

## Optimierung des Schwingungsverhaltens von Scherearbeitsbühnen

# Immer höher hinaus ...

Durch die Kombination einer experimentellen Schwingungsanalyse mit einem geeigneten Simulationsmodell kann das beim Einsatz von Scherearbeitsbühnen vor allem für große Arbeitshöhen relevante Schwingungsverhalten beurteilt und optimiert werden. Um die im späteren Praxiseinsatz an den mechanischen Komponenten entstehenden Bauteilbelastungen gleichzeitig exakt bestimmen zu können, wurde vom Institut für Fördertechnik und Logistik (IFT) der Universität Stuttgart ein Mehrkörpersimulationsmodell erstellt und im Rahmen einer methodischen Neukonstruktion der Weiss GmbH in Unterschwarzach mit ergänzenden Finite-Elemente-Untersuchungen verknüpft.

- Christian Vorwerk
- Christian Häfner
- Christian Uetz

### Montagearbeiten in großer Höhe

Eine Vielzahl von Montage-, Inspektions- und Wartungstätigkeiten in öffentlichen und privaten Gebäuden erfordert ein Arbeiten in einer Höhe von bis zu 20 m. Der Einsatz von Leitern, temporären Gerüsten oder aufwändigen bauseitigen Lösungen ist in vielen Fällen nicht möglich oder unter kosten- und sicherheitstechnischen Gesichtspunkten nicht vertretbar. Wegen des schnellen, flexiblen und kostengünstigen Einsatzes haben sich in den letzten Jahren unterschiedliche Typen von Hubarbeitsbühnen sowohl für den Innen- als auch für den Außenbereich durchgesetzt. Eine hydraulisch oder elektromechanisch ange-

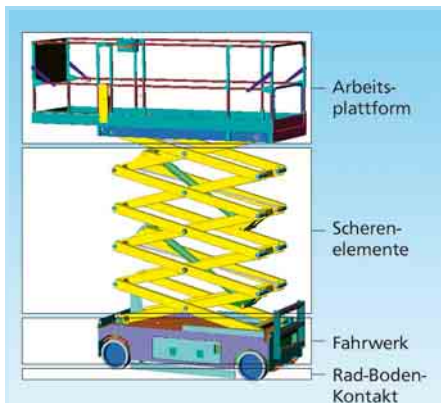
triebene Hubarbeitsbühne (Hubsteiger) verfügt über eine Arbeitsplattform mit einem meist im Bodenbereich befindlichen Einstieg. Die Hubmechanik wird je nach Zielsetzung z. B. über einen beweglichen Arm, eine Scherenkonstruktion oder über senkrechte Masten ausgeführt. Für im Innenbereich häufig anfallende Wartungsarbeiten in unterschiedlichen Höhen (z. B. Lampenwechsel, Deckenreparaturen oder Inspektionen von Lüftungskanälen) kommen hauptsächlich Scherearbeitsbühnen zum Einsatz (Bild 1). Die Arbeitshöhe der Plattform wird hydraulisch über Hubzylinder eingestellt, die auf unterschiedliche Scherenelemente wirken. Der Fahrtrieb der Arbeitsbühne besteht aus zwei Elektromotoren, die jeweils ein ungelenktes Hinterrad über angeflanschte Getriebe antreiben.

### Gewährleistung der Standsicherheit ...

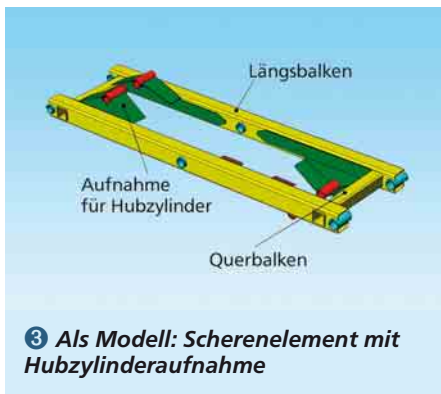
Um das geforderte Einsatzspektrum möglichst gut abdecken zu können, müssen moderne Arbeitsbühnen sehr große Arbeitshöhen bei gleichzeitig möglichst begrenzten Grundabmessungen zulassen. Diese hohen, schlanken Geräte können durch Fahr- und Hubbewegungen, Wind Einfluss oder das Bedienpersonal leicht zu nennenswerten Nick- und Torsionsschwingungen angeregt werden, deren Amplitude die Standsicherheit der Arbeitsbühne ernsthaft gefährden kann. Dabei hängt das Schwingungsverhalten außer von der Anregung und der Bodenneigung vom Schwerpunkt der bis zu 500 kg betragenden Nutzlast ab, der bei einer Höhe von bis zu 20 m wegen der Möglichkeit des beidseitigen Ausschubs der Arbeitsplattform in Fahrtrichtung um mehr als 5 m (!) variieren kann. Die für eine rationelle Fertigung notwendige Leichtbauweise der mechanischen Konstruktion kann dieses Problem ggf. weiter verschärfen.



1 Scherearbeitsbühne mit einer Arbeitshöhe bis 17,5 m



**2 Hauptbaugruppen der Scherenscheibearbeitsbühne**



**3 Als Modell: Scherenelement mit Hubzylinderaufnahme**

Um die statische und dynamische Standfestigkeit einer Scherenscheibearbeitsbühne für alle möglichen Einsatzszenarien auch bei unterschiedlichen Nutzlastverteilungen auf der Arbeitsplattform gewährleisten zu können, sollte eine Analyse des Schwingungsverhaltens der Geräte unbedingt erfolgen. Hierfür bietet sich die Modellierung der Arbeitsbühne, der Nutzlast (Bedienpersonal, Werkzeug, Material) und

der Fahr- und Hubbewegungen in einer Mehrkörpersimulation (MKS) an. Mit dem Rückgriff auf Werkzeuge der Simulationstechnik kann das unternehmerische Risiko einer Produktentwicklung und -optimierung entscheidend minimiert werden. Neben der Möglichkeit zur Vermeidung falsch dimensionierter Systemelemente lässt sich vor allem die Produktsicherheit bereits am virtuellen Prototypen überprüfen, so dass der Kosten- und Zeitaufwand deutlich reduziert werden kann.

### ... durch Modellbildung

Mechanische Systeme werden üblicherweise mit einer Mehrkörpersimulation (MKS) und/oder einer Finite-Elemente-Untersuchung analysiert. Während die Finite-Elemente-Methode (FEM) überwiegend für die detaillierte Berechnung von Teilstrukturen und Festigkeitsuntersuchungen zur Anwendung kommt, wird die MKS vor allem bei der Analyse des Bewegungsverhaltens kompletter Systeme verwendet. Inzwischen kann das dynamische Verhalten von komplexen Mechanismen mit großen Bewegungsumfängen durch die Integration der MKS in die Computer-Aided-Engineering-Umgebung kostengünstig und zeitsparend simuliert werden.

Mehrkörpersysteme bestehen aus einer endlichen Anzahl von starren oder elastischen Körpern, die über Koppellemente miteinander verbunden sind. Koppellemente können in Form von starren (Lager, Gelenke, Führungen) oder nachgiebigen Bindungselementen (Feder, Dämpfer) sowie in Form von Regelmechanismen (Stellmotoren) auftreten. Da die Analyse eines mechanischen Systems mit einer MKS teilweise sehr komplexe Modelle erfordert, wird auch bei Neukonstruktionen nach Möglichkeit zunächst eine Nachbildung des Systems im Istzustand angestrebt. Dieses Vorgehen ermöglicht eine Kalibrierung

und Verifikation des Modellverhaltens mit dem realen Verhalten des Systems in der Praxis.

Das mechanische Ersatzmodell der analysierten Scherenscheibearbeitsbühne im Istzustand aus insgesamt rd. 200 teilweise elastischen Körpern und 50 Koppellementen gliedert sich in die vier Hauptbaugruppen Boden, Fahrwerk, Scherenelemente und Arbeitsplattform (Bild 2) und hat damit über 600 Freiheitsgrade. Da sich die Scherenelemente unter der einwirkenden Belastung deutlich verformen können und die an den Gelenken entstehenden Kräfte als Schnittstelle zwischen dem MKS-Modell und der Finite-Elemente-Berechnung dienen sollten, mussten die Quer-, Längs- und Torsionssteifigkeiten sowie das Dämpfungsverhalten der Längsbalken im mechanischen Ersatzmodell möglichst genau nachgebildet werden (Bild 3).

### ... und Kalibrierung

Anschließend wurden die Ergebnisse des mathematischen Modells mit dem Verhalten des realen Systems verglichen, das durch Labormessungen im IFT ermittelt worden war. Bei diesen Messungen wurden kapazitive Beschleunigungssensoren an mehreren Stellen der Arbeitsplattform appliziert und das Schwingungsverhalten bei unterschiedlichen Anregungen, Arbeitshöhen und Nutzlasten erfasst (Bild 4). Zur Kalibrierung und Validierung des Modells wurde zunächst ein Vergleich der maßgeblichen Eigenfrequenzen des Simulationsmodells und des realen Systems vorgenommen. Zur Ermittlung der dominierenden Eigenfrequenzen der Scherenscheibearbeitsbühne diente eine Fourier-Analyse der Messwerte.

Da das Verhalten der MKS von einer Vielzahl von teilweise nur näherungsweise bekannten Parametern abhängt (z. B. Steifigkeiten und Dämpfungen der Struktur-



**4 Schwingungsmessungen im Labor des IFT**

elemente), werden die resultierenden Kräfte und Momente an den Gelenken der Scherenelemente zur genaueren Berechnung der Bauteilspannungen und -verformungen in einem Finite-Elemente-Modell genutzt. Mit diesem Modell können dann die benötigten Parameter ermittelt und zurück in die MKS exportiert werden. Durch eine Variation weiterer Größen (z. B. Steifigkeit der Hubzylinder, Rad-Boden-Kontakt) wird das Mehrkörpermodell so lange verbessert, bis die gewünschte Genauig-

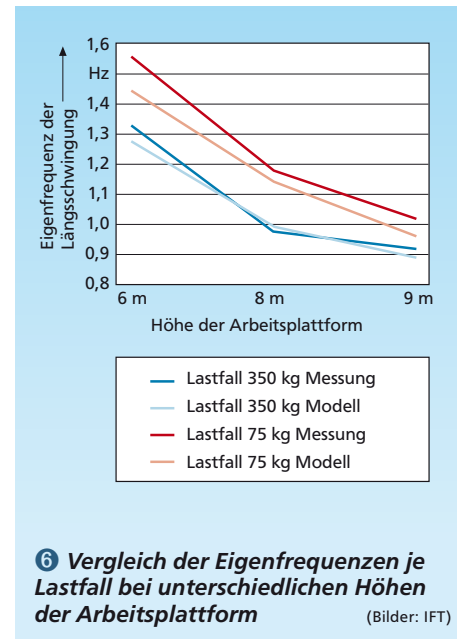
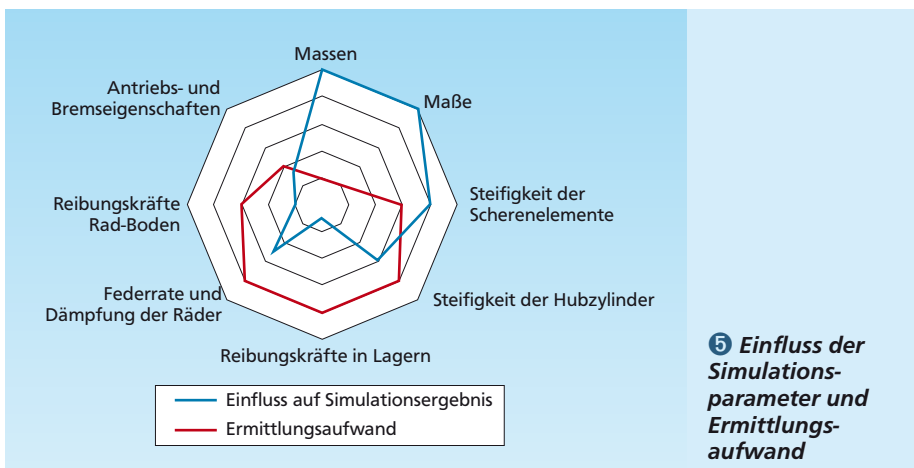
keit im Systemverhalten erreicht ist und damit ein kalibriertes Modell vorliegt. Dieses iterative Vorgehen ist typisch für die schrittweise Modellierung komplexer Systeme. Für eine zielgerichtete Optimierung müssen dabei der Aufwand zur Bestimmung der Simulationsparameter und ihr Einfluss auf das Schwingungsverhalten beachtet werden (Bild 5).

Da sowohl die entstehenden Eigenfrequenzen als auch der Einfluss des Schwingungsverhaltens auf die Standsicherheit erheblich von der Größe der Nutzlast abhängen, wurde bei der Parametervariation besonderer Wert auf ein praxisgetreues Verhalten der MKS im Bereich höherer Nutzlasten gelegt. Durch die Optimierung des Modells konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Praxisverhalten erzielt werden (Bild 6). Die sich aus der MKS ergebenden und in der Praxis nur sehr aufwändig ermittelbaren Gelenkkräfte wurden zur Unterstützung der Werkstoffauswahl und der Konstruktion der Scherenelemente genutzt und ermöglichen bei der Anwendung von zwei Hubzylindern eine gleichmäßige Kraft- und Spannungsverteilung im Scherenpaket.

Nach der erfolgreichen Verifikation des Modellverhaltens mit dem realen Schwingungsverhalten wird eine Variation des Modells durchgeführt, indem z. B. Scherenelemente ergänzt und verändert werden. Dieses variierte Modell liefert dem Konstrukteur detaillierte und praxistreue Informationen über das zu erwartende Schwingungsverhalten und über die daraus resultierende Standsicherheit der Scherearbeitsbühne.

**Resümee und Ausblick**

Im Auftrag der Weiss GmbH in Unterschwarzach wurde vom Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart das Schwingungsverhalten einer Scherearbeitsbühne experimentell untersucht



und die dynamische Standsicherheit einer Neukonstruktion mit einem Mehrkörpersimulationsmodell analysiert. Sowohl am virtuellen Prototypen als auch am realen Fahrzeug konnte nachgewiesen werden, dass Fahr- und Hubbewegungen der Scherenbühne bis zu einer Arbeitshöhe von 17,5 m und bei maximaler Nutzlast ohne Beeinträchtigung der Betriebsicherheit möglich sind. Der Einsatz geeigneter Simulationstechnik zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens mechanischer Systeme gestattet bei einer Neukonstruktion einen erheblich kürzeren Zeit- und Kostenaufwand in der Planungsphase. □

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

**cand. mach. Christian Häfner**  
ist wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart

**cand. mach. Christian Uetz**  
ist wissenschaftliche Hilfskraft am Institut für Fördertechnik und Logistik der Universität Stuttgart