

Modellierung und Simulation von Mehrkörpersystemen mit ANSYS

Yevgeniy Chumachenko, Dmitry Vlasenko, Roland Kasper

Institut für Mobile Systeme (IMS), Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Universitätsplatz 2, D-39106 Magdeburg, Deutschland

E-Mail: Yevgeniy.Chumachenko@ovgu.de, Dmitri.Vlasenko@ovgu.de, Roland.Kasper@ovgu.de,

Webseite: <http://www.ims.ovgu.de/>

Im Rahmen dieses Artikels wurde die Definition des Gelenks untersucht, die in der ANSYS-Software für die Modellierung der Dynamik von Mehrkörpersystemen verwendet wird. Es wurden ein ANSYS-Drehgelenk-Modell eines flexiblen Pendels und ein Kontakt-Modell eines flexiblen Pendels entwickelt, die die Zusammenhänge zwischen dem Pendel und dem Zylinder beschreiben. Die Spannungen und die Deformationen in den Modellen wurden verglichen. Außerdem wurde auch eine theoretische Berechnung der Flächenpressung mit Hilfe der Hertz'schen Formel durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Berechnung wurden mit den Ergebnissen verglichen, die mit Hilfe der ANSYS-Software gewonnen wurden.

Einleitung

Heutzutage ist die Entwicklung von Software-Produkten für die Simulation der Dynamik von Mehrkörpersystemen, die auch flexible Körper beinhalten, von großer Bedeutung. Die Modellierung der im Rahmen dieses Artikels betrachteten Modelle wurde mit Hilfe von ANSYS Workbench 11.0 durchgeführt. Ab der Version 11.0 wurde in ANSYS WB die Möglichkeit realisiert, Mehrkörpersysteme mit flexiblen Körpern zu modellieren und deren Dynamik zu untersuchen. Dabei können verschiedene Typen von Gelenken modelliert werden: Drehgelenke, zylindrische Gelenke, universelle Gelenke, sphärische Gelenke usw.

Betrachten wir das ANSYS-Drehgelenk (Revolute Joint), das in unserem Modell eingesetzt wurde. Dieser Gelenktyp hat nur einen Freiheitsgrad: Er kann nur Drehungen um die Z-Achse ausüben (s. Abb. 1).

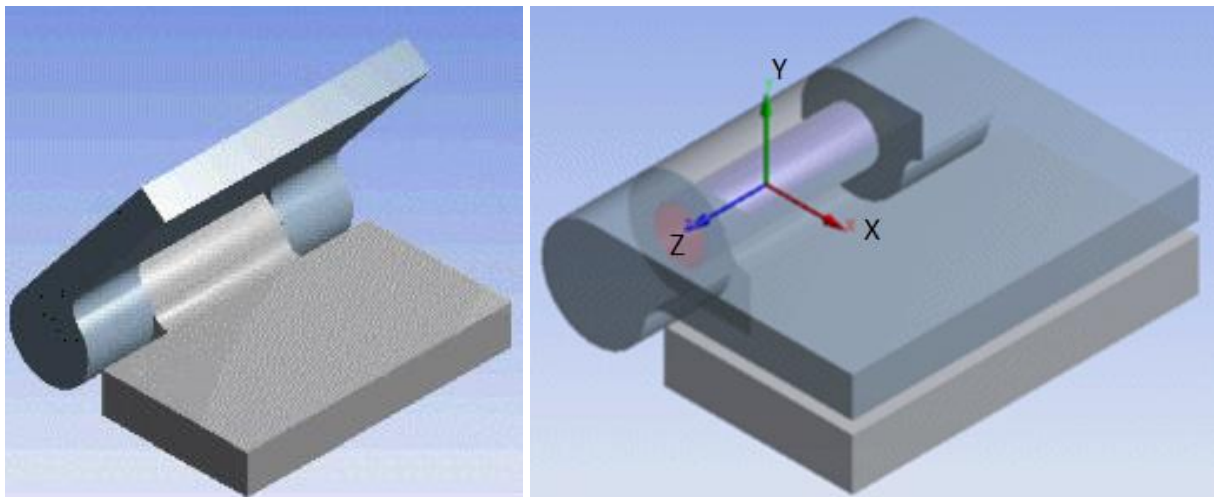


Abb. 1: Beispiel eines Drehgelenks. Fixierte Freiheitsgrade: UX, UY, UZ, ROTX, ROTY

ANSYS bietet mehrere Elemente zur Modellierung eines Drehgelenks (MPC184, COMBIN7), die sich durch ihre Bestimmung, Anzahl der Knoten usw. unterscheiden. Das am meisten benutzte Element ist MPC184-Revolute (MPC= Multipoint Constraint Element). Ein solches Element besteht aus zwei "führenden Knoten" (pilot nodes). Dabei werden die kinematischen Bedingungen so festgelegt, dass die führenden Knoten *I* und *J* immer die gleichen Verschiebungen ausüben, da sie immer die gleichen Koordinaten besitzen (s. Abb. 2). [1]

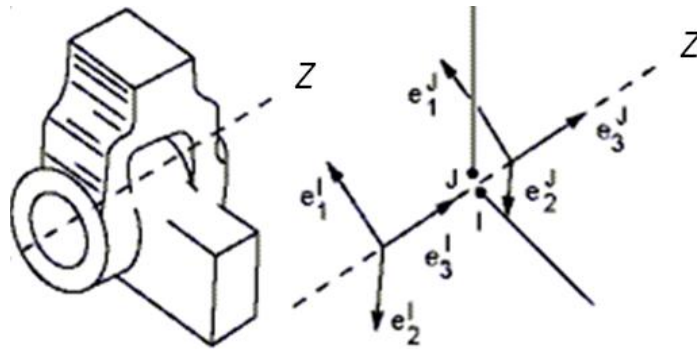


Abb. 2: Geometrie des Drehgelenks MPC184

Das MPC184-Element verbindet die beiden Kontaktkörper miteinander. Es gibt mehrere Typen der Verbindung: Knoten-zu-Knoten, Knoten-zu-Oberfläche, Oberfläche-zu-Oberfläche, Linie-zu-Linie, Linie-zu-Oberfläche. [1]

Bei dem Typ der Verbindung "Knoten-zu-Oberfläche" sind die führenden Knoten einerseits miteinander verbunden, andererseits jeweils mit einer Kontaktoberfläche beziehungsweise mit Kontaktelementen, die diese Oberfläche bilden (s. Abb. 3). Die führenden Knoten werden auf der Z-Achse des Gelenks erzeugt. Zwischen den führenden Knoten und den Kontaktelementen werden die Befestigungsgleichungen des Drehgelenks aufgebaut und somit die Zusammenhänge zwischen den führenden Knoten und Kontaktelementen definiert (s. Abb. 4).

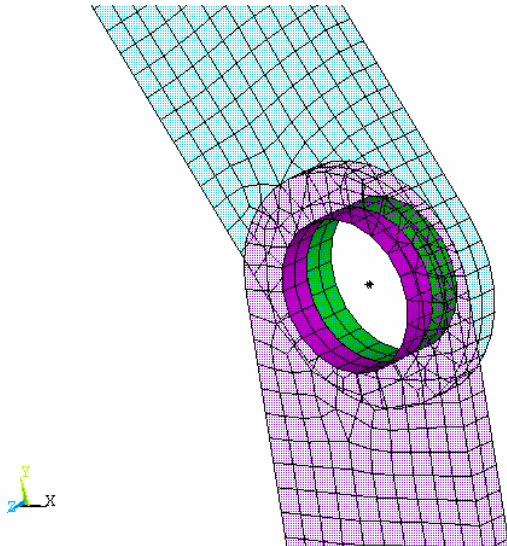


Abb. 3: Kontaktelemente des Drehgelenks (Knoten-zu-Oberfläche-Verbindung)

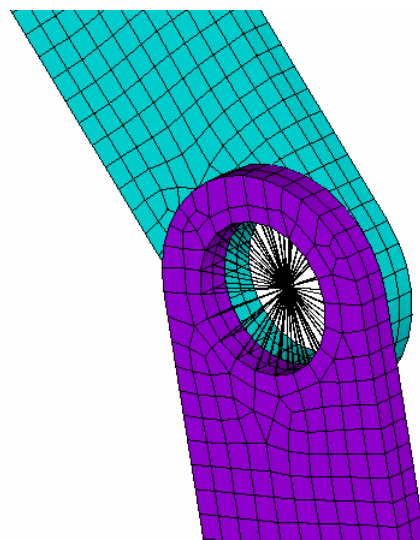


Abb. 4: Zusammenhänge zwischen den führenden Knoten und den Kontaktelementen

Die Kontaktelemente werden auf den entsprechenden Kontaktoberflächen generiert und sind für die Ermittlung von den im Gelenk entstehenden Kräften, Momenten, Spannungen usw. zuständig. Die Kontaktelemente unterscheiden sich in zwei Gruppen: Kontaktelemente der Zieloberfläche (z.B. TARGE169, TARGE170) und Kontaktelemente der Kontaktoberfläche (z.B. CONTA173, CONTA174 usw.). [1]

Modellierung der Dynamik des einfachen Pendels mit ANSYS

Das Pendel-Modell stellt einen Balken dar, der auf einem Zylinder (Stift) angebracht ist. Da der Durchmesser von dem Zylinder 0.1 mm kleiner ist als der von der Öffnung im Balken, existiert zwischen dem Balken und dem Zylinder ein Spalt. Der Zylinder ist an beiden Enden (Stirnseite) fest im Raum fixiert. Beide Körper sind als flexible Körper definiert und das Material der beiden Körper ist Stahl. Die Reibung zwischen den Kontaktkörpern sowie der Luftwiderstand werden vernachlässigt. Auf das Modell wirkt nur die Schwerkraft entlang der Y-Achse. Die Geometrie des Pendels ist auf der Abb. 5 dargestellt.

Der Typ der Verbindung der Kontaktkörper war in unserem Fall "Oberfläche-zu-Oberfläche". Dementsprechend wurden als Kontaktelemente der Zieloberfläche die TARGE170-Elemente benutzt und als Kontaktelemente der Kontaktoberfläche die CONTA174-Elemente. Insgesamt wurden in dem Modell 9354 Knoten und 5637 Elementen verwendet.

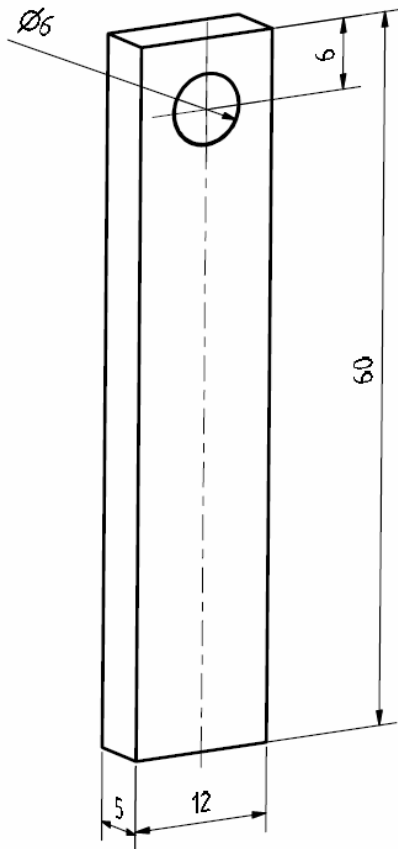


Abb. 5: Geometrie des Pendels

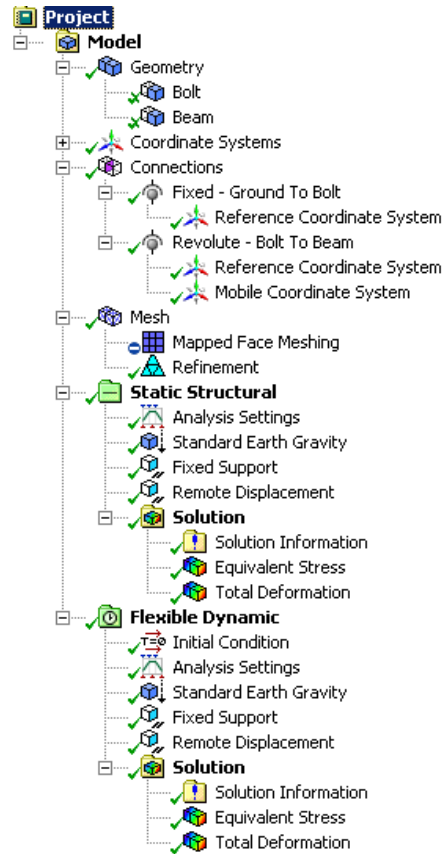


Abb. 6: Struktur des Pendel-Modells mit dem eingebautem ANSYS-Drehgelenk

Für eine genauere Modellierung von flexiblen Körpern in ANSYS kann man die Kontaktoberfläche als verformbare Oberfläche definieren. Diese Option wurde ebenso in unserem Modell eingesetzt.

Die Struktur des Modells des Pendels zeigt sich in der Abb. 6. Es wurden zwei Typen der Berechnung durchgeführt: eine statische Analyse (static structural) und eine transient-mechanische Analyse (flexible dynamics).

Wir untersuchten das Modell in verschiedenen Fällen der Lastanbringung untersucht. Im erstem Fall wirkte die Schwerkraft zur Anfangszeit quer zum Balken (s. Abb. 7). Somit wurde das Gelenk auf Drehung getestet. Das Pendel führte eine volle Schwingung aus.

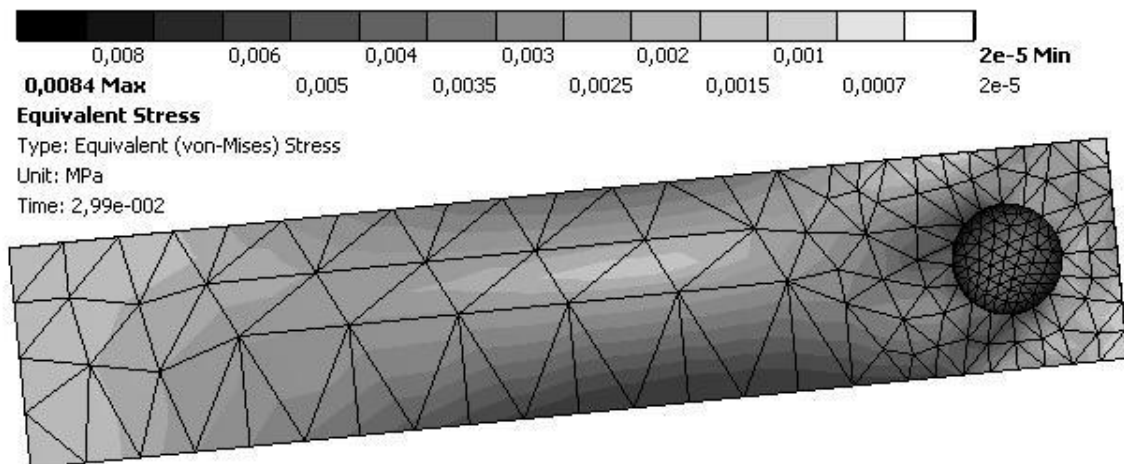


Abb. 7: ANSYS-Drehgelenk-Modell (dynamische Analyse)

Es wurden Abhängigkeiten der maximalen Spannungen und der maximalen Verschiebungen von der Zeit gewonnen (s. Abb. 8, 9).

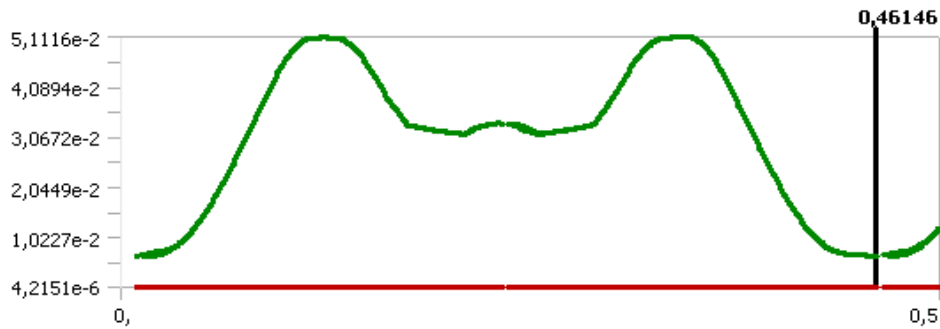


Abb. 8: Abhängigkeit der maximalen Spannungen von der Zeit für eine volle Schwingungsperiode

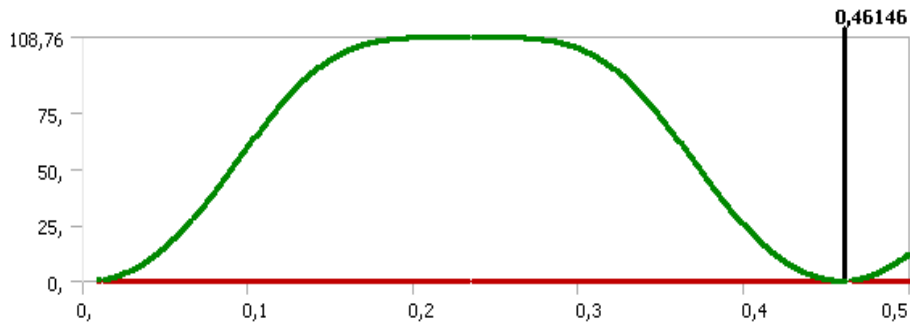


Abb. 9: Abhängigkeit der maximalen Verschiebungen von der Zeit für eine volle Schwingungsperiode

Im zweitem Fall der Lastanbringung wirkte die Schwerkraft zur Anfangszeit entlang des Balkens (s. Abb.10). Somit wurde das Gelenk auf Zug getestet.

Aber schon bei den Ergebnissen der ersten Simulationen konnte man einige Ungenauigkeiten und Differenzen in den Berechnungen der Spannungen im Gelenk bemerken. Es waren Ungenauigkeiten in der Größe der Spannungen sowie deren Verteilung. Deshalb musste das ANSYS-Drehgelenk (Revolute-Joint) genauer erforscht werden.

Kontaktmodell

Um die Ergebnisse der Simulationen zu überprüfen, wurde ein Kontakt-Modell des Pendels geschaffen.

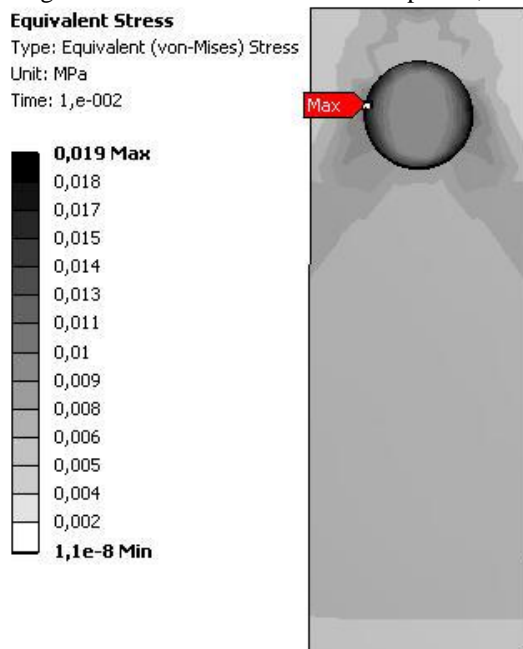


Abb. 10: Spannungen im ANSYS-Drehgelenk-Modell (statische Analyse)

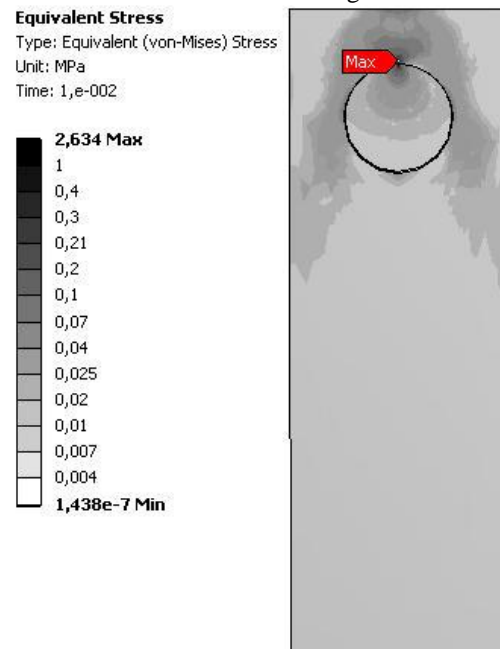


Abb. 11: Spannungen im Kontaktmodell (statische Analyse)

Dabei wurde Geometrie des Pendel-Modells ohne Veränderungen übernommen. In diesem Modell wurde kein Gelenk definiert, sondern der Kontakt zwischen den Körpern. Die Bewegungen des Balkens entlang der Z-Achse sowie entlang der X-Achse wurden durch "remote displacement" ausgeschlossen.

Die maximalen Werte der Spannungen wurden im Kontaktbereich vermutet und deswegen wurde die Vernetzung im Kontaktbereich extra verfeinert. Die minimale Breite eines Kontaktelements im Kontaktbereich betrug 0.015 mm. Das Kontaktmodell bestand aus insgesamt 40319 Knoten und 8600 Elementen.

So entstanden zwei Mehrkörpermodelle, mit deren Hilfe man die Spannungen im Gelenk vergleichen konnte (s. Abb. 10, 11). Wie man sieht, sind die Werte der ermittelten maximalen Spannungen in dem ANSYS-Drehgelenk-Modell deutlich kleiner. Auch die Spannungsverteilung weist starke Unterschiede auf. Die Erklärung dafür vermuten wir in der fehlerhaften Definition des ANSYS-Drehgelenks, das mit Hilfe des MPC184 Elementen aufgebaut wird.

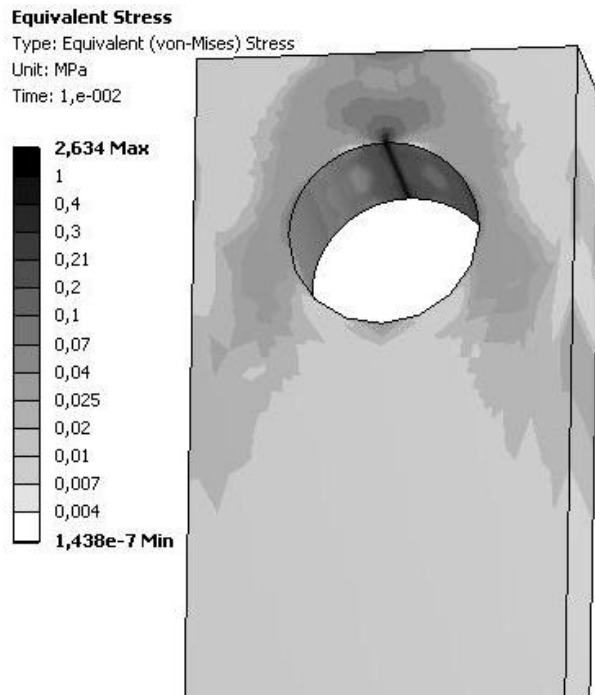


Abb. 12: Spannungsverteilung im Balken

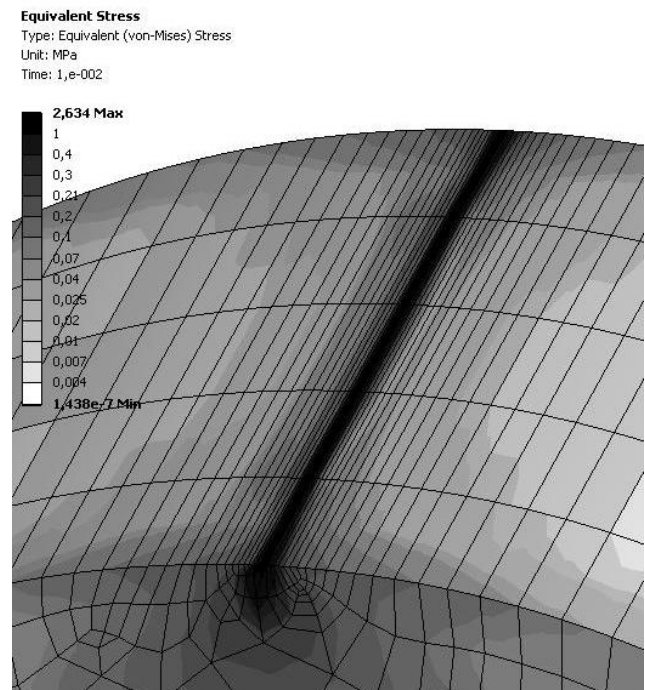


Abb. 13: Spannungsverteilung und Vernetzung im Zylinder

Die Verteilung der Spannungen im Balken und im Zylinder in dem Kontaktmodell kann man auf den Abb. 12 und 13 sehen. Die ermittelte Breite der dabei entstandenen Kontaktfläche betrug 0.027 mm.

Hertz'sche Pressung

Um die Ergebnisse der Simulationen des Kontaktmodells zu überprüfen, wurde das Kontaktmodell des Pendels als Modell der Hertz'schen Pressung berechnet.

Für unser Modell gelten folgende Eingangswerte:

Tabelle 1: Eingangswerte für das Modell der Hertz'schen Pressung

$m = 0.02808 \text{ kg}$	Masse des Balkens
$r_1 = 0.003 \text{ m}$	Radius der Öffnung im Balken
$r_2 = 0.00295 \text{ m}$	Radius des Zylinders
$E = 210 \cdot 10^9 \text{ Pa}$	Elastizitätsmodul
$l = 0.005 \text{ m}$	Zylinderlänge
$g = 9.81 \text{ m/s}^2$	Erdbeschleunigung
$\nu = 0.3$	Querkontraktionszahl

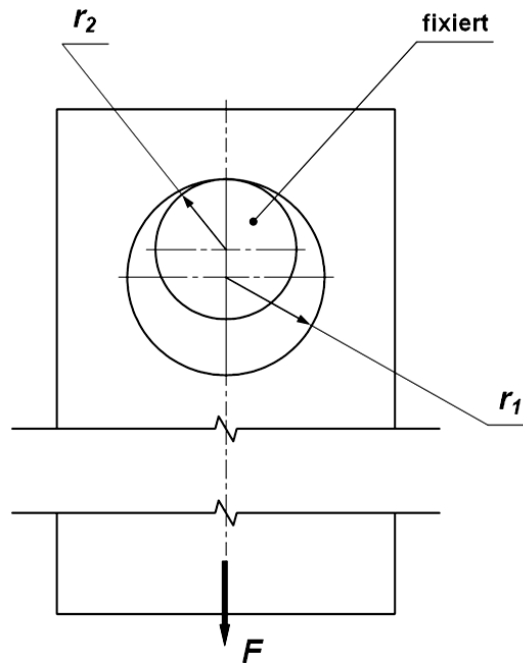


Abb. 14: Kontakt-Modell der Hertz'schen Pressung

Betrachten wir das oben erwähnte Modell des Pendels als Kontaktmodell der Hertz'schen Pressung zwischen zwei Körpern mit zylindrischen Kontaktflächen (s. Abb. 14). Die Projektion der Druckfläche ist ein Rechteck von der Breite a und der Zylinderlänge l . Die Druckspannungen verteilen sich halbkreisförmig über die Breite $2a$.

Für den allgemeinen Fall eines Kontakts zwischen zwei Zylindern laut Hertz gilt [4]:

Druckspannungen:

$$\max \sigma_z = \sigma_0 = \sqrt{\frac{FE}{2\pi r l (1 - \nu^2)}} \quad (1)$$

Halbe Breite des Kontaktes:

$$a = \sqrt{\frac{8Fr(1 - \nu^2)}{\pi E l}} \quad (2)$$

Da der Kontakt an der Innenseite eines Zylinders stattfindet, gilt [5]:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \quad (3)$$

In unserem Fall gleicht die Kraft F der Schwerkraft:

$$F = mg, \quad (4)$$

wobei m - die Masse des Balkens und g - die Erdbeschleunigung ist.

Wenn wir (3) und (4) in (1) und (2) einstellen, bekommen wir:

$$\max \sigma_z = \sigma_0 = \sqrt{\frac{mgE(r_2 - r_1)}{2\pi r_1 r_2 l (1 - \nu^2)}} \quad (5)$$

$$a = \sqrt{\frac{8mgr_1 r_2 (1 - \nu^2)}{\pi E l (r_2 - r_1)}} \quad (6)$$

Das Einsetzen der Eingangswerte aus der Tabelle 1 in die Gleichungen (5), (6) ergibt dann:

$$\max \sigma_z = \sigma_0 \approx 3,4 \cdot 10^6 \text{ Pa} = 3,4 \text{ MPa:}$$

$$a \approx 1,036 \cdot 10^{-5} \text{ m} \approx 0,01 \text{ mm}$$

Dann beträgt die berechnete Breite der Kontaktfläche:

$$2a \approx 0,02 \text{ mm}$$

Zusammenfassung:

Von den drei Modellen lieferte das ANSYS-Kontakt-Modell die realitätsgetreuesten Ergebnisse. Sowohl die Größe der Spannungen als auch deren Verteilung waren sehr überzeugend. Bei der Erhöhung der Genauigkeit des Kontaktmodells durch die Verfeinerung der Vernetzung im Kontaktbereich stieg der rechnerische Aufwand erheblich. Die Ergebnisse tendierten dabei zur Ähnlichkeit mit den Ergebnissen des Modells der Hertz'schen Pressung.

Das ANSYS-Drehgelenk-Modell zeigte wie schnell und einfach man Mehrkörpersimulationen mit ANSYS WB anfertigen kann, wies aber eine unrealistische Spannungsverteilung in der Simulation sowie zu kleine berechneten Spannungswerte auf. Die Erklärung dafür vermuten wir in der fehlerhaften Definition des ANSYS-Drehgelenks, das mit Hilfe des MPC184 Elementen aufgebaut wird.

Literatur

- [1] ANSYS® Academic Teaching. Release 11.0. Help System.
- [2] Geradin, M., Cardona, A. (2001): Flexible Multibody Dynamics: A Finite Element Approach. Wiley. Chichester.
- [3] Flores, P., Ambrósio, J., Claro, J. C. P. und Lankarani, H. M.: Dynamic behaviour of planar rigid multi-body systems including revolute joints with clearance. In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part K: Journal of multibody dynamics. Bd. 221. 2. 2007. S. 161-174.
- [4] Dubbel, H. (2001): Taschenbuch für den Maschinenbau. 21. Aufl. Springer. Berlin.
- [5] Birger, I. A. (1993): Raschet na prochnost detalej mashyn. Spravochnik. 4. Aufl. Mashynostrojenije. Moskau.