



Leseprobe

Günter Scheuermann

Simulationen mit Inventor

FEM und dynamische Simulation Grundlagen und Beispiele ab Version
2011

ISBN: 978-3-446-42365-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

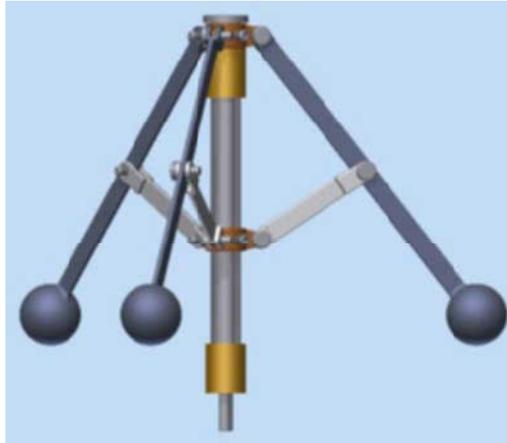
<http://www.hanser.de/978-3-446-42365-7>

sowie im Buchhandel.

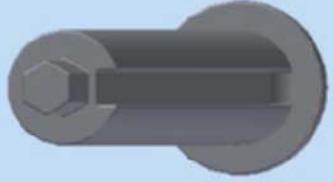
14 Fliehkraftregler

Im folgenden Kapitel soll ein Fliehkraftregler aufgebaut und simuliert werden.

Die Funktion und nicht die Form ist beispielhaft für viele derzeitige Fliehkraftregler, die meist klein und komplexer konstruiert sind. Das Funktionsprinzip ist jedoch in den meisten Fällen dasselbe, weswegen sich der gute alte Dampfmaschinenregler für die Demonstration besser eignet.



Die Baugruppe besteht aus den folgenden Bauteilen:

 	 	
<p>Welle Anzahl: 1 Stahl</p>	<p>Gleitbuchse mit Gew.stift Anzahl: 2 Bronze</p>	<p>Lagerbuchse Anzahl: 2 Messing</p>
		
<p>Gewichtsstange Anzahl: 3 Blei</p>	<p>Gelenkstange Anzahl: 3 Stahl</p>	<p>Bolzen 4 x 10 mm Anzahl: 9 Stahl</p>

14.1 Die Baugruppe

Der Zusammenbau ist schnell beschrieben und eigentlich problemlos zu bewerkstelligen. Da die Simulation und gegebenenfalls eine anschließende FE-Analyse mit den Bewegungslasten erfolgen soll, ist jedoch peinlich darauf zu achten, dass die 3D-Abhängigkeiten genauso vergeben werden, wie die einzelnen Funktionen dies verlangen.

Dieser Umstand ist vor allem deswegen so wichtig, weil die Simulationsumgebung gemäß der Inventor-Vorgabe alle 3D-Abhängigkeiten automatisch in Gelenke umwandelt und falsch vergebene Abhängigkeiten Fehlfunktionen zur Folge haben können.

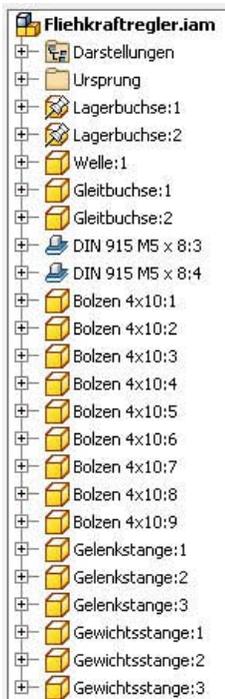
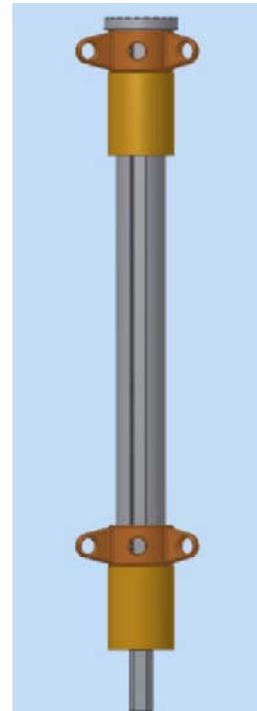
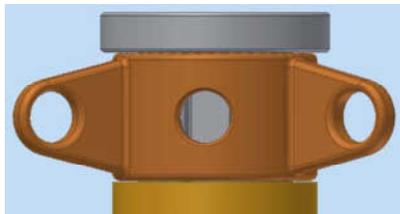
Im ersten Schritt werden die beiden Lagerbuchsen und die Welle platziert. Die beiden Lagerbuchsen und die Welle fluchten über ihre Mittelachsen.

Die untere runde Stirnfläche der Welle bildet mit der unteren Stirnfläche der unteren Lagerbuchse eine Ebene.

Zwischen der oberen Lagerbuchse und dem Wellenkopf wird eine Gleitbuchse mit ihrer Mittelachse fluchtend zur Welle eingebaut.

Die obere Stirnfläche dieser Gleitbuchse ist mit einem Abstand von **0,1 MM** passend an der unteren Kopffläche des Wellenkopfes ausgerichtet. Der kleine Abstand verhindert, dass die Simulationsumgebung eine Verbindung zwischen den beiden Flächen herstellt.

Die obere Lagerbuchse soll zur unteren einen lichten Abstand haben, der so groß ist, dass sich ebenfalls ein Spalt zwischen ihrer oberen Stirnfläche und der unteren Stirnfläche der oberen Gleitbuchse befindet. Beträgt der lichte Abstand zwischen den beiden Lagerbuchsen **99,8 MM**, dann entsteht oben ebenfalls ein Spalt von **0,1 MM**.



Im nächsten Schritt können die beiden Gewindestifte M5x8 eingefügt werden.

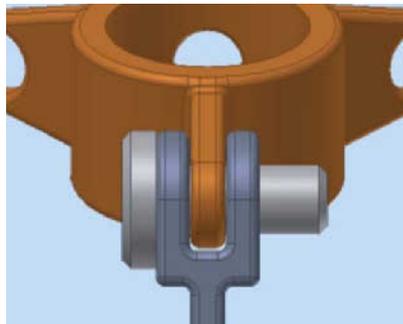
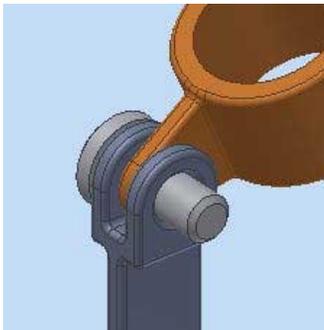
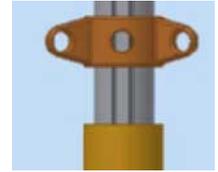
Diese Schrauben haben die Aufgabe, das Drehmoment von der Welle auf die beiden Gleitbuchsen zu übertragen. Dafür müssen die Zapfen in der Wellennut vertikal beweglich laufen. Insgesamt sind somit jeweils drei Abhängigkeiten zu vergeben:

- Mittelachse Gewindestift – Mittelachse Gewindebohrung: **PASSEND**
- Zapfenmantelfläche – Nutseitenfläche: **TANGENTIAL**
- Zapfenstirnfläche – Nutgrundfläche: **PASSEND** mit **0,1 mm** Abstand

Auf die Verbindungen der Gelenkstangen und der Gewichtsstangen mit den Gleitbuchsen durch die Bolzen ist besondere Sorgfalt aufzuwenden.

Da der Kraftfluss jeweils über die Bolzen von einem auf das andere Bauteil übertragen wird, sind die Abhängigkeiten genauso zu vergeben.

- Gewichtsstange – Bolzen: **EINFÜGEN**
- Mittelachse Bolzen – Mittelachse Gleitbuchsenbohrung: **PASSEND**
- Seitenfläche Gleitbuchsenwanne – innere Seitenfläche Gewichtsstange: **PASSEND** mit **0,1 mm** Abstand

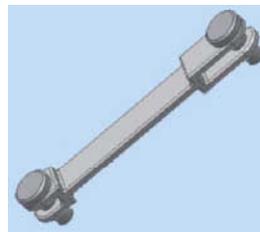


In der rechten Abbildung ist deutlich die Platzierung des Gelenks der Gewichtsstange in der Gleitbuchse zu sehen. Es befindet sich allseits ein kleiner Spalt zwischen den Flächen (seitlich je 0,1 mm), der verhindert, dass die Simulationsumgebung eine feste Verbindung zwischen den Bauteilen herstellt, die von Hand nachgearbeitet werden müsste.

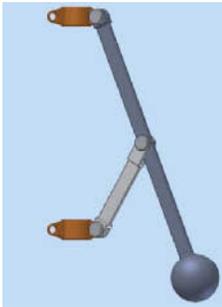
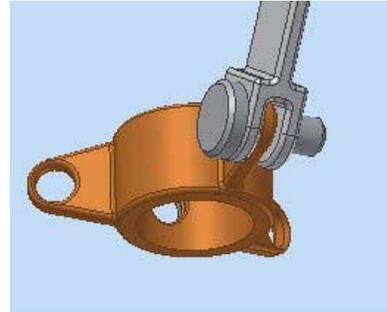
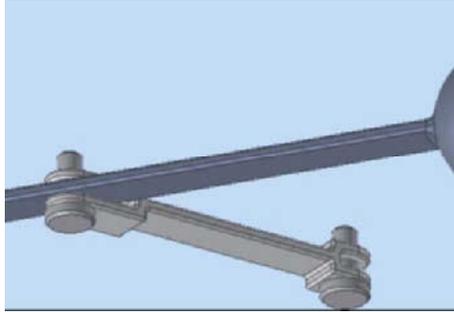
In derselben Art und Weise sind die Bolzen zuerst mit der Abhängigkeit **EINFÜGEN** in der Gelenkstange unterzubringen.

Das längere Gelenk der Gelenkstange ist dann über den Bolzen, wie oben beschrieben, mit der mittleren Bohrung der Gewichtsstange zu verbinden.

Das untere Gelenk der Gelenkstange ist genauso mit der unteren Gleitbuchse zu montieren.



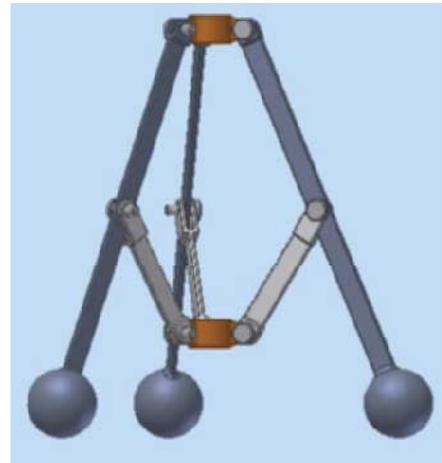
14 Fliehkraftregler



Sind alle Verbindungen an einem Gelenkarm hergestellt, dann ist mit den anderen beiden Armen ebenso zu verfahren.

Es empfiehlt sich, zur Montage dieser Teile die Welle und die Lagerbuchsen, die an diesen Vorgängen nicht teilhaben, auf unsichtbar zu schalten; möglicherweise auch die jeweils nicht benötigten anderen Teile.

Die Übersichtlichkeit und die Handhabung beim Vergeben der Abhängigkeiten erleichtern sich dadurch nicht unwesentlich.



Sind alle Teile montiert, dann werden die beiden Lagerbuchsen fixiert.

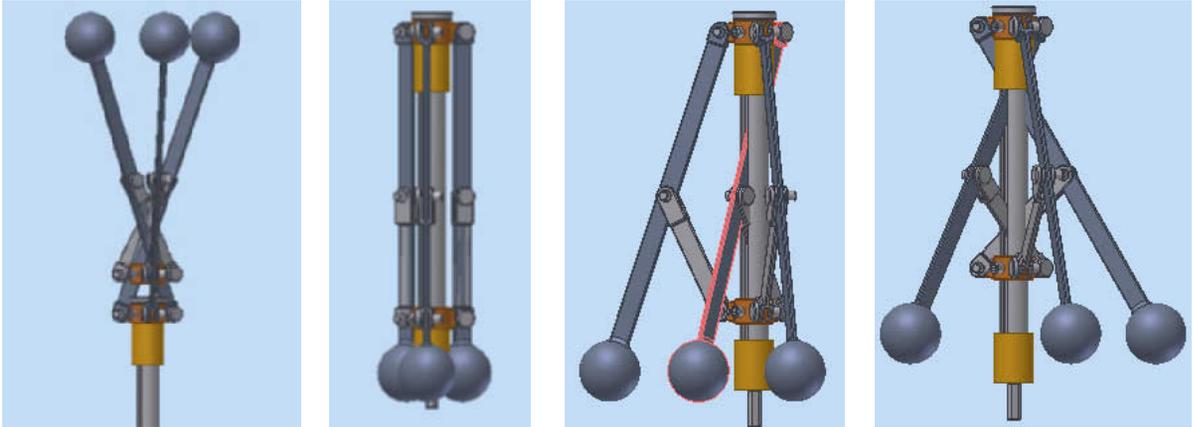
Diese beiden Buchsen stellen das Gehäuse bzw. den Rahmen dar, mit dem die gesamte Konstruktion nach außen hin stabilisiert sein muss.



14.2 Baugruppe bewegen

In der Baugruppe kann jetzt die Konstruktion im Rahmen ihrer Abhängigkeiten mit dem Mauszeiger bewegt werden.

Aber Vorsicht! Da der Inventor keine praktikable Möglichkeit kennt, das Durchdringen von Bauteilen durch andere zu verhindern, kann sehr schnell ein nur schwierig zu behebendes Durcheinander der Bauteile entstehen.



Alle möglichen bzw. unmöglichen Gebilde können durch unvorsichtiges Bewegen entstehen, vor allem dann, wenn die Gelenkstangen in eine gestreckte Lage kommen, kann nicht vorhergesagt werden, in welche Richtung sie sich weiter bewegen.

Da alle drei Hebelgetriebe, die übrigens drei Gelenkvierecke darstellen, miteinander verbunden sind und nur immer eine Stelle bewegt werden kann, fällt es schwer, wieder Ordnung in das System zu bringen. Ein beherzter Zug der unteren Gleitbuchse nach unten und das anschließende Schieben nach oben hilft manchmal weiter.

Alle Varianten, mit denen dieses Problem im Inventor umgangen werden könnte, sind im Rahmen der dynamischen Simulation nicht anzuwenden und ungeeignet.

- Bauteile zusätzlich als Referenzbauteile einzufügen und die Extremstellungen damit anzudeuten, eignet sich nur für Zeichnungsableitungen und macht in der Prototyperstellung keinen Sinn.
- Nach Abhängigkeiten bewegen zu lassen (siehe Kapitel 10), erfordert zusätzliche Abhängigkeiten und Grenzangaben, die bei der dynamischen Simulation stören würden.
- Kontaktsatz und Kontaktlöser anzuwenden, hilft nur weiter, wenn man die Bauteile nach Abhängigkeit bewegen lässt.



Animation auf DVD



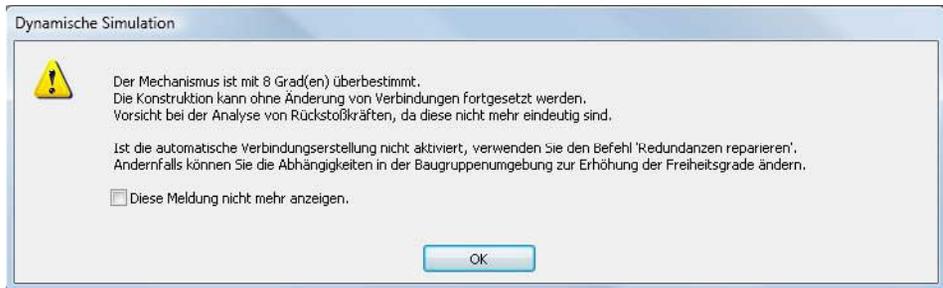
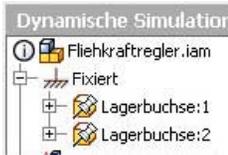
14.3 Die dynamische Simulation

14.3.1 Überbestimmungen

Wie schon mehrmals geschehen, wird die dynamische Simulationsumgebung über die Registerkarte **UMGEBUNG** und die Schaltfläche **DYNAMISCHE SIMULATION** gestartet.

Das Erste, was wir zu sehen bekommen, ist eine Warnung, die besagt, dass unsere Konstruktion mit acht Graden überbestimmt ist.

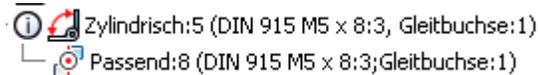
Zu erkennen ist dieser Umstand dann auch im Objektbrowser neben dem Baugruppennamen durch das eingblendete **i** im Kreis.



Die Warnung kann momentan ignoriert werden, da sie für die Bewegungssimulation ohne Bedeutung ist. Wird später eine FE-Analyse durchgeführt, dann müssen entsprechende Vorkehrungen getroffen werden.

Das Fenster ist also zur Kenntnis zu nehmen und mit **OK** wegzuklicken.

Im Objektbrowser befinden sich an den Gelenken, die von den besagten Redundanzen betroffen sind, ebenfalls die Informationssymbole.

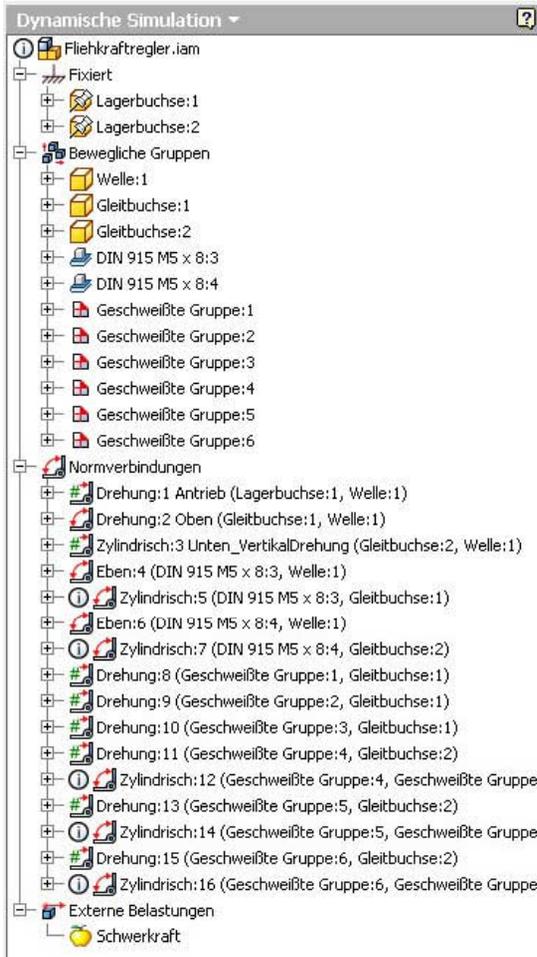


Erkennen lässt sich nach dem Öffnen des Eintrages, dass es sich in diesem Fall um die Abhängigkeit **Passend** zwischen einem Gewindestift und einer Gleitbuchse handelt.

Die Warnung wird offensichtlich deswegen ausgegeben, weil sowohl die Mittelachse des Gewindestifts mit der Mittelachse der Gewindebohrung als auch die Mantelfläche des Zapfens mit der Seitenfläche der Wellennut verbunden ist. Verständlich ist die Meldung trotzdem nicht, denn eine Überstimmung liegt definitiv nicht vor. Aufgrund welchen Umstandes der Inventor damit ein Problem hat, bleibt leider unklar.



14.3.2 Der Objektbrowser



Externe Belastungen

Unter den externen Belastungen ist die Schwerkraft eingetragen. Andere Kräfte oder Momente sind nicht definiert.

Interessanter als in der letzten Übung, der Federklappe, sind in diesem Beispiel die Einträge im Objektbrowser.

Fixiert

Die in der Baugruppe bereits fixierten Elemente befinden sich in der Gruppe Fixiert.



Bewegliche Gruppen

Alle Objekte, die an der Bewegung teilnehmen und die in den Kraftfluss eingebunden sind, befinden sich in der Gruppe Bewegliche Gruppen.



Die Elemente Geschweißte Gruppe sind nicht wirklich geschweißt, sie sind durch die Abhängigkeiten lediglich fest miteinander verbunden.

Normverbindungen

Hier befinden sich alle automatisch erzeugten Gelenke.



Die grüne Raute drückt aus, dass in den Gelenkeigenschaften Einträge vorgenommen wurden.

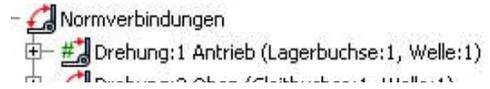


Das i im Kreis weist auf Überbestimmungen hin.



14.4 Der Antrieb

Eher zufällig steht an der obersten Stelle in den Normverbindungen das Gelenk **DREHUNG:1**, das der besseren Kenntlichmachung wegen um den Zusatz **ANTRIEB** (Umbenennung im Objektbrowser) ergänzt wurde. Dass es sich bei diesem Gelenk um die Abhängigkeit zwischen der unteren Lagerbuchse und der Welle handelt, geht aus dem Klammerausdruck (**LAGERBUCHSE:1, WELLE:1**) hervor.

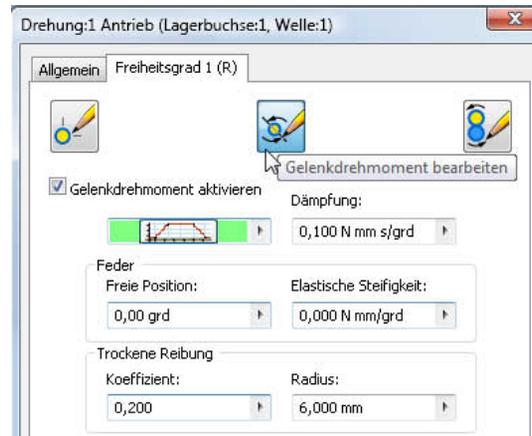


Über dieses Gelenk soll der Antrieb des Fliehkraftreglers erfolgen.

Der Eintrag **EIGENSCHAFTEN** im Kontextmenü des Gelenks ruft das Dialogfenster auf, in dem alle Gelenkeinstellungen vorgenommen werden können.



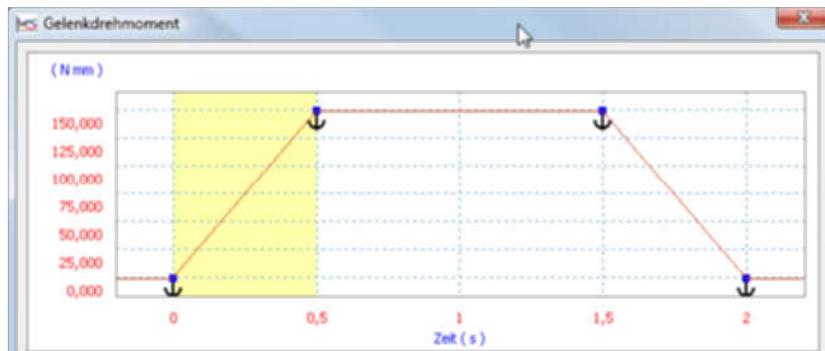
Auf der Registerkarte zum einzigen **FREIHEITSGRAD 1 (R)** des Gelenks ist die mittlere Schaltfläche **GELENKDREHMOMENT BEARBEITEN** auszuwählen.



14.4.1 Antriebsmoment

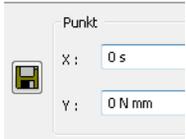
Das Auswahlfeld **GELENKDREHMOMENT** ist zu aktivieren, und ein Drehmoment soll über das Eingabediagramm definiert werden.

Die Definition im Eingabediagramm ist so einzustellen, dass in den ersten **0,5 SEKUNDEN** das Moment auf **150 NMM** linear ansteigt, danach **EINE SEKUNDE** konstant bleibt, bis es in den letzten **0,5 SEKUNDEN** wieder auf den Wert null abfällt.



14.5 Die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse

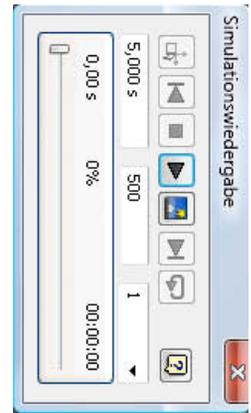
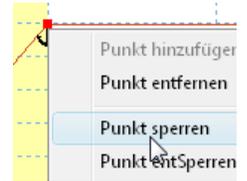
Neue Diagrammpunkte sind mit einem Doppelklick einzufügen. Es empfiehlt sich, die einzelnen Diagrammpunkte zu sperren, da damit das Kurvengebilde während der Manipulationen stabil bleibt.



Wurde ein Punkt mit einem einfachen Klick selektiert, dann können seine Daten, in diesem Fall der X-Wert in Sekunden und der Y-Wert in Nmm, direkt in die Eingabefelder eingetragen werden.

Die Kurve im Diagramm passt sich jeder Eingabe automatisch an.

Die Gesamtzeit der Momenteneinwirkung beträgt zwei Sekunden. Die Simulationszeit wird später auf fünf Sekunden eingestellt, da zu erwarten ist, dass die Fliehkraftrotation aufgrund der Massenträgheit der Gewichte noch einige Zeit nachläuft.



14.4.2 Dämpfung

Eine **DÄMPFUNG** von **0,1 NMM S/GRD** wurde dem Moment gefühlsmäßig zugeordnet, damit es nicht durch starre und harte Stöße bei Lastwechsel Spannungsspitzen hervorruft.



14.4.3 Reibung

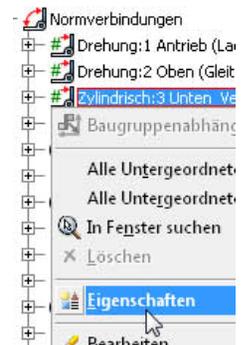
Der **KOEFFIZIENT** der Reibung ist mit **0,2** eingetragen und entspricht in etwa einer trockenen Reibung zwischen Metallen. Der **RADIUS** des Reibmomentes von **6 MM** ergibt sich aus dem Wellendurchmesser von 12 mm.



14.5 Die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse

Das Gelenk für die Vertikalbewegung der unteren Gleitbuchse muss ebenfalls eingestellt werden.

Entsprechend der Beweglichkeit dieses Gelenks hat es zwei Freiheitsgrade, einen der Translation (Vertikalbewegung) und einen der Rotation (Antrieb durch die Welle über den Gewindestift).



Das Eigenschaftsfenster zeigt demgemäß die beiden Registerkarten **FREIHEITSGRAD 2 (T)** und **FREIHEITSGRAD 1 (R)**, auf denen die jeweiligen Einstellungen vorgenommen werden.

Die Translation

Die Angaben für die Translation sind etwas umfangreicher und mit der linken Schaltfläche **ANFANGSBEDINGUNGEN BEARBEITEN** vorzunehmen.

Die **POSITION** der Ruhelage, an der die Bewegung beginnen soll, befindet sich bei **-130 MM** und soll dort auch festgeschrieben werden. Ermittelt wird diese Stellung durch Verschieben der Buchse und Ablesen des Wertes in diesem Feld.

Die **DREHZAHL** bleibt auf **BERECHNET** stehen, da sie vom Antrieb abhängig ist.

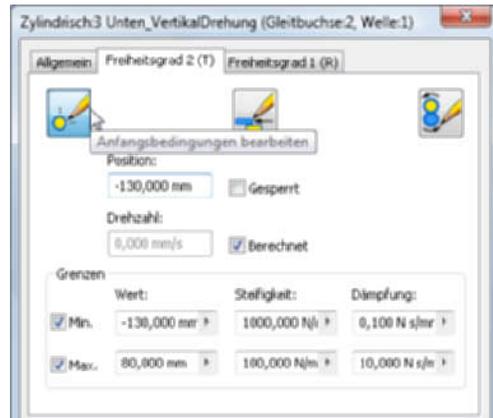
Interessant sind die Eingaben der Grenzen. Beide Extreme, **MIN.** und **MAX.**, sind von Bedeutung.

Der minimale Wert der Position darf nicht unter **-130MM** liegen, da sich sonst eine Durchdringung mit der Lagerbuchse ergeben würde.

Richtiger wäre, an dieser Stelle ein Kontaktgelenk zwischen der unteren Lagerbuchse und der Gleitbuchse zu platzieren und damit eine tatsächliche mechanische Grenze zu installieren. Dies würde allerdings den Rechenaufwand für die Simulation deutlich erhöhen, weswegen mit dieser Grenzangabe ein Kompromiss eingegangen wird.

Der Kompromiss besteht in der Angabe einer sehr hohen **STEIFIGKEIT** von **1000 N/MM** für diese Position, die einem mechanischen Kontakt gleichkommt. Die **DÄMPFUNG** von **0,1 Ns/MM** wird hinzugefügt.

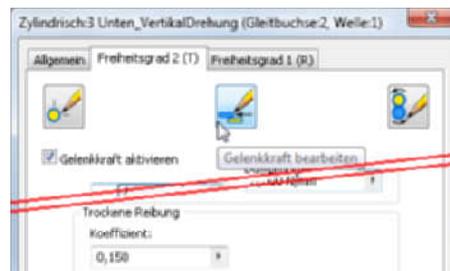
Der maximale Wert wird mit **80 MM** eingetragen und entspricht in etwa der Streckstellung der Gelenkstangen. Die **STEIFIGKEIT** dieser Position ist mit **100 N/MM** deutlich geringer, dafür sorgt an dieser Position eine relativ hohe **DÄMPFUNG** von **10 Ns/MM** für eine weiche Einnahme der Endstellung.



14.6 Andere Gelenke mit Reibwerten versehen

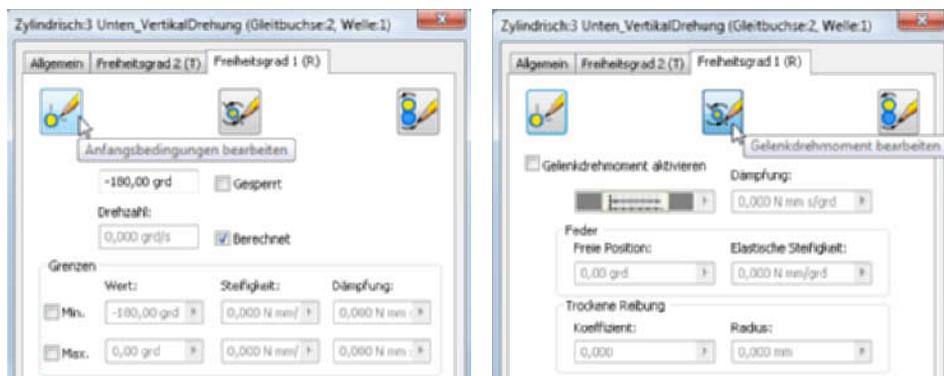
Mit der mittleren Schaltfläche **GELENKKRAFT BEARBEITEN** wird die Einstellung **GELENKKRAFT AKTIVIEREN** vorgenommen, damit ein Reibwert für die Vertikalbewegung eingegeben werden kann. Der **KOEFFIZIENT** von **0,15** sollte einigermaßen realistisch dafür sein.

Damit ist die Definition der Translationsbewegung der unteren Gleitbuchse abgeschlossen.



14.5.1 Die Rotation

Die **ANFANGSBEDINGUNGEN** der Rotation sind ohne Belang. Die Anfangsposition in Grad ist unerheblich, und die Drehzahl wird natürlich berechnet.



Am **GELENKDREHMOMENT** gibt es nicht viel zu tun. Die Auswahl **GELENKDREHMOMENT AKTIVIEREN** kann deaktiviert bleiben, da sich die untere Gleitbuchse zusammen mit der Welle dreht und keine Rotationsreibung auftritt.

14.6 Andere Gelenke mit Reibwerten versehen

Die folgenden Schritte entsprechen einer kleinen Fleißarbeit, sollten aber der realistischen Bedingungen wegen trotzdem durchlaufen werden.

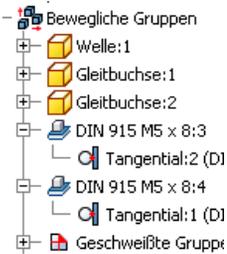
In allen Gelenken, in denen eine Bewegung stattfindet, tritt auch Reibung auf. Dies betrifft

- die Rotationen in den beiden Lagerbuchsen und
- alle Rotationen in allen Bolzenverbindungen
- sowie die Vertikalbewegung des unteren Gewindestifts in der Wellennut.

14 Flihkraftregler

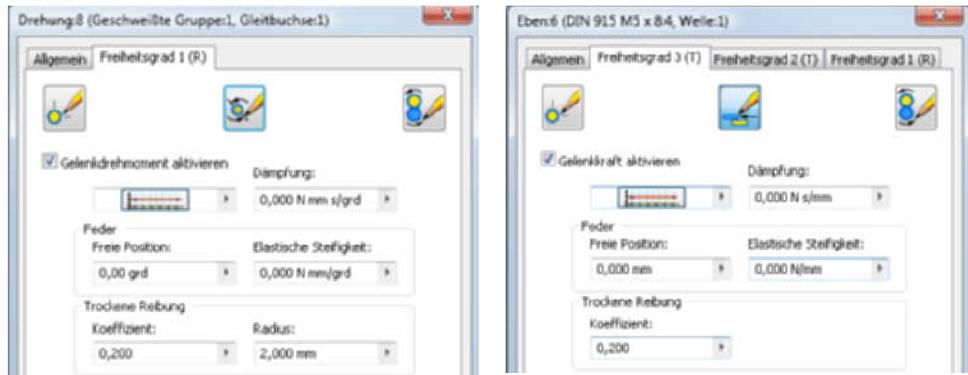
Der Vorgang ist fast überall derselbe: **EIGENSCHAFTEN** des betroffenen Gelenks aufrufen, den richtigen **FREIHEITSGRAD** wählen, die Schaltfläche **GELENKDREHMOMENT** (Rotation) oder **GELENKKRAFT** (Translation) betätigen, das **GELENKDREHMOMENT** oder die **GELENKKRAFT** aktivieren und die Daten für die **TROCKENE REIBUNG** eingeben. Bei Rotationsgelenken ist jeweils noch der richtige **RADIUS** einzutragen.

Beispielhaft zeigen die folgenden zwei Abbildungen den Vorgang für die Rotation einer Bolzenverbindung, die in einer **GESCHWEISSTEN GRUPPE** steckt, mit dem Reibwert **0,2** und einem Radius von **2 MM** (Bolzendurchmesser 4 mm) und der Translation des unteren Gewindestiftes in der Wellennut.



Achtung! Bei der Translation des Gewindestiftes in der Wellennut ist Folgendes zu beachten: Der Inventor hat offensichtlich ein Problem bei der Umsetzung der Abhängigkeit Tangential (Gewindestiftzapfen an Wellennutseite) zusammen mit der Winkelabhängigkeit am Gewindestift, die eigentlich die Rotation verhindert. Zu sehen ist das Problem auch daran, dass sich die tangentielle Abhängigkeit in den **BEWEGLICHEN GRUPPEN** befindet und nicht in ein Gelenk umgewandelt wurde.

Anstelle des einen Freiheitsgrades der vertikalen Translation in der Wellennut ver gibt der Inventor drei Freiheitsgrade (zweimal T, einmal R). Der richtige Freiheitsgrad ist durch die Anzeige des Pfeils in der Baugruppe bei der Registerkartenauswahl zu wählen. Im Beispiel ist es der Freiheitsgrad 3 (T).

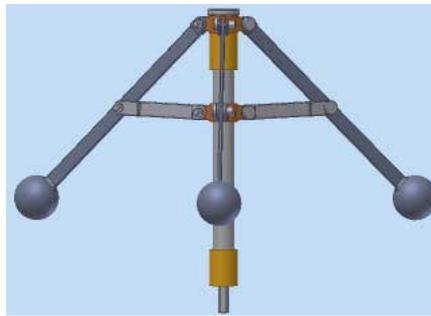
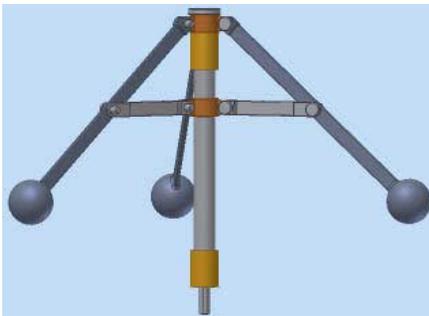
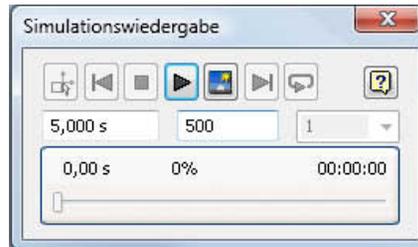


Sind alle Gelenke entsprechend bearbeitet, dann steht einer Bewegungssimulation nichts mehr im Weg.

14.7 Die Simulation

Wie vorher schon erwähnt wird die Dauer der Simulation auf **5 SEKUNDEN** eingestellt, da die Antriebsdauer im Eingabediagramm zwei Sekunden beträgt und damit drei Sekunden für den Auslauf zur Verfügung stehen.

Mit einem beherzten Klick auf den Play-Button startet der Fliehkraftregler und führt seine Funktion (fast) tadellos aus.



Animation auf DVD



Die AVI-Animation auf der CD zeigt die Bewegung sehr realitätsnah.

Ein kleines Problem, das möglicherweise zu erwarten war, sind Schwingungen in den Extremlagen. Sowohl in der oberen Maximalstellung als auch nach dem Auslaufen in der untersten Stellung treten unschöne Schwingungen auf.

Durch eine erhöhte Dämpfung bzw. durch niedrigere Steifigkeiten wäre dieses Thema durchaus in den Griff zu

bekommen. Inwieweit dies aber einer praktischen Umsetzung entsprechen würde, ist fraglich. Der bessere Weg ist der Einbau einer schwachen Spiralfeder, die das System etwas auf Vorspannung hält. Damit sollten die Schwingungen unter Kontrolle zu bekommen sein.

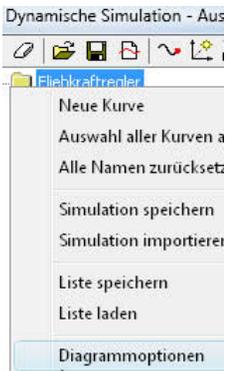
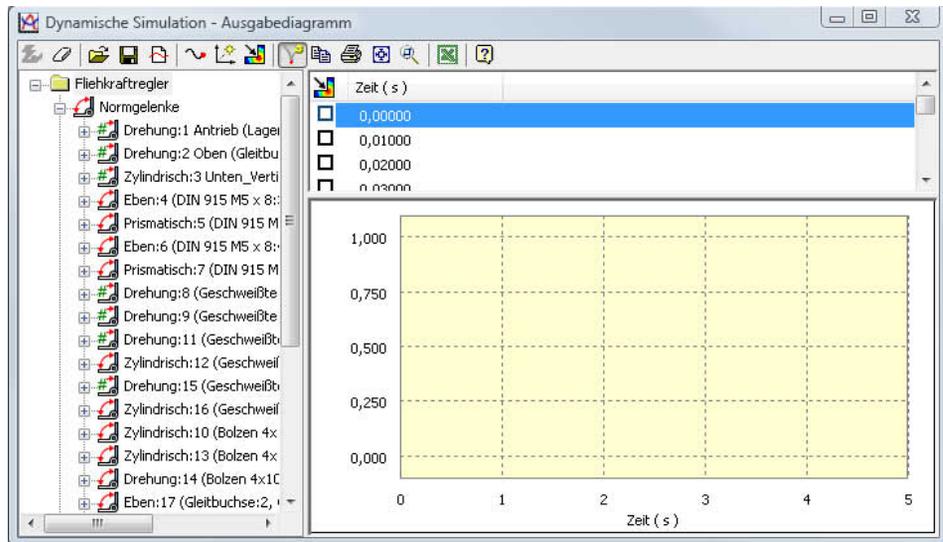
Bevor es so weit ist, soll aber zuerst das Ausgabediagramm vorgestellt und untersucht werden.



14.8 Das Ausgabediagramm

Das Ausgabediagramm ähnelt dem schon besprochenen Eingabediagramm. Sein Fenster besteht aus drei Bereichen.

- Dem Objektbrowser, in dem alle Gelenke, Benutzervariablen und Spuren mit ihren physikalischen und kinematischen Eigenschaften aufgelistet sind,
- dem Zeitschrittbereich, in dem die ausgewählten Daten millisekundengenau abgelesen und z.B. nach Excel exportiert werden können, und
- dem Diagrammbereich, in dem die ausgewählten Daten über der Zeitachse grafisch zur Anzeige gebracht werden können.



Die Daten im Ausgabediagramm stehen erst dann zur Verfügung, wenn eine Simulation durchlaufen wurde.

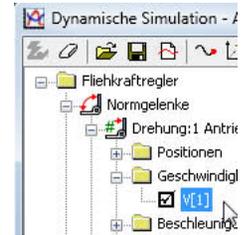
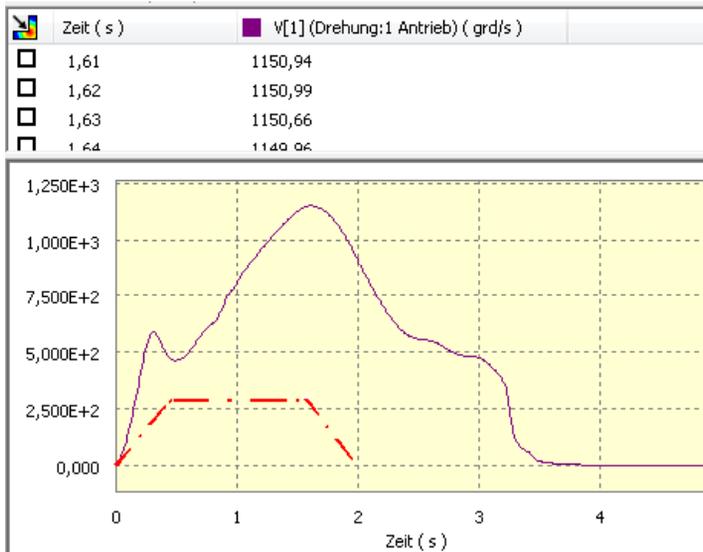
Jede stattgefunden Simulation kann als *.iaa-Datei gespeichert werden. So können mehrere Simulationen miteinander verglichen und optimiert werden. Zum Vergleichen der unterschiedlichen Simulationen kann das Fenster auch mehrfach geöffnet werden.

Die Diagrammoptionen bieten Einstellungsmöglichkeiten für die Diagrammdarstellung der Diagrammachsen und der Wertetabelle. Sie sind über das Kontextmenü erreichbar.



14.8.1 Rotationsgeschwindigkeit interpretieren

Zur Verdeutlichung des Geschwindigkeits- bzw. Drehzahlverlaufes wurde klein und rot der Verlauf des Antriebsmomentes von Hand eingezeichnet. Leider kann das Diagramm diese Größe nicht selbst darstellen, da es eben nur ein Ausgabediagramm ist.



Im der Wertetabelle kann man ablesen, dass das Drehzahlmaximum nach 1,62 Sekunden mit 1150,99 grad/s erreicht wurde, also etwas nachdem das Antriebsmoment schon wieder kleiner wurde.

Das Diagramm zeigt folgenden Verlauf:

Der erste steile Anstieg betrifft den Anstieg des Antriebsmoments und zeigt damit eine hohe Beschleunigung, die durch den Steigungswinkel der Anfangskurve dokumentiert wird.

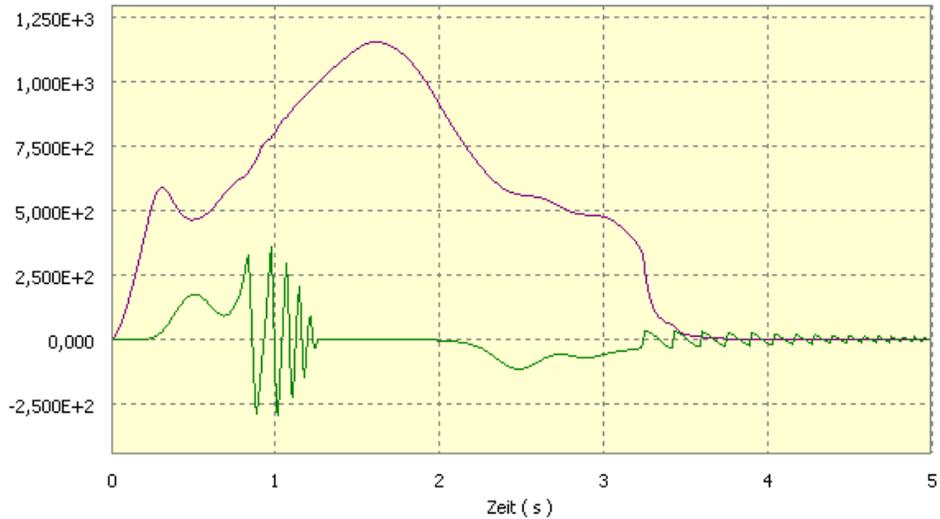
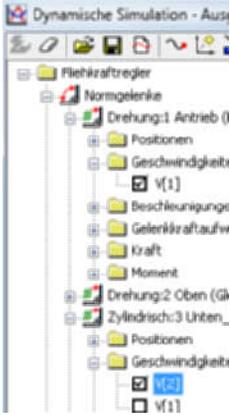
Der anschließende kleine Überschwinger kommt durch die beschleunigte träge Masse der Gewichte zustande, die als Gegenreaktion auch die kleine Unterschwingung begründet.

Währenddessen das Antriebsmoment konstant bleibt, steigt die Drehzahl immer weiter bis zu ihrem Maximum an und fällt nach dem Abklingen des Antriebs durch die Gelenkviereckgeometrie nicht linear bis auf den Wert null ab.

14.8.2 Schwingungen untersuchen

Die festgestellten Schwingungen lassen sich in der Drehzahlbetrachtung nicht erkennen, diese müssen über die vertikale Bewegung der unteren Gleitbuchse zu sehen sein.

Wir lassen die Drehzahlkurve stehen und wählen zusätzlich im Browser das zylindrische Gelenk mit der unteren Gleitbuchse und dort die Geschwindigkeit aus.



Die grüne Kurve zeigt die Vertikalgeschwindigkeit, die im ersten Teil analog zur Drehzahl ansteigt, dann, nach einer knappen Sekunde, beginnt die erhebliche Schwingung, die sich nach etwa 1,25 Sekunden beruhigt.

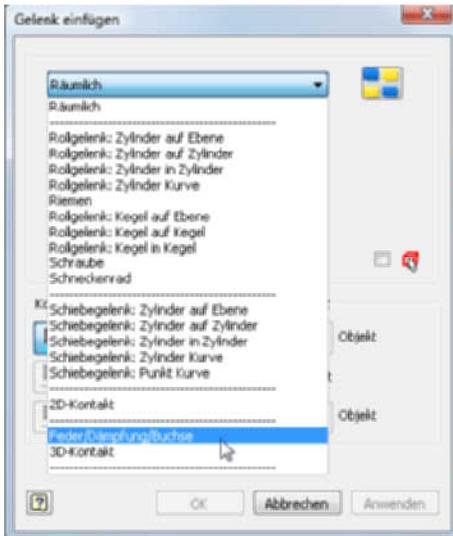
Nach zwei Sekunden, nachdem das Antriebsmoment weggefallen ist, wird die Geschwindigkeit negativ, also langsamer, bis sie am Ende, wenn die untere Gleitbuchse in ihrer unteren Position aufsetzt, wieder zu schwingen, diesmal mehr zu hopsen (Sägezahn), beginnt.

14.9 Feder einfügen

Leider ist es nicht möglich, im Inventor problemlos, d.h. ohne Tricks, eine wirklich funktionierende Feder als Baugruppenkomponente zu erstellen.

In der dynamischen Simulation ist das zwar möglich, und die Feder wird auch naturgetreu dargestellt, aber leider ist sie nur ein Gelenk mit der entsprechenden Funktion und kein Bauteil der Baugruppe. In einer Stückliste wird sie beispielsweise fehlen, bei Gewichts- bzw. Masseberechnungen ebenfalls.

Ein Punkt für die Wunschliste der nächsten Inventor-Version wäre: Die Feder aus der dynamischen Simulation in ein funktionierendes Bauteil umwandeln zu können.



Mit der Funktion **GELENK EINFÜGEN** wird das entsprechende Dialogfenster aufgerufen, in dem aus dem Abrollmenü der Eintrag **FEDER/DÄMPFER/BUCHSE** ausgewählt wird.

Alternativ ginge das auch über den blau-gelben Schachbrett-Button, aber Vorteile bringt das keine.

Die drei Begriffe Feder, Dämpfer und Buchse sind deswegen in einem Gelenkaufruf zusammengefasst, weil im weiteren Verlauf zwischen diesen Einbauten unterschieden werden kann.

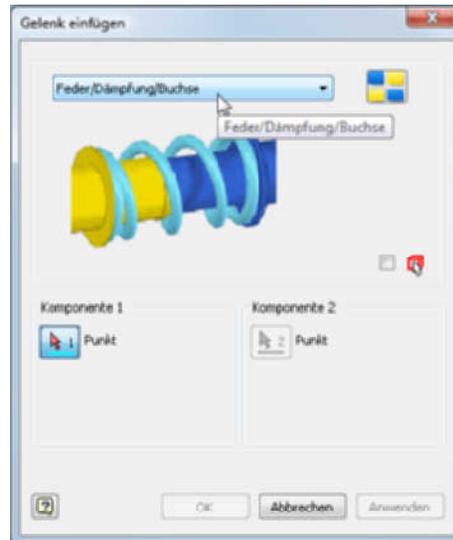
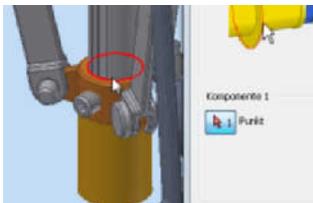
In unserem Fall soll nur eine einfache Feder zur Anwendung kommen.



Die Einfügung der Feder geht sehr unproblematisch vonstatten.

Es sind die beiden Komponenten, die mit der Feder verbunden werden sollen bzw. zwischen denen sich die Federkraft etablieren soll, auszuwählen.

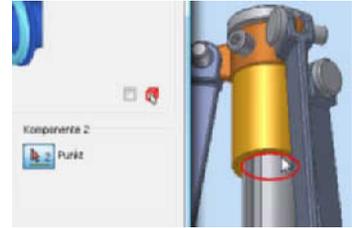
Zu beachten ist dabei lediglich, dass die Funktion die Eingabe eines Punktelementes erwartet.



Als **KOMPONENTE 1** ist in unserem Fall die untere Gleitbuchse und an dieser der Innendurchmesser auszuwählen. Bei der Selektion eines Kreises wird der Mittelpunkt als Positionsangabe für die Einfügung interpretiert.

14 Fliehkraftregler

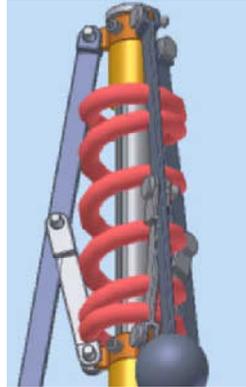
Als zweites Element, die **KOMPONENTE 2**, ist die obere Lagerbuchse auszuwählen, und dort ist ebenfalls der Innendurchmesser als Position für die Einfügung zu selektieren.



Das war's, der Rest passiert erst mal, wie man sieht, von selbst.

Die eingefügte Spiralfeder sieht zwar etwas unförmig aus, und die Größenverhältnisse passen nicht ganz so gut zu den angegebenen Durchmessern, aber immerhin, die Feder existiert, und sie auf die richtigen Dimensionen zu bringen, geht schnell und leicht.

Ein Blick in den Objektbrowser unter der ebenfalls neu entstandenen Kategorie **KRAFTVERBINDUNGEN** zeigt auch dort die eingefügte Feder als **FEDER/DÄMPFUNG/BUCHSE:1** an.



Ein zweiter Blick auf das Kontextmenü der Feder in Objektbrowser zeigt den Eintrag **EIGENSCHAFTEN**, mit dem das folgende Einstellungsfenster für diese Gelenkverbindung erscheint.

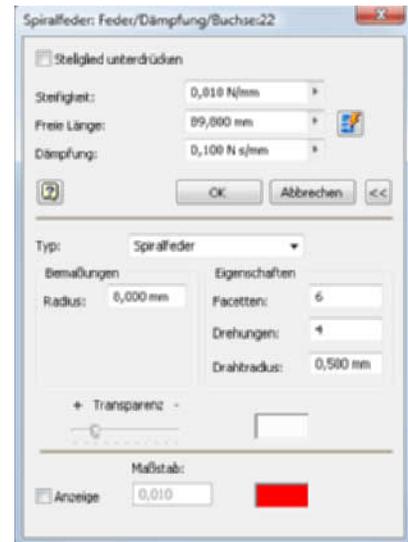
Die **STEIFIGKEIT** und die **DÄMPFUNG** kann aus der Vorgabe übernommen werden. Sollte sie nicht in den angegebenen Größen angezeigt werden, so sind sie wie abgebildet einzutragen.

Im mittleren Bereich des Fensters ist die **SPIRALFEDER** ebenfalls bereits eingetragen. Ein Blick auf die Wahlmöglichkeiten zeigt an dieser Stelle auch die Begründung für die eigenartige Benennung dieses Gelenks.

Die **FREIE LÄNGE** ist richtig eingetragen, kann aber mit der kleinen Schaltfläche rechts daneben aktualisiert werden.

Die weiteren geometrischen Eigenschaften müssen angepasst werden.

Die Anzahl der **FACETTEN** steuert die optische Darstellung der Feder, d.h. die Genauigkeit, mit der die Rundheit der Spiralen angezeigt wird, sie kann auf 6 stehen bleiben.



Der **RADIUS** ergibt sich aus dem Wellen- plus Drahtdurchmesser zuzüglich des Spiels zwischen Feder-Innendurchmesser und Welle und wird beispielsweise mit 8 mm eingetragen.

Die **DREHUNGEN** (mit denen der Übersetzer die Anzahl der federnden Windungen meinte) ist 4 und kann ebenfalls stehen bleiben oder verändert werden. Änderungen betreffen ohnehin nur die Optik der Darstellung.

Der **DRAHTRADIUS** wird mit 0,5 mm angegeben, womit sich eine akzeptable Einstellung ergibt.

Die geometrischen Einstellungen sind alle relativ unerheblich, da ja die Steifigkeit und die Dämpfung extra angegeben wurden.

Die folgende Übersicht zeigt die Erklärungen des Inventor-Online-Handbuches zu den Begriffen im Dialogfenster

Bereich	Begriff	Erklärung
Hauptfenster		
	Steifigkeit	Legt die Steifigkeit von Federn fest. Auf die beiden Zuordnungspunkte wird eine Aktions-/Rückstoßkraft ausgeübt. Die Formel für die Kraft lautet: $F = KX$, wobei F die ausgeübte Kraft darstellt und K die Steifigkeit angibt. X ist die Verlängerung der Feder (d. h. Länge abzüglich freier Länge).
	Freie Länge	Gibt die Länge an, bei der die Feder keine Kraft ausübt. In der Standardeinstellung entspricht die freie Länge der Strecke zwischen den beiden Zuordnungspunkten zum Zeitpunkt der Konstruktion.
		Aktualisiert die freie Länge auf die aktuelle Strecke zwischen den beiden Zuordnungspunkten
	Dämpfung	Legt die Federdämpfung fest. Auf die beiden Zuordnungspunkte wird eine Aktions-/Rückstoßkraft ausgeübt. Die Formel für die Kraft lautet: $F = CV$, wobei F die ausgeübte Kraft darstellt, C die Dämpfung und V die relative Geschwindigkeit zwischen den beiden Zuordnungspunkten ist.
Weitere Optionen		

14 Fliehkraftregler

Bereich	Begriff	Erklärung
	Typ	Legt den Typ der Feder-Dämpfung-Buchse-Verbindung fest. Diese Auswahl legt fest, welche Parameter verfügbar sind. 
Bemaßungen		
	Radius	Legt den Radius der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
		Für Federdämpfungen ist eine weitere Bemaßung verfügbar.
	Länge	Legt die Länge der Federdämpfung fest
Eigenschaften		
	Facetten	Legt die Facettenanzahl der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
	Windungen	Legt die Anzahl von Windungen der Spiralfeder, Feder oder Federdämpfung fest
	Drahradius	Legt den Radius für den Draht fest, aus dem die Spiralfeder bzw. die Federdämpfung hergestellt wird
	Transparenz	Legt die transparente Darstellung der Feder fest (+ = unsichtbar)
	Anzeige	Gelenkkraftvektor



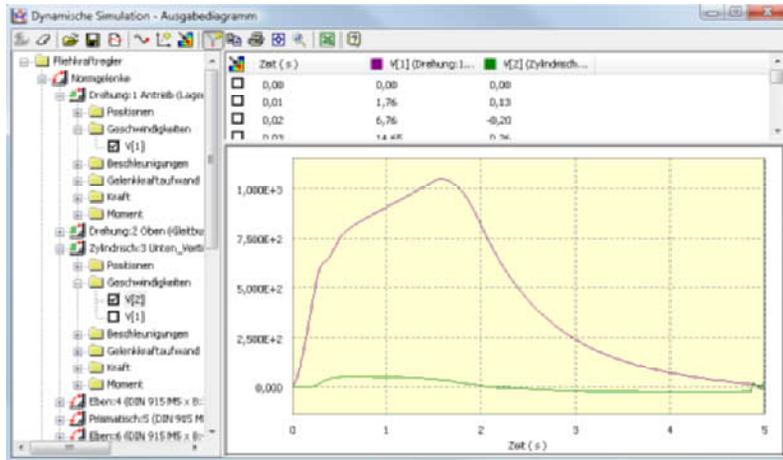
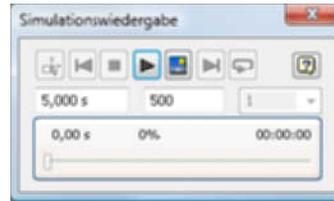
Die aufgrund der angegebenen Daten eingefügte bzw. dargestellte Feder, die zu ca. $\frac{3}{4}$ transparent eingestellt wurde, macht einen recht akzeptablen Eindruck.

14.10 Simulation mit eingebauter Feder

Die Simulation der Bewegung mit der eingebauten Feder verläuft sehr zufriedenstellend.

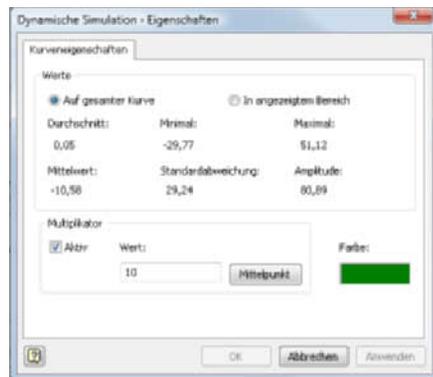
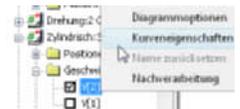
Das Ausgabediagramm zeigt die beiden Kurven wie vorher, die Geschwindigkeit der Drehung (Drehzahl) des Antriebes und die vertikale Gleitgeschwindigkeit der unteren Gleitbuchse.

Die Schwingungen sind fast vollständig verschwunden.



Animation auf der DVD

14.11 Kurven im Ausgabediagramm bearbeiten



Die Darstellung der Verlaufskurven im Ausgabediagramm kann über den Eintrag im Kontextmenü **KURVENEIGENSCHAFTEN** beeinflusst werden.

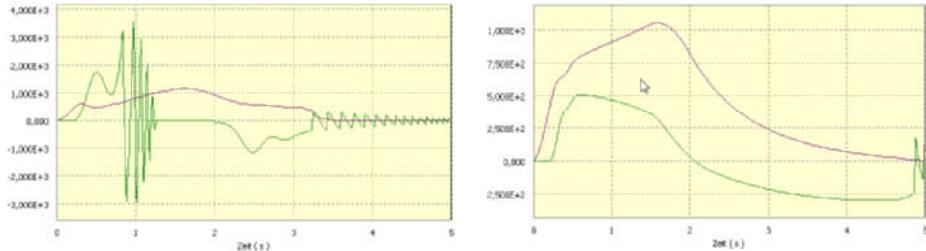
Da im Diagramm nur eine Ordinatenachse mit einem Maßstab angezeigt wird, werden beide Geschwindigkeitskurven im selben Maßstab wiedergegeben, und die höhere der Geschwindigkeitskurven bestimmt die Darstellung.

Die vertikale Gleitgeschwindigkeitskurve verläuft deswegen sehr flach.

14 Flihkraftregler

Im Dialogfenster **EIGENSCHAFTEN** der grünen Kurve stellen wir deswegen den **MULTIPLIKATOR** auf aktiv und statten ihn mit dem **WERT 10** aus.

Die beiden folgenden Vorher-Nachher-Bilder zeigen links den Geschwindigkeitsverlauf ohne und rechts mit eingebauter Feder. Im linken Bild ist die violette Kurve deswegen so flach, weil die grüne Kurve mit dem Multiplikator 10 so heftige Ausschläge zeigt.



Der Effekt kann deutlicher kaum sein. Nur im letzten Teil der grünen Kurve finden noch einige Hopsen statt, an der Stelle, an der die untere Gleitbuchse vor dem Stillstand auf der unteren Lagerbuchse aufsetzt.

14.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen

Der Übergang von der dynamischen zur Belastungsanalyse erfolgt ebenfalls über das Ausgabediagramm.



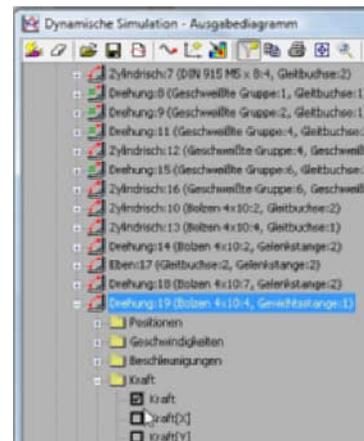
14.12.1 Die Vorbereitung

Um für die Belastungsanalyse einen Moment hoher Belastung untersuchen zu können, ist es notwendig:

- erstens eine Bewegungssimulation durchlaufen zu lassen und
- zweitens eine Belastungskurve im Ausgabediagramm zur Anzeige zu bringen.

Der erste Schritt wurde getan, im zweiten wurde beispielhaft das Gelenk **DREHUNG:19** zwischen einem Bolzen und einer Gewichtsstange ausgewählt.

Für die Anzeige eines Kraftverlaufes wurde im Ordner **KRAFT** der Eintrag **KRAFT**, der die am Gelenk wirkende Gesamtkraft betrifft, mit einem Haken versehen.

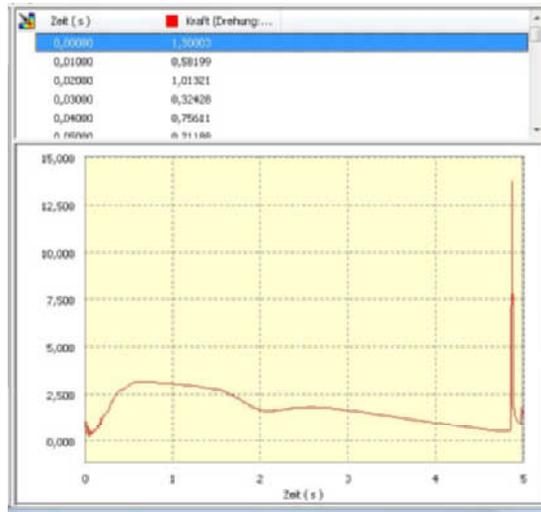


14.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen

Das entsprechende Diagramm zeigt den Kraftverlauf über der Simulationszeit von fünf Sekunden.

Auffallend ist die Spitze im Kurvenverlauf kurz vor dem Ende der Simulation, deren Größe bis knapp an die 15 N geht.

Von den Geschwindigkeitsdiagrammen her wissen wir, dass am Ende der Simulation ein Aufsetzen der unteren Gleitbuchse auf der unteren Lagerbuchse stattfand. Dieser erste Aufsetzer verursacht eine Kraft- bzw. Spannungsspitze, die in der FE-Analyse genauer untersucht werden soll.



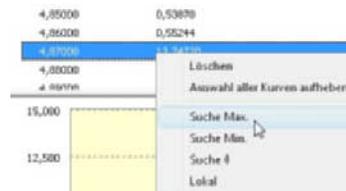
14.12.2 Zeitschritt auswählen

Wird kein Zeitschritt ausgewählt, dann wird der FEM-Export mit dem ersten Zeitschritt durchgeführt, der für unsere Untersuchung ungeeignet ist.

Um einen oder mehrere Zeitschritte auszuwählen, gibt es zwei Möglichkeiten:

Man doppelklickt in der Diagrammkurve möglichst nahe an der Belastungsspitze und erzeugt so eine vertikale Linie im Diagramm und die entsprechende Markierung in der Zeitschritttabelle. Anschließend klickt man in der Zeitschritttabelle so lange nach oben oder unten, bis man den Größtwert gefunden hat.

Man wählt im Kontextmenü eines beliebigen Zeitschrittes in der Zeitschritttabelle den Eintrag **SUCHE MAX.** und freut sich darüber, dass der Inventor viel schneller ist als man selbst.



In beiden Fällen stößt man in unserem Beispiel auf den Eintrag am Zeitschritt 4,87 Sekunden auf die Kraft 13,75 N.

Möchte man mehrere Zeitschritte exportieren, dann ist es möglich, über das Kontextmenü des FEM-Icons in

14 Fliehkraftregler



der Zeitschritttabelle, die Funktion **REIHE ERSTELLEN** auszuwählen. Über die Auswahlkästchen können alle Zeitschritte zur Untersuchung selektiert werden.

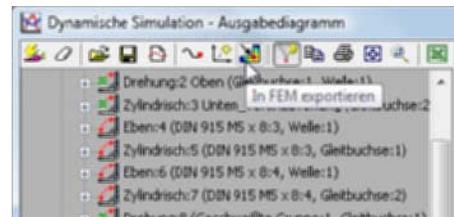
Wir markieren für unsere Untersuchung nur einen Eintrag, und zwar den gefundenen Maximizeintrag der Kraft am untersuchten Gelenk.

	Zeit (s)	Kraft (Drehung:...
<input type="checkbox"/>	4,86000	0,55244
<input checked="" type="checkbox"/>	4,87000	13,74720
<input type="checkbox"/>	4,88000	1,88225
<input type="checkbox"/>	4,89000	1,71414
<input type="checkbox"/>	4,90000	1,54974

Wir markieren für unsere Untersuchung nur einen Eintrag, und zwar den gefundenen Maximizeintrag der Kraft am untersuchten Gelenk.

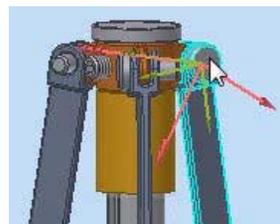
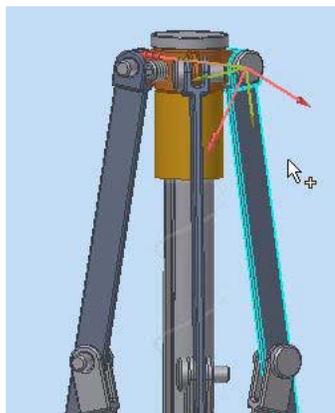
14.12.3 Bauteile zur FE-Analyse auswählen

Um den Export dieser Daten vorzubereiten, ist jetzt der Punkt gekommen, an dem man das entsprechende Symbol **IN FEM EXPORTIEREN** in der Symbolleiste des Ausgabediagramms betätigt.



Sobald dies geschehen ist, erscheint das Dialogfenster zur Auswahl der zu exportierenden Bauteile.

Die zu untersuchenden Bauteile werden durch Anklicken selektiert.



Untersucht werden sollen der Gewichtarm, der Bolzen und die obere Gleitbuchse.

14.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen

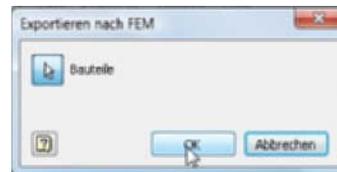
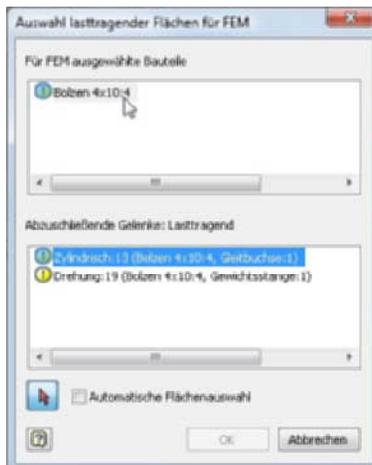
Bereits während der im vorangegangenen Kapitel zur Bewegungssimulation beschriebenen Überbestimmung von Gelenken wurde auf mögliche und teilweise nicht zu verhindernde Warnmeldungen hingewiesen.

Auch jetzt erscheint, wenn ein vermeintlich überbestimmtes Bauteil selektiert wurde, die folgende Meldung.



14.12.4 Überbestimmte Bauteile heilen

Sind überbestimmte Komponenten in der Auswahl und klickt man, um die Bauteilauswahl zu beenden, auf **OK**, dann erscheint das Dialogfenster zur Auswahl lasttragender Flächen für FEM.

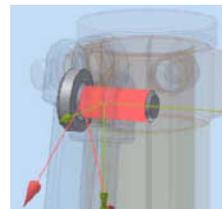
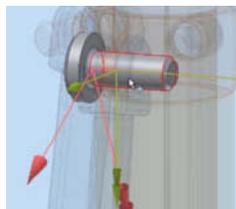


Im nebenstehenden Beispiel ist der Bolzen davon betroffen.

Die beiden Einträge im unteren Bereich betreffen die beiden Gelenke, über die der Bolzen einmal mit der Gleitbuchse und einmal mit der Gewichtsstange verbunden ist.

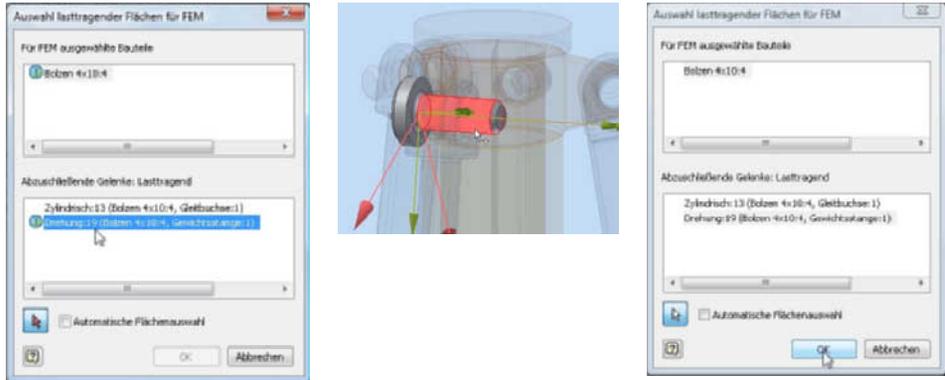
Für das Gelenk **ZYLINDRISCH:13** ist am Bolzen die Fläche auszuwählen, die als lasttragend zu vermuten ist.

Sobald das durchgeführt wurde, wird derselbe Schritt für den zweiten Eintrag, der **DREHUNG:19** durchgeführt.



14 Flihkraftregler

Wurde die gewählte lasttragende Fläche akzeptiert, dann verschwindet das gelbe Ausrufezeichen neben dem Eintrag.



Dieser Vorgang muss so oft mit den jeweiligen Einträgen durchgeführt werden, bis alle gelben Ausrufezeichen eliminiert sind.



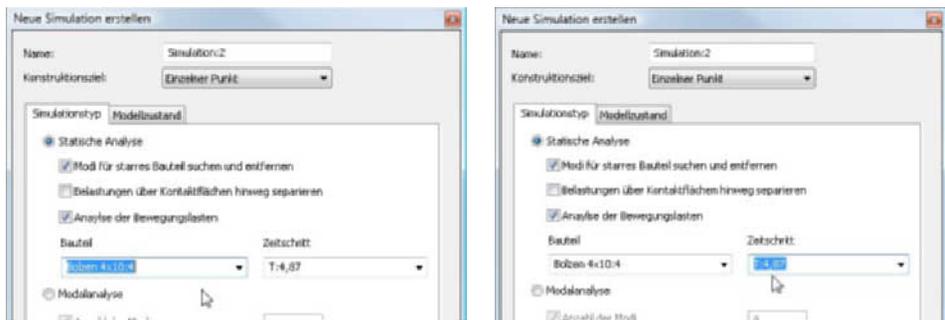
14.12.5 In die Belastungsanalyse wechseln

Die Vorbereitung des Exportes für die FE-Analyse ist jetzt abgeschlossen.

Die dynamische Simulation ist zu verlassen, und über die Registerkarte **UMGEBUNG** kann die **BELASTUNGSANALYSE** ausgerufen werden.

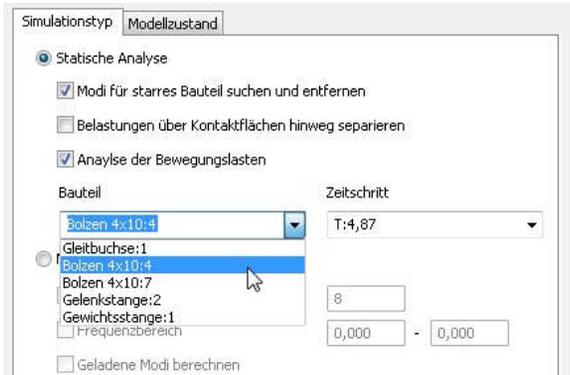
Eine **NEUE SIMULATION** ist zu erstellen bzw. die **SIMULATIONSEIGENSCHAFTEN** einer vorhandenen Simulation sind zu bearbeiten

Im ersten Schritt sind im entsprechenden Dialogfenster die zu simulierenden Auswahlen zu treffen.



Die wichtigste Einstellung ist, die **ANALYSE DER BEWEGUNGSDATEN** zu aktivieren. Erst dann erscheinen die Abrollfelder für die Auswahl eines **BAUTEILS** und des entsprechenden **ZEITSCHRITTES**.

14.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen



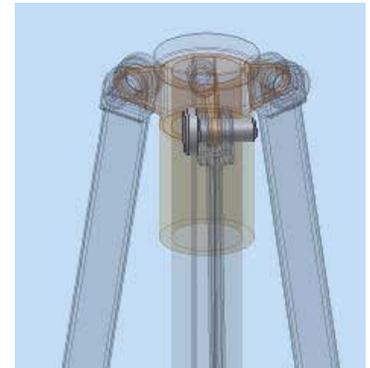
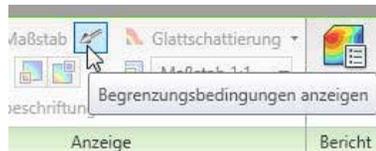
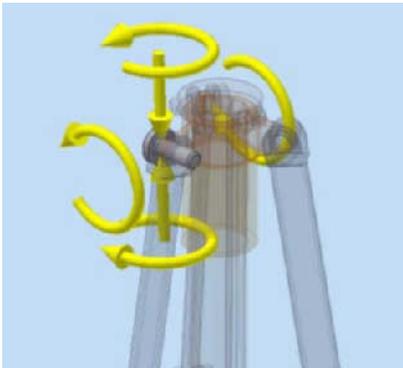
Für die erste Belastungsanalyse wird der **BOLZEN 4X10:4** ausgewählt.

Hätten wir im Ausgabediagramm der dynamischen Simulation mehrere Zeitschritte markiert, dann würden diese hier zur Auswahl stehen.

Da nur ein Zeitschritt exportiert wurde, ist dieser schon in das entsprechende Abrollfeld eingetragen. Untersucht

wird also die Belastung des Bolzens im Zeitschritt **4,87 SEKUNDEN**, an dem der Aufsetzer und damit der Belastungsstoß erfolgten.

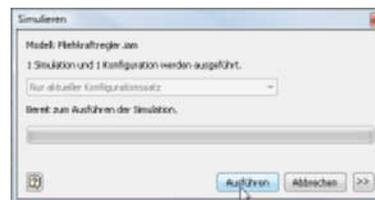
Wird das Eigenschaftsdialogfenster mit **OK** verlassen, dann wird der Bolzen optisch hervorgehoben dargestellt, bzw. alle anderen Bauteile werden abgeblendet.



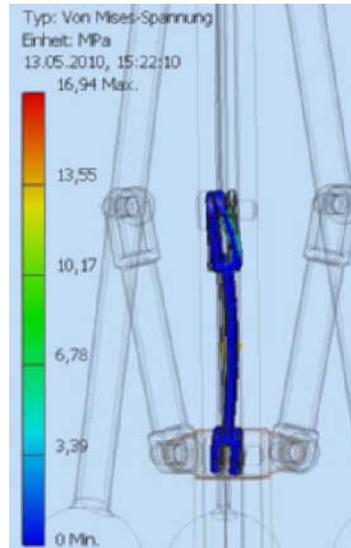
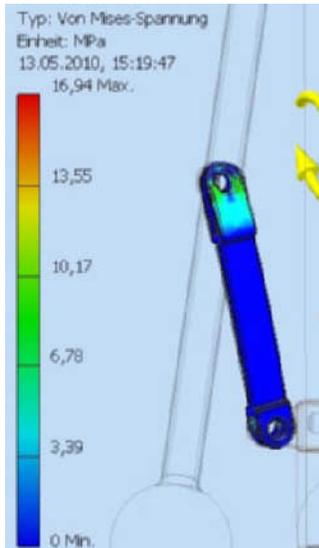
Entsprechend der Vorgabe werden alle auf das Bauteil einwirkenden Lasten mit gelben Pfeilen dargestellt. Mitunter kann das recht hilfreich sein, manchmal sieht man jedoch das Bauteil vor lauter Lasten nicht mehr. Der Button **BEGRENZUNGSBEDINGUNGEN ANZEIGEN** in der Funktionsgruppe **ANZEIGE** schaltet die Anzeige der Lasten ein und aus.

14.12.6 Die Belastungsanalysen

Jetzt kann sofort die Belastungsanalyse über die Schaltfläche **SIMULIEREN** gestartet werden. Im Dialogfenster wird **AUSFÜHREN** geklickt, und nach einer kurzen Zeit gibt's das Ergebnis.



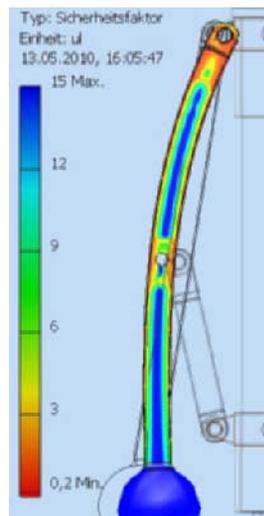
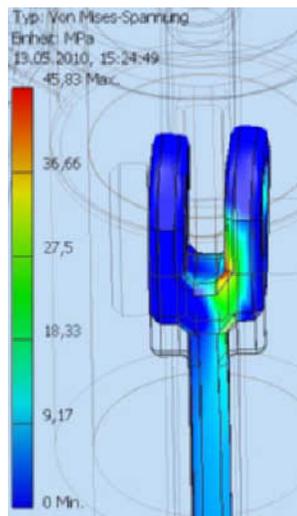
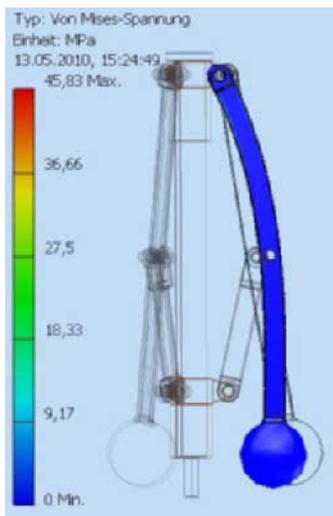
14.12 Export nach FEM und FE-Analyse von Bauteilen

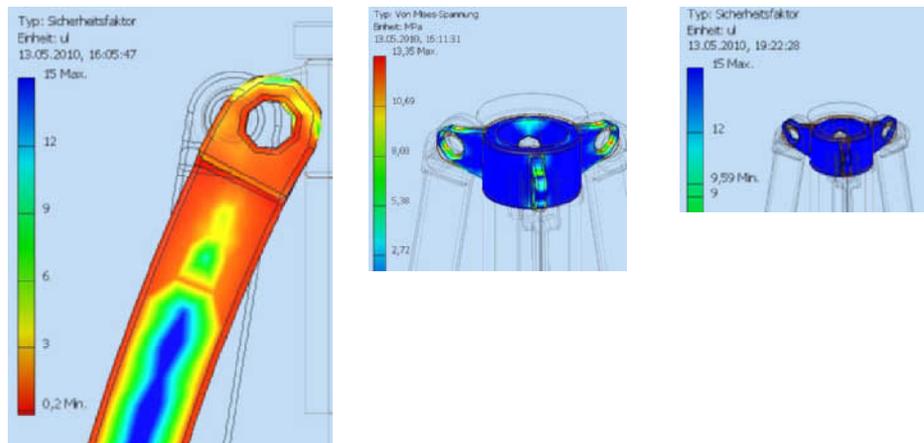


Auch die Gelenkstange, in der zwar höhere Spannungen auftreten als im Bolzen, ist an keiner Stelle gefährdet.

Die dritte Simulation, die der Gewichtsstange, bringt etwas Interessanteres zutage.

Die Verformungsart beim Aufsetzen war erwarten, die Spannungen liegen an der oberen Gelenkstelle aber immerhin bei ca. 45 MPa.





Der Werkstoff der Gewichtsstange ist Blei, und dieses Material verformt sich auch bei niedrigen Spannungen schon recht bald plastisch. Der Sicherheitsfaktor zeigt deutlich, dass der minimale Wert bei 0,2 liegt, also eigentlich nicht mehr tolerierbar ist.

Die vierte Simulation, die der oberen Gleitbuchse, verläuft dagegen wieder völlig unkritisch. Der Sicherheitsfaktor zeigt hier einen minimalen Wert von 9,59 an.

14.12.7 Fazit

Um diesen kleinen Mechanismus zu optimieren, fängt die eigentlich Arbeit genau an dieser Stelle an.

Es müssten weitere dynamische Simulationen mit unterschiedlichen Drehzahlen und vor allem mit unterschiedlichen Drehzahlverläufen, siehe Eingabediagramm des Antriebs, durchgeführt werden.

Für all diese Simulationen müssen FE-Analysen erfolgen. Die Auswertung der Spannungen, Verformungen und Sicherheitsfaktoren sollte mit verschiedenen Werkstoffen erfolgen, sodass schlussendlich an die Optimierung der geometrischen Eigenschaften der Bauteile gegangen werden kann.

Auch diese Optimierung der Formgebung wird immer wieder ein Hin und Her zwischen den belastungs- und werkstoffmäßigen Optima und den fertigungstechnischen bzw. wirtschaftlichen Optima sein.

Dieser Prozess, der hier in diesem Buch nur recht grob angerissen wurde, stellt das eigentliche Prototyping, das in der Einleitung des Buches kurz angesprochen wurde, dar.