

## Beispiel 18 Tellerfeder (Geometrische Nichtlinearität)

### Lernziel

In diesem Beispiel wird eine nichtlineare strukturelle Berechnung vorgestellt. Es liegt eine **geometrische Nichtlinearität** vor, das Bauteilverhalten ist von den Verformungen abhängig. Die **Ergebnisse der FEM-Berechnung werden mit Formeln** verglichen. Zum Kennenlernen der Parametersprache APDL **werden die Formeln mit der APDL (ANSYS parametric design language) programmiert** und die Ergebnisse grafisch dargestellt.

Es wird vorausgesetzt, dass Sie die Beispiele 1 und 2 durchgearbeitet haben und damit bereits das ANSYS/ED-Menüsystem und lineare strukturelle Berechnungen kennengelernt haben.

Für die Durchführung von diesem Beispiel sehen Sie **etwa 1 Stunde** vor.

### 1 Aufgabenstellung

Die zu berechnende Struktur stellt eine Tellerfeder dar. Am inneren Rand wird eine axial wirkende Last aufgebracht. Der Außenrand ist axial gelagert.

Reibungseinflüsse werden an der Lasteinleitung und an der Auflagefläche sind geringfügig und werden vernachlässigt. Sowohl das Bauteil als auch die Lasten und Randbedingungen sind rotations-symmetrisch.

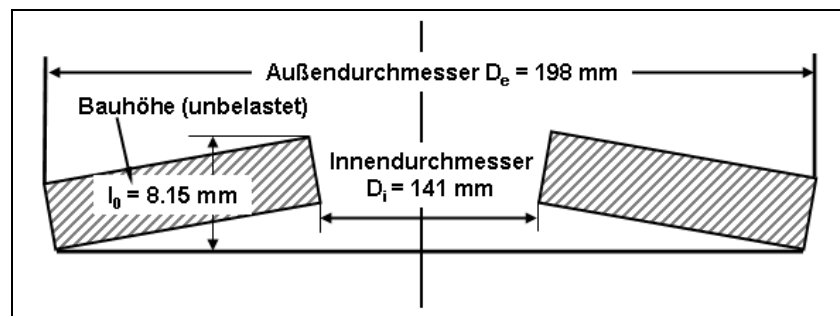


Abb. 1 Aufgabenstellung

Folgende Daten der Geometrie sind gegeben:

Innendurchmesser	$D_i$	= 141 mm
Außendurchmesser	$D_e$	= 198 mm
Bauhöhe (unbelastet)	$l_0$	= 8,15 mm
Materialdicke	$t$	= 2 mm

Für das Material sind folgende Daten gegeben:

Elastizitätsmodul:	$E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$
Querkontraktionszahl	$\nu = 0,3$

Gesucht wird die Kraft-Verformungs-Kurve der Tellerfeder. Dabei soll die Berechnung zunächst mit der Finite-Element-Methode mit dem ANSYS/ED-Programm erfolgen. Anschließend sollen die Berechnungsergebnisse mit den Werten verglichen werden, die sich aus den Formeln der technischen Berechnungsgrundlagen (DIN 2092) ergeben. Die Verfasser bedanken sich bei der Fa. Christian Bauer, Welzheim für die freundliche Unterstützung und die zur Verfügung gestellten Unterlagen.

## 2 Idealisierung

Die Aufgabe wird mit einer nichtlinearen statischen strukturellen Berechnung gelöst. Das Bauteil wird durch ein 2-dimensionales rotationssymmetrisches Modell abgebildet. Dazu wird der Elementtyp PLANE42 verwendet, der in der Ebene definiert ist, die durch die radiale (x) und die axiale (y) Richtung gebildet wird. Jedes Element wird als Viereck mit 4 Eckknoten ausgeführt werden. Die Rotationssymmetrie wird für diesen Elementtyp durch eine Schaltergröße (key option) festgelegt. Ein Element dieses Typs repräsentiert damit einen geschlossenen Ring um die Mittelachse.

## 3 Das Preprocessing

Der Aufruf des Preprocessors erfolgt mit  
**/PREP7**

Der Elementtyp  
**ET,1,PLANE42,,,1**

Die Materialdaten werden eingegeben mit  
**MP,EX,1,2.06E5**  
**MP,NUXY,1,0.3**  
und die bisherige Arbeit gesichert mit  
**SAVE**

Die Ecken des Querschnitts der unbelasteten Tellerfeder sind durch den Innendurchmesser, den Außendurchmesser, die Bauhöhe und die Materialdicke konstruktiv vorgegeben. Diese Abmessungen und einige weitere, daraus abzuleitende Abmessungen werden von uns direkt bei der Festlegung dieser Ecken als arithmetische Ausdrücke eingetragen. Das Programm führt die Berechnung jedes Zahlenwertes aus.

**K,1,(198/2)-0.5822**  
**K,2,198/2,1.9133**  
**K,3,(141/2)+0.5822,8.15**  
**K,4,141/2,8.15-1.9133**

Darstellung der Keypoints mit Nummern  
**/PNUM,KP,1**  
**KPLOT**

Die Fläche  
**A,1,2,3,4**

Darstellung der Fläche mit Linien-Nummern  
**/PNUM,LINE,1**  
**APLOT**

Sichern Sie die bisherige Arbeit mit  
**SAVE**

Die Vernetzungskriterien  
**LESIZE,1,,,3**  
**LESIZE,2,,,15**

Die Vernetzung der Fläche

**AMESH,1**

Sichern Sie die bisherige Arbeit mit

**SAVE**

## 4 Die Lösung

Der Aufruf des Lösungsteils

**/SOLU**

Die Randbedingung, die das Auflager darstellt

**DK,1,UY**

Die Last wird als aufgezwungene axiale Verschiebung des Eckpunktes (keypoint) 3 eingegeben mit

**DK,3,UY,-12**

Die Tellerfeder hat dadurch, dass sie einen geschlossenen Kreisring darstellt, ein Tragverhalten, das nicht so leicht auf den ersten Blick zu durchschauen ist. Im vorliegenden Fall liegt eine aufgezwungene Verformung in axialer Richtung vor. Eine solche Verformung flacht zunächst die Tellerfeder ab. Dabei ist zu beachten, dass im Federquerschnitt sowohl Spannungen in der Ebene unseres Modells (also radiale und axiale Spannungen) als auch Umfangsspannungen (senkrecht auf die Ebene unseres Modells) auftreten. Diese Umfangsspannungen tragen erheblich zum gesamten Tragverhalten des Bauteils bei.

Solange die Abflachung der Tellerfeder gering bleibt, liegt ein lineares Verhalten vor. Dann liegt ein linearer Zusammenhang zwischen der aufgeprägten Verschiebung, den Spannungen und der Reaktionskraft in der Tellerfeder vor. Bei größeren Verformungen ist dieser lineare Zusammenhang nicht mehr gegeben. Dann können bei der Tellerfeder die Spannungen und die Reaktionskraft langsamer zunehmen als die aufgeprägte Verschiebung. Nach einem Maximum kann sogar trotz zunehmender Verschiebung eine Abnahme der Reaktionskraft auftreten! Dieser Zusammenhang zwischen dem Tragverhalten des Bauteils (also den Spannungen und Reaktionskräften) und den Verschiebungen ist damit nichtlinear, obwohl keine Plastizität des Materials und keine nichtlinearen äußeren Einflüsse vorliegen. Nur durch die Verformung ändert sich die Steifigkeit. Damit liegt eine **Geometrie-Nichtlinearität** vor.

Im ANSYS-Programm wird standardmäßig eine lineare Geometrie angenommen. Wenn das Bauteil möglicherweise geometrisch nichtlinear ist, muss die Berücksichtigung dieses Effektes eingeschaltet werden

**NLGEOM,ON**

Bei einer nichtlinearen Berechnung kann das Ergebnis der Berechnung nicht in einem Berechnungsschritt erreicht werden. Ein Lösungsschritt bei der FEM besteht in der Lösung des linearen Gleichungssystems mit der Steifigkeitsmatrix und den unbekanntem Zahlenwerten der Freiheitsgrade. Wenn das Bauteil nichtlinear ist, so

a) muss ein solcher Lösungsschritt durchgeführt werden,

- b) anschließend müssen die berechneten Verschiebungen verwendet werden, um die Einflüsse der Bauteilverformung in der Steifigkeitsmatrix zu berücksichtigen,
- c) mit der neuen Steifigkeitsmatrix muss ein neuer Lösungsschritt durchgeführt werden,
- d) es muss geprüft werden, ob die neue Lösung zutreffend ist und abhängig davon
- e) muss entweder neu gerechnet werden (also wieder mit b weitermachen) oder die Folge von Lösungsschritten beendet werden.

Jeder dieser Lösungsschritte wird als **Gleichgewichtsiteration (equilibrium iteration)** bezeichnet. Wenn die Folge der Iterationen ein zutreffendes Ergebnis geliefert hat, wird davon gesprochen, dass die Berechnung **konvergierte (converged)**.

In vielen Fällen ist es ausreichend, den Schalter für die geometrische Nichtlinearität (large deform. effects) einzuschalten. Dadurch wird automatisch die Folge der Gleichgewichtsiterationen solange ausgeführt, bis die Berechnung konvergiert ist. Alle Standardeinstellungen (z.B. der Konvergenzkriterien) sind so gewählt, dass sie robust und alltagstauglich sind. Nur in besonderen Fällen sind die folgenden zusätzlichen Schritte in Betracht zu ziehen.

Bei der Erläuterung der Gleichgewichtsiterationen war zugrundegelegt worden, dass iterativ das Ergebnis bestimmt wird, das für das nichtlineare Bauteil bei einer gegebenen Last zutrifft. Es wird also mit der Dateneingabe eine bestimmte Last vorgegeben und durch die Iterationen vom Programm das für diese Last zutreffende Ergebnis bestimmt. Bei nichtlinearen Berechnungen ist es aber häufig sinnvoll, **Zwischenschritte** zu untersuchen, zum Beispiel,

- weil das Verhalten des Bauteils nicht nur im unbelasteten Zustand (am Anfang) und bei voller Last (am Ende), sondern auch dazwischen untersucht werden soll und
- weil bei nichtlinearen Bauteilen vielfach das Endergebnis auch vom Geschehen dazwischen abhängig ist, also von der Folge der Schritte bis zu diesem Endergebnis. Diese Berechnungen sind **nicht-konservativ**, das Superpositionsprinzip gilt dann nicht mehr.

Insgesamt gibt es bei der Berechnung von nichtlinearen Bauteilen

- **Lastschritte (load steps)**: Jeder Lastschritt enthält eine Zusammenstellung von Lasten und Randbedingungen und Lastschrittoptionen zur Steuerung der Berechnung. Ein Lastschritt wird in der Dateneingabe mit einer Aufforderung an das Programm abgeschlossen, die Lösung und damit den Bauteilzustand am Ende dieses Lastschrittes (ausgehend vom Ende des vorangegangenen Lastschrittes) zu berechnen.
- **Zwischenschritte (substeps)**: Dies sind Bauteilzustände im Verlauf eines Lastschrittes, die ebenfalls berechnet werden sollen (zum Beispiel um den Verlauf genauer untersuchen zu können). In der Dateneingabe wird die Anzahl der Zwischenschritte (oder die Schrittweite) im Lastschritt angegeben.
- **Gleichgewichtsiterationen (equilibrium iterations)**: Für jeden Bauteilzustand muss eine Folge von linearen Gleichungslösungen ablaufen, bis das Gleichgewicht ausreichend genau erfüllt ist und Konvergenz erreicht ist. Jede dieser Gleichungslösungen ist eine Gleichgewichtsiteration. Bei den meisten Aufgaben sind die standardmäßig zugelassenen 25 Iterationen ausreichend, um Konvergenz zu erreichen. Die Standardeinstellung kann vom Anwender verändert werden (Kommando **NEQIT**).

Im vorliegenden Beispiel ist ein einziger Lastfall vorgesehen. Es sollen aber 100 Zwischenschritte (substeps) ausgeführt werden, ehe die aufgebrachte Last am Ende des Lastschrittes beim letzten Substep in voller Höhe berücksichtigt wird.

Grundsätzlich gilt, dass eine solche nichtlineare Berechnung durch viele Zwischenschritte genauer wird, aber auch mehr Rechenzeit benötigt. Um dabei den optimalen Zwischenweg zu finden, kann eine Automatik verwendet werden, die laufend während des Berechnungsfortschrittes die Schrittweite zwischen den Zwischenschritten den Erfordernissen anpasst. Diese Automatik wird als **Last- oder Zeitschrittautomatik (automatic time stepping)** bezeichnet (sie ist nicht nur für nichtlineare statische Berechnungen, sondern insbesondere für dynamische Berechnungen zur Wahl des geeigneten Zeitschrittes (time step) wichtig). Die Aufgabe für den Anwender besteht nun nur noch darin, eine Anfangs-Schrittweite vorzugeben. Anschließend übernimmt die Automatik die Kontrolle der Schrittwahl innerhalb von vorgegebenen Grenzwerten.

Im vorliegenden Beispiel wird die Last- oder Zeitschrittautomatik eingeschaltet. Am Anfang des Lastschrittes soll eine Schrittweite von 1/100 des Lastschrittes gewählt werden. Anschließend - also vom zweiten Zwischenschritt an - darf die Automatik die Schrittweite von einem Zwischenschritt zum nächsten dem Bauteilverhalten anpassen. Die Automatik soll aber die Grenzwerte einhalten, dass höchstens 1000 Zwischenschritte und mindestens 30 Zwischenschritte ausgeführt werden. Diese Festlegungen werden eingegeben mit

**AUTOTS,ON**  
**NSUB,100,1000,30**

Standardmäßig werden nicht alle Ergebnisse der Substeps auf der Ergebnisdatei .rst abgespeichert, sondern nur die Ergebnisse des letzten Zwischenschrittes eines Lastschrittes. Im vorliegenden Beispiel möchten wir jedoch das Ergebnis für jeden Zwischenschritt abspeichern. Dies kann eingestellt werden mit

**OUTRES,ALL,ALL**

Um die Folge der Iterationen schneller auf die Konvergenz hinzuführen, können eine Anzahl von numerischen Hilfen eingeschaltet oder ausgeschaltet werden. Im vorliegenden Beispiel wird ein Prediktor (predictor) eingeschaltet

**PRED,ON**

Sichern Sie die bisherige Arbeit mit

**SAVE**

Die Lösung des Lastschrittes wird begonnen durch

**SOLVE**

Anschließend wird jeweils ein Zwischenschritt (substep) mit der ersten Iteration begonnen und je nach Erfordernis eine Folge von weiteren Gleichgewichtsiterationen ausgeführt, bis Konvergenz erreicht wird (Verfolgen Sie die Berechnungslösung im Fenster ANSYS\_OUTPUT. Beachten Sie die Meldungen "SOLUTION CONVERGED".).

Im Grafikfenster wird der Berechnungsfortschritt durch eine grafische Darstellung skizziert. Mit diesem „Monitor“ kann überwacht werden, welche Zahlenwerte aktuell für das Ungleichgewicht im berechneten Bauteil vorliegen (standardmäßig werden F L2, U L2 verfolgt) und welche Zahlenwerte aktuell für das zugehörige Konvergenzkriterium (F CRIT, U CRIT) zugrunde gelegt werden. Immer wenn eine Iteration für beide Größen F und U feststellt, dass das Ungleichgewicht geringer als das Kriterium ist, wird diese Iteration als konvergiert festgestellt. Solange dies nicht der Fall ist, wird eine weitere Iteration gestartet.

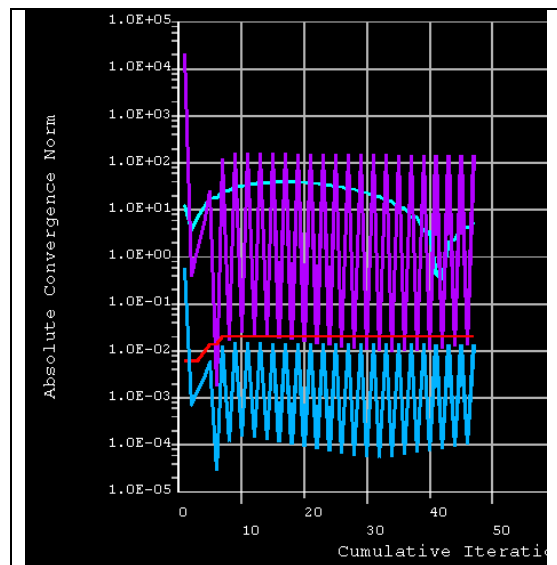


Abb.2 Lösungs-Verlauf, Monitor

Die Kunst des Programmherstellers ist es zu erreichen, dass das Programm automatisch die Annahmen für die neue Iteration so einstellt, dass die Ergebnisse dichter an das Ziel herankommen (und so das Ungleichgewicht geringer wird). Und dass dies möglichst effektiv in Hinsicht auf die benötigte Rechenzeit erfolgt. Im ANSYS-Programm sind die zugehörigen Einstellungen so praxisgerecht wie möglich vorgesehen. Trotzdem bestehen viele Einwirkungsmöglichkeiten des Anwenders. Wenn in der Ingenieurs-Praxis ein nichtlineares Problem zu berechnen ist, sollten in Versuchsmodellen diese Einstellungen zunächst getestet werden. Dabei sollten die nichtlinearen Effekte in ihrem prinzipiellen Verhalten im Modell enthalten sein, die Modellgröße sollte aber so gering wie möglich sein. Im günstigsten Fall wird ein Modell mit einem einzigen Element aufgebaut, so dass selbst 1000 Iterationen in wenigen Sekunden abgearbeitet sind. Mit solchen Modellen können natürlich viele Varianten geprüft und verglichen werden, so dass der „ernste“ Rechenlauf gleich bei der ersten Anwendung effektiv, schnell und zielgerichtet abgeschlossen werden kann.

## 5 Das Postprocessing

Für die Darstellung der Ergebnisse wird der Time-History-Postprocessor POST26 verwendet. Wenn auch hier die Berechnung keine Abhängigkeit von der Zeit enthielt, liegt doch durch den Berechnungsablauf als Folge von Substeps eine vergleichbare Datenmenge vor. So wie bei einer Zeitverlaufberechnung der Verlauf einzelner Ergebnisgrößen über der Folge von Zeitschritten ausgewertet wird, möchten wir den Verlauf einzelner Ergebnisgrößen über der Folge der Substeps auswerten.

Der Aufruf des Time History Postprocessors erfolgt mit  
**/POST26**

Mit dem folgenden Kommando wird die Nummer desjenigen Knotens abgefragt, der am Keypoint 3 (Ecke oben links) angeordnet wurde. Auf diese Weise kann bei der

Eingabe mit Kommandos der interaktive Blick auf das Grafikfenster und das Ablesen der Nummer automatisiert werden

**NN=NODE(141/2+0.5822,8.15,0)**

Bei dem entsprechenden Menüschritt ist das Ablesen der Nummer erforderlich

**/PNUM,NODE,1**

**NPLOT**

und die Nummer des Knotens oben links ablesen (bei dieser Vernetzung ist dies der Knoten 5).

Die Verschiebung dieses Knotens in y-Richtung wird als eine der von uns auszuwertenden Ergebnisgrößen festgelegt. (Für die Kommando-Eingabe kann die Variable mit der Bezeichnung NN verwendet werden. Dieser Variablen wurde direkt vorher die Nummer des gewünschten Knotens zugewiesen. Für die Menü-Eingabe muss die Nummer des gewünschten Knotens aus dem Plotbild eingesetzt werden.)

**NSOL,2,NN,U,Y**

Durch diese Operation wurde die Folge derjenigen Zahlenwerte aus den Ergebnissen herausgesucht, die die y-Verschiebung des gewünschten Knotens aus jedem gerechneten Zwischenschritt (substep) darstellen. Diese Wertefolge (table) kann anschließend unter ihrer Referenznummer 2 weiterverwendet werden.

Als Wertefolge (table) 1 werden automatisch die Zeitwerte jedes Substeps eingetragen. Wenn (wie in unserer Berechnung) die Zeit nicht direkt als Problemzeit vorgegeben war, wird automatisch das Ende des ersten Lastschrittes mit der Zeit  $t = 1$  versehen. Dementsprechend hat jeder Substep einen Zeitwert zwischen  $t = 0$  (Beginn der Berechnung) und  $t = 1$  (letzter Substep). In diesem Fall kann am Zeitwert der Berechnungsfortgang (time, von 0 bis 1 zunehmend) abgelesen werden.

Die Reaktionskraft in y-Richtung wird als zweite der von uns auszuwertenden Ergebnisgrößen für die Wertefolge (table) mit der Referenznummer 3 festgelegt mit

**RFOR,3,NN,F,Y**

Es soll ein Diagramm erstellt werden, in dem horizontal die y-Verschiebung und vertikal die y-Kraft aufgetragen werden. Beide Größen sind jedoch - von Null ausgehend - negativ. Daher wird für alle Einträge beider Tabellen 2 und 3 das Vorzeichen umgedreht. Diese arithmetische Operation wird hier auf verschiedene Weise durchgeführt, um die Möglichkeiten der Postprocessing-Operationen aufzuzeigen.

Die Werte der Tabelle 2 (y-Verschiebung) werden jeweils mit dem Absolutwert überschrieben. Dadurch werden alle bisher negativen Werte positiv. Natürlich ist diese Operation nur dann eine Vorzeichen-Invertierung, wenn alle Zahlenwerte vorher negativ waren. Dies ist hier der Fall, daher kann diese Operation hier vorgestellt werden.

**ABS,2,2**

Die Werte der Tabelle 3 (y-Reaktionskraft) werden in einer Additions-Operation verwendet. Bei dieser Operation können mehrere Tabellen additiv überlagert werden, wobei vorher jeweils mit einem Faktor multipliziert wird. Die Operation kann beschrieben werden als

$$IR = IA * FACTA + IB * FACTB + IC * FACTC$$

IR	Referenznummer der resultierenden Tabelle
IA	Referenznummer der ersten zu summierenden Tabelle
FACTA	Faktor für die Werte von Tabelle IA
IB	Referenznummer der zweiten zu summierenden Tabelle
FACTB	Faktor für die Werte von Tabelle IB
IC	Referenznummer der dritten zu summierenden Tabelle
FACTC	Faktor für die Werte von Tabelle IC

Im vorliegenden Fall wird Tabelle 3 mit dem Faktor FACTA = -1 multipliziert und keine weiteren Werte hinzuaddiert. Das Ergebnis wird wieder in Tabelle 3 eingetragen

**ADD,3,3, , , , , -1**

Zur grafischen Darstellung wird festgelegt, dass Tabelle 2 entlang der horizontalen Achse des Diagrammes aufzutragen ist.

**XVAR,2**

In Vertikalrichtung sollen die Zahlenwerte von Tabelle 3 aufgetragen werden.

**PLVAR,3**

Das Diagramm wird zusätzlich noch mit einer Achsenbeschriftung und einem bestimmten Wertebereich auf den Achsen festgelegt mit

**/GRID,1**

**/AXLA,X,Durchbiegung Innenrand (mm)**

**/AXLA,Y,Kraft F (N)**

**/XRAN,0,12**

**/YRAN,-1000,6000**

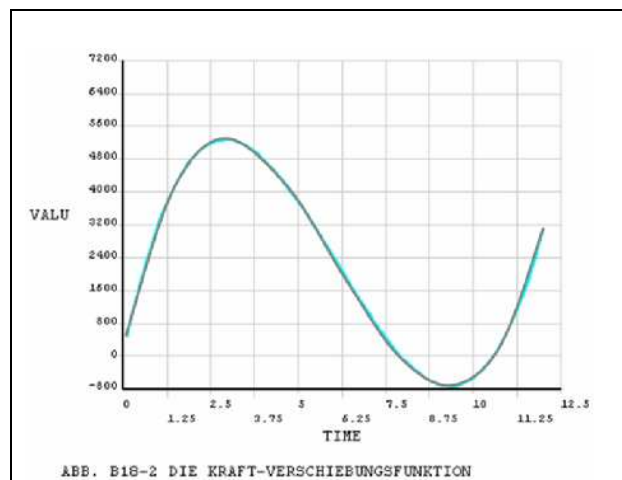


Abb.3 Kraft-Weg-Diagramm

Mit diesen Spezifikationen wird das Diagramm wiederholt.

**PLVAR,3**

Die Berechnung ist damit abgeschlossen, die ANSYS-Programmanwendung kann abgeschlossen werden mit

**FINISH**

**/EXIT**

## 6 Varianten zum Selbststudium

Zum Studium der ANSYS-Parametersprache (APDL - ANSYS parametric design language) kann die analytische Lösung programmiert werden und mit der FEM-Lösung verglichen werden. Die Formeln der analytischen Lösung entsprechend DIN 2092 sind hier dargestellt (aus "Tellerfeder", Technische Datensammlung, Christian Bauer GmbH&Co, Welzheim).

1. Kennwerte

$$d = \frac{D_e}{D_i}$$

$$h_0 = l_0 - t$$



$$K_1 = \frac{1}{p} \cdot \frac{\left(\frac{d-1}{d}\right)^2}{\frac{d+1}{d-1} - \frac{2}{\ln d}}$$

$$K_2 = \frac{6}{p} \cdot \frac{\frac{d-1}{\ln d} - 1}{\ln d}$$

$$K_3 = \frac{3}{p} \cdot \frac{d-1}{\ln d}$$

Für Tellerfedern ohne Auflagefläche gilt

$$K_4 = 1$$

## 2. Federkraft

$$F = \frac{4E}{1-m^2} \cdot \frac{t^4}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4^2 \cdot \frac{s}{t} \cdot \left[ K_4^2 \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{t} \right) \cdot \left( \frac{h_0}{t} - \frac{s}{2t} \right) + 1 \right]$$

$$F_C = F(s=h_0) = \frac{4E}{1-m^2} \cdot \frac{t^3 \cdot h_0}{K_1 \cdot D_e^2} \cdot K_4^2$$

## 3. Bezeichnungen

μ ....	Querkontraktionszahl (= ν)
s ....	Federweg der Einzeltellerfeder
h <sub>0</sub> ....	rechnerische Hilfsgröße: h <sub>0</sub> = l <sub>0</sub> - t (für Tellerfeder ohne Auflagefläche)
F ....	Kraft der Einzeltellerfeder
F <sub>C</sub> ....	rechnerische Kraft der Einzeltellerfeder in Planlage

Die Formeln lassen es zu, den Zusammenhang zwischen der y-Verschiebung und der y-Kraft für jeden Lastpunkt zu berechnen. In den folgenden Eingabe-Kommandos werden diese Formeln einprogrammiert. In der APDL werden dabei arithmetische Operationen ausgeführt. Es werden sowohl skalare Variablen verwendet als auch Feldvariablen (indizierte Variablen, vector, array) dimensioniert und verwendet. Diese Eingabe sollte immer als Kommandofolge in einem Editor des Rechner-Betriebssystems geschrieben und durch ein Lese-Kommando (Kommando **/inp**, Menü-Aufruf **Utility Menu> File> Read Input From**) im ANSYS-Programm ausgeführt werden. Nur in den seltensten Fällen ist hierfür die direkte Eingabe (**Utility Menu> Parameters**) sinnvoll.

Hier wird empfohlen, die folgenden Zeilen im Editor zu schreiben und zum Beispiel als Datei "ANALY.EIN" abzuspeichern.

```

/TITLE, TELLERFEDER
EX=2.06E5           ! Parameter definieren, zur Darstellung
NU=0.3             ! der analytischen Lösung
DE=198
DI=141
T=2
L0=8.15
    
```

```

PI=3.14159
DELT=DE/DI
H0=L0-T
T1=((DELT-1)/DELT)**2
T2=(DELT+1)/(DELT-1)
T3=2/LOG(DELT)
K1=T1/(PI*(T2-T3))
C12=(4*EX)/(1-NU**2)*(T**4/(K1*DE**2))
*DIM,S,TABLE,100
*DIM,F,TABLE,100
*VFILL,S(1,0),RAMP,1,1
*VFILL,S(1),RAMP,.12,.12
*VFILL,F(1,0),RAMP,1,1
*DO,I,1,100,1
D1=S(I)/T
D2=(H0/T-S(I)/T)*(H0/T-S(I)/(2*T))+1
F(I)=C12*D1*D2
*ENDDO
U=12
A=4 ! Keypoint Koordinaten (x,y)
B=-4*L0
C=L0**2-4*T**2+(DE/2-DI/2)**2 ! FX = AX4 + BX3 + CX2 + DX + E
D=2*L0*T**3
E=T**4-(DE/2-DI/2)**2*(T**2) ! Newton Verfahren
XI=T
*DO,I,1,10,1
FX=A*XI**4+B*XI**3 ! FXP = ¶FX/¶X
FX=FX+C*XI**2+D*XI+E
FXP=4*A*XI**3+3*B*XI**2 ! X(i+1) = X(i) - FX/FXP
FXP=FXP+2*C*XI+D
X=XI-FX/FXP
XX=ABS(X-XI)
XI=X
*ENDDO
Y=SQRT(T**2-X**2)

```

Wenn diese Datei vorhanden ist, kann im Postprocessing nach dem Erstellen des Diagramms der y-Kraft, aufgetragen über der y-Verschiebung, die analytische Lösung zum Vergleich aufgetragen werden.

Die analytische Lösung wird ausgeführt mit  
**/INP,ANALY,EIN**

Das vorhandene Diagramm soll im Grafikfenster erhalten bleiben, wenn die neue Kurve darüber gezeichnet wird  
**/NOER**

Die Array-Zahlenwerte werden als Diagramm gezeichnet  
**\*VPLO,S(1),F(1)**