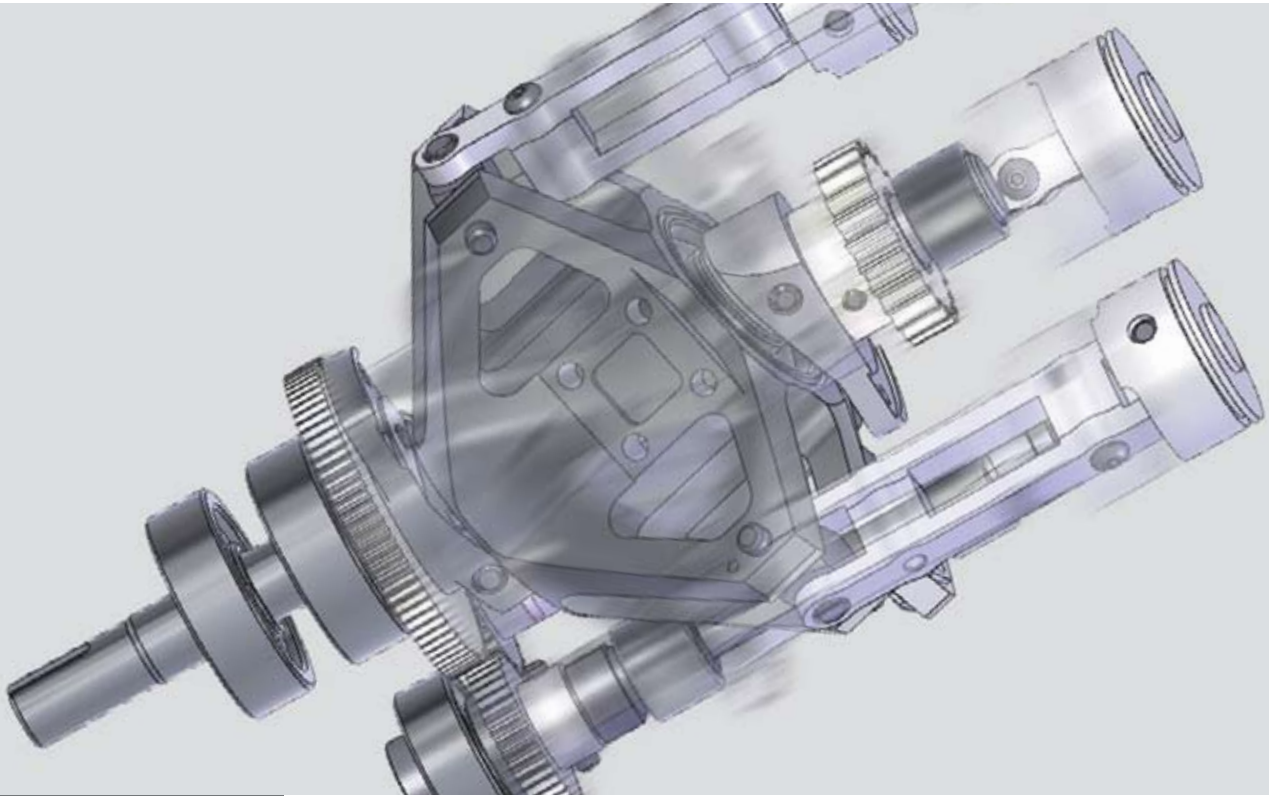


Bewegungssimulation



ÜBERSICHT

Was versteht man unter Bewegungssimulation? Welche Probleme lassen sich damit lösen? Wie kann die Produktkonstruktion davon profitieren? In diesem Dokument werden einige dieser Themen angesprochen und Beispielprobleme erörtert, die durch Bewegungssimulation gelöst werden können. Außerdem werden praktische Anwendungen vorgestellt, bei denen die Bewegungssimulation als CAE-Konstruktionswerkzeug eingesetzt wurde.

Die Bewegungssimulation liefert vollständige quantitative Informationen über die Kinematik (einschließlich Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) und die Dynamik (einschließlich Gelenkreaktionen, Trägheitskräften und Leistungsanforderungen) aller Komponenten eines beweglichen Mechanismus.

Einführung

In den 80er Jahren, als CAE-Methoden (Computer-Aided Engineering) in der technischen Konstruktion Einzug hielten, hat sich die Finite-Elemente-Analyse (FEA) zum ersten gemeinhin eingesetzten Simulationswerkzeug entwickelt. Im Laufe der Jahre konnten Konstrukteure damit die Formstabilität neuer Produkte untersuchen und in vielen Fällen auf die zeitaufwändige und teure Prototyperstellung verzichten. Stattdessen wurden kostengünstige Computer-Simulationen an den CAD-Modellen ausgeführt.

Angesichts der zunehmenden Komplexität mechanischer Produkte und des immer stärker werdenden Konkurrenzkampfs, der immer kürzere Markteinführungszeiten für neue Konstruktionen erforderlich macht, geraten die Ingenieure heutzutage verstärkt unter Druck. Eine Ausweitung der Simulation über die FEA hinaus erscheint daher oftmals dringend erforderlich. Neben der Simulation der Formstabilität mithilfe der FEA müssen die Ingenieure vor der Erstellung physischer Prototypen auch die kinematischen und dynamischen Eigenschaften neuer Produkte bestimmen.

Die Bewegungssimulation, auch unter der Bezeichnung Starrkörperdynamik bekannt, bietet einen Simulationsansatz, mit dem diese Probleme gelöst werden können. Sie wird immer häufiger angewandt, und mit zunehmender Verbreitung wächst auch die Neugier der Konstrukteure in Bezug auf diese Methode. Fragen, die in diesem Zusammenhang auftauchen, sind zum Beispiel: Was ist das eigentlich? Welche Probleme lassen sich damit lösen? Wie kann die Produktkonstruktion davon profitieren?

Bewegungssimulation für mechanische Analyse und Synthese

Angenommen, ein Ingenieur konstruiert einen Ellipsenzirkel zur Zeichnung unterschiedlicher Ellipsen. Nach der Definition von Verknüpfungen in der CAD-Baugruppe kann er das Modell animieren, um zu prüfen, wie sich die Komponenten des Mechanismus bewegen (siehe Abbildung 1). So kann zwar die relative Bewegung der Baugruppenkomponenten dargestellt werden, die Bewegungsgeschwindigkeit ist dabei jedoch irrelevant und das Timing willkürlich. Zur Bestimmung von Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Gelenkreaktionen, Leistungsanforderungen usw. benötigen die Konstrukteure ein leistungstärkeres Werkzeug. Hier greift die Bewegungssimulation.

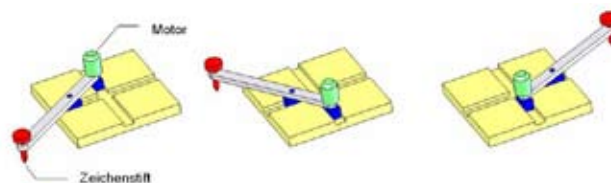


ABBILDUNG 1: UNTERSCHIEDLICHE POSITIONEN EINES ELLIPSENZIRKELS, DIE MIT EINEM CAD-ANIMATOR SIMULIERT WURDEN.

Die Bewegungssimulation liefert vollständige quantitative Informationen über die Kinematik (einschließlich Position, Geschwindigkeit und Beschleunigung) und die Dynamik (einschließlich Gelenkreaktionen, Trägheitskräften und Leistungsanforderungen) aller Komponenten eines beweglichen Mechanismus. Außerdem ist es oftmals von entscheidender Bedeutung, dass die Ergebnisse der Bewegungssimulation praktisch ohne zusätzlichen Zeitaufwand ermittelt werden können, da alle zur Ausführung dieser Simulation erforderlichen Daten bereits im CAD-Baugruppenmodell definiert wurden. Sie müssen lediglich an das Bewegungssimulationsprogramm übertragen werden.

Im Falle des oben beschriebenen Ellipsenzirkels muss der Konstrukteur lediglich die Motorgeschwindigkeit, die nachzuzeichnenden Punkte sowie die gewünschten Bewegungsergebnisse festlegen. Alle anderen Aufgaben werden vom Programm automatisch ausgeführt, ein Eingreifen des Anwenders ist nicht erforderlich. Das Bewegungssimulationsprogramm verwendet die Materialeigenschaften der CAD-Teile zur Definition der Trägheitseigenschaften der einzelnen Mechanismuskomponenten. Die Verknüpfungsbedingungen der CAD-Baugruppe werden in kinematische Verbindungen umgewandelt. Anschließend werden automatisch Gleichungen erstellt, die die Mechanismusbewegungen beschreiben.

Im Gegensatz zu den flexiblen Strukturen, die mithilfe der FEA untersucht werden, handelt es sich bei Mechanismen um aus starren Komponenten zusammengesetzte Baugruppen, die nur über wenige Freiheitsgrade verfügen. Mit einem numerischen Gleichungslöser gelingt die Lösung von Bewegungsgleichungen im Handumdrehen. Die Ergebnisse umfassen vollständige Informationen zu Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Gelenkreaktionen und Trägheitslasten aller mechanischen Komponenten sowie die Leistung, die erforderlich ist, um die Bewegung aufrecht zu erhalten (siehe Abbildung 2).

Das Bewegungssimulationsprogramm verwendet die Materialeigenschaften der CAD-Teile zur Definition der Trägheitseigenschaften der einzelnen Komponenten des Mechanismus. Die Verknüpfungsbedingungen der CAD-Baugruppe werden in kinematische Verbindungen umgewandelt.

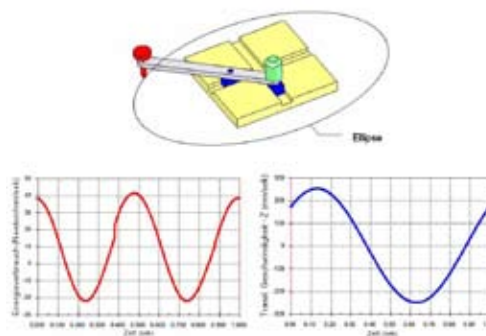


ABBILDUNG 2: LINEARE GESCHWINDIGKEIT UND ERFORDERLICHE MOTORLEISTUNG, BERECHNET VON EINEM BEWEGUNGSSIMULATOR.

Die Bewegungssimulation der in Abbildung 3 dargestellten Kurbelschleife stellt eine Übung dar, die häufig in Lehrbüchern über die Kinematik von Maschinen zu finden ist. In diesem Fall ist das Ziel die Ermittlung der Winkelgeschwindigkeit und der Beschleunigung des Schwinghebels bei Rotation der Kurbel mit konstanter Geschwindigkeit. Das Problem kann mit diversen analytischen Methoden gelöst werden. Die von Studenten vielleicht am häufigsten verwendete Methode ist der Einsatz komplexer Zahlen. Wenn man ein solches Problem „von Hand“ lösen will, sind jedoch umfangreiche Berechnungen erforderlich. Selbst mit Tabellenkalkulationsprogrammen kann die Erstellung von Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdarstellungen durchaus einige Stunden in Anspruch nehmen. Bei Geometrieänderungen muss die gesamte Prozedur wiederholt werden, was für Studenten sicherlich eine interessante Aufgabe darstellt, sich in der Praxis der Produktentwicklung jedoch als vollkommen unmöglich erweist. Bewegungssimulationssoftware ermöglicht praktisch die sofortige Simulation der Bewegung der Kurbelschleife, da hier Daten verwendet werden, die bereits im CAD-Baugruppenmodell vorhanden sind.

Die Bewegungssimulation führt Interferenzprüfungen in Echtzeit aus und liefert die genauen räumlichen und zeitlichen Positionen aller Mechanismuskomponenten sowie die exakten Interferenzvolumina.

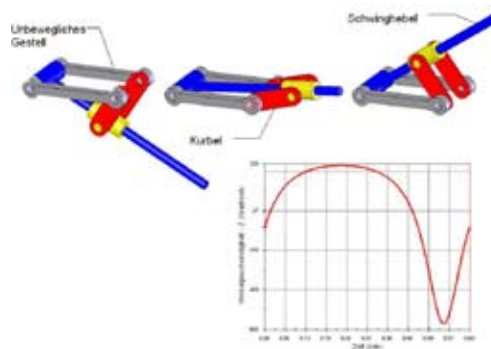


ABBILDUNG 3: SIMULATION EINES KURBELSCHLEIFEN-MECHANISMUS ZUR BERECHNUNG DER WINKELGESCHWINDIGKEIT DES SCHWINGHEBELS.

Im Rahmen der Bewegungssimulation wird außerdem eine Interferenzprüfung durchgeführt, die sich grundlegend von dem in der CAD-Baugruppenanimation verfügbaren Prozess unterscheidet. Die Bewegungssimulation führt Interferenzprüfungen in Echtzeit aus und liefert die genauen räumlichen und zeitlichen Positionen aller Mechanismuskomponenten sowie die exakten Interferenzvolumina. Bei Geometrieänderungen, wie beim Eilrückstellmechanismus in Abbildung 4, werden die Ergebnisse innerhalb weniger Sekunden aktualisiert. Jedes einzelne Ergebnis bezüglich der Bewegung kann in einem beliebigen Format grafisch oder tabellarisch dargestellt werden.

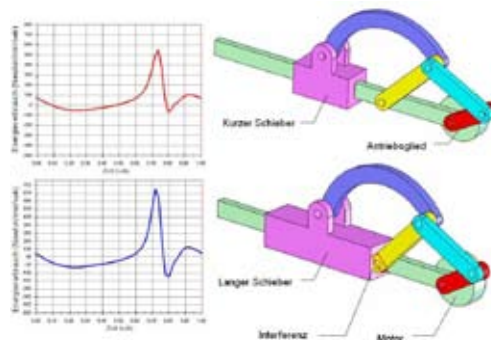


ABBILDUNG 4: ANWENDER KÖNNEN DIE INTERFERENZ ZWISCHEN SCHIEBER UND ANTRIEBSGLIED MÜHELOS ERMITTELN UND KORRIGIEREN.

Ingenieure können einfache Mechanismen wie den Ellipsenzirkel oder die oben beschriebene Kurbelschleife als 2D-Mechanismen darstellen. Zwar gestaltet sich deren Analyse „von Hand“ schwierig und zeitaufwändig, es gibt jedoch analytische Lösungsmethoden. Für 3D-Mechanismen gibt es dagegen keine etablierte analytische Lösungsmethode, selbst wenn es sich um einfache Mechanismen wie den in Abbildung 5 dargestellten handelt. Doch mit der Bewegungssimulation lässt sich das Problem innerhalb weniger Sekunden lösen, weil diese auf Mechanismen jeder Art und Komplexität ausgelegt ist und für 2D und 3D gleichermaßen eingesetzt werden kann. Selbst wenn ein Mechanismus eine größere Anzahl starrer Verbindungen, Federn, Dämpfer und Kontaktpaare enthält, wirkt sich dies kaum negativ auf die Lösungszeit aus. So können beispielsweise die Bewegungen der Frontaufhängung des Motorschlittens in Abbildung 6, die des Fitnessgeräts in Abbildung 7 oder die des CD-Laufwerks in Abbildung 8 genauso problemlos simuliert werden wie die Bewegungen der Kurbelschleife.



ABBILDUNG 5: EIN EINFACHER 3D-MECHANISMUS IST „PER HAND“ SCHWER ZU ANALYSIEREN, STELLT JEDOCH FÜR DIE BEWEGUNGSSIMULATION ÜBERHAUPT KEIN PROBLEM DAR.

Produktentwickler können die Bewegungssimulation nicht nur zur mechanischen Analyse, sondern auch zur mechanischen Synthese verwenden, indem sie Bewegungsbahnen in CAD-Geometrie konvertieren.



ABBILDUNG 6: DIE FRONTAUFHÄNGUNG EINES MOTORSCHLITTENS BESTEHT AUS ZAHLREICHEN VERBINDUNGEN, EINSCHLIEßLICH FEDERN UND DÄMPFERN.

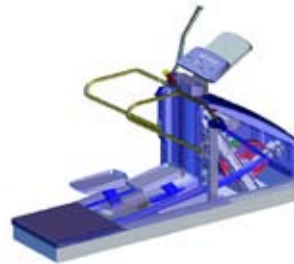


ABBILDUNG 7: BEI DER KONSTRUKTION DES FITNESSGERÄTS WIRD DIE BEWEGUNGSSIMULATION ZUR OPTIMIERUNG DER BEWEGUNGSBAHNEN DER TRITTFLÄCHEN SOWIE ZUR BERECHNUNG DER VOM NUTZER ERZEUGTEN LEISTUNG VERWENDET.



ABBILDUNG 8: EIN CD-LAUFWERK KANN MIT HILFE DER BEWEGUNGSSIMULATION PROBLEMLOS ANALYSIERT WERDEN, OBWOHL ES SICH DABEI UM EINEN KOMPLEXEN MECHANISMUS HANDELT.

Produktentwickler können die Bewegungssimulation nicht nur zur mechanischen Analyse, sondern auch zur mechanischen Synthese verwenden, indem sie Bewegungsbahnen in CAD-Geometrie konvertieren und diese zur Erstellung einer neuen Teilgeometrie heranziehen. In Abbildung 9 ist ein Beispielproblem dargestellt. Diese Konstruktion beinhaltet ein Kurvenglied, das einen Schieber entlang einer Führungsschiene bewegen soll. Mithilfe der Bewegungssimulation wird ein Profil dieses Kurvenglieds erstellt. Der Anwender gibt die gewünschte Schieberposition als Zeitfunktion an und zeichnet die Bewegung des Schiebers auf dem rotierenden leeren Kurvenglied (der runden Platte) nach. Anschließend konvertiert er die Bahnkurve in CAD-Geometrie, um das in Abbildung 10 dargestellte Kurvengliedprofil zu erstellen.

Konstrukteure können Bewegungsbahnen außerdem zur Prüfung der Bewegungen eines Industrieroboters verwenden.

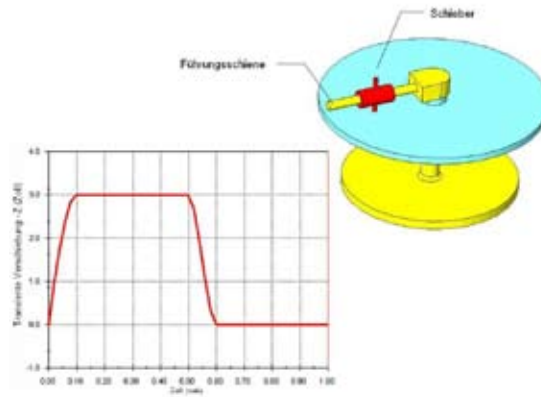


ABBILDUNG 9: EINE VERSCHIEBUNGSFUNKTION WIRD ANGEWENDET, UM DEN SCHIEBER ENTLANG DER FÜHRUNGSSCHIENE ZU BEWEGEN.

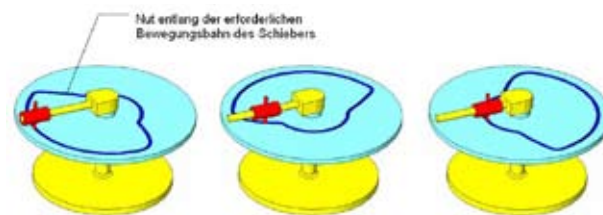


ABBILDUNG 10: DIE BEWEGUNG DES SCHIEBERS WIRD AUF DER ROTIERENDEN RUNDEN PLATTE NACHGEZEICHNET, UM EIN KURVENGLIEDPROFIL ZU ERSTELLEN. IN DER ABBILDUNG WIRD DIES MIT EINER IN DIE PLATTE GESCHNITTENEN NUT VERANSCHAULICHT.

Konstrukteure können die Bewegungsbahnen beispielsweise auch zur Prüfung der Bewegungen eines Industrieroboters verwenden. Eine Beispieldarstellung finden Sie in Abbildung 11. Durch einen Test des Werkzeugpfads können Informationen abgerufen werden, die für die Bestimmung der Größe des Roboters sowie des Leistungsbedarfs nötig sind. Dabei sind keine physischen Tests erforderlich.

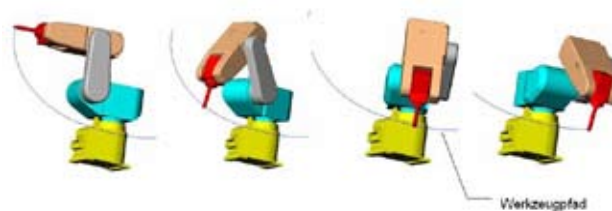


ABBILDUNG 11: DIE SIMULATION DER BEWEGUNG EINES INDUSTRIEROBOTERS DURCH MEHRERE POSITIONEN ERMÖGLICHT DIE ERSTELLUNG EINES WERKZEUGPFADS OHNE PHYSISCHE TESTS.

Ein weiteres wichtiges Einsatzgebiet der Bewegungssimulation liegt in Bewegungen, die durch Kollisionen zwischen beweglichen Körpern hervorgerufen werden. Zwar müssen bestimmte Annahmen hinsichtlich der Elastizität solcher aufeinanderprallenden Körper vorgenommen werden, die Bewegungssimulation liefert jedoch genaue Ergebnisse für Mechanismen mit Komponenten, die nur temporär in Kontakt sind (siehe Abbildung 12).

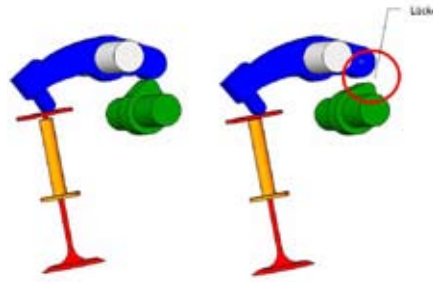


ABBILDUNG 12: AUFPRALL UND KONTAKT KÖNNEN IN DER BEWEGUNGSSIMULATION SIMULIERT WERDEN, UM BEISPIELSWEISE EINE LÜCKE ZU UNTERSUCHEN, DIE IN EINEM VENTILHUBMECHANISMUS ZWISCHEN EINEM KURVENGLIED UND EINEM KURVENGETRIEBE (KIPPHEBEL) ENTSTEHT.

Um sich einen Überblick darüber zu verschaffen, wie Bewegungssimulation und FEA in der mechanischen Simulation ineinander greifen, ist es sinnvoll, sich zunächst über die Grundlagen zu informieren, auf denen die beiden Werkzeuge basieren.

Zusammenspiel von Bewegungssimulation und FEA

Um sich einen Überblick darüber zu verschaffen, wie Bewegungssimulation und FEA in der mechanischen Simulation ineinander greifen, ist es sinnvoll, sich zunächst über die Grundlagen zu informieren, auf denen die beiden Werkzeuge basieren.

Bei der FEA handelt es sich um eine numerische Technik zur Strukturanalyse, die sich im CAE-Bereich zur Untersuchung von Strukturen durchgesetzt hat. Mit dieser Methode lässt sich das Verhalten aller fest unterstützten elastischen Objekte analysieren, z. B. das Verhalten des in Abbildung 13 dargestellten Bügels. Elastisch bedeutet in diesem Fall, dass das Objekt verformbar ist. Bei Anwendung einer statischen Last verformt sich der Bügel und bleibt dann bewegungslos. Bei Anwendung einer dynamischen Last vibriert der Bügel um die Gleichgewichtslage. Mithilfe der FEA können Verschiebungen, Dehnungen, Spannungen sowie die Vibration des Bügels unter statischer oder dynamischer Last untersucht werden.

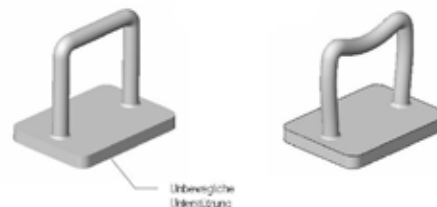
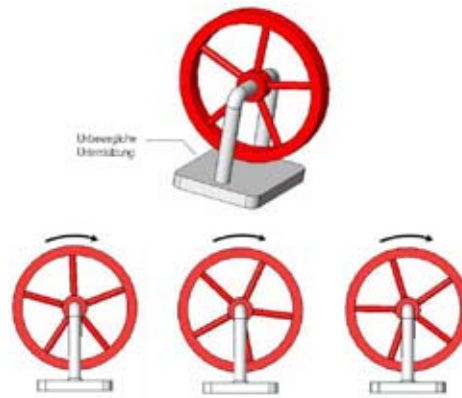


ABBILDUNG 13: BEI EINEM FEST UNTERSTÜTZTEN BÜGEL IST KEINE BEWEGUNG OHNE VERFORMUNG MÖGLICH.

Im Gegensatz dazu kann ein teilweise unterstütztes Objekt, wie das in Abbildung 14 dargestellte am Bügel aufgehängte Schwungrad, sich ohne Verformung drehen. Das Schwungrad kann sich als Starrkörper bewegen, wodurch das Gerät nicht als Struktur, sondern als Mechanismus definiert wird. Zur Untersuchung der Bewegung des Schwungrads wird die Bewegungssimulation verwendet. Dehnungen und Spannungen lassen sich nicht berechnen, wenn das Schwungrad als Starrkörper betrachtet wird. (Weitere Informationen dazu finden Sie in Anhang 1.)



Der Unterschied zwischen einer Struktur und einem Mechanismus ist manchmal nicht auf den ersten Blick erkennbar.

ABBILDUNG 14: EIN SCHWUNGRAD DREHT SICH ALS STARRKÖRPER UM DAS SCHARNIER, ÜBER DAS ES MIT DEM GESTELL VERBUNDEN IST (OBEN). DA EINE STARRKÖRPERBEWEGUNG VORHANDEN IST, GILT DAS GERÄT ALS MECHANISMUS (UNTEN).

Struktur und Mechanismus lassen sich nicht immer auf den ersten Blick unterscheiden, wie die beiden in Abbildung 15 dargestellten Geräte veranschaulichen. Beide verfügen über Schwingarme, die über ein Scharnier mit einem unbeweglichen Gestell verbunden sind. Beim rechten Gerät ist der Arm über eine Feder mit dem Gestell verbunden. Das Gerät ohne Feder ist der Mechanismus, da der Schwingarm frei rotieren kann. Unabhängig davon, ob er sich um das Scharnier dreht oder um die Gleichgewichtslage schwingt, ist während der Bewegung des Arms keinerlei Verformung von Geräteteilen erforderlich. Der Arm führt Starrkörperbewegungen aus, weshalb das linke Gerät als Mechanismus einzustufen ist. Konstrukteure können die Bewegungen mithilfe der Bewegungssimulation untersuchen.

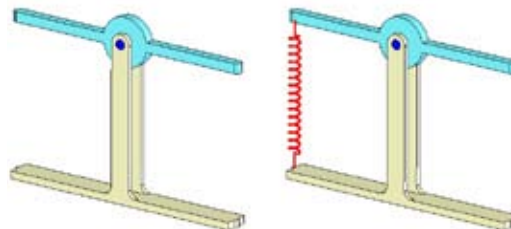


ABBILDUNG 15: DER SCHWINGARM IN DER LINKEN ABBILDUNG KANN SICH OHNE VERFORMUNG BEWEGEN; DAHER HANDELT ES SICH HIER UM EINEN MECHANISMUS. JEDE BEWEGUNG DES ARMS IN DER RECHTEN ABBILDUNG GEHT MIT EINER VERFORMUNG DER FEDER EINHER; DAHER HANDELT ES SICH HIER UM EINE STRUKTUR.

Durch das Hinzufügen der Feder ändert sich die Art des Geräts, da sich der Arm nun nicht mehr bewegen kann, ohne die Feder zu verformen. Die einzig mögliche Form einer kontinuierlichen Armbewegung ist die Vibration um die Gleichgewichtslage. Die Armbewegung geht mit einer Verformung der Feder einher, weshalb das Gerät auf der rechten Seite als Struktur einzustufen ist. Mithilfe der FEA kann die Vibration des Arms analysiert werden. Bei Bedarf ist anschließend eine Berechnung der Dehnungen und Spannungen in der Feder und anderen Komponenten möglich, die als elastische Körper betrachtet werden. (Weitere Informationen zu den Unterschieden zwischen Bewegungssimulation und FEA finden Sie in Anhang 2.)

Wenn der Konstrukteur nach Abschluss der Bewegungssimulationsstudien an einer der Mechanismuskomponenten eine Verformungs- und/oder Spannungsanalyse durchführen möchte, muss die entsprechende Komponente einer FEA-Strukturanalyse unterzogen werden.

Die für eine FEA-Strukturanalyse erforderlichen Eingabedaten, wie Gelenkreaktionen und auf die einzelnen Verbindungen des Mechanismus wirkende Trägheitskräfte, stammen aus den Ergebnissen der Bewegungssimulation. In der Bewegungssimulation werden diese Faktoren grundsätzlich berechnet, unabhängig davon, ob anschließend eine FEA durchgeführt wird oder nicht. Gelenkreaktionen und Trägheitskräfte befinden sich per definitionem im Gleichgewicht. Mechanismuskomponenten, die im Gleichgewicht befindlichen Lasten ausgesetzt sind, können mit der FEA untersucht werden und werden vom Analyseprogramm wie Strukturen behandelt.

Die „gekoppelte“ Simulation bietet den Vorteil der automatischen Definition der FEA-Lasten, wodurch Spekulationen und die für die manuelle Einrichtung typische höhere Fehleranfälligkeit vermieden werden können.

Der Ingenieur hat zwar die Möglichkeit, die Daten aus der Bewegungssimulation manuell an die FEA zu übertragen, die besten Ergebnisse werden jedoch erzielt, wenn die Ergebnisse der Bewegungssimulationssoftware automatisch in die FEA exportiert werden können. Wenn Bewegungssimulation und FEA auf diese Weise eingesetzt werden, sprechen wir von einer „gekoppelten“ Simulation. Dieser Ansatz bietet den Vorteil der automatischen Definition der FEA-Lasten, wodurch Spekulationen und die für die manuelle Einrichtung typische höhere Fehleranfälligkeit vermieden werden können.

Die gekoppelte Simulation wird am Beispiel des in Abbildung 16 dargestellten Kurbelmechanismus demonstriert. Hier geht es dem Konstrukteur um die Bestimmung der maximalen Spannungen in der Pleuelstange.

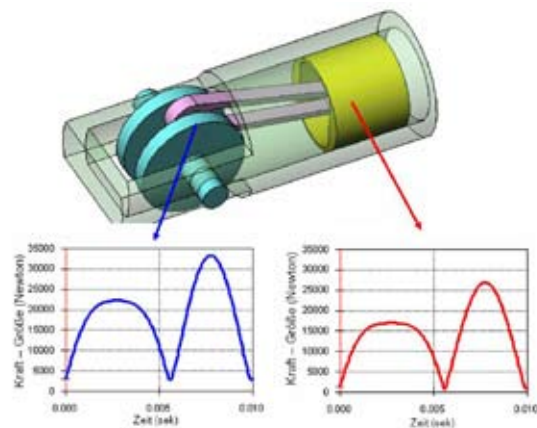


ABBILDUNG 16: ÜBER DIE BEWEGUNGSSIMULATION WERDEN REAKTIONEN AN BEIDEN ENDEN DER PLEUELSTANGE ERMITTELT. AUSSERDEM WERDEN DIE AUF DIE STANGE WIRKENDEN TRÄGHEITSKRÄFTE BERECHNET.

Wenn Sie Bewegungssimulation und FEA kombinieren möchten, gehen Sie folgendermaßen vor:

1. Verwenden Sie zunächst die Bewegungssimulation zur Ermittlung der Verschiebungen, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Gelenkreaktionen und Trägheitskräfte, die auf alle Komponenten innerhalb des für die Studie ausgewählten Bewegungsbereichs wirken. In dieser Phase werden alle Mechanismusverbindungen als Starrkörper betrachtet. Die Darstellungen in Abbildung 16 zeigen die Gelenkreaktionen der Pleuelstange während einer vollständigen Kurbeldrehung.

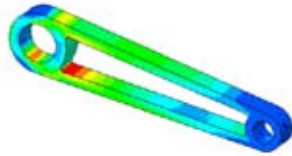


ABBILDUNG 19: DIE PLEUELSTANGE WIRD IN DER FEA ALS STRUKTUR BETRACHTET, SO DASS SPANNUNGEN BERECHNET WERDEN KÖNNEN.

Sowohl bei der Bewegungssimulation als auch bei der FEA ist ein CAD-Baugruppenmodell Ausgangspunkt und Voraussetzung für die Analyse.

Bewegungssimulation und Test

Mit der Bewegungssimulation lassen sich Zeitverlaufsdaten aus einem Test importieren. Auf diese Weise kann die Bewegung eines vorhandenen Mechanismus problemlos reproduziert und vollständig analysiert werden, einschließlich aller Gelenkreaktionen, Trägheitseffekte, Energieverbrauch usw. Bei diesem Ansatz werden kostengünstige Computermodelle anstelle von zeitaufwändigen und kostenintensiven Tests verwendet. Ebenso kann ein Mechanismus mit Eingaben analysiert werden, die von einer analytischen Funktion definiert werden.

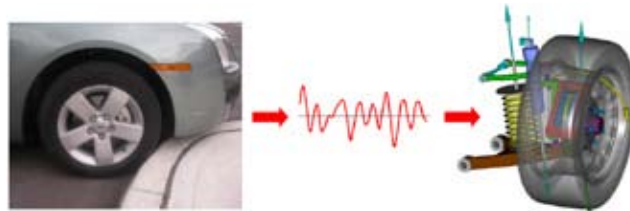


ABBILDUNG 20: DIE TESTDATEN DER BEWEGUNG DES QUERLENKERS WERDEN FÜR DAS AUFHÄNGUNGSMODELL IN DER BEWEGUNGSSIMULATION ALS EINGABE VERWENDET.

Nehmen wir beispielsweise die in Abbildung 20 dargestellte Radaufhängung eines Autos. In diesem Fall lassen sich mit der Bewegungssimulation folgende typische Fragen beantworten: Wie lange dauert es nach dem Auftreffen eines Rades auf die Bordsteinkante, bis die an der Aufhängung verursachte Schwingung abklingt? Welche Dämpfung ist für das Federbein erforderlich? Welche Spannungen treten in den Querlenkern und ihren Buchsen auf?

Integration von CAD, Bewegungssimulation und FEA

Sowohl bei der Bewegungssimulation als auch bei der FEA ist ein CAD-Baugruppenmodell Ausgangspunkt und Voraussetzung für die Analyse. Eine gemeinsame, integrierte Umgebung für alle drei Werkzeuge ermöglicht den Datenaustausch zwischen CAD, Bewegungssimulation und FEA. Durch diese Integration wird die für Standalone-Anwendungen typische, mühselige Datenübertragung über neutrale Dateiformate vermieden. Außerdem reduziert sich der Aufwand beim Einrichten von Bewegungssimulationsmodellen bei integrierten CAD-/Bewegungssimulationslösungen im Vergleich zu Lösungen mit gemeinsamer Schnittstelle.

Wie oben bereits erörtert, können Materialeigenschaften und CAD-Baugruppenverknüpfungen bei der Erstellung eines Bewegungssimulationsmodells „wieder verwendet“ werden. Die aus der Bewegungssimulation resultierenden Bewegungsbahnen können wieder in CAD-Geometrie umgewandelt werden. Dies ist jedoch nur in einer integrierten Softwareumgebung möglich. Zudem entfällt durch die Integration mit der CAD-Software die Notwendigkeit, eine eigene Datenbank für Bewegungssimulationsmodelle zu verwalten. Die Daten der Simulationsmodelle und die Simulationsergebnisse können in einer integrierten Umgebung gemeinsam mit dem CAD-Baugruppenmodell gespeichert werden. Zu guter Letzt ist noch zu beachten, dass CAD-Änderungen sowohl mit der Bewegungssimulation als auch mit der FEA vollständig assoziativ sind.

Das SolidWorks CAD-Programm mit den integrierten Zusatzanwendungen SolidWorks Simulation (FEA) und SolidWorks Motion (Bewegungssimulation) ist das Nonplusultra der integrierten Simulationswerkzeuge.

Das SolidWorks® CAD-Programm mit den integrierten Zusatzanwendungen SolidWorks Simulation (FEA) und SolidWorks Motion (Bewegungssimulation) ist das Nonplusultra der integrierten Simulationswerkzeuge. Die vollständige Integration wurde möglich, weil es sich bei SolidWorks, SolidWorks Simulation und SolidWorks Motion durchweg um native Windows® Anwendungen handelt. Alle drei Programme wurden gezielt für das Betriebssystem Windows entwickelt und nicht einfach von anderen Betriebssystemen portiert. Durch die vollständige Kompatibilität mit Windows wird auch die Kompatibilität mit anderen unter Windows ausgeführten Anwendungen sichergestellt.

SolidWorks Simulation, ein führendes FEA-Programm, hat sich in der Produktkonstruktion im engen Zusammenspiel mit CAD schon seit langem als sehr wertvolles Werkzeug erwiesen (Abbildung 21). Durch die Zusatzanwendung SolidWorks Motion ist nun eine noch umfassendere Simulation neuer Produkte sowie eine weitere Reduzierung der Anzahl physischer Prototypen in der Produktentwicklung möglich (Abbildung 22).

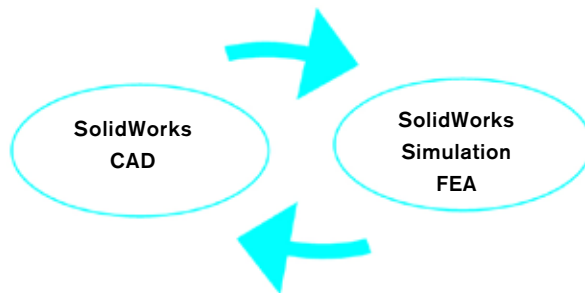


ABBILDUNG 21: IN DIESEM KONSTRUKTIONSPROZESS WERDEN CAD UND FEA ALS KONSTRUKTIONSWERKZEUGE EINGESETZT.

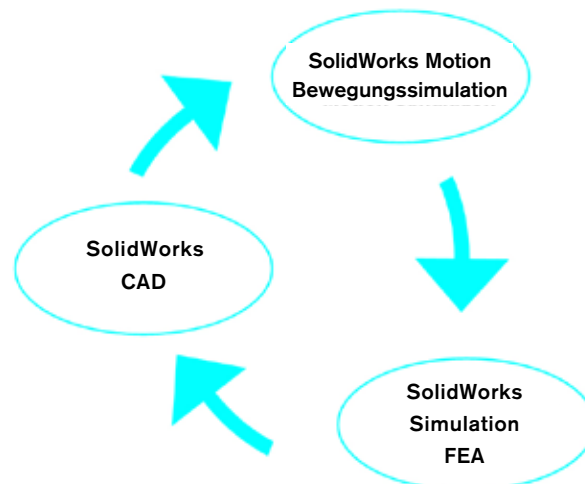


ABBILDUNG 22: DER KONSTRUKTIONSPROZESS PROFITIERT VOM EINSATZ DER BEWEGUNGSSIMULATION GEMEINSAM MIT CAD UND FEA.

Beispiele aus der Praxis

Tigercat

Tigercat (www.tigercat.com), ein marktführender Hersteller von Forstkulturgeräten wie Rückezügen, Schleppern und Fäll-Bündel-Maschinen, verwendete SolidWorks zur Konstruktion des in Abbildung 23 dargestellten Fällkopfes einer Fäll-Bündel-Maschine. Anschließend simulierten die Ingenieure des Unternehmens die Funktionen des Geräts mit SolidWorks Motion und SolidWorks Simulation. Nach Angaben von Tigercat konnten die empirischen Tests aufgrund der Simulation von Bewegung, Dynamik und Spannungen bei diesem komplexen Mechanismus auf einen einzigen Prototyp reduziert werden. Die Simulationsergebnisse wurden durch die Prototypentests vollständig bestätigt.

Die empirischen Tests konnten aufgrund der Simulation von Bewegung, Dynamik und Spannungen bei diesem komplexen Mechanismus auf einen einzigen Prototyp reduziert werden.



ABBILDUNG 23: DER FÄLLKOPF EINER FÄLL-BÜNDEL-MASCHINE DER FIRMA TIGERCAT MIT SITZ IN BRANDFORD, ONTARIO, KANADA, WURDE IN SOLIDWORKS KONSTRUIERT UND IN SOLIDWORKS MOTION UND SOLIDWORKS SIMULATION SIMULIERT.

FANUC Robotics America Inc.

FANUC Robotics (www.fanucrobotics.com) ist Hersteller einer weit verbreiteten Roboter-Produktlinie, die Kunden in vielen unterschiedlichen Branchen bei der Optimierung von Arbeitsabläufen sowie bei der Kostenreduzierung, Qualitätsverbesserung und Ausschussminimierung in der Fertigung unterstützt. Damit die unterschiedlichsten Kunden von diesen Vorzügen profitieren können, bietet FANUC Roboterwerkzeuge in vielen verschiedenen Größen an (siehe Abbildung 24). Die Kunden müssen dann die für ihre spezifischen Anwendungen geeignete Größe auswählen. Diese Auswahl erfolgt durch Analyse der Roboterleistung entlang angegebener Werkzeugpfade. Durch die Bewegungssimulation mit SolidWorks Motion gestalten sich Analyse und Auswahl wesentlich einfacher.

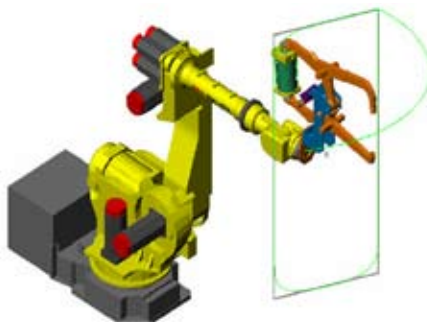


ABBILDUNG 24: DIESER INDUSTRIEROBOTER WURDE VON FANUC ROBOTICS AMERICA MIT SITZ IN ROCHESTER HILLS, MICHIGAN, USA KONSTRUIERT.

Durch den Einsatz von SolidWorks und SolidWorks Motion konnten Kosteneinsparungen von schätzungsweise 45.000 US-Dollar erzielt werden. Außerdem wurde die Testzeit auf nur 10 % des vorherigen Herstellungs- und Testprozesses reduziert.

Ward Machine Tool

Ward Machine Tool (www.wardcnc.com) ist mit der Konstruktion und Herstellung von kundenspezifischem Drehmaschinenfutter für Aluminiumfelgen, Rotationsaktuatoren und Spezialmaschinen befasst. Die Ingenieure von Ward konstruieren kundenspezifische Produkte, die noch nie zuvor hergestellt wurden. Dabei stellt die Simulation für sie ein unentbehrliches Werkzeug dar, mit dem sie die Funktionstüchtigkeit einer Konstruktion prüfen, bevor sie deren Fertigung in Auftrag geben. Das Unternehmen entwickelte und testete beispielsweise das in Abbildung 25 dargestellte doppel funktionale Multi-Range-Drehmaschinenfutter für Aluminiumfelgen und verzichtete dabei vollkommen auf das Testen physischer Prototypen. Nach Angaben von Ward konnten durch den Einsatz von SolidWorks und SolidWorks Motion Kosteneinsparungen von schätzungsweise 45.000 US-Dollar erzielt werden. Außerdem wurde die Testzeit auf nur 10 % des vorherigen Herstellungs- und Testprozesses reduziert.



ABBILDUNG 25: WARD MACHINE TOOL MIT SITZ IN FOWLerville, MICHIGAN, USA, KONSTRUIERTE DAS DREHMASCHINENFUTTER UND FÜHRTE EINE SIMULATION DURCH.

Synchroness

Synchroness (www.synchroness.com) ist eine Produktentwicklungsagentur, die in enger Zusammenarbeit mit ihren Kunden Produkte entwickelt, deren Bandbreite von Fitnessgeräten bis hin zu Lasersystemen reicht. Synchroness hat für die Optimierung der Vier-Stab-Verknüpfung der in Abbildung 26 dargestellten Scherenhebebühne sowohl SolidWorks Motion als auch SolidWorks Simulation eingesetzt. Laut Synchroness war das Konstruktionsteam in der Lage, die Bewegungssimulation mit nur geringem Schulungsaufwand und ohne Ausfallzeiten durchzuführen. Nach Angaben von Synchroness wurden durch den Einsatz der Simulation schnelle Konstruktionsiterationen möglich. Außerdem sei sie ein hervorragendes Visualisierungswerkzeug für Kundenpräsentationen – alles in allem ein ausschlaggebender Faktor für die erfolgreiche Konstruktionslösung.

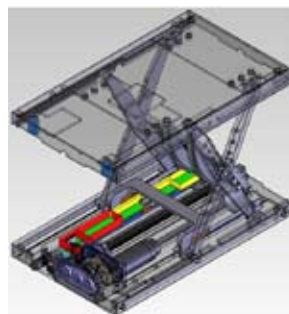


ABBILDUNG 26: DIESE HEBEBÜHNE WURDE VON DER FIRMA SYNCRONESS MIT SITZ IN WESTMINSTER, COLORADO, USA, UNTER EINSATZ DER KONSTRUKTIONSWERKZEUGE SOLIDWORKS, SOLIDWORKS MOTION UND SOLIDWORKS SIMULATION KONSTRUIERT.

ANHANG 1: Starrkörperbewegung

Wenn ein Objekt sich bewegen kann, ohne dabei einer Verformung zu unterliegen, nennt man diese Bewegung Starrkörperbewegung. Man spricht auch von Starrkörperformen. Beim Vorhandensein von Starrkörperbewegung(en) gilt ein Objekt als Mechanismus.

In Abbildung 27 ist ein Kugelgelenk dargestellt. Die Basis ist unbeweglich. Ein solches Gelenk verfügt über drei Starrkörperbewegungen, da es sich in drei unabhängige Richtungen (oder drei Rotationen) bewegen kann, ohne dabei einer Verformung zu unterliegen. Drei unabhängige Variablen, die auch als Freiheitsgrade bezeichnet werden, beschreiben die Position dieses Mechanismus.

Beim Vorhandensein von Starrkörperbewegung(en) gilt ein Objekt als Mechanismus.

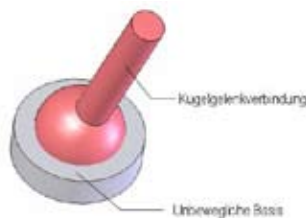


ABBILDUNG 27: BEIM HIER DARGESTELLTEN KUGELGELENKMECHANISMUS HANDELT ES SICH UM EIN KINEMATISCHES PAAR MIT DREI STARRKÖRPERBEWEGUNGEN.

In Abbildung 28 ist eine Platte dargestellt, die auf einer unbeweglichen Grundplatte gleitet. Dieser Mechanismus verfügt ebenfalls über drei Starrkörperbewegungen, da die Gleitplatte in zwei Richtungen verschoben und in einer Richtung gedreht werden kann, ohne dabei einer Verformung zu unterliegen. Auch hier wird die Position des Mechanismus durch drei Freiheitsgrade beschrieben.

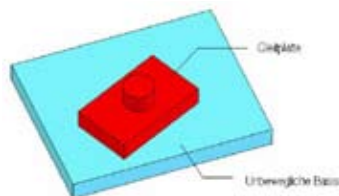


ABBILDUNG 28: DER GLEITPLATTENMECHANISMUS VERFÜGT ÜBER DREI STARRKÖRPERBEWEGUNGEN.

Die in Abbildung 29 dargestellte Vier-Stab-Verknüpfung verfügt über eine Starrkörperbewegung. Eine unabhängige Variable, beispielsweise die Winkelposition einer beliebigen Verbindung, beschreibt die Position des gesamten Mechanismus. Beachten Sie, dass Drehzapfen je nach Konstruktion eines Scharniers über lokale Starrkörperbewegungen verfügen können (Rotation um die Zapfenachse und/oder Gleiten entlang der Zapfenachse).

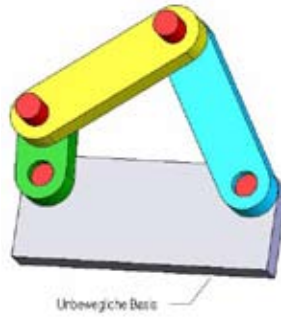


ABBILDUNG 29: DIE WINKELPOSITION EINER BELIEBIGEN VERBINDUNG DES MECHANISMUS DEFINIERT DIE POSITION DES GESAMTEN MECHANISMUS. DIESER MECHANISMUS VERFÜGT ÜBER EINE STARRKÖRPERBEWEGUNG.

Schwingungsmodi erfordern eine FEA-Analyse anstelle einer Bewegungsanalyse.

Alle drei hier dargestellten Mechanismen können außerdem Freiheitsgrade aufgrund von Bewegungen aufweisen, die aus Verformungen resultieren. Diese werden als „elastische Formen“ bezeichnet. In der Vier-Stab-Verknüpfung kann beispielsweise jede einzelne Verbindung eine Bewegung ausführen und gleichzeitig schwingen. Schwingungsmodi erfordern eine FEA-Analyse anstelle einer Bewegungsanalyse.

ANHANG 2: Bewegungssimulation und FEA im Vergleich

Bewegungssimulation und FEA ergänzen sich. Bei den Anwendungsgebieten kann es Überschneidungen geben, wie aus der folgenden Tabelle hervorgeht:

Art des Problems	FEA	Bewegungssimulation
Analyse von Strukturen (verformbare Objekte)	Ja	Nein*
Analyse von Mechanismen	Nein	Ja
Analyse von Verformungen und Spannungen	Ja	Nein
Analyse von Schwingungen	Ja	Nein**
Analyse von Modellen mit Starrkörperbewegungen	Nein***	Ja
Analysiertes Modell muss vernetzt sein	Ja	Nein
Analysiertes Modell wird in CAD vorbereitet	Ja	Ja

* Die Bewegungssimulation lässt einige verformbare Komponenten wie Federn und flexible Verbindungen zu. Wenn in der Analyse Bewegungen untersucht werden, die einen Aufprall beinhalten, definiert der Anwender die Elastizität der kollidierenden Körper.

** Schwingung kann mit der Bewegungssimulationssoftware analysiert werden, wenn das Modell elastische Komponenten wie Federn enthält. Eine solche Schwingungsanalyse beschränkt sich auf die von der Verformung dieser elastischen Komponenten verursachte Schwingung, während andere Mechanismuskomponenten (Verbindungen) starr bleiben.

*** Mit speziellen Modellierungstechniken, wie dem Hinzufügen von weichen Federn oder Massenträgheitsentlastung zum FEA-Modell, können Starrkörperbewegungen künstlich eliminiert werden, um eine FEA-Analyse von Strukturen mit Starrkörperbewegungen zu ermöglichen.

Fazit

Neben der Simulation der Formstabilität mithilfe der FEA müssen die Ingenieure vor der Erstellung physischer Prototypen auch die kinematischen und dynamischen Eigenschaften neuer Produkte bestimmen. Außerdem erscheint oftmals eine Ausweitung der Simulation über die FEA hinaus dringend erforderlich. Die Bewegungssimulation bietet einen Simulationsansatz, mit dem diese Probleme gelöst werden können. Die Ergebnisse der Bewegungssimulation können praktisch ohne zusätzlichen Zeitaufwand ermittelt werden, da alle zur Ausführung dieser Simulation erforderlichen Daten bereits im CAD-Baugruppenmodell definiert wurden.

Produktentwickler können die Bewegungssimulation nicht nur zur mechanischen Analyse, sondern auch zur mechanischen Synthese verwenden, indem sie Bewegungsbahnen in CAD-Geometrie konvertieren und diese zur Erstellung einer neuen Teilgeometrie heranziehen. Wenn der Konstrukteur nach Abschluss der Bewegungssimulationsstudien an einer der Mechanismuskomponenten eine Verformungs- und/oder Spannungsanalyse durchführen möchte, muss die entsprechende Komponente einer FEA-Strukturanalyse unterzogen werden. Die für eine FEA-Strukturanalyse erforderlichen Eingabedaten stammen aus den Ergebnissen der Bewegungssimulation.

Der Ingenieur hat zwar die Möglichkeit, die Daten aus der Bewegungssimulation manuell an die FEA zu übertragen, die besten Ergebnisse werden jedoch erzielt, wenn die Ergebnisse der Bewegungssimulationssoftware automatisch in die FEA exportiert werden können. Mit den vollständig integrierten Anwendungen SolidWorks Simulation und SolidWorks Motion bietet die SolidWorks Software genau diese Möglichkeiten. Zusammen ermöglichen diese SolidWorks Lösungen eine noch umfassendere Simulation neuer Produkte sowie eine weitere Reduzierung der Anzahl erforderlicher Prototypen.

Niederlassung Deutschland
Telefon: +49-(0)89-612-956-0
E-Mail: infogermany@solidworks.com

Hauptsitz Europa
Telefon: +33-(0)4-13-10-80-20
E-Mail: infoeurope@solidworks.com

Ihr Partner in der Schweiz
c+e forum AG
Netzibodenstrasse 33
CH-4133 Pratteln (Basel)
Telefon: +41-(0)58-433-33-33
E-Mail: info@ceforum.ch

www.ceforum.ch



Unternehmenssitz
Dassault Systèmes SolidWorks Corp.
300 Baker Avenue
Concord, MA 01742 USA
Telefon: +1-978-371-5011
E-Mail: info@solidworks.com

www.solidworks.de