

HANSER



Leseprobe

zu

„Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench“

von Christof Gebhardt

ISBN (Buch): 9783446450011

ISBN (E-Book): 9783446457409

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/9783446450011>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Inhalt

1	Vorwort	XI
1	Vorteile der simulationsgetriebenen Produktentwicklung	1
1.1	Zahl der Prototypen reduzieren	1
1.2	Kosten einsparen	3
1.3	Produktinnovationen fördern	4
1.4	Produktverständnis vertiefen	6
2	Voraussetzungen	9
2.1	Grundlagenkenntnisse	9
2.2	Organisatorische Unterstützung	10
2.3	Geeignete Soft- und Hardware-Umgebung	10
3	Grundlagen der FEM	13
3.1	Grundidee	13
3.2	Was heißt Konvergenz?	18
3.3	Was heißt Divergenz?	19
3.4	Genauigkeit	20
4	Anwendungsgebiete	23
4.1	Nichtlinearitäten	24
4.1.1	Kontakt	25
4.1.2	Nichtlineares Material	26
4.1.3	Geometrische Nichtlinearitäten	28

4.2	Statik	29
4.3	Beulen und Knicken	36
4.4	Dynamik	39
4.4.1	Modalanalyse	39
4.4.2	Angeregte Schwingungen	43
4.4.3	Fortgeschrittene modalbasierte Dynamik	45
4.4.4	Nichtlineare Dynamik	53
4.5	Design for Additive Manufacturing	67
4.6	Betriebsfestigkeit	71
4.7	Composites	79
4.8	Weitergehende Simulationen	82
4.8.1	Temperaturfelder	82
4.8.2	Strömung	83
4.8.3	Elektromagnetische Felder	84
4.8.4	Gekoppelte Analysen	85
4.8.5	Systemsimulation	88
4.9	Robust-Design-Optimierung	90
5	Standardisierung und Automatisierung	97
5.1	Generische Lastfälle	97
5.2	Skriptprogrammierung	99
5.3	Makrosprache Mechanical APDL	101
5.4	FEM-Simulation mit dem Web-Browser	103
6	Implementierung	105
6.1	Training	105
6.2	Anwenderunterstützung	107
6.3	Qualitätssicherung	108
6.4	Datenmanagement	109
6.5	Hardware und Organisation der Berechnung	109
7	Erster Start	115
7.1	Analyse definieren	116
7.2	Berechnungsmodell und Lastfall definieren	118
7.3	Ergebnisse erzeugen und prüfen	122

8	Der Simulationsprozess mit ANSYS Workbench	127
8.1	Projekte	128
8.1.1	Systeme und Abhängigkeiten	129
8.1.2	CAD-Anbindung und geometrische Varianten	132
8.1.3	Archivieren von Daten	137
8.2	Analysearten	139
8.3	Technische Daten für Material	141
8.4	Geometrie	143
8.4.1	Modellieren mit dem DesignModeler	143
8.4.2	Geometrie erstellen	144
8.4.2.1	Geometrie aufbereiten	152
8.4.3	Analysen in 2D	158
8.4.4	Balken	160
8.5	Modell	163
8.5.1	Die Mechanical-Applikation	164
8.5.1.1	Selektion	164
8.5.1.2	Komponenten	166
8.5.1.3	Steuerung der Ansichten	166
8.5.2	Geometrie in der Mechanical-Applikation	168
8.5.3	Koordinatensysteme	169
8.5.4	Virtuelle Topologie	171
8.5.5	Kontakte	172
8.5.5.1	Funktionsprinzip von Kontaktelementen	172
8.5.5.2	Baugruppen-Handling	173
8.5.5.3	Kontaktdefinition	175
8.5.6	Netz	181
8.5.6.1	Adaptive Vernetzung	182
8.5.6.2	Manuelle Vernetzung	186
8.5.6.3	Kontrolle der Vernetzung	192
8.5.6.4	Dünnwandige Bauteile	196
8.6	Setup	204
8.6.1	Analyseeinstellungen	204
8.6.2	Randbedingungen	206
8.6.2.1	Mechanische Randbedingungen	207
8.6.2.2	Thermische Randbedingungen	216
8.6.2.3	Symmetrie	218
8.6.2.4	Schrauben	223
8.6.2.5	Schweißnähte	231
8.6.3	Definitionen vervielfältigen	233
8.7	Lösung	234
8.7.1	Solver-Informationen	237
8.7.2	Konvergenz nichtlinearer Analysen	238
8.7.3	Wenn die Berechnung nicht durchgeführt wird	241

8.8	Ergebnisse	243
8.8.1	Spannungen, Dehnungen, Verformungen	243
8.8.2	Darstellung der Ergebnisse	247
8.8.2.1	Fokussierung der Ergebnisdarstellung	250
8.8.2.2	Animation	253
8.8.3	Automatische Dokumentation – Web-Report	254
8.8.4	Schnitte	255
8.8.5	Reaktionskräfte und -momente	257
8.8.6	Ergebnisbewertung mit Sicherheiten	258
8.9	Lösungskombinationen	259
9	Übungen	261
9.1	Biegebalken	262
9.2	Scheibe mit Bohrung	264
9.3	Parameterstudie	266
9.4	Designstudien, Sensivitäten und Optimierung mit optiSLang	272
9.5	Temperatur und Thermospannungen	283
9.6	Festigkeit eines Pressenrahmens	285
9.7	FKM-Nachweis	291
9.8	Presspassung	297
9.9	Hertz'sche Pressung	301
9.10	Steifigkeit von Kaufteilen	305
9.11	Druckmembran mit geometrischer Nichtlinearität	311
9.12	Elastisch-plastische Belastung einer Siebtrommel	315
9.13	Bruchmechanik an einer Turbinenschaufel	324
9.14	Schraubverbindung	333
9.15	Elastomerdichtung	337
9.16	Aufbau und Berechnung eines Composite-Bootsrumpfs	346
9.17	Beulen einer Getränkedose	358
9.18	Schwingungen an einem Kompressorsystem	365
9.19	Mehrkörpersimulation	372
9.20	Containment-Test einer Turbine	378
9.21	Falltest für eine Hohlkugel	385
9.22	Lineare Dynamik einer nichtlinearen Elektronikbaugruppe	391
9.23	Kopplung von Strömung und Strukturmechanik	402
9.24	Akustiksimulation für einen Reflexionsschalldämpfer	404
9.25	Schallabstrahlung eines Eisenbahnrades	407
9.26	Elektrisch-thermisch-mechanischer Mikroantrieb	412
9.27	Verhaltensmodell für die Systemsimulation einer Messmaschine	416

9.28	Topologieoptimierung	421
9.29	Lattice-Optimierung	426
9.30	Simulation der Additiven Fertigung	428
10	Konfiguration von ANSYS Workbench	431
10.1	Maßeinheiten und Geometriearten festlegen	431
10.2	Simulationseinstellungen	432
11	Export von Daten	435
11.1	Einbindung von alternativen Solvern	435
11.2	Export zu Excel	436
	Index	439

Vorwort

ANSYS Workbench ist eine der meistverbreiteten Softwarelösungen für strukturmechanische Simulationen, mit deren Hilfe Produkte schneller, zu geringeren Kosten und mit höherer Qualität auf den Markt gebracht werden können.

Auf Basis von Version 19 vermittelt dieses Praxisbuch die notwendigen Grundlagen, um mit ANSYS Workbench typische Fragestellungen mithilfe strukturmechanischer Simulationen zu beantworten.

Der grundlegende Aufbau wurde in der vorliegenden dritten Auflage beibehalten. Im ersten Teil (Kapitel 1 bis 6) werden die Grundlagen der verschiedenen Analysemöglichkeiten dargestellt, im zweiten Teil (Kapitel 7 und 8) werden die wichtigsten Funktionen für die strukturmechanische FEM-Simulation mit ANSYS erklärt und der dritte Teil (Kapitel 9) enthält Übungen zu typischen Applikationen.



Unter <http://downloads.hanser.de> finden Sie die Geometrien und Musterlösungen zu den im Buch beschriebenen Übungen.

In den letzten Jahren sind mir weitere interessante Anwendungsbereiche ans Herz gewachsen, in die Sie in dieser Auflage durch neu hingekommene Übungen einen Einblick erhalten:

- Topologieoptimierung
- Lattice-Optimierung
- Prozesssimulation für den 3D-Druck

Ich danke allen Lesern für ihre Rückmeldungen zu den ersten beiden Auflagen, meinen Kollegen bei CADFEM für ihr offenes Ohr bei all meinen Fragen, und vor allem meiner Frau Gerda für ihre Geduld.

Grafing, im Mai 2018

Christof Gebhardt

7

Erster Start

Für den ersten Berechnungsgang ist es empfehlenswert, ein einfaches, überschaubares Modell zu verwenden, um erst einmal die grundlegenden Funktionen kennenzulernen. Gönnen Sie sich diese Zeit und widerstehen Sie der Versuchung, gleich mit einem eigenen Modell zu beginnen. Sie können sich so besser auf die Handhabung konzentrieren und sind nicht von der physikalisch anspruchsvolleren eigenen Aufgabenstellung abgelenkt. Ein kleiner Winkelhalter aus Stahl soll in einer linear statischen Analyse auf Spannungen und Verformungen berechnet werden. Vereinfacht wird angenommen, dass er in der Anlagefläche komplett fixiert wird. Auf das etwas vorstehende Auge soll eine Kraft von 1 kN nach unten wirken (siehe Bild 7.1).

Ablauf üben

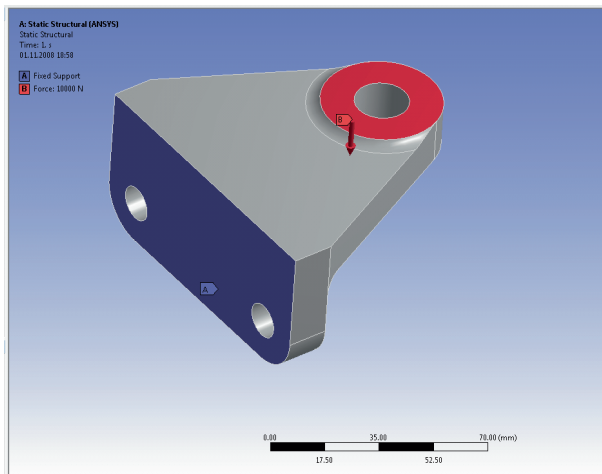


Bild 7.1 Erste Analyse: Winkelhalter mit Belastung und Lagerung

■ 7.1 Analyse definieren

Wie geht's los?

Starten Sie ANSYS Workbench über das Windows-Startmenü START/PROGRAMME/ANSYS 19.1/ANSYS WORKBENCH. Daraufhin erscheint der in Bild 7.2 dargestellte Projektmanager.

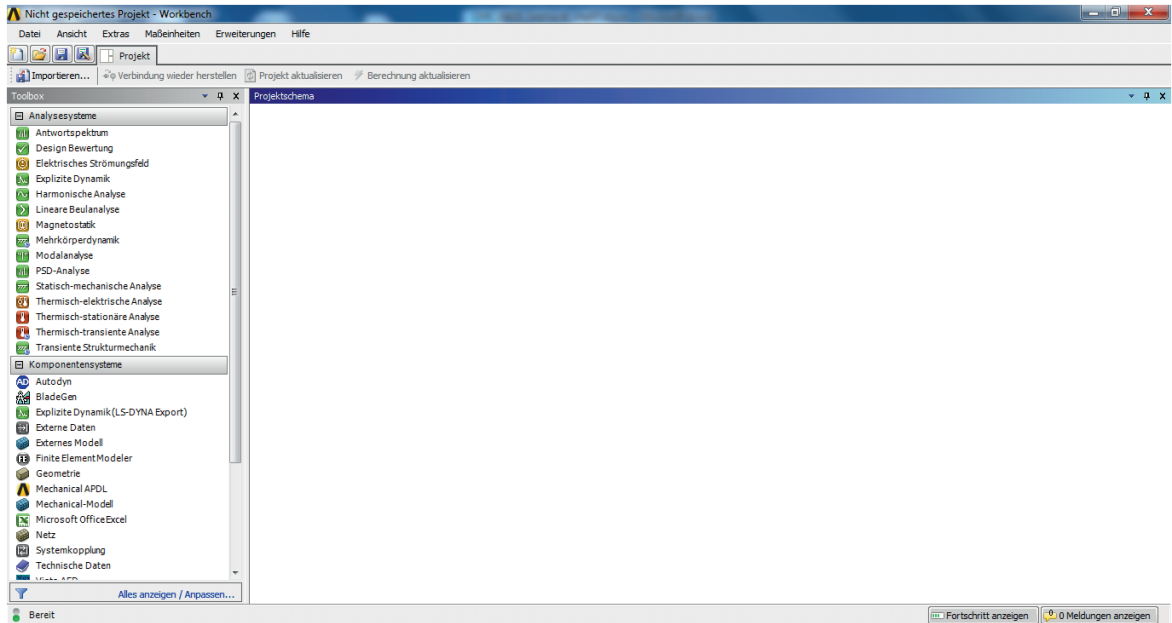


Bild 7.2 Projektmanager zum Beginn der Analyse

Analyse definieren

Auf der linken Seite in Bild 7.2 werden die verfügbaren Analysearten dargestellt. Für den Winkelhalter definieren wir eine statisch-mechanische Analyse. Mit einem Doppelklick auf **STATISCHE STRUKTURMECHANISCHE ANALYSE** unterhalb von **ANALYSENSYSTEME** wird eine neue Analyse – im Projektmanager „System“ genannt – angelegt. Statt des Doppelklicks kann im Projektbereich (großer leerer Bereich rechts) mit der rechten Maustaste mit **NEU: ANALYSENSYSTEME/STATISCH STRUKTURMECHANISCHE ANALYSE** ebenfalls ein neues System angelegt werden. Ebenso kann der Analysetyp **STATISCH STRUKTURMECHANISCHE ANALYSE** von links per Drag & Drop nach rechts in den Projektbereich gezogen werden (siehe Bild 7.3).

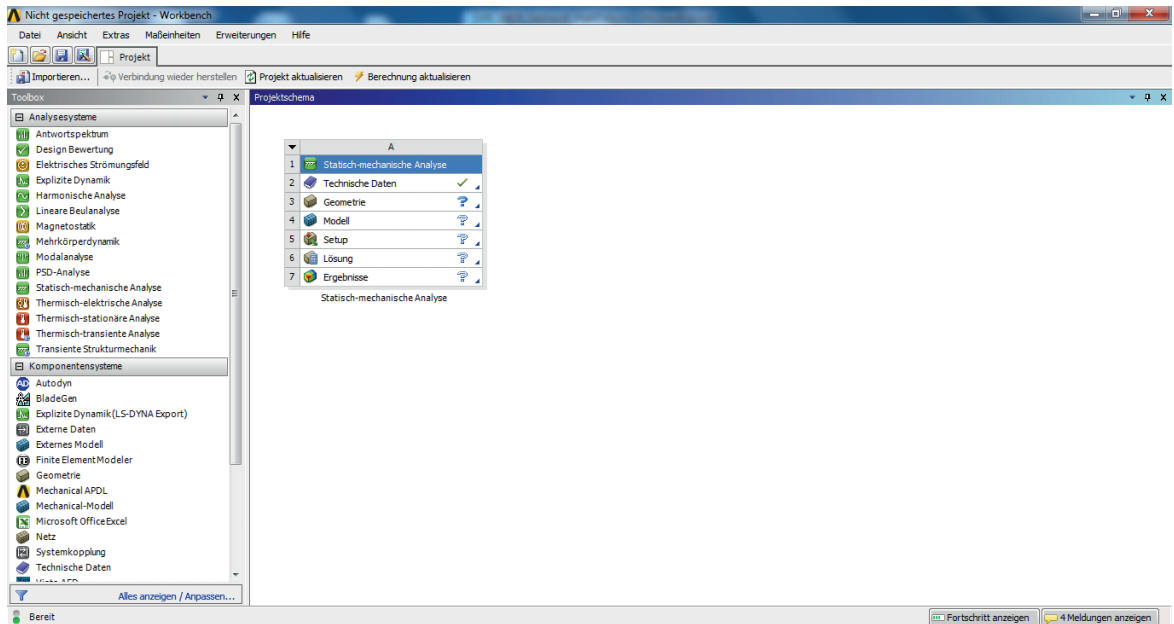


Bild 7.3 Projektmanager mit definierter Analyse

Jedes System besteht aus den folgenden Komponenten, die in Kapitel 8 noch genauer beschrieben werden (siehe Bild 7.4): Projektkomponenten

- **ANALYSE-ART:** Hier wird festgelegt, welche Physik und welches numerische Verfahren verwendet werden.
- **TECHNISCHE DATEN:** Hiermit werden Materialdaten für das Bauteil oder die Baugruppe beschrieben. Es wird ein Standardmaterial verwendet, sofern die Materialdaten vom CAD-System nicht mit übernommen werden. Daher ist diese Komponente auch ohne eine Materialauswahl durch den Anwender mit einem grünen Haken versehen.
- **GEOMETRIE:** Hier können die nativen Dateien eines CAD-Systems eingeladen, ein neutrales Format wie IGES, STEP, Parasolid und ACIS importiert oder eine Geometrie mit dem ANSYS DesignModeler neu erstellt werden. Auch die Übernahme eines in einem CAD-System geladenen Modells ist möglich.
- **MODELL:** Alle Definitionen, die neben der Geometrie notwendig sind, um ein FE-Modell zu beschreiben, wie z. B. die Vernetzungseinstellungen, Kontakte oder auch lokale Koordinatensysteme, werden unter dem Begriff Modell zusammengefasst.
- **SETUP:** Die Analyse-Einstellungen, die Belastung und die sonstigen Randbedingungen werden in den Setup-Einstellungen zusammengefasst.
- **LÖSUNG:** Die Rückmeldungen des Gleichungslösers sind unter der Lösung verfügbar.
- **ERGEBNISSE:** Unter ERGEBNISSE sind die durch die FEM-Analyse ermittelten Resultate zu finden.

Gehen Sie die einzelnen Komponenten von oben nach unten mit der rechten Maustaste durch, um das System für die erste Berechnungsaufgabe zu definieren. Die Analyseart wurde mit dem Anlegen des Systems schon definiert und sollte nicht nachträglich verändert werden. Das Material wird standardmäßig als Stahl definiert, deshalb können in diesem ersten Ablauf die Materialdaten so verwendet werden.

Klicken Sie mit der rechten Maustaste auf GEOMETRIE (siehe Bild 7.4) und wählen Sie unter GEOMETRIE IMPORTIEREN/DURCHSUCHEN die STEP-Datei *halter_verrundet.stp* aus. Die Beispieldaten finden Sie unter <http://downloads.hanser.de>.

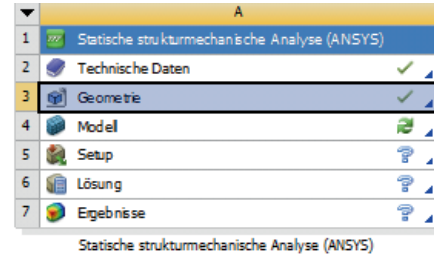


Bild 7.4 Analysesystem mit vordefinierten Arbeitsschritten



TIPP: Bevor Sie in die Definition einzelner Komponenten wie Modelle, Lasten oder Ergebnisse einsteigen, sollten Sie Ihr Projekt speichern, auch wenn in den ersten Projektphasen noch wenige Projektdaten sicherungswürdig erscheinen. Im Hintergrund werden mit dem Speichern des Projekts Pfade für temporäre Dateien festgelegt und andere Einstellungen getätigt, die für einen reibungslosen Projektablauf sorgen. Verwenden Sie dazu kein Netzlaufwerk und nicht den Desktop, sondern ein Verzeichnis auf Ihrer lokalen Festplatte.

■ 7.2 Berechnungsmodell und Lastfall definieren

Nachdem das Projekt gespeichert und die Geometriezuordnung abgeschlossen ist, können Sie mit der rechten Maustaste auf MODELL klicken und über BEARBEITEN das Berechnungsmodell und den Lastfall definieren. Dazu öffnet sich das Fenster der Mechanical-Applikation.

Das Berechnungsmodell, bestehend aus Geometrie, Koordinatensystemen und Netz, kann mit den Default-Einstellungen verwendet werden, sodass hier keine weiteren Ergänzungen vorzunehmen sind. Um Lasten und Lagerungen zu definieren, wählen Sie im Strukturbaum den Lastfall STATISCH-MECHANISCH an. Für eine einfachere Definition wählen Sie bei den folgenden Schritten zuerst die Geometrie, dann die zugehörige Randbedingung.

Der Selektionsfilter (roter Rahmen, siehe Bild 7.5) ist per Default auf Flächenselektion eingestellt. Mit den Funktionen zur Ansichtssteuerung (blauer Rahmen, siehe Bild 7.5) oder einer Space-Mouse können Sie Ihr Modell drehen, schieben, skalieren, zoomen oder einpassen. Wenn Sie die DREHEN-Funktion (blauer Rahmen, ganz links) verwenden, wird der Selektionsfilter aufgehoben, sodass nach dem Drehen der Selektionsfilter FLÄCHE wieder aktiviert werden muss. Um dies zu vermeiden, kann man statt der DREHEN-Funktion das Bauteil mit der mittleren Maustaste (Mausrad) drehen, ohne dass der Selektionsfilter neu aktiviert werden muss.

Ansicht verändern

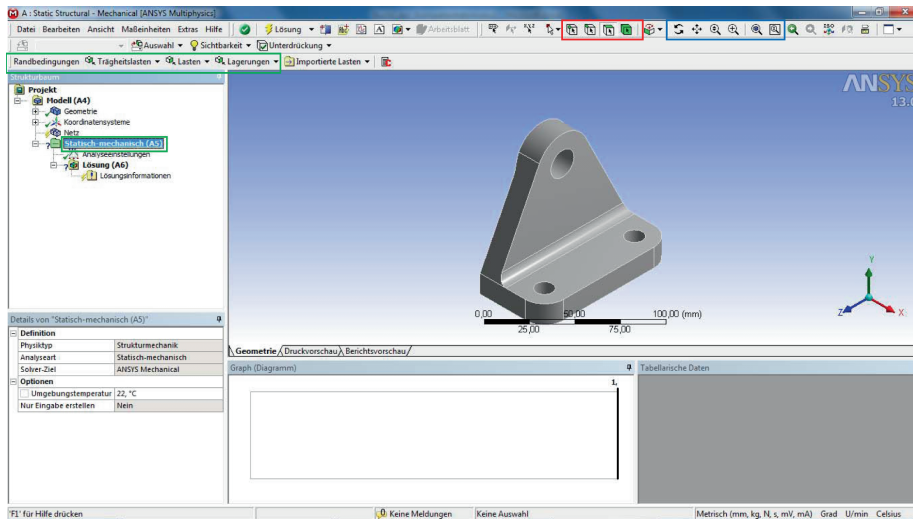


Bild 7.5 Das Geometriemodell ist bereit für Randbedingungen.

Fährt man mit der Maus über das Modell, wird das geometrische Element, das mit einem Linksklick selektiert werden kann, mit einer Markierung hervorgehoben (siehe Bild 7.6).

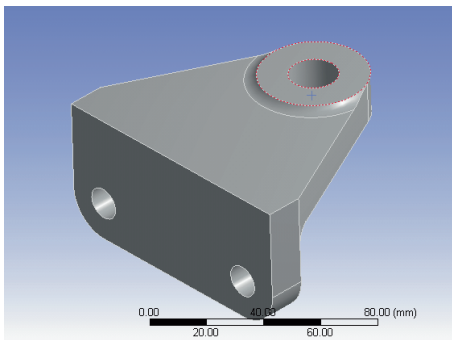


Bild 7.6 Orientieren der Geometrie über die mittlere Maustaste

Wird der Linksklick ausgeführt, wird die selektierte Geometrie grün dargestellt (siehe Bild 7.7).

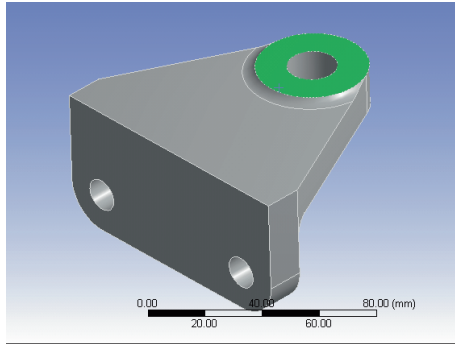


Bild 7.7 Auswahl der Fläche für die Belastung

Kraftangriff selektieren

In der Statusleiste am unteren Rand des Mechanical-Applikationsfensters werden die Anzahl der selektierten Flächen und der Flächeninhalt angezeigt (eine Fläche ausgewählt; Flächeninhalt ca. = 992 mm²).

Wählen Sie aus der kontextsensitiven Funktionsleiste direkt oberhalb des Grafikfensters unter **LASTEN** die Funktion **KRAFT**. Alternativ können Sie im Strukturbaum oder im Grafikfenster durch die rechte Maustaste **EINFÜGEN/KRAFT** auswählen und die Krastrandbedingung definieren.

Während der Kraftdefinition wird im Strukturbaum die Kraft mit einem blauen Fragezeichen versehen, solange noch nicht alle erforderlichen Angaben gemacht sind. Ist die Kraft vollständig definiert, z. T. auch über Default-Einstellungen, wird dies durch einen grünen Haken im Strukturbaum visualisiert.

Im Detailfenster unten links erwartet ANSYS Workbench unter **GRÖSSE** den Wert der Kraft im eingestellten Einheitensystem. Für die Strukturmechanik hat sich das Einheitensystem mm/kg/N bewährt, deshalb ist es empfehlenswert, im Menü **MASSEINHEITEN** dieses Einheitensystem einzustellen. Tragen Sie die Zahl 1000 ein und bestätigen Sie mit der Eingabetaste. Die Checkbox vor **GRÖSSE** bleibt leer.

Orientieren der Kraft

Die nächste zu definierende Eigenschaft ist die Krafrichtung. Bei einer einzelnen selektierten Fläche wird die Kraft mit einer Default-Richtung versehen. Für eine Zylinderfläche ist sie die Richtung der Achse, bei einer ebenen Fläche die Richtung der Flächennormale. So wird auch in diesem Fall die Flächennormale verwendet, um die Default-Richtung nach oben zu definieren. Mit einem Klick auf **ZUM ÄNDERN KLICKEN** im Detailfenster könnten am CAD-Modell eine andere Fläche, Kante oder zwei Punkte angewählt werden, welche die Richtung (nicht den Ort) der Krafteinleitung bestimmt. Der zweite rote Pfeil zeigt die gerade aktuell gefundene, aber noch nicht zugewiesene Krafrichtung. Nachdem die Flächennormale der Ringfläche des Auges zur Richtungsdefinition verwendet werden kann, kann mit einem Klick auf die beiden rot-schwarzen Pfeile im CAD-Fenster die Krafrichtung einfach umgedreht werden. Mit **ANWENDEN** wird die temporäre Richtung übernommen und die Kraftdefinition abgeschlossen (siehe Bild 7.8).

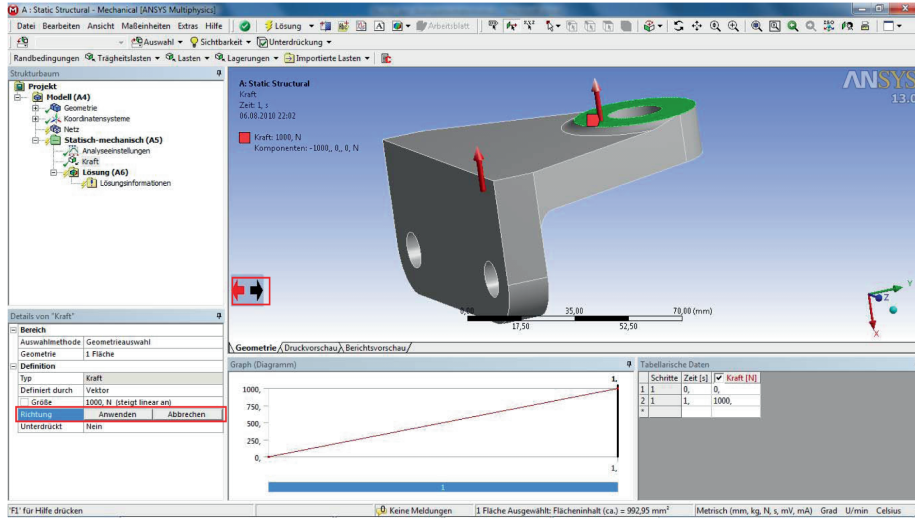


Bild 7.8 Orientierung der Kraft

Ähnlich wird auch die fixierte Lagerung definiert. Selektieren Sie die Anlagefläche, wählen Sie im Kontextmenü unter LAGERUNGEN oder über die rechte Maustaste unter EINFÜGEN die FIXIERTE LAGERUNG, um das Bauteil dort einzuspannen (siehe Bild 7.9). Weitere Angaben zur Lagerung sind im Detailfenster unten links nicht erforderlich.

Lagerung definieren

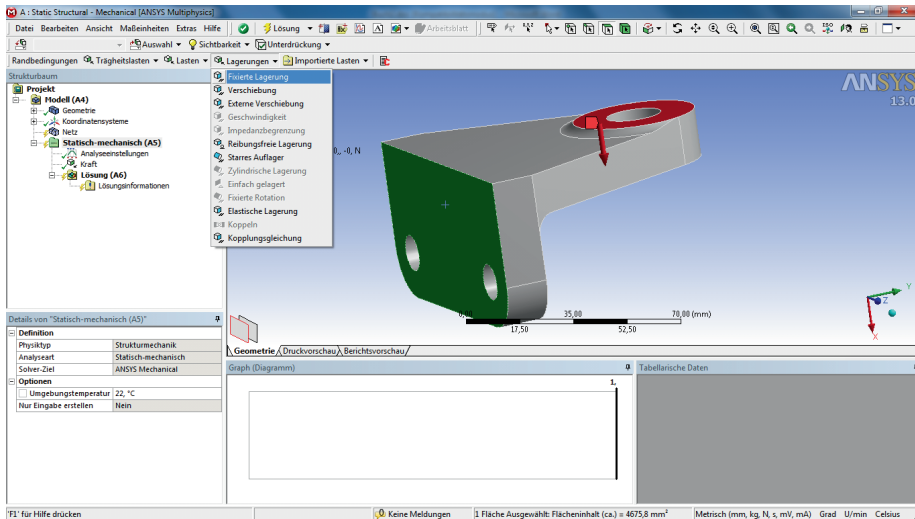


Bild 7.9 Auswahl der Fläche für die Lagerung

Nachdem im Strukturbaum lediglich die gerade definierte Lagerung markiert wird, wird auch nur diese im Grafikenfenster angezeigt. Um alle definierten Randbedingungen zu sehen, können mit der CTRL/STRG-Taste im Strukturbaum zusätzliche Randbedingungen

oder mit einem Klick auf STATISCH-STRUKTURMECHANISCH der gesamte Lastfall markiert werden (siehe Bild 7.10).

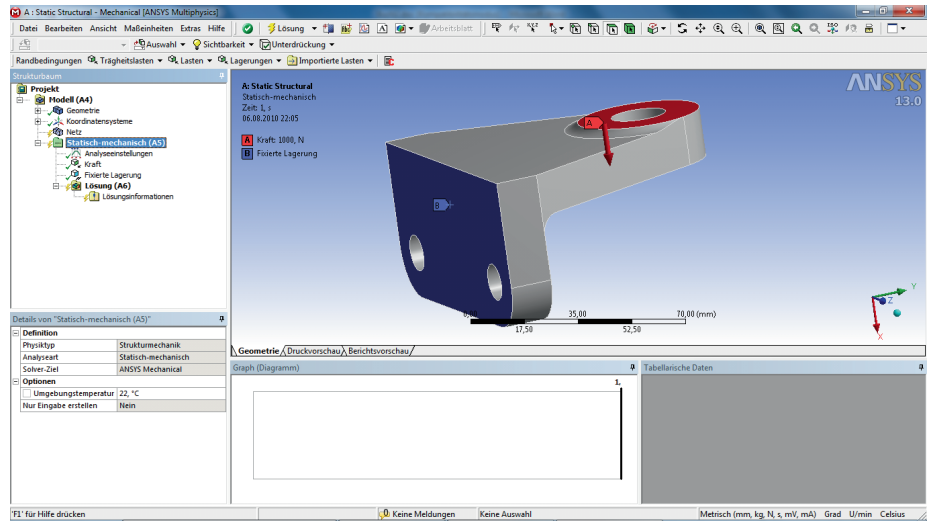


Bild 7.10 Lastfall vollständig

Definition kontrollieren

Im Strukturbaum sollte jetzt alles grün angehakt sein, bis auf Netz und Lösung, die mit einem gelben Blitz versehen sind, der symbolisiert, dass diese noch berechnet werden müssen. Sind darüber hinaus unvollständig definierte Randbedingungen (erkennbar an einem blauen Fragezeichen) definiert, löschen Sie diese (anklicken, rechte Maustaste). Mit DATEI/PROJEKT SPEICHERN wird die bisherige Definition der Berechnung gespeichert.

Die Berechnung kann gestartet werden, indem Sie in der oberen Icon-Leiste oder im Baum mit der rechten Maustaste auf STATISCH-STRUKTURMECHANISCH/LÖSUNG gehen und die Funktion LÖSUNG oder oben in der Icon-Leiste LÖSUNG wählen. Vernetzung und Berechnung werden mit den Standardeinstellungen in einem Schritt durchgeführt. Ein Fortschrittsbalken zeigt den Status der Analyse an. Nach kurzer Zeit ist der Strukturbaum komplett mit grünen Haken versehen und die Berechnung abgeschlossen.

■ 7.3 Ergebnisse erzeugen und prüfen

Ergebnisse erzeugen

Um ein Berechnungsergebnis zu definieren, wählen Sie im Strukturbaum LÖSUNG und im Kontextmenü oder über die rechte Maustaste unter EINFÜGEN eine der Ergebniskategorien wie VERFORMUNG, DEHNUNG, SPANNUNG, ENERGIE, LINEARISIERTE SPANNUNG, STICHPROBE, EXTRAS oder BENUTZERDEFINIERTER ERGEBNISSE. Für den Winkelhalter sollten mindestens zwei Ergebnisse, nämlich die Gesamtverformung (VERFORMUNG/GESAMT) und die Von-Mises-Vergleichsspannung, definiert werden (siehe Bild 7.11).

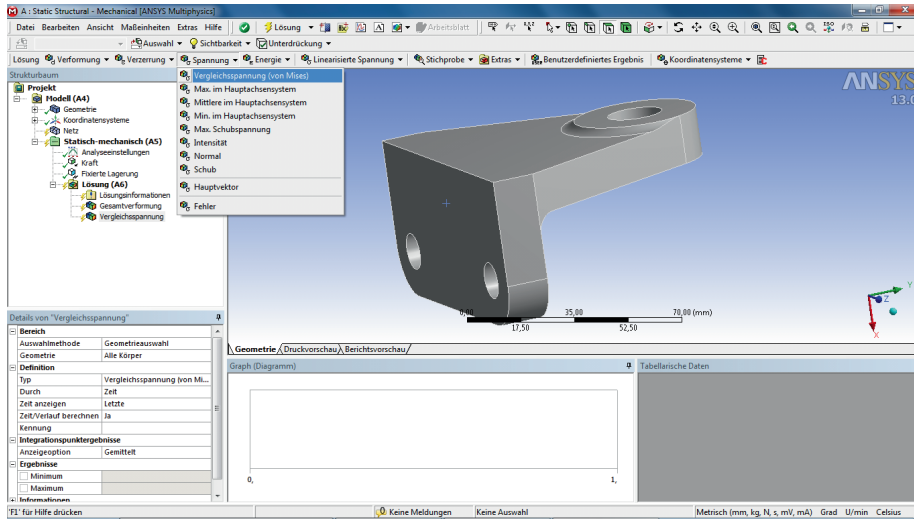


Bild 7.11 Definition von Ergebnissen

Mit einem erneuten Klick auf LÖSUNG oben in der Mitte der Icon-Leiste werden die Ergebnisse aktualisiert. Das erste visualisierte Berechnungsergebnis jeder statisch-mechanischen Analyse sollte die Verformung sein, um eine Plausibilitätsprüfung durchführen zu können: Verformt sich das Bauteil so wie erwartet (in diesem Fall nach unten)? Ist die Verformung in einer realistischen Größenordnung?

Ergebnis prüfen

Der Winkel verformt sich in Kraftrichtung, die Größe der Verformung mit 0,03 mm scheint realistisch. Die Verteilung der Verformung wird durch abgestufte Farbbänder dargestellt, deren Grenzlinien (z. B. zwischen Blau und Hellblau) glatt und rund sind (siehe Bild 7.12). Damit ist ein erster grober Anhaltswert auch bezüglich der Genauigkeit des verwendeten Netzes gegeben.

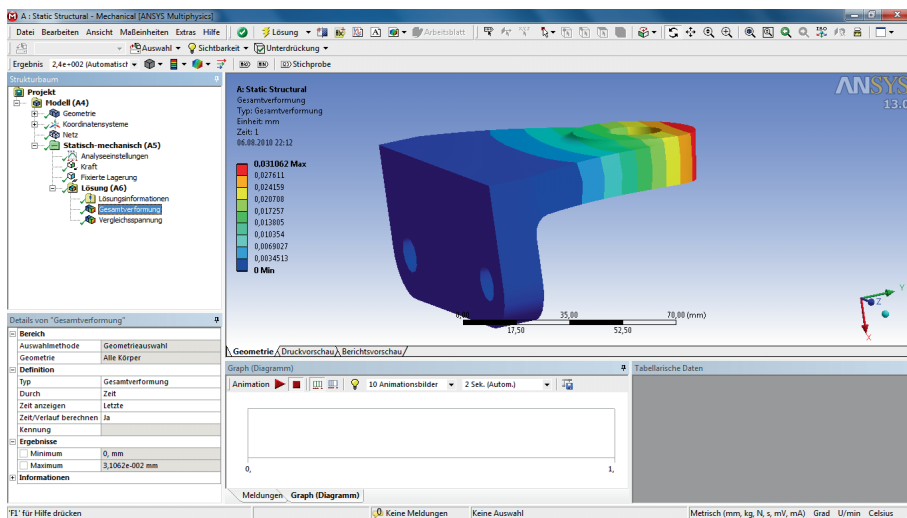


Bild 7.12 Verformung

Bei der Darstellung der Spannungen sieht man einen Maximalwert von ca. 20 MPa, der an der Innenseite des Winkels auftritt (siehe Bild 7.13).

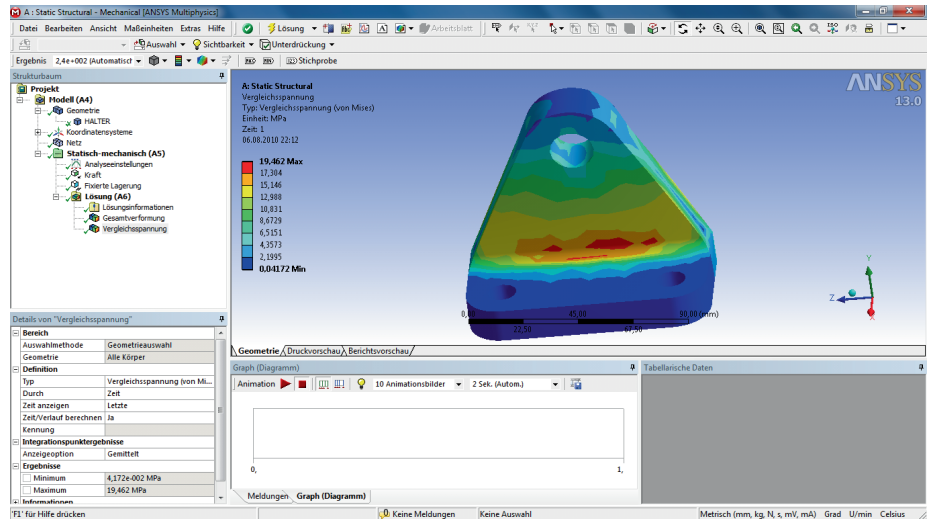


Bild 7.13 Grobe Spannungsverteilung mit initialem Netz

Genauigkeit steigern

Das Spannungsmaximum erscheint nicht mit einer glatten Verteilung, sondern die Abgrenzung der verschiedenen Farben ist grob und gezackt. Dies deutet auf eine unzureichende Vernetzung für eine Spannungsbewertung hin. Genauere Spannungen können berechnet werden, indem in der Kerbe eine feinere Vernetzung definiert wird. Dazu stehen zwei Methoden zur Verfügung:

- die manuelle Vernetzung, bei der der Anwender selbst definiert, wo und wie das Netz lokal verdichtet wird
- die adaptive Vernetzung, bei der das System die Vernetzung automatisch so weit verfeinert, bis eine voreingestellte Genauigkeitsschranke erreicht wird

Nähere Informationen zur Vernetzung finden sich in Abschnitt 8.5.6, die Grundlagen in Kapitel 3.

Manuelle
Netzverdichtung

Für eine manuelle Netzverdichtung an der Verrundung, wählen Sie im Strukturbaum die Vernetzung (NETZ), selektieren Sie im Grafikfenster die Verrundungsfläche (Selektionsfilter FLÄCHE aktivieren, falls erforderlich) und definieren Sie im Kontextmenü über NETZSTEUERUNG oder im Strukturbaum mit der rechten Maustaste EINFÜGEN eine lokale Elementgröße mit ELEMENTGRÖSSE. Legen sie im Detailfenster unten links die Elementgröße für die selektierte Fläche mit 1 mm fest. Aktualisieren Sie die Analyse durch eine erneute Berechnung mit LÖSUNG. Wählen Sie im Strukturbaum die Von-Mises-Vergleichsspannung an und vergleichen Sie das Ergebnis mit dem vorherigen (siehe Bild 7.14).

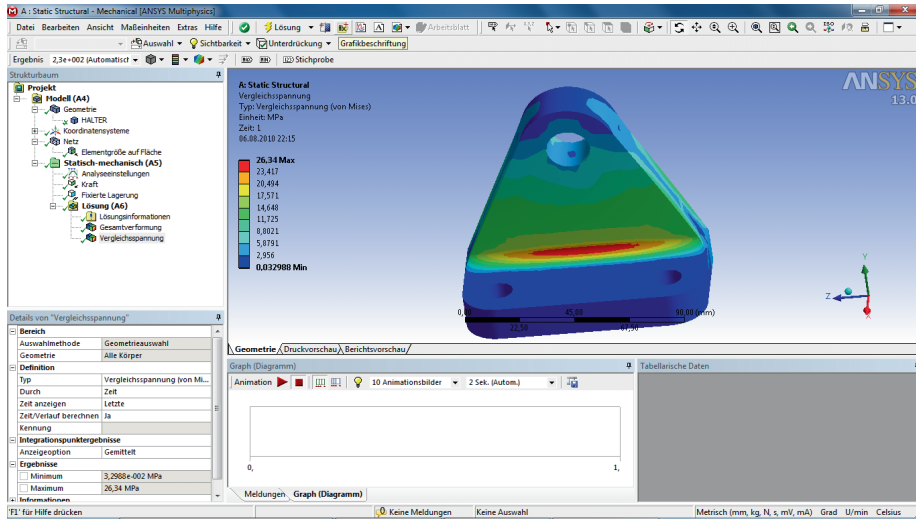


Bild 7.14 Glatte Spannungsverteilung mit verfeinertem Netz

Die Spannungsverteilung weist – zumindest in dem für die Festigkeits-Aussage relevanten Bereich der Maximalspannung – eine glatte Spannungsverteilung auf. Die Farbbänder zwischen Rot und Orange bzw. Orange und Gelb sind glatt. Der Spannungswert liegt mit 26 MPa aber etwa 30 % über der zuvor ermittelten Spannung mit der groben Vernetzung. Dieses Verhalten ist typisch und zeigt, dass für genaue Spannungswerte eine lokale Netz-anpassung zwingend erforderlich ist (siehe Bild 7.14).

Vernetzung o.k.?

Weitere Hinweise zur optischen Darstellung der Ergebnisse finden Sie in Abschnitt 8.8.2. Zum Abschluss der Analyse wählen Sie **DATEI** und **PROJEKT SPEICHERN** an, danach schließen Sie das Fenster der Mechanical-Applikation durch einen Klick auf das X im Fenster-rahmen oben rechts oder über das Menü. Auf der Festplatte liegt das Berechnungsprojekt unter dem während der Analyse angegebenen Namen einmal als Datei mit der Endung **.WBPJ** und als Verzeichnis mit gleichem Namen und der Erweiterung **_FILES**. Datei und Verzeichnis gehören zusammen und sollten nur miteinander auf andere Datenträger oder in andere Verzeichnisse verlagert werden.

Index

Symbole

2D 158, 337

A

Ableitung 14f.
Abweichung 18
Abwicklung 82
ACP 81
adaptive Vernetzung 182, 192, 285
Akustik 48, 404
Amplitude 43, 369
Analysetyp 139
Animation 253
Anregung 43, 367
Ansatzfunktion 17
Ansicht 166
ANSYS TWIN BUILDER 89, 419
Antimetrie 220
Antwortfläche 92
Antwortspektrum 52, 139
APDL 101
Archivieren 137
Assoziativität 11, 81, 97, 132
Aufbereitung 106
Augmented Lagrange 178, 432
Ausbildung 9, 108
Automatisierung 97
Axialsymmetrie 158

B

Balken 160
belastungsgerecht 67
Berechnungsingenieur 97, 106
bereinigen 138
Bericht 139, 254
Beschleunigung 29, 214
Betriebsfestigkeit 71, 188
Beulen 36, 140, 358
Bewegung 373

Bewertung 106
Bibliothek 89
Blade-Workstations 110
Blech 196
Bolzenlast 210
Bremsquietschen 48
Bruchmechanik 324, 76

C

CAD-System 11, 132, 143, 207
Cauchy-Spannungen 28
CFD 83, 402
Cloud 111
Cluster 113
Component Mode Synthesis 66
Composite 79, 346
Compute-Server 113
Containment-Test 378
Co-Simulation 89
Crash 58, 65
Curve-Fitting 339

D

Dämpfung 40f., 44, 53, 368, 62, 381, 388
Datenaustausch 10f.
Datenmanagement 109
Datenmenge 138
Dehnungen 246
DesignModeler 143, 196, 207
Design of Experiments 90
DesignXplorer 134
Dichtung 337
Dienstleister 7
Divergenz 19, 242
DoE 91
dokumentieren 254
Download 261
Drahtmodus 167

drapieren 82
Drehgeschwindigkeit 214
Drehzahl 214
Druck 29, 209
dünnwandig 29, 196
Durchdringung 177, 253, 297, 344
Durchschlag 378

E

ebener Dehnungszustand 158, 337
ebener Spannungszustand 158
ECE 417
Eigenform 40, 53, 367
Eigenfrequenz 40, 140, 367
Eigengewicht 29, 214
Einflussbereich 302
Einführung 105
EKM 109
Elastische Lagerung 213
E-Learning 107
Elektromagnetik 84
Energiebilanz 64
Entwicklungszeit 1
Erddanziehungskraft 214
Erdbeben 52, 65
Ermüdung 33, 71
Ersatzsteifigkeit 305
Erster Start 115
Evolution 90
Excel 436
expandieren 370
explizit 54, 58, 140, 242, 364, 379, 385
Explosion 66
Export 435
externe Kraft 210
externer Punkt 252
externe Verschiebung 211
Extrapolation 264

F

Falltest 66, 385
 Faserverbundwerkstoff 81
 faserverstärkt 79
 Federkennlinien 29
 Fehlerenergie 193
 Festigkeit 79
 Festigkeitsnachweis 291
 fixierte Lagerung 211
 FKM-Nachweis 291
 FKM-Richtlinie 291
 Flächenmodell 157, 196, 432
 Fließgrenze 27, 258
 Fluid-Struktur-Interaktion 51, 402
 Fokus 250
 Form 67
 Free Mesh 181
 Frequenz 54
 Frequenzbereich 39, 52
 Frequenzgang 371
 Frieren 149
 FSI 51, 402

G

Gelenk 66, 372
 Genauigkeit 20, 124, 192, 265, 317
 Geometrie 143, 168
 geometrische Nichtlinearität 28, 314
 Geschwindigkeit 36, 59
 Gewicht 68, 214
 Gleichgewicht 36, 208
 Gleichgewichtsbedingung 28
 Gleichung 13
 Gleichungslöser 14
 Gleichungssystem 89
 Gleitweg 253
 GPU 112
 Gradient 17f., 188, 265
 große Verformungen 29
 Grundlagen 9, 13
 Gruppe 166, 180

H

Hardware 10, 109
 harmonisch 140, 222, 368, 43, 404
 Hauptspannungen 244
 HCF 73
 Hencky-Dehnungen 28
 Hertzische Pressung 301
 Hexaeder 181, 188, 301, 312
 Hookesches Gesetz 15
 Hourglass 62, 381, 388
 hydrostatischer Druck 209
 Hyperelastizität 28, 337

I

ICEPAK 89
 IGES 10
 Imperfektionen 38
 Implementierung 105
 implizit 54, 140, 364
 Induktion 87
 Ingenieurspannungen 27
 Innovation 1, 4
 instationär 53, 82, 379, 385
 inverse Dynamik 66
 IRF 81
 Iterationen 55
 iteratives Berechnungsverfahren 29

J

J-Integral 331

K

Kaufteile 305
 Kerbspannung 232
 Kinematik 66
 Knicken 36
 Knotendurchmesser 222
 koinzidente Knoten 298
 Kollektiv 44
 Komponenten 166
 Kontakt 25, 172
 Kontaktdruck 253
 Kontaktsteifigkeit 172, 178, 240, 253, 334, 344, 432
 Kontakt-Tool 253
 Kontrolle 192
 Konvektion 82, 217
 Konvergenz 19, 38, 56, 64, 184, 238, 285, 364, 432
 Konvergenzmonitor 335
 Koordinatensystem 169
 Koppelgleichung 327
 Kopplung 35, 85, 213, 218, 283, 402, 408, 413
 Kosten 3
 Kraft 29, 209
 kraftgesteuert 362
 Kraft-Weg-Kurve 25
 Kriechen 28
 Krylov-Subspace-Methode 417
 kumulierte plastische Dehnung 382

L

Lastfall 259
 Lastschritt 205, 227, 301
 Lastvektorkopplung 87

Lastzyklen 71
 Lebensdauer 21, 33, 44, 71, 140
 Legende 249
 linear 24
 Linearisierung 392
 Lösung 242
 Lösungskombination 259
 LTI 417

M

Magnetfeld 35
 Makro 327
 Makrosprache 101
 Mapped Mesh 181
 Mapping 35, 80, 214, 403
 Maßeinheiten 432
 Massenskalierung 58
 Master-Studiengang 107
 Material 23, 26, 141
 Materialdatenbank 4, 141
 Matrixkopplung 87
 Maxwell 35
 Mechanical-Applikation 128, 164
 Mehrkörpersimulation 66, 140, 372
 Mehrschrittanalyse 301
 Membran 29
 Metallumformung 36
 Mittelfläche 156, 196
 MKS 66, 374
 Modalanalyse 39, 65, 140, 366
 Modale Reduktion 417
 Modell 163
 Modellbildung 106
 Modell-Ordnungs-Reduktion 417
 Modellreduktion 89
 Moden 40, 49, 53, 158
 Mohrscher Spannungskreis 244
 Moment 29, 210
 Monte-Carlo-Verfahren 91
 MOP 417
 MOR 417
 Motoren 84
 MPC 178, 203
 Multi Body Simulation 66
 Multiphysics 82
 Musterlösungen 108, 261

N

Nachbeulverhalten 38, 364
 Näherungsverfahren 18
 Nennspannung 72, 231
 Netzdichte 16, 19
 Netzverdichtung 18, 124, 285, 287
 Netzverfeinerung 17, 58, 182, 187
 Netzwerk 109

Neuber-Verfahren 321
 Newton-Raphson-Verfahren 55
 nichtlineare Dynamik 39, 53
 Nichtlinearitäten 24, 38f., 80

O

Optimierung 6, 67, 90, 140
 OptiSlang 134
 Ordnungsreduktion 89
 Organisation 109
 Orientierung 215
 örtliches Konzept 73

P

parallel 112
 Parallelisierung 112
 Parameter 134, 268
 Parameterstudie 266
 parametrische Geometrie 67
 Pareto 23, 305
 PDM-System 109
 Pendelrollenlager 212
 Performance 197
 Perturbation 394
 Pfade 102, 251
 Pilotanwender 107
 plastisch 27
 Plastizität 315
 Plausibilität 243
 Power Spectral Density 44
 Prägung 153
 Preis 3
 Prepregs 80
 Presspassung 297
 Prismenschicht 188, 318
 Problem 241
 Produktdaten 10
 Produktentwicklung 1
 Produktqualität 1
 Projektmanager , 109, 108, 116, 127, 36
 Prototypen 1
 PSD-Analyse 41, 140
 Punktmasse 168, 366

Q

Qualität 192
 Qualitätssicherung 108
 Quasistatik 60

R

Randbedingungen 206
 Rauschen 41, 140
 RDO 95

Reaktionskräfte 257
 Reduced Order Model 417
 Reduktion 57, 89, 138, 417
 Regler 416
 Reibung 48, 230, 342
 reibungsfreie Lagerung 212
 Remote Solve Manager 113, 234
 Residuum 56
 Resonanz 1, 40, 65, 140
 Response-Surface-Methoden 92
 Richtlinie FKM 291
 Richtung 120, 170, 215
 Rigid Body Simulation 66
 Riss 324
 Robust-Design-Optimierung 90
 Robustheit 64, 92
 ROM 417
 Rotordynamik 46, 65
 Roving 80
 RSM 92, 113, 234
 Ruck 377
 rutschen 300

S

Schalen 196
 Schall 48, 404
 Schallabstrahlung 407
 Schnitte 255
 Schnittstelle 11
 Schrauben 211, 223, 333
 Schulungen 10
 Schweißnähte 33, 106, 231
 Schweißpunkte 199
 Schwingung 39, 41, 54, 61, 365
 Segment 45, 329
 seismische Analysen 52
 Selektion 119, 164
 Server 109f., 113
 Setup 204
 Sicherheit 258
 simultan 112
 Singularität 20, 185, 194, 303
 Skala 249
 Skalierung 246, 299
 Skizzieren 145
 Skript 99
 SolidShell 191, 202
 Solver 237, 242
 Sonotroden 41
 Spalte 177
 Spannungen 15, 19, 243
 Spannungs-Dehnungs-Kurven 27
 Spannungsintensitätsfaktor 324, 331
 Spannungskonzentrationen 17
 SPMWRITE 417
 Spritzgießen 79

Stabilität 36, 64
 Standardisierung 97
 starres Auflager 212
 Starrkörperbewegung 208, 238, 242
 Starrkörpersimulation 66
 Statik 29, 60
 stationär 82, 140
 statistisch 71
 Steifigkeit 25, 55, 79
 STEP 10, 135
 Stichprobe 251
 stochastisch 44, 92
 stoßartige Belastung 33
 Strahlung 82, 217
 Streuung 92
 Strömung 34
 Strömungsanalyse 83
 Strukturbaum 164
 Strukturspannung 72, 231
 Stützwirkung 294
 Submodell 320
 Substruktur 66
 Superposition 392
 Symmetrie 218, 241, 298, 301, 312, 386
 Symmetrie, zyklische 325
 System 128, 141
 Systemsimulation 88, 416f.

T

Tangentialelektion 165
 TeamCenter 135
 technische Daten 141, 168
 Temperatur 82, 216
 Tetraeder 181, 189, 197, 287
 thermische Dehnung 30
 Toleranz 177
 Topologie-Optimierung 67
 Traglast 66
 Training 105
 transiente Dynamik 38, 52
 Trennen 153
 Trial and Error 90
 Turbine 324

U

Übergang 183, 188
 Überlagerung 259
 Übungen 261
 Umformung 66
 ungemittelte Spannung 194, 265, 320
 Ungleichgewicht 56
 Unterstützung 107
 Unwucht 46

- V**
- Varianten 23, 127, 132, 270
 - Variation 90
 - VDI2230 230
 - Vektor 248
 - Vereinfachung 206, 263
 - Verfestigung 27
 - Verformungen 246
 - Vergleichsspannung 244
 - Verhaltensmodell 417f.
 - Vernetzung 181, 192, 241
 - Versagen 56, 64, 66, 300, 378
 - Verschiebung 211
 - Verzug 34
 - virtuelle Topologie 171
 - virtuelle Workstations 111
 - Viskoelastizität 28
 - Vorspannung 223
- W**
- wahre Spannungen 27
 - Wahrscheinlichkeit 44, 93
 - Wärmeleitung 82
 - Wärmestrom 216
 - Warteschlange 113
 - Wechselwirkungen 85
 - weggesteuert 361
 - Welle 404
 - Wissen 23, 109
 - Wöhlerlinie 44
 - Workbench 128, 132
 - Workstations 110
- X**
- x-y-Diagramm 304
- Z**
- Zeitbereich 39, 52, 54
 - Zeitintegration 57, 205
 - Zeitschritt 39
 - zerschneiden 152
 - Ziel 23
 - Zoom 167
 - Zufall 44
 - Zukaufteile 305
 - Zustandsraum 418
 - Zuverlässigkeit 93
 - zyklisch 325
 - zyklische Belastung 71
 - zyklische Symmetrie 45, 221
 - zylindrische Lagerung 213