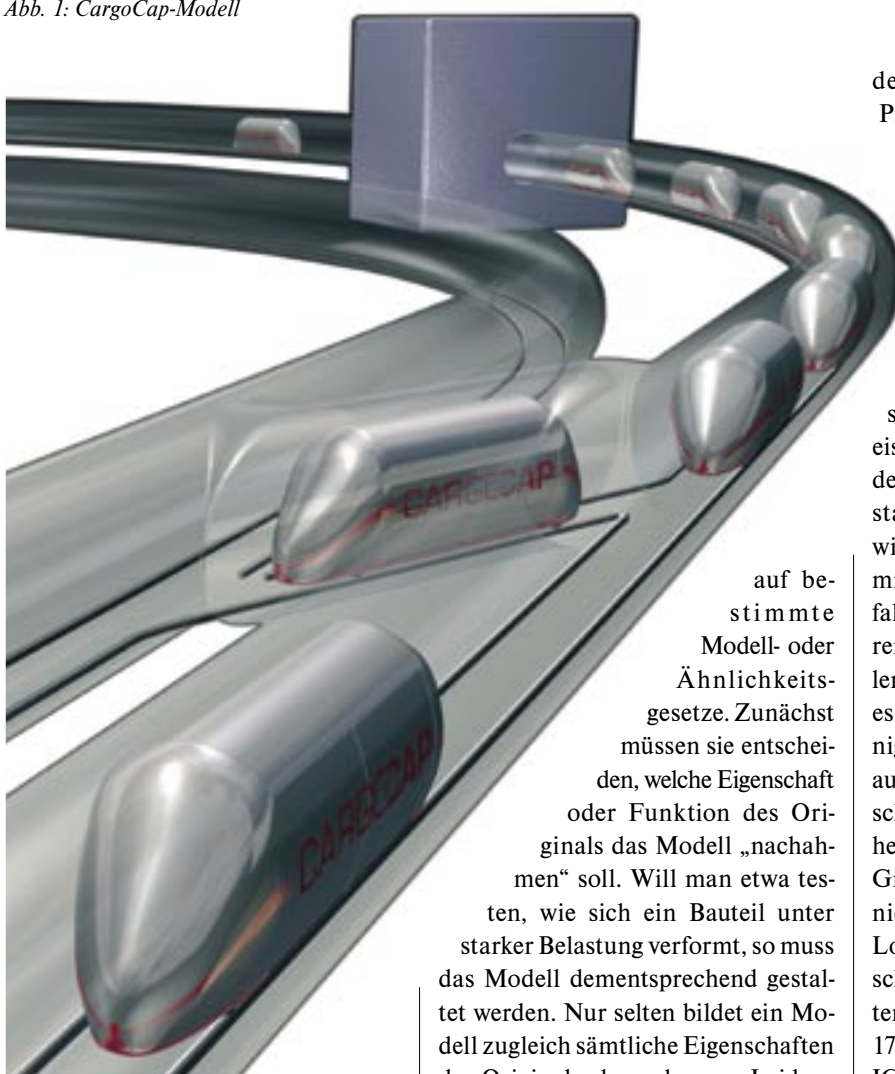


## Unterirdisches Transportsystem auf dem Modellprüfstand: Wenn Weichen weichen

L. Hohaus  
J. Scholten

Ob Carrera- oder Modelleisenbahn - nicht nur die Kleinen fasziniert die miniaturisierte Technik. Für so manchen Hobbylokomotivführer ist aus dem Spiel schon einmal ernsthafte Wissenschaft geworden: Ingenieure greifen auf verkleinerte Modelle zurück, um ihre Konstruktionen zu erproben, etwa eine neue Weichentechnik, die speziell für das unterirdische Transportsystem CargoCap entwickelt wurde.

Abb. 1: CargoCap-Modell



**E**n miniature am Modellprüfstand untersuchen Ingenieure technische Systeme und übertragen die Ergebnisse dann in den Originalmaßstab zurück. Damit sich Modell und Original auch wirklich ähnlich verhalten, achten die Forscher

auf bestimmte Modell- oder Ähnlichkeitsgesetze. Zunächst müssen sie entscheiden, welche Eigenschaft oder Funktion des Originals das Modell „nachahmen“ soll. Will man etwa testen, wie sich ein Bauteil unter starker Belastung verformt, so muss das Modell dementsprechend gestaltet werden. Nur selten bildet ein Modell zugleich sämtliche Eigenschaften des Originals ab – sehr zum Leidwesen der Forscher. Vielmehr müssen sie für einzelne zu untersuchende Effekte verschiedene Modelle entwerfen. Sogar innerhalb eines Modells können unterschiedliche Modellmaßstäbe nötig sein – etwa für Masse, Geschwindigkeit oder Beschleunigung. Ein Beispiel aus der Welt des Mo-

delleisenbahners verdeutlicht das Problem. Die Masse verändert sich bei rein geometrischer Ähnlichkeit maßstäblich zum Volumen – das Modell einer 80.000 kg schweren Lokomotive wöge demnach im üblichen Modellbahnmaßstab von 1:87 bezüglich Länge, Breite und Höhe (Volumen) nur 121g. Tatsächlich wiegt die Lok einer Modelleisenbahn etwa 200 g. Für den Modelleisenbahner ist auch eine maßstabsgetreue Geschwindigkeit sehr wichtig – eine „1/87-Eisenbahn“ soll mit 1/87 der echten Geschwindigkeit fahren, für eine ICE-Modellbahn wären das nur 3 km/h anstelle der realen 280 km/h. Eine Ausnahme gibt es dennoch: Die maximale Beschleunigung ist sowohl beim Original als auch im Modell von der Reibung zwischen Rad und Schiene abhängig. Daher ist der Reibwert eine feststehende Größe und muss dem Modellmaßstab nicht angepasst werden. Die Mini-Lok könnte mit demselben Wert beschleunigen wie ihre große Schwester – im Modellmaßstab wären das 17 mm/s<sup>2</sup>. Dafür bräuchte der Modell-ICE eine Beschleunigungsstrecke von über zwei Metern! Da nur wenigen Modellbahnfreunden so viel Platz zur Verfügung steht, verletzen auch hier viele Hersteller bewusst die Ähnlichkeitsgesetze.

Was wir für die Modelleisenbahn eher spielerisch diskutieren, fordert uns als Forscher heraus: Ein Prüfstand

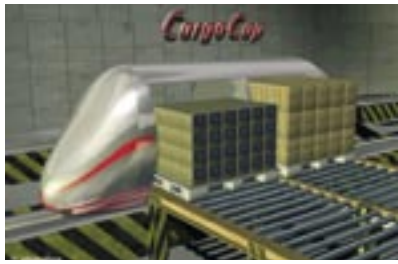


Abb. 2: Kapsel des CargoCap: Zwei handelsübliche Euro-Paletten finden darin Platz. Eine LKW-Ladung mit 40 Euro-Paletten müsste demnach auf 20 Transportkapseln verteilt werden.

für eine Weiche des unterirdischen Transportsystems CargoCap (s. Info 1). Wir wollen ein Modell realisieren, um eine neue Weichentechnik zu testen und zu verbessern, die wir speziell für den CargoCap entwickelt haben. Für das interdisziplinäre Projekt CargoCap bearbeiten wir am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Fördertechnik neben den fahrdynamischen Problemen der Transportkapseln (Caps) auch die Spurführung innerhalb der Rohrleitungen.

Wenn wir einen LKW-Ladung von 40 Euro-Paletten auf einen CargoCap übertragen wollen, wären 20 Transportkapseln nötig (s. Abb. 2). Deshalb sollten die einzelnen Kapseln einen möglichst geringen Abstand voneinander haben – eine effektive Abstandsregelung ist die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit des Systems. Herkömmliche Weichen, wie sie von der Deutschen Bahn eingesetzt werden, sind ungeeignet für das CargoCap-System. Bei den langen Weichenstellzeiten wäre ein zu großer Abstand zwischen den Kapseln nötig. Mit unserer neuen Weiche an der eigens dafür gestalteten Transportkapsel können einzelne Caps bei konstanter Geschwindigkeit von 36 km/h aus dicht fahrenden Verbänden heraus abzweigen – ganz ohne Wartezeit (s. Abb. 1). Das Besondere an dieser Weiche ist, dass sie kein Bestandteil bzw. verstellbares Weichenelement der Schiene selbst ist. Stattdessen besitzen die einzelnen Kapseln einen Mechanismus, der die Richtung vor jeder Weiche einstellt. Dazu wird seitlich am Fahrzeug ein Führungselement aus-

gefahren, das sich in eine Führungsschiene an der Rohrwand einfädelt (s. Abb. 4). Wo sich im Bereich der Weiche zwei Fahrstrecken überschneiden, ist die mittlere Schiene unterbrochen (s. Abb. 3). Die seitliche Führungsschiene muss daher zusätzlich zu ihrer Führungsfunktion auch die Tragfunktion für das fehlende mittlere Schienenstück übernehmen. Durch diese Lastverlagerung bei der Weichendurchfahrt werden die Bauteile stärker beansprucht: die Führungsschiene, der seitliche Führungsarm und auch die noch benutzte Schienenspur. Die möglichen Schwerpunktlagen der Euro-Paletten beeinflussen die Belastungsverteilung der Caps

### Schwerpunkt veränderlich

ebenfalls erheblich. Es ist unwahrscheinlich, dass Euro-Paletten immer mit demselben Schwerpunkt beladen werden – zumal auch extrem unsymmetrisch befüllte Paletten, etwa durch Maschinenteile mit einseitigem schweren Antrieb, transportiert werden.

Diese Belastungseffekte ermitteln wir nun an einem Weichenprüfstand à la Modelleisenbahn – und so schließt sich der Kreis. Wir wollen dabei die Zuverlässigkeit der Weiche nachweisen und sie wenn nötig optimieren. Im Original müsste der Prüfstand

folgende Eigenschaften haben: einen Weichenradius von 20 m, eine Durchfahrgeschwindigkeit von 36 km/h und eine Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$ , woraus sich eine Beschleunigungsstrecke von 50 m ergibt. Doch diese Abmessungen sprengen den Rahmen unserer Versuchshalle. Es ist somit unerlässlich, den „geometrischen“ Maßstab an die Platzverhältnisse anzupassen – in unserem Fall an eine Grundfläche von  $10 \times 5$  Metern. Für eine „dynamisch ähnliche“ Abbildung (Modell und Original sind aus dem selben Material und werden gleich stark belastet) muss die Geschwindigkeit unverändert bleiben. In unserer Versuchshalle steht maximal eine Strecke von 10 m für Beschleunigung, Weichendurchfahrt und Bremsweg zur Verfügung – eine vollständige „dynamische Ähnlichkeit“ können wir unter diesen Bedingungen nicht erreichen. Also muss die Geschwindigkeit verringert werden. Da aber die Beschleunigung selbst an unserem Prüfstand nicht untersucht wird, sondern nur die eigentliche Weichendurchfahrt, kann die Modellkapsel schneller beschleunigt werden als durch die Reibung möglich. Wir schieben das Modell abweichend vom Original durch einen Elektromotor an und sparen dadurch Platz. Als Zielgeschwindigkeit haben wir 18 km/h gewählt – das ist die Hälfte dessen, was für eine vollstän-

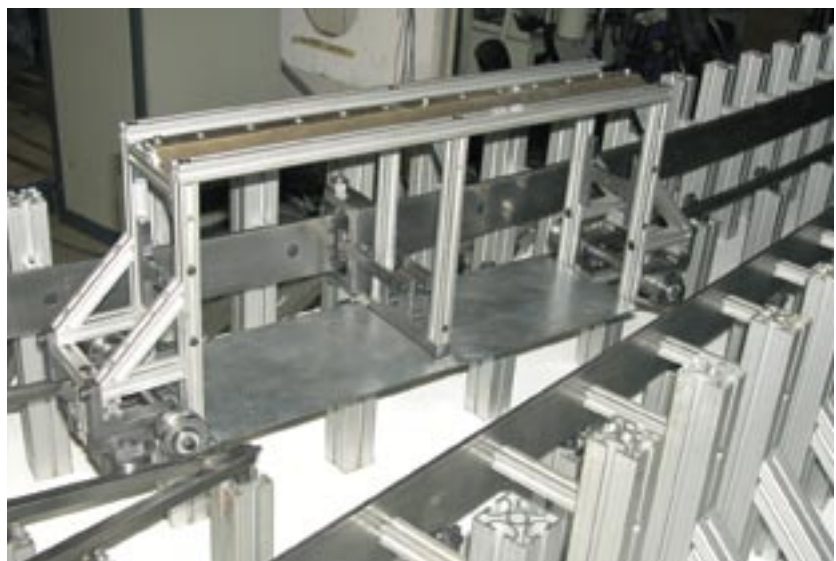


Abb. 3: Modellprüfstand: Das Fahrzeug kann die Weiche passieren und sich ohne Verzögerung aus dem Verband mehrerer Caps lösen, weil die Mittelschiene unterbrochen ist.



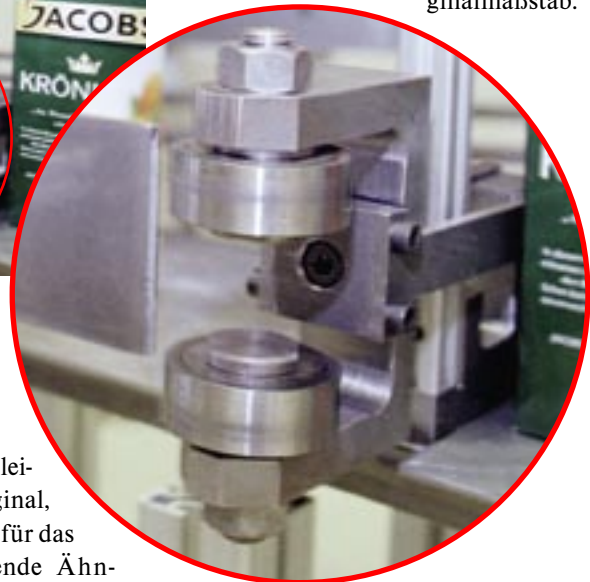
Abb. 4: Die neue Weichentechnik umgesetzt für den Modellprüfstand. In die an der Rohrwand befestigte Führungsschiene „fädelt“ sich ein seitlich an der Transportkapsel befindlicher Führungsarm ein.

dige dynamische Ähnlichkeit erforderlich wäre. Aber welcher Maßstab muss für die restlichen Systemparameter gewählt werden, damit die am Modellprüfstand ermittelten Größen auch auf die Realität übertragen werden können?

Ein beliebter Weg zur vereinfachten Betrachtung technischer Systeme ist, Systemgrößen, die sich in Einheiten wie Meter, Sekunden oder Kilogramm ausdrücken lassen, auf dimensionslose Kennzahlen zu reduzieren. Die für unser Modell relevanten Größen sind Kraft, Masse, Beschleunigung, Geschwindigkeit, geometrische Länge und die Federsteifigkeit, als ein Maß für die Kraft, die eine bestimmte Bauteilverformung bewirkt. Zeitlich veränderliche Größen – etwa Schwingungen – sollten hier zunächst nicht berücksichtigt werden. Ein Vorteil dieser Methode ist, dass sich die Kennzahlen auch dann ermitteln lassen, wenn die funktionalen Zusammenhänge nicht genau bekannt sind. In unserem Fall konnten alle relevanten Größen durch eine Kombination der Einheiten Meter, Kilogramm und Sekunde ausgedrückt werden. Drei dimensionslose Kennzahlen genügen, um die bei der Weichendurchfahrt auftretenden physikalischen Effekte zu beschreiben. Haben diese Kenn-

zahlen im Modell den gleichen Wert wie im Original, dann kann eine speziell für das jeweilige System geltende Ähnlichkeitsbeziehung aufgestellt werden (s. Info 2). Wenn man nun die Größen betrachtet, die hinter den einzelnen Kennzahlen stehen, dann lässt sich der „Skalierfaktor“ – der Maßstab – für jede einzelne Größe ableiten: Unser ModellCap fährt mit der halben Geschwindigkeit des zukünf-

tigen CargoCaps, auf die Testkapsel wirken 1/16 der Kräfte des Originals ein und Steifigkeit und Dämpfung liegen im Modell bei 1/4 bzw. 1/8 der originalen Transportkapsel. Diese Maßstäbe sind zugleich „Bauanleitung“ für unseren Modellprüfstand und Umrechnungsfaktoren zurück zum Originalmaßstab.



Der Modellprüfstand soll letztlich die Daten für eine Computersimulation im realen Maßstab liefern, durch die sich alle Betriebsdaten des zukünftigen CargoCap abrufen lassen, schon bevor dieser wirklich im Einsatz ist. Dafür verwenden wir ein Computerpro-

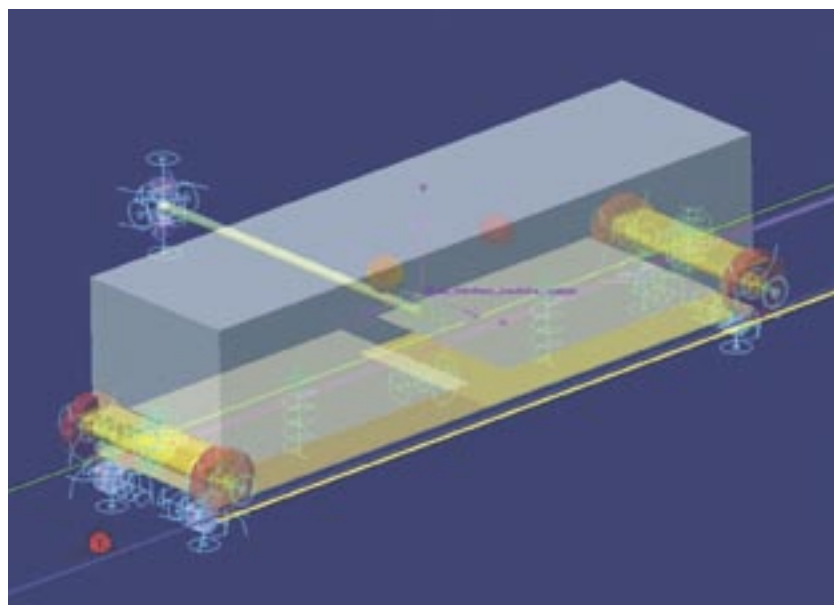


Abb. 5: Mehrkörpersimulation: Ein spezielles Computerprogramm bildet alle relevanten Bauteile der Weiche und der Transportkapsel mit ihren jeweiligen physikalischen Eigenschaften und deren Zusammenwirken genau ab.

gramm, mit dem alle Bauteile der Weiche mit ihren jeweiligen physikalischen Eigenschaften und ihrem Zusammenwirken genau abgebildet werden können (s. Abb. 5). Doch das ist schon der zweite Schritt. Zunächst

### Vergleich: gemessen und simuliert

wird der Modellprüfstand selbst als Computermodell simuliert. Diese Simulation lässt sich exakt mit den gemessenen Werten „füttern“. Alle möglichen Beladungszustände bzw. Schwerpunktlagen, die im Betrieb des CargoCap-Systems auftreten können, werden sowohl am Prüfstand wie auch in der Simulation durchgespielt. Die Simulation ist erst dann hinreichend genau, wenn sich die am Prüfstand gemessenen Werte mit den computersimulierten Werten decken. Bei

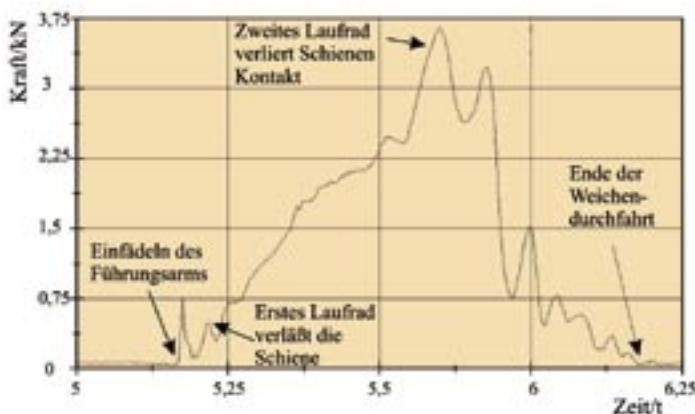
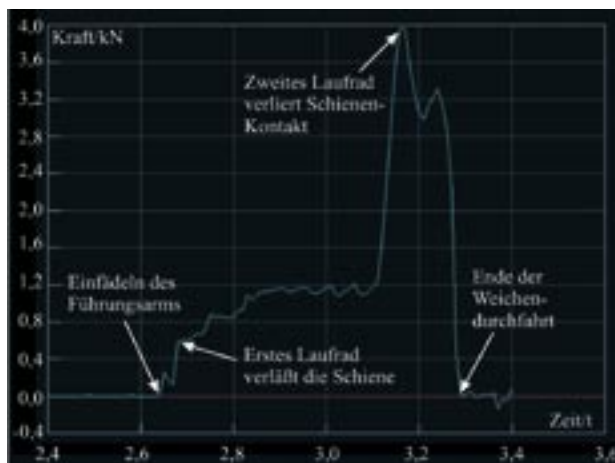


Abb. 6: Vergleich und Anpassung: Wenn die simulierten (oben) den tatsächlich gemessenen (unten) Kraftverläufen gegenübergestellt werden, zeigt sich, ob die Relevanzliste vollständig ist und alle wirklich beteiligten Größen richtig skaliert wurden. Die Ergebnisse belegen bereits jetzt eine gute Übereinstimmung.

## info<sup>1</sup>

### High Tech nach dem Rohrpost-Prinzip

Vor allem in Ballungsräumen wie dem Ruhrgebiet sind zukunftsorientierte Verkehrslösungen gefragt, die der Umwelt, der Wirtschaft und letztlich auch dem Verbraucher zugute kommen. Mit dem unterirdischen Transportsystem CargoCap könnten sich schon in naher Zukunft Waren sicher, kostengünstig und vollautomatisch von Punkt A nach B bringen lassen - ganz ohne Staus und Abgase zu verursachen.

Schon seit 1998 forscht die Projektgruppe „Transport- und Versorgungssysteme unter der Erde“ an der Ruhr-Universität, geleitet von Prof. Dr. Dietrich Stein (Leitungsbau und Leitungsinstandhaltung, Fakultät für Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität), am CargoCap-System; 2002 wurde die CargoCap GmbH gegründet. Das technische Prinzip: Auf einem Schienennetz werden mit Paletten beladene Transportkapseln (Caps) durch unterirdische „Rohrleitungen“ geschickt. Die Caps fahren in einem weit verzweigten Netz viele einzelne Stationen an, an denen sie automatisch be- und entladen werden. Durch ein unterirdisches Bauverfahren kann das Röhrennetz ohne Probleme und kostengünstig erweitert werden, ohne dass es „oben“ jemand merken muss. Das System zeichnet sich durch geringe Wartungskosten, einen niedrigen Energieverbrauch und eine lange Lebensdauer aus.

Die Planung sieht in jeder Kapsel Platz für zwei handelsübliche Euro-Paletten vor - so könnten Speditionen ohne große Kosten problemlos auf CargoCap umstellen. Das computergesteuerte System ermöglicht es, die Caps in kurzen Abständen von nur etwa zwei Metern loszuschicken. Bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 36km/h verspricht CargoCap eine reibungslose und zeitgenaue Güterversorgung rund um die Uhr. Daher richtet sich das unterirdische Transportsystem gleichermaßen an Industrie, Einzelhandel und Endverbraucher und ist besonders geeignet für Produktionsbauteile, Paketfracht oder Lebensmittel. Letztere könnten dann auf Bestellung direkt im Keller der Privathaushalte in Empfang genommen werden. Zukunftsmusik?



Verladestation des CargoCap: Die Vision zeigt die unterirdische Verladung von Europaletten in die Transportkapseln des CargoCap, während „oben“ der Verkehr ungestört weiterrollt.



Abb. 7: Weiche im Test: Auf dem Modellprüfstand wird ein maßstabsgerechtes Modell der Kapsel durch einen Elektromotor angeschoben. Mit einer Zielgeschwindigkeit von 18 km/h - der Hälfte dessen, was für eine vollständige dynamische Ähnlichkeit erforderlich wäre - saust die Kapsel über die Teststrecke. Juniorprofessor Dr.-Ing. Jan Scholten (r.) und Dipl. Ing. Lutz Hohaus überwachen den Versuch



mulation wurden bestimmte Effekte nicht hinreichend genau abgebildet (s. Abb. 6 oben). So sind etwa die als starr abgebildeten Bauteile in Wirklichkeit elastisch (Abb. 6 unten). Zum Teil mussten wir auch Kompromisse in der Simulation eingehen, um die enorme Rechenzeit zu verkürzen.

Anhand der Messungen können wir nun beurteilen, welche Details in der Simulation weiter verfeinert werden müssen. So ergab sich am Modellprüfstand eine im Vergleich zur Simulation längere Kapselfahrt (vgl. Abb. 6 oben u. unten). Die Geschwindigkeit der Kapsel sinkt im Experiment durch die Reibungskräfte stärker ab. Zudem kommt es zu einer

der Gegenüberstellung der gemessenen mit den simulierten Kraftverläufen zeigt sich, ob die Relevanzliste vollständig ist und alle wirklich be-

teiligten Größen richtig skaliert wurden. Unsere ersten Ergebnisse zeigen bereits eine gute Übereinstimmung, aber auch Unterschiede: In der Si-

## info<sup>2</sup> für Insider

### Maßstab ohne Dimension

Um eine Ähnlichkeitsbetrachtung durchzuführen, muss man die Zielgröße kennen und anhand dieser eine Relevanzliste aufstellen. Das besondere Interesse bei der Simulation von CargoCap gilt den bei der Weichendurchfahrt auf den Führungsarm und die Führungsrollen einwirkenden Kräften: Massenkräfte, Beschleunigungskräfte und schwingende Anteile der Feder- und Dämpfer-Systeme. Es ergibt sich eine Relevanzliste, welche Kräfte, Beschleunigungen, geometrische Längen, Federkonstanten und Dämpfungswerte umfasst.

Die Relevanzliste weist mehrere Größen auf, die jeweils aus denselben Grundeinheiten zusammengesetzt sind. Ohne den physikalischen Zusammenhang zu kennen, lassen sich durch Herauskürzen gleicher Einheiten linear unabhängige Größen (Pi-Größen) bilden. Man spricht dann von dimensionslosen Kennzahlen. Im vorliegenden Fall genügen vier dieser Pi-Größen. Sie müssen im Modell und in der Realität gleich sein. Dazu werden alle Pi-Größen gleich 1 gesetzt, so dass sich die Skalier- oder Umrechnungsfaktoren (s) für jede einzelne Größe herleiten lassen.

#### Beispiel anhand einer Kennzahl

Formel:  $x = \frac{F}{x \cdot c}$

(Verhältnis einer beliebigen Kraft zu einer Federkraft)

Maßeinheit:  $\left[ \frac{N}{m \cdot N} \right]$   
(dimensionslos)

Die Kennzahl muss dann im Modell und in der Realität für die untersuchten Kräfte gleich bleiben:

$$x_{modell} = x_{real} \Rightarrow \frac{F_{modell}}{x_{modell} \cdot c_{modell}} = \frac{s_{Beschleunigung} \cdot F_{modell}}{s_{Länge} \cdot s_{Federkonstante} \cdot x_{modell} \cdot s_{Dämpfung} \cdot c_{modell}}$$

Um dieses Ziel zu erreichen werden für die Größen Fmodell, xmodell und cmodell die Maßstäbe sF, sx und sc eingeführt:

$$\frac{F_{modell}}{x_{modell} \cdot c_{modell}} = \frac{s_{Beschleunigung} \cdot F_{modell}}{s_{Länge} \cdot s_{Federkonstante} \cdot x_{modell} \cdot s_{Dämpfung} \cdot c_{modell}}$$

Diese Maßstäbe wurden im vorliegenden Fall so bestimmt, dass der Ausdruck den Wert 1 annimmt. Dies gelingt mit sF=1/16, sx=1/4 und sc=1/4. Auf diese Weise lassen sich mithilfe dimensionsloser Kennzahlen sämtliche für den Bau des Prüfstandes einzuhaltenden Maßstäbe bestimmen: sx=1/4

als Maßstab für Längenmaße (Wegstrecken, Kurvenradien, etc.), sv=1/2 als Maßstab für die Geschwindigkeit, sF=1/16 als Maßstab für die Kraft, sc=1/4 als Maßstab für die Steifigkeit und, sd=1/8 als Maßstab für die Dämpfung.

Abweichung bei der Maximalauftreten der Last, und im Experiment zeigen sich deutlich mehr Nachschwingungen. Diese beruhen vermutlich auf der im Vergleich zur Simulation längeren Weichendurchfahrt. Auffallend ist auch der stärker ansteigende Kraftverlauf vor dem zweiten Kontaktverlust zwischen Laufrad und Schiene. Wir werden die Simulation in bestimmten Grenzen an die Messwerte und den Prüfstand entsprechend der Simulation weiter an die realen Verhältnisse anpassen. Dazu könnte etwa gehören, dass wir das relativ weiche Gummigelenk des Führungsarms gegen ein steiferes austauschen. Wir sehen auch, ob unsere Liste der Systemparameter vollständig ist und ob tatsächlich sämtliche Größen im richtigen Maßstab abgebildet sind. Wenn Prüfstand und Computersimulation am Ende übereinstimmende Ergebnisse liefern, kann am Computer die „reale“ Weiche im Maßstab 1:1 simuliert werden – anhand der Ähnlichkeitsgesetze und der so ermittelten Vorgaben für die Konstruktion. Mit unserem Modellprüfstand haben wir nun die Möglichkeit, das neue Weichensystem zu testen und die neue Technik für CargoCap nutzbar zu machen. Der nächste Schritt, eine Teststrecke im Maßstab 1:2, ist schon für das kommende Jahr geplant. Sie wird erstmals Versuche mit mehreren Transportkapseln ermöglichen. So tasten wir uns Schritt für Schritt vom Modell über die Teststrecke an das Original heran – und dafür hat auch die Industrie längst Interesse bekundet.

■ *Dipl.-Ing. Lutz Hohaus,  
Juniorprofessor  
Dr.-Ing. Jan Scholten, Lehrstuhl  
für Maschinenelemente und  
Fördertechnik, Institut für  
Konstruktionstechnik*

**Anzeigen**