

Simulation an virtuellen Prototypen von Schmalgangstaplern

Praxistests schon in der Planungsphase

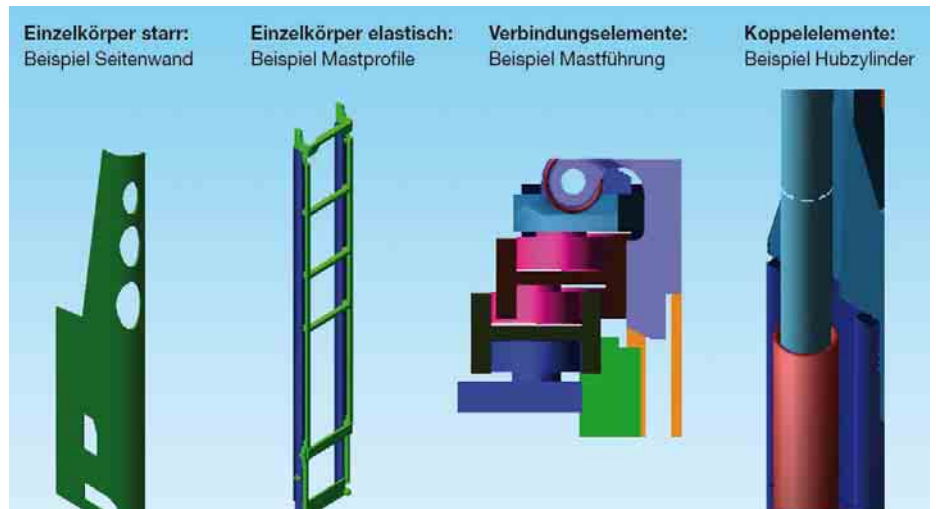
Die für Umschlagprozesse in Hochregallagern eingesetzten Kommissionier- und Schubmaststapler mit mehrteiligen Hubgerüsten stellen komplexe mehrdimensionale Schwingungssysteme dar. Die durch Hub-, Neige- und Fahrbewegungen des Fahrzeugs angeregten mehrdimensionalen Schwingungsvorgänge können die Effizienz des Warenumschlags vor allem bei Ein- und Auslagervorgängen mit voll ausgefahrenem Hubgerüst deutlich verringern. Mit einem vom Institut für Förder-technik und Logistik der Universität Stuttgart (IFT) im Auftrag der Still-Wagner GmbH in Reutlingen entwickelten Simulationswerkzeug kann das Schwingungsverhalten zukünftiger Fahrzeuggenerationen schon in der Planungsphase einer Entwicklung analysiert und optimiert werden.

■ Christian Vorwerk
■ Iljo Nikic

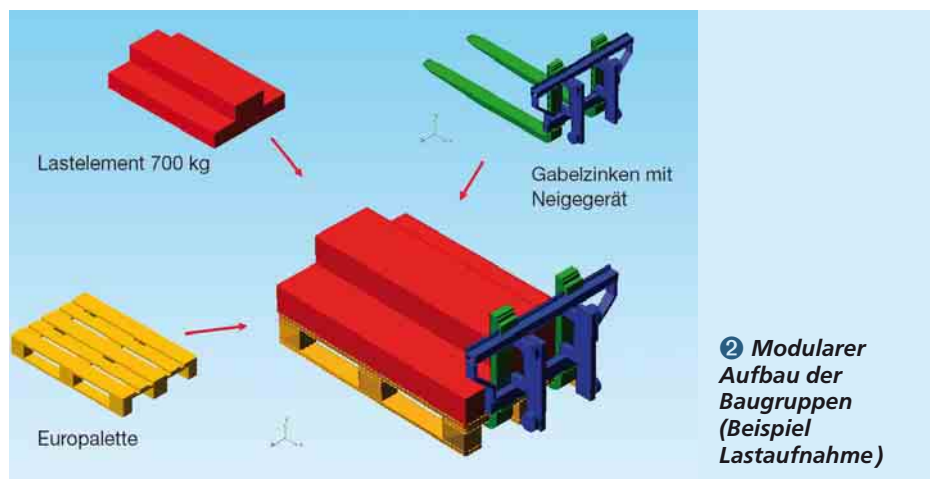
Beurteilung des dynamischen Fahrzeugverhaltens

Angesichts der durch den ständig zunehmenden Wettbewerbsdruck im Bereich der Distributionslogistik notwendigen weiteren Erhöhung der Dynamik von Umschlagprozessen muss die Flexibilität der Fahr- und Hubbewegungen von zukünftigen Schmalgangstaplern hohe Anforderungen erfüllen. Bei der Entwicklung neuer Fahrzeuggenerationen treten deshalb neben der mechanischen Konstruktion vor allem die dynamischen Eigenschaften unter praxisrelevanten Bedingungen in den Vordergrund, die in Abhängigkeit von der Anregung zu einer Überlagerung von Fahrzeugschwingungen in Längs- und Querrichtung mit Torsionsschwingungen des Hubgerüsts führen können. Eine Vorhersage des komplexen Schwingungsverhaltens ist mit analytischen Methoden der Festigkeits- und Schwingungslehre in einer frühen Entwicklungsphase jedoch nur bedingt möglich, da die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Systemkomponenten in Abhängigkeit von der jeweiligen Schwingungsanregung vom Konstrukteur nicht mit ausreichender Genauigkeit beurteilt werden können.

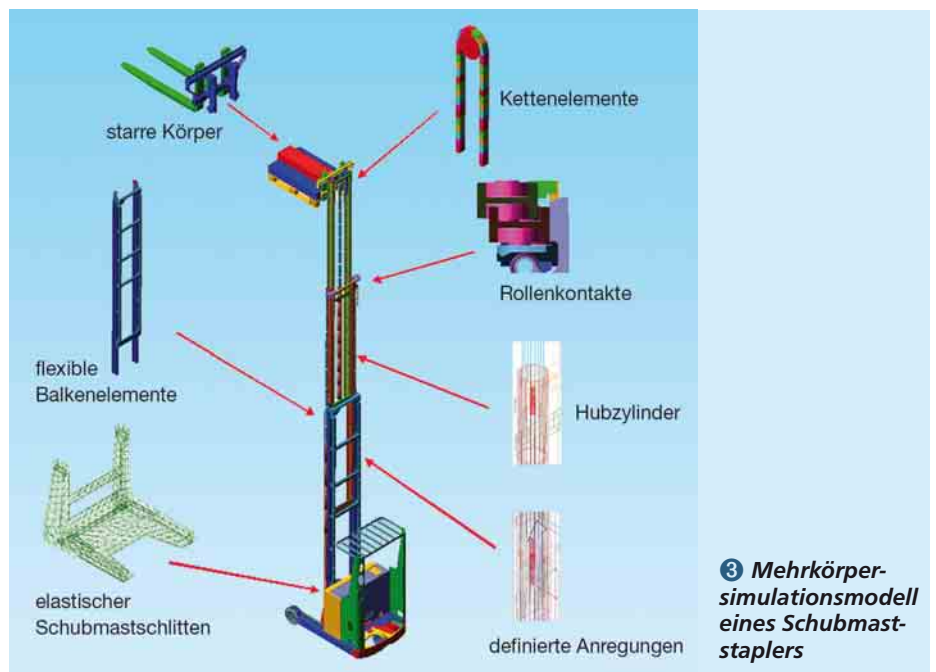
Im Zusammenhang mit Neuentwicklungen mussten deshalb bis vor kurzer Zeit zahlreiche Prototypen unter hohem Kosten- und Zeitaufwand gefertigt und im



1 Elemente eines MKS-Modells (Beispiele)



2 Modularer Aufbau der Baugruppen (Beispiel Lastaufnahme)



3 Mehrkörpersimulationsmodell eines Schubmaststaplers

phase

Labor- oder Feldversuch untersucht werden. Dabei zeigte sich häufig, dass sich das Schwingungsverhalten von Neufahrzeugen auch von einem erfahrenen Konstrukteur nicht zufriedenstellend vorhersagen lässt. Auch kleine Veränderungen der Federrate der Bereifung, der Massenverteilung und Steifigkeit des Hubgerüsts oder des Antriebsverhaltens können einen großen Einfluss auf die dynamischen Eigenschaften des Gesamtfahrzeugs haben.

Simulation mit virtuellem Prototyp

Mit Hilfe moderner und leistungsfähiger Softwarewerkzeuge können realitätsgetreue Simulationsmodelle entwickelt und eingesetzt werden, die eine Analyse und Optimierung des Systemverhaltens zukünftiger Flurförderzeuge und einzelner Komponenten bereits in der Entwicklungsphase ermöglichen. Neben einer deutlichen Kostenreduzierung wird durch den Einsatz eines Simulationsmodells als virtueller Prototyp eine schnelle und flexible Untersuchung zahlreicher Konstruktionsvarianten und unterschiedlicher Systemparameter ermöglicht. Aus der Simulation können weiterhin genauere Informationen für die mechanische und sicherheitstechnische Auslegung der Systemkomponenten bei verschiedenen Lastfällen gewonnen werden (beispielsweise Verformungen, Reaktionskräfte und Momente, Schwingungsformen, Beschleunigungen, Kollisionsstellen). Das Vorgehen bei der Erstellung eines Mehrkörpersimulationsmodells (MKS-Modell) erfolgt analog und möglichst zeitparallel zur konstruktiven Entwicklung eines Neufahrzeugs.

Zur zeitnahen Gewinnung nutzbarer Erkenntnisse für geplante Neuentwicklungen des Auftraggebers wurde deshalb am Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart ein komplexes MKS-Modell für Schubmaststapler erarbeitet, das eine Parametrisierung diverser konstruktiver und physikalischer Größen sowie eine schwingungstechnische Untersuchung des in der Entwicklung befindlichen Fahrzeugs ermöglicht. Um eine valide, praxisgetreue Vorhersage des zu erwartenden Fahrzeugverhaltens sicherstellen zu können, wurde das aus dem Simulationsmodell resultierende Schwingungsverhalten mit am bestehenden Flurförderzeug messtechnisch ermittelten Größen verifiziert. Um eine Analyse der Einzelkomponenten und hier vor allem der Hubmastelemente durchführen zu können, wurden die Steifigkeiten, Dämpfungen und Eigenfrequenzen aller relevanten Komponenten mit Hilfe einer ergänzenden Modalanalyse des Fahrzeugs bestimmt.

Einsatz von MKS-Modellen

Eine MKS kann sowohl gezielt zur Lösung kinetischer und kinematischer Probleme im Maschinenbau (z. B. Schwingungsoptimierung) als auch zur Visualisierung und Analyse komplexer Bewegungsabläufe eingesetzt werden. Zur Berechnung und Simulation dynamischer Maschinensysteme mit einem MKS-Modell muss zunächst ein mechanisches Ersatzmodell erstellt und in ein mathematisches Modell in Form eines Differentialgleichungssystems überführt werden. Dabei müssen die Geometrie, die Materialdaten, die dynamischen Systemparameter und die experimentelle Datenbasis berücksichtigt werden. Wegen der Abhängigkeit der Simulationsgeschwindigkeit von der Menge der resultierenden Differentialgleichungen soll das mechanische Ersatzmodell das zu untersuchende reale System in einer möglichst einfachen Form darstellen. Um auch für komplexe Systeme praxisrelevante Simulationsergebnisse zu erhalten, wird deshalb häufig ein wesentlich vereinfachtes Modell des Gesamtsystems verwendet und die Untersuchung von Einzelkomponenten mit separaten Modellen durchgeführt.

Mit Softwareprodukten zur Mehrkörpersimulation (z. B. MSC ADAMS oder alaska) können das Differentialgleichungssystem numerisch gelöst und die statischen und dynamischen Simulationsergebnisse visualisiert und analysiert werden.

Modellaufbau und Kalibrierung

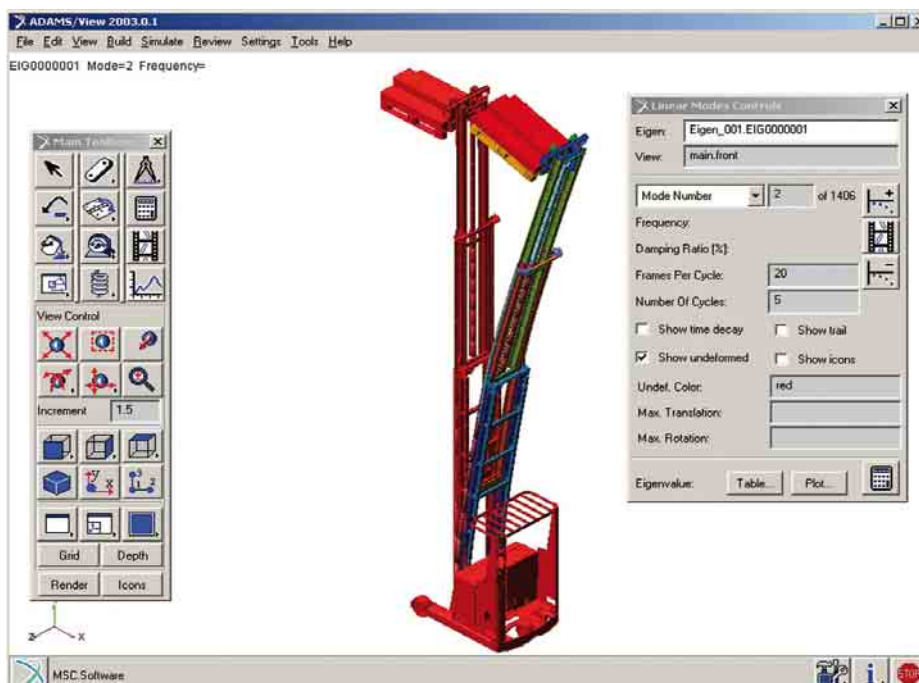
Um das MKS-Modell kalibrieren und verifizieren zu können, wurde zunächst ein Referenzmodell für einen dem IFT vom Auftraggeber zur Verfügung gestellten Schubmaststapler mit einem dreiteiligen Hubgerüst und einer maximalen Hubhöhe von 12 m erstellt.

Das dynamische Verhalten eines Schubmaststaplers mit (wegen der komplexen Struktur des Fahrzeugs) vielen Baukomponenten und Freiheitsgraden lässt sich mit Hilfe eines MKS-Modells gut nachbilden, da die mechanischen Ersatzmodelle aus massebehafteten, starren oder elastischen Einzelkörpern, idealisierten masselosen Verbindungselementen und äußeren Kräften aufgebaut werden können (Bild 1). Starre Körper werden nur über ihre Masse, die Lage des Schwerpunkts und den Trägheitstensor definiert. Die Darstellung der geometrischen Abmessungen dient nur der Visualisierung und hat keinen Einfluss auf das Verhalten des Modells. Bei flexiblen Körpern müssen zusätzlich noch die (für den Stapler aus der Auswertung der Modalanalyse gewonnenen) Steifigkeits- bzw. Elastizitätseigenschaften angegeben werden.

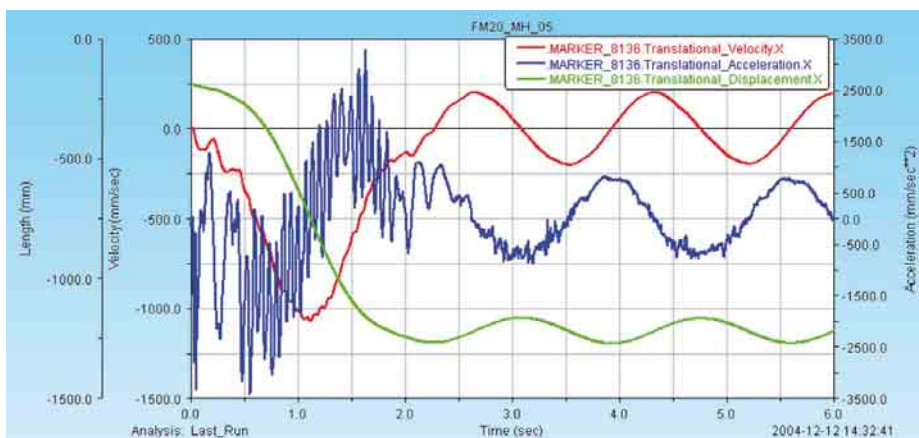
Das Schwingungsverhalten eines Staplers wird – abgesehen von den mechanischen Steifigkeiten und dem Dämpfungsvermögen der Systemkomponenten – maßgeblich durch die nichtlineare Charakteristik der Verbindungs- und Koppellemente (z. B. Hubketten, Mastführungsrollen, Hubzylinder) beeinflusst, die u. a. die mechanischen Wechselwirkungen zwischen den Elementen des Hubgerüsts bestimmen. Die Komplexität eines Mehrkörpersystems wird hauptsächlich durch die Anzahl der voneinander unabhängigen Bewegungsmöglichkeiten (Freiheitsgrade) charakterisiert, wobei starre Körper zunächst je drei translatorische und rotatorische Freiheitsgrade haben, die durch Verbindungs- und Koppellemente reduziert werden können.

Der Modellaufbau geschah mit Hilfe einer CAD-basierten, vollständig modularen Gestaltung des Fahrzeugs (Bild 2). Abstraktionsgrad und Detaillierung wurden unter Berücksichtigung der verfügbaren Rechenleistung eines leistungsstarken Standard-PC an die gestellte Aufgabe angepasst. Der hohe Detaillierungsgrad des in MSC-ADAMS umgesetzten MKS-Modells mit annähernd 500 Einzelkörpern (Bild 3) ermöglicht die Berücksichtigung der Verformung einzelner Elemente jedes Mastrahmens, des Einflusses der Steifigkeit und Dämpfung von Ketten und Hubzylindern und bildet mit Hilfe einer in das Modell eingebetteten Finite-Elemente-Struktur (sog. Superelement) auch Verformungen des Schubschlittens nach. Die mit ADAMS ermittelten Eigenfrequenzen und -formen des Gesamtfahrzeugs (Bild 4) und der Strukturkomponenten wurden mit den messtechnisch ermittelten Werten abgeglichen; anschließend wurde das Modellverhalten mit praxisrelevanten Anregungen verifiziert.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein datenbank-basiertes Werkzeug geschaffen, das dem Konstrukteur auf der Grundlage eines Baukastensystems verschiedene Variationen der Fahrzeuggeometrie anbietet. Die Simulation des Schwingungsverhaltens kann jederzeit unter Verwendung der eingestellten Parameter aufgerufen und mit den Simulationsergebnissen anderer Parameter verglichen werden (Bild 5). Dabei lässt das Werkzeug eine Kombination verschiedener Systemanregungen und Lastannahmen zu.



4 Erste Eigenform des Schubmaststaplers (Nickschwingung)



5 Analyse des Schwingungsverhaltens am virtuellen Prototypen

(Bilder: IFT)

Resümee und Ausblick

Das Schwingungsverhalten eines Schubmaststaplers wurde messtechnisch untersucht und daraus eine aussagekräftige Datenbasis zur Validierung und Anpassung eines adaptiven Simulationswerkzeugs generiert. Der Konstrukteur erhält somit die Möglichkeit, vielfältige Variationen der zukünftigen Fahrzeugstruktur und Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung bereits an einem virtuellen Prototyp zu simulieren und damit den Zeit- und Kostenaufwand einer Neuentwicklung deutlich zu reduzieren. Das Werkzeug wird vom IFT im Rahmen aktueller Forschungsprojekte auch für andere Flurförderzeuge eingesetzt. □

Dipl.-Ing. Christian Vorwerk
ist Oberingenieur am
Institut für Fördertechnik
und Logistik der Universität
Stuttgart



Dipl.-Ing. Iljo Nikic
ist wissenschaftlicher
Mitarbeiter am Institut für
Fördertechnik und Logistik
der Universität Stuttgart

