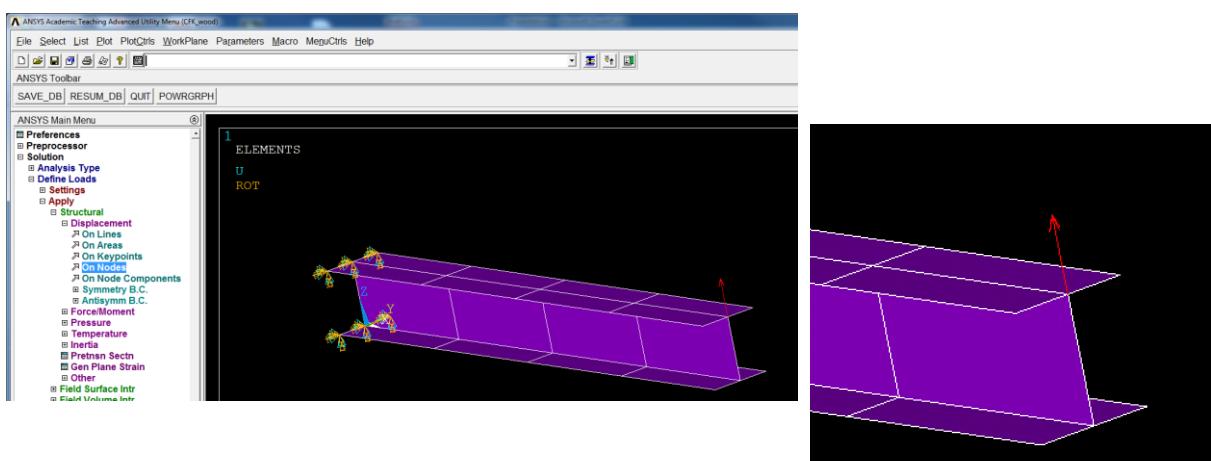


Abbildung5-35: Balkenmodell 3: Einzelkraft aufbringen

Anschließend kann über

Solution – Solve – Current LS

die Berechnung gestartet werden.

5.1.3.3 Postprocessing

Nachdem die Berechnung abgeschlossen ist, kann über

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solution

die Verschiebung des Balkens in z – Richtung dargestellt werden. Dabei erkennt man eine maximale Verschiebung von 1.766mm in z – Richtung am freien Balkenende. Vergleicht man diese Verschiebung mit den Ergebnissen der beiden vorherigen Balkenmodelle (ca. 1.5mm) so zeigt sich ein etwa 15% höherer Wert bei der Modellierung des Balkens mit Schalenelementen.

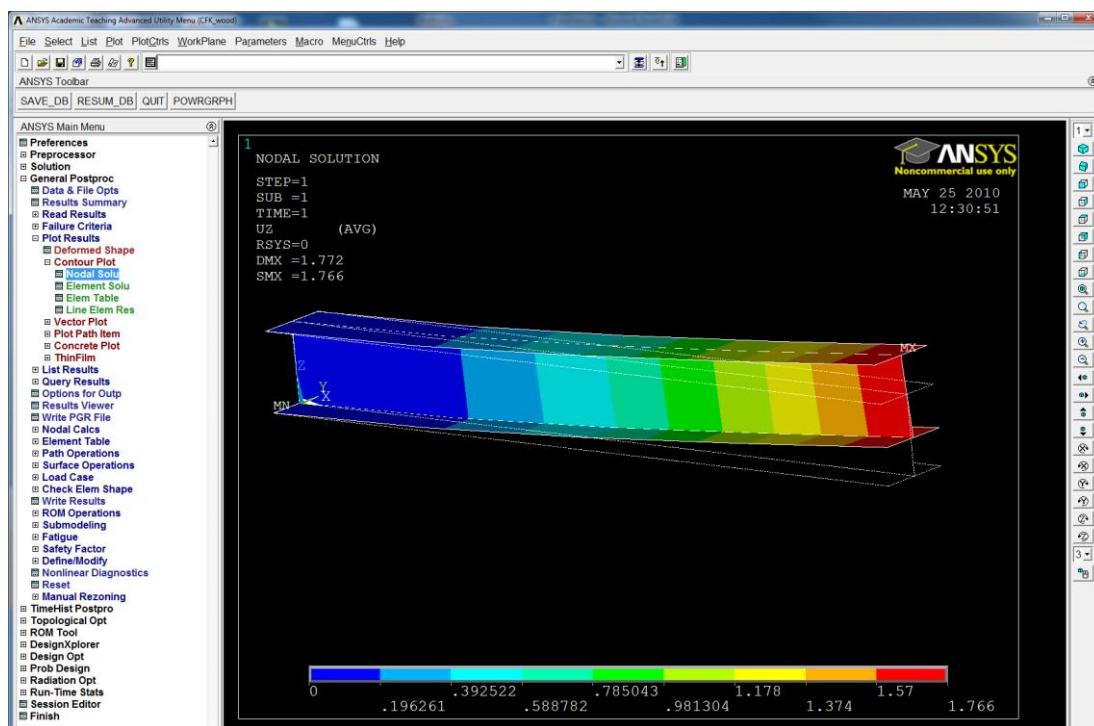


Abbildung5-36: Balkenmodell 3: Verformungen

Die große Abweichung der Verschiebung kann in diesem Fall durch die sehr grobe Diskretisierung des Balkens erklärt werden. Betrachtet man die Verschiebung dieses Knotens bei veränderlicher Elementgröße so zeigt sich eine deutliche Abnahme der maximalen Verschiebung bei feinerer Diskretisierung. Ein besonders deutlicher Unterschied der Verschiebung ist bei Elementgrößen im Bereich von 100mm zu erkennen. Grund dafür ist, dass ANSYS bei einer Elementgröße < 105mm den Steg mit 2 Elementen über dessen Höhe diskretisiert. Somit kann der Einfluss des Stegs auf die Biege – und Schubsteifigkeit des Balkens wesentlich besser abgebildet werden.

Konvergenztest

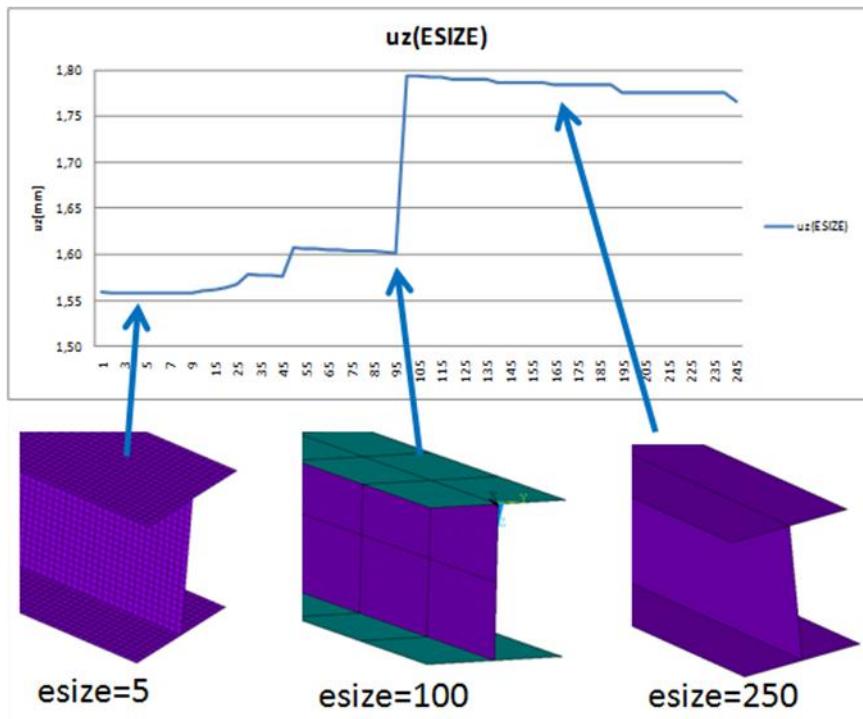


Abbildung5-37: Balkenmodell 3: Verschiebung in z – Richtung über Elementgröße

Alternative Lastaufbringung

Alternativ zu diesem Beispiel kann die Last auch „verschmiert“ auf alle Knoten der Stirnfläche aufgebracht werden, was allerdings auch zu lokalen Verformungen führt.

5.1.3.4 Verwendung der Pfad – Funktion

Ein sehr leistungsstarkes Werkzeug des Postprocessors ist das Erstellen von Pfaden. Durch einen Pfad können Schnitte, entlang von Knoten, durch das Bauteil realisiert werden. Der Pfad kann dabei beliebig geformt sein und die darstellbaren Ergebnisgrößen sind vielfältig. Zur Auswertung der Ergebnisse entlang eines Pfades muss zunächst der Pfad definiert werden (**PPATH**) und anschließend die Ergebnisgrößen entlang des Pfades interpoliert werden(**PDEF**). Die interpolierten Größen können dann in Form eines x-y Diagramms oder einer Tabelle dargestellt werden. Es besteht auch die Möglichkeit die Größen durch weitere, mathematische Operationen aufzubereiten z.B. (ableiten, integrieren).

Für den I - Profil Balken soll mit Hilfe der Pfad-Operation ein vertikaler Schnitt durch den Balken gelegt und der Verlauf der auftretenden Normalspannungen in x- Richtung über die Balkenhöhe in einem Diagramm dargestellt werden.

Zunächst muss der senkrechte Schnitt im Balken festgelegt werden.

General Postproc – Path Operations – Define Path – By Nodes

Zur Definition des Pfades muss an Ober- und Unterseite des Trägers ein Knoten selektiert werden, der Gurt und Steg schneidet. Die Verbindung der beiden Knoten sollte dann eine senkrechte zur Balkenlängsachse bilden (siehe Abbildung 5-38). Nach Eingabe des Pfadnamens wird der Pfad erstellt.

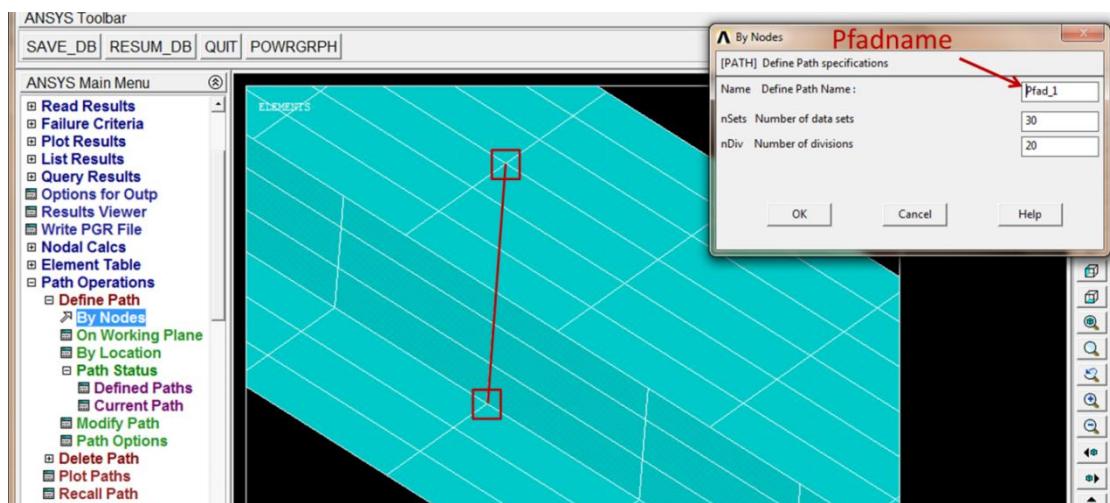


Abbildung 5-38: Anlegen eines Pfades

Um die Spannungen in einem Diagramm darstellen zu können müssen diese noch auf den Pfad projiziert bzw. interpoliert werden. Dazu müssen Pfadname und gewünschte Komponente eingegeben werden (Stress - X-direction SX).

General Postproc – Path Operations – Map onto Path

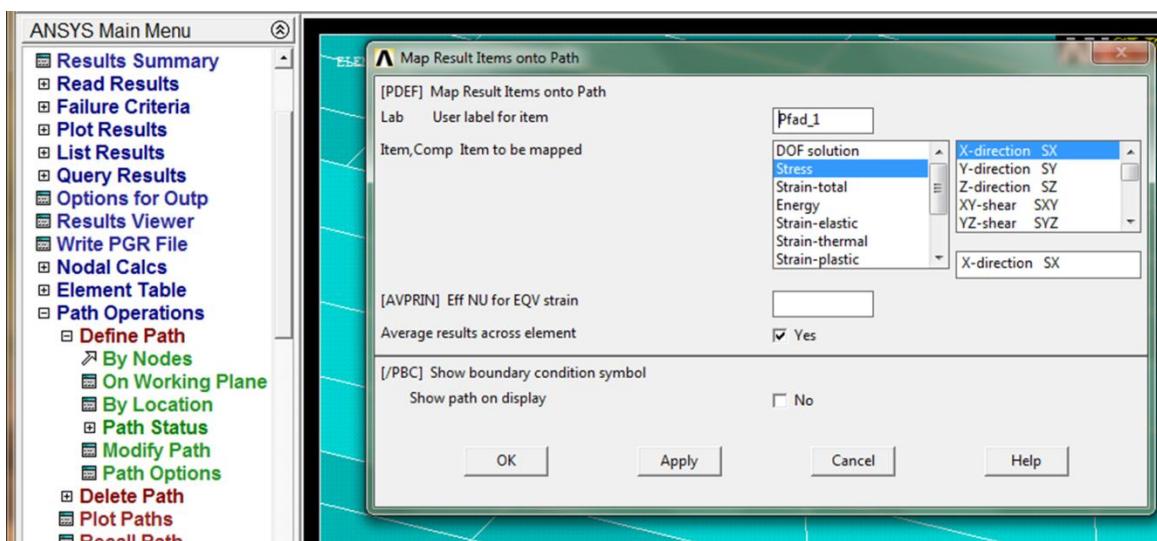


Abbildung 5-39: Projizieren der Ergebniswerte auf einen Pfad

Schließlich können die Spannungen über den Verlauf des Pfads (Balkenhöhe) in einem Diagramm geplottet werden.

General Postproc – Plot Results – Plot Path Item – On Graph

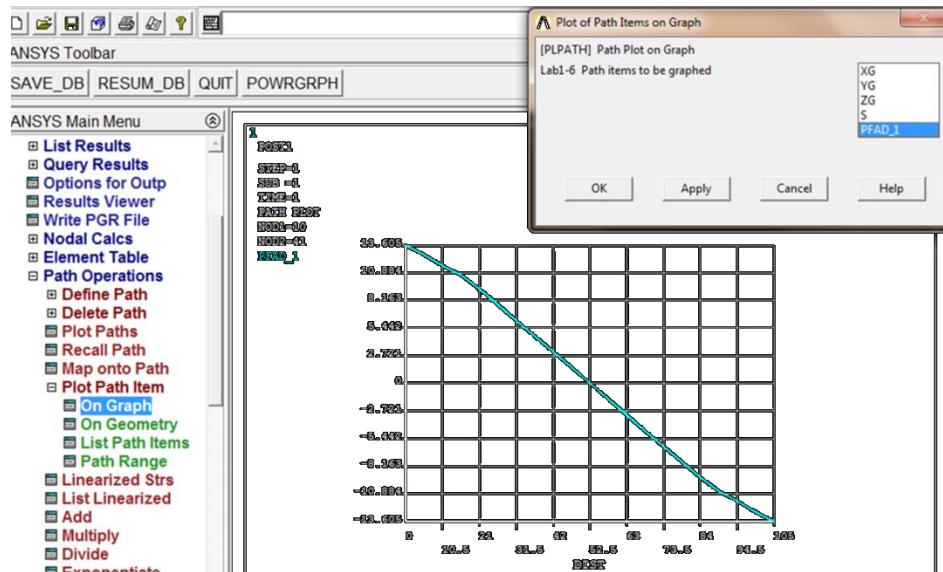


Abbildung 5-40: Plotten eines Pfades

Eine weitere Option zur freien Übung wäre das Anlegen eines Pfades zum Darstellen der Schubspannungen über die Balkenhöhe oder zum Darstellen der Spannungen in x – Richtung über die Balkenlänge.

5.1.4 Balkenmodellierung mit Volumenelementen

Modellierung mit Volumenelementen (solid45)

Das komplexeste Balkenmodell lässt sich mit dem „solid45“ Volumenelement mit 8 Knoten in ANSYS realisieren. Hierbei handelt es sich um ein 3-D Volumenelement mit 3 translatorischen (u_x , u_y , u_z) Freiheitgraden je Knoten.

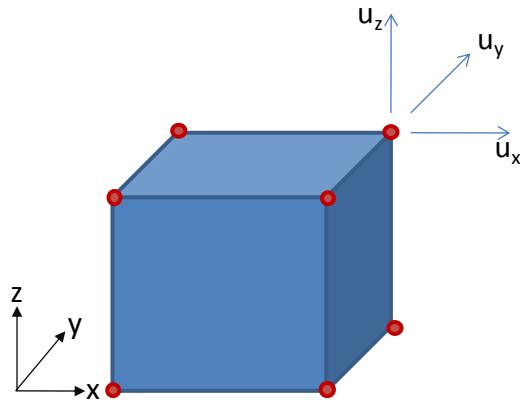


Abbildung5-41: Balkenmodell 4: Freiheitsgrade „solid45“ Volumenelement

Dieses Volumenelement erwartet folgende Eingabeparameter / Elementattribute:

- Materialdaten

5.1.4.1 Preprocessor

Geometrieerstellung

Wurde in den vorherigen Modellen die Balkengeometrie stets durch Linien oder Flächen vereinfacht abgebildet, muss diese im jetzigen Beispiel komplett modelliert werden. Die Balkengeometrie wird demnach als Volumen mit den realen Abmessungen erzeugt.

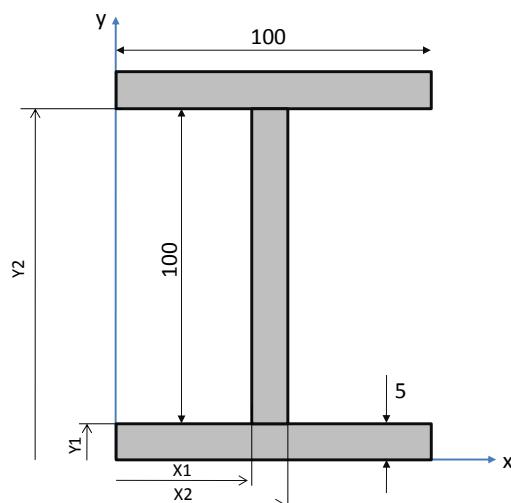


Abbildung5-42: Balkenmodell 4: Geometrieerstellung

Dazu wird zunächst der Balkenquerschnitt aus drei Rechtecken erzeugt. Die Lage der Flächen im globalen Koordinatensystem ist in der obigen Skizze gezeigt. Der Balken ist nun derart im Koordinatensystem positioniert, dass die z – Achse seiner Längsachse entspricht. Diese Positionierung des Balkens erleichtert die folgende Geometrieerstellung deutlich.

Die Flächen können über die Anfangs – und Endkoordinaten (X1/X2, Y1/Y2) erzeugt werden.

Preprocessor – Modeling – Create – Area – Rectangle – By Dimensions

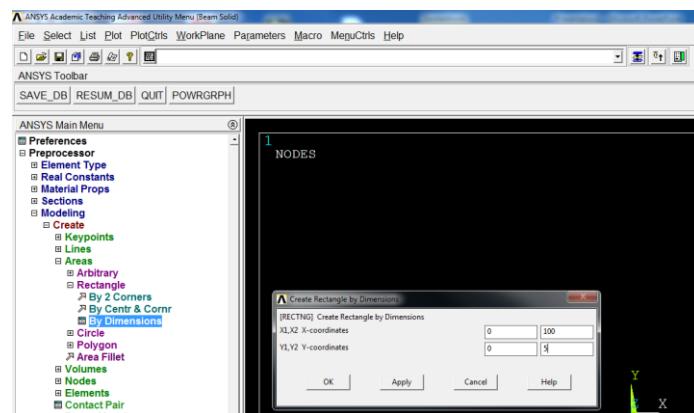


Abbildung5-43: Balkenmodell 4: Rechtecke erstellen

Sind alle drei Teilflächen erzeugt, müssen diese wieder miteinander verbunden werden um doppelte Linien zu vermeiden. Dies geschieht auch hier wie bereits im vorherigen Beispiel beschrieben über den Boolschen Operator *Glue*

Preprocessor – Modeling – Operate – Booleans – Glue – Areas

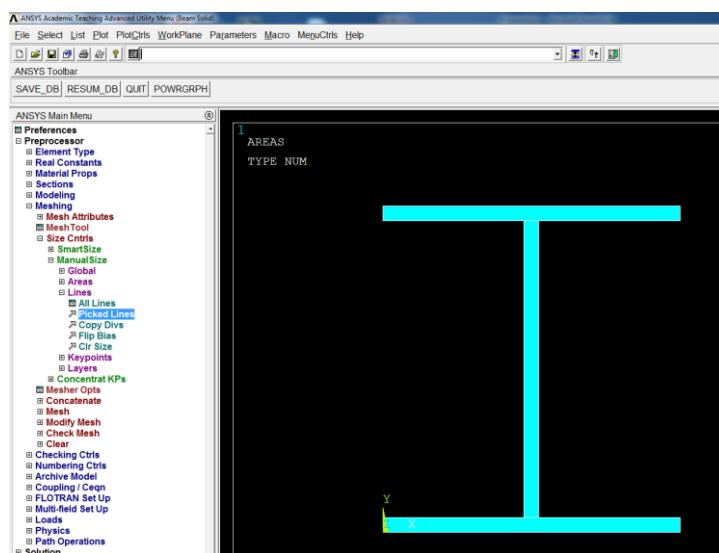


Abbildung5-44: Balkenmodell 4: Flächen verbinden

Danach ist in diesem Beispiel die eigentliche Geometrieerstellung beendet. In den weiteren Schritten wird nun zunächst der Querschnitt mit den bereits bekannten *Shell181* Elementen vernetzt und im nächsten Schritt werden diese Schalenelemente zu Volumenelementen extrudiert. Dieses Vorgehen ist bei der Modellierung mit Volumenelementen nicht zwingend notwendig, bietet sich jedoch aufgrund der sehr einfachen Geometrie des Balkens an. Besonders die Steuerung der Vernetzung kann auf diese Weise sehr gut beeinflusst und kontrolliert werden.

Alternativ kann auch zunächst ein Volumen erzeugt und dieses danach direkt mit Volumenelementen vernetzt werden.

Vernetzen der Geometrie

Als nächstes sollten die beiden benötigten Elementtypen *Shell181* und *Solid45* angelegt werden.

Preprocessor – Elementtype – Add/Edit/Delete

Elementtyp 1: *Shell181: Elastic 4node 181*

Elementtyp 2: *Solid 45: Brick8node 45*

Danach die Materialeigenschaften von Aluminium definieren.

Preprocessor – MaterialProps – Material Models -

Steuerung der Vernetzung / Elementgrößen

Auch hier kann die Steuerung der Vernetzung wieder sehr einfach über zwei Wege erfolgen. Zum einen kann eine maximale Elementgröße angegeben werden, zum anderen kann die Elementgröße über die Anzahl oder Länge der Unterteilungen der Flächenränder (Linien) gesteuert werden. In diesem Beispiel soll nun eine Kombination aus beiden Möglichkeiten gezeigt werden. Die Vernetzung der Querschnittsflächen der Gurte soll dabei mit einer Festlegung einer maximalen Elementgröße gesteuert werden, die Vernetzung des Stegs über die Unterteilung der Linien.

Dazu über

Preprocessor – Meshing – Size Cntrls – Manual Size – Areas – Picked Areas

die beiden Flächen der Gurte selektieren und die *Element edge length* auf 2.5 setzen. Somit können 2 Elemente über die Gurtdicke erzeugt werden. Anschließen die vertikalen Ränder des Stegs über

Preprocessor – Meshing – Size Cntrls – Lines – Picked Lines

selektieren und die *number of divisions* auf 20 setzen.

Danach kann wieder über den Befehl

Preprocessor – Meshing – Mesh – Areas – Free

und die Auswahl aller Flächen die Vernetzung gestartete werden.

Der fertig vernetzte Querschnitt sollte dann folgendermaßen aussehen:

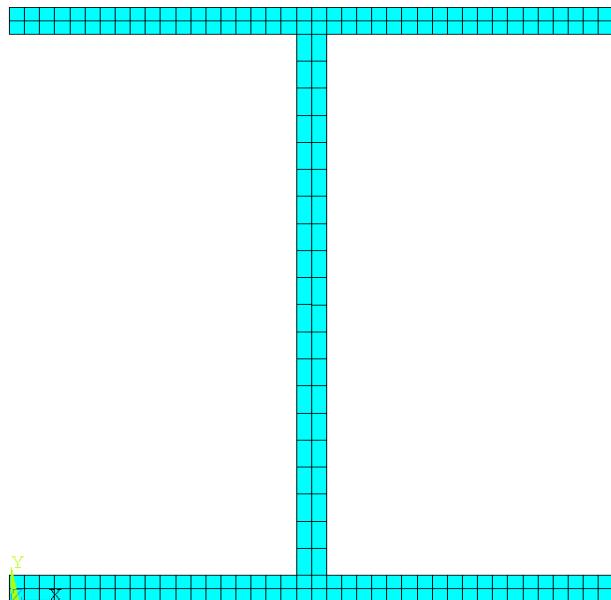


Abbildung5-45: Balkenmodell 4: Mit Schalenelementen vernetzte Stirnfläche

Durch diese Art der Vernetzungssteuerung wurde beispielhaft gezeigt, wie in einem Modell verschiedene Bereiche unterschiedlich fein diskretisiert werden können.

Extrudieren der Shell Elemente zu Solid Elementen

Die bis jetzt erzeugten Schalenelemente werden als Ausgangsnetz verwendet um daraus die eigentlich verwendeten Solid 45 Elemente zu generieren. Diese sollen nun durch Extrudieren der Shell Elemente in z – Richtung, mit einer bestimmten Anzahl von Elementen in dieser Richtung, erzeugt werden. Die Shell181 Elemente werden bei diesem Vorgang gelöscht und nicht weiter benötigt. Sie dienen lediglich zur Erzeugung des Ausgangsnetzes.

Bevor die Extrusion ausgeführt werden kann müssen noch die Extrusions Optionen eingestellt werden. Dabei müssen über

Preprocessor – Modeling – Operate – Extrude – ELEM Ext Opts

der Elementtyp, das Material und die Anzahl der Elemente über die Extrusionslänge bestimmt werden. Ebenfalls muss angegeben werden, ob die Ausgangselemente (Shell181) nach der Extrusion erhalten oder gelöscht werden sollen. In diesem Beispiel sollen die Shell181 Elemente nach dem Extrudieren gelöscht werden, da sie nicht mehr benötigt werden.

Element Type: 2 Solid 45

Material number: 1

No. ELEM divs: 200

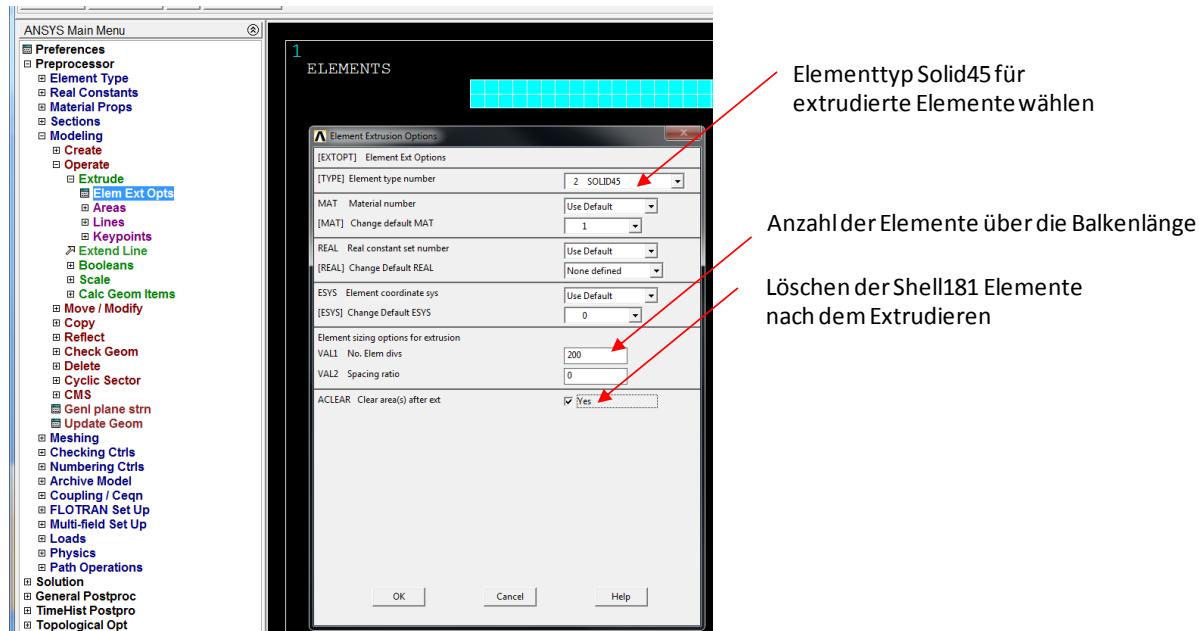


Abbildung5-46: Balkenmodell 4: Extrusionsoptionen

Danach über:

Preprocessor – Modeling – Extrude – Areas – Along Normal

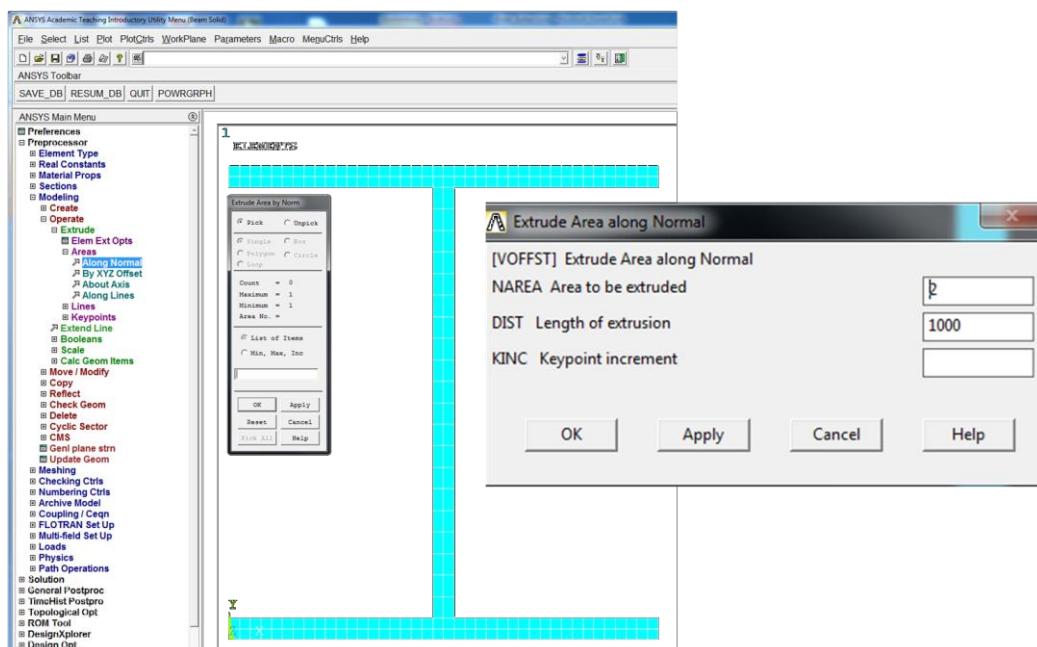


Abbildung5-47: Balkenmodell 4: Extrusionsoptionen 2

jeweils eine Fläche des Querschnitts auswählen und über eine Länge von 1000mm extrudieren. Die Volumenelemente werden so entlang der Flächennormale der jeweiligen Fläche über die Länge 1000mm extrudiert. dabei werden 200 Elemente über die Länge des Balkens generiert. Der fertig diskretisierte Balken sollte anschließend folgendermaßen aussehen:

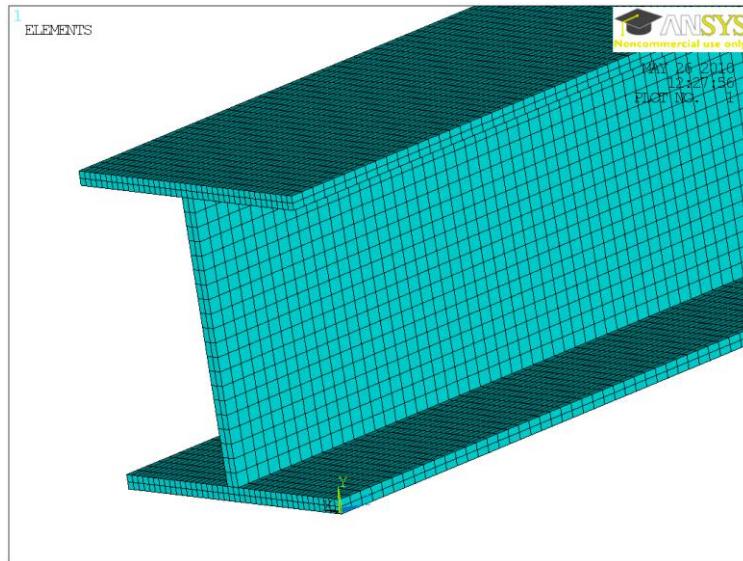


Abbildung5-48: Balkenmodell 4: vernetztes Modell

Da bei diesem Beispiel die drei Flächen hintereinander vernetzt wurden, kommt es an den Stößen zwischen Gurten und Steg zu „doppelten“ Knoten. Das bedeutet, dass in diesem Bereich zwei identische Knoten an der gleichen Stelle liegen. Dies würde bedeuten, dass die Elemente der Gurte an diesen Stellen nicht mit den Elementen des Stegs verbunden wären. Um zu überprüfen ob in einem Modell „doppelte“ Knoten existieren kann man sich die Knoten mit ihren Knotennummern in den interessanten Bereichen anzeigen lassen. Sind dabei an einem Knoten zwei Nummern zu erkennen, liegt dort ein „doppelter“ Knoten vor.

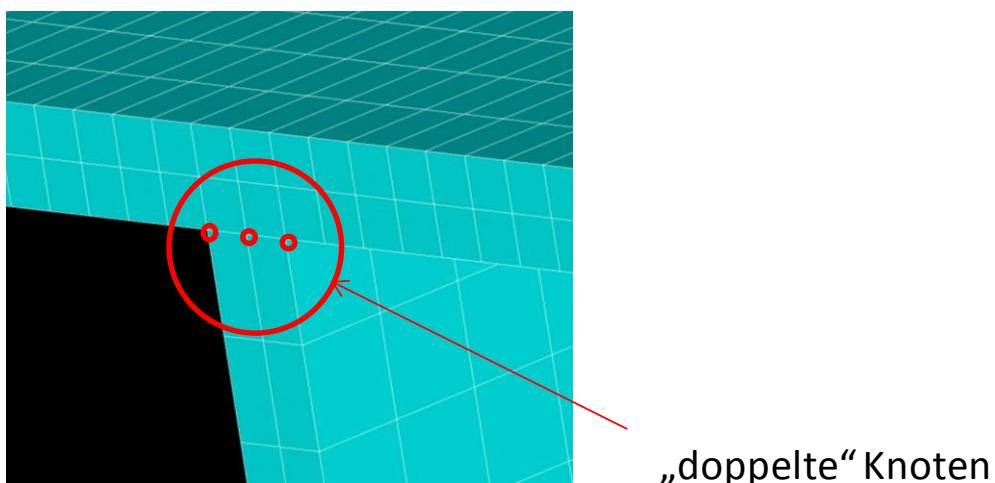


Abbildung5-49: Balkenmodell 4: Netzprüfung

Dazu über die Menüleiste

Select – Entities...

und anschließend *Nodes* und *By Location* auswählen. Auf diese Weise können in ANSYS verschiedene Modellkomponenten wie Knoten, Elemente, Linien, Flächen, etc. über diverse Kriterien selektiert werden. In diesem Beispiel wollen wir alle Knoten auswählen, welche im Bereich des oberen Steg – Gurt Stoßes liegen. Dies gelingt über die Option *By Location*, also über die Lage im Koordinatensystem. Da die Knoten in einem y – Abstand von 105mm vom Ursprung entfernt liegen wählen wir zunächst *Y – coordinates, Min,Max: 105*, und aktivieren *From Full*.

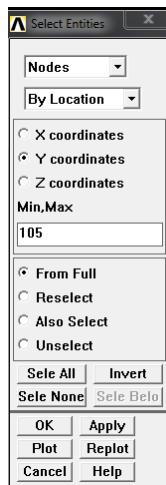


Abbildung5-50: Balkenmodell 4: Netzprüfung 2

Somit werden aus allen existierenden Knoten diejenigen mit einem y – Abstand von 105mm vom Koordinatenursprung selektiert. Dazu gehören jedoch auch alle Knoten auf der Gurtunterseite. Über einen weiteren Selektiervorgang können nun die Knoten im x – Abstand von 47.5mm bis 52.5mm aus den bereits selektierten ausgewählt werden. Dazu wie oben beschrieben über die Menüleiste:

Select – Entities...



Abbildung5-51: Balkenmodell 4: Netzprüfung 3

anschließend über

Plot – Nodes

die selektierten Knoten anzeigen lassen. Anschließend über

PlotCtrls – Numbering – Nodes

die Knotennummern anzeigen lassen. Dabei erkennt man nun, viele Knoten mit doppelter Knotennummer.

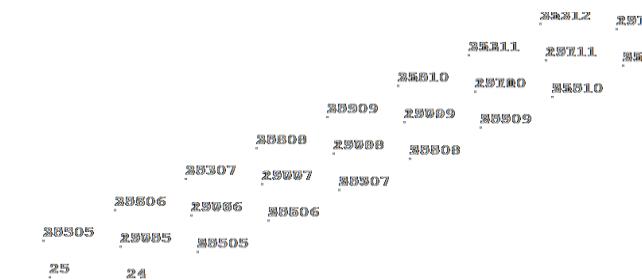


Abbildung5-52: Balkenmodell 4: Netzprüfung 4

Ähnlich wie im Beispiel zuvor in dem die doppelten Linien miteinander verbunden (glue) wurden, können auch hier die doppelten Knoten verbunden werden (merging). Dazu alle Knoten des Modells selektieren über:

Select – Entities... Sele All

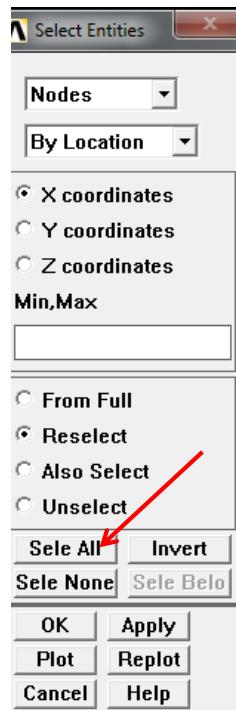


Abbildung5-53: Balkenmodell 4: Knoten verbinden 1

und anschließend mit:

Preprocessor – Numbering Ctrls – Merge Items

die doppelten Knoten verbinden.

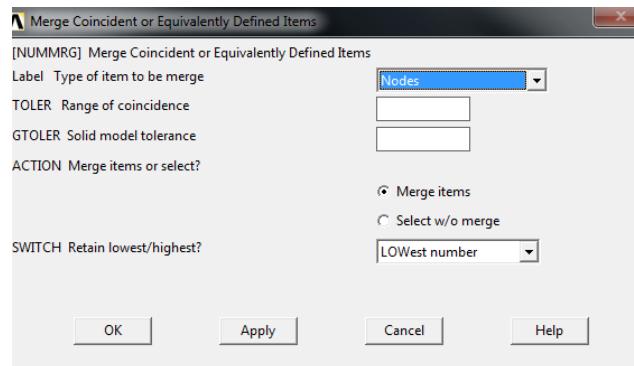


Abbildung5-54: Balkenmodell 4: Knoten verbinden 2

5.1.4.2 Solution

Sperren der Freiheitsgrade an der Einspannung

Wie in allen vorherigen Modellen werden nun zunächst alle Knoten im Bereich der festen Einspannung in allen Freiheitsgraden gesperrt. Da das auswählen aller Knoten an einem Balkenende mit der Maus zu aufwändig wäre, sollen diese über den zuvor beschriebenen Selektierbefehl selektiert werden. Alle Knoten bei $z=0$ selektieren. Anschließend die Knoten über *Plot – Nodes* anzeigen lassen und die Selektion prüfen. Anschließend alle Freiheitsgrade der Knoten bei $z=0$ über

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes

sperren. Am einfachsten gelingt dies wenn im Fenster *Apply U,Rot on Nodes* die Option *Box* gewählt wird und alle Knoten mit einem Auswahlfenster selektiert werden. Die zweite Möglichkeit wäre im Schriftfeld des Fensters „all“ einzugeben.

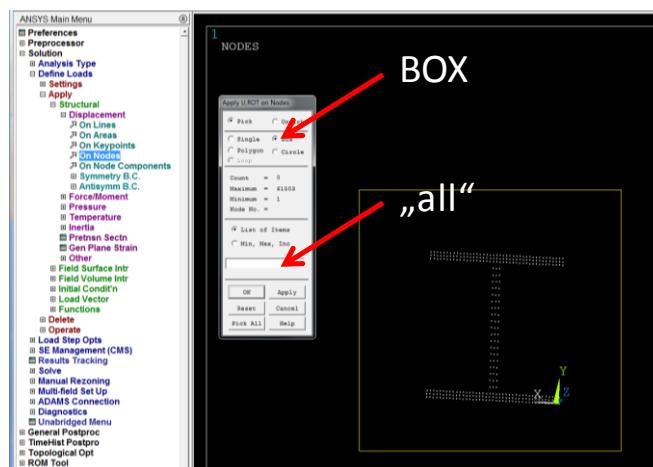


Abbildung5-55: Balkenmodell 4: Lagerung

Danach bei der Auswahl der zu sperrenden Freiheitsgrade *AllDof* wählen.

Aufbringen der Last F

Um die Lasteinleitung am anderen Balkenende zu Modellieren existiert in diesem Modell aufgrund der sehr detaillierten Modellierung und feinen Diskretisierung eine Vielzahl von Möglichkeiten. In einem ersten Schritt soll die Kraft in diesem Beispiel am Knoten in der Mitte des Stegs am Balken angreifen. Dazu wie bereits mehrfach gezeigt, über

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moment

den Knoten auswählen und die Kraft von 1000N aufbringen. Da in diesem Beispiel der Balken jedoch eine andere Orientierung besitzt muss die Kraft hier in y – Richtung wirken, um die gleich Belastung des Balkens wie in den anderen Modellen zu erhalten.

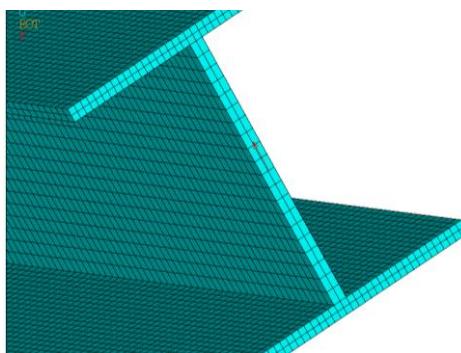


Abbildung5-56: Balkenmodell 4: Last aufbringen

Ist die Kraft aufgebracht kann anschließend die Berechnung gestartet werden.

Solution – Solve – Current LS

5.1.4.3 Postprocessing

Nachdem die Berechnung beendet ist im Postprozessor die Verschiebung des Balkens in y – Richtung anzeigen lassen

General Postproc – Plot Results – Contour Plot - ... y-Component of Displacement

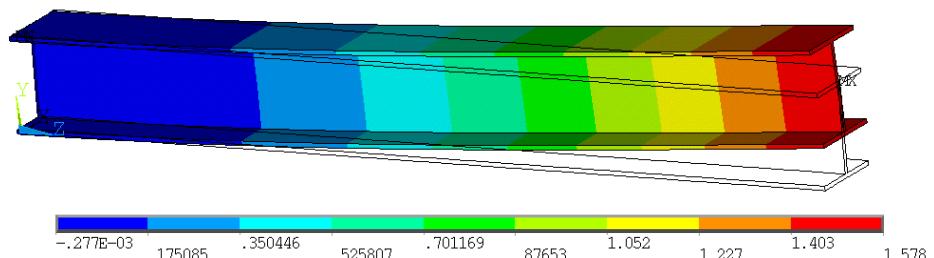


Abbildung5-57: Balkenmodell 4: Verformungen

Wie erwartet zeigt sich auch in diesem Beispiel der Balkenmodellierung eine maximale Verschiebung von ca. 1.5mm.

5.2 Beispiel 2: Fachwerkmodell mit Balkenelementen

5.2.1 Aufgabe

Im Folgenden soll ein Fachwerk aus 9 Keypoints erstellt und unter verschiedenen Belastungen hinsichtlich Spannungen und Deformation untersucht werden:

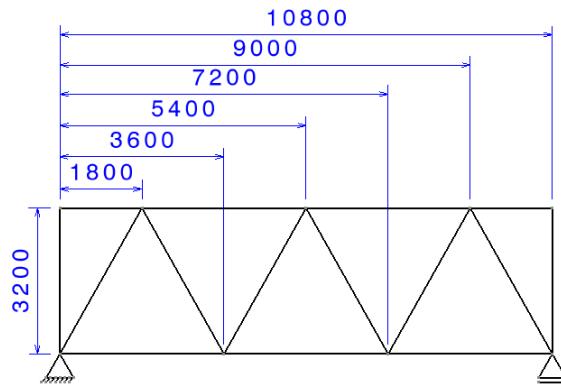


Abbildung 5-58: Skizze des Fachwerks mit Bemaßungen

5.2.2 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise ist im Folgenden recht knapp gehalten, um das bisher Gelernte anwenden zu können. In der rechten Spalte sind jeweils die Modellierungsschritte mit Inputfiles beschrieben.

**Generierung von 9 Keypoints entsprechend k,KP-Nr,x,y,z
folgender Koordinaten**

z.B.:

Preprocessor – Modeling – Create – Keypoints k,1,0,0,0
– In Active CS

Keypoint	1	2	3	4	5	6	7	8	9
x[mm]	0	0	1800	3600	5400	7200	9000	10800	10800
y[mm]	0	3200	3200	0	3200	0	3200	0	3200

Danach die Keypoints wieder miteinander verbinden

Istr,KP-Nr,KP-Nr

Preprocessor – Modeling – Create – Lines – Lines – Straight Line z.B.: Istr,1,2

Definition der Elementtypen	ET,1,BEAM188
<i>Element Type – Add/Edit/Delete – Add – “2 node 188”</i>	
Geometriezusatzinformationen	sectype,1,beam,ctube,Rohrprofil,
(Rohrprofil mit $R_i=95$, $R_a=100$, $N_{div}=10$)	secoffset,cent
<i>Preprocessor – Sections – Beam – Common Sections</i>	secdata,95,100,10
Definition eines Materialmodells	mp,ex,1,70000
<i>Preprocessor – Material Props – Material Model ($E=70.000 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$)</i>	mp,prxy,1,0.3 mp,dens,1,2.7e-9 (Dichte)
Vernetzung der Geometrie	lesize,all, , ,5, ,1, , ,1,
<i>Preprocessor – Meshing – SizeCntrs – ManualSize – Lines – All Lines (5 Unterteilungen)</i>	
Vernetzung der Linien	lmesh,all
<i>Preprocessor – Meshing – Mesh – Lines</i>	
Mit “Box” und “all” lassen sich alle Linien auswählen	
Aufbringen der Randbedingungen und Lasten	nsel,s,loc,y,0 nsel,r,loc,x,0 (Knotenauswahl)
Festlager bei (0/0), Loslager bei (10800/0)	d,all,all,0 (displacement, Festlager)
<i>Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes</i>	(rechts analog))
Lastfall 1 : Kraft von -4000 N in Y-Richtung auf Keypoints 4 und 6 verteilt	nsel,s,loc,y,0 (neues set) nsel,r,loc,x,3600 (reselect) nsel,a,loc,x,7200 (add) F,all,Fy,-4000/2

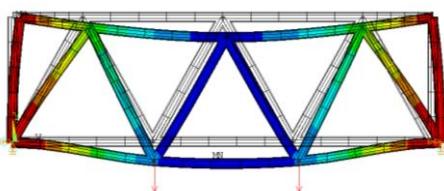
Lastfall 2: Kraft von -4000 N in Y-Richtung auf alle Knoten der Linien zwischen 1 und 9 verteilt

```
nsel,s,loc,y,0
*get,nanz,node,,count
```

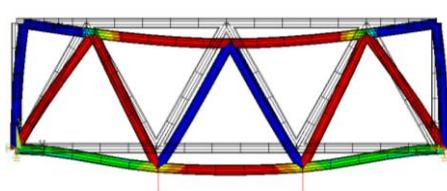
Solution – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moment – On Nodes

5.2.3 Ergebnis Lastfall 1

Die im Folgenden dargestellten Verformungs – und Spannungsplots sind qualitativer Natur. Die wahren Werte hängen von den gewählten Stabquerschnitten ab.



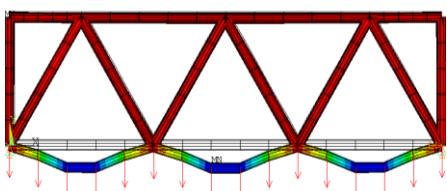
a) Verschiebungen



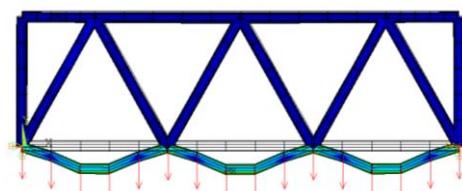
b) Von Mises Spannungen

Abbildung5-59: Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall1

5.2.4 Ergebnis Lastfall 2



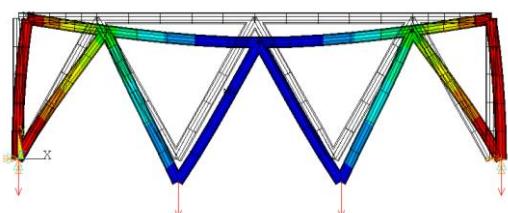
a) Verformungen



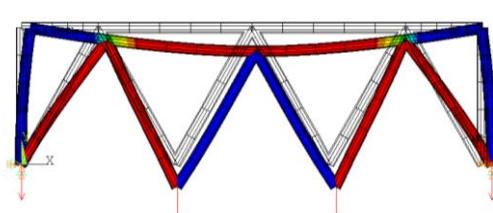
b) Von Mises Spannungen

Abbildung5-60: Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall2

Dass der obere Bereich bei der verschmierten Last nicht verformt erscheint, ist skalierungsbedingt, deaktiviert man die Basislinien sieht man die wahre Verformung/Spannung des oberen Bereichs:



a) Verformung



b) Von Mises Spannungen

Abbildung5-61: Darstellung von Verformungen und Spannungen unter Lastfall2 ohne Basislinien

5.3 Beispiel 3: Einfacher Rotationskörper

Unter Ausnutzung der Achssymmetrie lässt sich ein Rotationskörper erzeugen. Hierbei muss beachtet werden, dass ANSYS stets die globale Y-Achse als Symmetriearchse verwendet. Negative X-Koordinaten sind für Knoten nicht erlaubt.

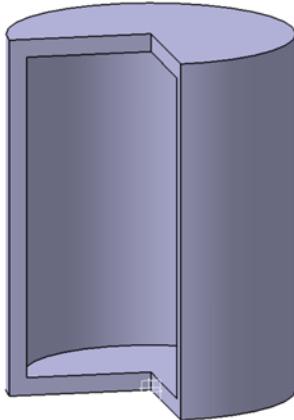


Abbildung 5-62: Skizze des Rotationskörpers

Vorgehen:

Erzeugung von 3 sich überlappendenden Rechtecken. Diese sind in U-Form angeordnet und werden um die Y-Achse Rotiert um einen 3-D Körper zu erzeugen. Die Flächen werden von folgenden Koordinaten aufgespannt:

Tabelle 5-2: KP - Koordinaten

Koordinaten	X1	X2	Y1	Y2
Fläche 1	0	35	0	5
Fläche 2	30	35	0	100
Fläche 3	0	35	95	100

Erzeugung der Flächen:

rectng,0,b,0,t

Preprocessor – Modeling – Create – Areas – rectng,b-t,b,0,h
Rectangle – rectng,0,b,h-t,h

By Dimensions

Sind die Flächen erzeugt müssen diese noch verbunden

werden, hier mit dem Befehl „Overlap“ um eine gleichmäßige Vernetzung zu erreichen:

Preprocessor – Operate – Booleans – overlap– Areas – „All“ aovlap,all

Zuweisen eines Elementtyps:

Es können nur Elementtypen verwendet werden, für welche auch achssymmetrische Anwendungen angeboten werden, wir verwenden den „plane223“ Elementtyp

et,1,plane223

keyopt,1,1,11

keyopt,1,3,1

Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – “Add” – plane223

Unter Options muss K3 auf „axisymmetric“ gestellt werden

Definition eines Materialmodells:

mp,ex,1,70000

E-Modul: 70000, Querkontraktionszahl: 0.3 mp,prxy,1,0.3

Preprocessor – Material Props – Material Models – Structural –Linear – Elastic – Isotropic

Vernetzung der Geometrie

lesize,all,5/3

Preprocessor – Meshing – SizeCntrls – ManualSize – Lines– All Lines (size 5/3)

Zuweisung der Elementattribute

mat,1

Preprocessor – Meshing – Mesh Attributes – All Areas

Vernetzung der Linien

amesh,all

Preprocessor – Meshing – Mesh –Areas – Free

Mit “Box” und “all” lassen sich alle Linien auswählen

Aufbringen der Randbedingungen und Lasten:

lsel,s,loc,x,0

Zunächst muss die Symmetrieeachse bei „x=0“ festgelegt werden, hierfür die Linien ganz links auswählen

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – Symmetry B.C. – On Lines

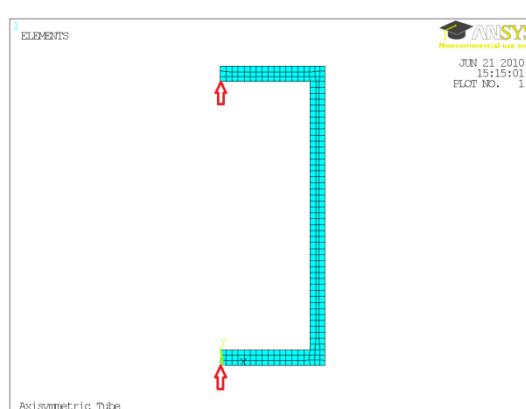


Abbildung5-63: Festlegen der Symmetrieeachse

Lagerung:

Als Lagerung wird bei $y=h/2=50$ der translatorische Freiheitsgrad in Y-Richtung blockiert. Über

„select – Entities – Nodes – From Location“ nsel,s,loc,y,h/2

werden alle Knoten bei $y=50$ ausgewählt. Mit

*Solution – Define Loads – Apply – Structural – d,all,uy,0
Displacement – On Nodes – “All”*

den Verschiebungsfreiheitsgrad in Y-Richtung auf „0“ setzen. Wegen der symmetrischen Belastung werden sich diese Knoten auf der Symmetrieebene ohnehin nicht bewegen, weswegen sich die Lagerung an dieser Stelle anbietet. Danach über

„Select – Entities – Sele All“ nsel,all alle Knoten auswählen!

Lasten:

Als Lasten werden 10N in positive Y-Richtung auf die Knoten der Ebene bei $y=0$ und in negative Y-Richtung auf die Knoten der Ebene bei $y=100$ verteilt: nsel,s,loc,y,0 f,all,fy,10 nsel,s,loc,y,h f,all,fy,-10

Select – Entities – Nodes – From Location nsel,s,loc,x,b-t
Solution – Define Loads – Apply – Structural – nsel,r,loc,y,h/2+10,h/2-10
Displacement – On Nodes – “All” f,all,fx,-100

In negative X-Richtung analog 100 N auf folgenden Bereich verteilt: $x=30$, $40 < y < 60$

Berechnung:

Solution – Solve – Current LS solve

Achsensymmetrische Darstellung erzeugen:

PlotCtrls – Style - Symmetry Expansion – 2-D Axi- /expand,27,axis,,,10 symmetric

Anzeigen der Verformung

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solution – DOF Solution – Displacement vector sum plnsol,u,sum

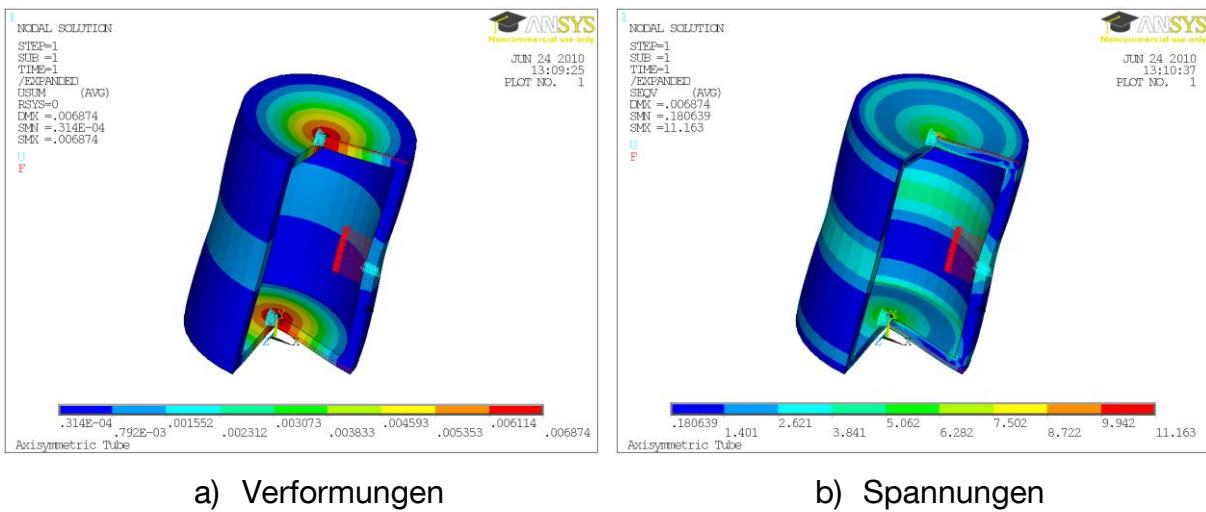


Abbildung5-64: Darstellung der Verformungen und Spannungen

5.4 Beispiel 4: Einfaches ebenes (Schalen/Platten) Modell

In diesem Beispiel wird die Vernetzung eines eingespannten und mit einer Linienlast belasteten Schalenelements durch den Nutzer beeinflusst. Da dieses Beispiel bereits recht komplex ist, wird hier hauptsächlich auf die Modellierung mittels Inputfiles eingegangen.

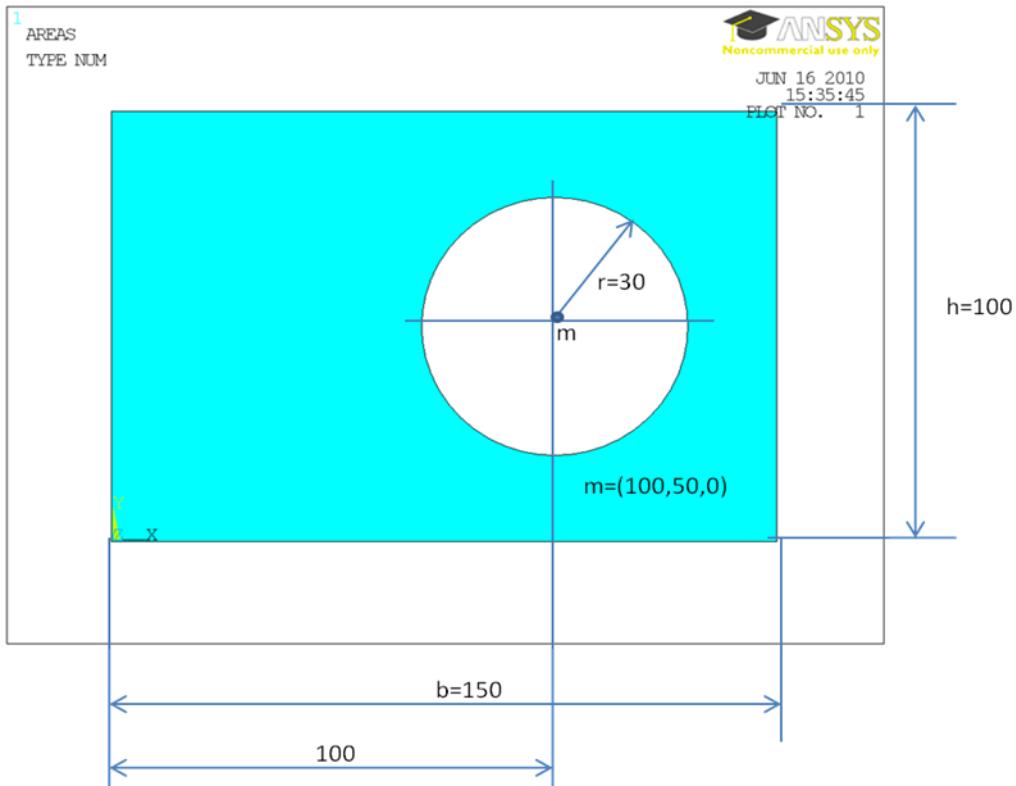


Abbildung5-65: Schalenmodell: Skizze

5.4.1 Beginn eines Inputfiles

laufende Prozesse beenden	finish /clear
Variablendefinition	b=150
(neben Befehlen können auch Variablen definiert werden)	h=100 mx=100 my=50 r=30

5.4.2 Preprocessor

Zunächst werden verschiedene Koordinatensysteme angelegt, die die spätere Linienauswahl erheblich vereinfachen. Das Bauteil mit lokalen Koordinatensystemen ist in Abbildung5-68 zu sehen.

Preprocessor starten	/prep7
Kartesisches System im Ursprung der WorkPlane	cswpla,11, 0,
<i>WorkPlane – Local Coordinate System – Create Local CD – At WP Origin</i>	Befehl allgemein: cswpla, kcn, kcs kcn: Referenznummer, muss größer als 10 sein. kcs: Typ des Koordinatensystems , siehe Abbildung5-66
Lokales zylindrisches Koordinatensystem	local,15,1,mx,my
wird im Mittelpunkt der Bohrung über	Befehl allgemein:
<i>WorkPlane – Local Coordinate System – Create Local CD – At specified Loc</i>	local,kcn,kcs,xc,yc,zc,thxy,thyz,thzx xc,yc,zc: Ursprungspunkt des Koordinaten-systems in x, y, z, angegeben im globalen Koordinatensystem thxy,thyz,thzx: Für Rotationen, wird hier auf 0 gesetzt
und Eingabe der entsprechenden Parameter erstellt, m=(100,50,0), zylindrisch	
Wechsel in das globale Koordinatensystem	csys,0
<i>WorkPlane – Change Active CS to – Global Cartesian</i>	Befehl allgemein: „0“ steht hier wieder für das kartesische Koordinatensystem, siehe Abbildung5-66

Abbildung5-66: mögliche Koordinatensysteme

0 or CART	Cartesian
1 or CYLIN	Cylindrical (circular or elliptical)
2 or SPHE	Spherical (or spheroidal)
3 or TORO	Toroidal

Erzeugung des Bauteils

Rechteck mit Höhe h und Breite b

rectng,0,b,0,h

Preprocessor – Modeling – Create – Areas – Rectangle – By Dimensions

Kreis für Bohrung

cyl4, mx, my, r,

Preprocessor – Modeling- Create – Areas – Circle - Solid Circle

Flächen miteinander verschneiden

asba, 1,2,

Preprocessor – Modeling – Operate – Booleans – Subtract - Areas

Befehl allgemein:

asba, na1, na2, sepo, keep1, keep2

na1: von dieser Fläche wird abgezogen

na2: diese Fläche wird abgezogen

sepo: bestimmt, ob Schnittlinien als gemeinsame Linien festgelegt werden oder 2 einzelne, kongruente Linien erzeugt werden. Mögliche Einträge sind sepo oder Leerzeichen, im zweiten Fall werden die Linien geteilt.

keep1, keep2: mögliche Einträge sind keep und delete. Legt fest, ob die Fläche mit der jeweiligen Referenznummer nach dem Verschneiden beibehalten oder gelöscht werden soll.

asba – Area Subtracted By Area

Man könnte in einem andern Fall z.B. eine Linie mit einer

Fläche verschneiden, dann lautet es asbl.

Aufbau eines Grundgerüsts für die Vernetzung

Als nächstes werden neue Keypoints und Linien eingefügt um ein Grundgerüst für die Vernetzung aufzubauen, siehe Abbildung5-67a).

Keypoints erstellen

k,,x,y,z,

Preprocessor – Modeling – Create – Keypoints – In Active CS

Koordinaten siehe Abbildung 5-65.

Bei der Erstellung der Geometrie hat ANSYS bereits 8 KP erstellt. Dies sind die Eckpunkte des Rechtecks und die Viertelkreispunkte an der Bohrung. Die hier hinzugefügten KP werden somit ab Nr. 9 fortlaufend nummeriert, wenn nach dem ersten Komma im Befehl keine KP-Nr. zugewiesen wird.

Danach die Keypoints wieder miteinander verbinden

lstr,KP-Nr,KP-Nr

*Preprocessor – Modeling – Create – Lines – Lines – z.B.: lstr,1,2
Straight Line*

Hier können die KP über Pick ausgewählt werden.

PlotCtrls – Numbering – KP KeyPointNumbering ON hilft bei der Eingabe im Logfile.

Die Linien wie in Abbildung5-67: Schalenmodell:
Grundgerüst für Vernetzung erstellen.

Kreisring um die Bohrung

circle,(Nr. des KP, der ins Zentrum der Bohrung gelegt wurde),40, , ,360, ,

Main Preprocessor – Modeling – Create – Lines – Arcs - By Cent & Radius

Vollkreisring (daher 360°) mit r=40 und Ursprung im Bohrungsmittelpunkt

Verschneidung der Fläche mit den Linien

asbl, 3,all,

Preprocessor - Modeling – Operate – Booleans – Divide - Area by Line

Hier wird die Fläche in Teilflächen mit je 4Seitenzerlegt -> bessere Vernetzung

Tabelle 5-3: Keypoints

Keypoint	9	10	11	12	13	14	15	16
x	b/3	0	b/3	b/3	mx	mx	b	mx

y	my	my	0	h	0	h	my	my
---	----	----	---	---	---	---	----	----

Liest man das Logfile bis hierher ein so kann man erkennen, dass die Verschneidung stattgefunden hat (Anzeige über *Iplot* in der Kommandozeile), die Linien sind nicht mehr durchgängig einfarbig, siehe Abbildung5-67b.

Jetzt ist die Vernetzung soweit vorbereitet.

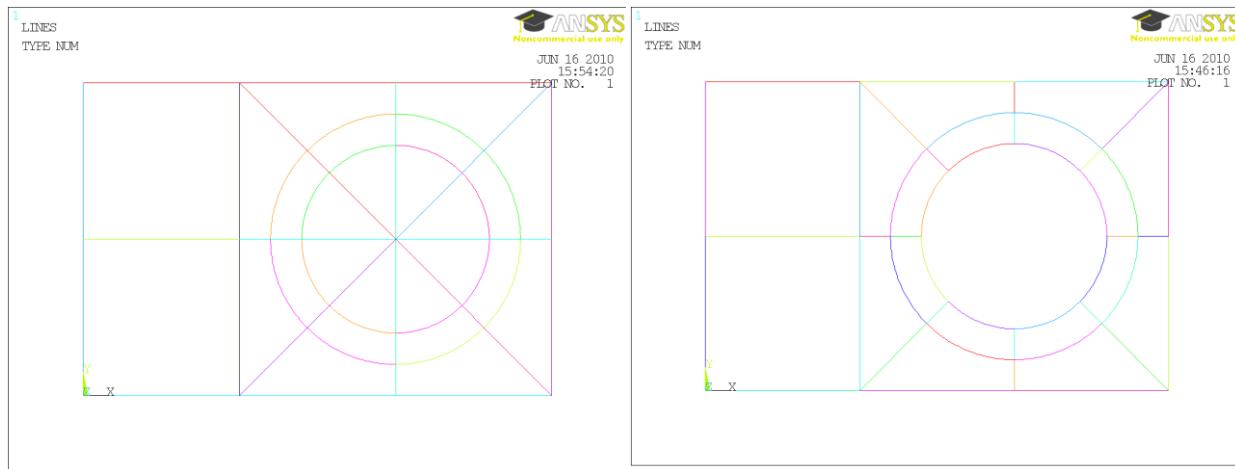


Abbildung5-67: Schalenmodell: Grundgerüst für Vernetzung

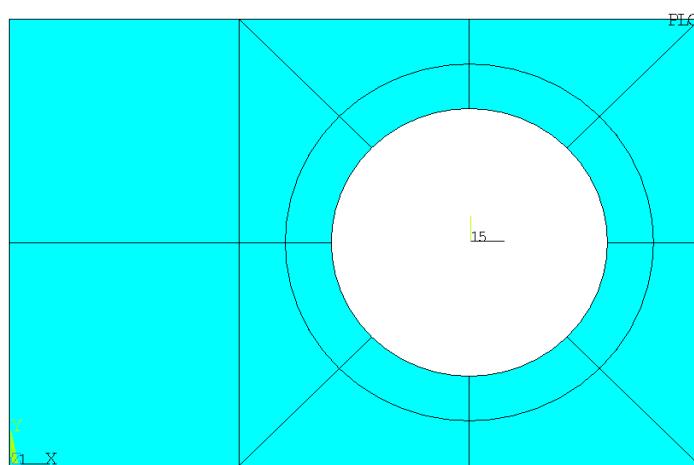


Abbildung5-68: Schalenmodell: Lokale Koordinatensysteme

Definition von Materialdaten und Elementtyp

Definition der Elementtypen

Element Type – Add/Edit/Delete – Add et,1,181,

Definition eines Materialmodells

E-Modul: 70000, Querkontraktionszahl: 0.3

mp,ex,1,70000

Preprocessor – Material Props – Material Models – Structural –Linear – Elastic – Isotropic mp,prxy,1,0,3

Definition der Section sectype,1,shell281,,

Parameter der Section secdata, 5,1,0,0,7

Preprocessor – Sections – Shell – Lay-UP – Add/ Edit

Scheibenelement mit Dicke D=5mm, Material 1 (zuvor definiert) und 7 Punkte (je höher, desto feiner das Netz), siehe

Dann im selben Fenster das „Section Offset“, also die Extrusionsrichtung bei der Aufdickung des Körpers angeben. Auswahl „Mid-Plane“ führt zur gleichmäßigen Aufdicken zu beiden Seiten hin. Sonst „top“ oder „bot“ secoffset,mid

Meshing

Um das Meshing vorzubereiten, müssen nun alle Linien definiert unterteilt werden, damit die Vernetzung wie in Abbildung 5-70 a aussieht. Eine automatische Vernetzung, siehe Abbildung 5-70 b, sollte wenn möglich vermieden werden. Es sollen nicht alle Linien auf einmal geteilt werden, denn es sollen mehrere Unterteilungsgrade gewählt werden. Siehe dazu die verschiedenen markierten Linien in Abbildung 5-69. Damit eine regelmäßige Vernetzung entstehen kann, müssen die jeweiligen Linien in Sets selektiert und dann unterteilt. Zur erleichterten Auswahl werden die zuvor definierten Koordinatensysteme verwendet.

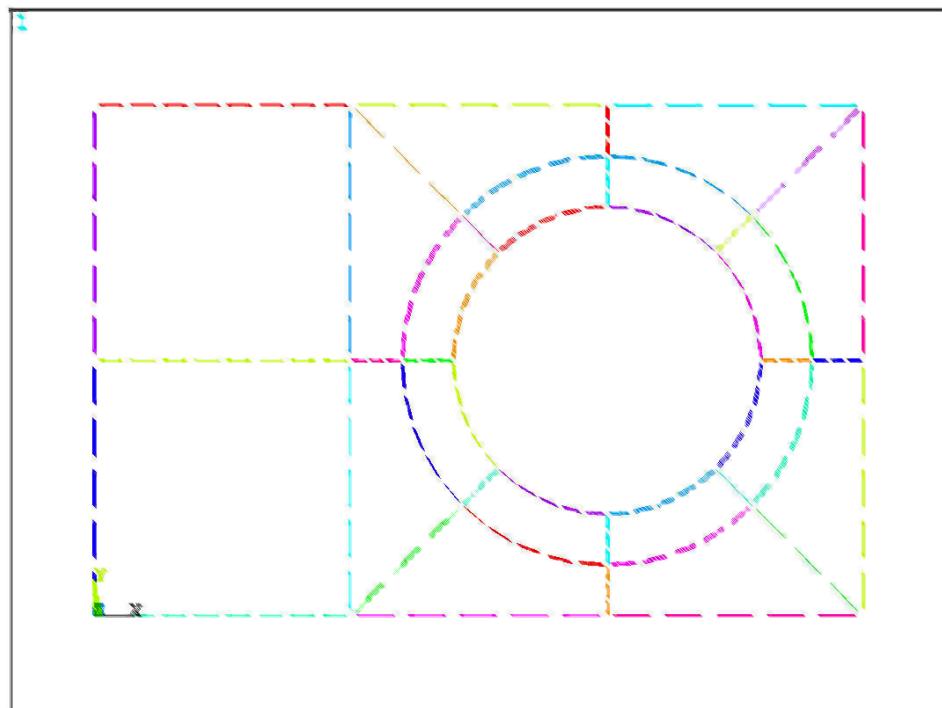


Abbildung 5-69: Schalenmodell: Korrespondierende Linien

Anzahl der Teilungen pro Linie

*Preprocessor – Meshing – SizeCntrls –
ManualSize – Lines – Picked Lines – NDIV*

Andernfalls können in der GUI wie auch im Logfile Linien über ihre Koordinaten ausgewählt werden.

**Wechsel in das zuvor angelegte, lokale CSYS,15
Koordinatensystem Nr. 15**

Work Plane – Change Active CS to – Specified Coordinate System – (KCN eingeben), hier 15

Auswahl der Linien LSEL,s,loc,x,30

Select – Entities – Lines – By Location LSEL,a,loc,x,40

Component aus enthaltenen Linien erstellen CM,Kreise,line

Select - Comp/Assembly - Create Component

Name „Kreise“

Geometrie unterteilen

*Preprocessor – Meshing – SizeCntrls –
ManualSize – Lines– All Lines* LESIZE,all,,0,5,

Select – Entities – Lines – Select All ALLS

weitere Auswahl analog

Auswahl der radialen Linien: LSEL,s,loc,y,0

LSEL,a,loc,y,45

LSEL,a,loc,y,90

LSEL,a,loc,y,135

LSEL,a,loc,y,180

LSEL,a,loc,y,225

LSEL,a,loc,y,270

LSEL,a,loc,y,315

CSYS,11

LSEL,r,loc,x,50,150

LESIZE,all,,,3

Auswahl der Linien in x-Richtung (CSYS 11):

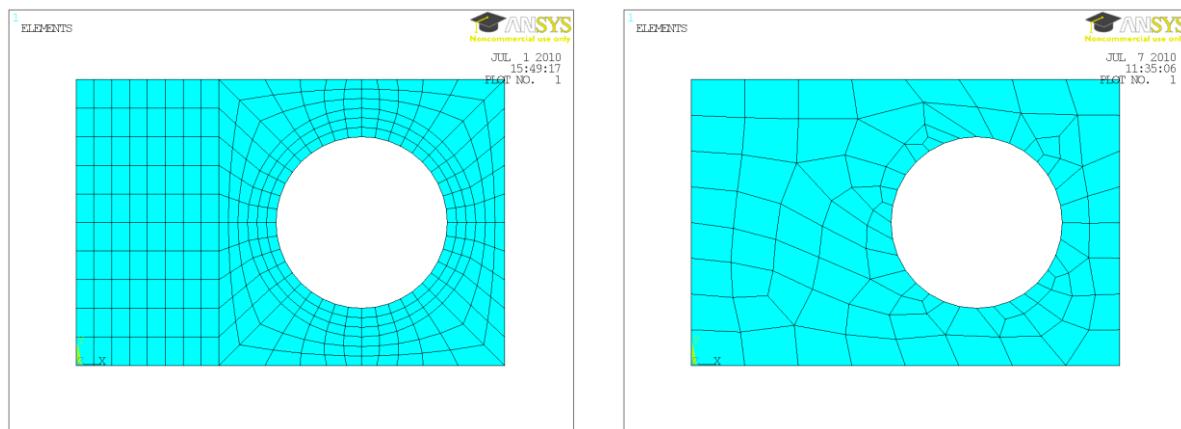
LINKS:	RECHTS:
LSEL,s,loc,y,0	LSEL,s,loc,y,0
LSEL,a,loc,y,50	LSEL,a,loc,y,50
LSEL,a,loc,y,100	LSEL,a,loc,y,100
LSEL,r,loc,x,0,50	LSEL,r,loc,x,50,150
LESIZE,all,,,8	LESIZE,all,,,5

Auswahl der Linien in y-Richtung (CSYS 11):

LSEL,s,loc,x,0
LSEL,a,loc,x,50
LSEL,a,loc,x,150
LESIZE,all,,,5

Vernetzung der Linien

Preprocessor – Meshing – Mesh –Areas – Free AMESH,all



a) Erzwungene (geregelte) Vernetzung

b) Automatische Vernetzung

Abbildung5-70: Schalenmodell: Vernetzung

5.4.3 Solution

Wechsel in das globale Koordinatensystem CSYS,0

Work Plane – Change Active CS

Lagerung:

Feste Einspannung am linken Rand. Über
„select – Entities – Nodes – From Location“ werden alle
Knoten bei $x=0$ ausgewählt.

Solution – Define Loads – Apply – Structural – D,all,all,0 (displacement,

Displacement – On Nodes

Festlager)

alle Freiheitsgrade sperren.

Lasten:

110 N in positive x-Richtung auf die Knoten am rechten Rand (11 Knoten).

Select – Entities – Nodes – From Location

NSEL,s,loc,x,150

Solution – Define Loads – Apply – Force/ Moment – On Nodes F,all,Fx,110/11

Berechnung:

SOLVE

Solution – Solve – Current LS

Anzeigen der Verformung

PLNSOL, u,x, 0,1.0

General Postproc – Plot Results – Deformed Shape

5.4.4 Postprozessor

Das folgende Bild zeigt die Verformungen für dieses Beispiel:

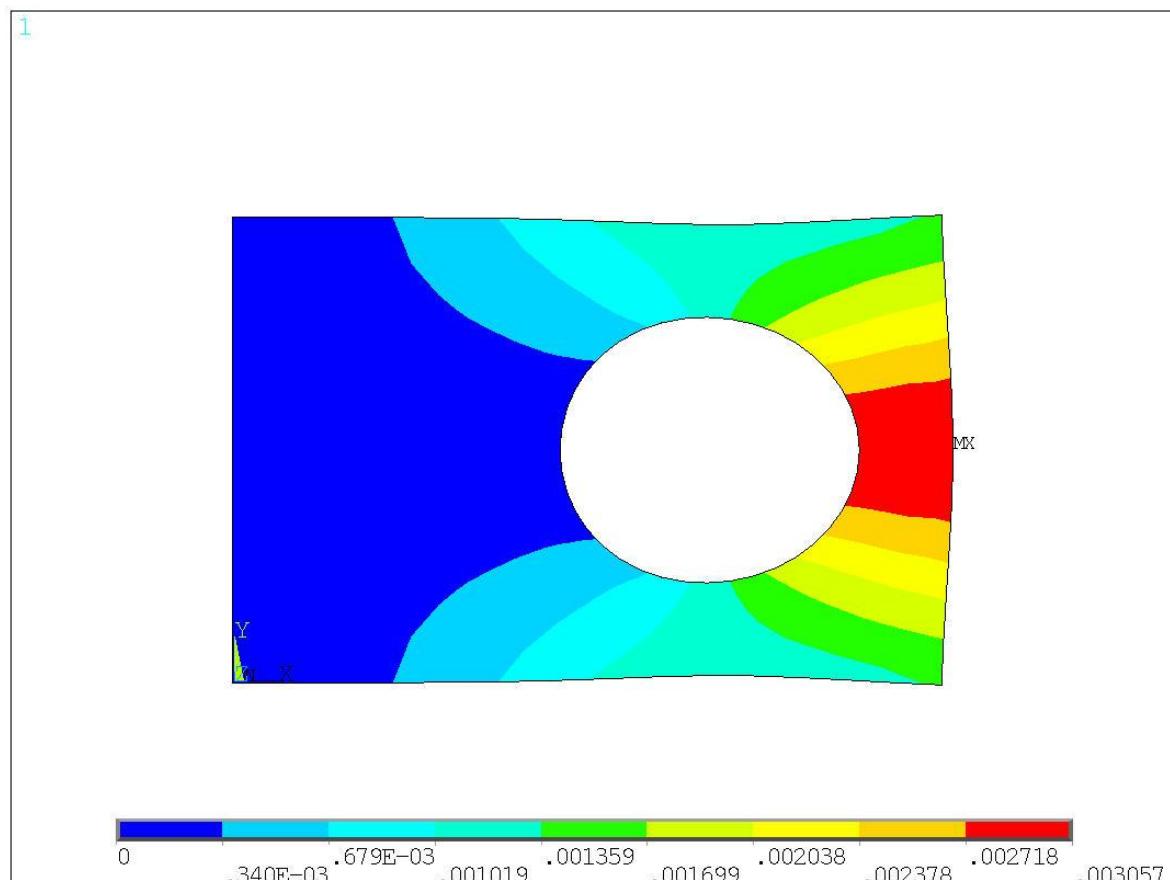


Abbildung5-71: Schalenmodell: Verschiebungen in x-Richtung

5.5 Beispiel 5: Faserverbund Modellierung

Das vorherige Beispiel soll nun aus einem Mehrschichtverbund mit einem symmetrischen Lagenaufbau aufgebaut werden. Das erzeugte Logfile kann daher weitestgehend übernommen werden. Auf die Änderungen in Diesem wird im Folgenden eingegangen.

Der Aufbau des Faserverbunds ist in Tabelle 5-4 angegeben. Das zu verwendende Material (unidirektional Kohlefaser verstärktes Epoxidharz) ist in Tabelle 5-4 definiert.

Tabelle 5-4: Lagenaufbau Faserverbund

Lagennummer	Faserorientierung
1.	0°
2.	45°
3.	90°
4.	-45°
5.	-45°
6.	90°
7.	45°
8.	0°

Tabelle 5-5: Werkstoffkennwerte UD-Lage

		ϕ [%]	E_0° , Zug [Mpa]	E_{90° , Zug [Mpa]	$G_{0^\circ, 90^\circ}$ [Mpa]	$v_{0^\circ, 90^\circ}$ [--]	Rm_{0° , Zug [Mpa]	Rm_{90° , Zug [Mpa]	Rm_{0° , Druck [Mpa]	Rm_{90° , Druck [Mpa]	$\tau_{0^\circ, 90^\circ}$ [Mpa]
Faser	T300										
Matrix	Epoxy 924	60	132.525	8.440	4.700	0,34	2.142	40	1.083	104	117

5.5.1 Preprocessor

Dazu aus dem bestehenden Inputfile die Eingaben zur Element- und Materialdefinition entfernen und die folgenden Befehle an dieser Stelle einfügen:

Definition der Elementtypen

Schalenelement, wie zuvor.

et,1,181,

In den vorherigen Beispielen wurden hier keine Keyoptions benötigt, die Defaultwerte sind 0. Zur Bedeutung siehe Abbildung5-72.

keyopt,1,1,0

keyopt,1,8,1

Die Berechnungen sollen für alle Schichten einzeln gespeichert werden, daher hier *Storage of Layer – All layers*, bzw *Keyoption 8* auf 1 setzen.

keyopt,1,9,0

keyopt,1,10,0

Definition eines Materialmodells

Die Werkstoffkennwerte werden aus der Werkstoffdatenbank übernommen, siehe Anhang. Die relevanten Werte in diesem Beispiel werden aus Tabelle 5-5 entnommen.

mp,ex,1,132525

mp,ey,1,8440

mp,prxy,1,0.34

mp,pryz,1,0.34

mp,gxy,1,4700

mp,gyz,1,3150

mp,gxz,1,4700

Definition der Section

sectype,1,shell181,,

Paramter der Section

entsprechend der Wahl über die GUI in Abbildung5-73Lagenaufbau definieren.

sect,1,shell

seadata, 0.2,1,-45,7

seadata, 0.2,1,90,7

seadata, 0.2,1,45,7

seadata, 0.2,1,0,7

seadata, 0.2,1,0,7

seadata, 0.2,1,45,7

seadata, 0.2,1,90,7

seadata, 0.2,1,-45,7

secoffset,MID

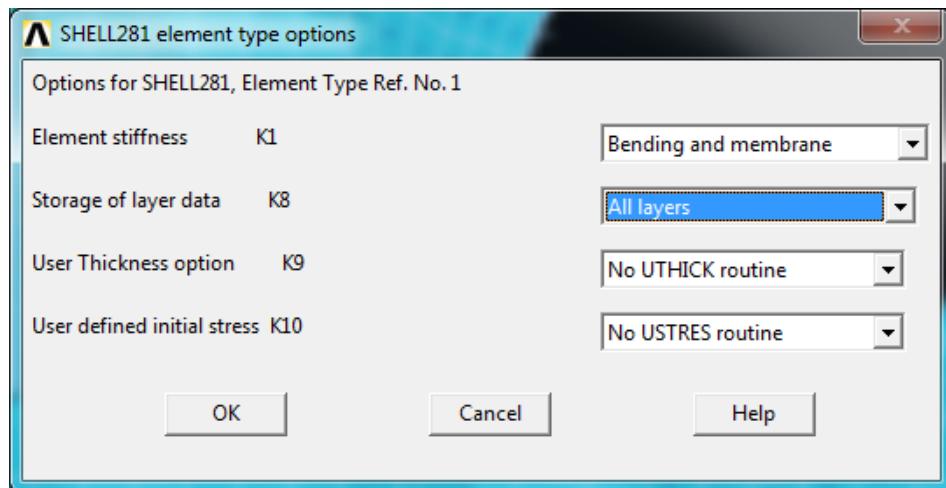


Abbildung5-72: Faserverbundmodell: Keyoptions

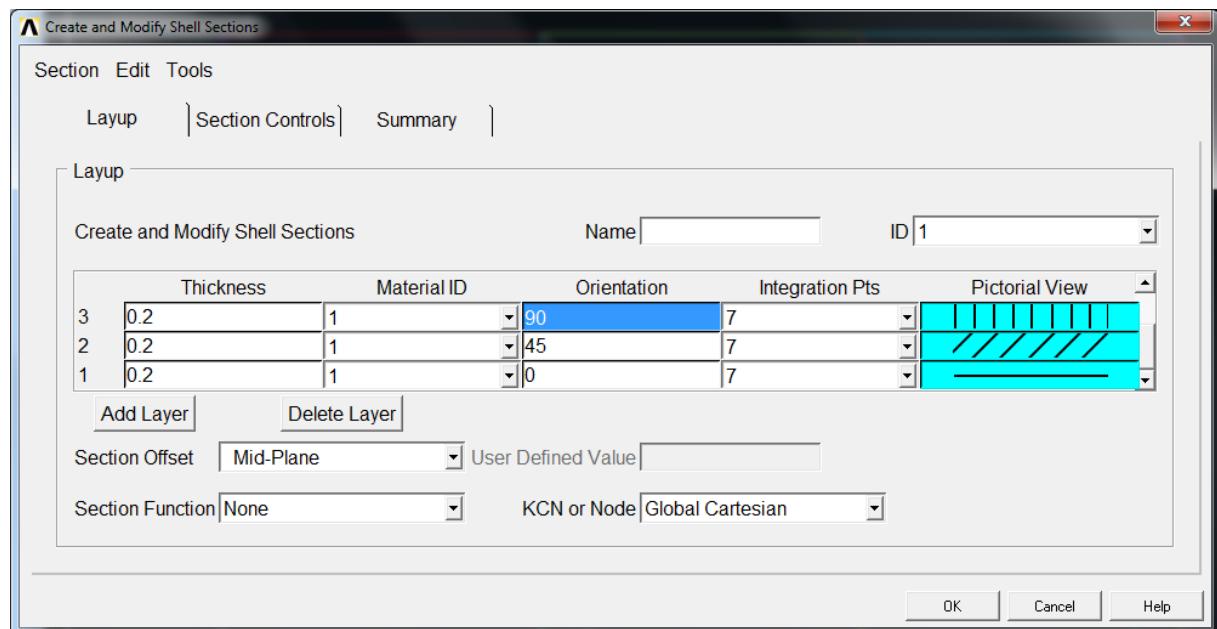


Abbildung5-73: Faserverbundmodell: Parameter der Section

Neben dem Lagenaufbau muss weiterhin noch beim Vernetzen das Elementkoordinatensystem definiert werden, da ansonsten alle Elemente unterschiedliche Koordinatensysteme aufweisen können:

Faserorientierung bei der Berechnung

Dieser Mehrschichtverbund könnte beispielsweise aus einem Gewebe oder Gelege hergestellt sein, d.h. die Fasern laufen nicht radial um die Bohrung herum, sondern parallel zur den Außenkanten, bzw. in dem unter Sections bezüglich dem definierten Winkel bezüglich dem definierten Koordinatensystem. Daher muss hier zwingend vor dem Befehl *amesh, all* in das lokale Koordinatensystem 11 gewechselt werden. Im System 15 würde die Modellierung einem tangentialen Faserverlauf entsprechen.

Kontrolle:

Plot Controls – Symbols – ESYS – on
siehe Abbildung 5-74, die Koordinatenachsen verlaufen waagerecht.

esys,11

amesh,all,

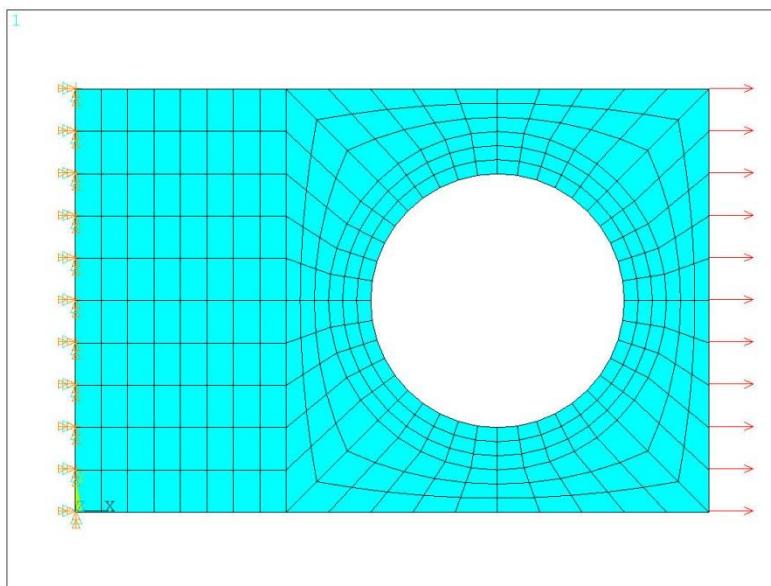


Abbildung 5-74: Faserverbundmodell: Elementkoordinatensysteme entlang der Faserorientierung

Anzeige der Layer

LAYPLOT,1,1,8,

Plot – Layered Elements – ein beliebiges Element auswählen – Layer 1 bis Layer 8

um den Lagenaufbau zu zeigen,
siehe Abbildung 5-75.

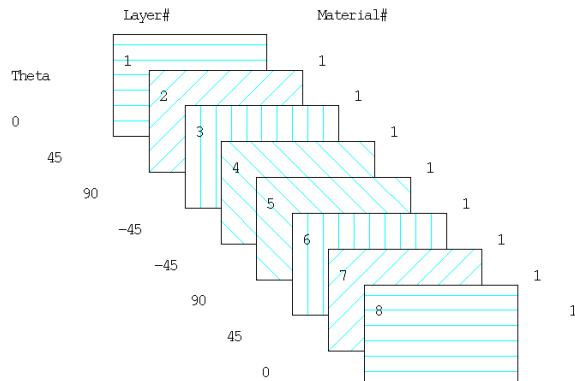


Abbildung 5-75: Faserverbundmodell: Lagenaufbau anzeigen lassen

5.5.2 Solution

Kräfte und Lagerung

F,...

analog zum Schalenmodell ohne Laminat. D,...

5.5.3 Postprozessor

Verformungen anzeigen

Verformung in Faserrichtung (x-Komponente) und quer dazu (y-Richtung)

Skalierung der Anzeige -> deutlicher auch bei kleinen Verformungen

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solution – Stress – x-component of stress

Scale Factor – User Specified – 1000

Spannungen in den einzelnen Lagen

zwischen den unterschiedlichen Lagen wechseln (z.B. Spannungen in Faserrichtung oder senkrecht dazu).

(in der Kommandozeile)

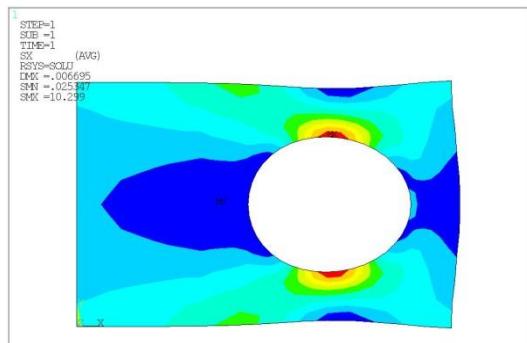
layer, Nummer der Schicht (zur Erinnerung Abbildung 5-73)

Plot in der gewählten Schicht darstellen

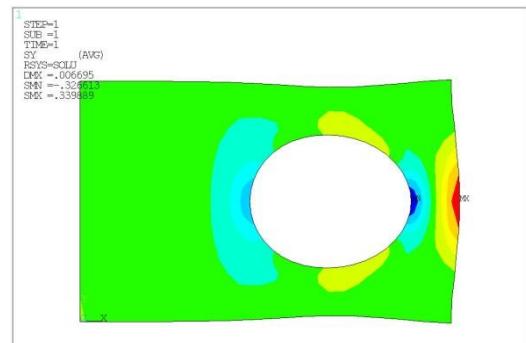
RSYS,SOLU zeigt Ergebnisse in /rep
Elementkoordinaten.

Plots siehe Abbildung5-76

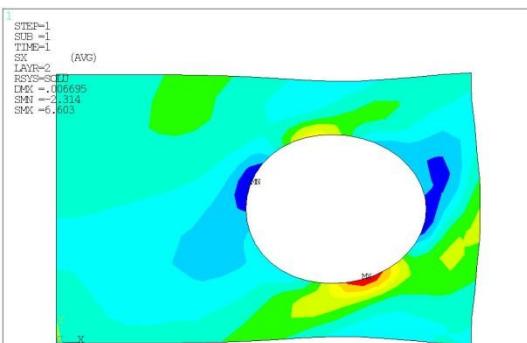
rsys, solu



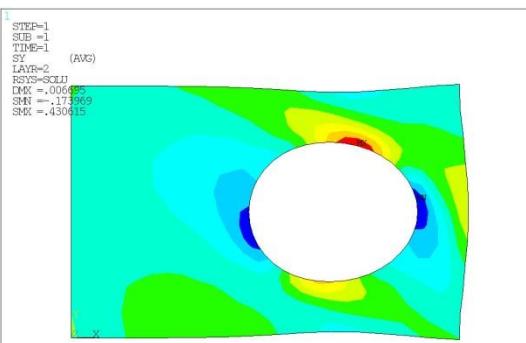
Layer 1 (0°), in Faserrichtung



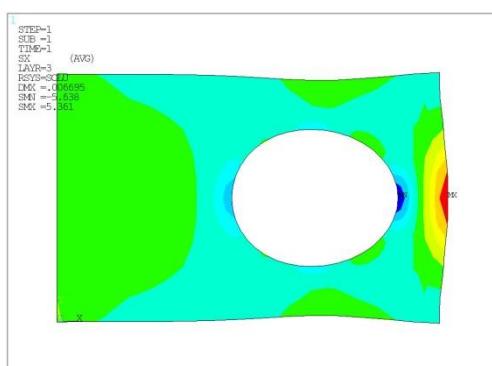
Layer 1, quer zur Faserrichtung



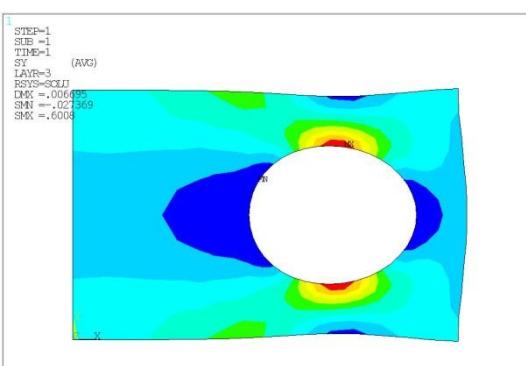
Layer 2 (45°), in Faserrichtung



Layer 2, quer zur Faserrichtung



Layer 3 (90°), in Faserrichtung



Layer 3, quer zur Faserrichtung

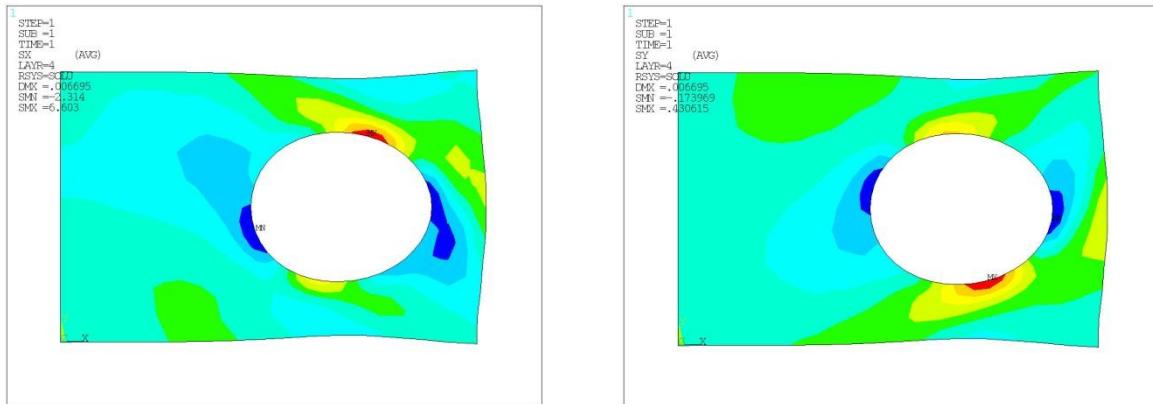


Abbildung5-76: Faserverbundmodell: Spannungen in den unterschiedlichen Schichten

5.6 Beispiel 6: Erzeugen von Koppelbedingungen

Mit den sogenannten Koppelbedingungen bzw. Koppelbefehlen bietet ANSYS die Möglichkeit Beziehungen zwischen verschiedenen Freiheitsgraden einzelner Knoten des FE - Modells zu erstellen. Dies wird vor allem dann notwendig, wenn einzelne Bauteile in der Realität auf verschiedene Weisen miteinander „verbunden“ sind, diese Verbindungen jedoch nicht explizit modelliert werden sollen. Sehr einfache Beispiele dazu sind Klebungen, Schweißnähte, Schrauben, Nieten, Lager, etc. Hierzu sollen nun im Folgenden, anhand von drei Beispielen, die wichtigsten Befehle und ihre Anwendung gezeigt werden.

5.6.1 Der CP – Befehl

Im Falle des CP – Befehls (Coupled degree of freedom) werden die jeweils ausgewählten Freiheitsgrade mehrerer Knoten gleichgesetzt. Dabei besteht die Möglichkeit nur bestimmte Freiheitsgrade gleichzusetzen. In Abbildung5-77 ist exemplarisch das Gleichsetzen (Koppeln) verschiedener Freiheitsgrade (oben:ux unten: ux,uy) an zwei Beispielen dargestellt. Man erkennt, dass bei einer Kopplung des x – Freiheitsgrades die Verschiebung in diese Richtung bei beiden Knoten identisch ist. Für alle anderen Freiheitsgrade ist dies nicht der Fall. Im zweiten Beispiel (unten) werden beide Verschiebungsfreiheitsgrade (ux, uy) gleich gesetzt.

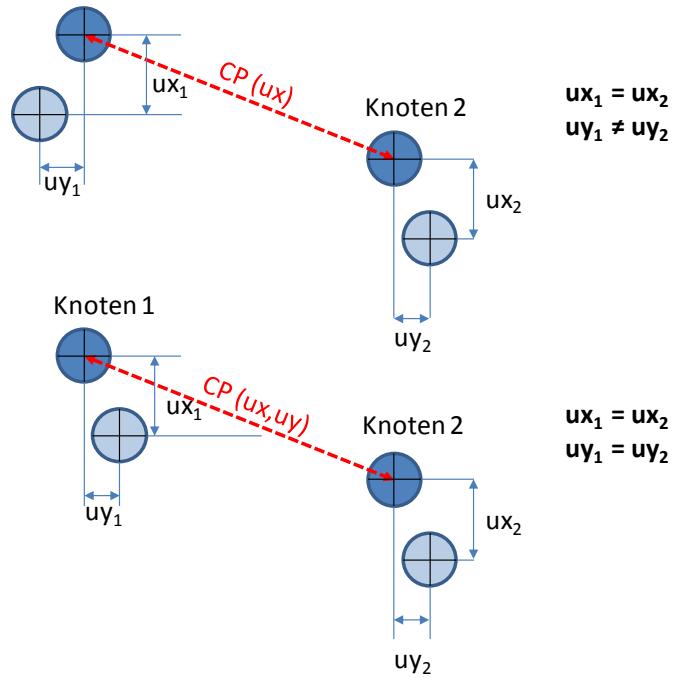


Abbildung 5-77: Koppeln verschiedener Freiheitsgrade, oben: u_x , unten: u_x, u_y

Mit Hilfe dieses Befehls sollen nun im folgenden Beispiel gelenkige Verbindungen zwischen Balken modelliert werden.

Im nachfolgenden Beispiel werden durch Kopplung zwei Gelenke modelliert. Die beiden Gelenke verbinden drei Stäbe miteinander, wobei ein Stab fest eingespannt und ein anderer nur in x-Richtung beweglich gelagert ist. Eine Skizze des zu erstellenden Modells ist in Abbildung 5-78 gezeigt. Alle Stäbe besitzen einen Kreisquerschnitt mit einem Durchmesser von 10mm. Das Material der Stäbe ist Aluminium.

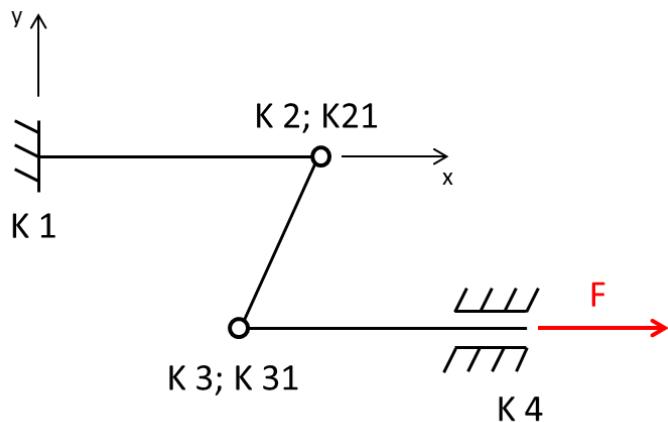


Abbildung 5-78: Gelenkig verbundene Stäbe

Dazu sollen zunächst 6 Keypoints nach Tabelle 5-6 erstellt werden.

Tabelle 5-6: Keypoint Koordinaten und Nummern

	Keypoint - Nummer					
	1	2	21	3	31	4
x - Koordinate	0	120	120	80	80	200
y - Koordinate	0	0	0	-100	-100	-100
z - Koordinate	0	0	0	0	0	0

Anschließend werden aus den Keypoints die jeweiligen Linien erstellt. Dabei ist darauf zu achten, dass die richtigen Keypoints miteinander verbunden werden. Dies ist aus Tabelle 5-7 zu entnehmen.

Tabelle 5-7: Linienerstellung durch Keypoints

Linienummer	Keypoints	
1	1	2
2	21	3
3	31	4

An den Stellen doppelter Keypoints werden die entsprechenden Endknoten der Balkenelemente anschließend in allen Freiheitsgraden, bis auf den Rotationsfreiheitsgrad um die z – Achse, gekoppelt. Danach werden die Stäbe entsprechend der in Abbildung5-78 dargestellten Lagerung gelagert und der untere Stab an seinem rechten Ende mit einer Kraft F von 10N in Stabrichtung belastet.

Das Vorgehen zur Modellierung ist im Folgenden detailliert beschrieben.

5.6.1.1 Preprocessor

Erzeugung der Geometrie

Preprocessor – Modeling – Create – Keypoints – In Active CS K,KP_Nummer,x,y,z

Preprocessor – Modelung – Create – Lines – Straight Line L,Knote1,Knoten2

Definition des Elementtyps

ET,1,188

Element Type – Add/Edit/Delete – Add – “2node 188”

Geometriezusatzinformation

SECTYPE,1,beam,csolid

Preprocessor – Sections – Beam – Common Sections

SECOFFSET,cent

SECDATA,5

Definition eines Materialmodells

MP,ex,1,70000

Preprocessor – Material Props – Material Model

MP,prxy,1,0.33

MP,dens,1,2.7e-9

Vernetzen

LESIZE,all,,10

Preprocessor – Meshing – SizeCntrls – ManualSize – Lines – All Lines LMESH,all

Preprocessor – Meshing – Mesh - Lines

Koppeln aller Knotenpaare an den Gelenken

NSEL,s,...

Selektieren der jeweiligen Knotenpaare

CP,1,ux,all

Preprocessor – Coupling / Ceqn – Couple DOFs

CP,2,uy,all

CP,3,uz,all

CP,4,rotx,all

CP,5,roty,all

5.6.1.2 Solution

Aufbringung der Randbedingungen und Lasten	KSEL,s,kp,,1
<i>Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes</i>	NSLK,s D,all,all
<i>Solution – Define Loads – Apply – Structural – Force/Moments – On Nodes</i>	NSEL,s,loc,x,180,200 D,all,uy,,,,,uz KSEL,s,kp,,4 NSLK,s F,all,fx,-10
Starten der Solution	/SOLU
<i>Solution – Solve – Current LS</i>	SOLVE

5.6.1.3 Postprocessor

Über

General Postproc – Plot Results – Contour Plot – Nodal Solution

zunächst die von Mise Spannungen anzeigen lassen.

Abbildung5-79 zeigt, dass im mittleren Stab bei gelenkiger Verbindung eine konstante Druckspannung herrscht. Aufgrund der gelenkigen Lagerung ist der mittlere Stab somit frei von Biegemomenten. In Abbildung5-80 sind die Spannungen bei einer festen Verbindung der drei Stäbe zu sehen. Deutlich zu erkennen sind hier die Zug – sowie Druckspannungen an den Enden des mittleren Stabes, was auf ein Biegemoment aufgrund der starren Verbindungen deutet. Um die Spannungen in dieser Form sichtbar zu machen müssen die Balkenelemente mit /ESHAPE,1 in ihrer tatsächlichen Geometrie dargestellt werden.

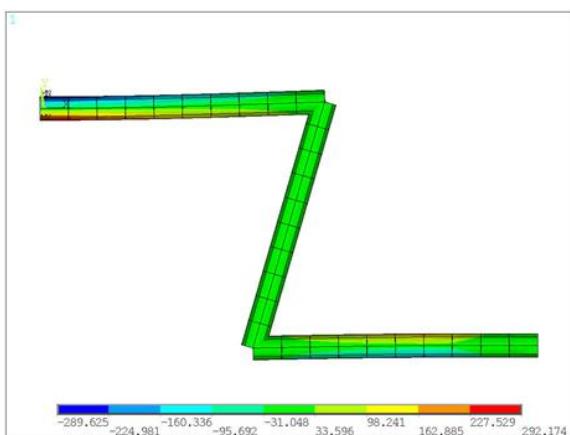


Abbildung5-79: Spannungen bei gelenkiger Verbindung

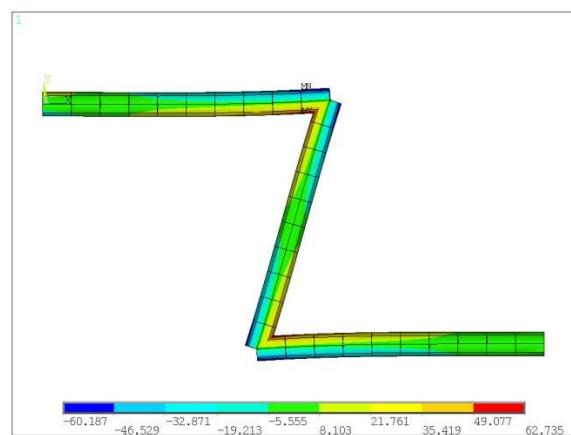


Abbildung5-80: Spannungen bei starker Verbindung

Um Gelenke oder ähnliche Verbindungselemente in ANSYS zu modellieren gäbe es ebenfalls sogenannte COMBIN – Elemente. Diese Elemente sind vor allem für die Modellierung von Federn oder Gelenken geeignet. Sie bieten dabei die Möglichkeit eine bestimmte Dreh - oder Federsteifigkeit in den Gelenken zu berücksichtigen. In diesem Skriptum soll dabei jedoch nicht näher darauf eingegangen werden.

5.6.2 Der CPINTF – Befehl

Eine Variation des CP – Befehls stellt der CPINTF – Befehl dar. Dieser koppelt, wie der CP – Befehl auch, die Freiheitsgrade verschiedener Knoten. Im Unterschied zum CP – Befehl generiert der CPINTF – Befehl jedoch Kopplungen zwischen Knoten, welche in einem definierten Abstand zueinander liegen. Dies ermöglicht die automatische Generierung einer Vielzahl von Kopplungen. Auf diese Weise kann auf die Auswahl einzelner Knoten und das Erstellen einzelner Kopplungssets verzichtet werden. Hierbei ist jedoch darauf zu achten, dass die Toleranz für die Auswahl der zu koppelnden Knoten kleiner als die Netzweite bzw. Elementgröße ist, da ansonsten Kopplungen innerhalb eines Elements auftreten können.

Mit Hilfe des CPINTF – Befehls soll im folgenden Beispiel eine vereinfachte Hängebrücke unter Schwerkrafteinfluss modelliert werden. Die Brücke soll dabei aus 3 rechteckigen Platten bestehen, welche gelenkig miteinander verbunden sind. Die Spannweite der Brücke soll beliebig gewählt werden können. Die Brücke wird mit einer Vorspannung von 10MPa in x – Richtung vorgespannt. Zunächst sollen nun 3 Rechteckflächen nebeneinander erstellt werden, welche nicht miteinander verbunden werden (kein AGLUE!!).

5.6.2.1 Preprocessing

Geometrieerstellung

Rechteck erstellen	RECTNG,0,I,0,b
--------------------	----------------

Preprocessor – Modeling – Create – Areas – Rectangle...

Elementattribute definieren

Material: Aluminium	MP,...
Plattendicke: 7,5mm	ET,...
Elementtyp: Shell 181	SECTYPE,...

Vernetzen der Geometrie

Preprocessor – Meshing – Mesh – Areas	LESIZE,all,,, TYPE,... SECNUM,.... AMES,all
---------------------------------------	--

N – faches Duplizieren der Platten

Preprocessor – Modelling – Copy – Areas - ...	AGEN,3,A_num,,,I
---	------------------

In Abbildung 5-81 ist das Modell nach dem Preprocessing dargestellt. Dabei sollte überprüft werden, ob an den Stoßstellen zwischen den Platten doppelte Knoten vorliegen. In diesem Beispiel sind diese für die spätere gelenkige Kopplung notwendig.

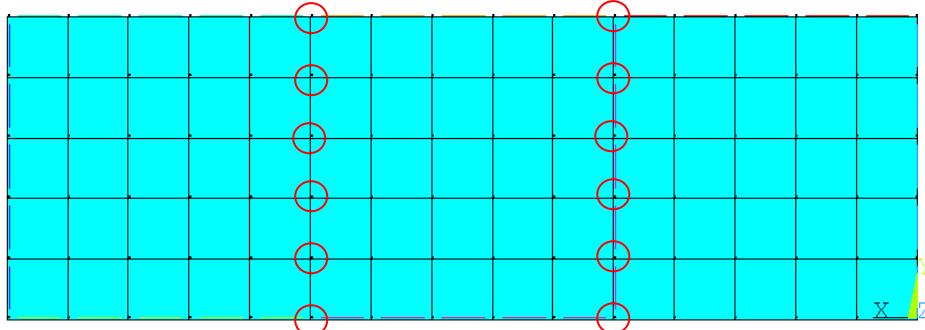


Abbildung 5-81: 3 Platten, vernetzt

5.6.2.2 Solution

Gelenkiges Verbinden der Platten

Preprocessor – Coupling/Ceqn – Coincident Nodes

ALLS
CPINTF,ux,0.0001
CPINTF,uy,0.0001
CPINTF,uz,0.0001

Lagern der Platte

Linkes Lager ($x=0$)

NSEL,s,loc,x,0
NSEL,a,loc,x,N*L

Rechtes Lager ($x=N^*l$)

D,all,all

Aufbringen der Vorspannung

siehe ANSYS Hilfe, kein GUI Befehl vorhanden

ALLS
INISTATE,DEFINE,,,,,10

Starten der Berechnung

/SOLU
ACEL,0,0,9810
SOLVE

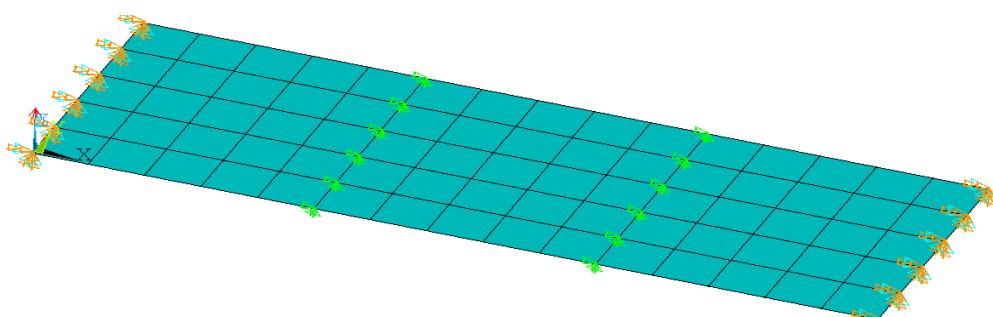


Abbildung 5-82: 3 Platten gekoppelt und gelagert

5.6.2.3 Postprocessing

Ein Plot der Verschiebungen in z – Richtung ist in Abbildung 5-83 abgebildet. Daraus ist die zu erwartende, konstante Verschiebung der mittleren Platte zu erkennen, was auf die gelenkige Lagerung zurückzuführen ist. Die fest eingespannten Platten an den Rändern hingegen eine Biegeverformung auf.

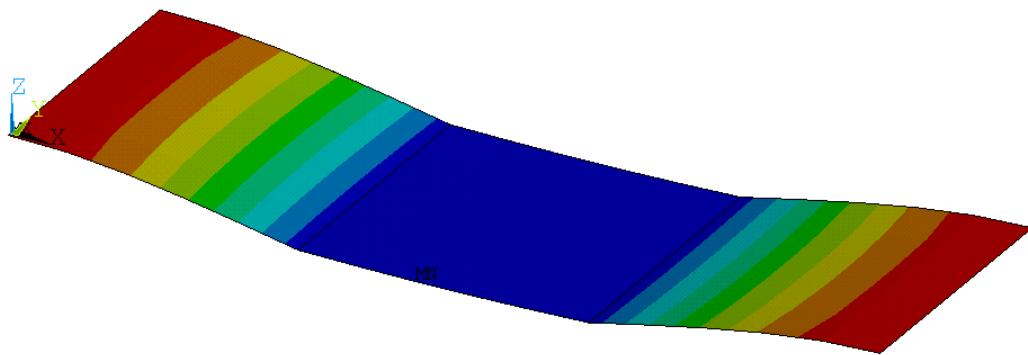


Abbildung 5-83: z – Verschiebungen bei 1g

In Abbildung 5-84 sind die Spannungen in x – Richtung dargestellt. Mit Hilfe des /ESHAPe Befehls lassen sich auch Gradienten über die Plattendicke darstellen. Auch hier ist die unterschiedliche Art der Verformung anhand der Spannungsverläufe zu erkennen. Biegespannungen in den Randplatten, Normalspannungen (kein Gradient über die Höhe) in der Mittelplatte.

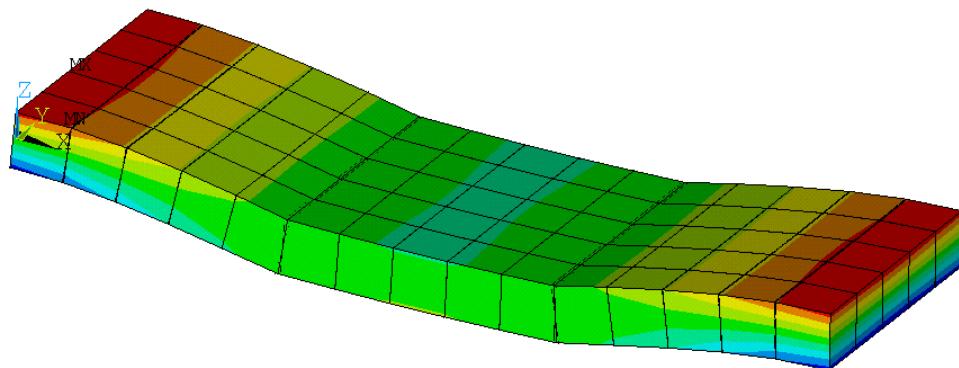


Abbildung 5-84: Spannungen in x – Richtung (/eshape,1)

Zur freien Übung: In diesem Beispiel alle Freiheitsgrade in den Gelenken koppeln und die Spannungs - und Verschiebungsverläufe vergleichen.

5.6.3 Der CERIG – Befehl

Neben den bereits bekannten Koppelbefehlen CP und CPINTF ist ein weiterer, wichtiger Befehl in diesem Zusammenhang der sog. CERIG – Befehl. Der CERIG-Befehl dient dazu, ideal starre Verbindungen zwischen mehreren Knoten zu definieren. Dabei werden ausgehend von einem *Master-Knoten* starre Verbindungen zu den sogenannten *Slave-Knotenerstellt*. Zusätzlich lässt sich festlegen, in welche Richtung diese Verbindung als ideal starr zu betrachten ist. Die Richtung ist dabei im Knoten – Koordinatensystem der *Slave-Knoten* anzugeben. Der CERIG Befehl kann generell nur zwischen Knoten ausgeführt werden, welche einem Element angehören.

Der Unterschied zu den bereits bekannten Koppelbefehlen CP und CPINTF besteht also darin, dass nun nicht die Freiheitsgrade verschiedener Knoten gleichgesetzt werden, sondern eine starre Verbindung zwischen diesen erzeugt wird. Dies kann beispielsweise bedeuten, dass durch die Verschiebung eines Slave – Knotens in eine Richtung eine Verschiebung **und** Rotation des Master – Knotens entsteht. Bei Verwendung des CP oder CPINTF Befehls wären die Verschiebungen der beiden betreffenden Knoten identisch. Eine Skizze zur Veranschaulichung der Unterschiede in den Befehlen ist in Abbildung5-85 gezeigt. Die einzelnen Verschiebungen oder Rotationen der Master – und Slave – Knoten sind dabei abhängig von den jeweiligen Steifigkeiten denen die Knoten angehören.

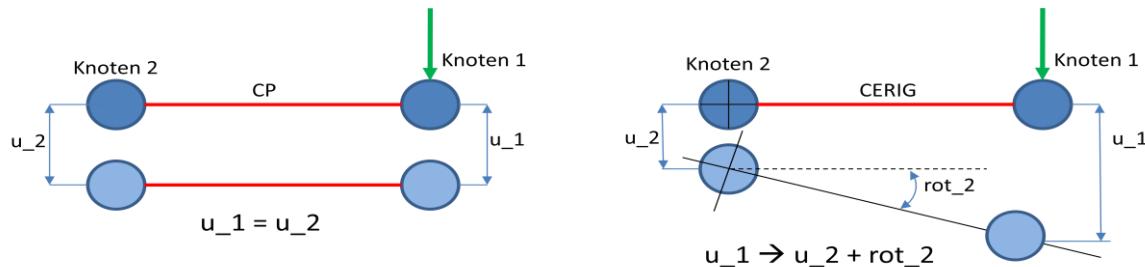


Abbildung5-85: Unterschied zwischen CP/CPINTF und CERIG

Als anschauliches Beispiel, wie dieser CERIG – Befehl verwendet wird, soll im Folgenden, eine Lasteinleitungsstelle mittels eines Bolzens(vgl.5.4), auf eine etwas andere modelliert werden. Hierbei besteht die Herausforderung darin, den Kraftverlauf auf die Lochleibung zu modellieren. Vernachlässigt man Reibungseffekte, so können Kräfte vom Bolzen lediglich in normaler Richtung (radial) vom Bolzen auf die Lochleibung übertragen werden. In Abbildung5-86 ist dies in Form einer vereinfachten Skizze dargestellt.

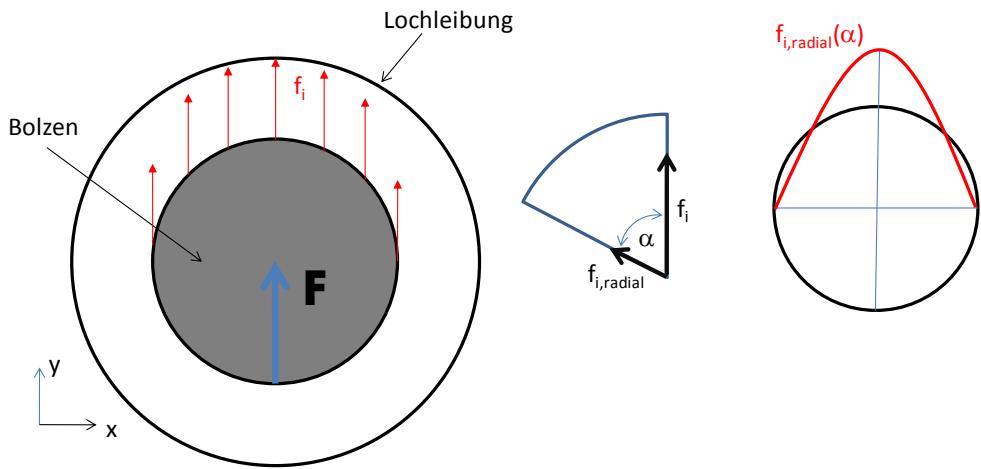


Abbildung 5-86: Verlauf der Lochleibungskräfte

Um nun den oben dargestellten Verlauf der Kräfte entlang der Lochleibung sinnvoll zu modellieren soll im Folgenden der CERIG – Befehl benutzt werden. Durch gezielte Wahl der gekoppelten Freiheitsgrade kann nun genau diese Art der Lasteinleitung modelliert werden. Ein wichtiger Schritt um dies zu ermöglichen, ist die Ausrichtung der Knotenkoordinatensysteme an einem Zylinderkoordinatensystem in Bohrungsmitte. Die prinzipielle Idee bei der Modellierung ist in Abbildung 5-87 schematisch dargestellt. Dabei wird zunächst in Bohrungsmitte ein sogenanntes Masselement (MASS21) erstellt welches einen Knoten mit sechs Freiheitsgraden besitzt. Dieses Element soll die Masse 0 besitzen und wird benötigt um die Möglichkeit der zentralen Lasteinleitung zu bieten. Anschließend sollen die Knotenkoordinatensysteme der Knoten an der Lochleibung an einem Zylinderkoordinatensystem ausgerichtet werden, welches im Zentrum der Bohrung liegt. Dadurch wird erreicht, dass nur Freiheitsgrade in radialer Richtung (x - Richtung im Knoten – KOSY) gekoppelt werden können. Am Ende wird die Kraft F auf den Knoten des Masselements in x - Richtung aufgebracht.

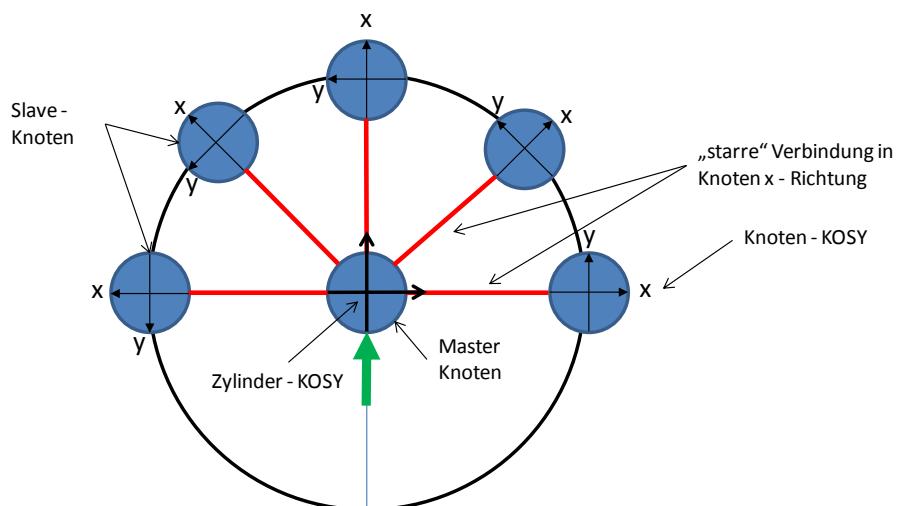


Abbildung 5-87: Idee der „radialen“ Kopplung mit CERIG und Zylinderkoordinaten

5.6.3.1 Preprocessor

Bei der Modellierung dieses Beispiels soll als Ausgangsbasis das Modell aus 5.4 verwendet werden. Die Geometrieerstellung sowie die Vernetzung aus diesem Beispiel kann direkt übernommen werden. Das weitere Vorgehen wird im Folgenden erläutert.

Wechseln ins vorhandene Lokale KOSY Nr.15

WorkPlane – Change Active CS to – Specified Coord Sys CSYS,15

....

Erstellen eines Keypoints in der Bohrungsmitte

K,,0,0,0

Preprocessor – Modeling – Create – Keypoints – In Active CS

K_center=_return

Ausrichten des Knotenkoordinatensystems der Randknoten der Bohrung in radiale Richtung

NSEL,s,loc,x,R

Preprocessor – Modeling – Create – Nodes – Rotate Node CS – To Active CS

NROTAT,all

Knoten auf erstelltem KP erzeugen

Preprocessor – Modeling – Create – Nodes – On Keypoints

NKPT,,K_CENT

NSEL,s,loc,x,0

NSEL,r,loc,y,0

*GET,N_center,node,,nxth

Massenelement auf Knoten in Mittelpunkt erstellen

ET,2,21

Preprocessor – Element Type – Add/Edit/Delete – Add „3D mass 21“

R,1,0,0,0

(alle Massen =0)

Preprocessor – Real Constants – Add/Edit/Delete

TYPE,2

Preprocessor – Modeling – Create – Elements – Auto Numbered – Thru Nodes

E,N_center

Das Massenelement wird benötigt um somit einen Knoten zur Lasteinleitung zu erhalten. Ebenfalls kann der CERIG Befehl nur an Knoten durchgeführt werden, welche einem Element angehören.

Erzeugen der Kopplung

Auswählen des Halbkreisbogens und des Masterknotens für die Kopplung
Preprocessor – Coupling/Ceqn – Rigid Region

NSEL,s,loc,x,r
NSEL,u,loc,y,91,269
NSEL,a,node,,N_cent
CERIG,N_cent,all,ux

5.6.3.2 Solution

Abbildung5-88 zeigt das fertige Modell bevor die Solution gestartet werden kann.

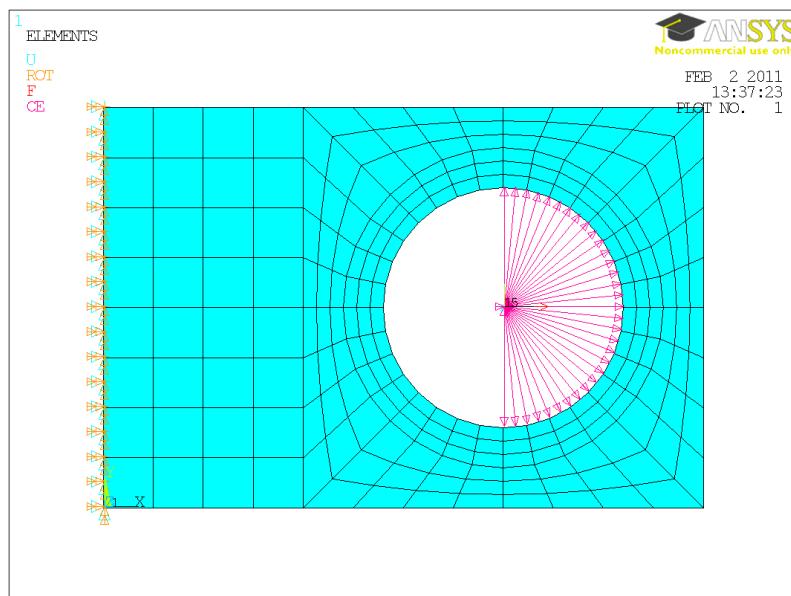


Abbildung5-88: Modell einer Lasteinleitungsstelle mittels Bolzen

Ist das Modell soweit erstellt kann die Solution gestartet werden.

Kräfte aufbringen

1000N in positive x-Richtung auf den Masterknoten

Solution – Define Loads – Apply – Force/Moment – On F,all,fx,1000 Nodes

Lagerung

Am linken Rand der Platte ($x=0$ in CSYS 0) CSYS,0

Solution – Define Loads – Apply – Structural – Displacement – On Nodes D,all,all

Berechnung

Solution – Solve – Current LS /SOLU
 SOLVE

5.6.3.3 Postprocessing

In diesem Beispiel soll besonders der Wechsel zwischen verschiedenen Ergebniskoordinatensystemen (Resultsystems, RSYS) gezeigt und verstanden werden. Dazu sind zunächst in Abbildung 5-89 die Spannungen im globalen, kartesischen Koordinatensystem in x – und y – Richtung in Form von Contourplots dargestellt.

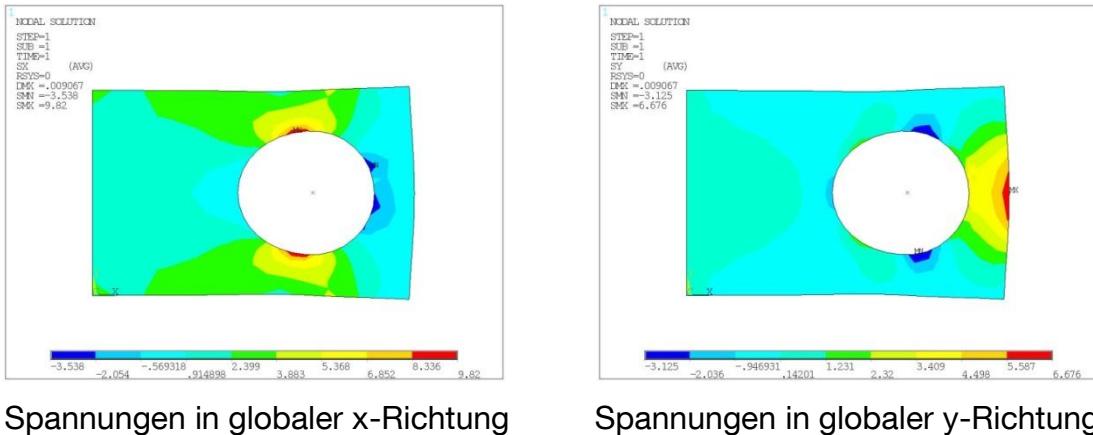


Abbildung 5-89: Spannungsplot in globaler x – und y – Richtung

Durch wechseln des Result – Koordinatensystems (RSYS) ins Zylinderkoordinatensystem im Bohrungsmittelpunkt (RSYS,15), können die Spannungen in Radialrichtung (x-Richtung im zylindrischen Koordinatensystem) und Umfangsrichtung (y-Richtung im zylindrischen Koordinatensystem) angezeigt werden.

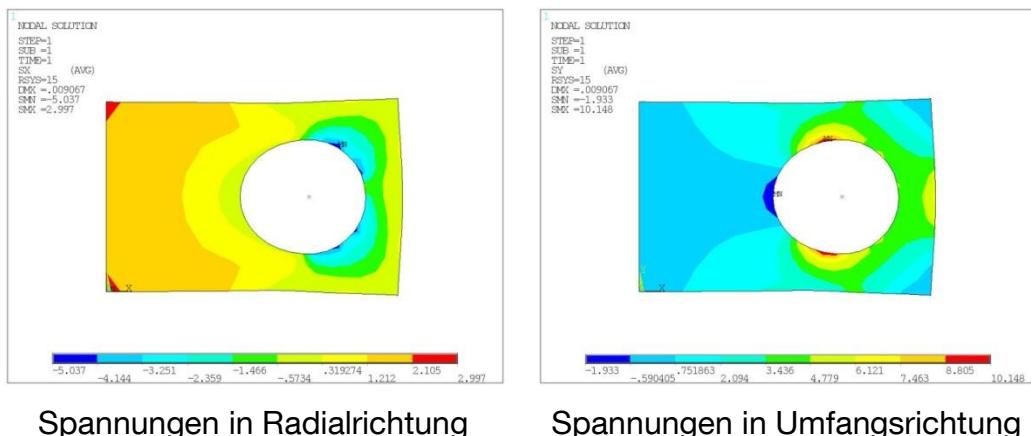


Abbildung 5-90: Spannungsplot in radialer – und tangentialer Richtung

Um das Modell zu verifizieren ist es an dieser Stelle der Analyse sinnvoll sich die Reaktionskräfte ausgeben zu lassen. Dies geschieht über

General Postproc – List Results – Reaction Solution – All Items

Dabei sollten die Lagerreaktionen in x – Richtung der aufgebrachten Kraft F von 1000N entsprechen. Alle anderen Lagerreaktionen sollten bei 0 liegen.

Ergänzend soll in diesem Beispiel nun der besprochene *vwriteln – Befehl benutzt werden um Ergebniswert in ein Textdokument zu schreiben. Dabei sollen alle Spannungen (σ_{radial} , $\sigma_{\text{tangential}}$) entlang der Lochleibung in eine Textdatei geschrieben werden. Dazu soll zunächst eine Matrix erstellt werden, in der Knotennummer, Knotenkoordinaten sowie die beiden Spannungen eingetragen werden. Diese Matrix wird im Folgenden mit Hilfe des *MWRITE – Befehls in eine Textdatei geschrieben.

5.7 Beispiel 7: Geometrieimport aus Catia – Volumenmodell

Neben dem modellieren von Geometrischen Elementen in ANSYS ist auch der Geometrieimport aus einem CAD System möglich. In diesem Beispiel werden die Geometriedaten aus Catia V5 mittels der standardisierten IGES Schnittstelle exportiert und in ANSYS importiert.

Die Hauptschwierigkeit bei der Verwendung von Schnittstellen ist, dass in der Regel in der Schnittstelle weniger Daten enthalten sind als im ursprünglichen Modell. Insbesondere Änderungen am Modell sind in der Regel nach der Speicherung im Schnittstellenformat nicht mehr möglich.

Weiterhin ist oftmals problematisch, dass einige Programme nicht hundertprozentig das Schnittstellenformat umsetzen. Catia zum Beispiel, hat oftmals Probleme Verschneide- oder Trimmoperationen in das IGES-Format zu übersetzen. Abhilfe schafft hier ein erneutes Einlesen des zuvor erzeugten IGES-Files in Catia und nochmaliges speichern in diesem. Erst jetzt können alle Informationen in ANSYS eingelesen werden.

Weitere Möglichkeiten CAD-Daten in FEM-Daten zu überführen werden später gezeigt.

5.7.1 Aufbereitung der CAD-Daten

Nachdem die Datei Winkel.CATPart in Catia geöffnet wurde, kann diese mit dem Befehl

-> *Datei -> Speichern Unter*

im IGES Format gespeichert werden. (Winkel.igs).

Nach dem Importieren von Winkel.igs in Catia und erneutem Abspeichern im IGES-Format (Winkel_1.igs), ist die Datei in ANSYS importierbar.

5.7.2 Importieren der CAD-Daten in ANSYS

Die CAD-Daten können über die GUI oder über ein Inputfile importiert werden.

5.7.2.1 GUI-Methode

In der GUI lässt sich die IGES-Datei mit dem Befehl

-> *File -> Import -> IGES...*

importieren.

Daraufhin öffnen sich die folgenden Fenster:

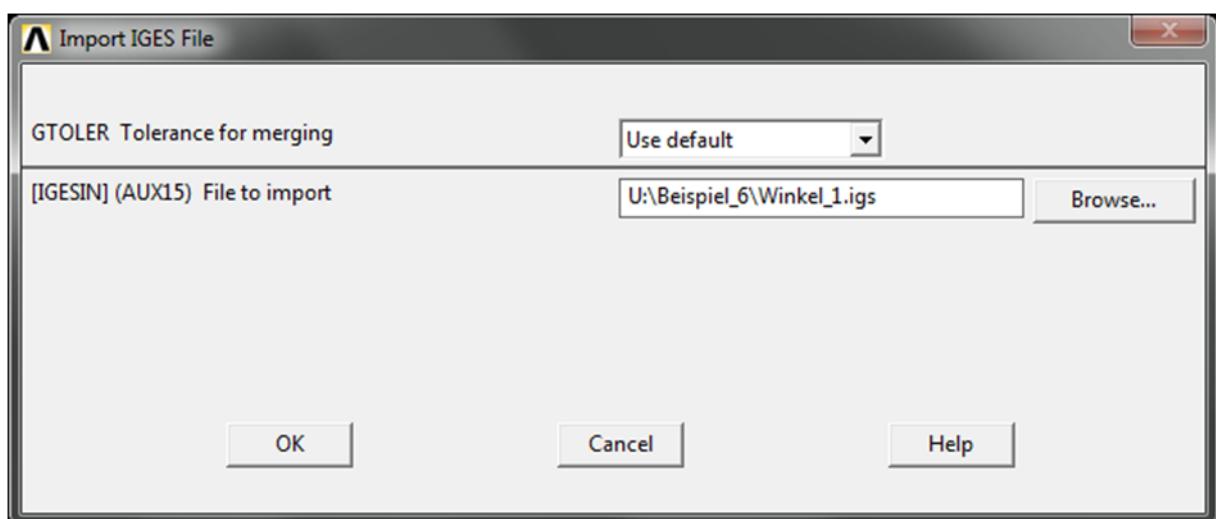
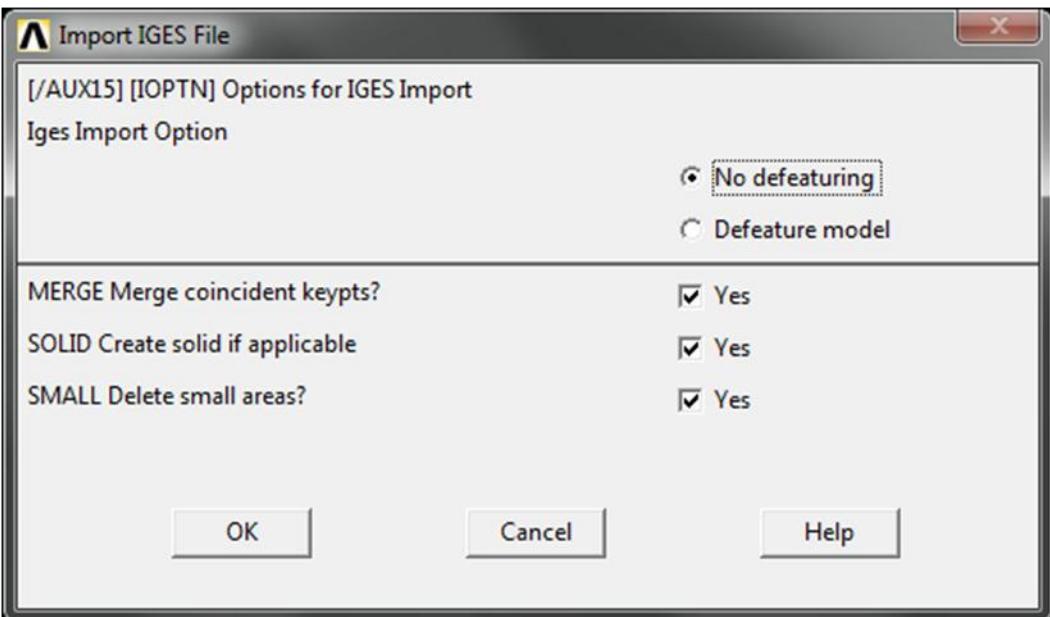


Abbildung5-91: Volumenmodell: IGES GUI Import

5.7.2.2 Inputfile Code

```

1) /AUX15
2) IOPTN,IGES,NODEFEAT           ! DEFEATURE MODEL
3) IOPTN,MERGE,YES               ! MERGE COINC: KEYPOINTS Y/N
4) IOPTN,SOLID,YES              ! CREATE SOLID IF APPLICABLE
5) IOPTN,SMALL,YES               ! DELETE SMALL AREAS Y/N
6) IOPTN,GTOLER, DEFA            ! GLOBAL TOLERANCE FROM MODEL
7) IGESIN,'Winkel_1','igs','U:\Beispiel_6\'   ! PFAD ANGABE

```

5.7.3 Vernetzen in ANSYS

Für das Vernetzen in ANSYS kann hier wieder das zuvor verwendete Solid45 Element verwendet werden, allerdings ist die Geometrie des Volumens so unregelmäßig, dass eine geregelte Vernetzung mit Quadern nicht möglich ist. Hierzu muss der Free-mesher verwendet werden, der automatisch Tetraeder-Elemente verwendet. Da das Solid45 Element dabei mehrere Knoten zu einem zusammenführt, solle hierfür evtl. ein anderes Solid Element verwendet werden, dass nur Tetraeder verwendet, z.B. Solid187.

Weitere benötigte Daten:

- Material: Aluminium
- globale Netzgröße: 5mm
- Lagerung an den 4 kleinen Bohrungen
- Belastung an der großen Bohrung

Die folgende Abbildung zeigt das unregelmäßig vernetzte Modell:



Abbildung5-92: Volumenmodell: Vernetztes Modell

5.7.4 FEM-Berechnung

Die restlichen Schritte erfolgen analog zum bisher Gelernten.

5.8 Beispiel 8: Nichtlinearitäten

Neben den bisher betrachteten statisch linearen Beispielen, muss im Leichtbau auch nichtlineares Verhalten betrachtet werden. Hierzu gehören

- Geometrische Nichtlinearitäten
- Werkstoff Nichtlinearitäten

Nichtlineare Berechnungen erfolgen Iterativ, indem die Last schrittweise erhöht wird. Dabei kann die Belastung mit dem verformten Bauteil wandern. Dies ist notwendig, da sich bei großen Verformungen sowohl der Lastangriffspunkt als auch die Richtung der Last ändern. Eine Nichtlineare Berechnung ist daher deutlich zeitaufwändiger als eine lineare Berechnung.

In beiden Fällen wird im Folgenden das Geometriemodell des Balkenmodells mit Schalenvernetzung verwendet (Beispiel 1.3).

5.8.1 Geometrische Nichtlinearitäten

Geometrisch nichtlineares Verhalten liegt dann vor, wenn die Verformungen des Modells groß gegenüber den Dimensionen sind. Bei Schalen/Platten kann man zum Beispiel bei Belastungen senkrecht zur Plattenebene davon ausgehen, dass ein geometrisch nichtlineares Verhalten vorliegt, wenn die Verformungen größer sind als die Schalen/Plattendicke.

5.8.1.1 Preprocessor

Im Preprocessor wird das Inputfile aus Beispiel 1.3 übernommen:

File – read input from – Auswahl

5.8.1.2 Solution

Auch für die nichtlineare Analyse müssen zunächst Lagerungen und Belastungen definiert werden:

Einspannung	/solu
Solution starten	nsel,s,loc,x,0
Feste Einspannung in (0,0,0)	d,all,all,0
	alls
Lasten	nsel,s,loc,y,0,
Aufbringen einer verteilten Kraft auf alle Knoten am Steg (Balkenende).	nsel,r,loc,x,1000 *get,nanz,node,,count f,all,fz,-100000/nanz alls

Die Änderungen für eine nichtlineare Analyse beziehen sich hauptsächlich auf die Konfigurierung der Analyse:

Statische Analyse antype,0

Solution - Parameter nlgeom,on

Die nichtlineare Analyse muss über

Solution – Analysis Type – Sol’n Controls
näher definiert werden, siehe
Abbildung5-93.

Große Auslenkungen ermöglichen -> nicht-lineares Modell

... - Large Displacement Static

... - Automatic Time Stepping – On autots,on

Passt die Anzahl der Iterationsschritte automatisch an, falls benötigt.

... - Number of Substeps – 5 nsubst,5,1000,1

Falls die Lösung nicht konvergiert, soll die Berechnung abgebrochen werden, in diesem Fall nach 1000 Berechnungsschritten.

... - Maximum number of substeps – 1000

... - min. number of substeps 1

Die errechneten Daten sollen alle in das „result file“ geschrieben werden. autres,all,all

... - Write items to result file – all solution items

(Standard: nur der letzte Schritt wird geschrieben)

Diese Option ist sehr hilfreich, um das Modell debuggen zu können falls keine Konvergenz erzielt werden kann.

Berechnung solve

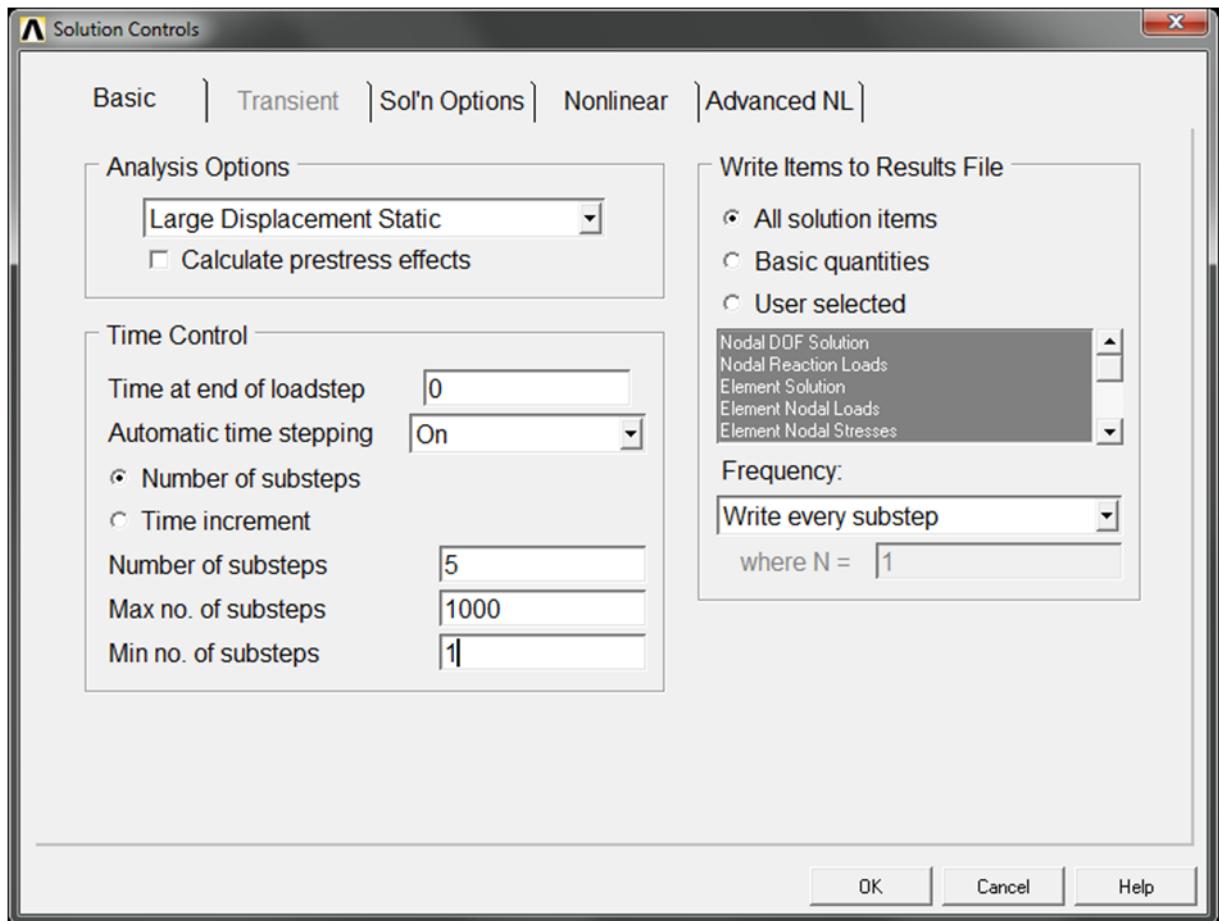


Abbildung 5-93: Geometrische Nichtlinearität: Solution – Parameter

5.8.1.3 Postprozessor

Die Verformungen können nun wie gewohnt dargestellt werden:

Anzeige der Verformung

siehe Abbildung Abbildung 5-94.

/post1

plnsol,u,z,0,1.0

Zwischenergebnisse für die einzelnen Belastungsschritte können mit Hilfe der Kommandozeile angezeigt werden.

set,1,Nummer des Zwischenschritts

! letzter Zwischenschritt:

set,1,last

Dies liefert das folgende Ergebnis für den letzten Substep. Es ist zu sehen, dass neben der globalen Biegung, die auch in der linearen Berechnung sichtbar war, in der nichtlinearen Berechnung auch noch lokale Beuleffekte im Druckbelasteten unteren Gurt des Trägers in der Nähe der Einspannung zu sehen sind.

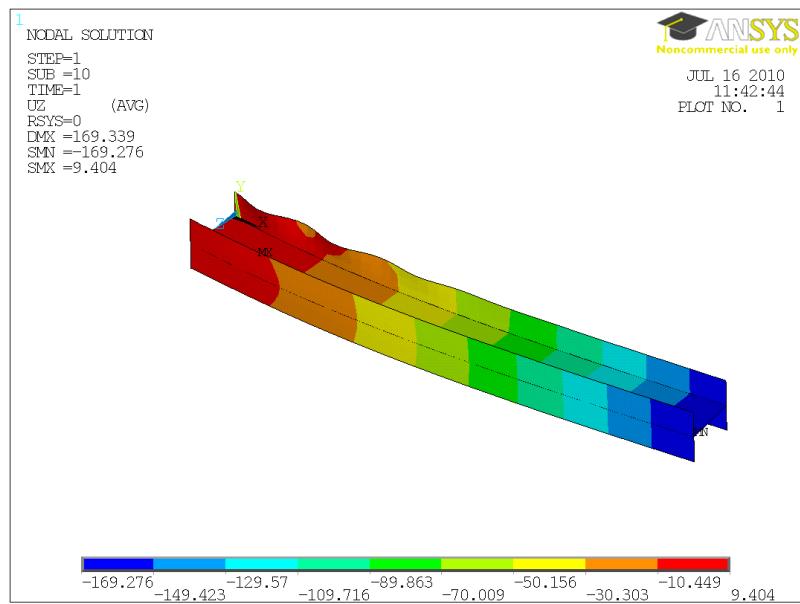
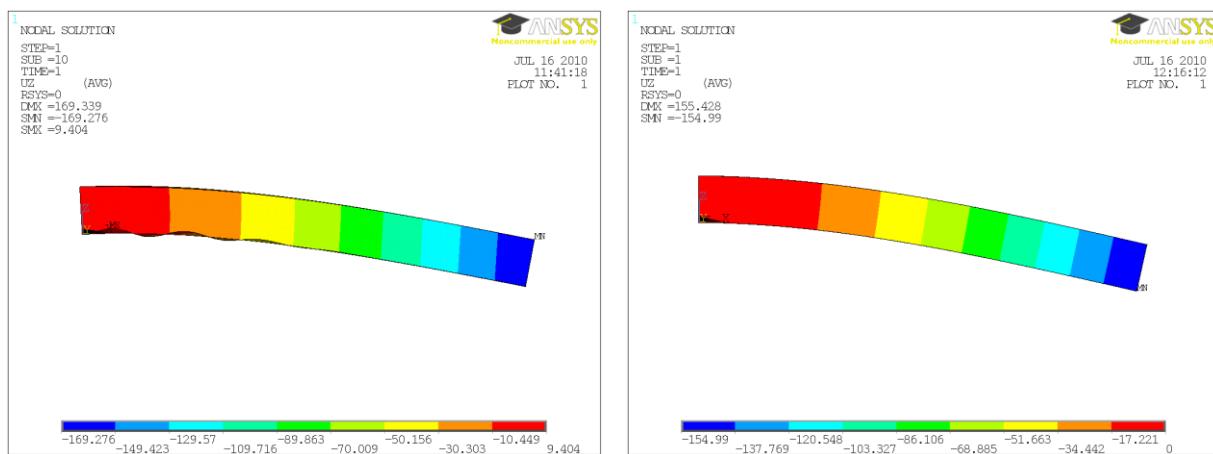


Abbildung5-94: Geometrische Nichtlinearität: Verformungen in der z-Achsenrichtung

Die Unterschiede zwischen linearer und nichtlinearer Berechnung sind im nachfolgenden Bild gezeigt:



- a) nicht-lineare Berechnung
min. Verschiebung: -169mm
max. Verschiebung: -9.4mm

- b) lineare Berechnung
min. Verschiebung: -154mm
max. Verschiebung: 0mm

Abbildung5-95: Geometrische Nichtlinearität: Verformungsvergleich in der z-Achsenrichtung Nichtlinear - Linear

5.8.2 Werkstoff Nichtlinearitäten

Um auch plastizierendes Werkstoffverhalten modellieren zu können, muss ein nichtlineares Werkstoffmodell definiert werden. D.h. der E-Modul ist jetzt abhängig von der Dehnung, siehe:

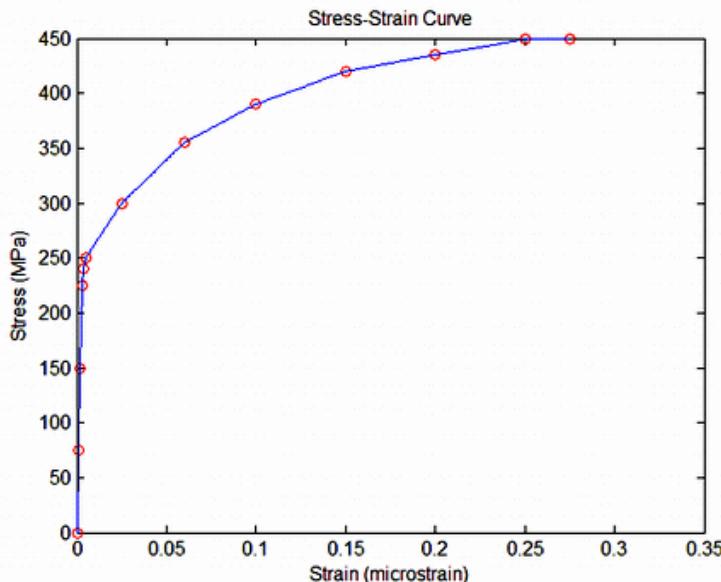


Abbildung5-96: Werkstoff Nichtlinearität: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

5.8.2.1 Preprocessor

Im Preprocessor wird das Inputfile aus Beispiel 1.3 übernommen:

File – read input from – Auswahl

Für den ersten Berechnungsdurchgang mp,ex,1,75000
muss ein Startelastizitätsmodul angegeben
werden

Allerdings müssen nun die Werkstoffparameter geändert werden. Ein nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Diagramm lässt sich in ANSYS über ein multilinear elastisches Werkstoffmodell (MISO) mit bis zu 100 Punkten definieren.

Nicht-lineares Materialgesetz

*Preprocessor – Material Models – Structural
– non-linear – elastic – multi-linear* tb,miso,1,1,12,
tbtemp,0

siehe Abbildung5-97

Hier nun die Punkte aus Tabelle 5-8
eingeben, jeweils mit *Add Point* zum
nächsten Punkt wechseln, die enthaltenen
Werte sind dem Spannungs-Dehnungs-
Diagramm aus Abbildung5-96entnommen.

Danach den Graph anzeigen und mit ok
bestätigen.

Um zur Geometrieanzeige zurück zu /rep
wechseln:

Hier jeweils die Spannungs-Dehnungswerte
hintereinander eingeben.

tbpt,,0.001,75
tbpt,,0.002,150
etc.

Hier sind beispielhaft die folgenden Punkte eingetragen worden:

Tabelle 5-8: Werkstoff Nichtlinearität: Stützpunkte des Spannungs-Dehnungs-Diagramms

Punkt	Dehnung	Spannung [MPa]
1	0	0
2	0.001	75
3	0.002	150
4	0.003	225
5	0.004	240
6	0.005	250
7	0.025	300
8	0.060	355
9	0.100	390
10	0.150	420
11	0.200	435
12	0.250	449
13	0.275	450

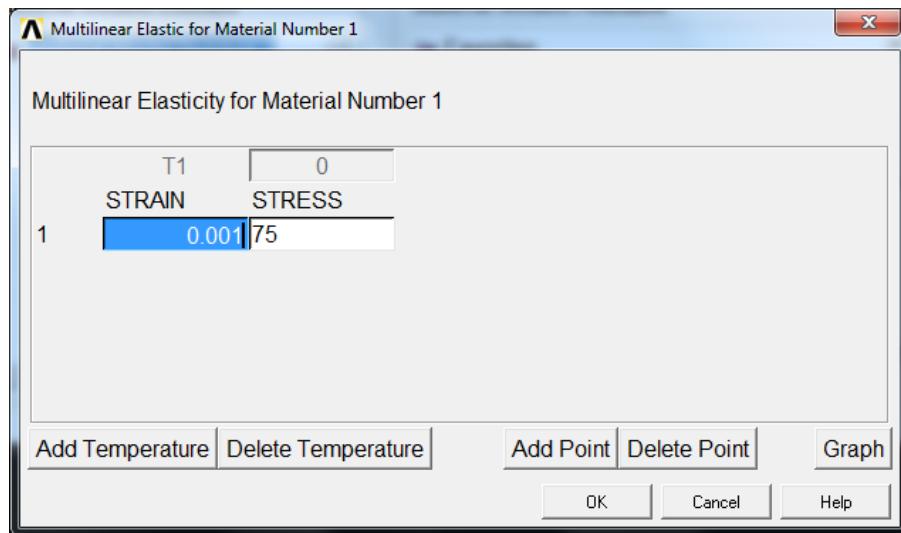


Abbildung5-97: Werkstoff Nichtlinearität: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – GUI

5.8.2.2 Solution

Die Solution Einstellungen erfolgen analog zum vorherigen Beispiel, jedoch mit fester Schrittweite und es sollten noch die folgenden zusätzlichen Optionen eingestellt werden:

- Linesearch anschalten (Konvergenzhilfe)
- Abbruchkriterium für Nichtkonvergenz

Solution – Parameter – nicht linear nlgeom,on

Solution – Analysis Type – Sol'n Controls autots,off

nsubst,50,1000,1

outres,all,all

im Reiter *non linear* werden Änderungen vorgenommen, siehe Abbildung5-98
Insrch,on

neqit,1000

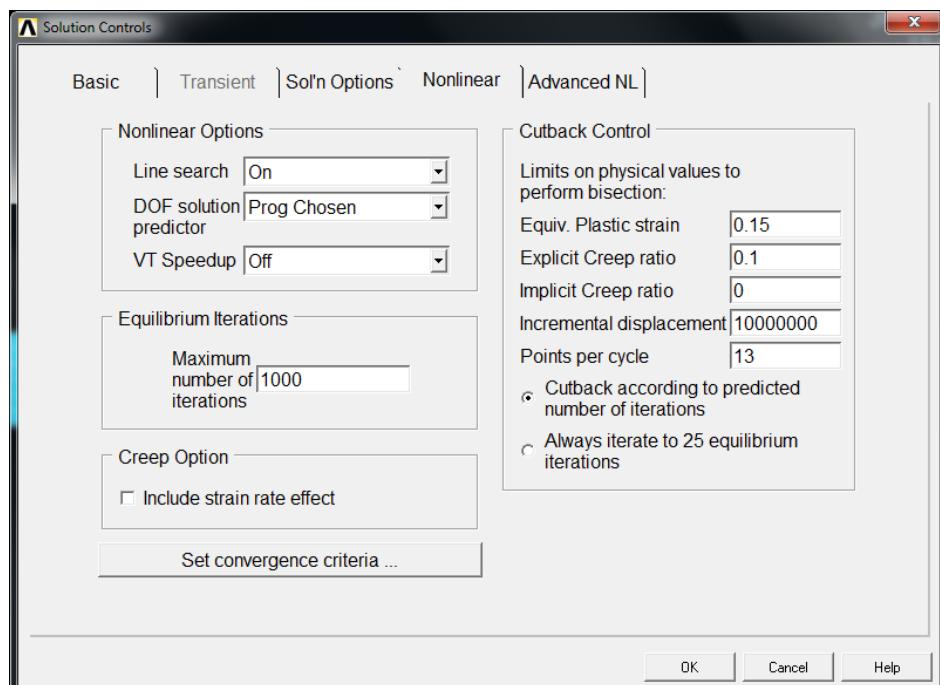


Abbildung5-98: Werkstoff Nichtlinearität: Solution – Parameter; Registrierkarte Nonlinear (erweiterte Optionen)

Die Belastung soll in diesem Beispiel eine Zwangsverschiebung in Balkenlängsrichtung sein:

```
nsel,s,loc,x,1000
*get,nanz,node,,count
d,all,ux,10
```

5.8.2.3 Postprozessor

Um nun die Änderung der Verformung in Abhängigkeit der Last anzeigen zu können, um der TimeHist Prostprozessor (/post26) verwendet werden.

Verlauf Verformung über Kraft

/post26

TimeHist Postproc – Variable Viewer - Add Data

zunächst *Nodal Solution – DOF Solution – x-component of displacement*, dann einen Knoten am Balkenende auswählen.

nsol,3,Knotennummer,u,x, ux_3

Dann *Reaction Forces > Structural Forces > x-Component of Force* und einen Knoten an der Einspannstelle auswählen. Die Kraft dann als x-Achse festlegen.

rforce,2,Knotennummer,f,x, fx_4

Im nächsten Schritt die Verschiebung anwählen und über *Graph Data* den Verlauf anzeigen lassen, siehe Abbildung5-99

xvar,2

Man sieht, dass dem nichtlinearen Materialgesetz entsprechend, die Verschiebung nichtlinear über der Kraft zunimmt.

plvar,3, !Verlauf der Variable 3,
also Verschiebung darstellen

Graph beschriften

/axlab,y,Verschiebung

Über *Plot Controls – Style – Graphs – Modify Axes* können

/axlab,x,Kraft

die Achsen beschriftet werden, also Kraft und Verschiebung jeweils eintragen, Anzeige über /rep in der Kommandozeile

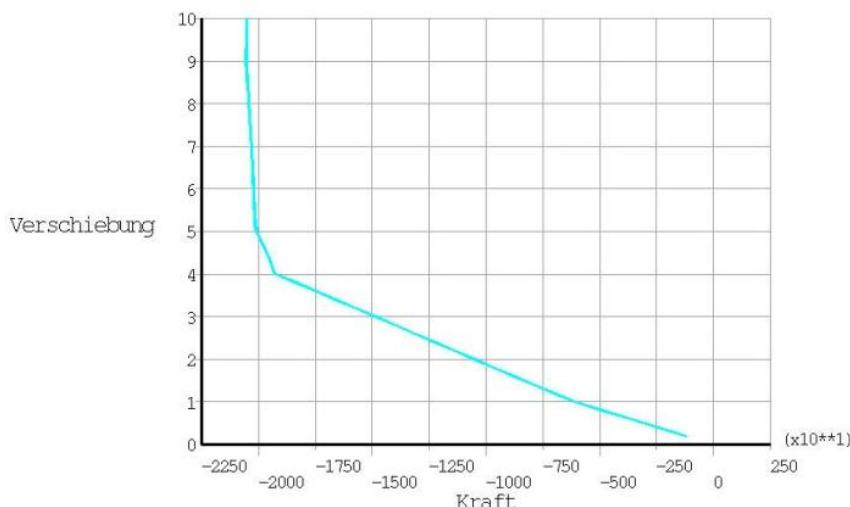


Abbildung5-99: Werkstoff Nichtlinearität: Verlauf der Verschiebung in x-Richtung über der Kraft

Der TimeHist Postprozessor lässt sich auch mit der GUI bedienen. Durch klicken auf diesen, öffnet sich das Fenster „Variable Viewer“:

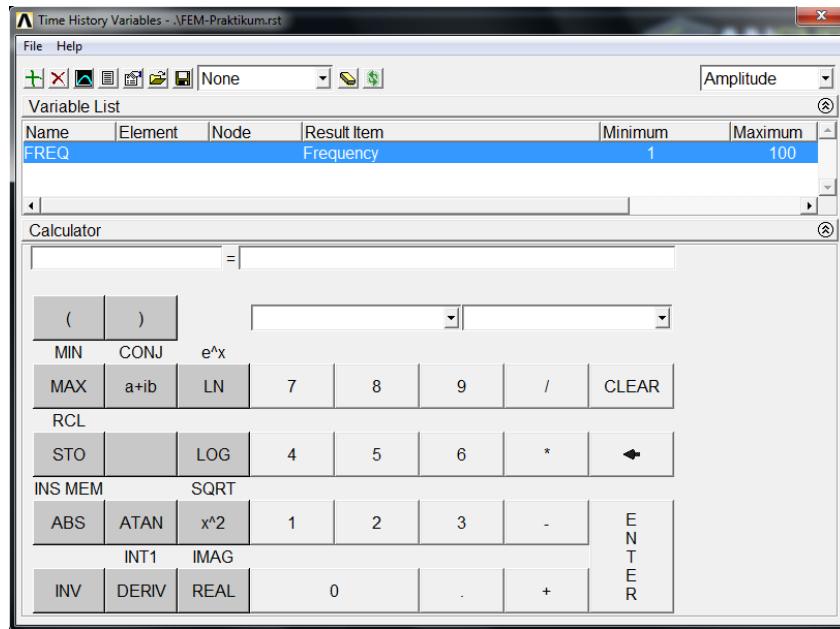


Abbildung 5-100: Werkstoff Nichtlinearität: Variable Viewer

Mit dem grünen Plus-Symbol (oben links im Fenster) wird der zu betrachtende Knoten und was ausgewertet werden soll ausgewählt. Hierfür die Verschiebung in X-Richtung im sich öffnenden Fenster und nachfolgend einen beliebigen Knoten am Balkenende auswählen.

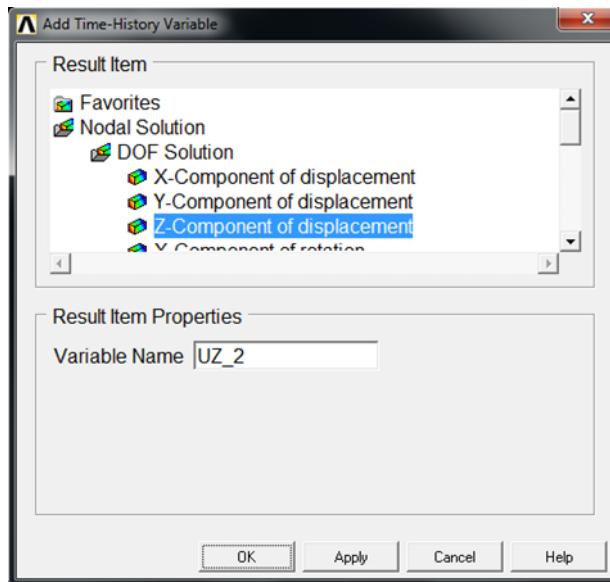


Abbildung 5-101: Werkstoff Nichtlinearität: Auswahlfenster

Durch Auswahl der erstellten Variablen und Klick auf das Graph Symbol werden diese geplottet.

5.9 Beispiel 9: Beulanalyse einer ebenen Rechteckplatte

5.9.1 Lineare Beulanalyse und Vergleich mit HSB-Handrechnung

Mit diesem Beispiel soll gezeigt werden, wie in ANSYS die kritische Beullast einer Struktur (Platte) bestimmt werden kann. Unter kritischer Beullast versteht man diejenige Last, unter der die Struktur anfängt auszubeulen. Das FE – Modell soll derart aufgebaut werden, dass die Ergebnisse der numerischen Simulation mit den analytischen Berechnungsmethoden aus dem Handbuch Strukturberechnung (HSB) verglichen werden können. Das Modell soll eine ebene Rechteckplatte unter einachsigem Druck abbilden. Die Lagerung der Platte soll dabei den Lagerungsvarianten aus dem HSB angepasst werden. Als Material soll Aluminium verwendet werden.

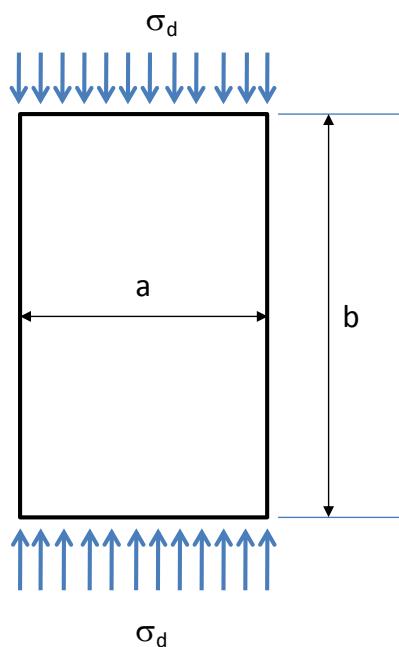


Abbildung 5-102: Lineare Beulanalyse: Geometriedefinition

Tabelle 5-9: Abmessungen: lineares Beulmodell

Breite	a	200mm
Höhe	b	200mm
Dicke	t	2mm

5.9.1.1 Preprocessing:

Zunächst in ANSYS eine ebene Rechteckplatte aus Aluminium mit den gegebenen Abmessungen in der zy – Ebene aufbauen. Die Erstellung der Geometrie, die Wahl des Elementtyps (SHELL 181), die Definition der Material - und Querschnittswerte sowie die Diskretisierung der Geometrie kann aus den bereits vorangegangenen Modellen entnommen werden. Bei der Vernetzung der Platte soll eine Elementgröße von ca.5mm verwendet werden.

Ist das Modell soweit erstellt, beginnt die eigentliche Schwierigkeit dieser Aufgabe, die Modellierung der verschiedenen Einspannungsarten der Platte entsprechend dem HSB. Zunächst soll hierzu der Fall einer allseitig fest eingespannten Platte(Fall 1) betrachtet werden.

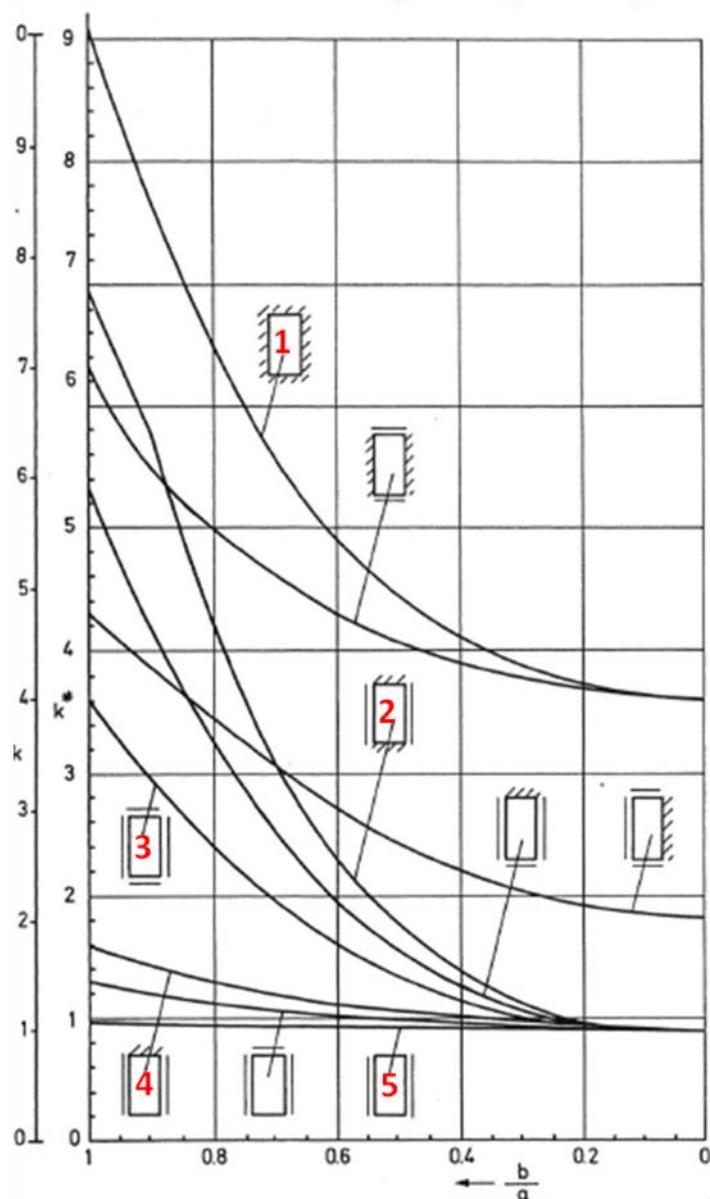


Abbildung5-103: Lineare Beulanalyse: Auszug aus dem HSB zur Beulberechnng

Die in obiger Abbildung dargestellten Einspannungen entsprechen jedoch keiner wirklichen Lagerung als vielmehr einer Randbedingung, die durch Stringer oder andere Versteifungselemente dem Rand aufgeprägt werden. In unserem Fall 1 würde dies bedeuten, dass der Rand des Beulfelds in der Rotation um seine Längsachse gesperrt ist. Weiterhin dürfen sich die Ränder nur parallel zu ihrer Ausgangslage verschieben bzw. sollen eben bleiben. Zuletzt muss darauf geachtet werden, die Querkontraktion der Platte nicht zu behindern. In nachfolgender Skizze ist dies vereinfacht dargestellt.

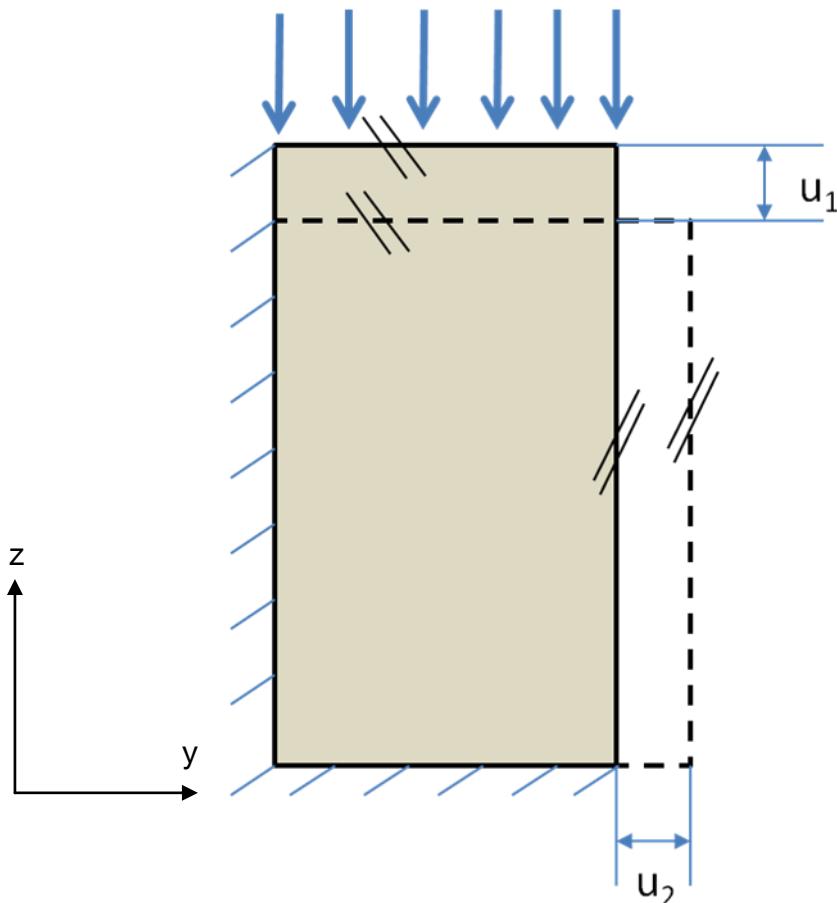


Abbildung5-104: Lineare Beulanalyse: Unbehinderte Querkontraktion

Dies kann in ANSYS folgendermaßen modelliert werden:

Zunächst werden an allen Rändern die Freiheitsgrade senkrecht zur Plattenebene gesperrt (x – Richtung), da die Ränder eben bleiben sollen. Die Freiheitsgrade der Knoten am unteren Rand werden zusätzlich in z – Richtung die am linken Rand zusätzlich in y – Richtung gesperrt. Ebenfalls muss die jeweilige Rotation der Randknoten um die Achse entlang der Randlinie gesperrt werden. Mit den bisherigen Schritten ist es jedoch noch nicht gelungen, die parallele Verschiebung der Ränder zu modellieren. Würde man die Knoten am oberen und rechten Rand auch in z – bzw. y – Richtung lagern, wäre die Querkontraktion der Platte behindert, was nicht der Randbedingung aus dem HSB entspricht.

Um dies zu erhalten, müssen nun die jeweiligen Verschiebungen der Randknoten zueinander in Beziehung gebracht werden. Dies erfolgt über sogenannte *Couplings* oder *Koppelbedingungen*. Couplings ermöglichen es, die jeweiligen Verschiebungen von zwei oder mehreren Knoten gleich zu setzen, zu koppeln. Übertragen auf unser Modell heißt das, dass alle Knoten am rechten Rand in y – Richtung und alle Knoten am oberen Rand in z – Richtung miteinander gekoppelt werden müssen. Somit werden die Verschiebungen der einzelnen Knoten in der jeweiligen Richtung gleich gesetzt, was dazu führt, dass sich der komplette Rand parallel zu seiner Ausgangslage verschiebt. Welche Freiheitsgrade an welchem Rand gesperrt werden müssen ist in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 5-10: Lineare Beulanalyse: Freiheitsgrade Zusammenfassung

	ux	uy	uz	cp,ux	cp,uy	cp,uz	rot,x	rot,y	rot,z
oben	x					x		x	
unten	x		x					x	
links	x	x							x
rechts	x				x				x

Zum Ausführen des Koppel – Befehls CP muss folgendermaßen vorgegangen werden:

- zunächst alle Knoten die gekoppelt werden sollen selektieren
- anschließend folgt die Eingabe des Befehls:
`CP,NSET,LAB,NODE1,NODE2,NODE3,...NODE17`
 - *NSET: Nummer des Coupling Sets (1,2,3,...)*
 - *LAB: zu koppelnder Freiheitsgrad*
 - *NODE1: Knotennummer der Knoten oder ALL*

über die GUI:

- *Main Menu – Preprocessor – Coupling / Ceqn>Couple DOFs*
-
- Die Koppelbedingungen sind anschließend an grünen Symbolen zu erkennen. Über *CP/list, all* kann man sich die einzelnen Coupling – Sets auflisten lassen.

Sind alle Lagerungen und Koppelbedingungen aufgebracht muss nun noch die Druckspannung auf den oberen Rand aufgebracht werden. Da wir in ANSYS aber nur Kräfte und keine Spannungen aufbringen können, muss eine äquivalente Kraft F bestimmt werden, welche eine Druckspannung von 1 MPa im Plattenquerschnitt erzeugt. Warum genau 1 MPa als Druckspannung angenommen wird soll im weiteren Verlauf verdeutlicht werden.

Die Kraft F berechnet sich folgendermaßen:

$$(5-1) \quad F = \sigma_D \cdot A = \sigma_D \cdot B \cdot t = 1 \text{ MPa} \cdot 200 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} = 400 \text{ N}$$

Diese Kraft F muss nun in z – Richtung, auf alle Knoten des oberen Randes verteilt aufgebracht werden. Dazu die Kraft F durch die Anzahl der Knoten teilen.

Das Modell sollte nun folgendermaßen aussehen:

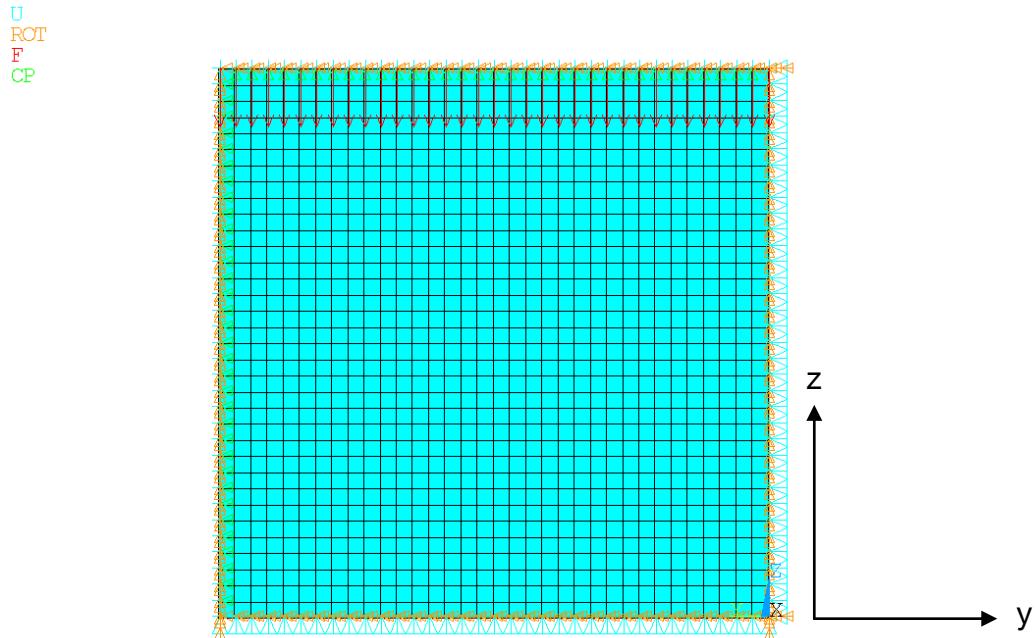


Abbildung5-105: Lineare Beulanalyse: Vernetztes Modell

Danach ist das Preprocessing abgeschlossen und es kann mit der Solution begonnen werden. Zur freien Übung können noch weitere Einspannungen aus dem HSB modelliert werden.

5.9.1.2 Solution

In diesem Fall teilt sich die Solutionphase in zwei Teile auf. Zunächst wird eine statische Analyse mit dem obigen Lastfall durchgeführt. Dabei werden Vorspanneffekte der Platte berechnet und als Ergebnisse gespeichert. Aufbauend darauf wird dann eine Beulanalyse zur Bestimmung der kritischen Beullast sowie der Beulformen durchgeführt.

1. Schritt: statische Analyse

Statische Analyse wählen	Solution – Analysis Type – New Analysis → Static	ANTYPE,STATIC
Effekte durch Vorspannung in den Ergebnissen berücksichtigen	Solution – Analysis Type – Sol'n Controls → Calculate Prestress effects	PSTRES,ON
Lösen	Solution – Solve – Current LS	ALLS SOLVE
Beenden des ersten Lösungsschritts		FINISH

2. Schritt: Beulanalyse

5.9.1.3 Postprocessor

Wie bereits zu Beginn der Aufgabe angedeutet, soll hier die kritische Beullast der Platte bestimmt werden. Die kritische Beullast ist genau jene Last, bei der die Platte zu beulen beginnt. ANSYS bestimmt jedoch nicht die kritische Beullast direkt, sondern einen sogenannten Beulfaktor. Dieser Beulfaktor berechnet sich aus dem Quotienten der kritischen Beullast und der tatsächlichen Beullast.

$$(5-2) \quad K = \frac{\sigma_{\text{kritisch}}}{\sigma_{\text{angenommen}}}$$

Wählt man nun die tatsächliche Beullast genau 1MPa, so entspricht der Beulfaktor genau der kritischen Beullast. Somit ist klar, warum zu Beginn eine Spannung von genau 1MPa angenommen wurde. Durch den Befehl SET, LIST wird im Postprocessor eine Liste der jeweiligen Beulfaktoren angezeigt (Wert unter TIME/FREQ). In diesem Beispiel wurden nun die Beulfaktoren der ersten 10 Beulformen bestimmt. Dem Beulfaktor für die erste Beulform zufolge liegt die kritische Last bei ca. 64MPa. Dies kann nun mit Hilfe der analytischen Formel aus dem HSB überprüft werden.

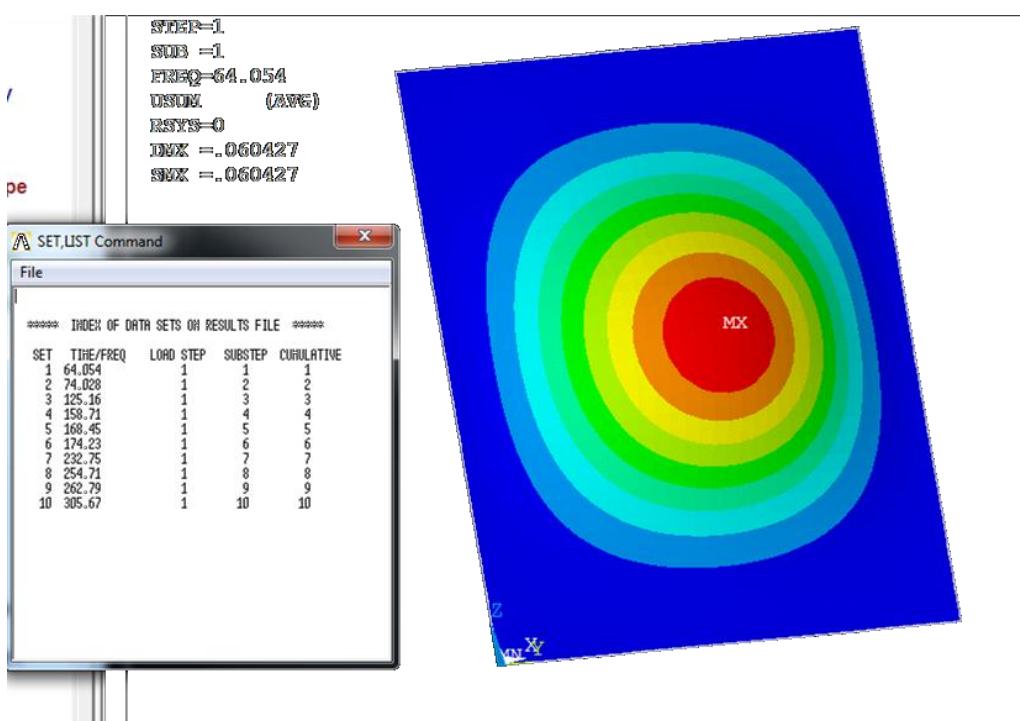


Abbildung5-106: Lineare Beulanalyse: Liste der ersten 10 Beulformen mit den kritischen Beulspannungen und Plot der ersten Beulform

Kritische Beuldruckspannung im elastischen Bereich:

$$\sigma_{kr} = k \cdot \frac{E \cdot \pi^2}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^2$$

mit $\nu = 0.3$ ist:

$$\sigma_{kr} = k^* \cdot E \left(\frac{s}{b}\right)^2 ; \quad k^* = 0.903 : k ; \quad k = 1.107 \cdot k^*$$

Im plastischen Bereich ist E abzumindern.

Abbildung5-107: Lineare Beulanalyse: Auszug HSB zur Beulberechnung

5.9.2 Nichtlineare Beulanalyse (zum Selbststudium)

Dieses Beispiel ist kein Praktikumsinhalt.

Neben der linearen „Eigenwertanalyse“ kann die kritische Beullast auch mit einer statisch nichtlinearen Analyse ermittelt werden. Diese Methode liefert genauere Ergebnisse als die zuvor vorgestellte Methode, ist aber deutlich zeitintensiver, da iterativ.

Die Unterschiede zur vorherigen Methode ergeben sich in der Solutionphase und im Postprozessor. Ausgewertet wird hier ein Verschiebungs-Spannungs-Diagramm, das über die Zeitschritte der nichtlinearen Analyse gebildet wird. Aus diesem Diagramm lassen sich deutlich die Beullasten ablesen.

5.9.2.1 Lasten

Um im nichtlinearen Fall möglichst viele Beulformen berechnen zu können, muss die Drucklast deutlich höher angesetzt werden als im linearen Fall (verschmiert auf alle Knoten in der Lasteinleitung). Außerdem muss noch eine Störlast senkrecht zur Plattenoberfläche angesetzt werden, um Beulen zu ermöglichen. Diese sollte sehr klein, aber dennoch vorhanden, gewählt werden:

```
LoadZ=-75000
LoadX=LoadZ/100000000
```

```
!oben Z=H
NSEL,S,Loc,Z,H
D,all,UX,0,
D,all,ROTY,0,
*get,nanz,NODE,,count
F,all,FZ,LoadZ/nanz
cp,1,UZ,all
```

```
!Störlast
NSEL,S,Loc,Z,H/2
NSEL,R,Loc,Y,B/2
F,all,FX,-LoadX
alls
```

5.9.2.2 Solution

Damit das Verschiebungs-Spannungs-Diagramm möglichst gut aufgelöst wird, muss eine feste Schrittweite für die Lastaufbringung gewählt werden. Auto timestepping oder Line search müssen also ausgeschaltet sein. Eine Schrittweite von 100 Steps hat sich als guter Kompromiss zwischen Auflösung und Rechenzeit herausgestellt. Die folgende Befehlskette steuert die Solution:

```
ANTYPE,STATIC ! Static analysis (not buckling)
NLGEOM,1
NSUBST,100,100,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
NEQIT,1000
SOLVE
```

5.9.2.3 Postprozessor

Im Postprozessor wird die zeitliche Änderung der Verformung und der Spannung in einem Punkt (hier: Plattenmittelpunkt betrachtet). Hierzu wird wieder der TimeHist Postprozessor verwendet:

```
/post26
NSEL,S,Loc,Z,H/2
NSEL,R,Loc,Y,B/2
*get,middleNode,NODE,,NXTH
alls
NSOL,2,middleNode,U,X,UX_2
ANSOL,3,middleNode,S,EQV,SZ_4
/axlab,y,Verschiebung
/axlab,x,Spannung
XVAR,3
PLVAR,2
```

Am Verlaufsdiagramm dieser Änderung Abbildung5-108(Verschiebung über Spannung) lassen sich die kritischen Beulspannungen ablesen, Tabelle 5-11 zeigt die Spannungen an den markierten Punkten:

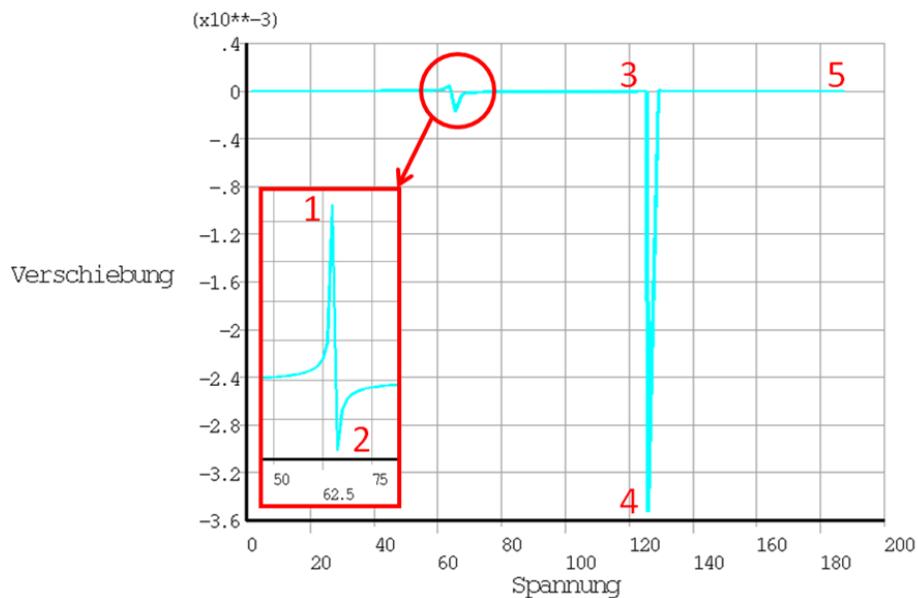


Abbildung5-108: Nichtlineare Beulanalyse: Verlauf der Verformungen senkrecht zur Plattenoberfläche über der Beulspannung

Tabelle 5-11: Nichtlineare Beulanalyse: Spannungen an den Diagrammpunkten

Punkt	Verformung [mm]	Spannung [MPa]
1	0.406959E-04	63.7103
2	-0.167303E-03	65.5901
3	-0.923166E-06	123.6060
4	-0.352162E-02	125.8710
5	-0.453124E-06	187.1690

Wechselt man in den General Postprozessor (/post1), kann man sich die Beulformen jeweils anzeigen lassen

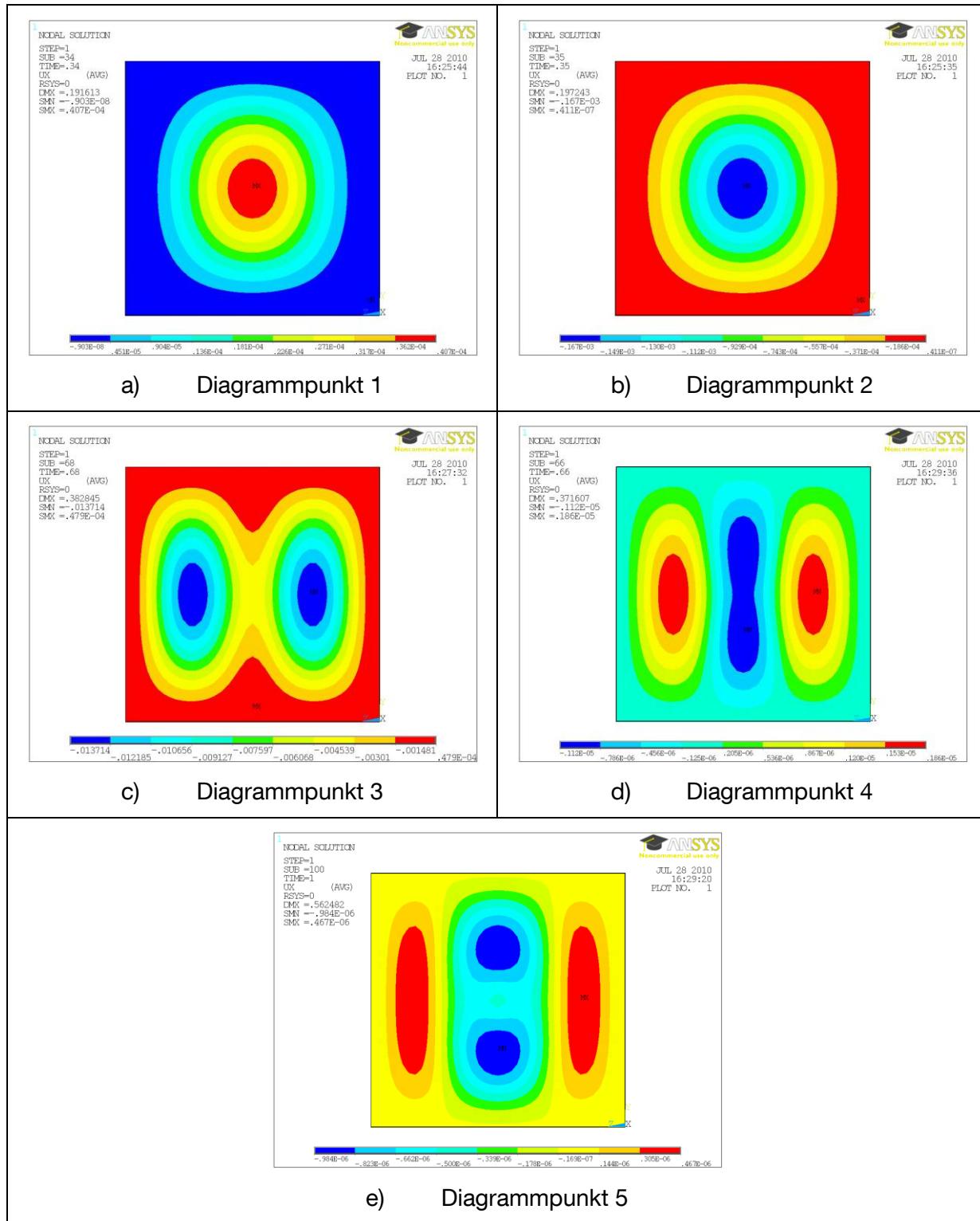


Abbildung5-109: Nichtlineare Beulanalyse: Plots der Beulformen

5.10 Beispiel 10: Dynamik

Für die dynamischen Berechnungen in diesem Kapitel werden erneut die Balkenmodelle aus Beispiel 1 verwendet:

- Modalanalyse mit Beam188 (Beispiel 1.2) und Shell181 (Beispiel 1.3)
- Harmonische Analyse mit Shell181 (Beispiel 1.3)
- Transiente Analyse mit Shell181 (Beispiel 1.3)

Folgende Änderungen sind gegenüber der statischen Analyse in Preprozessor und Solution zu tätigen:

- 1) Materialparameter Dichte definieren
→ notwendig, um Massenmatrix aufzustellen
- 2) Vernetzung mit 50 Knoten (Balkenmodell), bzw. der entsprechenden Vernetzungsfeinheit beim Schalenmodell
→ notwendig, um möglichst viele Eigenformen auflösen zu können

5.10.1 Modalanalyse

Mit der Modalanalyse werden zunächst die Eigenformen und Eigenfrequenzen bestimmt. Hier sollen nacheinander die Modelle mit beam188 und shell181 aufgebaut werden und die Unterschiede dokumentiert werden. Dazu sind in Solution und Postprozessor folgende Schritte notwendig:

5.10.1.1 Solution

In der Solution Phase werden hier neben der Lagerung nur die Analyse Einstellungen vorgenommen. Lasten am Balkenende werden hier nicht benötigt.

Analysetyp festlegen:	/sol
<i>Solution – Analysis Type – New Analysis – Modal</i>	antype,2
Analyseeinstellungen vornehmen:	modopt,lanb,100,100,40000
<i>Solution – Analysis Type – Analysis Options (Block Lanczos, No. of modes to extract: 100, No. of modes to expand: 100 Start Freq: 100, End Frequency 40000)</i>	,off mxpand,100, , ,0
Berechnung starten:	solve
<i>Solution – solve – current S</i>	

Abbildung5-110 zeigt die notwendigen Analyseeinstellungen in der GUI welche vor dem Starten der Modalanalyse getätigten werden müssen.

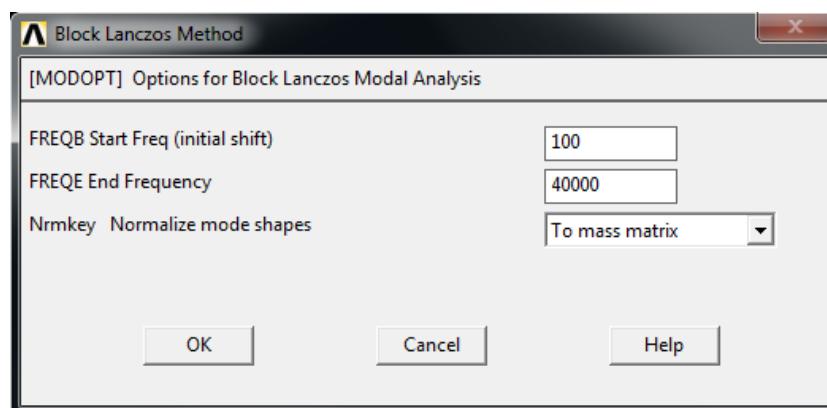
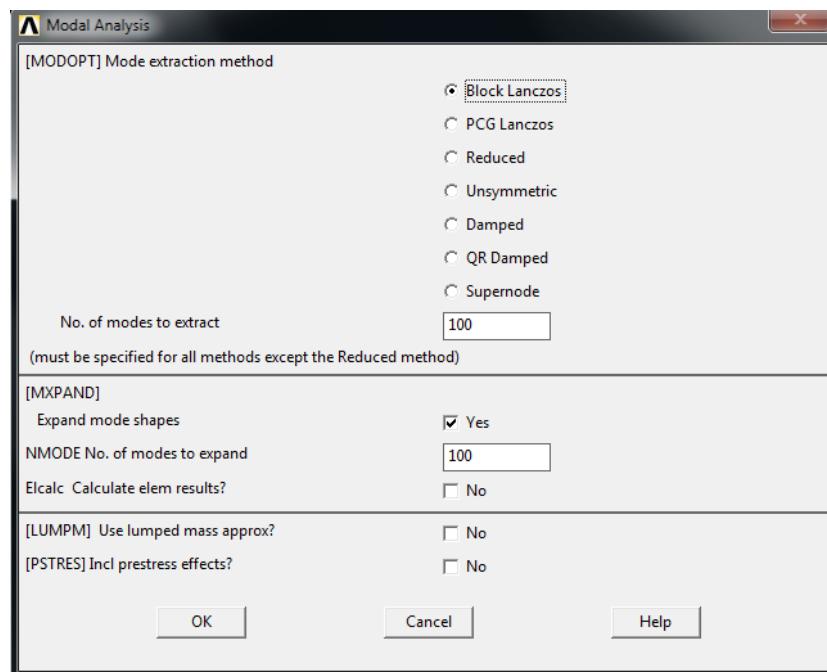


Abbildung5-110: Modalanalyse: Optionen für die Analyse Einstellen

5.10.1.2 Postprozessor

Im General Postprozessor lassen sich die Ergebnisse darstellen:

Eigenformen darstellen:

General Postproc – read results – first set
 General Postproc – Plot Results – Deformed Shape – Def + undeformed

/post 1

set,first

pldisp,1

Für die Darstellung der darauffolgenden Eigenform:

General Postproc – Read Results – Next Set

set,next

General Postproc – Plot Results – Deformed Shape – Def + undeformed

pldisp,1

Vergleicht man die Eigenfrequenzen/Eigenformen bei den beiden Modellierungsmethoden, entsprechen sich beispielsweise die farbig Unterlegten:

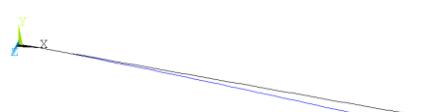
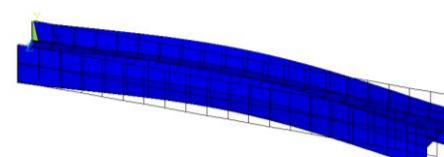
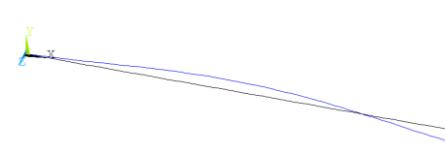
Shell 181	Beam 188
MODE Nr. / FREQUENZ 1 124.97 2 351.35 3 389.30 4 529.93 5 579.88 6 622.13 7 650.23 8 770.42 9 857.13	MODE Nr. / FREQUENZ 1 125.62 2 133.60 3 222.82 4 312.25 5 401.86 6 401.99 7 492.13 8 582.76 9 646.05
 a) 124.97 Hz	 b) 125.62 Hz
 a) 622.13 Hz	 d) 646.05 Hz

Abbildung5-111: Modalanalyse: Darstellung der sich entsprechenden Eigenformen

Weiterhin ist zu erkennen, dass mit der Schalenmodellierung deutlich mehr (lokale) Eigenformen bestimmbar sind, die mit dem reinen Balkenmodell nicht auflösbar sind. Zum Beispiel sind mit der Schalenmodellierung auch Torsionsmoden auflösbar:



Abbildung5-112: Modalanalyse: Beispiele für Verformungen die Beam 188 nicht abbilden kann

Zur besseren Veranschaulichung lassen sich die Eigenformen im Postprozessor auch animieren:

Animierte Darstellung der Eigenformen:

Menü – Plot Ctrls – Animate – Mode Shape

anmode,10,0.5, ,0

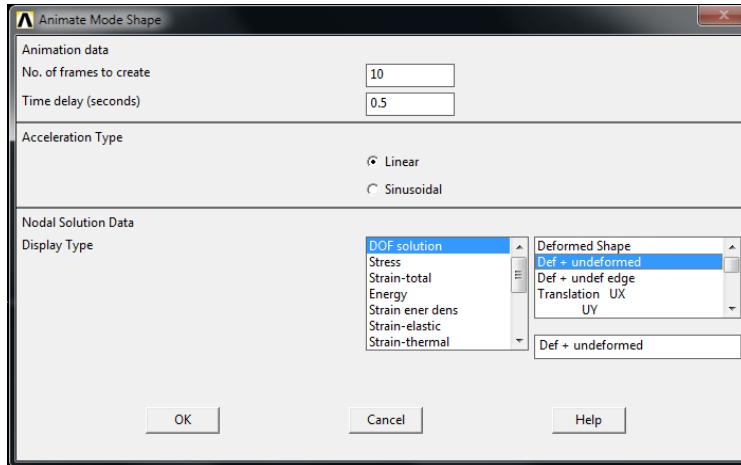


Abbildung5-113: Modalanalyse: Optionen für Animation

5.10.2 Harmonische Analyse

In diesem Beispiel soll der, mit Shell 181 modellierte I-Träger aus dem Einführungsbeispiel wieder mit 1000N in negativer Z-Richtung belastet werden, diesmal jedoch in Form einer harmonischen Anregung in einem Frequenzbereich von 1 Hz – 100 Hz. Die Kraft wird auf alle Knoten bei X=1000, also am Ende des Balkens verteilt. Der Frequenzabstand beträgt 1Hz. Die Auswertung erfolgt ebenfalls am Ende des Balkens.

5.10.2.1 Preprocessor

Erstellen des I-Trägers aus der Einführung mit dem Elementtyp Shell 181

5.10.2.2 Solution

In der Solution Phase sind folgende Schritte notwendig:

Analysetyp festlegen (Harmonic)

Solution – Analysis Type – New Analysis – Harmonic

/sol
antype,3

Analyseeinstellungen vornehmen:

Solution – Analysis Type – Analysis Options

hropt,full
hrout,on

Solution method: Full

lumpm,0

DOF printout format: Real + imaginary

Use lumped mass approx: No

Im darauffolgenden Fenster die Voreinstellung
beibehalten (siehe Abbildung5-114)

eqslv, ,1e-008,
pstres,0

Aufbringen der Belastung:

Solution – Define Loads – Apply – Structural –

Force/Moment – On Nodes

nsel,s,loc,x,1000
*get,nanz,node,,count
f,all,fz,-1000/nanz

Frequenzbereich auswählen:

*Solution – Load Step Opt – Time/Frequency – Freq
and Substs...*

harfrq,0,500,
nsubst,100,

Ramped: Amplitude wächst mit Frequenz:
z.B.: 1Hz,1N; 2Hz,2N; ... 100Hz,100N

kbc,1 (entspricht Auswahl
“stepped”)

Stepped: Amplitude bleibt bei allen Frequenzen
gleich(siehe Abbildung5-115)

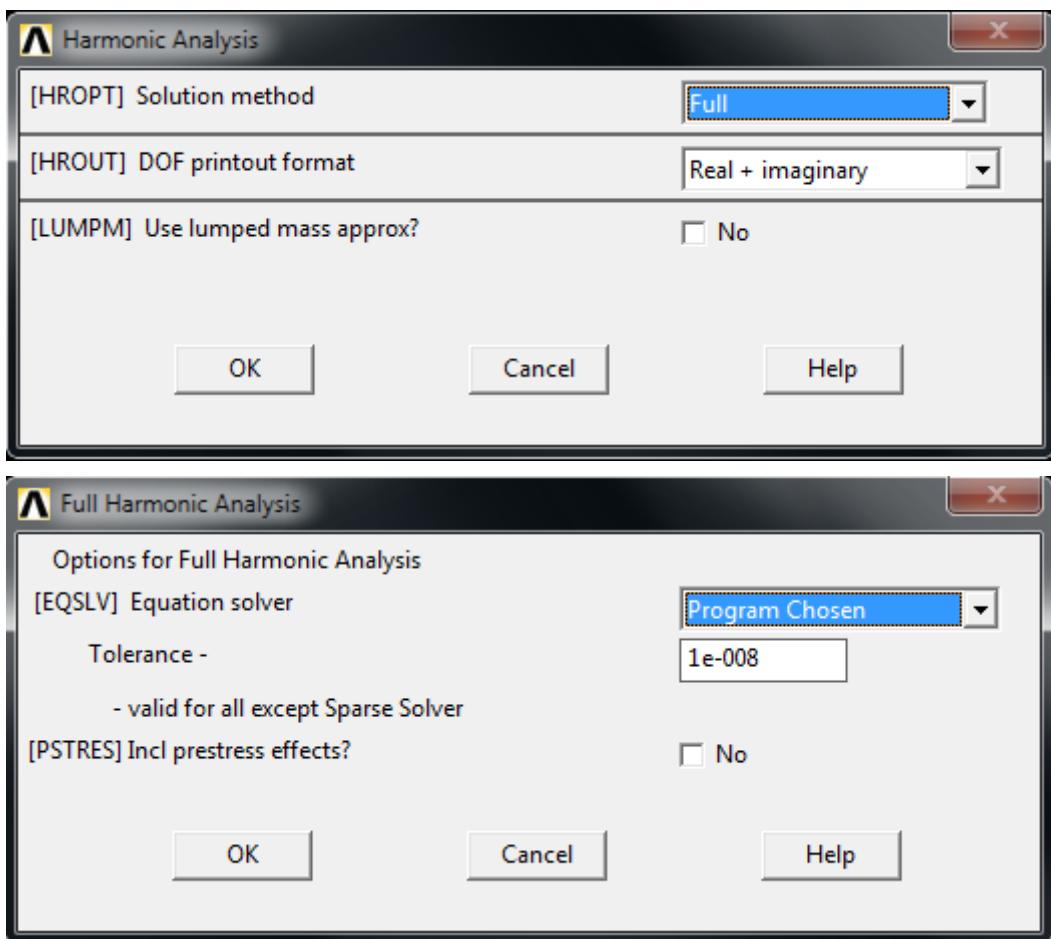


Abbildung5-114: Harmonische Analyse: Optionen für die Analyseeinstellungen

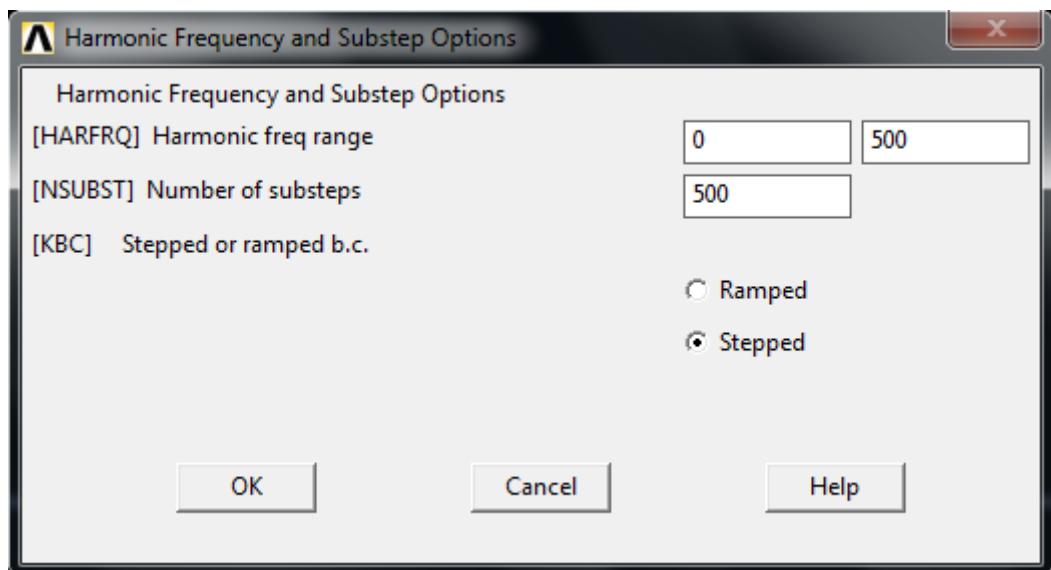


Abbildung5-115: Harmonische Analyse: Optionen für den Frequenzbereich

Dämpfung zuweisen:

ohne Dämpfung würde die Amplitude unendlich groß werden, wenn bei einer Eigenfrequenz angeregt wird.

Aufgrund mangelnder Auflösung gibt ANSYS dennoch einen endlichen Wert aus, der allerdings viel zu hoch ist. Deswegen wird dem Balken eine Dämpfungsrate von 2% zugewiesen:

Solution – Load Step Opt – Time/Frequency – Damping dmprat,0.02

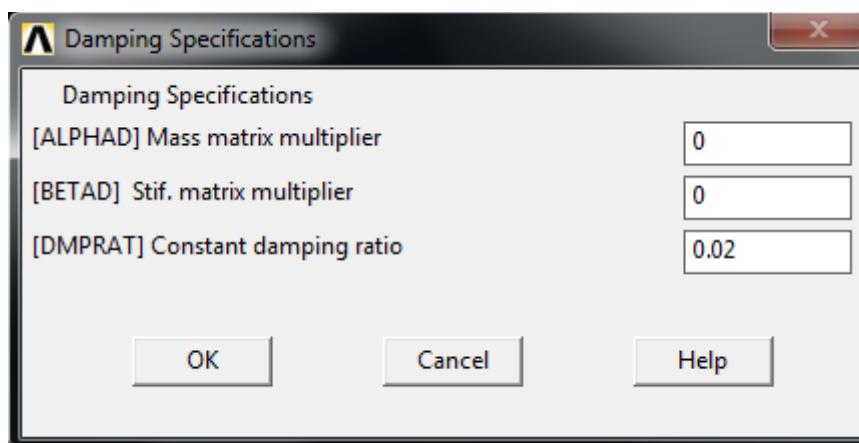


Abbildung5-116: Harmonische Analyse: Zuweisen der Dämpfungsrate

Berechnung starten:

Solution – solve – current LS solve

5.10.2.3 Postprozessor (/post26)

Zur Auswertung der Ergebnisse wird hier wieder der TimeHist Postprozessor verwendet:

```
/post26
NSEL,S,Loc,x,1000
*get,balkenende,NODE,,NXTH
alls
NSOL,2, balkenende,U,Z,UZ_2
/axlab,y,Verschiebung
/axlab,x,Frequenz
XVAR,1
PLVAR,2
```

Dies erzeugt die folgenden Plots:

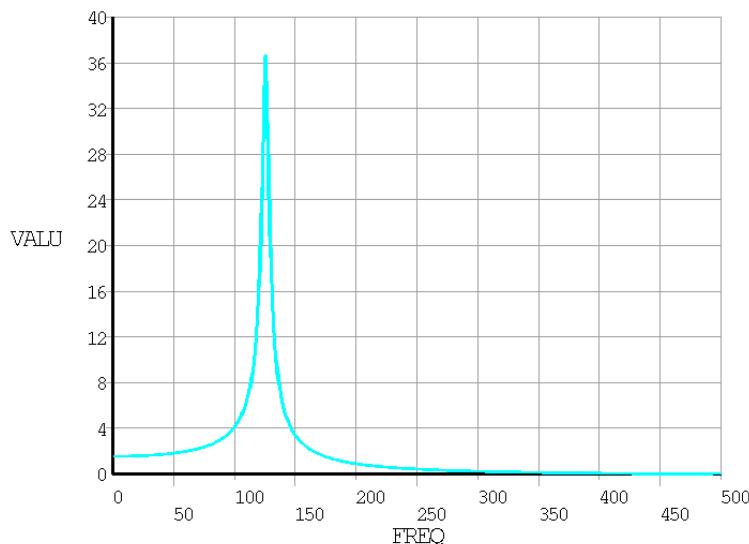


Abbildung5-117: Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm – Schwingung mit Dämpfung

Bzw. wenn kein Faktor für die Dämpfung angegeben wurde:

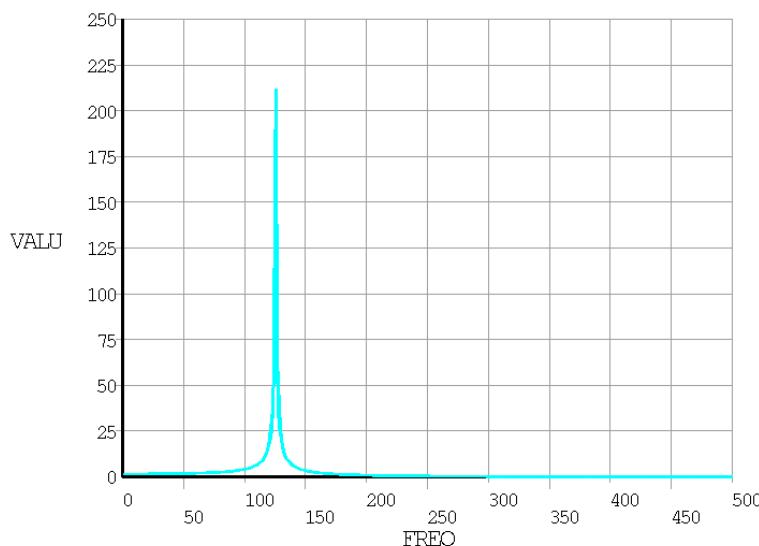


Abbildung5-118: Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm – Schwingung ohne Dämpfung

Um herauszufinden ob es sich hierbei tatsächlich um den Höchstwert handelt, kann man über „List Data“ alle Werte in Zahlen ausgeben lassen, oder wählt sich noch weitere beliebige Punkte, etwa einen bei halber Balkenlänge aus und lässt beide gleichzeitig plotten. Dafür markiert man einfach alle Punkte, für die die Graphen geplottet werden sollen, bevor man auf „Graph Data“ klickt. Hierbei bestätigt sich auch noch einmal die Schwingungsform: die Amplitudenverteilung stimmt mit der von der ersten Eigenschwingung Erwarteten überein:

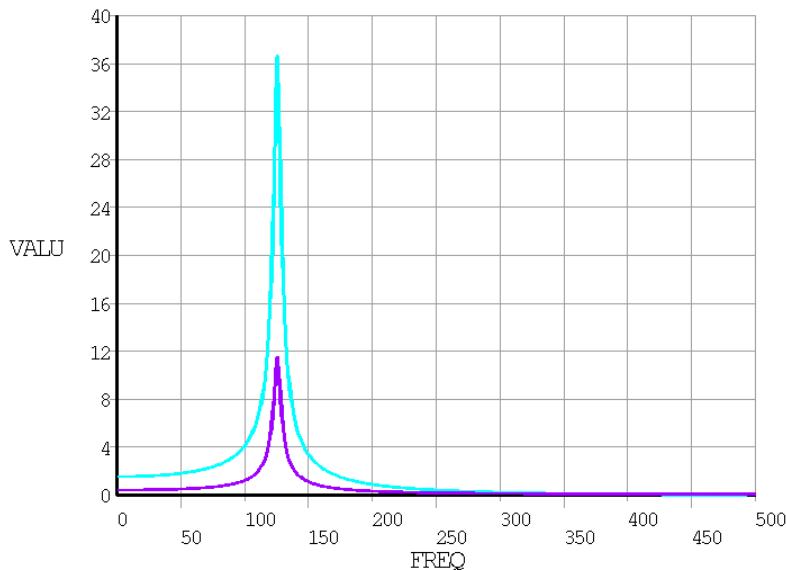


Abbildung5-119: Harmonische Analyse: gleichzeitige Darstellung der Amplituden zweier Knoten bei $x=l/2$ und $x=l$

Über

PlotCtrls – Style – Graphs – Modify Axes (Siehe Abbildung5-121)

kann man unter anderem die Skalierung der Achsen auf logarithmisch umstellen und so einen Größeren Amplituden- und / oder Frequenzbereich abbilden:

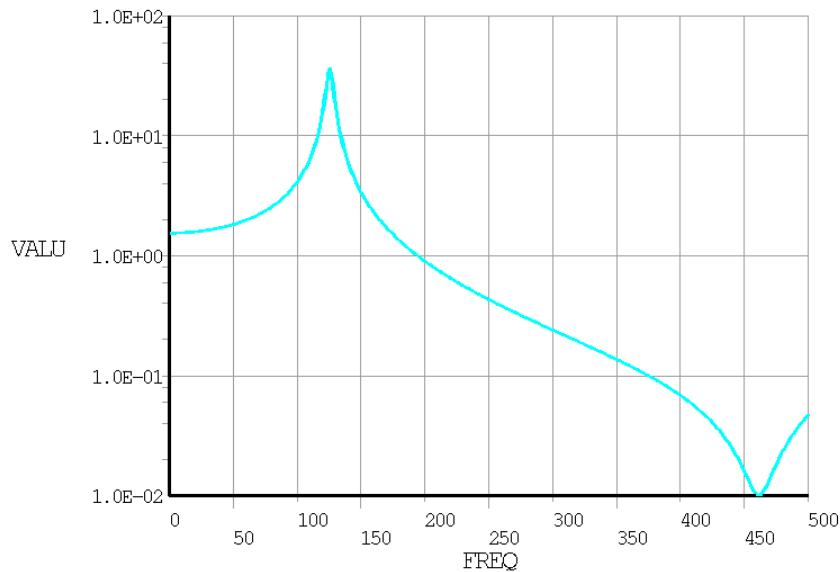


Abbildung5-120: Harmonische Analyse: Amplitude-Frequenz-Diagramm mit logarithmischer Y-Achse

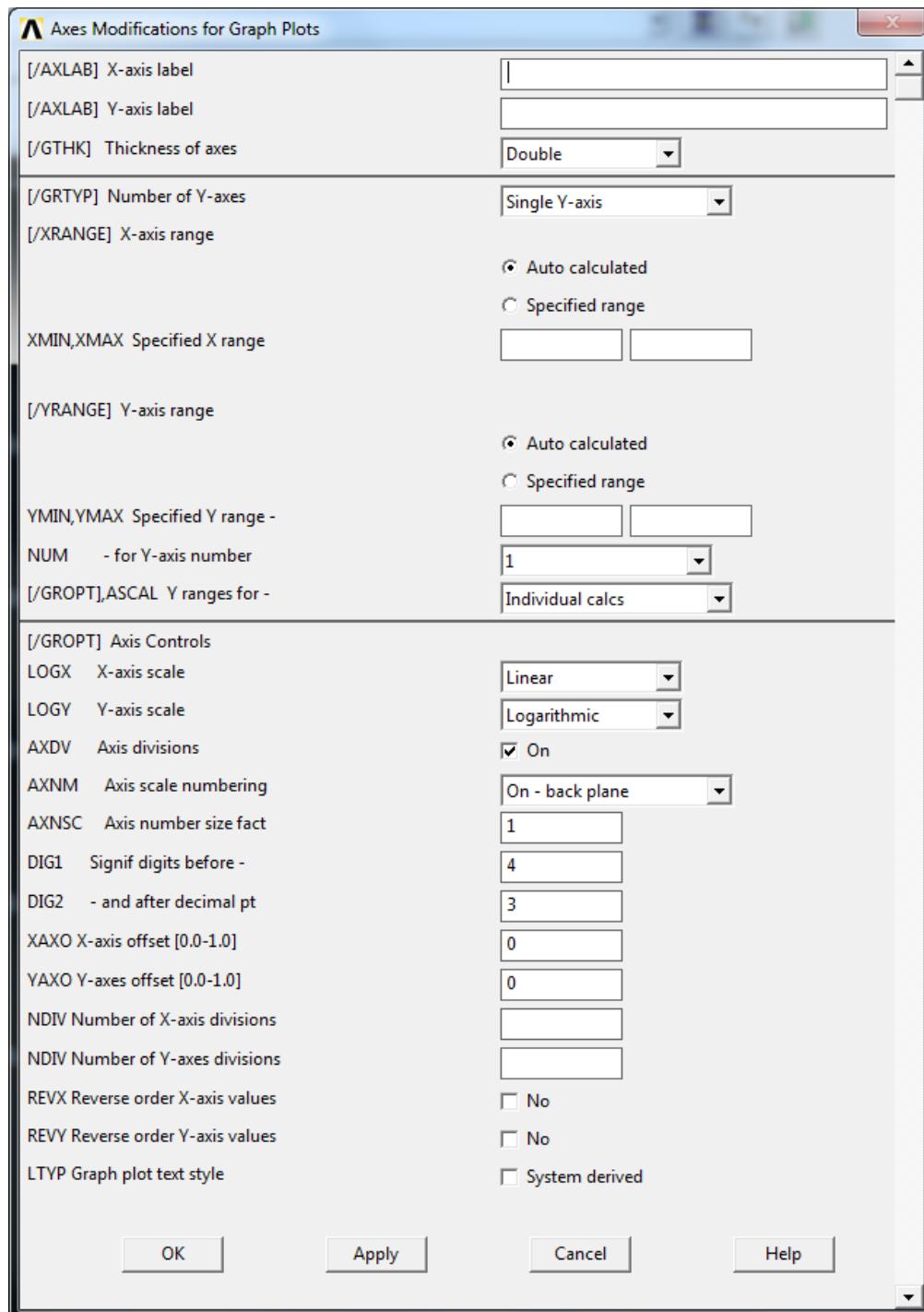


Abbildung5-121: Harmonische Analyse: Axes Modifications

5.10.2.4 Postprozessor (/post1)

Im Postprocessor /POST1 werden die Ergebnisse einer harmonischen Analyse jeweils getrennt in Realteil und Imaginärteil in zwei Ergebnisgruppen gespeichert. (siehe SET,LIST: jeweils 2 Sets pro substep vorhanden):

***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****				
SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	5.0000	1	1	1
2	5.0000	1	1	1
3	10.0000	1	2	2
4	10.0000	1	2	2
5	15.0000	1	3	3
6	15.0000	1	3	3
7	20.0000	1	4	4
8	20.0000	1	4	4
9	25.0000	1	5	5
10	25.0000	1	5	5
11	30.0000	1	6	6
12	30.0000	1	6	6
13	35.0000	1	7	7
14	35.0000	1	7	7
15	40.0000	1	8	8
16	40.0000	1	8	8
17	45.0000	1	9	9
18	45.0000	1	9	9
19	50.0000	1	10	10
20	50.0000	1	10	10

Abbildung5-122: Harmonische Analyse: set,list Ausgabe

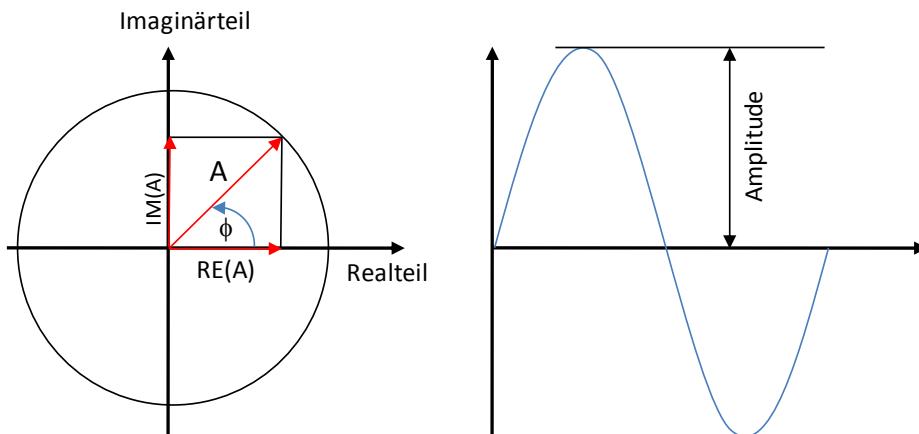


Abbildung5-123: Harmonische Analyse: Real- und Imaginärteil der Amplitude

Zur Darstellung der Ergebnisse (Verformungen, Spannungen, etc.) ist sowohl der Realteil als auch der Imaginärteil zu berücksichtigen. Beide Ergebnisanteile gemeinsam ergeben den Betrag des Ergebnisses mit welchem im Bauteil zu rechnen ist. Zur Überlagerung dieser beiden Ergebnisse muss eine arithmetische Kombination zwischen dem Real – und Imaginärteil ausgeführt werden. Für diese Operation stehen die „load case calculations“ im /POST1 zur Verfügung. Grundlage dieser Operationen ist das Konzept, dass immer nur ein Ergebnissatz (load case) des Modells im Rechnerspeicher gehalten wird. Zu einem Ergebnissatz gehören alle Verformungen, Spannungen oder sonstige Ergebniswerte eines Zeit – oder Frequenzpunktes. Diese Daten sind bei großen Modellen so umfangreich, dass sie einen großen Speicherbereich beanspruchen. Mehrere verschiedene Ergebnis – Sätze passen nicht gleichzeitig in den Speicher. Daher müssen andere Ergebnis – Sätze von der Festplatte gelesen, dabei nach der gewünschten arithmetischen Operation mit den Daten im Rechnerspeicher kombiniert und das Ergebnis der Kombination im Speicher behalten werden.

Die Überlagerung des Real – und des Imaginärteils geschieht durch eine SRSS – Kombination (SRSS: square root sum of squares) nach folgender Beziehung:

$$(5-3) \quad A = \sqrt{RT^2 + IT^2}$$

Dies geschieht in ANSYS durch folgende Befehle:

LCDEF,LCNO,LSTEP,SBSTEP,KIMG	definieren des ersten Ergebnissatzes (Realteil)	LCNO: zugewiesene Load case nummer LSTEP: Loadstep Nummer (hier:1) SBSTEP: Substep Nummer (je nach betrachteter Frequenz aus SET,LIST zu entnehmen) KIMG: 0- Realteil 1- Imaginärteil
LCDEF,LCNO,LSTEP,SBSTEP,KIMG	definieren des zweiten Ergebnissatzes (Imaginärteil)	
LCASE,LCNO	Füllen des Rechenspeichers mit ersten Ergebnissatz	LCNO: Load case nummer
LCOPER,OPER1,LCASE1,OPER,LCASE2	Ausführen der SRSS Kombination von Ergebnissatz 1 und 2	OPER1: Art der Kombination LCASE1: erster Load case in der Kombination

Dabei wird zunächst der Realteil als 1. Load case und anschließend der Imaginärteil als Load case 2 deklariert (LCDEF). Danach wird der Rechenspeicher mit den Daten des Load case 1 gefüllt (LCASE). Anschließend werden diese Daten mit denen des Load case 2 über eine SRSS Operation kombiniert (LCOPER). Jetzt können die wirklichen Ergebnisse des jeweiligen Sub Steps wie bereits bekannt im /POST1 betrachtet werden.

5.10.3 Transiente Analyse

Mit der transienten Analyse lässt sich das dynamische Antwortverhalten einer Bauteilstruktur unter einer zeitabhängigen Belastung bestimmen. Wegen der Zeitabhängigkeit müssen Massenträgheit und Dämpfung beachtet werden, welche eine große Rolle bei Stufen- oder Impulsbelastungen spielen, beispielsweise wo sich in Bruchteilen einer Sekunde die Belastung ändert.

In diesem Beispiel wird der Balken aus den vorigen Beispielen mit einem Impuls am Balkenende belastet und seine Antwort auch dort ausgewertet. ANSYS bietet hierfür 3 Möglichkeiten:

- **Full Method:** einfachste Methode, alle Arten von Nichtlinearitäten sind erlaubt. Weil die Matrizen voll besetzt werden, dauert die Berechnung entsprechend lange
- **Reduced Method:** reduziert die Matrizen auf die Hauptfreiheitsgrade, weswegen die Berechnung wesentlich schneller abläuft. Nur lineare Probleme sind möglich
- **Mode Superposition Method:** schnellste Methode, setzt aber viel Verständnis voraus. Vorab wird eine Modalanalyse durchgeführt, die eigentliche Berechnung erfolgt dann nur noch an den, von der Modalanalyse her bekannten, „interessanten“ Stellen

In diesem Beispiel soll die „Reduced Method“ eingesetzt werden.

5.10.3.1 Vorgehen

Da ein Kraftstoß alle Eigenformen der Struktur anregt, muss auch die Antwort des Balkens alle Eigenfrequenzen beinhalten. Man kann aber numerisch keinen echten Impuls generieren, sondern muss über eine bestimmte Zeitspanne „dt“ die Last aufbringen.

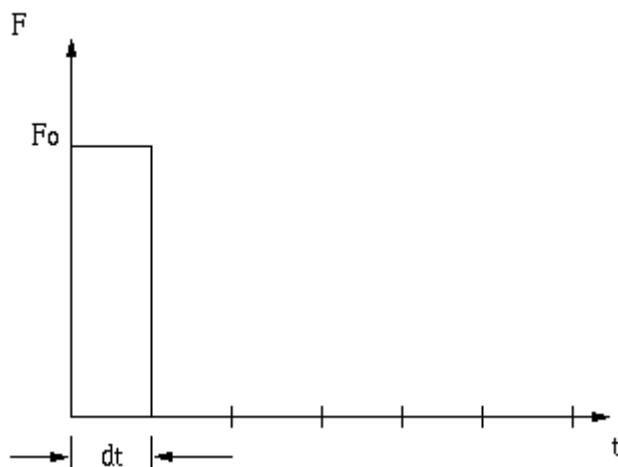


Abbildung 5-124: Transiente Analyse: Endlicher Kraft-Impuls

Die Größe von „dt“ wird von der höchsten, zu betrachtenden Eigenfrequenz beeinflusst. Je kleiner „dt“, desto höher die dazugehörige Eigenfrequenz. Die Daumenregel in ANSYS lautet

$$\text{Zeitspanne} = 1 / 20f$$

Wobei f die höchste Eigenfrequenz ist, die betrachtet werden soll. Damit erhält man 20 diskrete Unterteilungen pro Periode der höchsten Eigenfrequenz.

5.10.3.2 Preprocessor

Erstellen des I-Trägers aus der Einführung mit dem Elementtyp Shell 181.

Festlegen der Materialdämpfung

*Preprocessor – Material Props –Material MP,damp,1,0.001
Models - Damping*

5.10.3.3 Solution

In der Solution Phase sind bei dieser Analyse folgende Schritte notwendig:

Analysetyp festlegen (Transient)

*Solution – Analysis Type – New Analysis – antype,4
Transient trnopt,reduc,,damp*

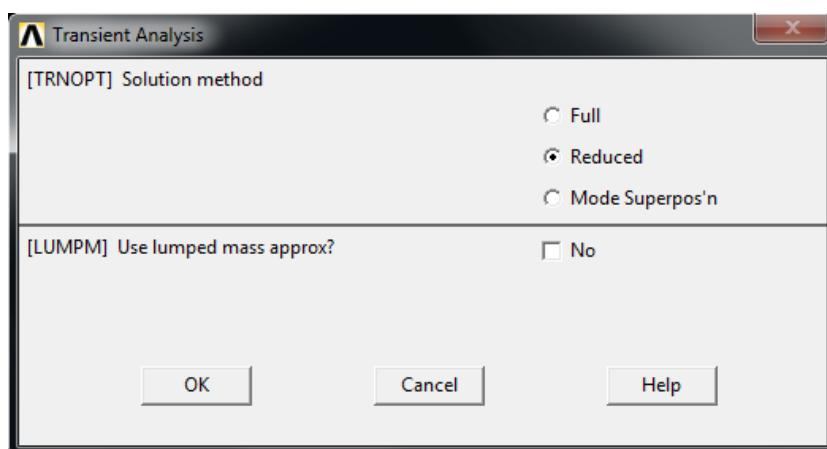


Abbildung5-125: Transiente Analyse: Auswahlfenster für die Methode

Festlegen der Hauptfreiheitsgrade

Zunächst alle Knoten auswählen die bei $x>0$ liegen, dann die Hauptfreiheitsgrade (Z-Richtung) bestimmen:

nsel,all
nsel,u,loc,x,0
m,all,uz

Solution – Master DOFs – User Selected – Define

Die Hauptfreiheitsgrade sind die, welche das dynamische Verhalten bestimmen, also beispielsweise Translation der Knoten in Z-Richtung bei Balkenbiegung um die Y-Achse.

(nur für „Reduced Method“ notwendig)

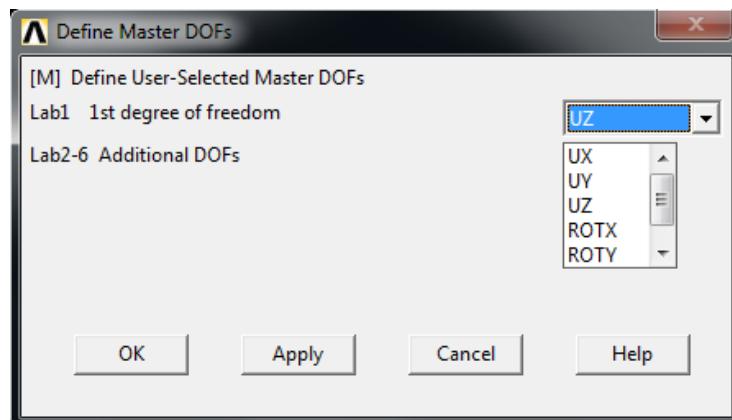


Abbildung5-126: Transiente Analyse: Auswahlfenster für die Hauptfreiheitsgrade

Aufbringen der Belastung:

Im nächsten Schritt muss die zeitlich Veränderliche Belastung aufgebracht werden. Der Impuls muss in drei Schritten entsprechend der Eckpunkte in Abbildung5-127 modelliert werden. Die Dauer und Höhe der Last wird dafür in einzelne Loadsteps gegliedert und in Loadstep-Files gespeichert.

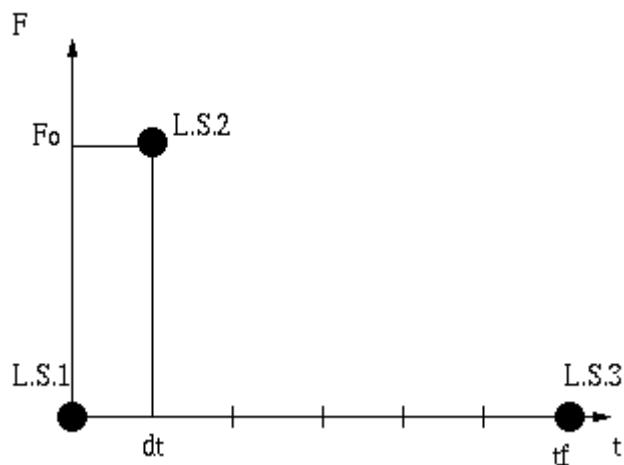


Abbildung5-127: Transiente Analyse: Ablauf der Laststufen über die Zeit

1. Load Step:

Zuerst muss im allgemeinen Anfangsverformung und Anfangsgeschwindigkeit definiert werden. In diesem Beispiel entfällt dieser 1. Schritt, da beide 0 sind (entspricht Default-Werten).

Time and Time Step Options

Für [TIME] 0 und für [DELTIM] 0.0001 eingeben:

```
Solution - Load Step Opts - time,0
Time/Frequenc - Time - Time Step ...      deltim,0.0001, , ,1
```

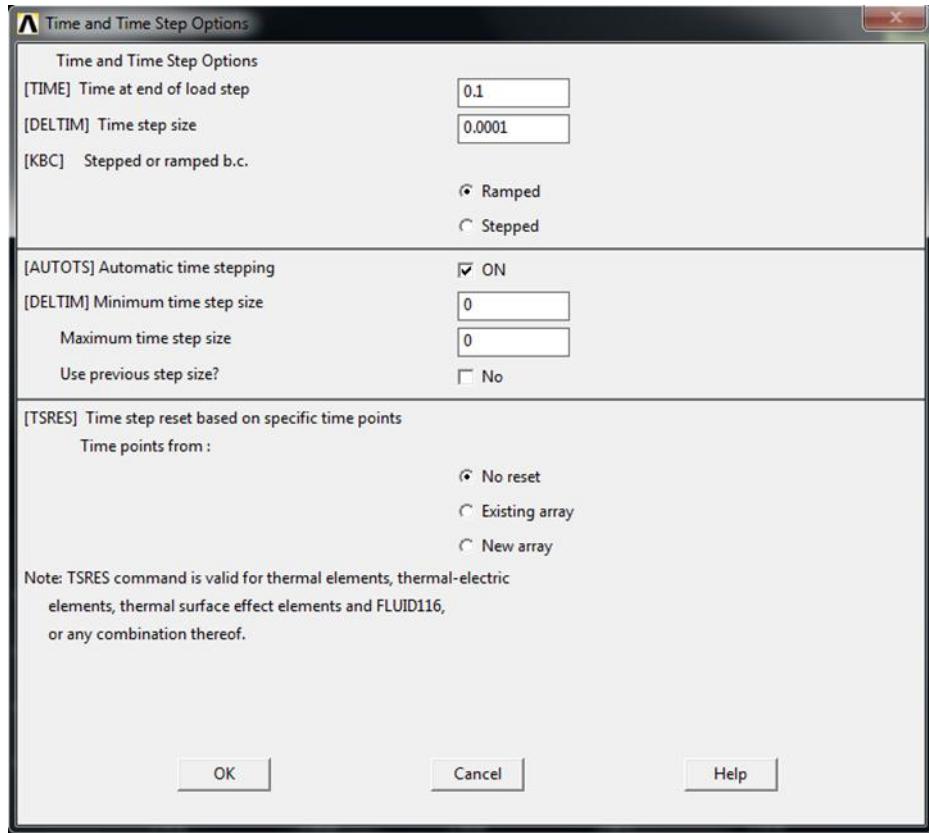


Abbildung 5-128: Transiente Analyse: Time and Time Step Options

Write Load Step File
Durch die Eingabe "1" erhält die Datei den
Namens „Jobname.s01“

Solution > Load Step Opt > Write LS File lswrite,1

2. Load Step:

Nun wird eine Kraft von 1000 N in negative Z-Richtung auf die Knoten bei $x=1000$ verteilt:

```

Solution - Define Loads - Apply - nsel,s,loc,x,1000
Structural *get,nanz,node,,count
Force/Moment - On Nodes - "all" f,all,fz,-1000/nanz

```

Time and Time Step Options

Für [TIME] 0.001 und für [DELTIM] 0.0001 eingeben:

*Solution – Load Step Opts – time,0.001
Time/Frequenc deltim,0.0001, , ,1
Time - Time Step ...*

Write Load Step File
Durch die Eingabe “2” erhält die Datei den Namen „Jobname.s02“

Solution > Load Step Opts > Write LS File lswrite,2

3. Load Step:

Die Kraft aus Loadstep2 muss wieder gelöscht werden:

*Solution – Define Loads – Delete – fdelete,all
Structural
Force/Moment – On Nodes –“all”*

Time and Time Step Options

Für [TIME] 0.1 (bessere Auflösung bis 0.1 erforderlich) und für [DELTIM] 0.0001 eingeben:

*Solution – Load Step Opts – time,0.1
Time/Frequenc
Time – Time Step ... deltim,0.0001, , ,1*

Write Load Step File
Durch die Eingabe “3” erhält die Datei den Namen „Jobname.s03“

Solution > Load Step Opts > Write LS File lswrite,3

Schließlich kann die Berechnung gestartet werden, indem die zuvor erzeugten Loadstep-Files eingelesen werden:

Solution – Solve – From LS Files lssolve,1,3,1

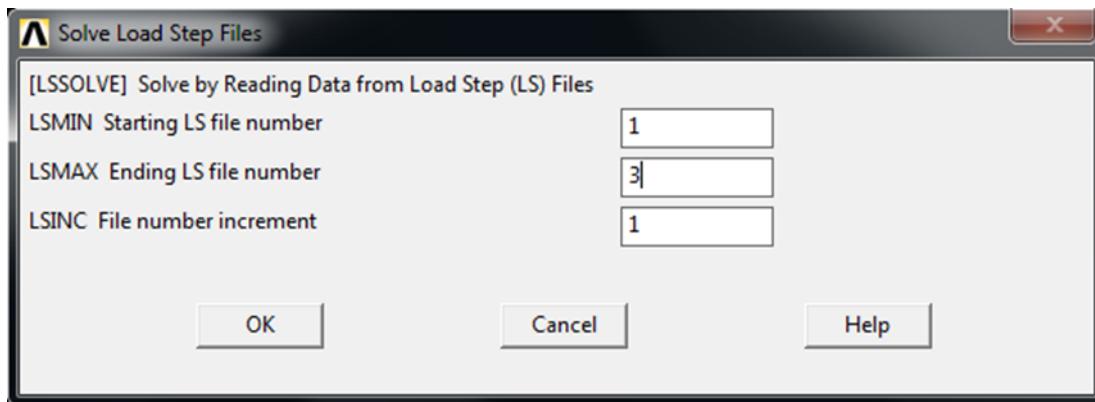


Abbildung 5-129: Transiente Analyse: Einlesen der Loadstep-Files

5.10.3.4 Postprozessor

Die Darstellung erfolgt analog zur Harmonischen Analyse mit dem Time Hist Post Processor (/POST26). Mit dem Befehl FILE,,rdsp werden die Ergebnisse der reduzierten Analyse in den TimeHist Postprocessor geladen.

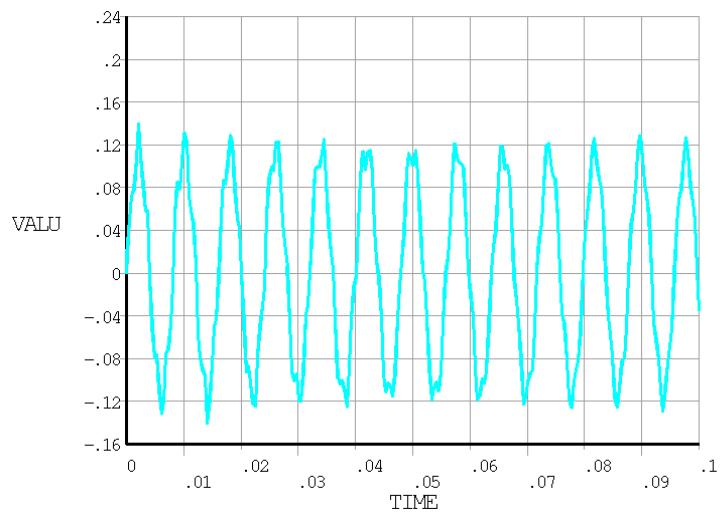


Abbildung 5-130: Transiente Analyse: Darstellung des ungedämpften Schwingungsverhaltens

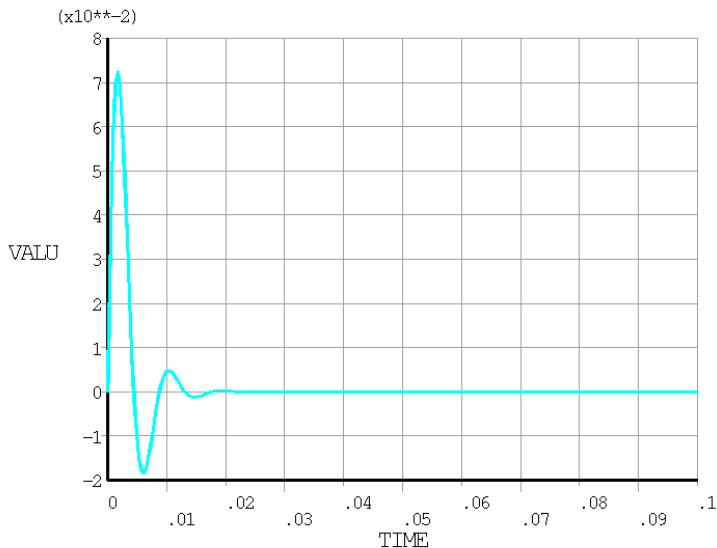


Abbildung5-131: Transiente Analyse: Darstellung des gedämpften Schwingungsverhaltens

Im ungedämpften Fall kann man sehr einfach die zugehörige Eigenfrequenz bestimmen. Dargestellt werden die Schwingungen bis 0,1s, nimmt man also die abgezählte Anzahl mal 10 erhält man die Anzahl Schwingungen pro Sekunde.

Dadurch dass mehrere Eigenfrequenzen durch den Kraftstoß angeregt werden überlagern sich diese auch in der Darstellung, weswegen die Minima und Maxima „gezackt“ sind.

5.11 Beispiel 11: Sandwichplatte unter Temperaturlast

In diesem Beispiel soll die Möglichkeit vorgestellt werden, mit Hilfe von ANSYS Temperaturlastfälle zu modellieren. Als Beispiel hierfür soll eine Sandwichplatte mit unterschiedlichen konstanten Temperaturen sowie Temperaturgradienten beaufschlagt werden und die daraus resultierenden thermoelastischen Spannungen und Verformungen untersucht werden. Die dabei betrachtete Sandwichplatte soll aus einer Kombination von Schalen – und Volumenelementen modelliert werden. Eine Skizze des Modells ist in Abbildung5-132 dargestellt.



Abbildung5-132: Sandwichplatte

Die Abmessungen der Sandwichplatte sowie die jeweiligen Materialien der einzelnen Komponenten sind in Tabelle 5-12 zusammengefasst. Die wichtigsten Materialkennwerte sind in Tabelle 5-13 zusammengestellt. Alle Geometriewerte sollen als Parameter im Inputfile definiert werden. Es empfiehlt sich aus den einzelnen Teilen der Sandwichplatte einzelne Komponenten zu erstellen.

Tabelle 5-12: Maße und Materialien der Sandwichplatte

Komponente	Länge	Breite	Dicke	Material
Deckschicht oben	500	250	1.5mm	Aluminium
Deckschicht unten	500	250	1.6mm	CFK (8lagen quasiisotrop)
Kern	500	250	20.0mm	Aluminium Honeycomb Wabe

Tabelle 5-13: Materialdaten Al – Wabe und CFK – T300

	Ex [MPa]	Ey [MPa]	Ez [MPa]	Gxy [MPa]	Gxz [MPa]	Gyz [MPa]	nuxy	nuxz	nuyz	alpx [1/K]	alpy [1/K]	alpz [1/K]
Wabe	20	20	965	20	200	455	0,1	0,1	0,01	22,8e-6	22,8e-6	22,8e-6
T-300	132525	8440	8440	4700	4700	3150	0,34	0,34	0,28	2.0e-7	3.1e-5	3.1e-5

5.11.1 Preprocessor

Geometrieerstellung	T_C=20 : Kerndicke
Grundfläche erzeugen und extrudieren	L=500 : Plattenlänge
	B=250 : Plattenbreite
	T_DS_oben=1.5 : Deckschichtdicke oben
	T_CFK_layer=0.2 : Dicke einer CFK-Schicht
	RECTNG,0,L,0,B
	*GET,A_1,area,num,nxth
	VEXT,A_1,,,,,T_C
Definition der Elementtypen	ET,1,181
Shell181 und Solid45	ET,2,45
Definieren der Materialmodelle	siehe 5.5, hier muss nun zusätzlich für jedes Material der thermische Ausdehnungskoeffizient (α_{px}) mit angegeben werden.
Material 1: Aluminium	
Material 2: CFK – T300	
Material 3: Alu –Wabenkern	siehe 5.5

Sections für Deckschichten definieren

1 x Aluminium

1 x 8 Lagen CFK T300 quasiiisotrop

Lokales Koordinatensystem CSWPLA,11,0,1,1

erstellen im Ursprung der Working Plane zur Elementausrichtung definieren

Working Plane – Local Coordinate System – Create – At WP Origin...

Vernetzen der Deckschichten	ASEL,s,loc,z,0
(obere und untere Fläche des Volumens)	TYPE,1
	SECNUM,1
	ESYS,11
	AESIZE,all,10
	AMESH,all
	...ebenso für 2. Fläche

Vernetzen des Volumens	TYPE,2
	MAT,3
	ESYS,11
	LSEL,u,loc,z,0
	LSEL,u,loc,z,T_c
	LESIZE,all,,,6
	VSWEET,all

Erstellen von Komponenten	ASEL,s,loc,z,0
Select – Component/Assembly – Create Component	CM,DS_unten,area
	ASEL,s,loc,z,T_c
	CM,DS_oben,area
	VSEL,all
	CM,Kern,volu

Das fertig diskretisierte Modell ist in Abbildung5-133 abgebildet. Dabei sollte mit dem /ESHAPPE, 1 Befehl die richtige Element - und Section – Zuweisung überprüft werden. Über den SECOFFSET Befehl sollte noch die richtige Richtung zur Aufdickung der Sections eingestellt werden.

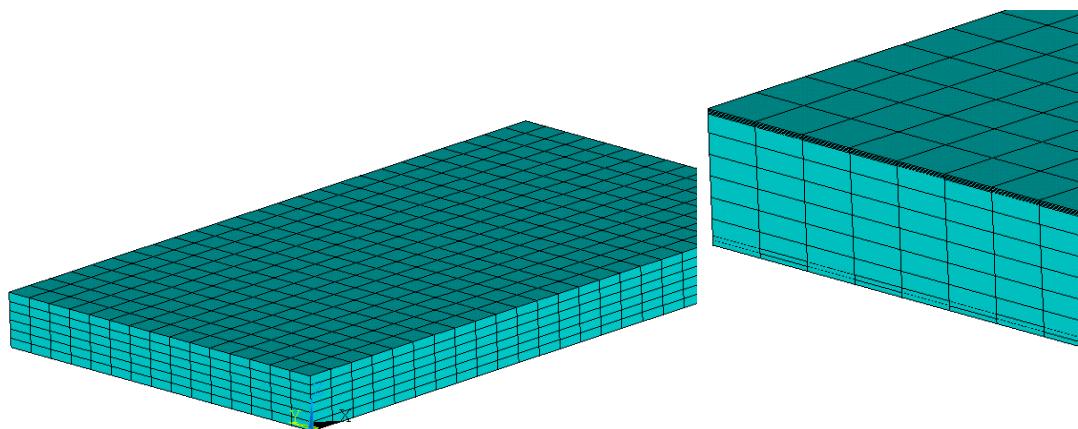


Abbildung5-133:Diskretisiertes Modell der Sandwichplatte

5.11.2 Solution

Nachdem die Geometrie erstellt ist müssen die Randbedingungen und Lasten definiert werden. Die Platte soll an der unteren Deckschicht bei $x=L/2$ über die gesamte Breite derart gelagert werde, dass eine freie, thermische Dehnung in y – und z – Richtung möglich ist. In Abbildung 5-134 ist eine mögliche Lagerungsvariante dargestellt.

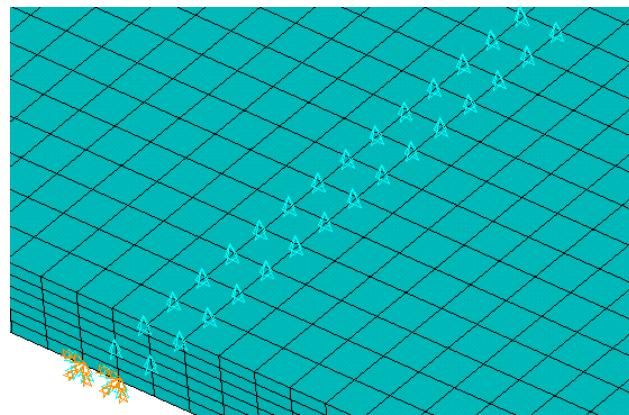


Abbildung 5-134: Lagerung der Sandwichplatte

Als Lastfall sollen in diesem Beispiel verschiedene konstante Temperaturen sowie Temperaturgradienten untersucht werden. Die Temperaturlastfälle sind in Tabelle 5-14 zusammengefasst. Temperaturen werden in ANSYS wie Kräfte direkt auf die jeweiligen Knoten aufgebracht.

Tabelle 5-14: Zusammenstellung der Temperaturlastfälle 1 - 3

Lastfall 1		konstante Temperatur von 100°C im gesamten Bauteil
Lastfall 2		linearer Temperaturgradient über die Höhe der Platte von -10°C bis 70°C

Lastfall 3		linearer Temperaturgradient über die Länge der Platte von -70°C bis 100°C
-------------------	--	---

Um diese Lastfälle zu modellieren soll im Weiteren der bereits bekannte *DO – Befehl verwendet werden. Somit kann über eine Schleife die jeweilige Temperatur den einzelnen Knoten in Abhängigkeit ihrer Koordinate zugewiesen werden. Dazu soll wie folgt vorgegangen werden:

Eine *DO – Schleife soll bei der kleinsten Knotennummer beginnend die z – Koordinate des jeweiligen Knoten in einen Parameter speicher. Daraus wird über den Temperaturgradienten die Temperatur an diesem Knoten berechnet und ihm anschließend zugewiesen. Die Knotennummer wird bei jedem Durchlauf der Schleife auf die nächsthöhere erhöht. Dieses Vorgehen ist für alle 3 Lastfälle zu nutzen.

Knoten lagern

(je nach Elementgröße existieren evtl. bei $x=L/2$ keine Knoten. Dann sollten die Lager an allen Knoten der Elementreihe bei $x=L/2$ gelagert werden)

/SOLU

NSEL,s,loc,x,L/2+L/50, L/2-L/50

NSEL,r,loc,y,0

NSEL,r,loc,z,0

D,all,ux

D,all,uy

D,all,uz

NSEL,s,loc,x,L/2+L/50, L/2-L/50

NSEL,r,loc,z,0

D,all,uz

Ecktemperaturen definieren

T_u=-10

T_o=100

*DO – Schleife zum Aufbringen der Temperatur

/PREP7

ALLS

Auslesen der gesamten Knotenzahl (N_Nodes)

*GET,N_Nodes,node,0,count

Tmp_Node=0

Temporärer Parameter Tmp_Node auf 0 setzen.
Enthält später die aktuelle Knotennummer

Steigung des Gradienten Berechnen

$$d_T = (T_o - T_u) / T_c$$

***DO Schleife starten** von i=1 bis i=N_Nodes

***DO,i,1,N_Nodes,1**

Temporären Parameter auf nächst höhere Knotennummer (NXTH: next higher) setzen $Tmp_node = NDNEXT(Tmp_node)$

Z – Koordinate des Knoten ausgeben

***get,z_node,node,Tmp_Node,loc,z**

Temperatur bei dieser Koordinate berechnen

$$Temp_node = (z_node * d_T) + T_u$$

Temperatur auf aktuellen Knoten aufbringen

BF,Tmp_node,TEMP,Temp_node

Beenden der Schleife

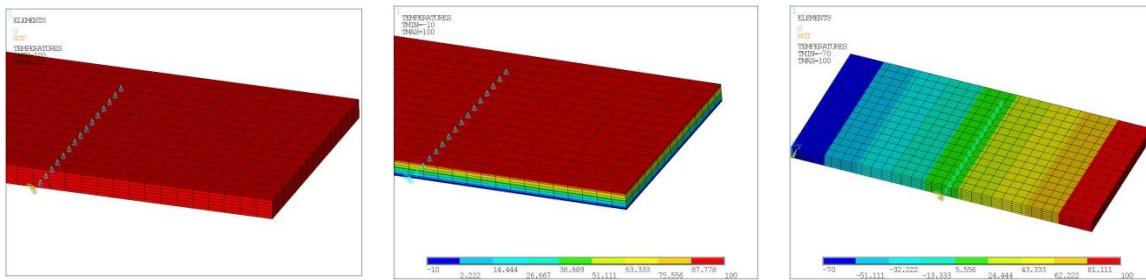
***ENDDO**

Starten der Solution

/SOLU

SOLVE

Um festzustellen ob die Temperaturen richtig auf das Modell aufgebracht wurden sollte im Anschluss über *Plot Ctrls – Symbols* unter dem Punkt *Body Load Symbols - Structural Temps* die Temperaturverteilung dargestellt und überprüft werden. Die Temperaturverteilung bei den einzelnen Lastfällen ist in Abbildung 5-135 dargestellt.



Lastfall1

Lastfall2

Lastfall3

Abbildung 5-135: Temperaturverteilung der drei Lastfälle

5.11.3 Postprocessing

Die auftretenden Verformungen der Platte je Lastfall sind in Abbildung 5-136 dargestellt. Ausgehend von diesen Verformungsplots sollen nun verschiedene Ansätze untersucht werden, die Verformungen der Sandwichplatte bei einem Lastfall zu minimieren. Folgende Änderungen an der Sandwichkonstruktion sollen selbstständig analysiert werden:

1. Erhöhung der Kerndicke auf 30mm
2. Änderung des Kernmaterials zu isotropen Hartschaum (Rohacell)
3. gleiches Material auf beiden Deckschichten (Alu/Alu oder CFK/CFK)

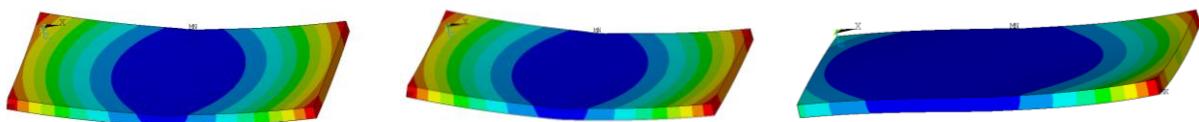


Abbildung 5-136: Thermoelastische Verformungen bei Lastfall 1-3

5.11.4 Weitere Möglichkeit der Sandwichmodellierung

Eine weitere Möglichkeit in ANSYS Sandwichstrukturen zu modellieren ist die Verwendung von Schalenelementen mit einer sogenannten Sandwich – Option. Solche Elemente berücksichtigen Effekte aus Schubverformung bei Sandwichkonstruktionen. Der Sandwich selbst wird in diesem Fall auch als Layered – Shell mit dem Sandwichkern als eigene Lage definiert. Diese Variante der Modellierung ist deutlich weniger aufwändig als eine Shell / Solid – Modellierung und zur globalen Abbildung von Steifigkeiten etc. völlig ausreichend. Da diese Elemente jedoch nur einen Knoten über die Höhe besitzen, empfiehlt es sich bei detaillierten Analysen einer Sandwichstruktur die Shell / Solid Modellierung zu verwenden. Vor allem wenn Effekte mit einem Gradienten über die Dicke des Sandwich untersucht werden sollen ist dieses Vorgehen unerlässlich. Die Modellierung eines Temperaturgradienten über die Dicke (siehe 5.11) wäre im Falle der Verwendung von Schalenelementen mit Sandwich – Option nicht möglich gewesen.

Um den direkten Vergleich der beiden Modellierungsarten, besonders in Hinblick auf Steifigkeiten und Spannungen, zu erhalten, sollen in einem FE – Modell zwei Sandwichplatten auf unterschiedliche Weise Modelliert werden. Dazu zwei Platten der obigen Abmessungen, zum einen als Shell – Modell und zu anderen als Shell / Solid – Modell, modellieren. Darauf achten, dass der Aufbau des Sandwichs in beiden Modellen identisch ist. Danach sollte auf beide Platten die gleiche Last aufgebracht werden. Am besten eine Kraft F in Z- Richtung am Plattenende, verteilt auf alle Knoten.

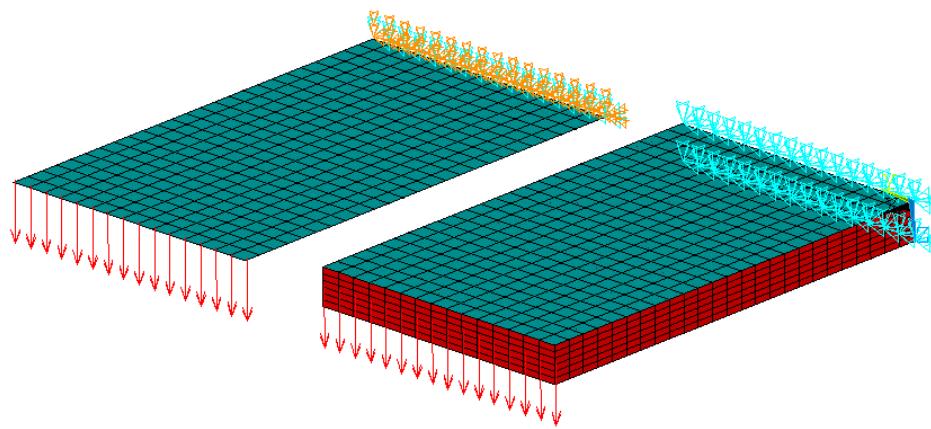


Abbildung 5-137: Varianten der Sandwichmodellierung

Anschließend kann die Solution gestartet werden. Die Verschiebungen in z – Richtung sowie die Spannungen in Plattenlängsachse sind in Abbildung 5-138 abgebildet.

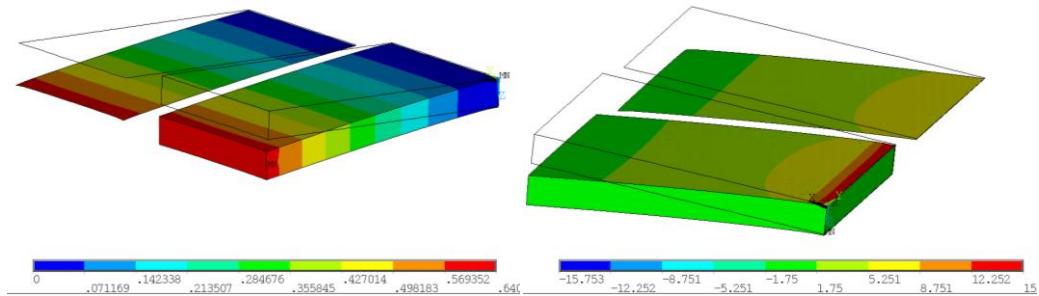


Abbildung 5-138: Vergleich der Verschiebungen (u_z) und Spannungen (s_x)

Im Postprocessor sollen einige Ergebniswerte miteinander verglichen werden. Dazu die folgenden Werte der einzelnen Platten ermitteln und vergleichen. Neben dem Vergleich einzelner Maximalwerte sollen verschiedene Spannungsgradienten miteinander verglichen werden. Versuchen Sie dabei eventuelle Unterschiede zu begründen. Vor allem bezüglich der Spannungen erkennt man deutliche Unterschiede zwischen den beiden Modellen. Dies liegt vor allem daran, dass bei dem Schalenmodell lediglich ein Knoten über die Höhe verfügbar ist, und somit keine getrennte Betrachtung der Knotenspannungen auf Ober – und Unterseite machbar ist. Die Steifigkeiten hingegen besitzen eine sehr gute Übereinstimmung.

Tabelle 5-15: Vergleich der Analyseergebnisse der Sandwichmodellierung

Größe	Wert 1 (shell)	Wert 2 (shell/solid)	Abweichung
$U_{z,\max}$	0,63697mm	0,6452mm	1,29%
$\sigma_{x,\max}$	6,7MPa	+- 15,75MPa	130%

Abschließend lässt sich also festhalten, dass bei der Art der Modellierung von Sandwichstrukturen immer auf die beabsichtigte Detailliertheit der Ergebnisse geachtet werden muss. Sind nur globale Eigenschaften der Struktur von Interesse (Verformung, Eigenformen, etc.) bzw. besitzt der Sandwich eine sehr geringe Dicke, so reicht eine Modellierung mit 2 – D Schalenelementen vollkommen. Sollen jedoch Eigenschaften analysiert werden, welche sehr lokal auftreten bzw. einen Gradienten über die Sandwichdicke besitzen, muss die etwas aufwändigeren Shell / Solid Modellierung verwendet werden. Vor allem die Modellierung von Temperaturgradienten, Spannungen im Kernmaterial bzw. lokale Spannungsspitzen an Lager – oder Krafteinleitungsstellen erfordern meist die etwas aufwändigeren Shell / Solid Variante.

Anhang A Liste wichtiger ANSYS – Befehle

*DIM	Definiert eine Matrix
*DO	Anfang einer Schleife
*ENDDO	Ende einer Schleife
*GET	Auslesen eines Skalaren Werts und speichern als Parameter oder Eintrag einer Matrix
*VWRITE	Ausschreiben von Parametern in Textdateien
/AUX15	Prozessor zum Einlesen von .IGS-Dateien
/AXLAB	Beschriftet die Achsen von Graphen
/CLEAR	Löscht Datenspeicher
/ESHAPE	Einstellen der Elementdarstellung
/EXPAND	Darstellung der Lösung in einem definierten Bereich
/EOF	Beendet das Einlesen eines Inputfiles
/GROPT	Einstellungen zur Anzeige bei Graphen
/INPUT	Liest Daten aus einer Eingabe-Datei ein
/NERR	Festlegen der maximalen Anzahl an Warnungen und Fehler
/PBC	Anzeigen / Verbergen von Randbedingungen
/POST1	aufrufen des Postprocessor
/PREP7	aufrufen des Preprocessor zur Modellerstellung
/REPLOT	Erneutes Plotten der Lösung (nötig nach Änderungen im Postprozessor)
/SOLU	Startet Solver (nur den Prozessor, nicht die Lösung selber!)
/VIEW	Legt Blickrichtung auf Lösungsplot fest
A	Erstellt eine Fläche aus ausgewählten Keypoints
AATT	Weißt unvernetzten Flächen Attribute zu
ACEL	Definieren von Beschleunigungen
ADELE	Löscht ausgewählte Flächen
ADRAG	Generiert eine Fläche durch Rotation oder Extrusion von

	Linienelementen
<i>AESIZE</i>	Legt die Elementgröße auf der zu vernetzenden Flächen fest
<i>AGLUE</i>	Vereinigt aneinander grenzende Flächen
<i>AL</i>	Generiert eine durch Linien begrenzte Fläche
<i>ALLS</i>	Wählt alles aus (hebt vorhergehende Auswahlen auf)
<i>AMESH</i>	Vernetzen von Flächen
<i>ANMODE</i>	Generiert eine Animation der Eigenform
<i>ANSOL</i>	Speichert gemittelte Knoten Daten (z.B. Verschiebung)
<i>ANTYPE</i>	Legt die Art der Analyse fest (z.B. Modalanalyse, etc.)
<i>AOVLAP</i>	Trimmt sich überlappende Flächen miteinander
<i>ASBA</i>	Verschneidet 2 Flächen miteinander
<i>ASBL</i>	Verschneidet eine Fläche mit einer Linie
<i>ASEL</i>	Selektiert Flächen
<i>AUTOTS</i>	Festlegung der Zeitschritte
<i>BSPLIN</i>	Generiert eine Spline aus Keypoints
<i>BUCOPT</i>	Legt Optionen für die Beulanalyse fest
<i>CIRCLE</i>	Generiert einen Kreisbogen
<i>CM</i>	Erzeugt Komponenten
<i>CMSEL</i>	Selektiert eine Komponente
<i>CM PLOT</i>	Plotten der aktiven Komponenten
<i>CMLIST</i>	Auflisten aller Komponenten
<i>CMDELE</i>	Löschen von Komponenten
<i>CMGRP</i>	Gruppieren von Komponenten zu Assemblies
<i>CP</i>	Definiert Coupling Sets
<i>CSKP</i>	Definiert ein lokales KoSy durch drei Keypoints
<i>CSWPLA</i>	Definiert ein lokales KoSy auf der aktiven Arbeitsebene
<i>CSYS</i>	Wechsel in bereits definiertes KoSy
<i>CYL4</i>	Erzeugt einen Zylinder in der Arbeitsebene

<i>D</i>	Definiert Verschiebungsrandbedingungen
<i>DELTIM</i>	Länge eines Zeitschrittes
<i>DL</i>	Definiert Verschiebungsfreiheitsgrade von Linien
<i>DMPRAT</i>	Dämpfungsrate der Struktur
<i>EMODIF</i>	Modifiziert Elementattribute wie Section, Material, Elementtyp,...
<i>EQSLV</i>	wählt den Typ des Gleichungslösers
<i>E SIZE</i>	Legt die globale Elementgröße fest
<i>ESLA</i>	Selektiert Elemente auf einer Fläche
<i>ESYS</i>	Weißt ausgewählten Elementen ein Element – KoSy zu
<i>ET</i>	Definiert einen Elementtyp
<i>EXTOPT</i>	Optionen zur Flächenextrusion
<i>F</i>	Aufbringen einer Kraft an selektierten Knoten
<i>FDELE</i>	Löscht Kraft auf ausgewählten Knoten
<i>FINISH</i>	Schließt einen laufenden Prozessor
<i>HARFRQ</i>	Bestimmt Frequenzspektrum für harmonische Analyse
<i>HROPT</i>	Einstellungen zur harmonischen Analyse
<i>HROUT</i>	Einstellungen zur Datenausgabe bei harmonischer Analyse
<i>IGESIN</i>	Liest .IGS-Datei in ANSYS ein
<i>INISTATE</i>	Definiert Ausgangszustände von Elementen (z.B. Vorspannung)
<i>IOPTN</i>	Legt Optionen beim Import von Modellen fest
<i>K</i>	Erstellt einen Keypoint
<i>KBC</i>	Stepped oder ramped Last bei harmonischer Analyse
<i>KEYOPT</i>	Legt Keyoptions von Elementtypen fest
<i>KGEN</i>	Verschieben und Kopieren von Keypoints
<i>KSEL</i>	Selektiert Keypoints
<i>L</i>	Erzeugt Linie aus Keypoints
<i>LAYER</i>	Auswahl einer Lage (Layered Shell)

<i>LDELE</i>	Löscht Linien
<i>LDIV</i>	Unterteilt eine Linie in mehrere Linien
<i>LESIZE</i>	Anzahl der Elemente auf einer Linie
<i>LGEN</i>	Verschieben und kopieren von Linien
<i>LMESH</i>	vernetzen von Linien
<i>LOCAL</i>	Definiert lokales KoSy durch Angabe von Ort und x - Orientierung
<i>LSEL</i>	Selektiert Linien
<i>LSSCALE</i>	Skaliert Linien
<i>LSSOLVE</i>	Liest Load-Step-Dateien ein und berechnet Lösung
<i>LSTR</i>	Siehe <i>L</i>
<i>LSWRITE</i>	Schreibt Load Step in eine Ausgabedatei
<i>LUMPM</i>	Einstellungen zur lumped Massenmatrix
<i>M</i>	Festlegung der Hauptfreiheitsgrade
<i>MAT</i>	Weißt ausgewählten Elementen die Materialnummer aus <i>MP</i> zu
<i>MODOPT</i>	Legt Optionen zur Modalanalyse fest
<i>MP</i>	Legt Materialeigenschaften eines Elementtyps fest
<i>MXPAND</i>	Maximale Anzahl der Eigenmoden bei Modal- oder Beulanalyse
<i>NEQIT</i>	Abbruchkriterium, legt maximale Anzahl an Iterationsschritten bei nichtlinearen Rechnungen fest
<i>NLGEOM</i>	Festlegung von geometrischen Nichtlinearitäten
<i>NROTAT</i>	Rotiert die Knotenkoordinatensysteme ins aktive KOSY
<i>NSEL</i>	Selektiert Knoten
<i>NSLE</i>	Selektiert Knotenpunkte auf einem Element
<i>NSOL</i>	Speichert nodale Daten (z.B. Verschiebung)
<i>NSUBST</i>	Legt die Anzahl der Substeps pro Load Step fest
<i>NUMCMP</i>	Neue Nummerierung der ausgewählten Objekte, beginnend bei 1
<i>NUMMRG</i>	Verschmilzt mehrfach definierte Objekte
<i>OUTRES</i>	Schreibt Daten in eine Ausgabedatei

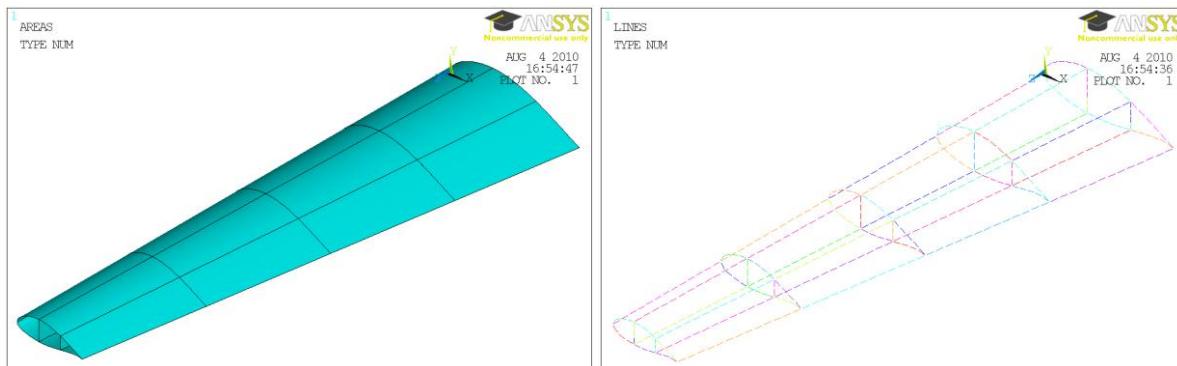
<i>PLDISP</i>	Plottet die verformte Struktur
<i>PLNSOL</i>	Plottet die berechnete Lösung
<i>PLVAR</i>	Plottet bis zu 10 Variablen in Form eines Graphen
<i>PSTRES</i>	Effekte durch Vorspannung werden berücksichtigt
<i>R</i>	Definiert die Realconstants eines Elements
<i>REAL</i>	Weißt ausgewählten Elementen die Realronstants aus <i>R</i> zu
<i>RECTNG</i>	Erzeugt ein Rechteck
<i>RFORCE</i>	Liefert Reaktionskraft
<i>RSYS</i>	Wählt ein lokales KoSy aus, in dem die Lösung ausgegeben wird
<i>SECDATA</i>	Definition der Section - Eigenschaften (Querschnittswerte)
<i>SECNUM</i>	Weißt ausgewählten Elementen eine Section zu
<i>SECOFFSET</i>	Richtung der Aufdickung(Offset) einer Section
<i>SECT</i>	Definition einer Section
<i>SECTYPE</i>	Verknüpft den Section-Typ (z.B. BEAM) mit einer ID
<i>SET</i>	Wählt Datensatz aus Result-Datei aus
<i>SOLVE</i>	Startet den Lösungsprozess
<i>TB</i>	Legt eine Tabelle für nichtlineare Werkstoffkennwerte an
<i>TBPT</i>	Definiert einen Punkt auf einer nichtlinearen Kurve
<i>TIME</i>	Zeit am Ende eines Load Steps
<i>TRNOPT</i>	Einstellungen zur transienten Analyse
<i>TYPE</i>	Weißt ausgewählten Elementen den Elementtyp aus <i>ET</i> zu
<i>VOFFST</i>	Extrudiert eine Fläche zu einem Volumen
<i>XVAR</i>	Bestimmt die Anzeige der x-Variable

Anhang B Abschlussübungen

B.1 Flügelmodell

Geometrieerstellung Flügel

Erstellt werden soll ein Flügel:



Geometriedaten

Spannweite	5000mm
Profiltiefe (Wurzel)	750mm
Profiltiefe (Spitze)	375mm
Anzahl Spanter	2
Anzahl Rippen	3
Profiltyp	NACA 63-206 (Profilkoordinaten s. Tabelle 0-2)

Materialdaten

Rippen

Material	Aluminium
Dicke	5mm

Spannten

Alu / Hartschaum – Sandwich	Deckschichtdicke: 1mm Kerndicke: 7.5mm
-----------------------------	---

Oberflächenbeplankung

Material	CFK T300
Laminataufbau	16 Lagen, quasiisotrop (Lagendicke: 0.21mm)

Lasten und Lagerung

Last	3000N verteilt auf alle Knoten der Außenhaut 75% Oberschale 25% Unterschale
Lagerung	gesamte Flügelwurzel,

Die Lagerung soll derart erstellt werden, dass die Bestimmung der Reaktionskräfte und Reaktionsmomente im Punkt A möglich ist.
 Dieser Punkt liegt bei $x=-100\text{mm}$.

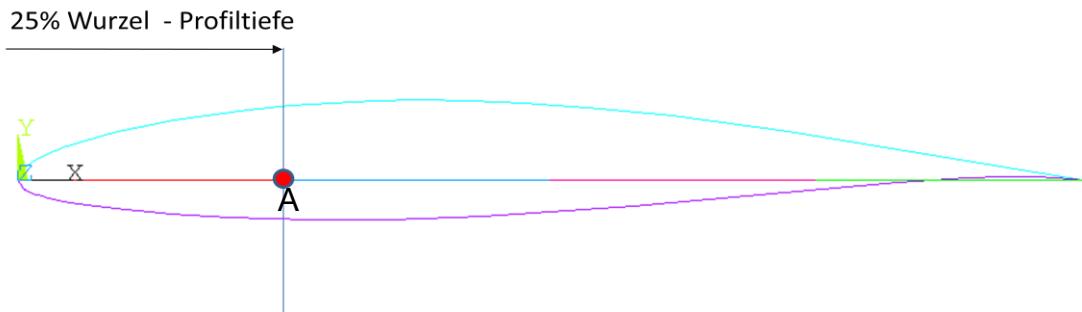


Abbildung 0-1: Position des Punktes zur Reaktionskraftbestimmung

Tabelle 0-1: Benötigte Materialdaten Flügelmodell

CFK T300	Wert	Einheit
E_{11}	132525	MPa
E_{22}	8440	MPa
E_{33}	8440	MPa
G_{12}	4700	MPa
G_{23}	3150	MPa
G_{13}	4700	MPa
ν_{12}	0.34	MPa
ν_{23}	0.34	MPa
ρ	1800	kg/m ³
Aluminium		
E	70.000	MPa
ν	0.33	[$-$]
ρ	2700	kg/m ³
Hartschaum		
E	70	MPa
ν	0.5	[$-$]
ρ	52	kg/m ³

Tabelle 0-2: Profilkoordinaten

Oberseite		Unterseite	
X [%]	Y [%]	X [%]	Y [%]
0	0	0	0
0,4577	0,5522	0,5423	-0,4520
0,7028	0,6778	0,7972	-0,5372
1,1965	0,876	1,3035	-0,6621
2,4385	1,2411	2,5615	-0,8690
4,9315	1,7770	5,0685	-1,1451
7,4294	2,1891	7,5706	-1,3412
9,9297	2,5269	10,0703	-1,4921
14,9341	3,0590	15,0659	-1,7135
19,9414	3,4530	20,0586	-1,8601
24,9503	3,7370	25,0497	-1,9470
29,9601	3,9278	30,0399	-1,9833
34,9705	4,0293	35,0295	-1,9684
39,9808	4,0423	40,0192	-1,9001
44,9908	3,9716	45,0092	-1,7812
50,0000	3,8250	50,0000	-1,6186
55,008	3,6113	54,992	-1,4208
60,0146	3,3390	59,9854	-1,1968
65,0195	3,0147	64,9804	-0,9538
70,0226	2,6448	69,9774	-0,7004
75,0235	2,2381	74,9765	-0,4481
80,0222	1,8037	79,9778	-0,2108
85,0188	1,3531	84,9812	-0,0076
90,0134	0,8991	89,9866	0,1356
95,0064	0,4529	94,9936	0,1790
100,0000	0	100	0

Aufgabenstellung

Erstellen Sie für folgende Aufgaben jeweils ein Input-Script und geben Sie dieses mit Ihren Antworten ab.

- (1) Führen Sie eine lineare, statische Analyse durch
 - a) bestimmen Sie die maximale Verformung an der Flügelspitze.
 - b) bestimmen Sie die maximale von Mises Spannung in den Spanten und Rippen.
 - c) bestimmen Sie für jeden layer die maximale und minimale Komponentenspannung (σ_x , σ_y , σ_{xy}) in der Oberflächenbeplankung.
 - d) Bestimmen Sie alle 6 Lagerreaktionen im Punkt A, überprüfen Sie damit ihr Modell.
 - e) Bestimmen Sie die Gesamtmasse des Flügels
- (2) Führen Sie bei gegebener Last (3000 N) eine lineare Beulanalyse durch.
 - a) bestimmen Sie die ersten 10 Beulfaktoren.
 - b) bestimmen Sie für jeden Beulfaktor den Bereich der zuerst beult.
- (3) Führen Sie eine Modalanalyse durch:
 - a) ungelagert, wozu dient diese Art der Analyse.
 - b) Lagerung in der Einspannung (**ohne Lasten**).
 - c) berechnen Sie jeweils die ersten 15 Moden und beschreiben Sie diese.
- (4) Führen Sie eine harmonische Analyse durch:
 - a) Frequenzbereich: 0-250 Hz
 - b) Lasten: wie in statischer Analyse
 - c) Dämpfung: 2%
 - d) erstellen Sie für den Frequenzbereich ein Frequency-Response-Diagramm mit logarithmischer Y-Achse.
 - i. Bestimmen Sie die Frequenz, bei der die maximale Verschiebung auftritt und beziffern Sie die maximale Verschiebung.
 - ii. Bestimmen Sie aus dem Diagramm, bei welchen Frequenzen Resonanzen auftreten.
 - iii. Bestimmen Sie aus dem Diagramm, bei welchen Frequenzen Anti-Resonanzen auftreten.

B.2 Reflektormodell

Aus dem in Abbildung0-2 dargestellten Reflektor soll, durch sinnvolle Vereinfachungen, ein FE – Modell in ANSYS erstellt werden. Mit Hilfe dieses Modells sollen anschließend unterschiedliche Analysen in ANSYS durchgeführt werden.

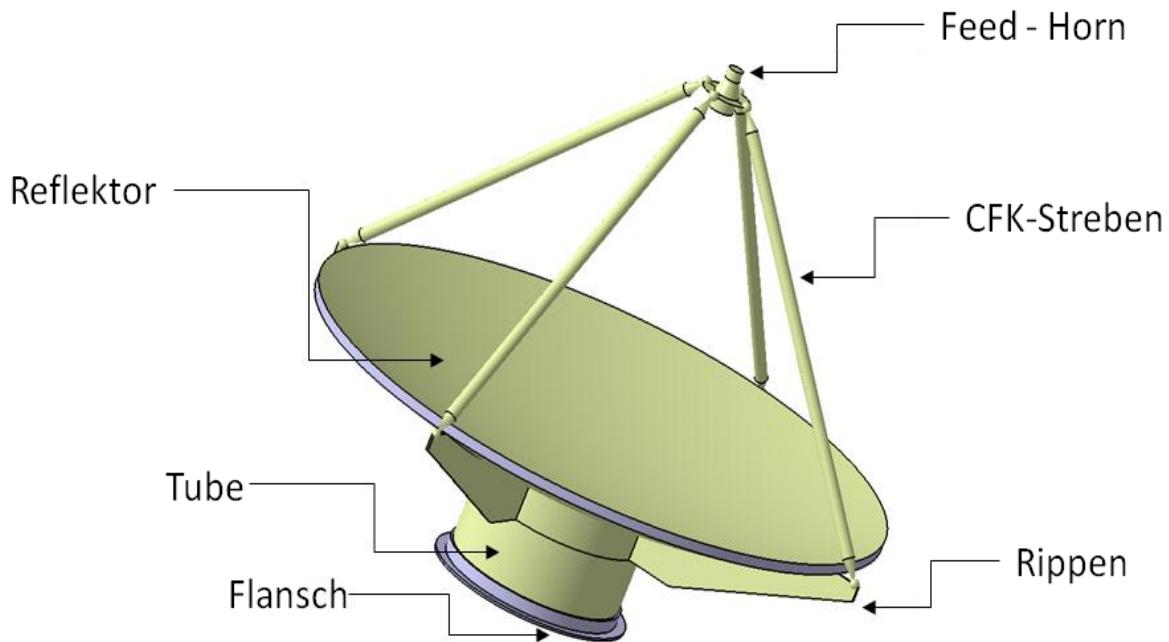


Abbildung0-2: Reflektor CAD – Modell

Folgende Lastfälle sollen untersucht werden:

$$\text{Lastfall 1: Beschleunigungslast } \ddot{a} = \begin{bmatrix} 25g \\ 20g \\ 60g \end{bmatrix}$$

Lastfall 2: Konstante Temperaturlast von 120°C

Lastfall 3: Temperaturgradient über die Höhe (z) von -50°C (Flansch) bis +70°C (Oberkante Reflektor), ab dort wieder konstante Temperatur bis zum Feed Horn.

Die Eckwerte des Temperaturverlaufs sind in Tabelle 0-3 zusammengestellt.

Tabelle 0-3: Eckwerte des Temperaturverlaufs über z

z[mm]	T
0	-50°C
350	70°C
1059.5	70°C

Die wichtigsten Abmessungen des Reflektors sind in Abbildung0-3 in Form einer Schnittdarstellung gegeben. Die Form des Reflektors entspricht einem Paraboloid. Die Funktion einer Parabel durch den Scheitelpunkt lautet: $f(x) = \frac{1}{3000} x^2$

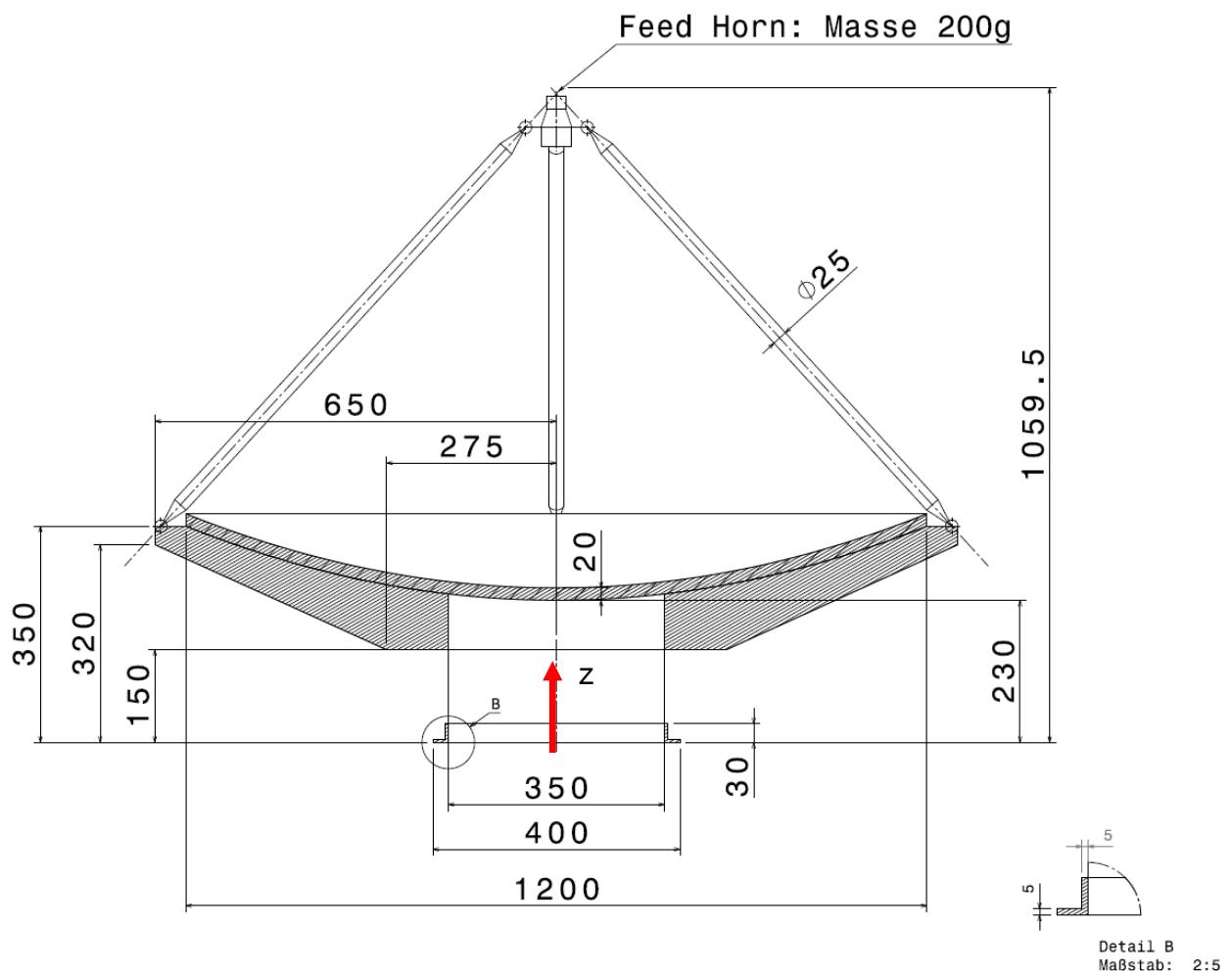


Abbildung0-3: Wichtige Abmessungen

Der Reflektor wird am unteren Rand des Aluminium Rings (Flansch) über 8 Schrauben gelagert. Diese sind gleichmäßig über den Umfang verteilt.

Die einzelnen Komponenten mit ihren Maßen und Bauweisen des Reflektors sind in Tabelle 0-4 zusammengefasst. In Tabelle 0-5 sind die wichtigsten Materialkennwerte gegeben.

Tabelle 0-4. Aufbau und Maße der Komponenten

Komponente	Bauweise / Maße	Material
Reflektor	Sandwichkonstruktion Kerndicke: 20mm Deckschichten: je 8 Lagen quasiisotrop	Kern: Hartschaum Deckschichten: T300
CFK – Rohre	10 Lagen $[0^\circ/30^\circ/0^\circ/-30^\circ/0^\circ]_s$	T300
Rippen	Sandwichkonstruktion Kerndicke: 5mm Deckschichten: $[45^\circ/-45^\circ]_s$	Kern: Hartschaum Deckschichten: T300
Tube	8 Lagen quasiisotrop	T300
Aluminium Ring	Wandstärke 5mm	Aluminium
Feed Horn	Massepunkt $m = 200\text{g}$	---

Tabelle 0-5: Materialdaten für Reflektormodell

CFK T300	Wert	Einheit
E_{11}	132525	MPa
E_{22}	8440	MPa
G_{12}	4700	MPa
G_{23}	3150	MPa
G_{13}	4700	MPa
ν_{12}	0.34	[−]
ν_{13}	0.34	[−]
ρ	1800	kg/m^3
α_x	$2.1\text{e}-7$	$1/\text{K}$
α_y	$3.0\text{e}-5$	$1/\text{K}$
Aluminium		
E	70.000	MPa
ν	0.33	[−]
ρ	2700	kg/m^3
α	$22.3\text{e}-6$	$1/\text{K}$
Hartschaum		
E	70	MPa
ν	0.5	[−]
ρ	52	kg/m^3
α	$3.5\text{e}-5$	$1/\text{K}$

Vorgehen bei der Modellierung

Die einzelnen Vereinfachungen und Annahmen welche zur Modellierung in ANSYS getroffen werden sollen sind im Folgenden genannt

Reflektor:

Bei der Modellierung des Reflektors in Sandwichbauweise soll der Sandwichkern durch Volumenelemente und die Deckschichten durch Schalenelemente modelliert werden. Die Verklebung zwischen Kern und Deckschichten soll als ideal steif angenommen werden. Für eine ausreichend genaue Abbildung des Kerns sollen mindesten 3 Elemente über dessen Höhe verwendet werden.

CFK Rohre:

Die CFK Rohre sollen durch Balkenelemente mit den entsprechenden Querschnittswerten (Rohrquerschnitt) und resultierende Steifigkeiten vereinfacht werden. Als Wandstärke soll die Laminatdicke angenommen werden. Die Anbindung der Rohre an die Rippen wird als ideal steif angesehen. Für das Laminat können dabei folgende Kennwerte angenommen werden.

E [MPa]	G[MPa]	α [1/K]
100.980	13.507	-1.01e-4

Rippen:

Die Rippen sollen durch Schalenelemente mit sogenannter „Sandwich – Option“ vereinfacht modelliert. Die Ausrichtung der 0° - Lagen in den Deckschichten verläuft in radialer Richtung.

Tube / Al – Ring:

Das Tube sowie der Aluminium Ring wird durch Schalenelemente (layered Shells) mit „Sandwich Option“ modelliert. Der Verlauf der 0° - Lagen ist dabei parallel zur globalen z – Richtung, y – Richtung in radialer Richtung.

Feed Horn:

Das Feed Horn wird als Punktmasse (Masseelement) mit einer Masse von 200g modelliert. Dieses ist ideal steif an die CFK – Rohre angebunden.

Allgemeine Hinweise:

- Nutzen Sie eventuelle Symmetrien bei der Geometrieerstellung
- Verwenden Sie sinnvolle Koordinatensysteme
- Achten Sie auf eine regelmäßige Vernetzung der Geometrie

- Alle Maße sollen in Form von Parametern verwendet werden

Aufgabenstellung

Erstellen Sie für folgende Aufgaben jeweils ein Input-Script und geben Sie dieses mit Ihren Antworten ab.

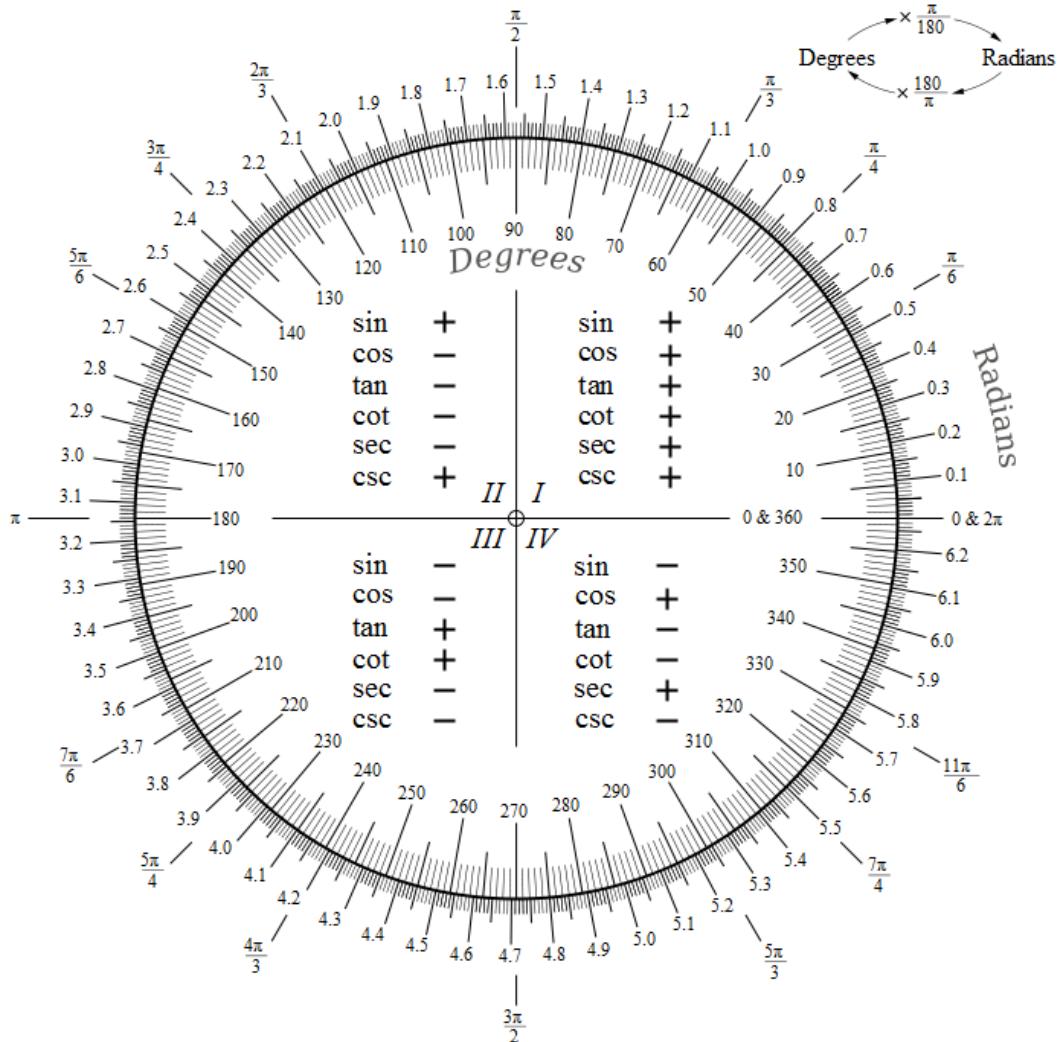
- (1) Führen Sie eine lineare, statische Analyse bei der gegebenen Beschleunigung durch
 - a) bestimmen Sie die maximale Verschiebungen des Feed – Horns je Richtung sowie der Reflektoroberfläche und beschreiben Sie Art der jeweiligen Verformung (Biegung, Torsion,...)
- (2) Bestimmen Sie die maximale von Mises Spannung in
 - a)CFK – Rohren
 - b)Al – Flansch
 - c)Schaumkern Rippen
 - d)Schaumkern Reflektor
 - e)Wo treten diese jeweils auf auf?
 - f) bestimmen Sie die maximalen Schubspannungen im Kernmaterial des Reflektors, welche Schubspannungen dominieren?
 - g)bestimmen sie die Lagerreaktionen in x,y,z-Richtung. Überprüfen Sie damit ihr Modell!
- (3) Führen Sie eine lineare Beulanalyse bei 100g in positiver z – Richtung durch.
 - a) bestimmen Sie die ersten 10 Beulfaktoren
 - b) bestimmen Sie in welchem Bauteil / Bereich zuerst Beulen auftritt
- (4) Führen Sie eine Modalanalyse durch:
 - a) ungelagert, wozu dient diese Art der Analyse?
 - b) gelagert am Aluminium Ring

berechnen Sie jeweils die ersten 10 Moden und beschreiben Sie diese
- (5) Führen Sie die zweithermoelastische Analysen(Lastfall 2,3) durch
 - a) Bestimmen Sie die maximalen thermoelastischen Verschiebungen (je Richtung) für jeden Lastfall:
 - des Feed Horn
 - der Reflektoroberfläche
 - b) Wo treten die höchsten thermoelastischen Spannungen auf? Wie hoch sind diese? Wodurch werden diese Ihrer Meinung nach verursacht?
- (6) Wo sehen Sie Schwachstellen / kritische Bereiche im Reflektorsystem? Begründen Sie Ihre Antwort und nennen Sie mögliche Maßnahmen um diese zu vermeiden.

Anhang C Sonstiges

C.1 Umrechnung Radian -> Degree

Da die Ergebnisse für Rotationsfreiheitsgrade in rad angegeben werden, hier eine kleine Umrechnungshilfe:



(Quelle: wikipedia)

Anhang D Referenz-Literaturverzeichnis

Für ein weiterführendes Eigenstudium wird die folgende Fachliteratur empfohlen:

- [1] Müller, G.; Groth, C.; „FEM für Praktiker, m. CD-ROM, Bd.1, Grundlagen“; Expert-Verlag; Auflage: 8., neu bearbeitete Auflage. (August 2007), ISBN-10: 3816926851, ISBN-13: 978-3816926856
- [2] Stelzmann , U.; Groth, C.; Müller, G.; „FEM für Praktiker, Bd., Strukturdynamik: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Strukturdynamik“; Expert-Verlag; Auflage: 5., neu bearb. Aufl. (Juli 2008), ISBN-10: 3816928420, ISBN-13: 978-3816928423
- [3] Groth, C.; Müller, G; „FEM für Praktiker, Bd.3, Temperaturfelder: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM-Anwendungen der Temperaturfeldberechnung“; Expert-Verlag; Auflage: 5., neu bearbeitete Auflage. (6. April 2009), ISBN-10: 3816927149, ISBN-13: 978-3816927143
- [4] Maurial, A.; Meißner, U. F.; „Die Methode der finiten Elemente: Eine Einführung in die Grundlagen (Springer-Lehrbuch)“; Springer Verlag; Auflage: 2 (26. Oktober 2000), ISBN-10: 354067439X, ISBN-13: 978-3540674399
- [5] Bathe, K.-J.; Zimmermann, P.; „Finite-Elemente-Methoden“; Springer, Berlin; Auflage: 2., vollst. neu bearb. und erw. A. (14. Februar 2007), ISBN-10: 3540668063, ISBN-13: 978-3540668060