



Leseprobe

Reiner Anderl, Peter Binde

Simulationen mit NX / Simcenter 3D

Kinematik, FEM, CFD, EM und Datenmanagement. Mit zahlreichen
Beispielen für NX 11

ISBN (Buch): 978-3-446-44489-8

ISBN (E-Book): 978-3-446-45238-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44489-8>

sowie im Buchhandel.

Inhalt

■	Vorwort	1
■	Geleitwort	3
1	Einführung	5
1.1	Lernaufgaben, Lernziele und wichtige Voraussetzungen für die Arbeit mit dem Buch	8
1.2	Arbeitsumgebungen	10
1.3	Arbeiten mit dem Buch	11
2	NX/Simcenter Motion, MKS	15
2.1	Einführung und Theorie	15
2.1.1	Berechnungsmethode	17
2.1.2	Einschränkungen	18
2.1.3	Klassifikationen bei MKS	19
2.2	Lernaufgaben zur Kinematik	20
2.2.1	Lenkgetriebe	20
2.2.2	Top-down-Entwicklung der Lenkhebelkinematik	39
2.2.3	Kollisionsprüfung am Gesamtmodell der Lenkung	59
2.3	Lernaufgaben zur Dynamik	68
2.3.1	Fallversuch am Fahrzeugrad	68
2.4	Lernaufgaben zur Co-Simulation	77
2.4.1	Balancieren eines Pendels	78

3	NX Design Simulation FEM	87
3.1	Einführung und Theorie	88
3.1.1	Lineare Statik	89
3.1.2	Nichtlineare Effekte	92
3.1.3	Einfluss der Netzfeinheit	94
3.1.4	Singularitäten	95
3.1.5	Eigenfrequenzen	96
3.1.6	Thermotransfer	97
3.1.7	Lineares Beulen	98
3.2	Lernaufgaben zu Design-Simulation	99
3.2.1	Kerbspannung am Lenkhebel (Sol101)	99
3.2.2	Temperaturfeld in einer Rakete (Sol153)	149
4	NX/Simcenter FEM	159
4.1	Einführung	160
4.1.1	Sol 101: Lineare Statik und Kontakt	161
4.1.2	Sol 103: Eigenfrequenzen	162
4.1.3	Sol 106: Nichtlineare Statik	162
4.1.4	Sol 601/701: Advanced nichtlinear	162
4.2	Lernaufgaben lineare Analyse und Kontakt (Sol 101/103)	165
4.2.1	Steifigkeit des Fahrzeugrahmens	165
4.2.2	Auslegung einer Schraubenfeder	198
4.2.3	Eigenfrequenzen des Fahrzeugrahmens	213
4.2.4	Klemmsitzanalyse am Flügelhebel mit Kontakt	221
4.3	Lernaufgaben Basic nichtlineare Analyse (Sol 106)	245
4.3.1	Analyse der Blattfeder mit großer Verformung	245
4.3.2	Plastische Verformung des Bremspedals	256
4.4	Lernaufgaben Advanced Nichtlinear (Sol 601)	266
4.4.1	Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung	266
5	NX/Simcenter CFD	291
5.1	Prinzip der numerischen Strömungsanalyse	292
5.2	Lernaufgaben (NX/Simcenter-Flow)	293
5.2.1	Strömungsverhalten und Auftrieb am Flügelprofil	293
6	NX/Simcenter EM	319
6.1	Prinzipien elektromagnetischer Analysen	320
6.1.1	Elektromagnetische Modelle	321
6.1.2	Maxwell-Gleichungen	322

6.1.3	Materialgleichungen	324
6.1.4	Modellauswahl	325
6.1.5	Elektrostatik	328
6.1.6	Elektrokinetik	328
6.1.7	Elektrodynamik	328
6.1.8	Magnetostatik	329
6.1.9	Magnetodynamik	329
6.1.10	Full Wave (Hochfrequenz)	330
6.2	Installation und Lizenz	330
6.3	Lernaufgaben (EM)	333
6.3.1	Spule mit Kern, achsensymmetrisch	333
6.3.2	Spule mit Kern, 3D	349
6.3.3	Elektromotor	353
7	Management von Berechnungs- und Simulationsdaten	377
7.1	Einführung und Theorie	377
7.1.1	CAD/CAE-Integrationsproblematik	377
7.1.2	Lösungen mit Teamcenter for Simulation	378
7.2	Lernaufgaben zu Teamcenter for Simulation	381
7.2.1	Durchführung einer NX CAE-Analyse in Teamcenter	381
7.2.2	Welches CAD-Modell gehört zu welchem FEM-Modell?	389
7.2.3	Revisionieren	391
8	Manuelle Berechnung eines FEM-Beispiels	397
8.1	Aufgabenstellung	397
8.2	Idealisierung und Wahl einer Theorie	398
8.3	Analytische Lösung	398
8.4	Raumdiskretisierung für FEM	399
8.5	Aufstellen und Lösen des FEA-Gleichungssystems	400
8.6	Vergleich der analytischen Lösung mit der aus der Finite-Elemente-Analyse	402
9	Farbige Darstellung ausgewählter Abbildungen	405
	Literaturverzeichnis	421
	Stichwortverzeichnis	425

Eine Analyse mit linearem Materialverhalten sollte immer vor solch eine nichtlineare angestellt werden. (Dies kann nun ganz schnell durch Einfügen einer neuen Lösung 101 und Zufügen der Randbedingungen nachgeholt werden). Dabei ergeben sich eine geringfügig kleinere Verformung von 1,69 mm und eine deutlich höhere Spannung mit ca. 200 N/mm². Das elastische Material zeigt also höhere Spannungen, während beim plastischen schon lokales Fließen eintritt. Aufgrund des leichten Fließens ergeben sich wiederum höhere Verformungen beim plastischen Material.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass eine Netzverfeinerung erforderlich ist und dass zur Absicherung der Ergebnisse die Konvergenz (Netzunabhängigkeit) nachzuweisen ist.

✎ Speichern Sie die Datei und schließen Sie sie.

Damit ist diese Lernaufgabe abgeschlossen.

■ 4.4 Lernaufgaben Advanced Nichtlinear (Sol 601)

4.4.1 Schnapphaken mit Kontakt und großer Verformung

Schnapphaken sind beliebte Verschlussarten bei Kunststoffbauteilen, die manuell montiert werden (Bild 4.120). Bei der Konstruktion will man z. B. wissen, wie viel Kraft erforderlich ist, um einen solchen Verschluss zusammenzufügen. Außerdem darf das Material bei dem Vorgang nicht zu hoch beansprucht werden. Am Modell des RAK2 ist am Batteriekasten solch eine Verbindung zu finden.

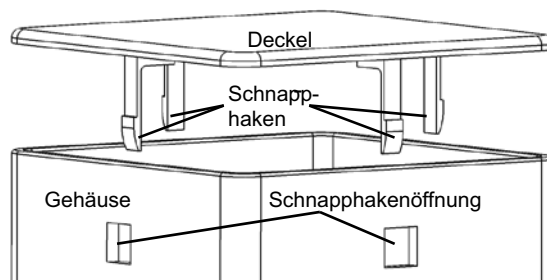


Bild 4.120 Schnapphaken sind beliebte Verschlussarten bei Kunststoffbauteilen.

Die Nastran-Lösungsmethode 601 ist für komplexe nichtlineare Analysen vorgesehen.

An dieser Aufgabe wird anhand eines Kunststoff-Schnappverschlusses der grundsätzliche Umgang mit der NX Nastran-Lösungsmethode 601 erläutert, die für komplexe nichtlineare Effekte zur Verfügung steht. Es wird ein zeitabhängiger Verfahrensweg definiert, der den Montagevorgang des Deckels kontrolliert. Auf diese Weise ist es möglich, die Kraft zu ermitteln, die für den Montagevorgang erforderlich ist. Darüber hinaus kommt auch der nichtlineare Effekt der großen Verformungen sowie Kontakt zum Einsatz. Es werden

Empfehlungen gegeben, wie mit komplexen nichtlinearen Effekten im NX-System umzugehen ist.

Wir wollen darauf hinweisen, dass vor einer nichtlinearen Analyse immer die einfache lineare Analyse des Problems durchgeführt werden sollte. Falls mehrere Typen von Nichtlinearität gleichzeitig vorkommen (z. B. plastisches Material und Kontakt), sollten die nichtlinearen Effekte zuerst einzeln untersucht werden. In unserer Lernaufgabe werden wir, entgegen dieser Regel, direkt mit Nichtlinearitäten arbeiten, weil der begrenzte Umfang des Buches uns dazu zwingt.

Um ein „Gefühl“ zu entwickeln, sollte immer zuerst linear gerechnet werden.

4.4.1.1 Aufgabenstellung

Der Batteriekasten des RAK2 sei, wie in Bild 4.120 dargestellt, mit Kunststoff-Schnappverschlüssen montiert. Dabei klinkt der Deckel an allen vier Seiten mit jeweils einem Schnapphaken in eine Öffnung des Gehäuses ein.

Der Batteriekasten soll montiert werden.

Gegeben sind die Materialeigenschaften des Kunststoffs sowie die Geometrie. Es soll analysiert werden, welchen Beanspruchungen der Schnapphaken ausgesetzt ist, wenn die Montage in kleinen Schritten durchgeführt wird.

4.4.1.2 Vorbereitungen und Erzeugung der Lösung

- ↳ Laden Sie die Baugruppe *as_bg_batterie*, die das Gehäuse, den Deckel sowie einige weitere Teile enthält.
- ↳ Schalten Sie dann in die Anwendung *Pre/Post* und erzeugen Sie über den Simulationsnavigator die Dateistruktur für die neue FEM und Simulation.
- ↳ Bei der Frage nach den zu verwendenden Körpern wählen Sie die Option *Körper auswählen (Select Bodies)* und selektieren Sie die Geometrie des Deckels und des Gehäuses.
- ↳ Nun erscheint das Menü *Lösung (Solution)*. Hier wählen Sie für den Lösungstyp die Option *ADVNL 601, 106* (Bild 4.121).

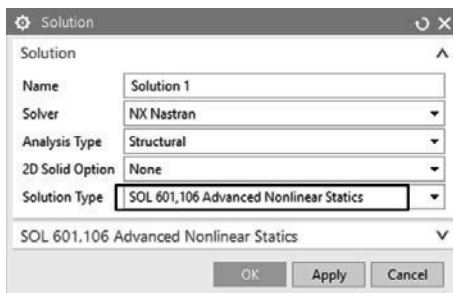


Bild 4.121

Der Dialog zum Erzeugen einer NX Nastran-Lösung 106.

Zunächst bleiben alle Einstellungen bei ihrer Voreinstellung.

- ↳ Bestätigen Sie alle Voreinstellungen mit OK.

Die Lösungsmethode 601 kann vielfältig eingestellt werden.



Die Startposition soll der geöffnete Batterie-kasten sein.

Die Position des Deckels soll für die Analyse verschoben werden.

4.4.1.3 Verändern der Baugruppenposition im idealisierten Teil

In der Simulation soll der Deckel vom geöffneten Zustand in den geschlossenen bewegt werden. Jedoch ist die Baugruppe im geschlossenen Zustand konstruiert worden. Diese geschlossene Position aus Sicht der Baugruppe soll auch erhalten bleiben, weil dies für Anwender, die beispielsweise eine Zeichnung der Baugruppe betrachten, erforderlich ist. Die Baugruppe ist das Master-Modell, das für alle nachfolgenden Anwendungen wie Berechnung, Zeichnungserstellung oder Fertigungsunterstützung genutzt werden soll. Falls für unsere Simulation eine andere Position der Teile zueinander benötigt wird, so muss in der idealisierten Datei eine Neupositionierung vorgenommen werden.

Die originale Baugruppenposition des Deckels muss also in der idealisierten Datei überschrieben werden. Aus Sicht der idealisierten Datei gibt es dann eine andere Position als aus Sicht der eigentlichen Baugruppe. Gehen Sie wie folgt vor, um dies zu erreichen:

- ✎ Machen Sie zunächst die idealisierte Datei zum dargestellten Teil.
- ✎ Schalten Sie in die Anwendung *Konstruktion (Modeling)* und stellen Sie sicher, dass auch die Anwendung *Baugruppen (Assemblies)* aktiviert ist. Nun haben Sie Zugriff auf die Baugruppenfunktionen.
- ✎ Öffnen Sie nun den Baugruppennavigator und selektieren Sie in der Struktur die Komponente des Deckels *as_bat_deckel*.
- ✎ Wählen Sie in dessen Kontextmenü die Funktion *Position überschreiben*  (*Overwrite Position*) und anschließend die Funktion *Verschieben...*  (*Move...*).

Nun kann der Deckel in die gewünschte Position bewegt werden, wie in Bild 4.122 dargestellt. Der Schnapphaken sollte idealerweise kurz vor dem Kontaktpunkt mit dem Gehäuse stehen. Dafür können Sie auch die Masse aus Bild 4.122 verwenden.

- ✎ Tragen Sie für Z den Wert aus Bild 4.122, d. h. -16,25, in das Feld ein und drücken Sie ENTER.

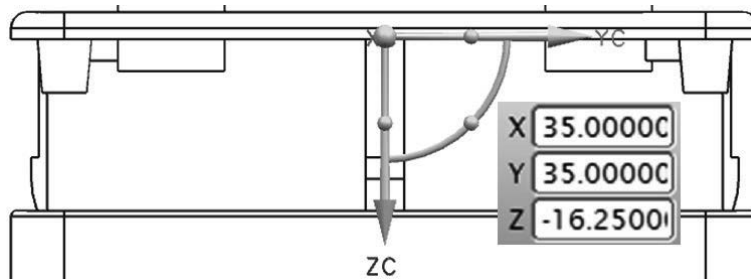


Bild 4.122 Der Deckel ist nun für die FEM-Berechnung verschoben.

- ✎ Bestätigen Sie mit OK. Die Neupositionierung, ausschließlich für Zwecke der Simulation, ist nun erfolgreich durchgeführt.

Wenn Sie möchten können Sie nun wieder in die Anwendung *Pre/Post*, wechseln und die alte Position prüfen, indem Sie das Master-Teil im Simulationsnavigator zum dargestellten Teil machen. Wechseln Sie dann wieder in die idealisierte Datei zurück. Die neue Position ist jetzt wieder aktiv.

4.4.1.4 Vereinfachen und Unterteilen der Geometrie

Die Geometrie des Deckels und des Gehäuses sollten nun idealisiert werden, damit auf der einen Seite die Anzahl der finiten Elemente gering gehalten werden kann, aber andererseits sich die verbleibende Geometrie nicht wesentlich von den Steifigkeitseigenschaften der originalen Geometrie unterscheidet. Deswegen soll auch die Symmetrieeigenschaft genutzt werden.

Die Forderung nach geringer Anzahl von finiten Elementen wird umso dringlicher, je mehr es zu nichtlinearen Effekten kommt, die berücksichtigt werden müssen, weil durch Nichtlinearitäten die Rechenzeiten enorm anwachsen. Sie werden sehen, dass schon diese Aufgabe deutlich mehr Rechenzeit braucht als die linearen Aufgaben bisher. Es gilt also, einen sinnvollen Kompromiss zu finden.

Darüber hinaus wäre es vorteilhaft, wenn die idealisierte Geometrie mit Hexaederelementen statt Tetraedern vernetzt werden könnte, weil hierdurch eine größere Gleichmäßigkeit der Vernetzung und eine bessere Genauigkeit erreicht werden kann. Eine Vernetzung mit Hexaederelementen ist immer dann möglich, wenn ein Volumenkörper extrusionsfähig ist, d. h., wenn er eine Fläche besitzt, die mit Vierecken besetzt durch den ganzen Körper gezogen werden kann. Auf diese Weise entstehen die Hexaeder- oder Quaderelemente.

Die Geometrie unseres Beispiels könnte beispielsweise auf die in Bild 4.123 dargestellte Weise vereinfacht und unterteilt werden. Dabei würde die Steifigkeit der Originalgeometrie weitgehend erhalten bleiben, und die Möglichkeit zur Hexaedervernetzung würde für beide Teile bestehen.

Besonders bei nicht-linearen Analysen sollten Elemente „gespart“ werden.

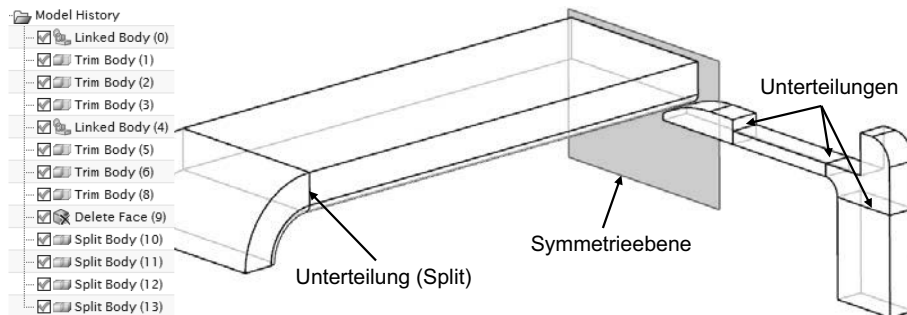


Bild 4.123 Der Batteriekasten und Schnapphaken wird für die FEM-Analyse vereinfacht. Dazu werden einige CAD-Operationen durchgeführt.

- ✚ Erzeugen Sie Wave-Links und führen Sie Geometrieoperationen in der idealisierten Datei aus, um eine entsprechende Geometrie zu erhalten.
- ✚ Speichern Sie die Datei.



4.4.1.5 Gitterverknüpfungsbedingungen

Gitterverknüpfungsbedingungen vom Typ *Kleben zusammenfallend* (*Glue Coincident*) sorgen dafür, dass die Flächen der Körperunterteilungen mit ausgerichteten Knoten vernetzt werden. Falls Sie in der idealisierten Datei beim Erzeugen der Unterteilungen mit der

Die unterteilte Geometrie soll an den Grenzen identische und verschmolzene Knoten erhalten.

Funktion *Körper teilen (Split Body)* die Option *Gitterverknüpfungsbedingungen erzeugen (Create Mesh Mating Conditions)* eingeschaltet hätten (was zu empfehlen ist), dann würden sich diese Bedingungen in der FEM-Datei automatisch erzeugen.

Andernfalls gehen Sie wie folgt vor:

- Wechseln Sie in die FEM-Datei.
- Rufen Sie die Funktion *Gitterverknüpfungsbedingung*  (*Mesh Mating Condition*) auf.
- Stellen Sie sicher, dass die Option *Kleben zusammenfallend*  (*Glue Coincident*) aktiv ist.
- Ziehen Sie im Grafikbereich ein Fenster über alle Teile und bestätigen Sie mit OK.

Die Verknüpfungsbedingungen werden nun an allen vier Unterteilungen erzeugt.

4.4.1.6 Hexaedervernetzung des Gehäuses

Im Kontaktbereich selber interessieren uns die Spannungen diesmal nicht besonders. Daher könnte hier grob vernetzt werden. Jedoch hat die Kontaktberechnung erfahrungsgemäß Schwierigkeiten mit kantigen Kontaktflächen, wie sie entstehen, wenn beispielsweise eine Verrundung sehr grob vernetzt wird. Daher soll die Verrundung, an der der Kontakt auftritt und entlangrutscht, verfeinert vernetzt werden, damit möglichst glatte Kontaktflächen entstehen.

Die Verrundung, an welcher der erste Kontakt auftritt, sollte feiner vernetzt werden.



- Erzeugen Sie eine *Gittersteuerung*  (*Mesh Control*) vom Typ *Anzahl auf Kante (Number on Edge)* auf der Verrundungskante im Kontaktbereich und geben Sie eine Anzahl von vier Elementen vor (Bild 4.124).



Bild 4.124 Auf der Kante wird die Vernetzungsdichte definiert.

- Für die anschließende Vernetzung rufen Sie die Funktion *Gitter mit 3D-Extrusion*  (*3D Swept Mesh*) auf, stellen den Typ auf *Bis Ziel (Until Target)* und selektieren für *Source* und *Target* die beiden dargestellten Flächen (Bild 4.125).

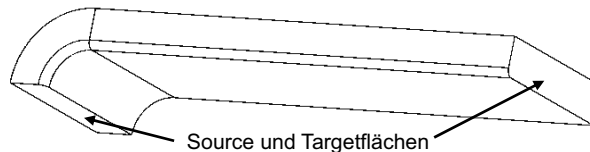


Bild 4.125 Vorüberlegungen zur Hexaedervernetzung.

- Wählen Sie *Hex8*-Elemente und als Elementgröße den Vorschlagswert, den Sie mit dem gelben Blitz erhalten. Bestätigen Sie mit OK, woraufhin das Netz erzeugt wird.

Das Netz sollte wie in Bild 4.126 aussehen.

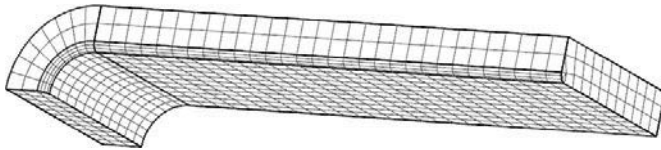


Bild 4.126 Das Hexaedernetz ist sehr gleichmäßig. Der Kontaktbereich ist feiner vernetzt.

4.4.1.7 Hexaedervernetzung des Schnapphakens

Der Körper, an dem die Spannungsergebnisse im Wesentlichen interessieren, ist der Schnapphaken. Weiterhin interessieren hier die Spannungen besonders im Biegebereich. Daher soll hier eine feinere Vernetzung angestrebt werden. Am restlichen Bereich des Schnapphakens kann gröber vernetzt werden.

Nachfolgend ist unser Vorschlag beschrieben, wie der Schnapphaken vernetzt werden sollte. Sicherlich gibt es auch andere sinnvolle Möglichkeiten. Probieren Sie es ruhig einmal aus.

- ✦ Für die Vernetzung des Biegebereichs des Schnapphakens rufen Sie die Funktion *Gitter mit 3D-Extrusion* (3D Swept Mesh) auf, stellen den Typ auf *Mehrfachkörper - Ziel ermitteln* (Multi Body-Infer Target) und selektieren die Fläche wie in Bild 4.127 dargestellt.

Mit der Option *Mehrfachkörper - Ziel ermitteln* (Multi Body-Infer Target) brauchen Sie nur eine Startfläche zu selektieren. Die andere Option erfordert noch die Zielflächenselektion. Dafür kann diese zweite Option durch mehrere Körper hindurchvernetzen, wenn die Körper durch Gitterverknüpfungsbedingungen verbunden sind.

- ✦ Als Elementtyp wählen Sie *Hex8* und als Elementgröße z. B. die Hälfte des Vorschlagswertes.
- ✦ Bei *Layer verwenden* (Use Layer) tragen Sie die gewünschte 5 ein. Klicken Sie nun auf OK.

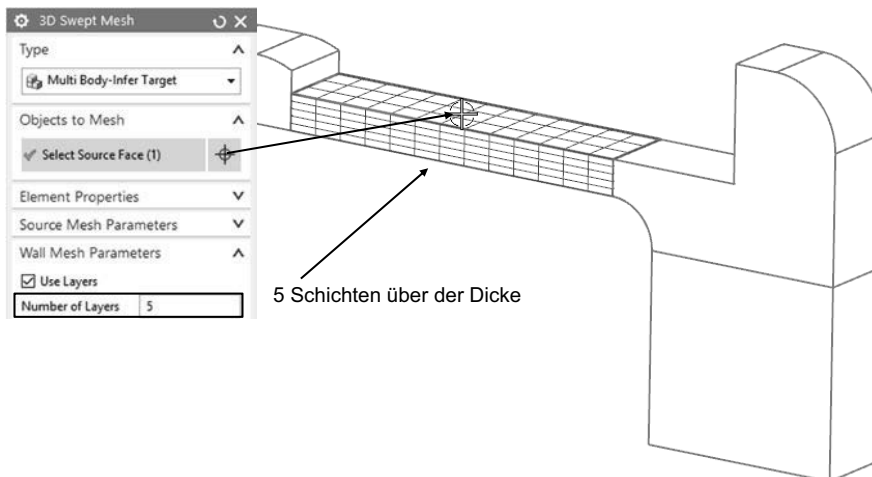


Bild 4.127 Dieser Bereich soll fünf Elementschichten über die Dicke bekommen.

Mit dieser Methode erreichen Sie, dass über der Dicke feiner vernetzt wird, in der Tiefe jedoch größer.

- Als Nächstes erzeugen Sie, entsprechend Bild 4.128, wieder eine Gittersteuerung mit fünf Elementen auf der Verrundungskante, damit in diesem gefährdeten Bereich ebenfalls fein vernetzt wird.

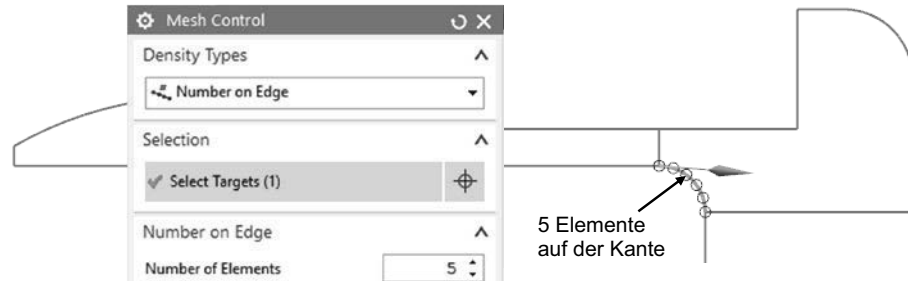


Bild 4.128 Definition einer Netzsteuerung auf einer Kante.

- Damit das verfeinerte Netz langsam wieder grob wird, erzeugen Sie nun, entsprechend Bild 4.129, auf den vier Kanten weitere Gittersteuerungen. Diesmal nutzen Sie den Typ *Normale auf Kante (Biasing on Edge)*, der es erlaubt, solch einen Übergang zu definieren. Stellen Sie die Optionen wie in Bild 4.129 dargestellt ein.

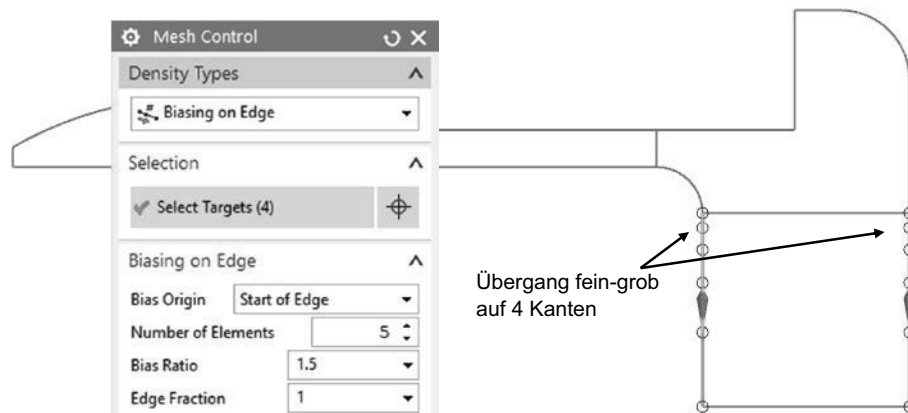


Bild 4.129 Mit mehreren Gittersteuerungen auf den Kanten wird vorgegeben, wie sich das Netz hier verhalten soll.

- Nun können die übrigen Teile vernetzt werden. Verwenden Sie die Elementgrößen, wie sie in Bild 4.130 dargestellt sind.

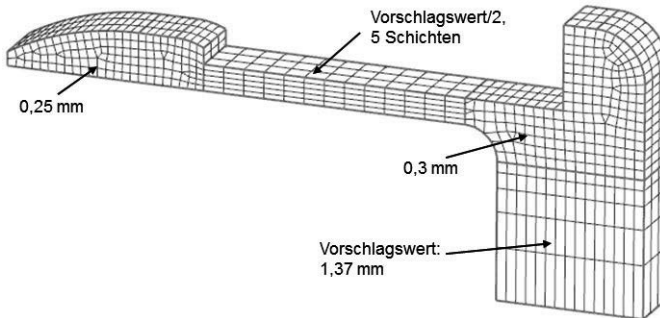


Bild 4.130 Eine gelungene Hexaedervernetzung des Schnapphakens.

4.4.1.8 Vorbereitung für Reaktionskräfte zufügen

Als Ergebnis möchten wir, dass die Kraft berechnet wird, die gebraucht wird, um den Schnapphaken zusammenzufügen. Diese Kraft, die sich als Reaktionskraft in der Verschiebungszwangsbedingung ergeben wird, kann zu jedem Rechen- bzw. Zeitschritt ausgerechnet und als Graph dargestellt werden. Für ein einfaches Ablesen dieser Kraft wollen wir nun als Vorbereitung eine Punkt-Flächenverbindung auf der Fläche der späteren Verschiebungsbedingung erzeugen:

- ✎ Wählen Sie die Funktion *1D-Verbindung (1D Connection)* aus.
- ✎ Stellen Sie den Elementtyp *RBE2* ein und stellen Sie den Typ auf *Punkt zu Fläche (Point to Face)*.
- ✎ Definieren Sie für den Punkt mit Hilfe der Funktion *Punkt Dialog* die Koordinate (x: 35, y: 10, z: -18,5) und selektieren Sie die Fläche entsprechend Bild 4.131.
- ✎ Bestätigen Sie mit OK, woraufhin die Verbindung erstellt wird.

Diesem Punkt wollen wir später die aufgezwungene Bewegung geben.

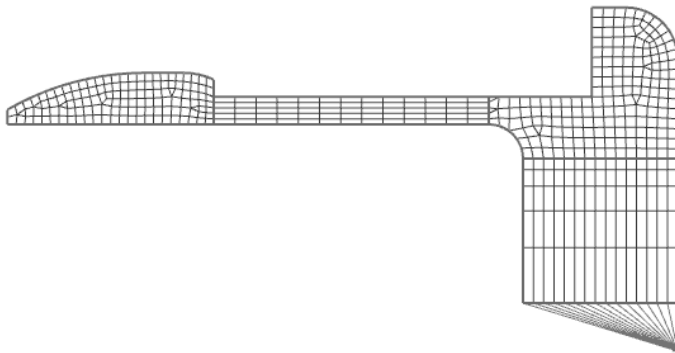


Bild 4.131 Ansicht des fertigen Netzes.

4.4.1.9 Materialeigenschaften für Kunststoff

Das Material der beiden Körper soll glasfaserverstärkter Polypropylen sein. Dieser Werkstoff ist als *Polypropylene-GF* in der Materialbibliothek des NX-Systems unter der Kategorie *Kunststoffe* zu finden. Andernfalls können Sie das Material auch manuell definieren. Folgende Eigenschaften werden benötigt:

- E-Modul: 3000N/mm²
- Poisson: 0,4
- ↳ Weisen Sie den Körpern das Material *Polypropylen GF* zu.

Es handelt sich bei diesem Bibliotheksmaterial um eine einfache lineare Beschreibung des Materials.

Empfehlungen für die Berechnung von Kunststoffen

Für den Umgang mit Kunststoffen in der FEM Berechnung geben wir folgende Empfehlungen, die umfassender auch in [Alber-Laukant] und [RiegHackenschmidt] nachzulesen sind: Bauteile aus Kunststoff weisen zwar prinzipiell ein nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten auf. Jedoch existiert fast immer ein linearer Bereich der Materialeigenschaften. Selbst über dieses Gebiet hinaus kann die Rechnung mit konstantem E-Modul und Querkontraktionszahl so lange erfolgen, bis der dadurch verursachte Fehler in der jeweiligen Anwendung nicht mehr toleriert werden kann. Das Vorgehen zur Berechnung von Kunststoffen sollte daher wie folgt vonstattengehen: An Hand der resultierenden Spannungen einer ersten Überschlagsrechnung mit linearen Materialeigenschaften wird herausgefunden, ob sich die Spannungen noch im linearen oder bereits im nichtlinearen Bereich befinden. Nur im zweiten Fall wird erwägt, ob der Fehler toleriert wird oder eine Analyse mit nichtlinearer Kurve durchgeführt wird (Bild 4.132).

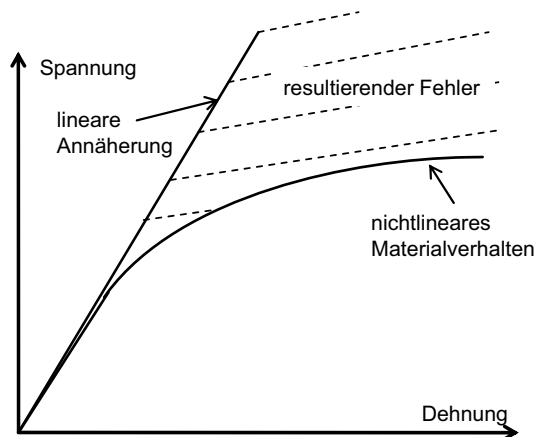


Bild 4.132 Wenn Kunststoffe linearisiert berechnet werden, muss der resultierende Fehler abgeschätzt werden.

Wenn die nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve berechnet werden soll ...

Solch eine Materialnichtlinearität kann in der Nastran-Lösung 601 problemlos zugefügt werden. Das Material müsste dann in der Art definiert werden, wie es schon bei dem Beispiel mit dem plastischen Bremspedal der Fall war. Lediglich die Einstellung *Typ der Nichtlinearität (TYP) (Type of Nonlinearity)* sollte auf *NLELAST* gestellt werden. Dieses Kür-


zel steht für *Nichtlinear Elastisch* und bedeutet, dass das Verhalten elastisch, also reversibel ist. Falls es daher zu einer Entlastung kommt, so folgt das Material wieder derselben Kurve nach unten zurück. Es entsteht also keine bleibende Verformung. Dieses Modell wird oft bei Kunststoffen eingesetzt, wenn sie nichtlinear berechnet werden müssen.

4.4.1.10 Kontakt definieren

- ☛ Für die Kontaktflächendefinition und die weiteren Randbedingungen machen Sie nun die Simulationsdatei zum dargestellten Teil.

Bei der Kontaktdefinition gilt die Empfehlung, dass der feiner vernetzte Flächenbereich zuerst selektiert und damit in die Gruppe der *Source-Region* aufgenommen wird. Der größer vernetzte Bereich soll als Zweites selektiert werden und der Gruppe der *Target-Region* zugeordnet werden. Der Kontaktalgorithmus wird dafür sorgen, dass die Knoten des ersten Bereichs nicht in die Flächen des zweiten Bereichs eindringen dürfen.

In unserem Beispiel ist nicht eindeutig zu beantworten, welche Seite die feinere ist, da sich die Netzfeinheiten der Kontaktpartner ändern. Im Zweifelsfall könnte auch ein rechenaufwendigerer beidseitiger Kontakt gewählt werden, der in den Kontaktparametern aktiviert werden kann.

- ☛ Rufen Sie die Funktion *Fläche-zu-Fläche-Kontakt*  (*Surface to Surface Contact*) auf (Bild 4.133).
- ☛ Wählen Sie darin den Typ *Manuell* (*Manual*) aus.
- ☛ Selektieren Sie für die *Source-Region* die Verrundungsfläche des Gehäuses, sowie die untere planare Fläche, weil hier zu Beginn die feinere Vernetzung von beiden Seiten ist.

Die beiden Seiten des Kontakts sollten nicht willkürlich gewählt werden.

Beim Kontakt sollte die feiner vernetzte Seite zuerst selektiert werden.

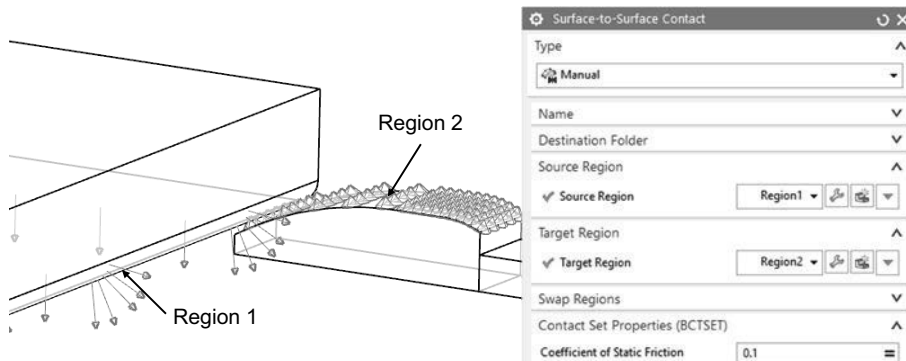


Bild 4.133 Definition eines Kontakts.

- ☛ Selektieren Sie für die *Target-Region* – entsprechend Bild 4.133 – die drei tangentialen Flächen des Schnapphakens, die in Berührung kommen können,
 - ☛ Tragen Sie für *Koeffizient der Haftreibung* (*Coefficient of static Friction*) 0,1 ein.
- Alle anderen Einstellungen des Menüs lassen Sie zunächst wie voreingestellt.
- ☛ Bestätigen Sie mit **OK**, woraufhin das Kontaktelement erzeugt wird.

Mit der Angabe von Reibung wird die Kontaktberechnung aufwendiger.

Die Rechnung wird in vielen kleinen Schritten durchgeführt.

4.4.1.11 Allgemeines zu den Lösungen ADVNLIN

Eine der Eigenschaften der Lösung 601 ist es, das zeitabhängige Randbedingungen aufgebracht werden können und sollten. Die Zeit wird dann schrittweise anhand des definierbaren Zeitschritts durchlaufen. Im Fall der Lösung 601,106 werden dabei keine dynamischen Effekte berücksichtigt, d. h., es spielt keine Rolle, ob wir unseren Weg in einer oder in zehn Sekunden durchfahren lassen. Falls Sie aber die Lösung 601,129 oder auch die 701 einsetzen, so werden aus den Zeitschritten und den definierten Bewegungen auch die dynamischen Effekte berechnet. Dann muss der betrachtete Zeitraum unbedingt realistisch eingestellt werden.

In den meisten Fällen der Lösung 601 ist es sogar zu empfehlen, eine Verfahrkraft oder den Verfahrweg zeitabhängig zu definieren, weil auf diese Weise sanfte Übergänge von einem Zeitschritt zum nächsten erreicht werden, die wiederum das Konvergenzverhalten der Lösung unterstützen.

Aus diesem Grunde soll auch in diesem Beispiel ein zeitabhängiger Verfahrweg definiert werden, der den Schnapphaken von seiner Ausgangslage bis in die geschlossene Position fährt.

4.4.1.12 Zeitschritte definieren

Je kleiner die Zeitschritte, desto leichter konvergiert die Lösung.

Da in unserer gewählten Lösung 601,106 keine Dynamik berücksichtigt wird, ist die Größe des Zeitraums keine wichtige Angabe. Lediglich die Randbedingungen müssen dementsprechend eingestellt werden, weil sie ebenfalls zeitabhängig definiert werden. Wohl aber ist die Anzahl bzw. die Größe der Zeitschritte eine wichtige Größe, denn je kleiner die Zeitschritte, desto leichter ist es für jeden einzelnen Schritt zu konvergieren.

- ✚ Wählen Sie im Kontextmenü des Lösungselements die Funktion **BEARBEITEN** und im nachfolgenden Menü das Register *Fallkontrolle (Case Control)*, (siehe Bild 4.134).
- ✚ Jetzt wählen Sie unter *Zeitschritt Intervalle (Time Step Intervals)* die Funktion *Erzeuge Zeitschritt Intervalle (Create Time Step Intervals)*.
- ✚ Es erscheint ein Dialog für die Definition von Zeitschritt-Intervallen. Für uns soll es reichen, nur ein Intervall zu definieren. Wählen Sie nun *Erzeugen (Create)*.

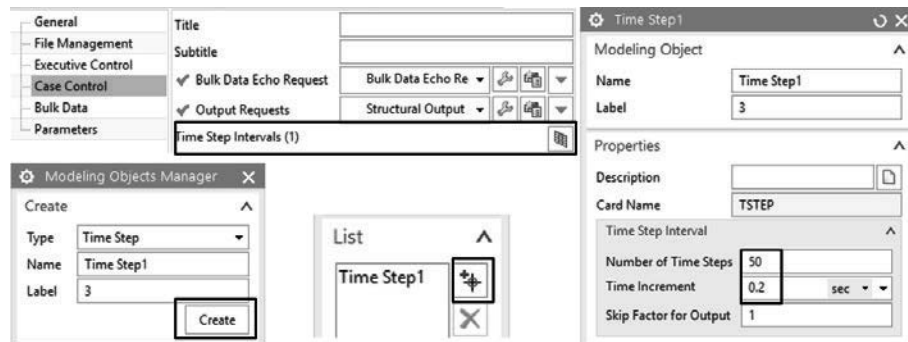


Bild 4.134 Dialog für die Definition von Zeitschritten.

Sie erkennen, dass die *Anzahl der Zeitschritte (Number of Time Steps)* auf 10 voreingestellt ist und das *Zeitinkrement (Time Increment)* 1 sec beträgt. Es ergibt sich daraus ein Zeitraum der Simulation von zehn Sekunden. Für diesen Zeitraum muss also im Folgenden der Verfahrenweg definiert werden. Wir wollen die 10sec lassen, aber eine feinere Unterteilung des Zeitraumes haben, daher ändern wir dieses Element wie folgt:

- ✚ Ändern Sie die Anzahl der Schritte auf 50 und das Inkrement auf 0,2sec (Bild 4.134).
- ✚ Bestätigen Sie mit OK und fügen Sie das Intervall über HINZUFÜGEN (ADD) der Liste zu. Klicken Sie nun auf SCHLIESSEN und OK.

4.4.1.13 Definition eines zeitabhängigen Verfahrenwegs

Ein Verfahrenweg entspricht einer vorgegebenen Randbedingung. Dies kann im NX-System über die Funktion *Erzwungene Verschiebungszwangsbedingung (Enforced Displacement Constraint)* definiert werden, wobei auch die Funktion *Anwenderdefinierte Zwangsbedingung (User Defined Constraint)* möglich wäre.

- ✚ Rufen Sie die Funktion *Erzwungene Verschiebungszwangsbedingung (Enforced Displacement Constraint)* auf (Bild 4.135).

Unter *Type* gibt es verschiedene Optionen für die Definition der Verschiebungsrichtung. Sinnvoll ist die Nutzung der Option *Komponente (Components)*, bei der in den Koordinatenrichtungen alle Freiheitsgrade getrennt eingestellt werden können. In unserem Fall ist die Z-Richtung entscheidend für den aufgezwungenen Weg. Alle anderen Komponenten sollen festgehalten werden.

- ✚ Stellen Sie den *Type* auf *Komponenten* und selektieren Sie den Punkt, der über *RBE2*-Elemente mit der Fläche verbunden ist.
- ✚ Tragen Sie bei allen Freiheitsgraden bis auf den *DOF3*, also die Verschiebung in Z-Richtung, eine 0 ein.

Sowohl die translatorischen als auch die rotatorischen Freiheitsgrade haben in diesem Fall eine Bedeutung, weil wir die Randbedingung einem Punkt zufügen, der mit einer Fläche gekoppelt ist.

Die Montage des Schnappverschlusses wird in zeitliche Inkremente aufgeteilt.

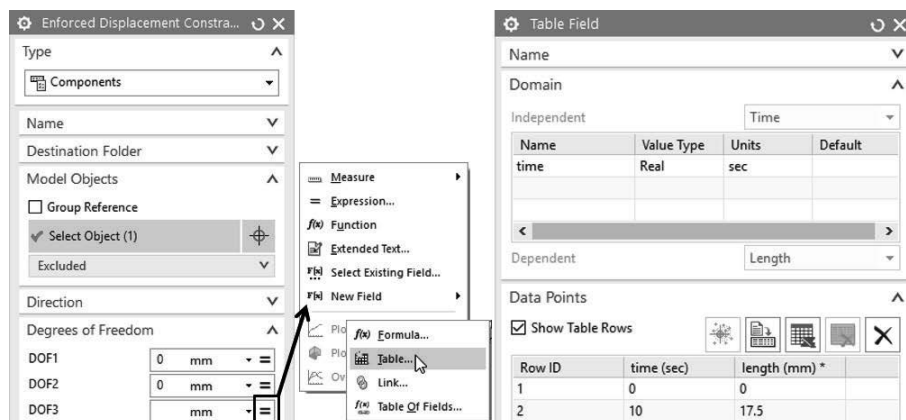



Bild 4.135 Dialoge für die Definition einer aufgezwungenen Bewegung.

Der Verfahrweg wird über eine Tabelle definiert.

Die unabhängige Variable ist die Zeit, die abhängige der Weg.

Der Verfahrweg kann in Form von Wertepaaren eingegeben werden.

- ✚ Für den zeitabhängigen Weg stellen Sie bei *DOF3* die Auswahl auf *Feld (Field)*.
- ✚ Zur Definition des Felds ist es hier am einfachsten eine Tabelle zu verwenden. Daher gehen Sie nun bei *New Field* auf den *Tabellen-Konstruktor*  (*Table Constructor*) und erzeugen ein Feld für die gewünschte Verschiebung (Bild 4.135).
- ✚ Im Dialog *Tabellenfeld (Table Field)* ist es zunächst erforderlich, dass für die Tabelle die unabhängige Variable, d. h. die Zeit, angegeben wird. Daher wählen Sie in der Box *Domäne (Domain)* bei *Unabhängig (Independent)* die Option *Zeit (Time)*.

Die abhängige Größe ist bereits als *Länge (Length)* mit der Einheit mm definiert.

Nun können einzelne x-y-Wertepaare der gewünschten Funktion angegeben werden. Wenn es sich wie bei uns um nur wenige Wertepaare handelt, ist es sinnvoll, diese manuell einzugeben. Wir wollen eine lineare Funktion erzeugen, die zum Zeitpunkt 0sec den Wert 0mm und zum Zeitpunkt 10sec den maximalen Verfahrweg von 17,5mm hat (Bild 4.135).

- ✚ Geben Sie in das untere Eingabefeld das Wertepaar „0 0“ ein, gefolgt von **ENTER**.
- ✚ Geben Sie auch das zweite Wertepaar „10 17.5“ ein und klicken auf **ENTER**.

Die Wertepaare werden in die Tabelle übernommen. Nach Wunsch kann das definierte Feld auch als Graph dargestellt werden (Bild 4.136).

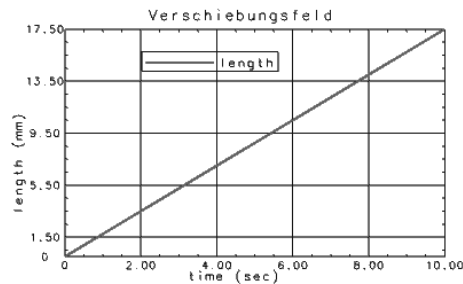


Bild 4.136

Die neu erstellte Tabelle wird der Randbedingung zugewiesen.

- ✚ Bestätigen Sie mit **OK**, woraufhin Sie in das vorherige Menü geführt werden.

So erreichen Sie schließlich wieder das Menü zur Definition der Randbedingung. Im Feld für *DOF3* ist nun das neue, zeitabhängige Feld eingetragen.

- ✚ Abschließend bestätigen Sie mit **OK**. Die zeitabhängige Verschiebungszwangsbedingung wird nun erstellt.

4.4.1.14 Definieren der weiteren Randbedingungen

Zusätzlich zu der zeitlich veränderlichen Verschiebung sind lediglich eine Fixierung des Gehäuses und eine Symmetriebedingung erforderlich.

- ✚ Erzeugen Sie eine fixe Einspannung auf der Fläche des Gehäuses, wie in Bild 4.137 dargestellt.
- ✚ Erzeugen Sie Symmetrierandbedingungen auf den Flächen, die zur Symmetrieebene gehören.

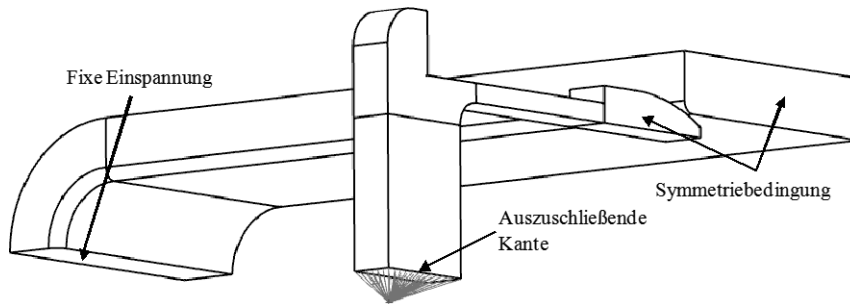


Bild 4.137 Das Gehäuse wird fest eingespannt.

Für die Flächen der Symmetriebedingung gibt es einen Konflikt, weil eine Kante existiert, an der sowohl die Symmetriebedingung als auch die *RBE2*-Elemente angreifen. Falls wir versuchen würden, das Modell auf diese Weise zu lösen, würde es zu einer Fehlermeldung kommen, die auf diesen Konflikt hinweist. Dieser Konflikt kann nicht automatisch aufgelöst werden, sondern wir müssen diese Kante aus einer der beiden Bedingungen ausschließen. Am einfachsten geht das folgendermaßen:

- ✚ Wählen Sie auf der gerade erzeugten Symmetriebedingung im Kontextmenü die Funktion **BEARBEITEN (EDIT)**.
- ✚ Klicken Sie im Menü auf den Text *Ausgeschlossen (Excluded)*. Es öffnet sich ein weiteres Selektionsfeld.
- ✚ Selektieren Sie in diesem Selektionsfeld die in Bild 4.137 gekennzeichnete Kante, die wir aus dieser Bedingung ausschließen wollen. Klicken Sie nun auf **OK**.

4.4.1.15 Aktivierung der Option für große Verformungen

Für dieses Beispiel soll die Lösung unter Berücksichtigung von großen Verformungen durchgeführt werden. Diese Option muss folgendermaßen aktiviert werden:

- ✚ Wählen Sie im Simulationsnavigator auf dem Lösungsknoten die Funktion **BEARBEITEN**.
- ✚ Wechseln Sie ins Register *Parameter* und aktivieren Sie den Schalter *Große Verdrängungen (Large Displacements)*, siehe Bild 4.138).

Große Verformungen müssen aktiviert werden, wenn sich die Steifigkeit ändert.

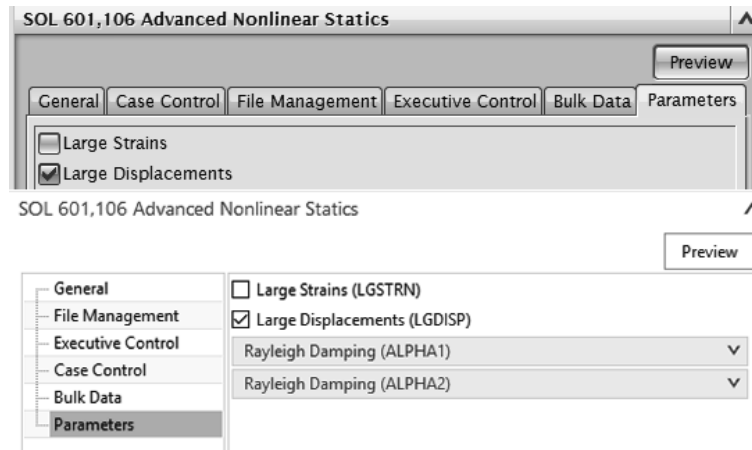



Bild 4.138 In der Lösung 601 wird hier die Option für nichtlineare Geometrie bzw. große Verformungen aktiviert.

4.4.1.16 Lösungsversuch ohne automatisches Zeitschrittverfahren

Ohne Zeitschrittverfahren können Kontakte meist nicht berechnet werden.

Nach Voreinstellung ist keines der verfügbaren automatischen Zeitschrittverfahren aktiviert. Wir wollen zunächst einen Lösungsversuch mit allen Voreinstellungen, also ohne Zeitschrittverfahren, versuchen und die Ergebnisse interpretieren. Im nächsten Abschnitt folgt dann die Nutzung des wichtigsten automatischen Zeitschrittverfahrens *ATS (Auto Time Stepping)*.

- ↳ Führen Sie mit der Funktion *Lösen*  (*Solve*) die Lösung durch.
- ↳ Schließen Sie den Lösungsmonitor noch nicht!
- ↳ Sie werden feststellen, dass ein Ergebnis erzeugt worden ist, bei dem nur wenige Zeitschritte berechnet worden sind.

Bei den ersten Schritten, die offenbar erfolgreich waren, wird der Schnapphaken lediglich ein wenig verschoben. Daraufhin sind keine Lösungen mehr berechnet worden. Um dies zu verstehen und Abhilfe zu finden, soll im Folgenden die Rechenmethode des nichtlinearen Solvers beschrieben werden.

4.4.1.17 Verstehen des Newton-Verfahrens

Um den Lösungsverlauf zu verstehen, muss erklärt werden, wie das nichtlineare Lösungsverfahren abläuft, das unter der Bezeichnung *Newton-Verfahren* bekannt ist. Die gebogene Kurve in Bild 4.139 stellt das reale nichtlineare Kraft-Weg-Verhalten eines Modells dar, das beispielsweise durch eine Materialplastizität hervorgerufen wird. Aufgabe der Berechnung ist es nun, eine Kraft auf das Modell zu geben und die Verformung entlang dieser Kurve zu berechnen.

Zeitschritte durchführen die äußeren Lasten oder Randbedingungen, die der Anwender vorgibt.

Das Newton-Verfahren nutzt eine äußere und eine innere Iterationsschleife. Die äußere Schleife nennen wir die Zeitschritte, die in Bild 4.139 mit Δt gekennzeichnet sind, und die innere die Gleichgewichtsschritte i .

Schauen wir uns zuerst die Zeitschritte an. In dieser Schleife werden die Lasten oder sonstigen Randbedingungen entsprechend ihrer zeitlichen Definition durchfahren. Stellen wir uns also vor, dass ein FEM-Modell vorliegt und ein Last- oder Zeitschritt darauf losgelassen wird. Es wird also mit den finiten Elementen die Steifigkeitsmatrix K aufgestellt und dann aus der Kraft F die Verformung U berechnet. Würde sich das Modell linear verhalten, so wäre dies schon ausreichend, d. h., man würde sofort die korrekte Verformung erhalten. Falls aber Nichtlinearitäten im Spiel sind, also Kontakt, Plastizität oder nichtlineare Geometrie, dann hätten wir nicht die korrekte Verformung berechnet.

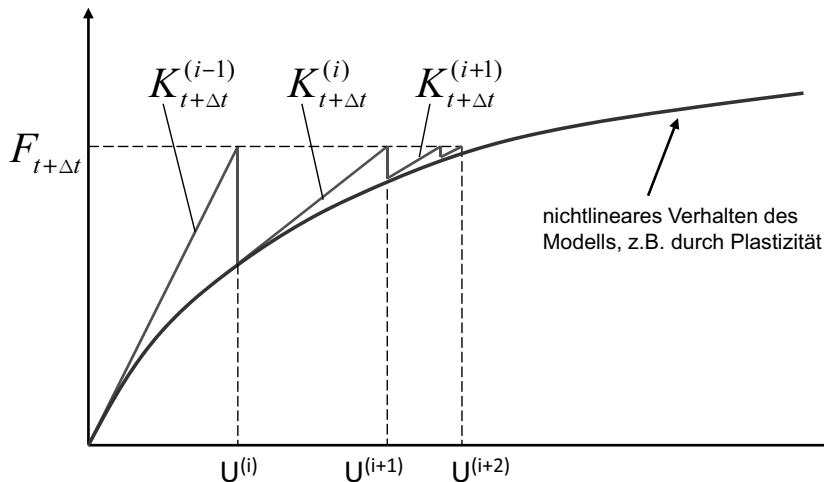


Bild 4.139 Das Newton-Verfahren.

Dass sich ein Modell nichtlinear verhält, wird rechnerisch daran erkannt, dass gewisse Konvergenzgrößen nicht gleich null sind. So eine Konvergenzgröße, die auch Residuum genannt wird, ist z. B. die Differenz aus der äußeren und der inneren Energie im Gesamtmodell. Auch andere solche Bilanzen werden gebildet, z. B. für Kontaktkräfte, die ja auch in einem plausiblen Gleichgewicht stehen müssen. Sind diese Residuen groß, so sind wir offenbar weit von der nichtlinearen Kurve entfernt, und es müssen Korrekturen durchgeführt werden.

Für diese Korrektur der Fehler kommen nun die Gleichgewichtsschritte i ins Spiel: Die Fehler kommen daher, dass wir die Anfangssteifigkeit des Modells ermittelt haben, wobei sich diese Steifigkeit infolge der Nichtlinearität geändert hat. Eine hoffentlich und wahrscheinlich verbesserte Steifigkeit finden wir, indem wir die Steifigkeitsmatrix mit dem jetzt verformten Modell und auch den aktualisierten Kontaktkräften und Materialeigenschaften neu errechnen. Dann haben wir schon zwei Steifigkeiten: Eine für den ersten Teil der Kraft und eine für den zweiten Teil. Es ergibt sich damit wieder ein Verformungsergebnis. Natürlich ist auch dieses Ergebnis der Verformungen nicht fehlerfrei, was sich wieder an den Residuen zeigt, aber die Fehler sind wahrscheinlich kleiner geworden. Sind die Residuen noch zu groß, d. h. größer als vorgegebene Grenzwerte, so wird eine weitere Gleichgewichtsiteration gebraucht usw.

Gleichgewichtsschritte verkleinern die Residuen/Fehler wieder.

Sind die Residuen aber kleiner als die Grenzen, so können wir annehmen, dass ein physikalisch sinnvolles Ergebnis inklusive der Nichtlinearität für diesen Zeitschritt vorliegt. In diesem Fall sagen wir, dass der Zeitschritt Δt konvergiert hat, und es wird der nächste aufgebracht.

4.4.1.18 Verstehen des Lösungsverlaufs anhand des Lösungsmonitors

Es gilt nun herauszufinden, warum die Rechnung nicht weitergeführt werden konnte. Dabei gibt der Lösungsmonitor der Nastran-Analyse Aufschluss. Hierin werden alle Zeitschritte, Gleichgewichtsiterationen sowie der Verlauf der Residuen dargestellt. Im Fall unserer Berechnung, die offenbar nur die ersten Zeitschritte erfolgreich durchführen konnte, ist die Darstellung des Lösungsmonitors in Bild 4.140 gezeigt.

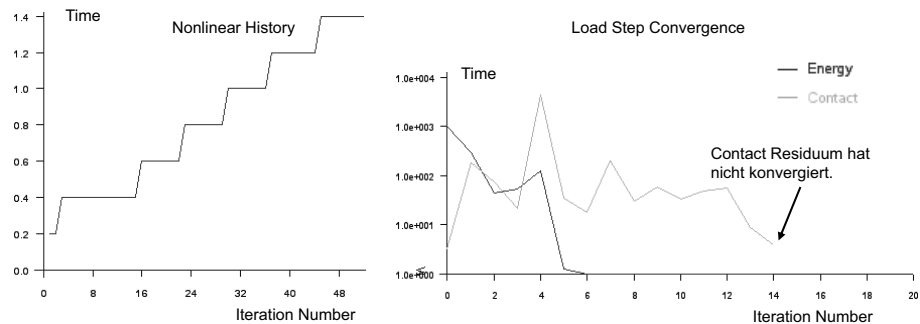


Bild 4.140 Die Darstellung zeigt eine Rechnung, die nicht konvergiert hat. Sie ist bei 1,4 von 10 sec abgebrochen.

Die linke Seite von Bild 4.140 zeigt das Register *Nonlinear History* des Lösungsmonitors. Auf der Y-Achse wird die Zeit und auf der X-Achse werden die Gleichgewichtsiterationen dargestellt. Wir haben in unserer Zeitschrittdefinition gefordert, dass 50 Schritte mit jeweils 0,2sec durchgeführt werden sollen. Daher wurde der erste Schritt bei der Zeit 0,2sec gemacht. Der Graph zeigt, dass dieser Zeitschritt konvergiert hat, und dass weitere Schritte bis zum Zeitpunkt 1,4sec durchgeführt wurden. Daraufhin sollte der nächste Zeitschritt berechnet werden, der abgebrochen wurde.

Die Residuen deuten auf Probleme hin.

Um nachzusehen, warum dieser weitere Zeitschritt nicht konvergiert hat, schauen wir in das Register *Load Step Convergence* des Lösungsmonitors (Bild 4.140 rechts). Diese Abbildung bezieht sich jetzt nur auf den aktuellen Zeitschritt. Auf der X-Achse sehen wir wieder die Zahl der Gleichgewichtsiterationen, auf der Y-Achse die Größe der untersuchten Residuen. Es wurden also das Energie- und das Kontaktresiduum untersucht. Typisch ist, dass die Residuen zu Anfang groß sind und dann immer kleiner werden. Wenn sie die Grenze 1 unterschreiten, bedeutet dies, dass sie ihren jeweiligen Grenzwert unterschritten haben. Wir warten also darauf und hoffen, dass diese Grenzen erreicht werden. Das Energieresiduum hat es offenbar schon bald erreicht, das Kontaktresiduum aber nach 15 Gleichgewichtsiterationen noch nicht.

In unserem Fall konnte das Kontaktresiduum nicht konvergieren.

Eine Voreinstellung lässt maximal 15 Gleichgewichtsiterationen bei einem Zeitschritt zu. Falls bis dahin keine Konvergenz erreicht wurde, wird die Berechnung dieses Zeitschritts

abgebrochen. Also hat die Berechnung die ersten Zeitschritte erfolgreich berechnet, zeigt diese auch im Ergebnis an, aber keine weiteren mehr.

Im Folgenden müssen wir also klären, welche Möglichkeiten bestehen, dies zu beeinflussen.

4.4.1.19 Möglichkeiten zur Erreichung einer konvergenten Lösung

Um die Bedingungen für die erfolgreiche Durchführung der kompletten Lösung zu verbessern, gibt es eine Reihe von Möglichkeiten. In diesem Abschnitt werden einige dieser Möglichkeiten beschrieben, wobei nur ein kleiner Einblick in die umfangreichen Steuerparameter der Lösung 601 gegeben werden kann. Eine vollständige Darstellung aller Einstellungen und Empfehlungen kann in [nx_adv_nonlinear] nachgelesen werden.

- **Anzahl der Gleichgewichtsschritte erhöhen:** Die Anzahl der möglichen Gleichgewichtsschritte kann erhöht werden, um die Lösungsbedingungen zu verbessern. Dies ist insbesondere dann zu empfehlen, wenn abzusehen ist, dass die Konvergenzparameter mit den voreingestellten 15 Schritten nahezu erreicht worden sind. Die zugehörige Voreinstellung *Maximum Iterations per Time Step* finden Sie unter der Funktion **BEARBEITEN...** im Kontextmenü der Lösung, unter **FALLKONTROLLE > STRATEGY PARAMETERS** und der Option *Gleichgewicht (Equilibrium)*, Bild 4.141).
- **Anzahl der Zeitschritte erhöhen:** Eine Vergrößerung der Anzahl der Zeitschritte verbessert die Bedingungen für die Lösungsfindung erheblich, weil ja jeder Schritt kleiner wird. Allerdings führt es auch zu erheblich größeren Rechenzeiten. Den zugehörigen Parameter *Number of Time Steps* finden Sie unter der Option *Time Step Interval* im Register *Case Control*. Wenn die Schrittzahl erhöht wird, sollte natürlich entsprechend das Zeitinkrement verkleinert werden, damit der Lösungszeitraum der gleiche bleibt.
- **Nutzung des ATS:** Die Nutzung des automatischen Zeitschrittverfahrens ATS ist eine sehr empfehlenswerte Option, besonders bei Vorhandensein von Kontakt. Das Verfahren erlaubt, dass ein Zeitschritt, der nicht konvergiert, automatisch verkleinert und wiederholt wird. Auf der anderen Seite wird ein Zeitschritt auch wieder vergrößert, wenn der vorher durchgeführte problemlos abgelaufen ist. Auf diese Weise kann an problematischen Bereichen der Zeitschritt sehr fein eingestellt werden. Trotzdem wird in den übrigen Bereichen mit grobem Zeitschritt gearbeitet und daher keine Rechenleistung verschwendet. Der Einsatz des ATS wird im nächsten Abschnitt weiter beschrieben.
- **Aktivierung von Langsam-Dynamik:** Diese Funktion ist oft sehr hilfreich. Sie fügt dem Rechenmodell dynamische Trägheitskräfte zu. Diese Kräfte bewirken eine Beruhigung der Bewegung und verbessern dadurch die Konvergenz.
- **Ändern der Konvergenzgrenzen:** Das Vergrößern der Grenzen führt zu einer leichteren Konvergenzfindung, allerdings auch zu einer ungenaueren Lösung und ist daher nicht zu empfehlen. Ein Verkleinern führt für jeden Zeitschritt zu einer genaueren Lösung oder evtl. leider auch zu gar keiner. Oft hilft aber das Verkleinern trotzdem, weil dadurch Ungenauigkeiten gar nicht erst zugelassen werden, die in nachfolgenden Zeitschritten zu Problemen führen. Die beiden Konvergenzgrenzen, die nach Voreinstellung

Falls keine Konvergenz erreicht werden kann, gibt es viele Einstellmöglichkeiten.

Eine Liste von empfehlenswerten Einstellparametern

für die Prüfung herangezogen werden, sind unter dem Register *Gleichgewicht (Equilibrium)* zu finden und heißen *Relative Energy Tolerance* und *Relative Contact Force Tolerance* (Bild 4.141).

Analysis Control	Use Line Searches (LSEARCH)	No
Analysis Options	Lower Bound for Line Search (LSLOWER)	0.001
Time Integration	Upper Bound for Line Search (LSUPPER)	
SOL 701 Time Stepping	Plasticity Algorithm (PLASALG)	Algorithm 1
Iterative Solver	Maximum Iterations per Time Step (MAXITE)	15
Equilibrium	Convergence Criteria Based on (CONVCRI)	Energy
ATS Scheme	Relative Energy Tolerance (ETOL)	
LDC Scheme	Relative Force Tolerance (RTOL)	0.01
TLA Scheme	Reference Force (RNORM)	0 N
Contact	Reference Moment (RMNORM)	0 N-mm
Restart	Relative Contact Force Tolerance (RCTOL)	0.05
Other	Relative Displacement Tolerance (DTOL)	0.01
Translation	Reference Translation (DNORM)	0 mm
	Reference Rotation (DMNORM)	0 deg
	Line Search Convergence Tolerance (STOL)	0.5
	Reference Contact Force (RCONSM)	1e-005 N
	Line Search Energy Threshold (ENLSTH)	0 N-mm

Bild 4.141 Einstellungen, die die Gleichgewichtssiterationen des Newton-Verfahrens betreffen.

- *Zulassen geringer Kontaktdurchdringung*: Falls eine geringe Durchdringung der Kontaktflächen zugelassen werden kann, ist der Parameter *Compliance Factor (CPACTOR1)* sehr wirksam, um die Bedingungen für eine konvergente Lösung zu verbessern. Der Parameter ist im Kontaktmenü unter *Advanced Nonlinear (BCTPARA)* zu finden. Je größer der Wert, desto mehr Durchdringung wird zugelassen. Die Durchdringung sollte an den Ergebnissen visuell nachgeprüft werden.
- *Reibungsfreien Kontakt verwenden*: Der Einsatz des Reibkoeffizienten führt in vielen Fällen zu schlechteren Bedingungen für die Lösungskonvergenz. Falls die Reibung nicht sehr wichtig ist, kann daher ein Weglassen des Reibwerts bzw. ein Nullsetzen zu einer erfolgreichen Lösung führen. In selteneren Fällen kann jedoch auch das Umgekehrte der Fall sein: Erst durch die Reibung wird die Lösungsfindung begünstigt.

Bei nichtlinearen Analysen müssen die Eingabegrößen realistisch gewählt werden.

Allgemein kann gesagt werden, dass bei nichtlinearen Berechnungen alle physikalischen Größen sinnvoll und realistisch gewählt werden müssen. Während bei den linearen Rechnungen auch unsinnige Eingabegrößen zu einem Ergebnis führen (das dann natürlich auch unsinnig ist), führen unrealistische Eingabegrößen in der nichtlinearen Berechnung meist dazu, dass gar keine Lösung gefunden wird. Daher sollten alle Eingabegrößen der Analyse kritisch bezüglich ihrer Realitätsnähe geprüft werden, wenn eine Rechnung keine konvergente Lösung bringt.

4.4.1.20 Lösung mit automatischem Zeitschrittverfahren

Das automatische Zeitschrittverfahren (*ATS, Auto Time Stepping*) ist eine sehr empfehlenswerte Methode für das Verbessern der Lösungsfindung. Dieses Verfahren ist daher bei Praxisaufgaben fast immer eingeschaltet.

Das ATS kontrolliert die Zeitschrittgröße mit dem Ziel, eine konvergente Lösung zu erhalten. Falls mit der vorgegebenen Zeitschrittgröße keine Konvergenz erreicht werden kann, verkleinert das Programm automatisch die Zeitschrittgröße und versucht, die Lösung erneut zur Konvergenz zu bringen. In manchen Fällen wird der Zeitschritt auch vergrößert, damit die Lösung beschleunigt wird.

Das ATS wird aktiviert, indem unter **STRATEGY PARAMETERS > ANALYSIS CONTROL** die Option *Automatic Incrementation Scheme* auf *ATS* gestellt wird (Bild 4.142).

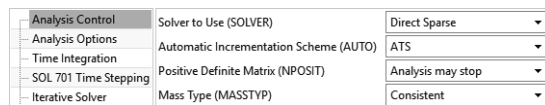


Bild 4.142 Das automatische Zeitschrittverfahren wird fast immer genutzt.

Die Einstellungen für das ATS sind im Register *ATS Scheme* zu finden. In Bild 4.142 sind die Voreinstellungen des ATS dargestellt, die in unserem Fall genutzt werden sollen. In vielen Fällen ist es jedoch sinnvoll, die im Folgenden erklärten Steuerparameter anzupassen. Eine vollständige Erklärung zu allen Steuerparametern kann in [nx_qrg] nachgelesen werden.

Zunächst einmal ist der *Division Factor (ATSDFAC)* von Bedeutung, der angibt, wie fein ein Zeitschritt unterteilt wird, wenn er nicht zur Konvergenz geführt hat. Die Zwei bedeutet, dass ein nicht konvergierter Zeitschritt durch zwei geteilt wird.

Die Zeitschritte sollen aber nicht beliebig klein werden. Daher wird mit dem Parameter *Smallest Time Step Size Number (ATSSUBD)* die feinste mögliche Unterteilung angegeben. Die 10 bedeutet also, dass der Zeitschritt nicht kleiner als ein Zehntel des originalen Werts werden darf (Bild 4.143).

Das ATS verkleinert die Zeitschritte. Die Steuerung ist hier definiert.

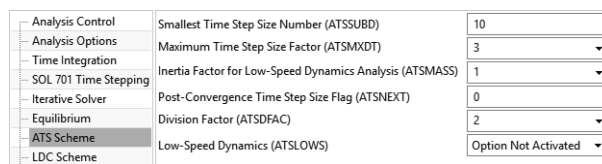


Bild 4.143 Die Parameter für das automatische Zeitschrittverfahren ATS (Auto Time Stepping)


Falls ein Zeitschritt erfolgreich berechnet werden konnte, muss entschieden werden, wie groß der nachfolgende Zeitschritt werden soll. Der Flag *Post-Convergence Time Step Size Flag (ATSNEXT)* bestimmt, wie in diesem Fall vorgegangen werden soll. Folgende Möglichkeiten existieren:

Einstellungen für das Verhalten nach einer Unterteilung

- **0:** Die Einstellung wird vom Programm gewählt, d.h. 2, falls Kontakt vorhanden ist, ansonsten 1.
- **1:** Die letzte Zeitschrittgröße, die zur Konvergenz geführt hat, wird weiter verwendet.
- **2:** Die vom Anwender vorgegebene, originale Zeitschrittgröße wird genutzt.
- **3:** Eine Zeitschrittgröße wird ermittelt, sodass die Solution Time mit der originalen Solution Time übereinstimmt, die vom Anwender vorgegeben wurde.

Falls ein Zeitschritt vergrößert werden soll, so gibt der Faktor *Maximum Time Step Size Factor (ATSMXDT)* die maximale Vergrößerung an.

☞ Weil für unser Beispiel die Voreinstellungen des ATS genutzt werden sollen, aktivieren Sie lediglich das ATS (zu finden unter: BEARBEITEN > FALLKONTROLLE > STRATEGIEPARAMETER > ANALYSEKONTROLLE > AUTOMATISCHES INKREMENTIERUNGSCHEMA).

☞ Führen Sie nun die Lösung mit *Solve*  erneut aus.

Jetzt wird die Berechnung vollständig durchgeführt.

Während des Lösens kann wieder der Lösungsmonitor analysiert werden, wie in Bild 4.144 dargestellt. Zu Beginn (Bild 4.144 links) zeigt er das gleiche Verhalten wie vorher, d. h., die ersten Schritte waren erfolgreich, der Schritt 1,4 sec nicht. Jedoch erlauben wir nun durch das ATS, dass der nicht konvergierte Zeitschritt auf die Hälfte verkleinert wird. Es ist zu erkennen, dass diese Unterteilung ausgereicht hat. Damit konnte die Konvergenz erreicht werden. Die nächsten Zeitschritte verlaufen zunächst problemlos. Die rechte Seite von Bild 4.144 zeigt den Verlauf des weiteren Fortschritts. An vielen Stellen setzt das ATS ein und verkleinert erfolgreich die Zeitschritte. Am Ende kann die ganze Rechnung bei 10sec erfolgreich abgeschlossen werden.

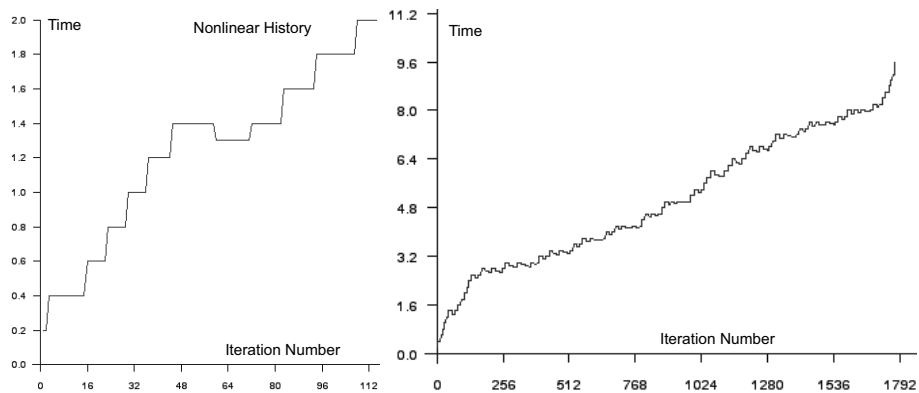


Bild 4.144 Das ATS erlaubt die Unterteilung von kritischen Zeitschritten.

4.4.1.21 Optionales Unterbrechen der Lösung zur Prüfung

Oft möchte man, dass die Nastran-Lösung 601 unterbrochen wird und ihre bis dahin berechneten Zeitschritte in die Ergebnisdatei geschrieben werden, da man nicht erst bis zum Ende warten möchte, um das Ergebnis zu prüfen.

Dies kann wie folgt erreicht werden:

1. Erzeugen Sie im Arbeitsverzeichnis eine Textdatei mit dem Namen *tmpadvnlin.rto*.
2. Schreiben Sie in diese Datei den Text *Stop=1*.
3. Speichern Sie diese Datei.
4. Warten Sie eine Weile, bis der Nastran-Job stoppt und seine bisherigen Ergebnisse erzeugt hat.
5. Öffnen Sie die Ergebnisse im Postprozessor.

Auch weitere Laufzeitparameter können in dieser Datei während des Laufs verändert werden. Sehen Sie bei Bedarf in [nx_adv_nonlinear] nach.

Übrigens kann auch eine Restart-Funktion genutzt werden, mit der die Berechnung weitergeführt wird. Genaueres dazu finden Sie in [nx_adv_nonlinear].

Die Berechnung kann unterbrochen werden, z. B. wenn nicht das Ende der vollständigen Berechnung abgewartet werden soll.

4.4.1.22 Postprozessing

Nachdem die zehn Sekunden erfolgreich berechnet worden sind, kann das Ergebnis im Postprozessor analysiert werden.

- ✚ Öffnen Sie die Ergebnisse im Postprozessor.

Die zehn Schritte werden einzeln angezeigt. Jeder der Schritte enthält Verformungen, Spannungen, Reaktionskräfte usw. Bild 4.145 zeigt beispielsweise den 21ten Lastschritt, bei dem der Schnapphaken bereits auf der Gehäusefläche rutscht. Hier können nun die Spannungen und Reaktionskräfte abgelesen werden. Beim letzten Lastschritt ist der Schnapphaken in die Öffnung eingeschnappt und hat seine Ruheposition erreicht.

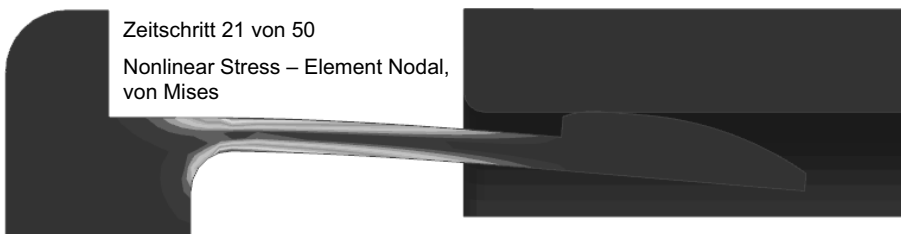


Bild 4.145 Mit dem ATS konnte die Lösung vollständig durchgeführt werden. Bild 9.26 in Kapitel 9 zeigt eine farbige Darstellung der Abbildung.



- ✚ Bei nichtlinearen Ergebnissen ist es wichtig, dass die voreingestellte Übertreibung der Darstellung auf den real berechneten Wert gestellt wird. Stellen Sie den Scalefaktor auf 1 und den Typ auf *Absolut*. Dies finden Sie unter **EDIT POST VIEW > DEFORMATION RESULT**.
- ✚ Um einen Film des gesamten Verfahrensweges darzustellen, muss die Funktion *Animation*  entsprechend Bild 4.146 derart eingestellt werden, dass die Option unter *Animate* auf *Iterations* gestellt wird.
- ✚ Daraufhin kann die Funktion *Spiel*  (*Play*) gestartet werden. Der vollständige Verfahrensweg des Schnapphakens wird nun als Film dargestellt.



Bild 4.146 Wenn ein Film der Bewegung dargestellt werden soll, werden die Bilder aus den einzelnen Iterationen genutzt.

4.4.1.23 Alternative vereinfachte Berechnungsmethoden

Schnapphaken werden in der Praxis meist vereinfacht berechnet.

Wir wollen abschließend noch darauf hinweisen, dass ein Schnapphaken, je nach Aufgabenstellung, auch auf sehr einfache Weise sinnvoll berechnet werden kann. In der Praxis von Kunststoffkonstruktionen besteht oftmals lediglich die Frage nach den auftretenden Spannungen oder Dehnungen bei voller Auslenkung des Hakens. Wenn dann diese aufgezogene Auslenkung auch noch bekannt ist – es wird z. B. einfach angenommen, dass das Gehäuse starr ist, dann kann die Auslenkung aus der Geometrie bestimmt werden – kann eine ganz einfache lineare Rechnung durchgeführt werden (Bild 4.147).

Angenommen, die aufgezogene Auslenkung beträgt 2,5 mm. Der Haken bekommt dann eine feste Einspannung und eine Kraft (Einheitskraft F_{norm}) auf seine Kontaktfläche von der Größe 1 N. In einer linearen FE-Analyse wird der Weg ($u_{1\text{N}}$) berechnet, den sich der Haken unter dieser Kraft verformt. Beispielsweise ergibt sich ein Weg von 0,1 N. Durch lineares Skalieren, d. h. durch die einfache Rechnung $2,5/0,1$ ergibt sich der Faktor für die erforderliche Kraft (F_{soll}). D. h., die erforderliche Kraft beträgt 25 N. In einer zweiten Rechnung (oder erneut durch Hochskalieren des ersten Ergebnisses) wird der Haken unter dieser Kraft berechnet.

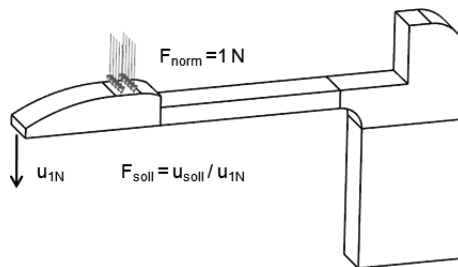


Bild 4.147

Eine lineare Analyse mit einer Einheitskraft wird genutzt, um auf die Steifigkeit zu schließen. Damit wird der Kraftfaktor bestimmt.

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass statt der Kraft eine aufgezwungene Verschiebung (so wie in der Lernaufgabe „Auslegung einer Schraubenfeder“ in Abschnitt 4.2.2) aufgebracht wird, in der die Kontaktfläche um genau die erforderlichen 2,5 mm verformt wird. Die dazu passende Kraft kann dann in den Ergebnissen als Reaktionskraft abgelesen werden.

Alternativ kann auch der erforderliche Weg direkt aufgezwungen werden.

Die Berechnung mit der Sol 601 und die beiden vereinfachten Berechnungsmethoden unterscheiden sich darin, dass bei den vereinfachten Methoden direkt der verformte Zustand berechnet wird und in der Sol 601 der vollständige Weg des Zusammenfahrens. Außerdem wird in der Sol 601 durch den Kontakt berücksichtigt, dass vom Gehäuse eine Nachgiebigkeit ausgeht, die dazu führt, dass der Haken etwas weniger verformt wird.

Damit ist diese Lernaufgabe abgeschlossen.

Literatur

- [Alber-Laukant] *Alber-Laukant, B.*: Struktur- und Prozesssimulation zur Bauteildimensionierung mit thermoplastischen Kunststoffen. Validierung von Werkstoffbeschreibungen für den technischen Einsatz. 1. Auflage. Shaker-Verlag 2008
- [Binde4] *Binde, P.*: NX Advanced Nonlinear FE-Analysis mit NX/Nastran Solver. Schulungsunterlagen zum Training. Dr. Binde Ingenieure GmbH, Wiesbaden 2014
- [Dubbel] *Grote, K. H./Feldhusen, J. (Hrsg.)*: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 21. Auflage. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 2004
- [nxn_advnnonlinear] NX Nastran Advanced Nonlinear Theory and Modeling Guide. Dokumentation zur NX Nastran-Installation
- [nxn_dmap] NX Nastran DMAP User's Guide. Online-Dokumentation zu NX Nastran
- [nxn_nonlinear106_1] NX Nastran Basic Nonlinear Analysis User's Guide. Online-Dokumentation zu NX Nastran
- [nxn_nonlinear106_2] NX Nastran Handbook of Nonlinear Analysis (106). Online-Dokumentation zu NX Nastran
- [nxn_qrg] NX Nastran Quick Reference Guide. Dokumentation zur NX Nastran-Installation
- [nxn_user] NX Nastran User's Guide. Online-Dokumentation zu NX Nastran
- [nxn_verif] NX Nastran Verification Manual. Online-Dokumentation zu NX Nastran
- [RiegHackenschmidt] *Rieg, F./Hackenschmidt, R.*: Finite Elemente Analyse für Ingenieure. Eine leicht verständliche Einführung. 3. Auflage. Carl Hanser Verlag, München 2009
- [RoloffMatek] *Muhs, D./Wittel, H./Jannasch, D./Vofsiak, J.*: Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung. 21. Auflage. Springer Vieweg, Wiesbaden 2013
- [SchnellGrossHauger] *Schnell, W./Gross, D./Hauger, W.*: Technische Mechanik 2: Elastostatik. 3. Auflage. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1989

Stichwortverzeichnis

Symbole

2D-Kontakt 24
3D-Kontakt 24, 72
64 Bit 13

A

Abbruchtoleranz 369
abhebende Kontakte 69
achsensymmetrisch 151, 333
Adams 13
ADINA 162
Ampere-Gesetz 322
analytische Lösung 398
Animation 25
Anlaufverhalten 365
Anregung 220
Ansatzfunktion 397, 399 ff.
Antrieb 21, 36
Antwortsimulation 161
Arbeitsspeicher 13
Artikulation 20
Artikulationsantrieb 37
Assistent
– Kinematikverbindung 26
aufgezwungene Bewegung 362, 365
Auftrieb 299, 314
Auslassöffnung 308
AUTOMPC 194

B

Balken 200
Balkenelement 200 f., 203

Balkentheorie 183
benannte Referenzen 379, 388
Beschränkung bei MKS 18
bestimmte Freiheitsgrade 19
bewegungsgetriebene Systeme 20
Bewegungskörper 22, 30, 71
Bewertung der Genauigkeit 99
Bibliothek 71
Blattfeder 245
Buchse 24

C

CAEAnalysis 379, 390
CAEGeometry 379
CAE-Manager 390 ff.
CAEModel 379, 390
CFD 291
CGAP 222
Co-Simulation 21, 29

D

Dämpfer 16, 24
Dämpfung 74, 220
Datenmodell 380, 389
Datensicherung 378
dielektrische Beziehung 324
dielektrische Permeabilität 324
Differentialgleichungssystem 17
Direct Matrix Abstraction Programming 161
DMAP 161
DMU 7
Drehantrieb 17
drehbare Lagerung 124

Drehfreiheitsgrad 191
 Drehgelenk 22, 32
 Druckverteilung 314
 Durchdringung 25
 Dynamik 29, 68

E

Eddy Currents 326
 Eigenfrequenz 96, 213
 Einlass 307
 Eisenverluste 373
 Elastizitätsmodul 120
 elektrische Leitfähigkeit 324
 Elektrodynamik 321, 327f.
 Elektrokinetik 319, 321, 327f.
 elektromagnetische Feldberechnungen 161
 Elektrostatik 319ff., 325, 327f.
 elektrotechnische Feldtheorie 319
 elektrotechnische Komponenten 319
 EMAG 161
 Ergebnistransfer an FEM 25
 Erhaltungsgleichungen 292

F

f06-Datei 282
 Fachwerktheorie 398
 Faraday-Gesetz 323
 Feder 16, 24
 ferromagnetisch 324
 Festgelenk 22, 27, 72
 Finite-Volumen-Methode 292
 Fläche auf Fläche kleben 222f.
 Flächenkörper 173
 Flächenunterteilungen 110
 Fläche-zu-Fläche-Kontakt 222
 flexible Bewegungskörper 23
 Flexible Body Dynamics 30
 flexible Körperdynamik 21
 Freigabeprozesse 380
 Freigabe- und Änderungsprozesse 378
 Full Wave 319, 321, 327, 330
 Full Wave (Hochfrequenz) 321, 330
 Funktion 37
 Funktionsmanager 23
 FVM 292

G

Gap-Elemente 162
 gekoppelte Systeme 161
 General Motion 364
 geometrisch nichtlineare Analyse 246
 Gestaltänderungsenergiehypothese 133
 Gitterpunkt 202
 Gitterverknüpfungsbedingung 154
 Gitterverknüpfungsverbindung 222
 Gleichgewichtsbedingung 398
 Graphenerstellung 25, 52
 Grenzschrift 302, 309
 große Verformung 93, 160, 245, 266, 280

H

harmonischer Antrieb 37
 Hexaederelemente 137
 Hexaedervernetzung 270
 Hookesches Gesetz 91, 93, 398

I

Induktionsgesetz 323
 Induktivität 321, 349
 Innen 23
 Installation 330ff.
 intelligenter Punkt 23

K

Kabel 23
 Kalkulationstabelle ausfüllen 25
 Kantenunterteilung 249
 Kapazität 321
 Kerbfaktor 136
 Kerbspannung 99
 Klemmsituationen 18
 Klemmsitz 221
 Klonen 214
 Kollisionen 20
 Kollisionsprüfung 67
 komponentenbasierte Simulation 30
 Kondensator 321
 Konfliktsituationen 29
 konstante Geschwindigkeit 23
 Kontakt 266

Kontakt-Nichtlinearität 92
Konvektionsrandbedingung 157
Konvergenz 144
Konvergenzkriterium 295f.
Konvergenznachweis 146, 408
Konvergenzsteuerung 312
Kopplungselemente 189
Körperwände 304
Kräfte 24
Kuchenstück 152
kugelförmiges Gelenk 22
Kugelgelenk 64
Kurve an Kurve 24
Kurvenscheiben 16

L

Lasttypen 122
Leistungsverluste 341, 354, 373ff.
Lernaufgaben 8
lineares Beulen 98
lineare Statik 89
Lizenz 330
lokale Netzverfeinerung 141

M

MAGNETICS 161
magnetische Beziehung 324
magnetische Permeabilität 324
Magnetodynamik 319, 320, 321, 327, 329
Magnetostatik 319ff., 325, 327, 329
Markierung 23
Maschinenportale 200
Masseneigenschaften 31
Master-Model-Konzept 25
Master-Modell-Bemaßung 23
Materialeigenschaften 119, 153, 303
Materialgleichungen 324
MATLABSimulink 21
Matrizenform 401
maximale Zughauptspannung 210
Maxwell-Gleichungen 320
Mehrkörpersimulation 16
Mesh Point 202
Messen 25
Mittelfläche 172
Mittelknotenelemente 137

MKS-Programm 16
Momente 24
Motion Joint Wizard 27
Motion-Verbindungen 34
Motorbibliotheken 21
Motor Driver 29
Moving Band 355, 364ff.
Multiprozessor 12

N

Netzfeinheit 94
Netzverbindung 154
Newton-Verfahren 280, 369
nichtlineare Effekte 87, 92
nichtlineare Geometrie 280
nichtlinearer Kontakt 222f.
nichtlineares Material 93
nichtlineares Spannungs-Dehnungs-Verhalten 274
Nietverbindungen 188
NX/Thermal 161

O

Oberflächenrauigkeit 305
Öffnungen 304, 306
Ohm-Gesetz 324
Ohm-Widerstand 321, 325, 354, 373
Opel RAK2 9, 405
Orientierung 23

P

Parallel 23
Parametrisierung 199
PDM 7
perfekte Isolation 157
Phasenspannungen 368, 372
Phasenverschiebungen 366
Planargelenk 22
Plant Input 24
Plant Output 24
plastische Verformung 256
Plastizität 257
PMDC-Motor 24
Polygeometrie 143, 249
Polygonkörper 107
Postprozessor 128

Presspassung 221
 Primitive Joints 22
 Prinzip der linearen FEM 90
 Prinzipien elektromagnetischer Analysen 320
 Prinzip vom Minimum der potenziellen Energie 400
 Prozessor 12
 Prozess-Orientierung 378
 Prüfung der Elementformen 139
 Punkt auf Fläche 24
 Punkt auf Kurve 24
 Punktmasse 215

Q

Querkontraktionszahl 120

R

Randbedingungen 126, 127
 Raumdiskretisierung 399
 Reaktionskraft 199, 208 f.
 RecurDyn 13
 redundante Freiheitsgrade 29, 48
 redundanzfrei 29
 Reibung 73
 reibungsfreies Gleiten 310
 Reifegradverfolgung 378
 Response Analysis 161
 Revisionen 380, 388, 392 ff.
 Revisionieren 391 f., 394
 ringelementbasierte Methode 151
 Rotationsfreiheitsgrade 167

S

Schalenelemente 167, 168
 Schiebegelink 66
 Schieberegler 22
 Schnapphaken 266
 Schraube 22
 Schraubenfeder 198
 Schraubkraft 235
 Sensor 23
 Sequenz erzeugen 25
 Signaldiagramm 24, 29
 Simulation File View 106
 Simulationsdaten 377 f., 396
 Simulationsdatenmanagement 378, 395 f.

Singularitäten 95, 147
 Skin-Tiefe 326
 Sol 101 161
 Sol 103 162
 Sol 106 162
 Sol 601 162
 Spannelement 221
 Spannungs-Dehnungsverhalten 398
 Spiel 18
 Spule 321 ff., 325, 333 f., 337, 340 f., 343, 345, 347, 349 ff., 358, 360 f.
 Standardvernetzung 118
 Steifigkeitsmatrix 401
 Steinmetz-Formel 324, 373
 Stich Edge 174
 Strömungsanalyse 292
 Strömungsrandbedingungen 304
 Strukturmechanik 18
 Superelemente 216
 Surface to Surface Contact 222
 Surface to Surface Gluing 222 f.
 Symmetrie 151
 Synchronisation der Prozesse 378

T

TC_CAE_Defining 379, 389
 TC_CAE_Source 380, 389
 TC_CAE_Target 380, 389
 Teamcenter 378 ff., 387 ff., 395 f.
 Temperaturfeld 149
 Temperaturgradient 157 f.
 Temperaturrandbedingung 156
 thermodynamische Aufgaben 161
 Thermotransfer 97
 TMG 161
 Toleranzen 49
 Toolbar 21
 Top-down-Methode 41
 Totwassergebiet 317, 419
 Transportgleichungen 292
 Turbulenzmodell 297

U

überbestimmte Freiheitsgrade 29
 Überbestimmungen 29
 Umgebung 21, 28

unbestimmte Freiheitsgrade 19
Universal 22
unterbestimmt 34

V

Ventilatoren 306f.
Verbindung 22, 30, 177, 188
Verformungsergebnisse 131, 134
Vergleichsspannungshypothese 133
verkettete Phasenspannung 371
Verluste 341, 354, 373
Verschiebungsfunktion 397
Versionsstände 378
vierknotige Tetraeder 137
virtuelle Produktentwicklung 6
von Mises 129, 133
Voreinstellung 76
Voreinstellungen 13
vorgegebene Verschiebung 208
vorgespannte Lagerungen 198

W

Wandstärke 176
Wärmefluss 158
weiche Federlagerungen 230, 233
Werkstoffgesetz 399
Whitney-Elemente 337
Widerstand 321, 325
Wirbelströme 326

Z

Zahnradpaar 23, 38
Zahnstange und Ritzel 23
zehnknotige Tetraederelemente 137
Zeichnen 25
zeitabhängiger Verfahrensweg 277
Zeitschritt 312
Zeitschrittgröße 295
Zeitschrittverfahren 285
Zughauptspannung 133
Zylindergelenk 50
Zylindrisch 22