

# Mechanische Ersatzmodelle zum Nachweis der Realisierbarkeit minimaler Restbeschleunigungen während der Freifallphase im Einstein-Elevator

Mechanical simulation model for verifying the feasibility of the minimal residual acceleration during the free-fall phase in the Einstein-Elevator

Christoph Lotz  
Ludger Overmeyer

Institut für Transport- und Automatisierungstechnik,  
Leibniz Universität Hannover

Der *Einstein-Elevator* entspricht einer deutlichen Abwandlung eines klassischen Fallturms. In Falltürmen werden wissenschaftliche Experimente unter Schwerelosigkeit durchgeführt. In großen Vakuumkammern werden dazu die Experimente, ohne das Einleiten externer Kräfte, fallengelassen. Die klassische Fallturms-technik hat den Nachteil einer geringen Wiederholrate durch einen hohen Zeitaufwand bei der Herstellung des Vakuums. Der *Einstein-Elevator* schafft durch sein weltweit einzigartiges Führungs- und Antriebskonzept den Zeitaufwand für die Versuchsdurchführung drastisch zu verkürzen und die Qualität der Schwerelosigkeit zu verbessern. Um die benötigte Qualität in der Versuchsumgebung zu erzielen, wurde das Konzept mithilfe einer Mehrkörpersimulation hinsichtlich der im Experiment in der Freifallphase zu erwartenden minimalen Restbeschleunigungen untersucht.

[Schlüsselwörter: *Einstein-Elevator*, mechanisches Ersatzmodell, Mehrkörpersystem, geringe Restbeschleunigung]

The *Einstein-Elevator* is a customized application of a classical drop-tower. A drop-tower is a structure that reproduces zero-gravity conditions for scientific experiments. These experiments are carried out inside a large vacuum chamber, which is dropped without the application of external forces. The major drawback of the established drop-tower technology is the low number of permissible experiments per day, mainly due to the time-consuming preparation of the vacuum. The *Einstein-Elevator* drastically decreases the necessary time for an individual experiment and moreover increases the quality of the reproduced zero-gravity conditions, thanks to the worldwide unique drive- and guide-concept. To investigate the achieved quality of the *Einstein-Elevator*, a mechanical simulation model was developed to study the behavior of the minimal residual acceleration during the free-fall phase.

[Keywords: *Einstein-Elevator*, mechanical simulation model, multi-body system, minimal residual acceleration]

## 1 EINLEITUNG

In der physikalischen Grundlagenforschung, aber auch im Bereich der Luft- und Raumfahrt, werden Versuche unter Schwerelosigkeit durchgeführt, da die Gravitation oftmals maskierend über den zu betrachtenden physikalischen oder chemischen Vorgängen und Effekten liegt. Schwerelosigkeit lässt sich in sehr unterschiedlichen Einrichtungen herstellen. Der *Einstein-Elevator* schließt dabei die Lücke der Forschungseinrichtungen zwischen teuren Parabelflügen und Weltraummissionen sowie sehr zeitaufwändigen Versuchsdurchführungen in klassischen Falltürmen. [Lot13]

Um Schwerelosigkeit für Experimente auf der Erde herzustellen, werden diese in klassischen Falltürmen meist in einem Vakuum fallengelassen. Durch die Verringerung der aerodynamischen Widerstandskräfte fallen die Experimente nahezu kräftefrei bzw. schwerelos. Zur Verlängerung der Versuchsdauer werden in einigen Falltürmen Katapultanlagen eingesetzt, sodass die Experimente einen vertikalen Parabelflug vollführen.

Das wesentliche Gütekriterium für Experimente unter Schwerelosigkeit stellt die Restbeschleunigung im Experiment dar, welche während der Versuchsdurchführung die Experimentgenauigkeit beschränkt. Diese liegt bei den gängigen Einrichtungen zwischen  $10^{-2}$  g und  $10^{-6}$  g. Im Fallturm des Bremer *Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation* (kurz: ZARM) stehen zum Vergleich Bedingungen von bis zu  $10^{-6}$  g dreimal täglich für 4,74 s (bzw. 9,48 s im Katapultmodus) zur Verfügung [ZAR13]. Eine Erweiterung schafft der *Einstein-Elevator* durch eine höhere Qualität der Restbeschleunigung mit kleiner  $10^{-6}$  g, einer für den Betrieb wirtschaftlich sinnvollen Versuchsdauer von 4,04 s und vor allem einer Wiederholrate von 100 Versuchen pro Tag.

Um 100 Versuche pro Tag bei sehr niedriger Restbeschleunigung durchführen zu können, ist ein weltweit ein-

zigartiges Antriebs- und Führungskonzept vorgesehen. Das Experiment mit einer Nutzlast von bis zu einer Tonne vollführt gemeinsam mit einer Vakuumkammer einen vertikalen Parabelflug auf einer Strecke von 20 m. Während der Freifallphase sind Kammer und Experiment entkoppelt und das Experiment schwebt schwerelos in der Vakuumkammer. Die Kammer wird von außen geführt und ist mittels eines Linearmotors zur Aufbringung der Vorschubkräfte und zur Kompensation von Luft- und Rollwiderständen aktiv angetrieben. Zur Realisierung geringer Restbeschleunigungen sind die von außen wirkenden Störeinflüsse zu analysieren und das Konzept entsprechend anzupassen. Zur Nachbildung der Störeinflüsse wird eine Mehrkörpersimulation eingesetzt, die die zu erwartenden Restbeschleunigungen berechnet und bei der Konzeptumsetzung einen Einfluss auf die Auswahl von Antriebs- und Führungskomponenten hinsichtlich ihrer schwingungsreduzierenden Eigenschaften hat.

## 2 MECHANISCHER AUFBAU

Das Konzept des *Einstein-Elevators* zur Erzielung möglichst geringer Restbeschleunigungen ist weltweit einzigartig. Der größte Unterschied zu konventionellen Falltürmen ist, dass der Versuchsträger in einer mitfahrenden Vakuumkammer, der sogenannten Gondel, steht. Abbildung 1 zeigt den generellen Aufbau des *Einstein-Elevators*.

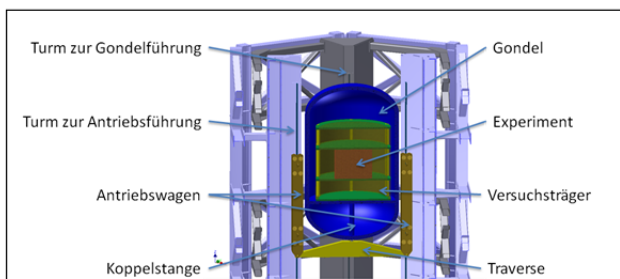


Abbildung 1. Schnitt durch den Einstein-Elevator mit der Innenansicht der Gondel, die das zu untersuchende Experiment beinhaltet

Das Experiment steht im Stillstand des Gerätes auf dem Boden der Gondel. Während der Freifallphase lösen sich Experiment und Gondel voneinander. Das Experiment schwebt dann berührungslos und kräftefrei in der Gondel. Die Gondel wird durch Laufrollen geführt. Die Antriebskräfte zum vertikalen Parabelflug werden aus einem Antriebswagen mithilfe einer Koppelstange übertragen. Der Antriebswagen sitzt unterhalb der Gondel und besitzt eine eigene von der Gondel unabhängige Führung. Beide Führungen sind zudem zur Schwingungsentkopplung an zwei unabhängigen Türmen befestigt.

### 2.1 EXPERIMENT UND GONDEL

Die Experimente können Maße von 1,70 m Durchmesser und zwei Metern Höhe aufweisen. Die Vakuum-

kammer braucht aufgrund des hier verwendeten Konzepts nur geringfügig größer als das Experiment zu sein und es muss nicht wie bei konventionellen Falltürmen eine lange Röhre evakuiert werden. Das geringe Volumen der Gondel bringt eine große Zeitersparnis bei der Herstellung des Vakuums. Zudem lässt sich die gewünschte Vakuumqualität aufgrund des geringen Volumens in kürzester Zeit erreichen. Die Gondel besitzt eine verspannungsarme Dreipunktführung mit Laufrollen oben und unten an der nahezu zylinderförmigen Gondel. Die Führungsschienen sind auf eine hohe Laufruhe und geringste Kräfte ausgelegt, da die Gondel lediglich eine vertikale Krafrichtung aufweist und die Rollen nur der Führung dienen.

### 2.2 ENTKOPPLUNG ZWISCHEN GONDEL UND ANTRIEB

Die Gondel ist vom Antrieb schwingungstechnisch entkoppelt, nur die Vorschubkräfte werden über die Koppelstange am Boden der Gondel übertragen. Die Schwingungsentkopplung findet neben der Nutzung unterschiedlicher Führungsschienen auch durch die Anbringung der Schienen an zwei unabhängig stehenden Türmen statt. Hier wird eine Turm-in-Turm-Konstruktion gewählt, die es ermöglicht die Führung des Antriebswagens und der Gondelführung komplett unabhängig zu gestalten. Abbildung 2 stellt einen horizontalen Schnitt durch das Gerät dar, sodass die Anordnung der Führungen der Gondel und der Antriebswagen erkennbar sind.

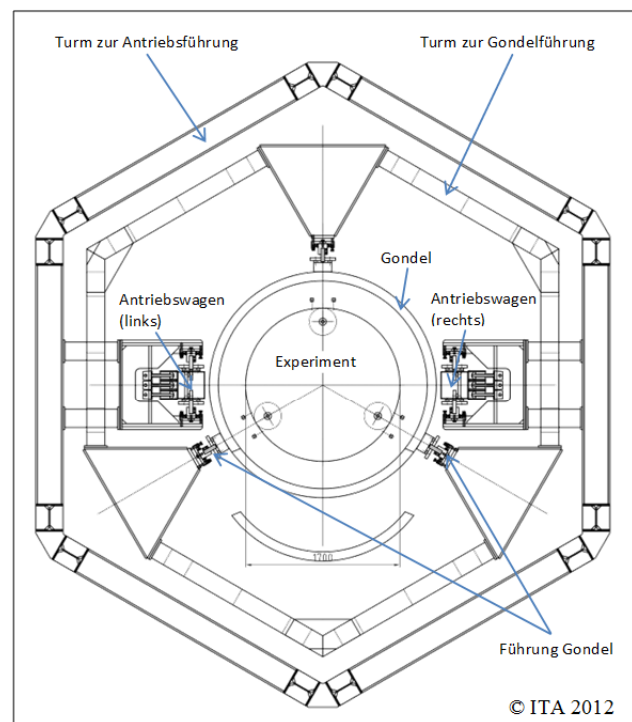


Abbildung 2. Horizontaler Schnitt durch den Einstein-Elevator mit Darstellung der Turm-in-Turm-Konstruktion

Die beiden Türme sind entlang ihres Verlaufs nicht verbunden. Desweiteren stehen sie zur Vermeidung der Übertragung von Schwingungen auf zwei separaten bohr-

pfahlgegründeten Ringfundamenten. Durch die Bohrpfähle wird über die Gesamthöhe von 40 m die Neigungsstabilität von wenigen Millimetern eingehalten.

Die Führungsschienen sind an zwei sechseckigen Stahltragwerken montiert, die sich in regelmäßigen Abständen einstellen und feinjustieren lassen. Abbildung 3 zeigt die im Aufstellort angeordneten Zwischenebenen.

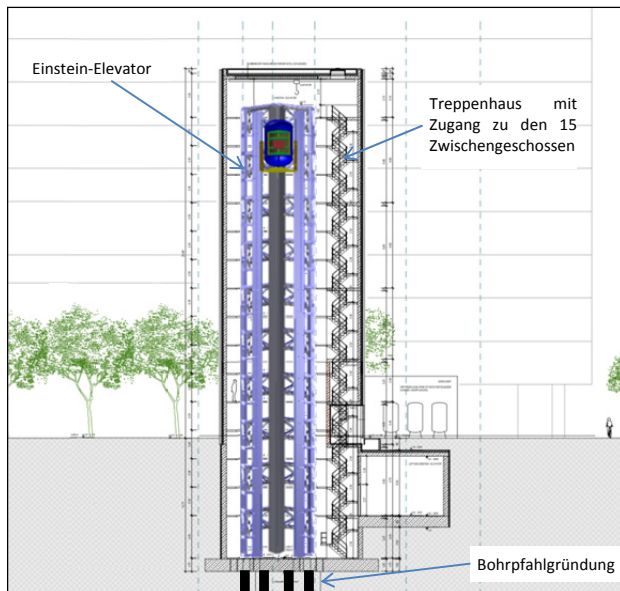


Abbildung 3. Schnitt durch das Gebäude des Einstein-Elevators mit Sicht auf die 15 Zwischengeschosse

Das Gebäude des Einstein-Elevators befindet sich mit seiner Hauptebene auf minus fünf Metern. Dies ist darin begründet, dass eine möglichst neigungsstabile, schwingungsarme und feste Verankerung der beiden Türme im Boden realisiert werden muss.

### 2.3 WESENTLICHE BAUGRUPPEN UND IHRE STÖREINFLÜSSE

Für die Mehrkörpersimulation werden einzelne Bauteile separiert betrachtet. Die wesentlichen Bestandteile stellen die folgenden drei dar:

- Antriebswagen
- Gondel
- Experiment/Versuch

Die drei Komponenten werden im weiteren Verlauf als Hauptkomponenten bezeichnet. Alle anderen Komponenten werden aufgrund ihres geringen Einflusses auf die Restbeschleunigung im Experiment vernachlässigt.

Die zuvor herausgestellten Hauptbaugruppen sind hinsichtlich ihrer Störeinflüsse zu analysieren. Neben den Störeinflüssen wird auch das Übertragungsverhalten zwischen den einzelnen Komponenten betrachtet. Abbil-

dung 4 zeigt die auftretenden Haupteinflüsse auf die drei Hauptkomponenten.

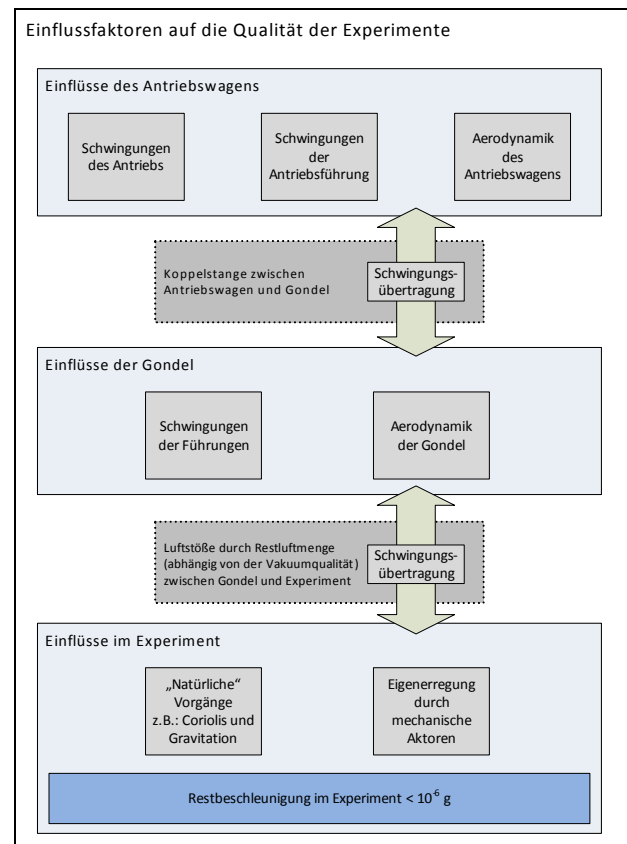


Abbildung 4. Analyse der Störeinflüsse auf die Experimente im Einstein-Elevator

Am Antriebswagen werden große Kräfte mit verhältnismäßig großen Ungenauigkeiten in die Tragstruktur eingeleitet, welche sich direkt auch auf die Führungsgenauigkeit auswirkt. Für die hohen Kräfte ist eine massive Führung vorzusehen. Da der Antrieb die Gondel und das Experiment auf eine Spitzengeschwindigkeit von 20 m/s beschleunigt, ist auch der Luftwiderstand nicht zu vernachlässigen.

Aufgrund der großen Schwingungsanregung des Antriebs ist die Gondel mit dem Experiment führungstechnisch entkoppelt. Die Gondel und der Führungswagen sind lediglich über eine Koppelstange miteinander verbunden, welcher als Druckstab ausgeführt im Wesentlichen nur Kräfte in vertikaler Richtung übertragen soll. Im realen System werden allerdings übertragene Schwingungen in stark abgeschwächter Form erwartet.

Die Gondelführung ist dreiseitig ausgeführt. Diese Anordnung erlaubt eine möglichst spannungsarme und vor allem sehr symmetrische Spannungsverteilung. Die Vorspannkräfte der Laufrollen wirken jeweils nur in einem Führungsschuh und greifen an allen drei Punkten lediglich in radialer Richtung an. Dadurch kann die Gondelstruktur möglichst gewichtsoptimiert konstruiert werden.

Im Ersatzmodell werden derzeit für die Aerodynamik nur die geschwindigkeitsabhängigen Widerstandswerte benutzt. Eine Simulation zum Verhalten der Gondel für unterschiedliche Geschwindigkeiten steht noch aus. Ähnlich verhält es sich mit der „Eigenerregung durch mechanische Aktoren“ (siehe Abbildung 4) im Experiment selbst. Derzeit wird dies nicht berücksichtigt, da für eine Abschätzung der äußeren Störgrößen die Störung durch den Versuch selbst keinen Einfluss hat.

### 3 AUFBAU DES MECHANISCHEN ERSATZMODELLS

Die drei zuvor ermittelten Hauptkomponenten werden im Ersatzmodell jeweils durch eine Punktmasse repräsentiert. Zwischen ihnen treten Wechselwirkungen durch Verbindungsglieder auf. Diese bilden aus den drei

Punktmassen einen Dreimassenschwinger. Unter der Annahme sehr geringer rotatorischer Bewegungen liefert das Modell hinreichend genaue Ergebnisse.

#### 3.1 ANTRIEBSWAGEN

Der Antriebswagen ist als eine der drei Punktmassen angenommen. Er weist an zwei Seiten (links und rechts in Abbildung 5) je eine Anordnung statisch bestimmter Führungselemente auf. Dies weist darauf hin, dass in einem späteren Modell der Antriebswagen in zwei unabhängig verfahrbare Teile geteilt werden wird. Zusätzlich zur Anordnung in der Ebene lässt sich auch eine feste Anzahl an Rollen durch die Erhöhung des Index  $i$  der Lagerkräfte übereinander anordnen. Abbildung 5 zeigt die horizontale Draufsicht mit den angreifenden Kraftpfeilen  $F_{LAi,1}$  bis  $F_{LAi,12}$ .

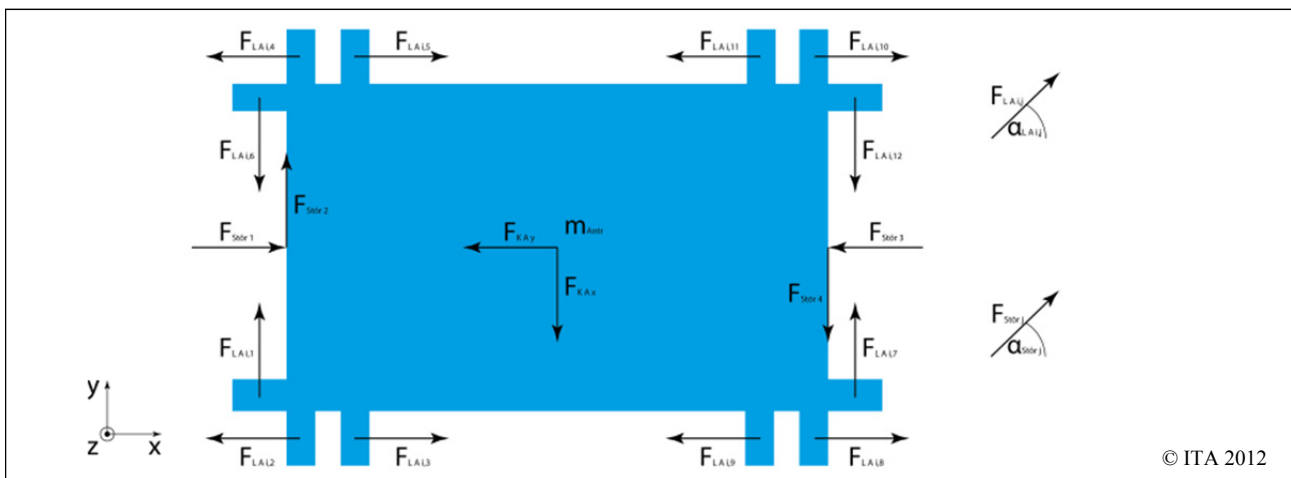


Abbildung 5. Ersatzmodell des Antriebswagens

In der Mitte des Antriebswagens greifen die Gewichtskraft des Antriebswagens  $m_{Antr}$  und die Koppelstange mit ihren Reaktionskräften  $F_{KAX}$  und  $F_{KAY}$  zwischen Antriebswagen und Gondel an. Dies wird später in Kapitel 3.3 beschrieben. Die Störungen durch den zweiteiligen Antrieb greifen links ( $F_{Stör,1}$  und  $F_{Stör,2}$ ) und rechts ( $F_{Stör,3}$  und  $F_{Stör,4}$ ) am Antriebswagen an. Die Winkel aller auftretenden Kräfte lassen sich im Modell frei einstellen  $\alpha_{LAi,j}$  und  $\alpha_{Stör,j}$ .

#### 3.2 GONDEL

Um die Gondel möglichst schwingungsarm und spannungsfrei zu führen ist eine Dreipunkt-Führung mit jeweils einem Führungsschuh an jedem der drei Punkte vorgesehen. Diese werden durch die Kräfte  $F_{LGi,1}$  bis  $F_{LGi,6}$  symbolisiert. Auch in diesem Modell lassen sich weitere Kräfte hinzufügen, die weitere Laufrollen in Vorschubrichtung nachbilden. Abbildung 6 zeigt das Ersatzmodell der Gondel.

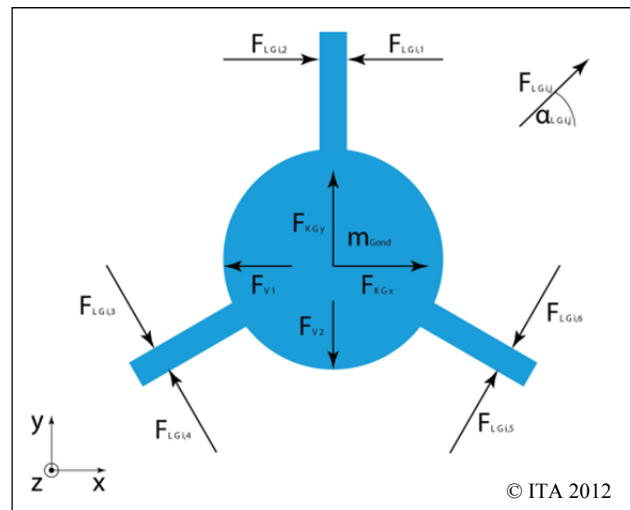


Abbildung 6. Ersatzmodell der Gondel

Im Zentrum der Gondel greifen neben der Gewichtskraft der Gondel  $m_{Gond}$  auch die Reaktionskräfte zwischen Antriebswagen und Gondel sowie die Reaktion des Experiments  $F_{V1}$  und  $F_{V2}$  an. Wie beim Antriebswagen lassen

sich auch bei der Gondelführung die Richtungen der Rollenführungen über  $\alpha_{LGi,j}$  anpassen.

### 3.3 KOPPELSTANGE

Als einzige Verbindung zwischen dem Antriebswagen und der Gondel überträgt die Koppelstange die Reaktionskräfte dieser beiden Hauptkomponenten. Abbildung 7 stellt die Kopplung der beiden Punktmassen sowie die Zuordnung der Kraftvektoren dar.

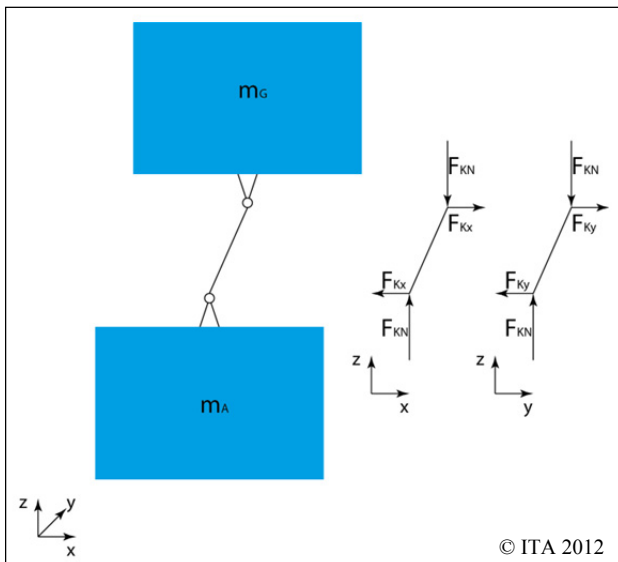


Abbildung 7. Ersatzmodell der Koppelstange

Die Reaktionskräfte zwischen den beiden Punktmassen Antriebswagen und Gondel werden im Modell über einen massefreien Druckstab mit einer Länge von 0,5 m übertragen. Die antriebswagenseitigen Reaktionskräfte  $F_{KAx}$  und  $F_{KAy}$  und die gondelseitigen  $F_{KGx}$  und  $F_{KGy}$  werden direkt mit den Kräften  $F_{Kx}$  und  $F_{Ky}$  verknüpft. Die Vorschubkraft zur Beschleunigung der Masse von Gondel und Experiment werden durch die Normalkräfte  $F_{KN}$  der Koppelstange nachgestellt. Durch die Verknüpfung der Koppelstange entsprechend der geometrischen Beziehung von Antriebswagen und Gondel werden anteilig auch Vorschubkräfte in die x- und y-Komponenten der Reaktionskräfte eingeleitet.

### 3.4 EXPERIMENT

Das Experiment weist zwei Verknüpfungen mit seinem Umfeld auf. Zum einen ist das Experiment während der Beschleunigungsphase mit der Gondel verbunden und weist im freien Fall nur noch den Luftwiderstand des Restluftvolumens im Vakuum mit einer Qualität von  $< 10^{-3}$  mbar auf. Zum anderen wirkt die Gravitation in Form der Corioliskraft störend auf die Experimente. Abbildung 8 zeigt die Einflüsse auf das Ersatzmodell des Experiments.

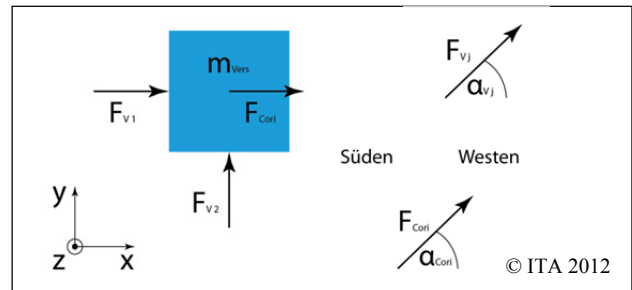


Abbildung 8. Ersatzmodell des Experiments

Sowohl für die Reaktionskräfte zwischen Gondel und Experiment als auch für die Corioliskraft lassen sich die Wirkrichtungen mit Hilfe der Winkel  $\alpha_{Vj}$  und  $\alpha_{Cori}$  einstellen. Dass die Corioliskraft einen wesentlichen Einfluss hat, lässt sich anhand deren Betrachtung zeigen. Mit der Winkelbeschleunigung der Erde  $\omega = 7,2921 \cdot 10^{-5}$  rad/s, der geographischen Breite  $b = 52,3667^\circ$  und einer Anfangsgeschwindigkeit von  $v_0 = 20$  m/s lässt sich eine laterale Abweichung folgendermaßen berechnen:

$$s_C = \frac{4}{3} \cdot \omega \cdot \frac{v_0^3}{g^2} \cdot \cos(b) \quad (3-1)$$

$$= 4,795 \text{ mm (Richtung Westen)}$$

Wird der Versuch ideal senkrecht bei 0 m mit einer Geschwindigkeit  $v_0$  von 20 m/s losgelassen und vollführt einen vertikalen Parabelflug, so weist das Experiment beim erneuten Erreichen der 0 m-Höhe einen lateralen Abstand  $s_C$  von 4,795 mm in westlicher Richtung auf. Da die Gondelhülle nicht viel größer als das Experiment ist, wird zur Vermeidung des Anstoßens des Experiments an der Gondelhülle der Einfluss der Corioliskraft bei der Gondelauslegung berücksichtigt.

### 3.5 FÜHRUNGSMODELLIERUNG

Die Störeinflüsse der Rollenführungen werden als Feder-Dämpfer-Systeme angenommen. Für jede Rolle lassen sich die Feder- und die Dämpfungskonstanten einzeln einstellen. Abbildung 9 zeigt die Anbindung einer Laufrolle an einer Punktmasse im Modell.

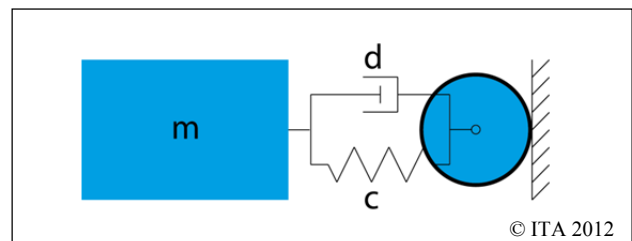


Abbildung 9. Ersatzmodell für die Modellierung einer Führungsrolle an einer Punktmasse

Hat eine Laufrolle eine Unwucht aufgrund eines Fertigungsfehlers oder weist die Führungsschiene einen gewellten Verlauf entlang der Vorschubrichtung auf, so leitet die Rolle Schwingungen über das Feder-Dämpfer-System an den Antriebswagen oder die Gondel weiter. In

diesem Modell wird sich zunächst auf die Unwucht der Laufrolle konzentriert. Diese Art der Anregung entspricht der Fußpunktanregung, wie in Abbildung 10 dargestellt.

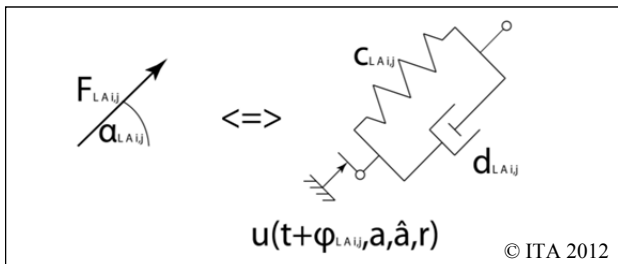


Abbildung 10. Feder-Dämpfer-Ersatzmodell für den Einfluss von Rollenführungen auf die Antriebs- und Gondelführung

Der Fußpunkt des Feder-Dämpfer-Systems ist von einigen Zustandsgrößen abhängig. Die Amplitude der Fertigungsungenauigkeit der Rollenzentrität  $\hat{a}$  bestimmt die Auslenkung des Fußpunktes. Die Phasenverschiebung ist von den Parametern Rollendurchmesser  $r$ , aktueller Zeitpunkt  $t$ , aktuelle Beschleunigung  $a$  und einem individuell einstellbarem Phasenverschiebungswinkel  $\varphi_{LAIj}$  zur Variation des Startpunktes der Unwucht unter den verschiedenen Rollen abhängig. Mit den individuellen Feder- und Dämpferkonstanten je Laufrolle lassen sich die Anregungskräfte der Laufrollen folgendermaßen berechnen:

$$F_{LGi,j} = \left( c_{LGi,j} \cdot \left( u(t) - \begin{pmatrix} x_G \\ y_G \end{pmatrix} \right) + d_{LGi,j} \cdot \left( \dot{u}(t) - \begin{pmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \end{pmatrix} \right) \right) \cdot \begin{pmatrix} \cos \alpha_{LGi,j} \\ \sin \alpha_{LGi,j} \end{pmatrix}$$

Die dargestellten Störgrößen sind beispielhaft für die Gondelführung aufgeführt.

#### 4 ERGEBNISSE

Nach der Aufstellung der Bewegungsgleichungen und deren Lösung lassen sich Ergebnisse in Abhängigkeit des Zustands ausgeben. Es wird zwischen den Zuständen „Beschleunigungsphase“ und „Flugphase“ unterschieden. Die Beschleunigung geschieht in den ersten 0,5 s. Die Flugphase schließt nahtlos an und dauert für den kompletten vertikalen Parabelflug etwas mehr als 4 s. Der anschließende Bremsbereich mit einer Dauer von ebenfalls 0,5 s wird hier nicht betrachtet.

##### 4.1 BESCHLEUNIGUNGSBEREICH

Zunächst wird der Beschleunigungsbereich betrachtet. Abbildung 11 zeigt zunächst die auftretenden Auslenkungen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen im Beschleunigungsbereich beispielhaft in x-Richtung für alle drei Hauptkomponenten.

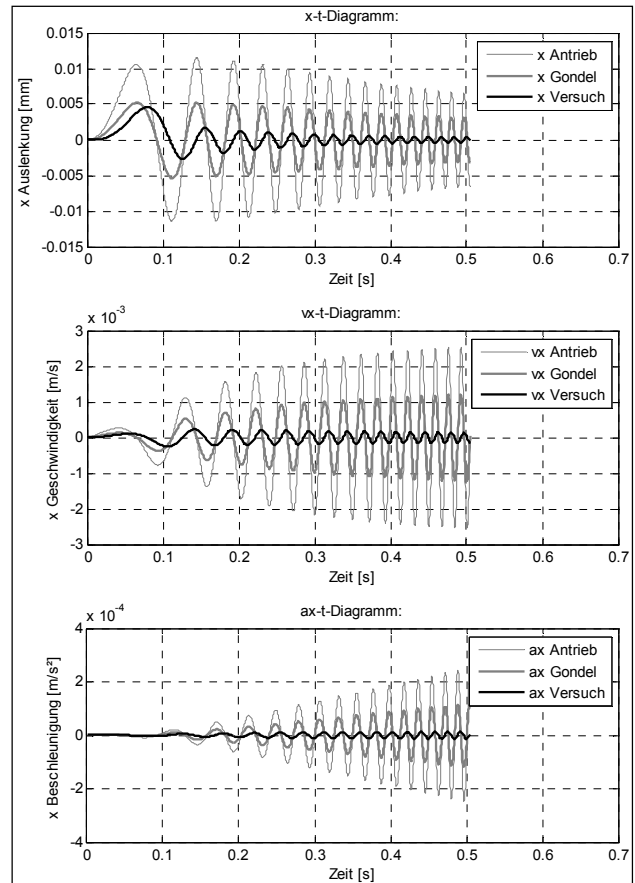


Abbildung 11. Auslenkungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm in x-Richtung für Antrieb, Gondel und Versuch

Sowohl der Antriebswagen als auch die Gondel erfahren eine Anregung aufgrund der Rollenführung und weiterer Einflüsse. Da zu Beginn das Experiment auf dem Boden der Gondel steht, wird auch dieses angeregt, wobei die Kopplung gedämpft und daher etwas phasenverschoben geschieht.

##### 4.2 ANFANGSGESCHWINDIGKEIT DES EXPERIMENTS

Das Experiment hat am Ende der gekoppelten Beschleunigungsstrecke eine Anfangsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung, die im Bereich der Flugphase kaum gebremst wird. Den Einfluss zeigen Abbildung 12 und Abbildung 13.

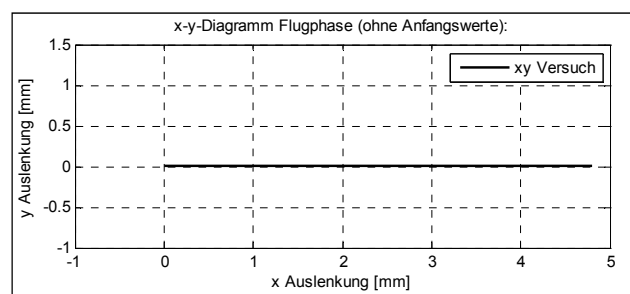


Abbildung 12. Flugkurve des Experiments (ohne Anfangswerte)

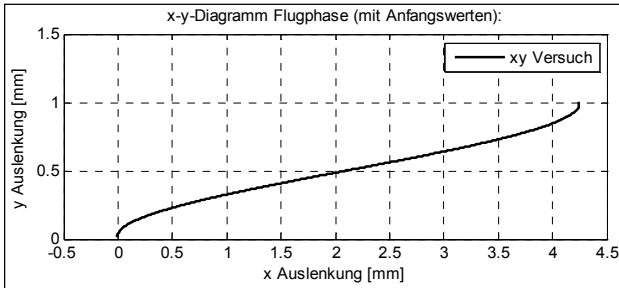


Abbildung 13. Flugkurve mit Anfangswerten im freien Fall

Der Vergleich von Abb. 12 und Abb. 13 zeigt, dass die Anfangsgeschwindigkeit einen wesentlichen Einfluss auf die Richtung und die Auslenkung des Experiments während der Flugphase aufweist. Bei der idealen Flugkurve wirkt nur der Einfluss der nach Westen gerichteten Corioliskraft. Der dargestellte Verlauf mit Anfangswerten ist von der Anregung während der Beschleunigungsphase abhängig. Diese können in gewissen Grenzen variieren und zu unterschiedlichen Verläufen nach der Trennung von Gondel und Experiment führen. Daher ist auch der Beschleunigungsbereich der Gondel separat zu betrachten.

### 4.3 FLUGPHASE UND RESTBESCHLEUNIGUNG DES EXPERIMENTS

Das Ziel des *Einstein-Elevators* und dieses Modells ist es, die Restbeschleunigung im Experiment möglichst gering zu halten. Als Grenze wird eine Restbeschleunigung von kleiner  $10^{-6}$  g definiert. Abbildung 14 stellt zunächst das Auslenkungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm aller Hauptkomponenten beispielhaft in x-Richtung dar.

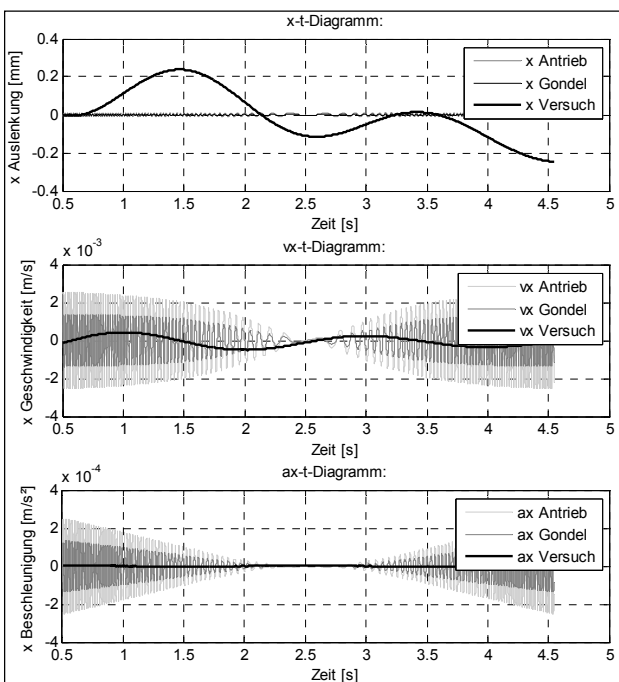


Abbildung 14. Auslenkungs-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramm der drei Hauptkomponenten in x-Richtung

Die Betrachtung des x-t-Diagramms zeigt sehr geringe Auslenkungen von Antrieb und Gondel. Das Experiment schwebt in dieser Phase frei in der Vakuumkammer. Dadurch ist die Kopplung zwischen Gondel und Experiment so gering, dass hauptsächlich die Anfangsgeschwindigkeit des Experiments aus der Beschleunigungsphase sowie die Corioliskraft wirken. Die Geschwindigkeits- und Beschleunigungsdiagramme zeigen, dass es eine höhere Anregung von Antrieb und Gondel gibt, die sich nur sehr gering auf das Experiment auswirkt. Die Betrachtung des Beschleunigungsprofils des Experiments in x-, y- und x-y-Richtung wird in Abbildung 15 dargestellt und zeigt einen beispielhaften Verlauf.

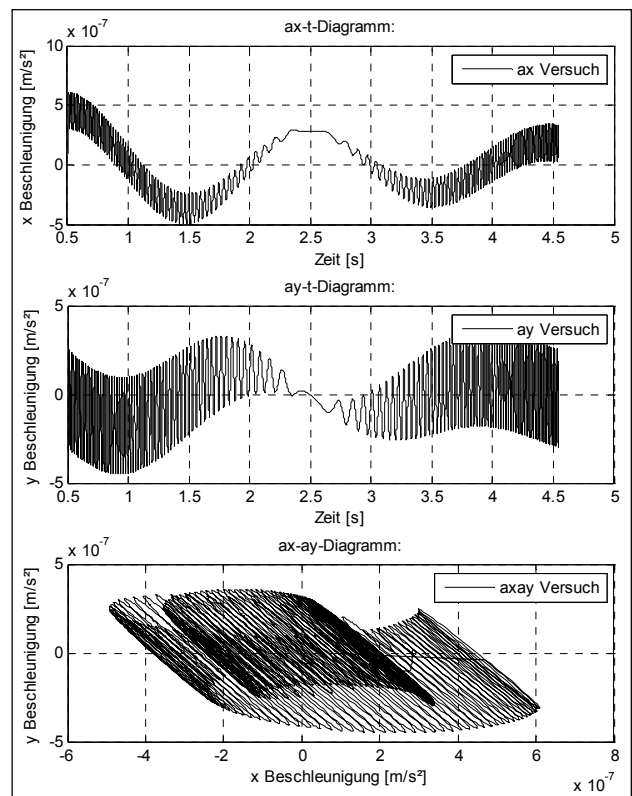


Abbildung 15. Beschleunigungsdiagramm für den Versuch in x-, y- und xy-Richtung

Die Diagramme zeigen, dass sich die Schwingungen der Gondel auf das Experiment übertragen. Allerdings ist auch zu erkennen, dass die Beschleunigungen sich im Bereich von  $10^{-7}$  m/s<sup>2</sup> befinden. Dieser Wert ist allerdings nicht als Beweis für die Erreichung der Restbeschleunigung von  $10^{-6}$  g im Experiment während der Versuchsdurchführung heranzuziehen, da zunächst noch die Parameter der Einflussgrößen bestimmt und in das Modell eingepflegt werden müssen.

### 4.4 SCHWINGUNGSVERLAUF WÄHREND DES GESAMTEN EXPERIMENTS

Neben den Restbeschleunigungen ist auch ein Blick auf die Auslenkung aller drei Hauptkomponenten während der kompletten Versuchsdurchführung für die spätere

Auslegung von Interesse. Den Verlauf der Auslenkungen stellt Abbildung 16 dar.

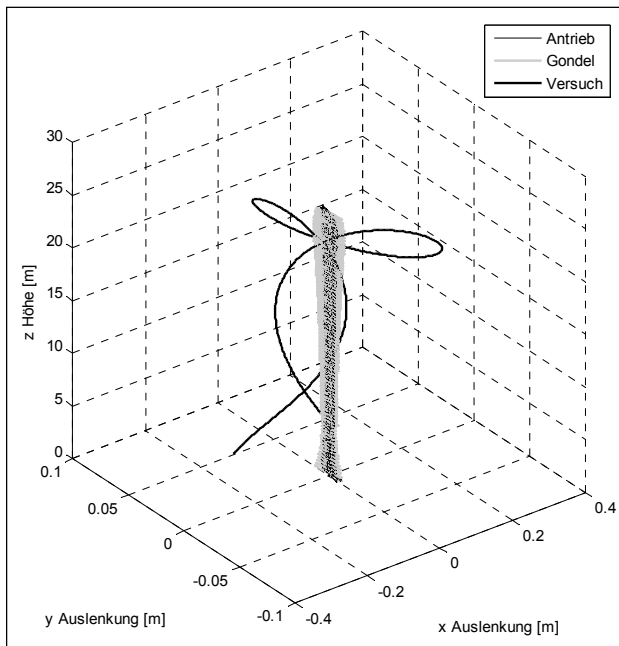


Abbildung 16. Verlauf der Auslenkungen aller drei Hauptkomponenten während des kompletten Versuchsablaufs

Der Verlauf der Auslenkungen von Gondel und Antrieb sind den Erwartungen nach gering. Das Experiment wiederum legt einige Millimeter während der gesamten Versuchsdurchführung zurück. Bei der Auslegung der Maße der Gondel spielt dies eine entscheidende Rolle. Es muss verhindert werden, dass das Experiment unabhängig von der Anregung in der Beschleunigungsphase und den damit verbundenen Anfangswerten für die Geschwindigkeit während der Freiflugphase gegen eine der Wände der Gondel stößt und diese oder das Experiment selbst beschädigt wird.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das mechanische Ersatzmodell zeigt trotz der zunächst noch recht groben Parametrierung, dass das generelle Konzept der Aufteilung der Führungen zwischen Antriebswagen und Gondel sich sehr positiv auf das Schwingungsverhalten des Experiments auswirken. Auch auf die Präzision der Gondelführung ist das Augenmerk zu richten, da die Anregung der Gondel in der Beschleunigungsphase sich auf die Restbeschleunigung des Experiments in der Flugphase negativ auswirkt. Die Erzielung einer maximalen Restbeschleunigung von  $< 10^{-6} g$  ist entsprechend dem Modell auch mit konventionellen Rollenführungen generell möglich. In ersten Konzeptideen wurde über eine Magnetführung nachgedacht, mit der eine aktive Regelung des Spalts und auch der Dämpfung möglich ist. Aufgrund der Ergebnisse des Modells lässt sich jedoch zeigen, dass auch eine Führung mit Laufrollen ausreichend ist.

Die Erstellung des Modells ist noch nicht abgeschlossen. Es werden noch weitere Einflüsse hinzugezogen und für die Berechnung der maximal zu erwartenden minimalen Restbeschleunigung im Experiment berücksichtigt. Beispielsweise ist die Aerodynamik des Antriebswagens als auch der Gondel mit einzubinden. Aus ersten Abschätzungen ist jedoch zu erwarten, dass die Aerodynamik einen sehr viel geringeren Einfluss auf die Anregung der bewegten Bauteile aufweist und somit das Ergebnis nicht größenordnungstechnisch verändern wird.

Neben der Einbindung weiterer Einflüsse sind auch die einstellbaren Parameter genauer zu bestimmen. Dies betrifft die Motorlinearität als auch die Führungsrollen. Zur Klassifizierung der Motorlinearität werden Untersuchungen an vergleichbaren Anlagen mit dem gleichen Linearmotor durchgeführt. Die Ergebnisse können bereits als Störgrößen im Modell berücksichtigt werden.

Die Kennwerte der Führungsrollen werden an einem eigens dafür entwickelten Laufrollenprüfstand untersucht. Die Laufrollen mit einem Durchmesser von ca. 100 mm werden dabei mit einer einstellbaren Kraft auf eine Scheibe mit einem Durchmesser von 400 mm gepresst. Die Scheibe fährt das Geschwindigkeitsprofil des *Einstein-Elevators* durch einen konventionellen Asynchronmotor ab. Die an den Laufrollen auftretenden Schwingungen werden detektiert und für die spätere Verwendung im Modell ausgewertet. Es können Rollen verschiedener Hersteller betrachtet werden und sowohl die für den Anwendungsfall beste Rolle ausgewählt werden als auch die Erreichung der minimalen Restbeschleunigung aufgrund der Rolleneigenschaften vor Aufbau des Gerätes überprüft werden.

## 6 DANKSAGUNG

Ich danke der DFG, dem Land Niedersachsen und dem Exzellenzcluster QUEST für die Chance den Aufbau des Großgeräts *Einstein-Elevator* im Rahmen des HITec-Baus zu begleiten. Desweiteren möchte ich mich bei Prof. Ertmer, Prof. Overmeyer und meinen Kollegen für die gute Zusammenarbeit bedanken.

## LITERATUR:

- [Lot13] Lotz, Christoph: *Schwerelos in Hannover*. phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Hannover, 2013. – ISSN 1616-2757
- [ZAR13] ZARM: *User Manual*. Drop Tower Operation and Service Company, ZARM FABmbH, Bremen, Version: April 26, 2012.



---

**Dipl.-Ing. Christoph Lotz**, Research Assistant at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Christoph Lotz was born 1985 in Neustadt a. Rbge., Germany. Between 2005 and 2011 he studied mechanical engineering at the Leibniz University Hannover.

Address: Institute of Transport und Automation Technology, Leibniz University Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany,  
Phone: +49 511 762-2291, Fax: +49 511 762-4007,  
E-Mail: christoph.lotz@ita.uni-hannover.de

**Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer**, Head of the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Ludger Overmeyer was born 1964 in Recke, Germany. Between 1984 and 1991 he studied Electrical Engineering at the University Hannover. 1996 he finished his doctorate in mechanical engineering at the University Hannover. From 1997 to 2001 he worked as project manager, division manager and head of research and development at Mühlbauer AG in Roding. Since 2001 Ludger Overmeyer is Professor at the Institute of Transport and Automation Technology of Leibniz University Hannover.

Address: Institute of Transport und Automation Technology, Leibniz University Hannover, An der Universität 2, 30823 Garbsen, Germany,  
Phone: +49 511 762-3524, Fax: +49 511 762-4007,  
E-Mail: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de