

# „Mehrkörpersystem- (MKS-) Simulation in der Seilbahntechnik“

In: Internationale Seilbahn-Rundschau ISR, 8/2001, Seite 8-9

Kuppelbare Einseilumlaufbahnen, gleich ob Kabinen- oder Sesselbahnen, sind z. Zt. das dominierende System, wenn es um den Ersatz alter oder den Bau neuer Anlagen geht. Der Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München beschäftigt sich in einem Forschungsprojekt mit der „Simulation der Stationseinfahrt kuppelbarer Einseilumlaufbahnen“. Zum Einsatz kommt dabei ein MKS-Simulationsprogramm, ein Hilfsmittel das bei der Berechnung technischer Systeme, wie z. B. in der Fahrzeugtechnik, bereits weit verbreitet ist. Vorliegender Beitrag soll anhand der Simulation der Stationseinfahrt zeigen, dass derartige Programme auch für seilbahntechnische Berechnungen ein geeignetes Werkzeug darstellen können.

## Ausgangssituation

Fahrzeuge von Einseilumlaufbahnen sind im Fahrbetrieb erheblichen dynamischen Belastungen, insbesondere durch Stützenüber- und Stationseinfahrten, unterworfen. Um eine sinnvolle Dimensionierung der Bauteile zu gewährleisten müssen diese mess- bzw. versuchstechnisch und/oder rechnerisch ermittelt werden. Die rechnerische Ermittlung dynamischer Bewegungen erfolgt über die Berechnung von sog. Mehrkörpersystemen. Als Mehrkörpersystem wird die Verknüpfung von Einzelkörpern durch geeignete Koppel-elemente (Gelenke, Federn, Dämpfer, Führungen, Kräfte) bezeichnet.

Die MKS-Berechnung erfolgt in der Regel in 3 Schritten:

1. Aufstellung des mechanischen Ersatzmodells
2. Generierung des mathematischen Ersatzmodells
3. Berechnung des mathematischen Ersatzmodells

Bei traditioneller Vorgehensweise - der „händischen“ Berechnung - wird das mathematische Ersatzmodell (System von Bewegungsgleichungen) mittels bewähr-

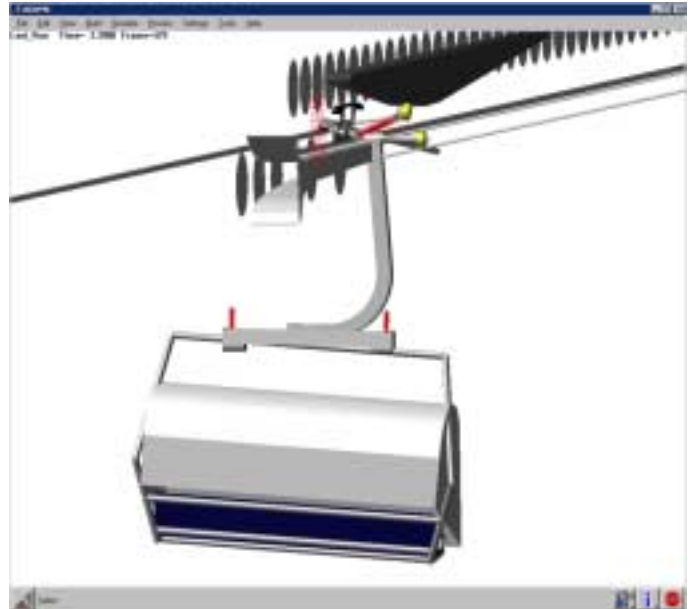


Abb. 1: ADAMS-Animation der Stationseinfahrt

ter Grundgleichungen (Newton/Euler) und Prinzipien der Mechanik (d’Alembert/Jour-dain/LaGrange II) aus dem mechanischen Ersatzmodell erstellt und nach einer numerischen Lösungsmethode (z.B. Runge-Kutta) berechnet. Ein äußerst aufwendiger und insbesondere bei der numerischen Lösung fehleranfälliger Prozess der außerdem hinsichtlich Flexibilität der Modellierung und Benutzerfreundlichkeit einige Wünsche offen lässt.

Diese Nachteile werden durch die Verwendung von MKS-Simulationsprogrammen, wie z.B. das vom Lehrstuhl fml verwendete System ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems), weitgehend behoben. Derartige Systeme übernehmen für den Anwender automatisch die Generierung und Berechnung des mathematischen Ersatzmodells und bieten darüberhinaus neben einer benutzerfreundlichen 3D/CAD-Oberfläche zur Erstellung des mechanischen Ersatzmodells auch einen sog. Postprozessor zur Darstellung und Visualisierung bzw. Animation der Berechnungsergebnisse (Abb. 1).

Folgende Merkmale bzw. Vorteile lassen sich zusammenfassen:

- Erhebliche Zeitersparnis („händische“ Berechnung entfällt)
- Flexibilität gegenüber Modelländerungen
- Komplexität der Modelle „fast“ beliebig (eingeschränkt durch Rechnerleistung)
- Berechnung von Zwangskräften (Gelenkkräfte) problemlos möglich
- Erstellung des Ersatzmodells aus CAD-Zeichnungen
- Umfangreiche Visualisierungsmöglichkeiten (Animationen) der Berechnungsergebnisse

### Ersatzmodell

Das mechanische Ersatzmodell besteht aus drei Baugruppen: Fahrzeug, Station und Förderseil. Das Fahrzeugmodell (Abb. 2) besteht aus den Bauteilen Klemme, Gehänge, Aufhängung, Fahrbetriebsmittel und Beladung. Die Klemme wird in zwei Einzelteile (Kuppelhebel, Klemmenhauptteil) aufgeteilt. Ebenso das Gehänge, das zur Berücksichtigung seiner Elastizität in einen, durch ein Drehgelenk verbundenen, oberen und unteren Teil aufgetrennt wird. Das Fahrzeug besteht damit aus 7 beweglichen Starrkörpern mit insgesamt 8 unabhängigen Freiheitsgraden (Minimalkoordinaten), welche durch geeignete Gelenke und Feder-/Dämpfer-Systeme miteinander verbunden werden.

Die Station besitzt in Form des Einfahrtrichters lediglich ein bewegliches Bauteil, die Stationsführungen (Führungsschiene, Kuppelschiene, Laufschiene) werden als masselose, nicht bewegliche Führungselemente abgebildet. Als Stationsfördereinrichtungen werden ausschließlich Reifenförderer betrachtet, die mittels eines stark vereinfachten Reifenmodells (Feder/Dämpfer)

als Kräfte auf die Klemme modelliert werden. Das Förderseil, an dem die Klemme mit einem Drehgelenk befestigt ist, wird als masseloser Punkt modelliert. Das Seil bewegt sich entlang der als Führungselement modellierten Lastwegkurve, Abweichungen von der Lastwegkurve durch Stöße bei der Stationseinfahrt werden durch zusätzliche auf die Klemme wirkende Feder-/Dämpfer-Kräfte berücksichtigt.

Die für die Simulationsrechnung benötigten technischen Daten der beweglichen Einzelkörper (Massen, Trägheiten, Schwerpunktlagen) werden direkt mit dem CAD-Tool von ADAMS bei der Erstellung des

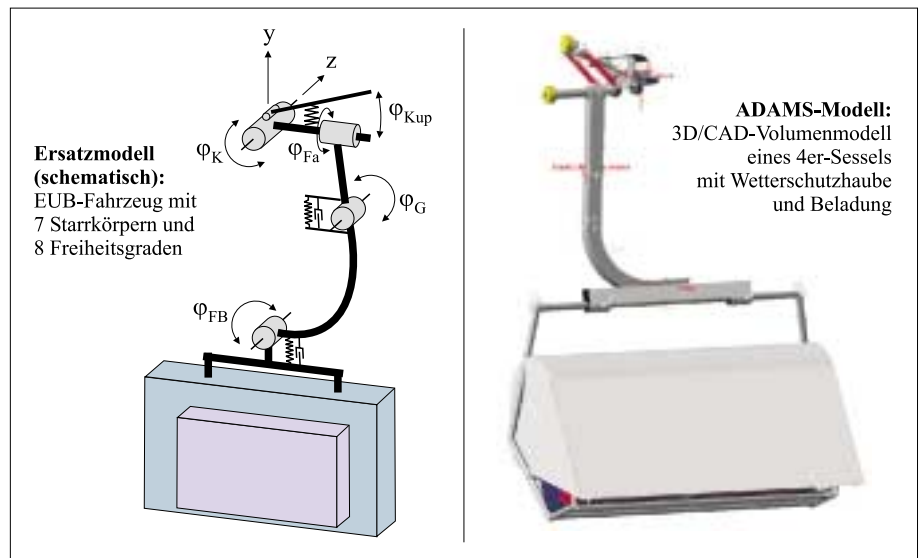


Abb. 2: Ersatzmodell eines EUB-Fahrzeugs

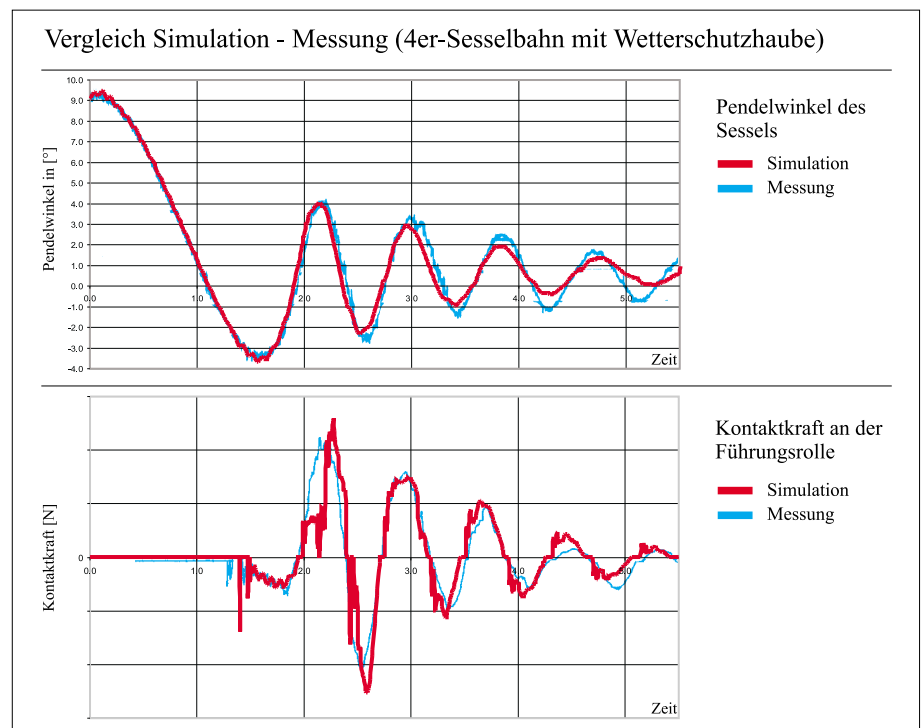


Abb. 3: Vergleich von Simulation und Messung

Ersatzmodells ermittelt. Die für die Verknüpfungen der Baugruppen bzw. Einzelkörper benötigten Parameter (Feder-/Dämpferwerte) werden theoretisch (z.B. Gehängeelastizität mittels FEM-Analyse) oder empirisch (z.B. Gummidämpfer der Fahrzeugaufhängung) bestimmt.

## **Verifizierung**

Das oben umrissene Ersatzmodell wurde in ADAMS für eine existierende 4er-Sesselbahn mit Wetterschutzhauben (siehe Abb. 2) erstellt und berechnet. Für verschiedenste Einfahrkonfigurationen (unterschiedliche Beladungen, unterschiedliche Pendelwinkel) wurden die Simulationsergebnisse mit - an der modellierten Anlage durchgeführten - Einfahrmessungen verglichen (Abb. 3). Dabei zeigen sich für die meisten Stationseinfahrten recht gute Übereinstimmungen von Rechnung und Messung.

## **Zusammenfassung**

Die guten Ergebnisse der Vergleichsrechnungen zeigen, dass das entwickelte Modell das Bewegungsverhalten des bzw. die Kraftwirkungen auf das Fahrzeug bei der Stationseinfahrt zufriedenstellend wiedergeben kann. Ebenso ist denkbar, dass sich auch andere Problemstellungen – wie z.B. die Stützenüberfahrt – mit einer MKS-Simulation betrachten lassen. Dabei muss jedoch angemerkt werden, dass – bei allen Vorzügen die eine MKS-Simulation bietet – doch ein erheblicher Aufwand für die Erstellung und Verifizierung eines realitätstreuen Modells betrieben werden muss.

Da neben der reinen Berechnung auch Optimierungsüberlegungen (wie z.B. Reduzierung der Bauteilbelastungen, Schwingungsreduzierungen oder Verbesserungen des Fahrkomforts) Anwendungsmöglichkeiten der MKS-Simulation sind, kann diese Werkzeug bei komplexen Problemstellungen auch für den Seilbahnkonstrukteur ein vielversprechendes Hilfsmittel sein.

*Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. Günthner ist Ordinarius des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der TU München, Dipl.-Ing. M. Löhr ist wiss. Assistent am selben Lehrstuhl.*