

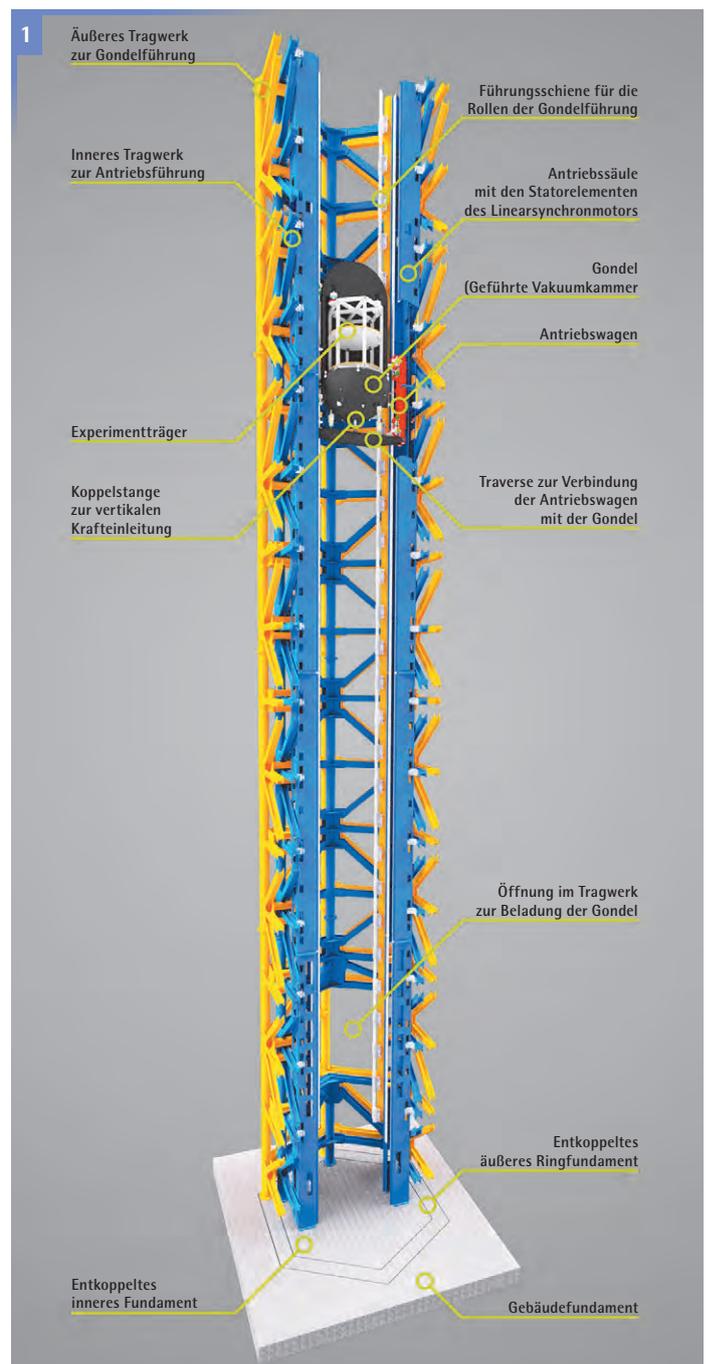
Der Einstein-Elevator

DER WELTWEIT ERSTE FALLTURM NEUER GENERATION MIT HOHER WIEDERHOLRATE

Der Einstein-Elevator ist die weltweit erste Forschungseinrichtung für physikalische und produktionstechnische Experimente bei unterschiedlichen Gravitationsbedingungen von Schwerelosigkeit bis zur fünffachen Erdbeschleunigung mit hoher Wiederholrate. Wissenschaftler vom Institut für Transport- und Automatisierungstechnik stellen die Funktionen und einzigartigen Möglichkeiten der Eigenkonstruktion vor.

Das ambitionierte Ziel in der Raumfahrt für die nächsten zwei Jahrzehnte besteht darin, eine Kolonie auf dem Mars zu errichten, zumindest wenn es nach der Vision von Elon Musk (SpaceX) geht. Für eine Kolonialisierung sind allerdings noch viele Fragen ungeklärt. Auf dem langen Flug zum Mars werden voraussichtlich metallische oder aus Kunststoff bestehende Ersatzteile benötigt. Wie werden diese in Schwerelosigkeit produziert? Mit konventionellen Werkzeugmaschinen? Im Druckverfahren? Sind die Astronauten auf dem Mars angekommen, müssen sie sich Unterkünfte errichten. Da die Nutzlast für Bauteile von der Erde begrenzt ist, sollte möglichst auf Ressourcen zurückgegriffen werden, die auf dem Planeten vorkommen. Aber wie werden aus den Mars-Rohstoffen Habitate gebaut, die dem Menschen nicht nur Schutz vor kosmischer Strahlung bieten, sondern im Inneren auch eine Atmosphäre erhält, in welcher der Mensch atmen kann?

Die Entwicklung von Methoden und Techniken für diese sehr speziellen Einsatzgebiete kann auf der Erde stattfinden. Die Erprobung unter Schwerbedingungen, wie sie beispielsweise im All oder auf dem Mars vorherrschen, kann dann in Falltürmen erfolgen. Mithilfe geeigneter Versuchsaufbauten können darin Experimente von sehr kleinen Prozessen aus der Quantenphysik



bis hin zu sehr großen Aufbauten aus dem Maschinenbau, beispielsweise zum 3D-Druck im All oder auf dem Mars, durchgeführt werden.

Das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik hat die Entwicklung einer neuartigen Anlage federführend übernommen und wurde dabei von Kollegen aus der Quantenoptik unterstützt. Vom ersten Entwurf bis hin

($\mu g = 10^{-6} g$ – hier steht g für eine Einheit/ein Vielfaches der Erdgravitation und nicht für eine Masse in Gramm), Versuchsdauer sowie Dimension und Gewicht der Nutzlast unterscheiden. Allerdings nutzen alle Falltürme das gleiche Prinzip: Das Fallenlassen eines Versuchsträgers im Vakuum, beschleunigt durch die Erdgravitation. Keiner dieser Falltürme ermöglicht es, Gravitationsbedingungen, wie sie

ge manuelle Arbeiten, ein geringerer Automatisierungsgrad und lange Pumpzeiten bei der Vakuumerzeugung. In beiden Anlagen wird das Experiment in einer druckdichten Kapsel in riesigen Vakuumkammern ungeführt fallengelassen und durch einen Behälter mit Styroporkugeln wieder abgebremst. Ein Katapult ermöglicht zudem im *Fallturm Bremen* eine Verdoppelung der Versuchsdauer von 4,7 s auf knapp 9,3 s durch einen vertikalen Parabelflug.



zur Bauüberwachung und der Entwicklung eigener Mess- und Steuerungskonzepte ist der Aufbau dieses Gerätes durch ein kleines Team von Institutsmitarbeitern in Zusammenarbeit mit den Firmen Ingenieur Büro Heinz Berlin (Planung und Konstruktion), Eilhauer Maschinenbau GmbH (Generalunternehmer für Stahlbau, Maschinenbau, Elektrotechnik), InTraSys GmbH Innovative Transportsysteme (Antriebs- bzw. Bremssystem und Regelungstechnik), Hall BV (Gondel und Traverse) und Stercom Power Solutions GmbH (SuperCap-Anlage) realisiert worden.

Einstein-Elevator versus konventionelle Falltürme

Weltweit existiert eine Vielzahl an Falltürmen, die sich in der Genauigkeit der Schwereelosigkeit/Mikrogravitation

auf dem Mond oder dem Mars auftreten, nachzustellen. Der Einstein-Elevator ist die erste Anlage weltweit, die zusätzlich zu reinen Schwerelosexperimenten die Kapsel auch gebremst fahren und somit andere Gravitationsbedingungen simulieren kann und das bei einer gleichzeitig hohen Wiederholrate, welche statistische Untersuchungen in diesen wissenschaftlichen Experimenten kosten- und zeitgünstig zulässt.

Die Wiederholrate bei konventionellen Falltürmen ist meist stark eingeschränkt. Zum Beispiel ermöglichen die beiden bekanntesten Forschungsanlagen, die *NASA Zero Gravity Research Facility* (132 m Freifallweg, 5,18 s Falldauer) und der *Fallturm Bremen* (110 m Freifallweg, 4,7 s Falldauer), nur zwei bis drei Experimente pro Tag. Gründe dafür sind unter anderem zeitaufwändi-

Falltürme der nächsten Generation

In den vergangenen zehn Jahren wurde am ZARM in Bremen, bei der NASA in Cleveland (Ohio) und in Hannover an einer neuen Falltürmgeneration gearbeitet. Treibend waren die Ziele: Erzeugung partieller Gravitation und Steigerung der Wiederholrate. Die Konzepte unterscheiden sich in ihrer Ausführung, haben aber alle gemeinsam, dass Hochleistungsantriebe sowie präzise Mess- und Regelungstechnik zum Einsatz kommen und der Automatisierungsgrad bei der Versuchsdurchführung stark gesteigert wird. Auf große Vakuumkammern wird verzichtet. Stattdessen fährt eine Kabine, welche den Experimentaufbau umgibt, von Schienen geführt auf und ab. In Bremen existiert mittlerweile ein Prototyp, die NASA wertet noch Konzeptstudien aus. Die Fertigstellung des Einstein-Elevators ist für das Wintersemester 2018/2019 geplant.

Große wissenschaftliche Experimente im vertikalen Parabelflug

Im Einstein-Elevator können große experimentelle Aufbauten untersucht werden. Diese können eine Größe von 1,7 m im Durchmesser und 2 m Höhe bei einem Gewicht von

Abbildung 1
Querschnitt durch die Konstruktion des Einstein-Elevators. Zur Schwingungsentkopplung stehen die zwei Türme (gelb und blau) auf jeweils vom Gebäude getrennten Fundamenten. Für die nötige Stabilität sorgen 10 m ins Erdreich getriebene Bohrpfähle.

Abbildung 2
Die Computeranimation vermittelt bereits einen hervorragenden Eindruck davon, wie es später im Einstein-Elevator einmal aussehen wird: Der Versuchsträger wird in der Beladeebene bei angehobenem Gondeloberteil eingebracht.



Abbildung 3
Die Gondel des Einstein-Elevators ist vollständig aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff gefertigt und hat bei einer Gesamthöhe von 4,5 m und einem Durchmesser von 2 m eine Masse von ca. 450 kg. Vor dem Einbau in den Einstein-Elevator wird die Gondel auf Vakuumdichtigkeit getestet, um später eine Vakuumqualität von mindestens 10^{-2} mbar zu gewährleisten.

Abbildung 4
Der Linear-Synchron-Motor in den zwei Antriebssäulen sorgt für die nötige Beschleunigung von maximal 5 g. Im unteren Bereich mit sechs parallelen Statorreihen für die Beschleunigung und im oberen Bereich mit zwei Statorreihen zum Ausgleich von Luft- und Rollwiderstand. Auffälliges Merkmal: Um die Turm-in-Turm-Konstruktion deutlich zu erkennen, sind der Turm für die Gondelführung in gelb (Institutsfarbe ITA) und der Turm für den Antrieb in blau (Farbe der LUH) lackiert. Alle beweglichen Komponenten wie die Antriebswagen und das Schienensystem zur Einbringung des Experimentträgers sind für einen maximalen Kontrast in rot lackiert.

bis zu 1000 kg haben. Eine druckdichte Hülle sorgt bei Bedarf für eine erdähnliche Atmosphäre im Inneren des Trägers. Außerdem können elektrische Energie, Druckluft, Kühlmittel oder Prozessgase zwischengespeichert werden.

Ein Hochleistungslinearantrieb beschleunigt die Gondel samt Experimentträger mit einem Gesamtgewicht von etwa 2,7 t auf einer Strecke von 5 m mit einer Beschleunigung von 5 g innerhalb von 0,5 s auf 20 m/s (= 72 km/h). Dazu werden 4,8 MW Antriebsleistung benötigt, die von einem Superkondensator-Energiespeicher bereitgestellt werden.

Während des vertikalen Parabelflugs kompensiert der Antrieb Luft- und Rollwiderstand entlang der 20 m langen Freifallstrecke, sodass die Gondel einer idealen vertikalen Wurfparabel folgt. Bei den Schwerelosexperimenten löst sich nach der Beschleunigungsphase im Inneren der Gondel der Experimentträger vom Gondelboden und schwebt kräftefrei für 4 s. Am Ende des Schwerelosfluges werden Experimentträger und Gondelboden wieder angenähert. Die einzelnen Antriebs Elemente werden kurzgeschlossen, sodass diese als Wirbelstrombremse arbeiten. Die Gondel wird mit bis zu 5 g wieder abgebremst. Mit der Unterstüt-

zung weiterer vier zuschaltbarer Wirbelstrombremsen wird die bewegte Masse sicher auf Hydraulikzylindern abgesetzt, die die Restgeschwindigkeit schlussendlich auf null reduzieren.

Mond, Mars, Raketenstart

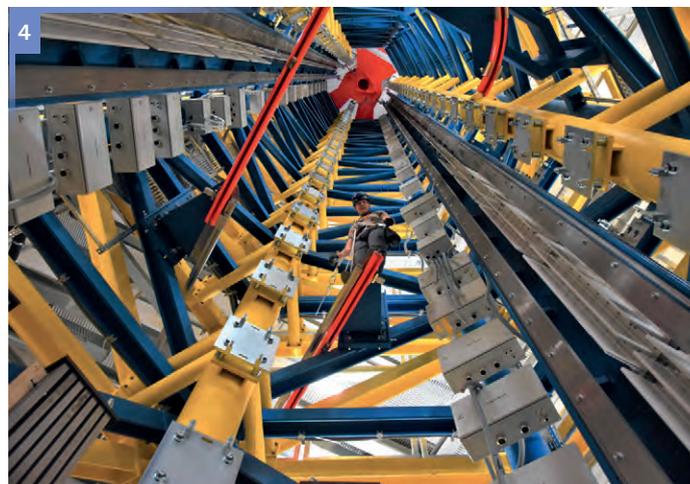
Im Bereich von 0 g bis 1 g werden Mond- oder Marsgravitation nachgestellt. Dabei wird in der Beschleunigungsphase mit im Vergleich zum Schwerelos-Profil geringerer Beschleunigung gestartet, so dass die Anfangsgeschwindigkeit ebenfalls geringer ist. Entsprechend des gewünschten Profils wird anschließend in Aufwärtsrichtung zusätzlich beschleunigt und in der Abwärtsrichtung entsprechend gebremst. Die mögliche Dauer der Versuchsdurchführung hängt vom Fahrprofil ab und kann zwischen 4 s bei nahe 0 g und bis zu 12,8 s bei 0,9 g betragen. Bei den Experimenten mit partieller Gravitation bleibt der Experimentträger fest mit dem Boden der Gondel verschraubt.

Auch der Bereich von 1 g bis 5 g ist nutzbar und wissenschaftlich interessant, wenn gleich dieser nicht im Fokus liegt. Für die Entwicklung von Technik, die in Schwerelosigkeit präzise funktioniert, aber zuvor einem Raketenstart

standhalten muss, sind Tests nötig, bei denen ein schneller Wechsel in einem Sekundenbruchteil von multipler Gravitation zu partieller Gravitation oder Schwerelosigkeit erfolgen kann. Beispielsweise können im Einstein-Elevator Beschleunigungen, wie sie in Ariane 5-Raketen (maximal 4,55 g) oder Sojus-Raketen (maximal 4,30 g) auftreten, nachgestellt werden. Bei den höheren Beschleunigungen sind allerdings die Versuchszeiten stark reduziert (1,4 s bei 1,5 g bis 0,5 s bei 5 g), da hierfür lediglich der Weg der Beschleunigungsphase zur Verfügung steht.

Wiederholrate von 100 Experimenten pro 8-Stunden-Schicht

100 Experimente in einer 8-Stunden-Schicht bedeuten, dass ein Experiment alle 4 bis 5 min. gestartet wird. In der Zeit zwischen den Versuchsdurchführungen befindet sich die Gondel in der Parkposition. Diese Zeit wird genutzt, um das Experiment wieder auszurichten. Der Experimentträger wird während des freien Falls durch die Corioliskraft beeinflusst, das heißt die Erde dreht sich unter dem Experiment weiter und es landet daher nicht dort, wo es zuvor gestartet ist. Die dafür wesentliche Komponente ist ein automatisches Ausrichtsystem, welches den Experimentträger in der Gondel zentriert, ohne diese dafür öffnen zu müssen. Außerdem wird die Zeit zwischen den Versuchsdurchführungen zum Wiederaufladen des Superkondensator-Energiespeichers sowie zum Abkühlen des Antriebs genutzt. In der Parkposition werden zudem die Energiespeicher des Experimentträgers automatisch gekoppelt und nachgeladen. Darüber hinaus können die Experimentdaten über eine permanente Datenverbindung zwischen Kontrollraum und Experiment



heruntergeladen und analysiert sowie die Parameter für den nächsten Flug hochgeladen werden.

Hohe μg -Qualität

Während sich die Experimente in Schwerelosigkeit befinden, sind die Restbeschleunigungen auf das Experiment so gering wie möglich zu halten. Gerade quantenoptische Experimente benötigen eine möglichst hohe μg -Qualität (Mikrogravitation). Der angestrebte Zielwert liegt bei $< 10^{-6} g$. Um dieses Ziel zu erreichen, sind Experiment beziehungsweise die Gondel und der Antrieb voneinander entkoppelt. Eine aufwändige Turm-in-Turm-Konstruktion mit separaten Fundamenten für die Türme der Antriebs- sowie der Gondelführung und einer speziellen Konstruktion zur

Kraftübertragung ermöglichen diese Entkopplung. Schwingungen aus dem Antrieb und dessen Führung werden nicht auf das sensible Experiment übertragen. Außerdem umgibt den Experimentträger im Gondelinneren ein Vakuum mit einem atmosphärischen Druck von $< 10^{-2}$ mbar, sodass auch Luftstöße und Schallwellen nicht übertragen werden. Bei der Konstruktion des Experimentträgers ist außerdem auf eine hohe Steifigkeit und ein schnelles Abklingverhalten bei Restschwingungen geachtet worden.

Die ersten Experimente stehen in den Startlöchern

Die ersten Forschungsprojekte im Einstein-Elevator werden durch das Institut für Transport- und Automatisierungstechnik sowie das Institut für

Quantenoptik gemeinsam mit dem Laserzentrum Hannover e.V. aus deren Kernthemen initiiert. Darunter sind Themen wie 3D-Druck, Lasermaterialbearbeitung, Pulverhandhabung in Schwerelosigkeit, Logistik im All (zum Beispiel Material- und Bauteilhandhabung auf der Raumstation oder auf der Mond-/Marsoberfläche) sowie Abbau, Transport und Verarbeitung von Material zum Unterkunftsbaus. Darüber hinaus besteht auch der Bedarf in der physikalischen Grundlagenforschung beispielsweise an ultrakalten Quantengasen (zum Beispiel Bose-Einstein-Kondensaten) sowie deren Atominterferometrie und Materiewellenexperimenten. Hierbei können die statistischen Kampagnen aufgrund der hohen Wiederholrate erstmals in adäquater Zeit und zu deutlich geringeren Kosten als bisher durchgeführt werden.



Dipl.-Ing. Christoph Lotz

Jahrgang 1985, ist seit 2011 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und der QUEST Leibniz Forschungsschule. Seit November 2014 leitet er die Gruppe Transporttechnik. Sein Arbeitsschwerpunkt ist das Management des Projektes Einstein-Elevator. Kontakt: christoph.lotz@hitec.uni-hannover.de



Sebastian Lazar, B.Sc.

Jahrgang 1990, ist seit 2016 Wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und der QUEST Leibniz Forschungsschule. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die elektrotechnische Betreuung des Aufbaus des Einstein-Elevators, insbesondere der Mess- und Steuerungstechnik. Kontakt: sebastian.lazar@hitec.uni-hannover.de



Prof. Dr.-Ing. Ludger Overmeyer

Jahrgang 1964, ist Leiter des Instituts für Transport- und Automatisierungstechnik und Wissenschaftlicher Direktor des Laser Zentrum Hannover e.V.. Seine Forschungsschwerpunkte sind unter anderem die Automatisierung von Förderanlagen und innerbetrieblichen Transportsystemen sowie die Integration innovativer Sensortechnologien in diese Anlagen, die Lasermaterialbearbeitung und die Optronik. Kontakt: ludger.overmeyer@ita.uni-hannover.de