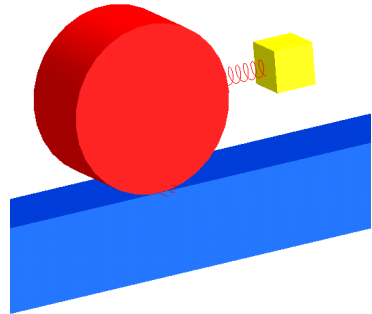


Vergleich von Stick-Slip-Modellen in Simpack

Mänz, T.; Nagler, N.



Der Großteil der in Mehrkörpersimulationsprogrammen implementierten Reibmodelle basiert auf der Coulomb'schen Reibung. Diese wird jedoch oftmals nur bei genügend großen Relativgeschwindigkeiten, d.h. im Gleitreibungszustand, richtig abgebildet, da die Reibkräfte im Haftzustand nicht eindeutig sind. Ein am Institut für Maschinenwesen (IMW) entwickeltes Stick-Slip-Modell, das den Haftzustand korrekt abbildet, wird in diesem Artikel mit zwei in dem Mehrkörpersimulationsprogramm Simpack implementierten Reibmodellen verglichen.

Most of the friction models implemented in Multibody Simulation Software base on coulombic friction. However, often these models are only valid in case of sufficient amounts of relative velocities, as friction force in static friction is not unique. The Institute of Mechanical Engineering (IMW) developed a stick-slip-model that calculates the stick friction force correctly. It will be compared with two friction models implemented in the Multibody Software Simpack.

1 Motivation für die Entwicklung eines eigenen Stick-Slip-Modells

Ein bedeutender Bereich in der Analyse von dynamischen Systemen, die mit Hilfe der Mehrkörpersimulation durchgeführt werden kann, stellt die Kontaktberechnung dar. Neben den Kontaktnormalkräften beeinflussen Reibkräfte die Charakteristik eines Systems maßgeblich. Allerdings erfolgt die Ermittlung der Reibkräfte oft unter Zuhilfenahme beträchtlicher Einschränkungen. So werden häufig Nichtlinearitäten bei dem Wechsel des Reibzustandes vermieden, was zwar zu einer Verkürzung der Rechenzeit führt, wodurch die Reibkräfte insbesondere im Haftreibungsbereich jedoch nicht mehr korrekt abgebildet werden. Bei weiter entwickelten Modellen wiederum fehlen die Flexibilität in der Anwendung (z. B. Kombination mit Modulen zur Kraftberechnung) und eine detaillierte Dokumentation der theoretischen Grundlagen, die eine Interpretation erst ermöglicht.

2 Vorstellung verschiedener Reibmodelle

Der Großteil der Reibmodelle, die in Mehrkörpersimulationsprogrammen implementiert sind, basiert auf dem Reibgesetz für trockene Festkörperreibung nach Coulomb. Bei der Berechnung wird zwischen den Zuständen „Haften“ und „Gleiten“ unterschieden. Während die Gleitreibungskraft F_{gleit} aus der Normalkraft F_N und dem Gleitreibungskoeffizienten μ_{gleit} eindeutig bestimmt werden kann (2), ist im Haftzustand nur die Berechnung der maximalen Haftreibungskraft F_{haft} aus dem Haftreibungskoeffizienten μ_{haft} und der Normalkraft möglich (1). Die genaue Haftreibungskraft hängt von den angreifenden Kräften ab, die in einer Mehrkörpersimulation nicht immer bekannt sind.

$$F_{\text{haft}} \leq \mu_{\text{haft}} \cdot F_N \quad (1)$$

$$F_{\text{gleit}} = \mu_{\text{gleit}} \cdot F_N \quad (2)$$

Weiterhin ist die Beschreibung nichtlinear, da die Reibungskraft bei einem Wechsel des Reibzustands sprunghaft ansteigen bzw. abfallen kann.

2.1 Coulomb'sches Reibmodell ohne Haftzustand (Simpack)

Diese Problematik umgeht das Reibmodell, das in Simpack's Kraftmodul „FE:222 Hertzian Contact“ verwendet wird /1/, indem die Reibkraft den Kraft-Geschwindigkeits-Zusammenhang nach **Bild 1** nutzt. Es wird deutlich, dass der Reibbeiwert im Gleitzustand maximal wird. Um Unstetigkeiten zu vermeiden sinkt er zwischen der Grenzgeschwindigkeit v_{switch} und der Geschwindigkeit 0 auf den Wert 0 ab. Daneben gibt es verschiedene nichtlineare Reibmodelle, denen gemein ist, dass kein Haftzustand existiert.

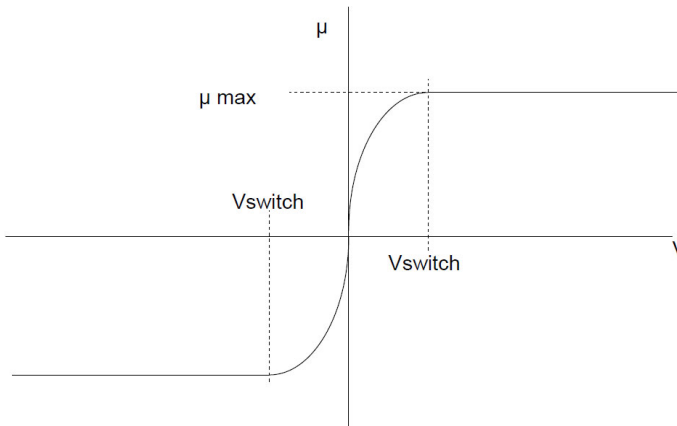


Bild 1: Reibgesetz des Kraftmoduls FE:222 in Simpack nach /1/

2.2 Coulomb'sches Reibmodell mit Haftzustand (Sim-pack)

Darüber hinaus bietet Simpack zahlreiche Stick-Slip-Modelle an, die verschiedene Anforderungen bezüglich der Reibrichtung (translatorisch, rotatorisch oder variabel), der Kontakt- und der Normalkraftberechnung stellen. Für den hier beschriebenen Vergleich wurde das Modul FE:195 genutzt, dessen Reibrichtung variabel ist und das ein Abheben des Kontaktes es erlaubt. Bei der Kraftberechnung wird zwischen drei Zuständen unterschieden, dem abgehobenen Kontakt, bei dem keine Kräfte übertragen werden, dem Gleitzustand und dem Haftzustand. Die Entscheidung, welcher Zustand vorliegt hängt vom Vorzeichen des Abstands der beiden Körper (abgehoben oder in Kontakt) und der Relativgeschwindigkeit ab. Ist die Relativgeschwindigkeit kleiner als eine vorzugebende Grenzggeschwindigkeit, tritt Haften ein, ansonsten befindet sich der Kontakt im Gleitzustand.

Die Normalkraft setzt sich aus einem linearen elastischen und einem linearen Dämpfungsanteil zusammen.

2.3 Coulomb'sches Reibmodell mit Haftzustand (IMW)

Das am IMW entwickelte Reibmodell eignet sich für die Berechnung der Kontaktkräfte von zwei- oder dreidimensionalen Körpern. Die möglichen Zustände entsprechen den in Kapitel 2.2 beschriebenen (kein Kontakt, Haften und Gleiten). Die Kriterien zur Entscheidung

über den vorliegenden Zustand sind ebenfalls ähnlich denen des in Reibmodell mit Haftzustand in Simpack, allerdings werden weitere Fälle unterschieden. So fließt neben der Relativgeschwindigkeit unter anderem auch die berechnete Reibkraft in die Entscheidung mit ein.

Weiterhin hat das Model den Vorteil einer flexiblen Einbindung der Normalkraftberechnung. So steht dem Anwender eine Vielzahl verschiedener Kraft-Durchdringungs-Gesetze zur Verfügung.

3 Beschreibung des Mehrkörpersystems zum Vergleich der Reibmodelle

Der Vergleich der Reibmodelle erfolgt an einem einfachen Modell, das im Titelbild dargestellt ist. Ein zylinderförmiger Körper, der sich nur translatorisch bewegen kann, ist über eine Feder mit einem weiteren Körper (würfelförmig, rechts im Bild) verbunden und steht auf einer Ebene. Der würfelförmige Körper hat eine geringe konstante Geschwindigkeit und zieht damit den Zylinder über die Ebene. Aufgrund des Stick-Slip-Effektes ist zu erwarten, dass sich die Feder zunächst verlängert, bis die Federkraft der maximalen Reibkraft entspricht. Dann beschleunigt der Zylinder plötzlich sehr schnell, da im Moment des Erreichens der maximalen Haftkraft der Reibzustand wechselt und die Kraft auf die geringere Gleitreibungskraft zurückgeht. Der Zylinder und der würfelförmige Körper nähern sich also an und die Feder verkürzt sich. Wird die Federkraft zu klein, wird der Zylinder durch die Gleitreibung abgebremst, bis die Geschwindigkeit auf 0 absinkt und der Reibzustand wieder in das Haften wechselt. Nun beginnt der Vorgang von neuem. Der Zylinder wechselt also ständig zwischen dem Stillstand, einer starken Beschleunigung, dem darauf folgendem Abbremsen und so weiter.

4 Ergebnisse

4.1 Verschiebung / Geschwindigkeit

Die Verschiebung bzw. die Geschwindigkeit des Zylinders ist, wie in Kapitel 3 beschrieben, eine charakteristische Größe, anhand der sich die Reibmodelle sehr gut vergleichen und auf Plausibilität überprüfen lassen. **Bild 2** zeigt die Verschiebung des Zylinders unter Benutzung der verschiedenen Reibmodelle sowie des würfelförmigen Körpers. **Bild 3** zeigt die entsprechenden Geschwindigkeiten. Es zeigt sich, dass die beiden Reibmodelle mit Berücksichtigung des Haftzustands nahezu identisch sind (IMW: O, FE:195 aus Simpack: X), während das

Reibmodell ohne Haftreibungszustand (Δ) wie erwartet keine Haftphase hat. Das $+$ bezeichnet die Verschiebung des würfelförmigen Körpers, der den Zylinder über die Feder zieht.

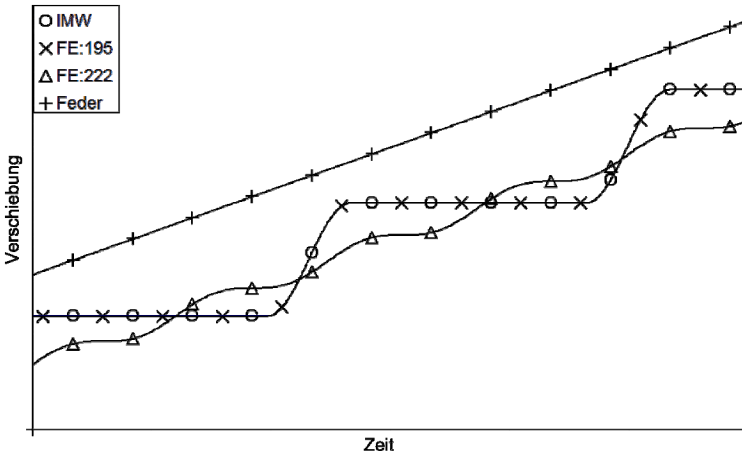


Bild 2: Vergleich der Reibmodelle anhand der Verschiebung des Zylinders

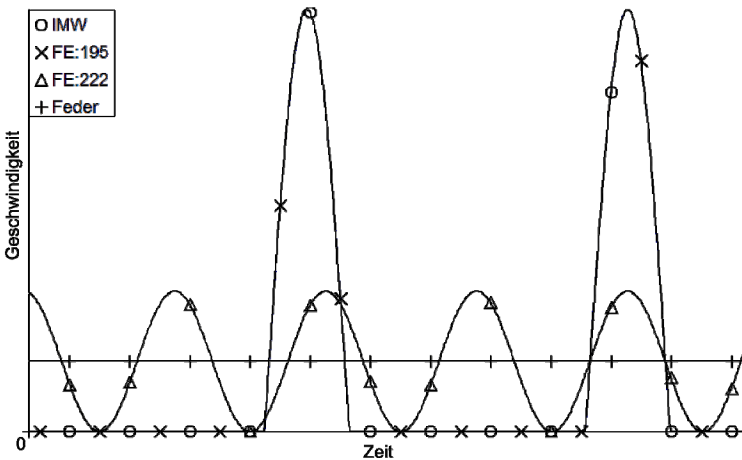


Bild 3: Vergleich der Reibmodelle anhand der Geschwindigkeit des Zylinders

Der Vergleich der Geschwindigkeiten (**Bild 3**) zeigt ebenfalls eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Reibmodellen mit Haftzustand.

Dabei werden die Haftphasen (Geschwindigkeit 0 m/s) sowie die Gleitphasen (starker Anstieg der Geschwindigkeit) sehr gut deutlich. Dagegen verhält sich die Geschwindigkeit bei dem Kraftelemente FE:222 sinusförmig, da die Reibkraft bei Geschwindigkeiten, die betragsmäßig größer als die Grenzgeschwindigkeit v_{switch} sind konstant ist und sich auch bei betragsmäßig kleineren Geschwindigkeiten nur langsam ändert. Dementsprechend ist der Einfluss der Federkraft für die Geschwindigkeit maßgeblich. Bei der Analyse von dynamischen Systemen kommt jedoch gerade den nichtlinearen Effekten oft eine besondere Bedeutung zu und kann nicht immer vernachlässigt werden.

5 Zusammenfassung

Die Problematik bei der Bestimmung der Gleitreibkräfte nach dem Coulomb'schen Reibgesetz mit Blick auf die Analyse dynamischer Systeme mit Hilfe der Mehrkörpersimulation wurde aufgezeigt. Zwei in Simpack implementierte Reibmodelle sowie ein am Institut für Maschinenwesen entwickeltes Modul zur Berechnung der Kontaktkräfte wurden beschrieben und an einem einfachen Mehrkörpersystem verglichen. Die Bedeutung und der Einfluss des Stick-Slip-Effektes auf die Simulationsergebnisse konnte gezeigt werden. Das am Institut für Maschinenwesen entwickelte Modell ergibt vergleichbare Ergebnisse zu dem in Simpack implementierten Stick-Slip-Modul FE:195. Jedoch ist die Verwendung flexibler gestaltet.

6 Literatur

/1/ Dokumentation zu SIMPACK 8900, INTEC GmbH, 2008