# 25
# 20

25 Jahre
Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation

25 Years
ZARM Center of Applied Space Technology and Microgravity

20 Jahre Fallturm Bremen

20 Years Bremen Drop Tower

25

20

25 Jahre
Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation
25 Years
ZARM Center of Applied Space Technology and Microgravity

20 Jahre Fallturm Bremen
20 Years Bremen Drop Tower

# Inhalt · Content


## VORWORT FOREWORD

Als Umwelt-Wassertechnik-Institut gedacht – als ZARM geboren 4
Conceived As an Environmental Water Technology Institute – Born As ZARM

## GRUSSWORTE GREETINGS

Jens Böhrnsen 8
Prof. Dr. Wilfried Müller 12
Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner 14
Jean-Jacques Dordain 18
Christa Fuchs · Prof. Dott. Ing. h.c. Manfred Fuchs 20
Dr. Heinz Riesenhuber MdB 46
Hans Koschnick 50
Prof. Dr. Dr. h.c. Jürgen Timm 52
Dr. Horst Binnenbruck 100
Dr.-Ing. Martin Zell 104

# Inhalt · Content


## WIE ALLES BEGANN HOW IT ALL BEGAN

Von kreativen Entwürfen über die NASA zum Bremer Wahrzeichen 24
From the Drawing Board to NASA to Bremen Landmark

Das 8. Weltwunder: Der Fallturm – von der Idee zur Kreation 28
The 8th Wonder of the World: The Drop Tower - from Idea to Creation

Die Geschichte des ZARM 34
The Story of ZARM

Von Menschen und Maschinen 40
Of Men and Machines

## HIGHLIGHTS AUS DER FORSCHUNG RESEARCH HIGHLIGHTS

Kapillare Kanalströmungen 56
Capillary Channel Flows

Geheimnisvolle Quantenteilchen – Unheimliche Quantenwelt 62
The Mysteries of Quantum Particles – the Weirdness of the Quantum World

Mysterium Gravitation: Fallen alle Körper gleich? 76
The Mystery of Gravity: Do All Bodies Fall in the Same Way?

Feuer und Flamme – Zündender Umweltschutz 84
Pollution Control – Ignition!

ZARM-orbital: Navigation auf fremden Himmelskörpern 92
Navigation on Distant Celestial Bodies

## DIE VERSUCHSEINRICHTUNGEN DES ZARM ZARM TEST FACILITIES

Der Fallturm Bremen und wie er funktioniert 108
The Bremen Drop Tower and How It Works

Hier geht's rund – die Großzentrifuge am ZARM 116
Spinning Into Action – the Giant ZARM Centrifuge

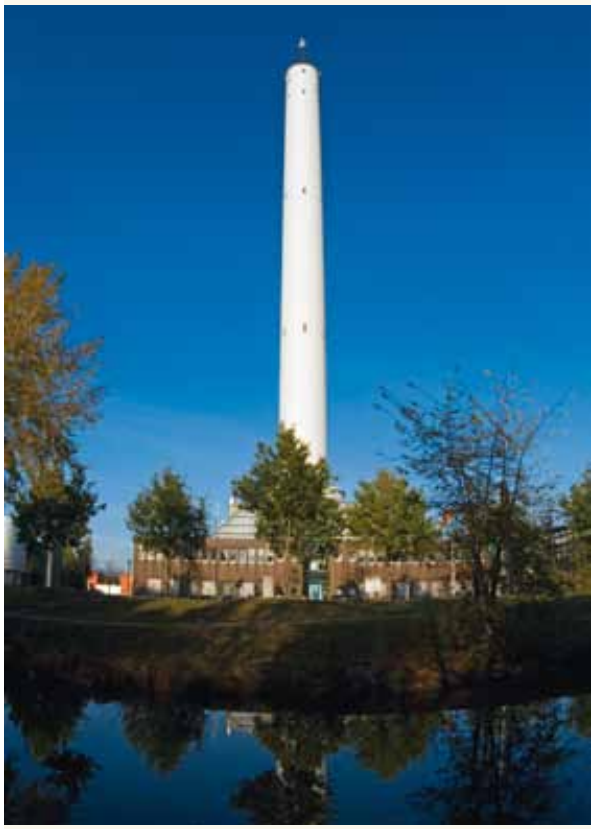
Wasser, Wind und Sturm 122
Water, Wind and Storm

## ZARM UND DIE KUNST ZARM AND THE ARTS

ZARM und die Kunst 132
ZARM and the Arts

# Als Umwelt-Wassertechnik-Institut gedacht – als ZARM geboren

*Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath*
*Leiter ZARM-Institut · Geschäftsführer ZARM-FAB mbH*
*Director General of the ZARM institute · Director General of the ZARM Drop Tower Operation and Service Company*



25 Jahre ZARM-Institut und 20 Jahre Fallturm Bremen – ein schöner Zeipunkt, sich zu erinnern und zu feiern.

Mit dieser Festschrift möchten wir Sie einladen, uns auf dem Streifzug durch unsere Erinnerung zu begleiten. Sie gibt einen Einblick in die Geschichte des ZARM und des Fallturms vom ersten Gedanken bis zum Jubiläumsjahr 2010. Eine Geschichte, die ohne Mitwirkung vieler „Co-Autoren“ nicht möglich gewesen wäre und deren Fortschreibung allen Mitwirkenden Herzenssache ist. Doch beginnen wir – am Anfang:

Im November 1981 wechselte ich von der Universität Hannover als Professor für Strömungsmechanik an die Universität Bremen. Im Vorfeld der Gründung unseres Fachbereiches Produktionstechnik hatte ich häufig Kontakte zur Industrie und zur Politik in Bremen. Insbesondere meine Kollegen aus den anwendungsorientierten Fachgebieten – Fertigungstechnik, Werkstofftechnik, Fertigungsverfahren, Verfahrenstechnik und andere – sprachen regelmäßig von großen Forschungsinstituten, die sie aufbauen wollten. Da die Grundausstattung meines Fachgebietes relativ spartanisch war, musste man sich bemühen, Drittmittelprojekte einzuwerben, um aus diesen Finanzmitteln wissenschaftliche Mitarbeiter finanzieren zu können. Das gelang mir über Kontakte zur Nahrungsmittel- und Umweltindustrie.

Im Jahr 1984 entwarf ich ein erstes Konzeptpapier für ein „Umwelttechnik-Wassertechnik-Institut“, das ich mit dem damaligen Staatsrat Rainer Köttgen und dem damaligen Rektor Prof. Jürgen Timm diskutiert hatte. Beide haben mich über viele Jahre begleitet und gefördert. Dafür an dieser Stelle ein herzliches Dankeschön.

Im selben Jahr lernte ich Manfred und Christa Fuchs kennen. Herr Fuchs war damals Vertriebsleiter bei ERNO und Frau Fuchs hatte gerade eine kleine Firma, die OHB GmbH, mit Sitz am Hemelinger Hafendamm erworben. Von Anfang an war ich von diesen beiden außergewöhnlichen Persönlichkeiten begeistert. Beide, Manfred wie Christa Fuchs, haben mich seither – bis zum heutigen Tage – stets begleitet, unterstützt und gefördert. Dafür möchte ich beiden an dieser Stelle meinen herzlichen Dank aussprechen. Es gelang uns gemeinsam, erste Drittmittelprojekte einzuwerben, die auch in Richtung Umwelttechnik gingen. Wir trafen uns regelmäßig zu Projektbesprechungen, wobei Manfred Fuchs immer wieder versuchte, mich davon zu überzeugen, an der Universität Bremen doch etwas in Sachen Raumfahrt aufzubauen.

Da ich schon seit meiner Kindheit Luft- und Raumfahrt begeistert bin, habe ich den Vorschlag von Manfred Fuchs aufgegriffen. Daraufhin entstand ein erstes Konzept für ein Bremer Institut für Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (BIRM). Allerdings gefiel mir die abgekürzte Schreibweise überhaupt nicht. Es war Prof. Timm, der anregte, stattdessen doch besser die Bezeichnung Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) einzuführen.

Im September 1985 wurde dann das ZARM per Fachbereichsrat-Beschluss gegründet – die Geburtsstunde des ZARM. Die Rückschau auf ein Vierteljahrhundert vielfältiger und spannender wissenschaftlicher Arbeit erfüllt mich mit Stolz. Mein besonderer Dank gilt all jenen, die an der Erfolgsgeschichte des ZARM mitgeschrieben haben.

# Conceived As an Environmental Water Technology Institute – Born As ZARM

Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation

KONZEPT

FÜR EIN

Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation

Bremen, im Oktober 1985

25 years of ZARM and twenty years of the Bremen Drop Tower – a good time to look back and a happy time to celebrate.

With this commemorative publication we invite you to join us on a journey down memory lane. It offers an insight into the history of ZARM and of the Drop Tower from first conception right down to the anniversary year of 2010 – a story that would not have been possible without the participation of a great many "co-authors" for all of whom the writing of further chapters remains close to their hearts. But let us start at the beginning.

In November 1981 I moved from the University of Hanover to become Professor of Fluid Mechanics at the University of Bremen. Prior to the founding of our production engineering faculty I had frequent contacts with industry and with politicians in Bremen. In particular my colleagues from the applied sciences – production technology, materials engineering, production processes, process engineering and others – were regularly talking about the great research institutes they were planning to establish. Since the basic facilities in my faculty were relatively spartan we needed to work hard to acquire outside projects to be able to finance research staff from these funds. Here I was successful through contacts with the food and environmental industries.

In 1984 I drew up an initial draft paper for an "environmental and water technology institute" which I had discussed with the then state councilor Rainer Köttgen and the rector at that time, Professor Jürgen Timm. Both have accompanied and supported my work over very many years and I would like to take this opportunity of expressing my warmest thanks to both of them.

In the same year I met Manfred and Christa Fuchs. Manfred Fuchs was at that time sales manager for ERNO and his wife had just acquired a small firm, OHB GmbH, with premises in Bremen's Hemelinger Hafendamm. From the start I was highly taken by these two exceptional personalities. Since then – right up to the present day – both Manfred and Christa Fuchs have resolutely accompanied, supported and encouraged me. Here I would like to extend my heartfelt thanks to them both. Together we were successful in acquiring the first outside projects, also relating to environmental technology. We regularly met for project evaluations, with Manfred Fuchs continually trying to convince me to set up something at the University of Bremen in the field of space technology.

Having been a great fan of aviation and space travel since childhood I seized on this suggestion and the result was an initial concept for a Bremen institute for space technology and microgravity – in German, BIRM. However, I was not at all happy with this short form. It was Professor Timm who suggested instead the name Center for Applied Space Technology and Microgravity, which in its German original yields the acronym ZARM (Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation).

In September 1985 ZARM was duly founded by resolution of the faculty council – ZARM was born. Looking back at a quarter of a century of multifaceted and enthralling scientific enterprise fills me with pride. My very special thanks go to all those who have played their part in the writing of the ZARM success story.

## Jens Böhrnsen

*Bürgermeister · Präsident des Senats der Freien Hansestadt Bremen*
*Mayor · President of the Senate of the Free Hanseatic City of Bremen*

146 Meter hoch, in Europa einzigartig und längst eines der architektonischen Wahrzeichen Bremens: Wie das historische Bremer Rathaus, Welterbe der Menschheit, die große hanseatische Tradition der Freien Hansestadt verkörpert, so symbolisiert der Fallturm im Technologiepark der Bremer Universität die herausragende Bedeutung von Forschung, Wissenschaft und Innovation in Bremen. In besonderer Weise steht er jedoch für den europäischen Luft- und Raumfahrtstandort Bremen und seinen Ruf als exzellentes Zentrum für Weltraumforschung. Einen bedeutenden Anteil daran hat das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation ZARM.

In diesem Jahr kann das ZARM sein 25-jähriges Jubiläum feiern, zu dem ich herzlich gratuliere. Als der Fallturm 1990 in Betrieb ging, war diese vielbeachtete Bremer High-Tech-Einrichtung für Experimente unter Bedingungen von Schwerelosigkeit zunächst konkurrenzlos und wurde zum Vorbild für ähnliche Einrichtungen. Erfolg ruft Konkurrenten auf den Plan – doch das ZARM legte nach und konnte im Jahr 2004 durch den Einsatz einer Katapult-Anlage den Zustand der Schwerelosigkeit und damit den Forschungszeitraum auf 9,3 s nahezu verdoppeln. Kein Wunder, dass Wissenschaftler aus allen Teilen der Welt diese Einrichtung nutzen und dafür sorgen, dass am ZARM in Bremen jährlich rund 400 Experimente in der Schwerelosigkeit durchgeführt werden können.

Ich freue mich sehr, dass das ZARM unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath in diesem Vierteljahrhundert auf eine nahtlose Erfolgsgeschichte zurückblicken kann. Dazu gehört, dass das ZARM auch an dem derzeit bedeutendsten europäischen Raumfahrtindustrieprojekt mit Bauteilen für das satellitengestützte europäische Navigationssystem beteiligt ist.

Dass in diesem Jahr der größte Raumfahrtforschungskongress COSPAR in Bremen ausgerichtet wurde, kann gewiss auch als Ausdruck der hohen internationalen Anerkennung gewürdigt werden, die das ZARM genießt. Ich bedanke mich an dieser Stelle bei allen, die daran mitgewirkt haben. Dem Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation wünsche ich für die weitere Zukunft viel Erfolg.

Jens Böhrnsen

146 meters high, unique in Europe and long since one of Bremen's architectural emblems – just as the historical town hall of Bremen, a world heritage site, epitomizes the city state's great Hanseatic tradition, so the Drop Tower in University of Bremen's Technology Park symbolizes the exceptional importance of research, science and innovation in Bremen. But in particular it stands for the fact that Bremen is a prime location of the European aerospace industry as well as for its reputation as an outstanding center for space research. A major share of this is due to the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM).

This year ZARM is able to celebrate its 25th anniversary for which I offer my hearty congratulations. When the Drop Tower was initially commissioned in 1990 this highly acclaimed Bremen high-tech facility for the conducting of experiments under conditions of weightlessness was unrivalled and became a model for similar installations. Success breeds competition – but ZARM did not rest on its laurels and in 2004 was able to practically double the state of weightlessness and with it the available research span to 9.3 s through the use of a catapult facility. It is no wonder then that scientists from all over the world make use of this amenity, meaning that around 400 experiments under conditions of weightlessness can be carried out annually at ZARM in Bremen.

I am delighted that under the leadership of Professor Dr.-Ing. Hans J. Rath ZARM is able to look back over the last quarter of a century as an unbroken success story. This includes ZARM's participation in Europe's currently most important space technology project with components for the satellite-based European Navigation System.

Moreover, the fact that the largest space research congress COSPAR this year took place in Bremen can without doubt be seen as a mark of the high degree of international recognition which ZARM enjoys. My thanks go here to all those who have contributed to it and I wish the Center of Applied Space Technology and Microgravity every possible success in the future.

## Prof. Dr. Wilfried Müller

*Rektor der Universität Bremen*
*President of the University of Bremen*

25 Jahre Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation sind in jeder Beziehung ein besonderes Ereignis: für den Fachbereich Produktionstechnik, die Universität Bremen und den Technologiepark.

Das ZARM unter Leitung von Prof. Rath und der später gebaute und 1990 in Betrieb genommene Fallturm sind mehr als ein sehr erfolgreiches Institut des Fachbereichs Produktionstechnik: Der Fallturm ist das Symbol einer Wende in der Universitätsentwicklung geworden, denn mit seiner weit ins Land hinein sichtbaren Höhe konnten alle an Wissenschaft und Universitäten interessierten Personen erkennen, dass die Universität Bremen nicht mehr nur eine Institution der Lehrerbildung und der Geistes- und Sozialwissenschaften sein will, sondern auch eine Stätte der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Forschung. Vor diesem Hintergrund ist der Fallturm auch das Symbol des 1988 eröffneten Technologieparks an der Universität Bremen geworden, in dem heute ca. 6.000 Menschen arbeiten und kleine sowie mittlere Unternehmen in Kooperation mit der Universität und den An-Instituten sich entwickeln können. Die Erfolgsgeschichte des ZARM wurde 2008 abgerundet durch den Aufbau des DLR-Instituts für Raumfahrtsysteme unter der Leitung von Prof. Dittus, langjähriger Mitarbeiter von Prof. Rath.

Alle diese Erfolge wären nicht ohne den Gründer Prof. Dr. Rath möglich gewesen. Seinem Willen, seiner Kreativität und seiner Abenteuerlust verdanken wir die Erfolge des ZARM.

Herzlichen Dank, Hans Josef Rath.

25 years Center of Applied Space and Microgravity constitute a special event in all respects – for the Department of Production Engineering, the University of Bremen and the Technology Park.

ZARM under the leadership of Professor Rath together with the subsequent building of the Drop Tower, commissioned in 1990, is more than just a successful institute within the Department of Production Engineering: the Drop Tower symbolizes a turning point in the development of the university, since, towering for all to see for miles around, it serves as a reminder to all those parties interested in science and the universities that the University of Bremen no longer wishes to be solely an institution for training teachers and for the humanities and social sciences but also a place of scientific and engineering research. It is in this context that the Drop Tower also symbolizes the University of Bremen Technology Park opened in 1988, employing some 6,000 people and where small and medium-sized businesses can develop in co-operation with the University and its affiliated institutes. The ZARM success story was capped in the year 2008 with the establishment of the DLR Institute of Space Systems under the direction of Professor Dittus, a long-standing associate of Professor Rath's.

None of these successes would have been possible without the moving force behind them, Professor Dr. Rath. It is to his determination, his creativity and his sense of adventure that we are indebted for the successes which ZARM can boast.

Sincerest thanks, Hans Josef Rath.

Wilfried Müller

## Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

*Vorsitzender des Vorstands Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)*
*Chairman of the Executive Board German Aerospace Center (DLR)*

Was haben Rotkopf, Grauschimmel, Bartstreicher und Packan mit Mikrogravitation zu tun? Nun, zunächst einmal nichts. Außer dass die Bremer Stadtmusikanten eine ebenso große Affinität zum Stadtstaat Bremen hatten wie die Raumfahrt.

Im Jahr 1961 wurde von den Flugzeugherstellern Focke-Wulf, Weserflug und Hamburger Flugzeugbau eine Arbeitsgemeinschaft gegründet, die zum Ziel hatte, alle anfallenden Entwicklungsaufgaben, vor allem auf dem Gebiet der Raumfahrt, zu konzentrieren. Aus ihr entstand 1964 der Entwicklungsring Nord (ERNO) als Interessengemeinschaft für Raumfahrt mit Sitz in Bremen. Unvergessen sind die Sonnensonde HELIOS und das Spacelab, die aus einer Interessengemeinschaft echte Raumfahrer machten. Seit dem hat sich die Stadt zu einer wahren Geburtsstätte für Raumfahrt „made in Germany“ entwickelt, mit der Astrium GmbH, OHB, dem DLR-Institut für Raumfahrtsysteme und der Schwerelosigkeitsforschung durch das Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM).

Ein wichtiger Aspekt der Raumfahrt ist nicht nur die Überwindung der Schwerkraft, sondern das Forschen unter Schwerelosigkeit. Auf diesen Aspekt konzentriert sich das ZARM seit 25 Jahren. Sein Fallturm mit einer Fallhöhe von 146 Metern macht es in Europa zu einer einzigartigen Forschungseinrichtung. Seit 1990 wird hier täglich unter Schwerelosigkeit geforscht – und das, ohne die Erde zu verlassen. Das Spektrum der Experimente reicht dabei von der erkenntnis- und anwendungsorientierten Grundlagenforschung bis hin zur Produktentwicklung, insbe-

sondere in der Fluidmechanik, der Rheologie, der Verbrennung und der Thermodynamik, sowie in der Materialforschung, der Physik und der Biologie.

Aufgrund von Dauer und Qualität der Schwerelosigkeit ist der Fallturm besonders geeignet für die Untersuchung schnell ablaufender Prozesse, zur Erprobung von raumfahrttechnologischen Entwicklungen sowie zur Vorbereitung und Erprobung von Experimenten im Weltraum, wie etwa auf der Internationalen Raumstation ISS. Damit ist der Fallturm eine ideale Ergänzung der Möglichkeiten mit und in der Schwerelosigkeit zu forschen.

Prof. Hans J. Rath hat mit seinen Mitarbeitern in den vergangenen 25 Jahren wesentlich zur internationalen Anerkennung der Forschung unter Weltraumbedingungen beigetragen. Dank ihm und seinem Team ist der Fallturm aus der bodengebundenen Schwerelosigkeitsforschung wie zur Vorbereitung orbitaler Forschungsprojekte nicht mehr wegzudenken.

Im Gegensatz zu den Bremer Stadtmusikanten hat das ZARM Bremen erreicht und wird hoffentlich noch viele erfolgreiche Projekte realisieren.

What do a rooster, a donkey, a cat and a dog have to do with microgravity? Actually nothing at all – other than the fact that these four Brothers Grimm characters, the so-called "Town Musicians of Bremen", had an equally great affinity to the city state of Bremen as does space technology!

In 1961 the aircraft manufacturers Focke-Wulf, Weserflug and Hamburger Flugzeugbau got together to create a consortium with the aim of streamlining all relevant developmental projects, particularly in the field of space technology. This in turn led to the creation of the so-called Entwicklungsring Nord (ERNO) in 1964 as a Bremen-based syndicate for astronautics. Memories of the HELIOS solar space probe and the spacelab which transformed a group of interested parties into real astronauts are still strong. Since then the city has established itself as a true birthplace of space technology "made in Germany", including Astrium, OHB, the DLR Institute of Space Systems and the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) with its research into weightlessness.

An important aspect of space technology is not only the overcoming of gravity but the conducting of research under conditions of weightlessness. ZARM has been concentrating on this facet for the last 25 years. Its Drop Tower with a fall height of 110 meters makes it a unique research facility within Europe. Since 1990 research into weightlessness has been conducted on a daily basis – without once leaving the Earth. The spectrum of experiments carried out ranges from knowledge-oriented and application-oriented fundamental research through to product development, particularly in fluid mechanics, rheology, combustion and thermodynamics, as well as in materials research, physics and biology.

Because of the duration and quality of weightlessness the Drop Tower is particularly suitable for investigating rapidly occurring processes, for testing astronautical developments as well as for the preparation and testing of experiments in space, such as those undertaken on the International Space Station (ISS). In this way the Drop Tower ideally enhances the possibilities for conducting research with and in weightlessness.

Professor Hans J. Rath has, together with his associates, made a substantial contribution in the last 25 years to the international recognition of research under space conditions. Thanks to him and his team it is impossible to imagine earthbound research into weightlessness or the preparation of orbital research projects without the Drop Tower.

Unlike the town musicians in the story, ZARM has reached Bremen, and, it is to be hoped, will still carry out a great many successful projects.

## Jean-Jacques Dordain

*Generaldirektor European Space Agency (ESA)*
*Director General European Space Agency (ESA)*

Im Namen der ESA sende ich meine herzlichsten Glückwünsche zum 25-jährigen Jubiläum des ZARM. Das ZARM-Institut hat sich in den 25 Jahren seines Bestehens europaweit zu einem der bedeutendsten Institute zur Forschung unter Weltraumbedingungen entwickelt. Es kann auf herausragende Forschungsergebnisse in vielen wissenschaftlichen und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen verweisen.

Der Fallturm Bremen am ZARM ist wichtiger Bestandteil für die Forschung unter Bedingungen der Mikrogravitation – und wurde deshalb 2003 in die offizielle Liste der ESA External Facilities aufgenommen. Wissenschaftler aus aller Welt ebenso wie die internationale Industrie haben die Anlagen des ZARM genutzt, was in bedeutende wissenschaftliche und technische Fortschritte und Durchbrüche mündete.

Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath hat das ZARM seit seiner Gründung erfolgreich geleitet und durch seine aktive Rolle in vielen Europäischen Forschungsstiftungen unermüdlich dafür gesorgt, dass diesem Forschungsgebiet die gebührende Aufmerksamkeit zuteil wurde. Mit der Organisation internationaler Konferenzen, wie dem International Astronautical Congress 2003 und der COSPAR Scientific Assembly in 2010, treibt er die Sichtbarkeit unserer Weltraumforschung und die internationale Zusammenarbeit aktiv voran.

Am 25. Geburtstag des ZARM zeigt sich deutlich: seine Zukunft ist vielversprechend. Gratulation – und die besten Wünsche für die nächsten 25 Jahre.

On behalf of ESA, I would like to send you my warmest congratulations on the occasion of the 25th anniversary of ZARM. Over the last 25 years the ZARM institute has developed continuously to become one of the most distinguished European institutes in space research. It has outstanding scientific achievements to its name in many scientific and engineering disciplines.

The Bremen Drop Tower at ZARM represents an important backbone element for research under microgravity conditions – and was therefore in 2003 officially affiliated as an ESA External Facility. Scientists and industry throughout the world have been using the ZARM facilities, resulting in significant scientific and technological advancements and breakthroughs.

Professor Dr.-Ing. Hans J. Rath has led ZARM very successfully from the time of its foundation, and has always done a great deal to focus attention on this research field through his active role in many European research foundations. By organizing international conferences, such as the International Astronautical Congress in 2003 and the COSPAR Scientific Assembly in 2010, he actively promotes the visibility of our space research and international collaboration.

On the 25th anniversary of ZARM, it is clear that its prospects for the future look very promising. Congratulations and best wishes for the next 25 years!

**Jean-Jacques Dordain**

## Christa Fuchs

*Aufsichtsratsvorsitzende der OHB Technology AG*
*Chairwoman of the Supervisory Board OHB Technology AG*

## Prof. Dott. Ing. h.c. Manfred Fuchs

*Aufsichtsratsvorsitzender der OHB-System AG*
*Chairman of the Supervisory Board OHB-System AG*

Im Gründungsjahr des ZARM-Instituts 1985 wurde auch die wenig früher gegründete OHB GmbH erstmalig auf dem Gebiet der Raumfahrt und Raumfahrtforschung aktiv. Seither haben sich beide Einrichtungen in hervorragender Weise entwickelt und repräsentieren heute gemeinsam Bremens Anspruch auf eine führende Rolle im Bereich der Raumfahrttechnologie und Weltraumwissenschaften für Deutschland und Europa.

Tatsächlich war die Gründung des ZARM das Ergebnis vieler Gespräche, die Hans J. Rath, meine Frau Christa und ich in dieser Zeit regelmäßig geführt haben. Aus meinen beruflichen Wurzeln bei der Bremer Firma ERNO-Raumfahrttechnik entwickelte sich nicht nur das Bild eigenständiger Aktivitäten im Raumfahrtbereich bis hin zur heutigen OHB-Holding, sondern mir war auch klar, dass es in Deutschland einen Bedarf für ein Universitätsinstitut wie das ZARM gab. Gemeinsam haben wir deshalb die Pläne entwickelt. Bis zum heutigen Tag sind wir nicht nur freundschaftlich eng verbunden, sondern haben in den vergangenen 25 Jahren an vielen Stellen eng zusammen gearbeitet. Diese Zusammenarbeit wollen wir nicht nur weiter pflegen, sondern arbeiten mit Kräften auch am weiteren Ausbau gemeinsamer Aktivitäten. Aufgrund der gemeinsamen Anfänge und der langen parallelen Geschichte dürfen wir auch ein wenig stolz auf den Erfolg des ZARM sein und auf das, was wir zusammen in Bremen und für Bremen geschaffen haben.

Deshalb wünschen wir dem ZARM und damit ausdrücklich auch uns weiterhin viel Erfolg und freuen uns auf die zukünftigen gemeinsamen Projekte.

In 1985, the year in which the ZARM institute was founded, OHB, which had come into existence shortly before, also for the first time became active in the field of space technology and research. Since then both institutions have made outstanding developments and today jointly represent Bremen's claim to a leading role in the field of space technology and astronautics in Germany and Europe.

In actual fact the founding of ZARM was the result of many conversations regularly conducted at that time between Hans J. Rath, my wife Christa and myself. From my professional roots in the Bremen space engineering firm ERNO not only did the idea of initiating independent activities in the field of space technology take shape – culminating in today's OHB holding – but it was additionally clear to me that Germany had a need for a university institute along the lines of ZARM. Thus, together we hatched out the plans. Up until the present day we have not only remained good friends but over the last 25 years have worked closely with one another on many projects. Not only do we wish to further cultivate this collaboration but we are also working hard to expand our common activities. As a result of these joint beginnings and a long parallel history we feel justified in feeling some pride in ZARM's success and in what together we have achieved in Bremen and for Bremen.

Therefore we wish ZARM, and therefore ourselves too, every future success and look forward to the joint projects which the future holds.

C. Fuchs  Manfred Fuchs

# Wie alles
# How it A

s beganm

ll Began

# Von kreativen Entwürfen über die NASA zum Bremer Wahrzeichen

*Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath*
*Leiter ZARM-Institut · Geschäftsführer ZARM-FAB mbH*
*Director General of the ZARM institute · Director General of the ZARM Drop Tower Operation and Service Company*

Im Vorfeld der Gründung des ZARM hatte ich den Entschluss gefasst, mich neben der Raumfahrttechnologie auch intensiv mit der Forschung unter Quasi-Schwerelosigkeit (Mikrogravitation beziehungsweise kompensierte Gravitation) zu beschäftigen, was sich dann ja auch in der Namensgebung des Instituts niederschlug. Als Strömungsmechaniker war mir natürlich bekannt, dass sich Flüssigkeiten unter Mikrogravitation völlig anders verhalten, insbesondere dann, wenn freie Grenzflächen vorhanden sind. Mittels numerischer Simulationsverfahren lassen sich die entsprechenden Gleichungen zwar lösen, jedoch benötigt man in jedem Fall entsprechende Experimente unter Schwerelosigkeit, um die theoretischen Resultate zu validieren. Diese Benchmark-Experimente sind bis heute zwingend erforderlich.

Deshalb erstellte ich eine Analyse, welche Flugmöglichkeiten für „Schwerelosigkeitsexperimente“ zum damaligen Zeitpunkt weltweit überhaupt bestanden. Außer auf Shuttle-Flügen, Höhenforschungsraketen und Parabelflügen konnten diese Experimente lediglich in einen 120 m tiefen Fallschacht im NASA-Zentrum Cleveland durchgeführt werden. In Europa existierte kein wirklich modernes Fallsystem.

Anfang 1986 entwarf ich ein erstes Konzept für einen Fallturm auf dem Gelände der Universität Bremen. Ein Turm sollte es auf jeden Fall sein, denn zum einen sieht man einen Fallschacht nicht und zum anderen ist die Zugänglichkeit eines Schachts im operativen Betrieb erheblich schwieriger.

Das erste Fallturmkonzept bestand aus einem 73 m hohen Stahlrohr, das mit entsprechenden Stahlseilen abgespannt war. Das seinerzeit noch bescheidene, zweistöckige Gebäude rund um das Stahlrohr wies allerdings schon einen Katapultraum auf. Im Laufe der Diskussionen stieg die Höhe des Turmes (Stahlrohr) auf 93 m.

Eines Morgens ging ich mit dem Fallturmkonzept zu Helmut Dietrich in das Baudezernat der Universität Bremen. Helmut Dietrich fragte mich, wie man sich Schwerelosigkeit vorstellen müsse. Meine Antwort: „Stell’ Dich mal auf Deinen Schreibtisch und spring’ dann runter. Das, was Du während des Sprungs spürst, ist Quasi-Schwerelosigkeit.“ Helmut Dietrich sprang – und war von meinem ersten Konzept angetan. Allerdings war er der Meinung, dass es ein Turm aus Beton sein sollte. Kurze Zeit später war der Turm dann bereits 130 m hoch. Von Anfang an wollte ich keinen schornsteinähnlichen Turm, sondern der obere Turmabschluss sollte etwas Besonderes sein.

Das neue Konzept eines Fallturms mit einer Fallröhre von rund 120 m, das nun schon ziemlich ausgereift war, wurde im Forschungsministerium in Bonn ausführlich diskutiert. Man zeigte sich optimistisch bezüglich einer möglichen Förderung.

Zwischenzeitlich reiste eine ZARM-Delegation mit den Partnern aus der Industrie, Helmut Dietrich und unserem Fallturmarchitekten Horst Rosengart in die USA. Dort besuchten wir die NASA-Zentren in Huntsville

und in Cleveland. In Cleveland besichtigten wir den Fallschacht der NASA, der etwa die gleiche Fallhöhe hat wie unser Turm heute. Die Kolleginnen und Kollegen der NASA waren sehr offen und hilfsbereit und gaben uns wertvolle Tipps bezüglich unseres Fallturms. Während dieser USA-Reise beschlossen wir eines Abends, nun auch das Design unserer Turmspitze festzulegen. Wir entschieden uns für einen 16 m hohen Glaskegel mit einer 30 m langen Space-Needle auf der Spitze. Die Space-Needle hat man mir leider später aus Kostengründen gestrichen. Eigentlich schade – denn dann würde unser Fallturm nicht 146 m, sondern 176 m in den Bremer Himmel emporragen.

Anfang 1987 war es soweit. Wir vollzogen den ersten Spatenstich jenseits des Hochschulrings. Die damals neu zu schaffende Straße trägt heute den Namen „Am Fallturm“. Nach dreijähriger Bau- und Entwicklungszeit – übrigens ohne eine heute so gängige Praxis der Kostensteigerung – konnte der damalige Bundesforschungsminister Heinz Riesenhuber den Fallturm Bremen im September 1990 in Betrieb nehmen. Und auch danach ging es positiv weiter, nicht nur in der wissenschaftlichen Arbeit. Im Jahr 2004 wurde das bereits in das erste Fallturmkonzept integrierte Katapult fertiggestellt und von der damals amtierenden Bundesforschungsministerin Edelgard Bulmahn eingeweiht.

Heute gilt der Fallturm längst nicht nur den Bremern als Wahrzeichen der Innovation und der Nachhaltigkeit in ihrer Stadt. Als erdgebundenes Weltraumlabor ist er weltweit der modernste Fallturm. Entsprechend wird er von vielen Wissenschaftlern aus dem In- und Ausland genutzt – mittlerweile seit 20 Jahren.

## From the Drawing Board to NASA to Bremen Landmark

Prior to the founding of ZARM I had made the decision to devote myself not only to space technology but also to intensive research under conditions of near-weightlessness (microgravity or compensated gravity), something which came to be reflected in the institute’s subsequent name. Coming from the field of fluid mechanics I of course realized that fluids under microgravity behave completely differently, especially when free interfaces exist. Even though it is possible to solve the corresponding equations by means of numerical simulation procedures, corresponding experiments under conditions of weightlessness are still necessary to validate the theoretical results. These benchmark experiments remain imperative up to the present day. Therefore I prepared an analysis of what flight facilities for “experiments under weightlessness” existed at all at that time. Other than on shuttle flights, high-altitude research rockets and parabolic flights, the only place where these experiments could be conducted was in a 120 m deep drop shaft at the NASA center in Cleveland. In Europe there was no truly modern drop system.

At the beginning of 1986 I drew up an initial concept for a Drop Tower on the site of University of Bremen. It was definitely to be a tower, firstly since a drop shaft cannot be seen and secondly because the operational accessibility of a shaft is considerably more problematic.

The first Drop Tower concept consisted of a steel tube 73 m high, secured with corresponding steel cables. The initially modest, two-story building surrounding the steel pipe did, however, already boast a catapult room. In the course of discussions the height of the tower (steel pipe) increased to 93 m.

One morning I took the Drop Tower draft to Helmut Dietrich from the University of Bremen's building department. Helmut Dietrich asked me what was the best way to imagine weightlessness. "Get up on your desk," I answered, "and jump off. The feeling you have as you jump is that of near-weightlessness." Helmut Dietrich jumped – and was sold on this first concept of mine. He was, however, of the opinion that the tower ought to be made of concrete. A short time later the tower had already reached a height of 130 m. Right from the start I wanted to avoid a tower that was like a chimney and wanted the top part of it to be something special.

This new concept for a Drop Tower with a drop tube around 120 m long, now already fairly well developed, was the subject of intensive discussions in the Ministry of Research in Bonn. There were optimistic signs as far as possible funding was concerned.

In the meantime a ZARM delegation including our partners from industry, Helmut Dietrich and our Drop Tower architect, Horst Rosengart, traveled to the USA. There we visited the NASA centers in Huntsville and Cleveland. In Cleveland we inspected the NASA drop shaft which has roughly the same drop height as our tower does today. Our NASA colleagues were very open and helpful, giving us valuable tips regarding our proposed Drop Tower.

During this USA trip we decided one evening to finalize the design for the tip of our tower. We decided on a 16 m high glass cone with a 30 m long space needle at its pinnacle. I was unfortunately later forced to withdraw the space needle idea for reasons of cost – a pity indeed, for otherwise the Drop Tower would have soared not 146 m into the skies of Bremen but 176 m!

By the beginning of 1987 we were all set to go. The ground-breaking ceremony took place just beyond the Hochschulring on the edge of the university. The new street which needed to be built is today called "Am Fallturm" (literally, "By the Drop Tower"). After a three year period of construction and development – incidentally without today's normal scenario of rocketing costs – the Bremen Drop Tower was put into operation in September 1990 by the then German Research Minister Heinz Riesenhuber. Thereafter things went well, too, and not only as far as scientific work was concerned. The year 2004 saw the completion of the catapult which had already been an integral part of the original Drop Tower concept, and it was inaugurated by the then Minister for Research Edelgard Bulmahn.

Today the Drop Tower is not only a landmark of innovation and sustainability for the citizens of Bremen. As an earthbound space laboratory it is the most modern Drop Tower anywhere in the world. As such it is used by hosts of scientists from Germany and abroad – and has been now for twenty years.

*„Das ZARM ist ein Mikrokosmos. Die Entstehung der ZARM-Welt in den ersten Jahren nach dem Urknall war extrem vielseitig, wunderbar und manchmal auch schlimm, aber vor allem lehrreich. Ich habe Hans J. Rath viel zu verdanken.“*

*“ZARM is a microcosm. The creation of the ZARM world in those first years after the big bang was extremely eclectic, wonderful and sometimes difficult but above all instructive. I am greatly indebted to Hans J. Rath.”*

PROF. DR. HENDRIK KUHLMANN
*Professor für Numerische Strömungsmechanik, Institut für Strömungsmechanik und Wärmeübertragung, Technische Universität Wien; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1989 – 2003 Professor of Computational Fluid Mechanics, Institute of Fluid Mechanics and Heat Transfer, Vienna University of Technology; Research Associate at ZARM from 1989 to 2003*

*„Die nahezu 10 Jahre am ZARM gehören zu den wissenschaftlich produktivsten Zeiten meiner Karriere und bilden die Grundlage für die gesamte Entwicklung meines Arbeitsgebiets. Damit stellen sie auch heute noch die Basis für die Arbeit meiner Gruppe dar. Der Grund dafür, dass diese Jahre für mich und mein Team so entscheidend gewesen sind, ist schlicht in der Tatsache zu sehen, dass Prof. Rath mir in dieser Zeit – und damit in einer sehr frühen Phase meiner Tätigkeit – die Möglichkeit eröffnet hat, frei und ohne jede Beschränkung meine Ideen zu entwickeln und damit ein wirklich neues Arbeitsfeld aufzubauen. Diese Freiheit – gekoppelt mit der ebenso intensiven wie freundschaftlichen Atmosphäre am ZARM – machen die Bremer Jahre zu einer unvergesslichen Erfahrung, die auch strukturell in meinen heutigen Lehrstuhl hineinwirkt.“*

*“The almost 10 years I spent at ZARM are among the scientifically most productive times of my career and form the basis of the whole subsequent development of my research. Even today they are the bedrock for my present group’s activities. The reason these years were so decisive for my team and myself lies exclusively in the fact that at that time – a very early phase in my career – Professor Rath opened up for me the possibility of developing my ideas freely without any constraints and thus of establishing a truly new field. This freedom – coupled with the both intensive and congenial atmosphere at ZARM – made the Bremen years an unforgettable experience and one which in structural ways still leaves its mark on my current professorship.”*

PROF. DR. STEFAN ODENBACH
*Institut für Strömungsmechanik, Lehrstuhl für Magnetofluiddynamik, Technische Universität Dresden Mitarbeiter des ZARM 1996 – 2005 Institute for Fluid Mechanics, Chair of Magnetofluiddynamics, Dresden University of Technology; Research Associate at ZARM from 1996 to 2005*

# Das 8. Weltwunder: Der Fallturm – von der Idee zur Kreation

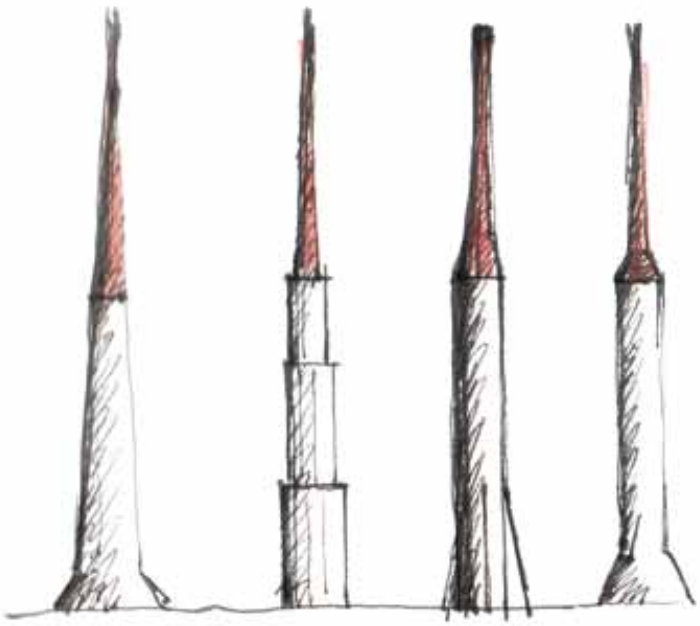
*Prof. Horst Rosengart*
*Architekt Rosengart + Partner*
*Architect*

*Prof. Horst Rosengart ist Partner in der Architektengruppe Rosengart + Partner. Die Architektengruppe Rosengart + Partner ist Nachfolgerin des Büros von Carsten Schröck, das dieser 1954 in Bremen gründete. 1968 erfolgte die Gründung der Architektengruppe Schröck mit dem langjährigen Mitarbeiter Fritz Busse als Partner. 1972 wurde Horst Rosengart nach zehnjähriger Mitarbeit dritter Partner. 1966 hatten die drei bereits die Architektengruppe für Tropenbauten gegründet, die bis in die frühen 1970er-Jahre zahlreiche Bauten in Westafrika errichtete. Nach dem Tod von Carsten Schröck führten Horst Rosengart und Fritz Busse mit wechselnden Partnerschaften, u. a. Heinz Meyerdierks, Rolf Klein, Ulf Sommer und Rainer Schürmann, das Büro als Architektengruppe weiter. Seit 1988 firmiert das Büro als Rosengart und Partner. Seit 2005 sind Horst Rosengart, Stephan Rosengart, Michael Hindenburg und Christian Lübke Partner. Zu den realisierten Projekten der Architektengruppe gehören neben dem Fallturm (1990) mit Institutsgebäude des ZARM des Weiteren die Zentrifuge und das Verbrennungslabor (1998) sowie Bauten für Lehre und Forschung im Uni-Bereich, Bauten für Kultur, Büro-, Geschäfts- und Wohnungsbau, Bauten für den Verkehr und die Kirche, Bauten in den Tropen. Horst Rosengart ist zum Ehrenbürger und Honorarprofessor der Hochschule Bremen ernannt worden. Von 1996 bis 2001 übte er eine Lehrbeauftragtentätigkeit auf dem Gebiet des klimagerechten Bauens an der Hochschule Bremen aus.*

Anlässlich der Vorbereitungen zum 25-jährigen Jubiläum des ZARM-Instituts und des 20-jährigen Betriebsjubiläums des Fallturms am 19. November 2010 haben Sie mich auf meine Teilnahme in Form eines möglichst interessanten Beitrags zur Entstehungsgeschichte des „Drop Tower“ angesprochen.

20 Jahre sind eine lange Zeit und viele Dinge sind doch schon vergessen. Da muss man schon ganz tief in den Berg der Erinnerungen einsteigen, um etwas auszugraben, was noch nicht geschrieben, gesagt oder gedruckt worden ist. Ich bin also auf „Schatzsuche“ gegangen und habe, wie ich glaube, Erfolg in meiner Sammlung von Skizzenbüchern gehabt. Das aufgefundene Skizzenbuch zeigt diverse Entwurfsskizzen aus dem Monat Mai 1987 und führt uns sehr weit zurück in die Entstehungsphase der Gestaltfindung des Fallturms.

Angeregt von einer Studienreise zur NASA nach Huntsville und Cleveland (USA), den Wirkungsstätten von Wernher von Braun, Ende April 1987, ist gleich nach der Rückkehr, noch unter dem Eindruck des Erlebten, diese Serie von Fallturm-Skizzen entstanden.

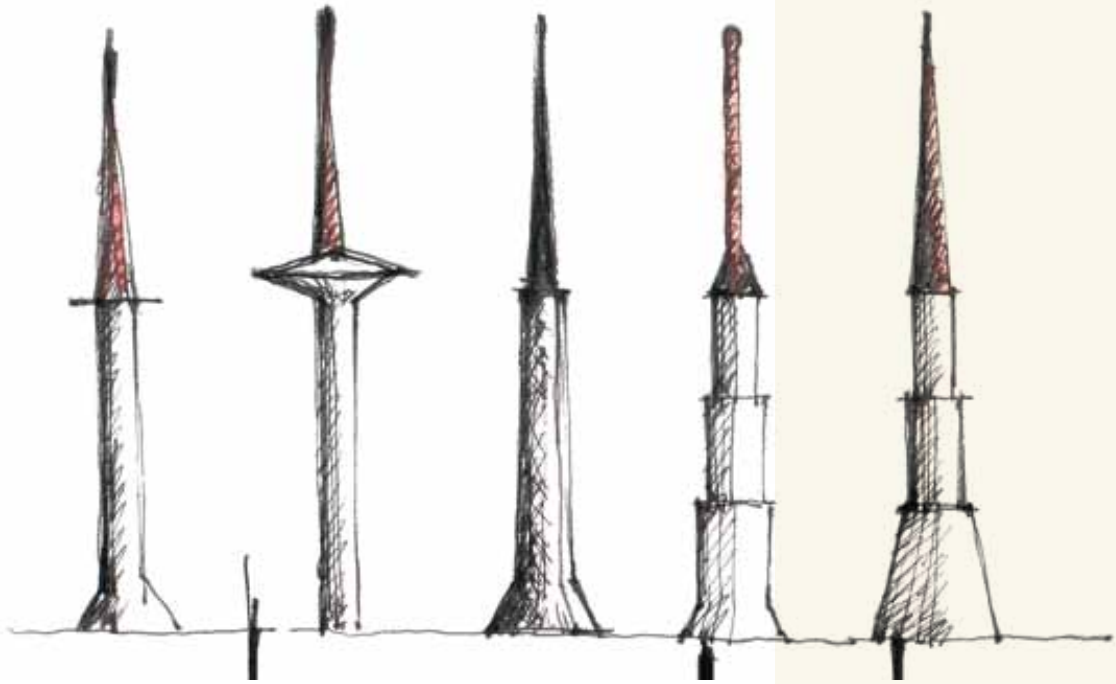


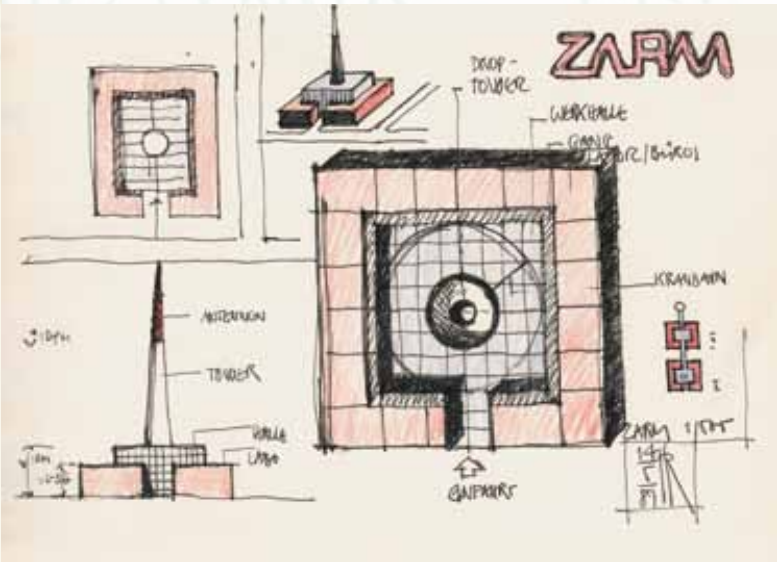
Bei keinem der besichtigten Projekte gab es zu meiner Überraschung sichtbar signifikante Türme. In einem Fall war ein alter Stollen eines Bergwerks umfunktioniert worden, und in einem anderen Fall war der Improvisationskünstler und Ingenieur der Mondrakete, Wernher von Braun, mit dem „Fallturm“ in eine Stahlbauhalle gegangen. Ich erinnere mich gut an die beispielhafte Einfachheit seiner Wirkungsstätte: Angefangen von grauem Zementfußboden, den Wellblechfassaden von konsequenter Farbgestaltung in Weiß und Ocker, und die 2 m gestapelten Rosshaardecken im Auffangbehälter als Abbremsvorrichtung bei Fallversuchen.

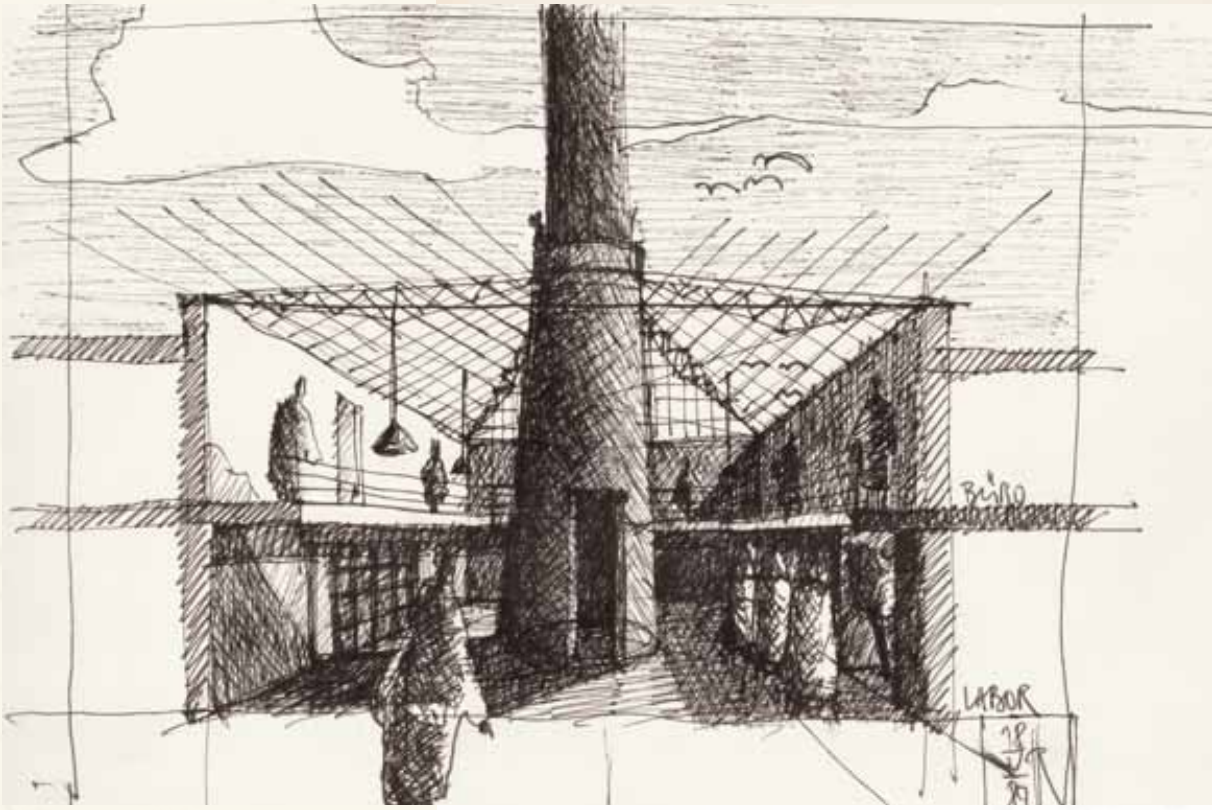
Bis heute werde ich von interessierten Menschen gefragt, woher die Figur des Fallturm Bremen stammt. Es gab weltweit keine Vorlage für ein solches Großraumlabor, das sich oberirdisch darstellt und so wegen seiner Höhe von 146 m und Gestaltung zum Symbol der Universität Bremen geworden ist. Dieses war das Ziel. Eine Antwort auf die Fragen, wie es geworden ist, und woher und warum so, sollen die Skizzen geben, mit denen ich Ihnen den Einblick in den „Intimbereich“ eines Architekten gewähre.

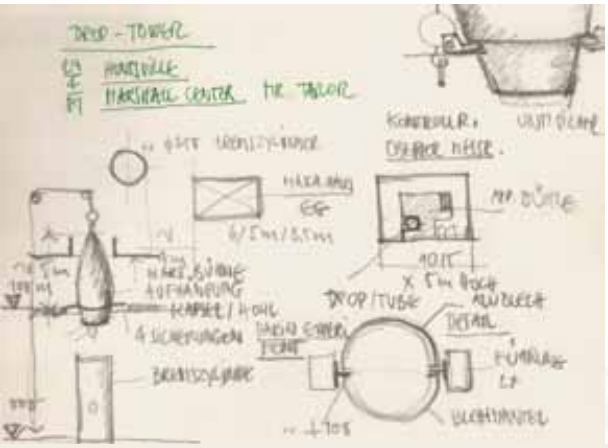
Sie sind in rascher Folge innerhalb weniger Tage entstanden und haben im Prinzip den Entwurf bis ins Detail beschrieben. Hirnforscher haben herausgefunden, dass sich die Entscheidung bis zum fertigen Ergebnis innerhalb von Bruchteilen von Sekunden vollzieht. Diese Erfahrung habe ich auch mehrfach an mir erlebt und kann sie bestätigen, wie es auch an diesem Beispiel gut nachvollziehbar ist. Von inneren Kräften getrieben wird das weiße Papier von Variante zu Variante gefüllt, um an einem gewissen Punkt vorläufige Zufriedenheit zu verspüren. Wir hören von ähnlichen Erfahrungen bei Künstlern, wie schwer auch das Ringen mit dem unverletzten Blatt Papier sein kann. Der Maler Horst Janssen, den ich zu seinen Lebzeiten getroffen habe, wartete auf einen Kaffee- oder Rotweinfleck und arbeitete vorzugsweise auf altem, vergilbtem Papier.

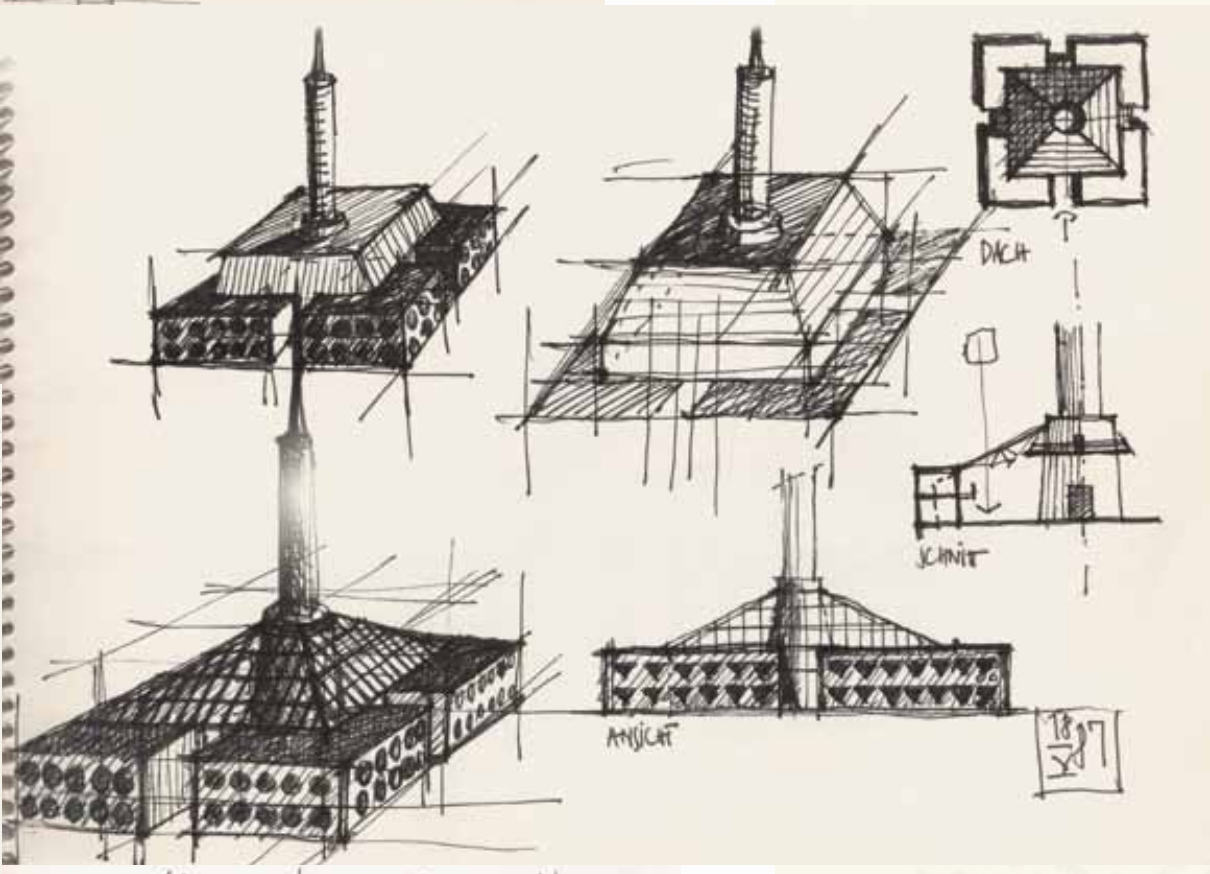
Ihre Anfrage war eine Aufforderung, mich an eine schöne Phase meiner Architektentätigkeit zurück zu erinnern. Dabei war mir das durch Zufall wieder entdeckte Skizzenbuch zum Fallturm ganz besonders hilfreich. Ich stelle Ihnen die Skizzen gern zur Verfügung und hoffe, dass auch Sie sich in Teilen an den Bau des „8. Weltwunders“ erinnern werden.

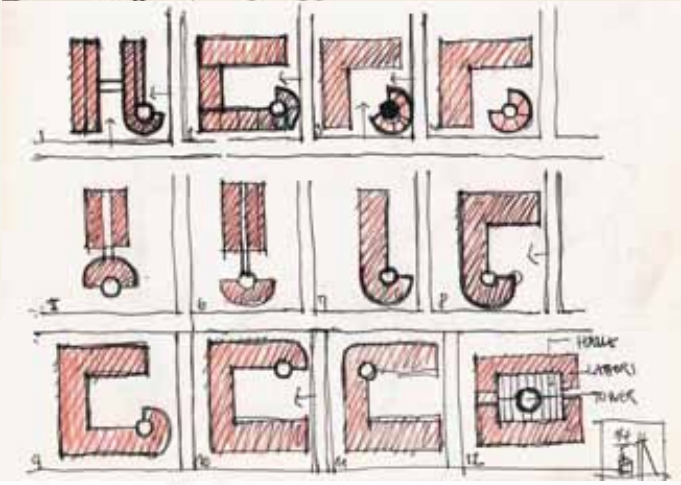



ZARM
DROP-TOWER
WERKHALLE
KRANBAHN
TOWER
HALLE
LABOR
EINFAHRT


BÜRO
LABOR


DROP - TOWER
DROP/TUBE
DETAIL


DACH
SCHNITT
ANSICHT


TOWER

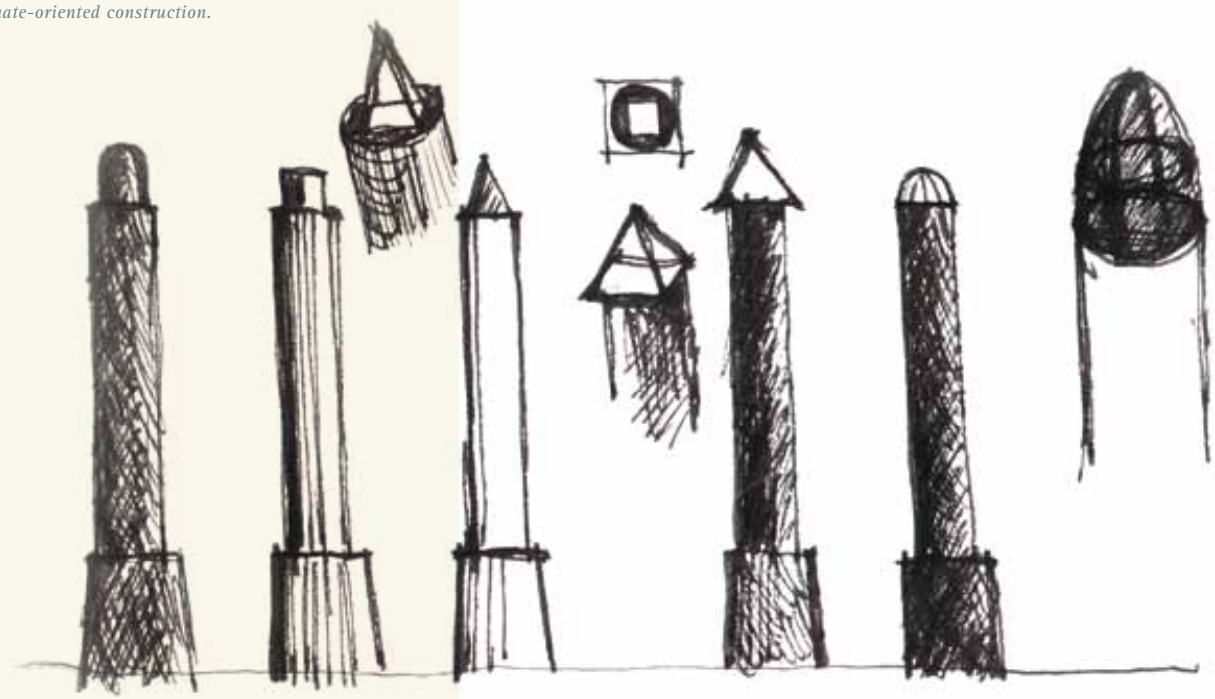
# The 8th Wonder of the World: The Drop Tower – from Idea to Creation

*Professor Horst Rosengart is a partner in the Rosengart + Partner group of architects. The group is the continuation of the bureau of Carsten Schröck who founded the Bremen firm in 1954. In 1968 there followed the founding of the Schröck group of architects with long-standing associate Fritz Busse as partner. In 1972 Horst Rosengart, after ten years of collaboration, became third partner. In 1966 the three had already founded their group for building projects in the tropics which up until the early seventies of the 20th century was responsible for much construction work in West Africa. After the death of Carsten Schröck Horst Rosengart and Fritz Busse continued the office as a group of architects with varying partners including Heinz Meyerdierks, Rolf Klein, Ulf Sommer and Rainer Schürmann. Since 1988 the office has operated under the name Rosengart + Partner. Since 2005 Horst Rosengart, Stephan Rosengart, Michael Hindenburg and Christian Lübke have been partners. The projects successfully realized by the group include not only the Drop Tower (1990) together with the ZARM institute building but also the centrifuge and combustion laboratory (1998), as well as buildings for teaching and research within the university, buildings in the spheres of culture, office construction, business and housing, projects associated with transport and with the church, and projects in the tropics. Horst Rosengart is an honorary citizen and honorary professor of the University of Bremen of Applied Sciences. From 1996 to 2001 he occupied a teaching position there in the field of climate-oriented construction.*

On the occasion of the 25th anniversary of the ZARM institute and the 20th anniversary on November 19, 2010 of the Drop Tower's operations, you have asked me to make a contribution on how the Bremen Drop Tower came into being.

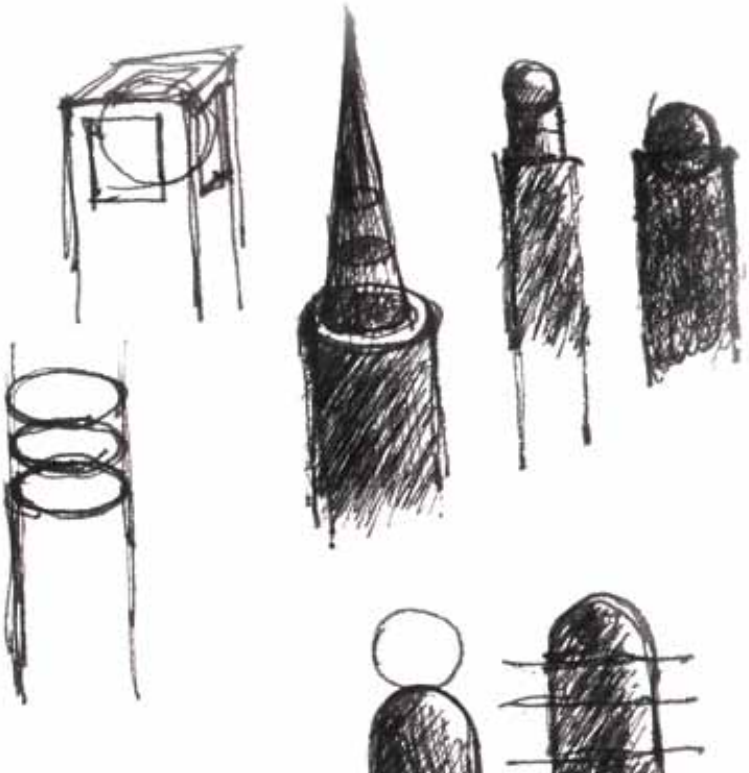
20 years are a long time and many memories have disappeared into thin air. One has to dig deep into the mountain of recollections to find something that has not already been written, said or printed. So I did some treasure-hunting and finally came up with my old collection of sketch-books. They show various conceptual design sketches from May 1987 and guide us far back to the time at which the initial form of the Drop Tower was ascertained.

Animated by a study trip at the end of April 1987 to NASA at Huntsville and Cleveland (USA), the domain of Wernher von Braun, these Drop Tower sketches were made immediately after my return. I was still under the impression of what I had seen.



To my surprise none of the projects we visited were visibly significant towers. In the one case an old mine shaft was reconfigured, in another case, Wernher von Braun, the artist of extemporization and engineer of the Moon rocket, went for a simple steel structure. I remember pretty well the exemplary simplicity of his domain – starting with the concrete floor through to the corrugated steel façade with a striking color scheme in white and ochre and the two meters of horsehair sheets in a container serving to decelerate the drop vehicle.

Still today I am asked by interested people where I got the idea of the Drop Tower from. There was no precedent worldwide for such a large-scale above-ground laboratory – one that through its design and height of 146 m went on to become a symbol for University of Bremen. This was the goal. The sketches will assist in answering the questions why and what were the sources of inspiration.



These sketches will allow you to catch a glimpse into the architect's most "intimate plans". These developed rapidly within a few days and in principle described in detail a design which had already evolved.

Brain researchers have found that the decision-making process until the final result occurs within only fractions of a second. This has frequently been my own experience and looking at the examples will easily confirm the truth of it here. As if driven by inner forces, the blank paper becomes filled with one variant after the next, each becoming a little more satisfactory. We have heard of similar experiences from artists; how hard their struggling with the virgin sheet of paper always is. The painter Horst Janssen, whom I was privileged to meet, was always waiting for a coffee or red wine stain to emerge and preferred to work on old yellowed paper.

Your request for a few words of greeting was an invitation to remind myself of a happy phase of my architectural work. The sketch-book found by accident was of important assistance here and thus I am delighted to provide you with it and hope that you will in turn remember how the "8th Wonder of the World" came to be constructed.

# Die Geschichte des ZARM

## The Story of ZARM

**NOVEMBER 1981** Berufung von Hans J. Rath zum Professor für Technische Mechanik/Strömungslehre an der Universität Bremen Appointment of Hans J. Rath to Professor of Technical Mechanics and Fluid Mechanics, University of Bremen

**1983** Gründung des Fachbereichs Produktionstechnik Founding of the Department of Production Engineering

**SEPTEMBER 1985** Gründung des ZARM als wissenschaftliche Einheit im Fachbereich Produktionstechnik Founding of the Center of Applied Space Technology and Microgravity (ZARM) as a scientific entity within the University of Bremen Department of Production Engineering

**FEBRUAR 1987** Beginn der Planung des Fallturms Bremen Initial planning period for the Bremen Drop Tower

**JUNI 1989** Gründung der ZARM-Fallturm Betriebsgesellschaft mbH Founding of the Drop Tower Operation and Service Company

**SEPTEMBER 1990** Inbetriebnahme des Fallturms durch Forschungsminister Heinz Riesenhuber Inauguration of the Drop Tower by the Federal Minister of Education and Research Dr. Heinz Riesenhuber

**OKTOBER 1992** Bezug des zweiten Institutsgebäudes Occupation of the ZARM institute's second building

**DEZEMBER 1993** 1000. Experimentabwurf 1,000th drop experiment

**FEBRUAR 1994** BremSat wird durch STS-60 ausgesetzt und beginnt seine einjährige Operationsphase Launch of BremSat from the space shuttle Discovery during the STS-60 mission and start of a one-year operation period

**JUNI 1995** Start des Experiments: Thermische Konvektion im Kugelspalt auf einer russischen Interkontinentalrakete SS-N-18 von Bord eines U-Bootes in der Barents-See und sichere Landung in Kamtschatka Successful start of experiment on "thermal convection between two concentric spheres under a central force field for the simulation of geophysical motions" on a Russian SS-N-18 missile aboard a submarine in the Barents Sea and safe landing in Kamchatka

**JANUAR 1997** 2.000. Experimentabwurf 2,000th drop experiment

**MAI 1997** Gründung der ZARM-Technik GmbH zur Entwicklung und Vermarktung raumfahrttechnischer Komponenten und als Partner der Industrie für wissenschaftlich-technische Dienstleistungen Founding of ZARM-Technik GmbH, a limited liability company for the development and marketing of space technology components and industry partner for scientific and technical services

**NOVEMBER 1999** Beginn der Entwicklung und des Baus des Fallturm-Katapults Construction period of the catapult system begins

**APRIL 2000** 3000. Experimentabwurf 3,000th drop experiment

**AUGUST 2000** Baubeginn des Gebäudes für eine 30g-Zentrifuge Start of construction works on building for the 30g centrifuge

**JUNI 2001** Baubeginn des Laborgebäudes für Verbrennungsforschung Construction of the new building for the combustion research laboratory begins

**JULI 2001** International Space University, eine Sommerschule für Master-Studierende der Raumfahrtwissenschaften zu Gast in Bremen The Summer Session Program of the International Space University, a summer course in space science, takes place in Bremen

**OKTOBER 2003** Organisation des 54. International Astronautical Congress im Messe- und Congress Centrum Bremen, Fallturm wird ESA External Facility Organization of the 54th International Astronautical Congress at the Bremen Exhibition & Conference Centre, the Drop Tower becomes ESA External Facility

**APRIL 2004** Inbetriebnahme des Laborgebäudes für Verbrennungsforschung mit dem 1. Schuss des Heißwindkanals zur Untersuchung der Selbstzündung von Brennstoffsprays First test of the Hot Wind Tunnel to investigate self-ignition of technical sprays, inaugurating the new combustion laboratory

**OKTOBER 2004** 4000. Experimentabwurf 4,000th drop experiment

**DEZEMBER 2004** Erster Katapultschuss durch Forschungsministerin Edelgard Bulmahn First test of the catapult system launched by the Federal Minister of Education and Research Edelgard Bulmahn

**MÄRZ 2005** Inbetriebnahme der 30g-Zentrifuge Commissioning of the 30g centrifuge

**AUGUST 2005** Wandlung der ZARM-Technik GmbH in die ZARM-Technik AG ZARM-Technik GmbH becomes the corporation ZARM-Technik AG

**SEPTEMBER 2005** ZARM initiiert die Gründung des DLR-Standortes Bremen mit der in 2007 erfolgten Eröffnung des DLR-Instituts für Raumfahrtsysteme ZARM initiates the establishment of Bremen as a location for the German Aerospace Center DLR, leading to the opening of the DLR Institute of Space Systems in 2007

**JULI 2006** ZARM holt mit Bürgermeister Jens Böhrnsen in Peking den COSPAR-Congress 2010 nach Bremen Together with Bremen's Mayor Jens Böhrnsen in Beijing, ZARM secures the COSPAR Congress 2010 for Bremen

**OKTOBER 2008** 5000. Experimentabwurf 5,000th drop experiment

**JULI 2010** Internationaler COSPAR-Kongress in Bremen International COSPAR Congress held in Bremen

*Fotos/Photos: 8. April 1989 - 3. Mai 1989*

## SEPTEMBER 1990

*Gespanntes Warten vor dem ersten Abwurf einer Versuchskapsel im Fallturm Bremen. v. l. Bürgermeister Klaus Wedemeier, Staatsrat Bernd Neumann (hinten), Bundesforschungsminister Dr. Heinz Riesenhuber, Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath. Eager anticipation before the first launch of an experimental capsule in the Bremen Drop Tower. From left, Mayor Klaus Wedemeier, State Councilor Bernd Neumann (rear), Federal Minister for Research Dr. Heinz Riesenhuber, Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath.*

## DEZEMBER 1993

*Dr. Jan-Baldem Menniken, Geschäftsführer der DARA GmbH und Bürgermeister Henning Scherf vor dem Auslösen des 1.000sten Experiment-Abwurfs. Dr. Jan-Baldem Menniken, manager of DARA GmbH and Mayor Henning Scherf before the launch of the 1,000th drop experiment.*

## AUGUST 1988

*Hoher Besuch auf der Fallturm-Baustelle. Der Vertreter des Geldgebers DFVLR (heute DLR) Dr. Horst Binnenbruck (rechts) und sein Mitarbeiter Quendler (links). Auch Manfred Fuchs (OHB-System) ist am Fortgang der Arbeiten interessiert. High-ranking visitors to the Drop Tower building site. Representing sponsor organization DRVLR (today DLR) Dr. Horst Binnenbruck (right) and his assistant Mr. Quendler (left). Manfred Fuchs (OHB-System) also shows interest in the building progress.*

## MAI 1988

*Feier auf der grünen Wiese: der erste Spatenstich für den Fallturm Bremen. Celebrating out in the open: ground-breaking ceremony for the Bremen Drop Tower.*

## SEPTEMBER 1990

*...3, 2, 1, 0! Bundesforschungsminister Dr. Heinz Riesenhuber nimmt den Fallturm Bremen mit dem Auslösen des ersten Abwurfs in Betrieb. ...3, 2, 1, zero! With the first launch Federal Minister for Research Dr. Heinz Riesenhuber officially commissions the Bremen Drop Tower.*

## AUGUST 1989

*Richtfest auf der Fallturm-Baustelle. Die Architekten Horst Rosengart und Heinrich Meyerdierks warten auf die Gäste. Topping-out ceremony on the Drop Tower building site. Architects Horst Rosengart and Heinrich Meyerdierks await the guests.*

## MAI 1989

*Das wachsende ZARM. Gruppenfoto auf dem Campus. ZARM grows. Group photo on the campus.*

## AUGUST 1995

*Die ZARM-Fallturm-Betriebsgesellschaft mbH besucht erstmalig die Fallanlagen in Japan. Im Hintergrund die Versuchskapsel des 500m Fallschachts auf Hokkaido. Drop Tower Operation and Service Company (ZARM-FAB mbH) visits drop facilities in Japan for the first time. In the background the test capsule of the 500 m drop shaft on Hokkaido.*

## DEZEMBER 2008

*Weihnachtsfeiern sind immer auch eine satirische Aufarbeitung des vergangenen Jahres: unser ehemaliger Kollege und jetziger Direktor des DLR-Instituts für Raumfahrtsysteme, Hansjörg Dittus, bekommt einen Rettungsring – für alle Fälle. Christmas parties always offer the chance for satirical reflections on the past year: former colleague and present director of the DLR Institute of Space Systems, Hansjörg Dittus, is given a lifebelt – just in case.*

## SEPTEMBER 2003

*Bundesforschungsministerin Edelgart Bulmahn eröffnet den 54. International Astronautical Congress (IAC) mit 2.200 Teilnehmern im Messe- und Congress Centrum Bremen. Federal Minister for Research Edelgart Bulmahn opens the 54th International Astronautical Congress (IAC) at the Bremen Exhibition and Conference Center with 2,200 participants.*

## SEPTEMBER 2003

*Fototermin zur IAC Eröffnung. V. l.: Hans J. Rath, Ministerin Bulmahn, NASA-Chef Shawn O'Keefe, Bremens Bürgermeister Henning Scherf. Photo call at the IAC opening. From left, Hans J. Rath, Minister Bulmahn, NASA Chief Shawn O'Keefe, Bremen Mayor Henning Scherf.*

*Wer arbeiten kann, kann auch feiern. Auch im Organisieren von Festen ist das ZARM ganz groß. Disco nach dem offiziellen Programm einer Weihnachtsfeier (links unten) und ZARM-DLR Sommerfest (oben). Work hard, play hard – ZARM also excels at organizing parties. Disco after a Christmas party official program (left) and ZARM-DLR summer get-together (top).*

## JULI 2010

*„Ischa Freimaak!“ lautet nicht nur das Motto Deutschlands ältesten Volksfestes in Bremen, sondern war auch Gegenstand des Themenabends des COSPAR-Kongresses. Das große Fest in der Bremer Messe bildete den Ausklang nach tausenden von Fachvorträgen, Podiumsdiskussionen und viel Arbeit für das Organisationsteam. “Come to the fair” – not only with reference to Bremen’s traditional public festival, Germany’s oldest, but also as subject of a special theme evening within the COSPAR Congress. After thousands of lectures, podium discussions and much work for the organizing team, the fairground festival provided the perfect finale.*

## DAS COSPAR-ORGANISATIONSTEAM *(von links)*
## THE COSPAR ORGANIZING TEAM *(from left)*

*Thorsten Coordes · Caroline Leuenberger · Kerstin Nethen*
*Silke Zierenberg · Lucie-Patrizia Arndt · Birgit Kinkeldey*
*Maria Ferré · Christine Steinseifer-Jeske · Hildegard Roolfing*
*Peter von Kampen · Ann-Marie Renner · Anna Peters*
*Nicht im Bild/not shown: Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath (Chairman of the Local Organizing Committee) · Irina Schön · Angelika Alex-Smida*

# Von Menschen und Maschinen

## Of Men and Machines

### FLIEGENDE BAUTEN

Die Idee, den Fallturm zu einem späteren Zeitpunkt mit einem Katapult auszustatten, welches die Versuchskapseln nach oben wirft anstatt sie nur fallen zu lassen, hatten wir von Anfang an. Tatsächlich war ja auch der Integrationsraum für das Katapult das allererste, was auf der Baustelle entstand.

Unser Kollege Bernhard Schwark hatte das Prinzip entwickelt, den Abbremsbehälter des Fallturms als Schaukel auszuführen. Zur Seite geschwenkt und dort festgehalten, könnte später die Versuchskapsel durch das unterhalb installierte Katapult am Bremsbehälter vorbei nach oben geworfen werden und der Behälter während des Fluges losgelassen, unter die Fallröhre schwenken. Wir fanden diese Idee ziemlich gut, da sie antriebslos (Schwerkraft-Antrieb) und damit sicher erschien und außerdem den Vakuumbehälter frei von Reaktionskräften hielt, wie sie beispielsweise dann aufträten, wenn man den tonnenschweren Behälter beschleunigen und anhalten müsste, oder wenn man ihn auf einer schiefen Ebene gegen einen Prellbock laufen ließe.

Nicht nur, um uns selbst die Kinematik zu verdeutlichen, sondern auch um die Ingenieure der planenden Firma Mannesmann-Anlagenbau von der Idee zu überzeugen, hatten wir ein 1:10-Modell des schaukelnden Behälters gebaut. Mit allen Schikanen: elektrischem Spindelantrieb und elektromagnetischer Kupplung zur Freigabe des Behälters. Als wir dies vorführten, waren die Herren von Mannesmann sichtlich beunruhigt. „Haben sie so etwas schon mal irgendwo gesehen?“, war ihre Frage. „Nein“, antworteten wir wahrheitsgemäß „aber, wie sie sehen, funktioniert es“. Die Herren fühlten sich nicht wohl, gingen aber mangels Argumenten an die Planungsarbeit.

Als wir viele Monate später das erste Mal die wahren Dimensionen unserer Modell-Idee im Maßstab 1:1 entstehen sahen, waren wir es, die beunruhigt waren. Eine 10 m hohe Schaukel von rund 12 t Gewicht soll an dünnen Stäben aufgehängt, eine 500 kg schwere Versuchskapsel auffangen, die mit 170 km/h einschlägt. Wird das wohl funktionieren, fragten wir uns ein wenig bange? Es funktionierte. Und tut es bis heute.

*Christian Eigenbrod*

### FLYING CONSTRUCTIONS

Right from the beginning it had been our idea to equip the Drop Tower at some later point with a catapult which would thrust the test capsules upwards rather than just letting them drop. In fact the integration room for the catapult was the first thing to be completed on the original building site.

Our colleague Bernhard Schwark had developed the principle of conceiving the Drop Tower’s decelerating container as a swing. Pivoted to the side and fastened there, the test capsule could later be thrust upwards past the decelerating container by means of the catapult installed underneath; the released container would then pivot under the drop tube during the flight. We were fairly taken with this idea since it was apparently unpowered (gravitational impetus) and therefore safe; moreover, it kept the vacuum container free from reaction forces, as would for example occur if it were necessary to accelerate and then halt the container with its several tons of weight, or if it were to be run against a buffer on a sloping surface.

It was not only to make the kinematics clear to ourselves but also to convince the engineers from the prospective building contractors Mannesmann that we had constructed a 1:10 model of the swinging container – with all the trimmings: electric spindle drive and electromagnetic coupling for releasing the container. When we presented this to the gentlemen from Mannesmann they were visibly worried. “Have you ever seen anything like this anywhere else?” they asked. “No,” we answered truthfully, “but as you can see, it works.” They were uneasy but, for lack of any counterarguments, set to work on the planning.

When several months later we for the first time saw the true dimensions of our model coming into being on a scale of 1:1 we were the ones who were worried. A swing 10 m high weighing around 12 t and hanging on thin rods was supposed to catch a test capsule weighing 500 kg hitting it at a speed of 170 km/h. Was it really going to work, we wondered somewhat anxiously. It worked. And it still does today.

*Christian Eigenbrod*

## LUIGI „HOWMUCHIANO“

In der Zeit der Entwicklung der Fallturm-Idee „hausten“ die wenigen Mitarbeiter des noch jungen ZARM in kleinen Büros des ersten ingenieurwissenschaftlichen Gebäudes auf dem Campus. Die Räume waren als Laborräume konzipiert, unverputzt mit den elektrischen Installationen auf der Wand.

Natürlich luden wir verschiedenste Persönlichkeiten der internationalen Mikrogravitations- und Raumfahrtszene ein, um sie für unsere Idee zu gewinnen. So besuchte uns eines Tages auch der leider 1991, kurz nach Inbetriebnahme des Fallturms, verstorbene Direktor des Instituts für Aerodynamik der Universität Neapel und Gründer des MARS-Zentrums (Microgravity Advanced Research and Support) und frühere Präsident der IAF (International Astronautical Federation) u. v. a. m., Prof. Luigi Gerardo Napolitano. Ich erinnere mich an ihn als eine beeindruckende Persönlichkeit mit politischem wie physischem Gewicht.

Luigi Napolitano war sehr kurzsichtig und trug immer mindestens zwei Brillen – eine auf der Nase, eine Zweite auf dem Kopf und oft eine Dritte an einem Band vor der Brust. Diese Brillen wechselte er rasch und oft, je nach Bedarf. Dennoch kam es vor, dass Herr Napolitano die für die Situation ungeeignete Brille auf der Nase hatte. Im Büro von Prof. Rath stand ein kleines Modell des Fallturms – dicht neben einem Kabelrohr welches an der Wand montiert von der Decke zu einem Lichtschalter führte. Herr Rath erklärte dem erstaunten Luigi Napolitano die Funktionsweise des Fallturms wiederholt auf das kleine Modell deutend. Dieser hatte aber nicht das Modell im Blick, sondern lediglich das Kabelrohr. Zwar kann man sich leicht vorstellen, das Prinzip eines Fallturms, den Bau des Gebäudes und den Umfang des Projektes auch anhand eines Installationsrohres erklären zu können, dennoch war Herr Napolitano sichtlich irritiert darüber, aus Italien geholt worden zu sein, um ein Installationsrohr gezeigt zu bekommen. Erst als es endlich gelang, seinen Blick auf das Modell zu richten und er die richtige Brille für diesen Abstand auf der Nase trug, klärte sich sein Blick. „Ah,“ rief er erfreut aus. „How much?“ war sofort seine nächste Frage. Als Herr Rath diese mit „Rund 30 Mio. DM“ beantwortete, zeigte sich Luigi Napolitano zufrieden und gab uns das gewünschte „Very good, go on!“ Wir behielten ihn fortan als Luigi „Howmuchiano“ in positiver Erinnerung.

*Christian Eigenbrod*

## LUIGI "HOWMUCHIANO"

At the time when the idea of the Drop Tower was being developed the few employees of ZARM, still in its infancy, were housed in small offices in the campus's first engineering science building. The rooms were conceived as laboratories, unplastered with electrical installations on the walls.

Naturally we invited a wide range of important people from the international microgravity and space technology scene in order to win them over to our idea. One day we received a visit from the director of the Institute of Aerodynamics of the University of Naples Prof. Luigi Gerardo Napolitano who sadly died in 1991 shortly after the commissioning of the Drop Tower. He was also founder of the MARS center (Microgravity Advanced Research and Support) and former president of the IAF (International Astronautical Federation), and much else besides. I remember him as an impressive personality with political as well as physical weight.

Luigi Napolitano was extremely short-sighted and always wore at least two pairs of glasses – one on his nose, a second on his head and often a third on a strap around his neck. He changed from one pair to another swiftly and frequently, as the situation demanded. However, it sometimes happened that Signor Napolitano was wearing the wrong glasses for the task in hand. In Professor Rath's office there was a small model of the Drop Tower – right next to a cable tube attached to the wall, trailing down from the ceiling to a light switch. Professor Rath explained to an amazed Luigi Napolitano the functioning of the Drop Tower, repeatedly pointing to the small model. But Napolitano was not looking at the model, his eyes the whole time remaining fixed on the cable tube. Now it might be easy to imagine explaining the principle of a Drop Tower, its construction and the overall scale of the project with the aid of an installation tube, but Professor Napolitano was nevertheless visibly irritated to have been brought over from Italy just to look at a bunch of cables. Not until his gaze could finally be directed to the model and he was to don the right glasses for the distance in question did his face brighten up. "Ah," he uttered in delight, immediately continuing with his second question: "How much?" With Professor Rath's answer of "around 30 million deutschmarks" Luigi Napolitano was most satisfied and gave us the desired endorsement: "Very good, go on!" From then on we fondly remembered him as Luigi "Howmuchiano" .

Christian Eigenbrod

## JAPANER OHNE FILM

Wer kennt sie nicht, die Gruppen reisefreudiger Japaner, die alles auf Film bannen, was sie nicht schon mal fotografiert haben? Auch unser Fallturm war zu allen Zeiten ein beliebtes Motiv. Japanische Expertengruppen besuchten uns während der Bauzeit auch deshalb so häufig, weil auf Hokkaido, der nördlichsten Insel Japans, etwa 100 km von Sapporo entfernt, eine vergleichbare Anlage in Planung war.

Eines Tages, es war wohl Anfang 1990, besuchte uns also eine Gruppe von Ingenieuren der Fa. Toshiba, die am Bau der japanischen Fallanlage beteiligt waren, und konfrontierte uns gleich zu Beginn der Führung mit einem ungewöhnlichen Problem: "Can we buy some films for our cameras somewhere here?" Japaner mit Kameras aber ohne Film? Was war passiert?

Nun, der Busfahrer kannte den Fallturm noch nicht und hatte sich aus einer Richtung genähert, in der, rund 3 km vom Fallturm entfernt, der Schornstein

einer Müllverbrennungsanlage turmartig aufragt. Irrtümlich dort haltend, hatten einige begeisterte Besucher ihre Filme rund um die Müllverbrennung verschossen, um nur ja kein Detail der vermeintlichen Fallanlage auszulassen.

Sind vielleicht wir vom ZARM die Geburtshelfer der Digitalfotografie?

*Christian Eigenbrod*

## FILMLESS IN BREMEN

We all know them – those groups of globetrotting Japanese who capture everything on film that they have not already photographed. Our Drop Tower, too, has always been a popular motif. One of the reasons we were so frequently visited by groups of Japanese experts at the time it was being built was that a comparable facility was being planned on Hokkaido, the northernmost island of Japan, around 100 km from Sapporo.

One day, it must have been at the beginning of 1990, a group of engineers from Toshiba involved in the construction of the Japanese drop installation came to visit, and right at the beginning of their tour confronted us with an unorthodox problem: “Is there anywhere where we can buy films for our cameras?” Japanese with cameras but no films? What had happened?

It turned out the coach driver was not yet au fait with the Drop Tower and had approached from a direction in which, some 3 km further on, the chimney of a waste incineration plant towered over the surroundings. Mistakenly stopping off there, many of the enthusiastic visitors had used up all their films around the incineration plant, not wanting to miss a single detail of what they presumed to be the Drop Tower. Could it be that we from ZARM were instrumental in the birth of digital photography?

Christian Eigenbrod

## FALLKAPSEL-DOMPTEURE

Für einen effizienten Fallturmbetrieb ist die schnelle Bergung der Fallkapsel nach jedem Abwurf ein wichtiger Aspekt. Es galt also, während der Fallturmplanung ein System zu entwickeln, mit Hilfe dessen die Kapsel, die nach dem Abwurf bis zu 6 m tief im Styropor-Granulat steckt, gefunden und an eine Winde gekoppelt werden kann, um sie aus dem Granulat herauszuziehen. Die Variante, das Granulat nach jedem Abwurf so lange abzusaugen, bis die Oberseite der Fallkapsel zum Vorschein kommt, fiel deshalb von vornherein aus, weil es viel zu viel Zeit in Anspruch nehmen würde.

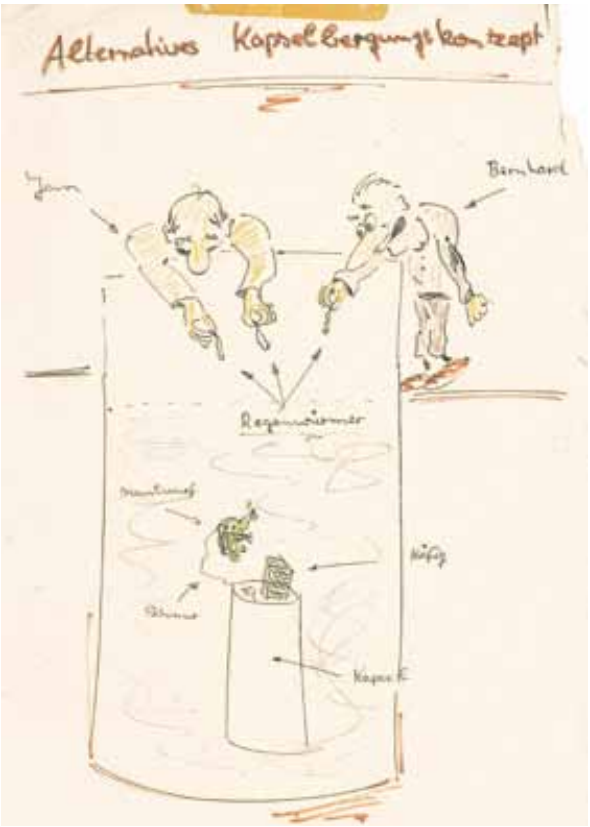
Keine ganz leichte Aufgabe. Insofern wurde jeder Mitarbeiter um die Eingabe einer Idee gebeten. Solche Wettbewerbe sind naturgemäß für Ingenieure animierend und treiben mitunter erstaunliche Blüten. Eine dieser originellen Ideen zeigt die Original-Skizze unseres damaligen studentischen Mitarbeiters Torsten Bolik. Er schlug vor, dass ein speziell ausgebildeter Maulwurf in einem druckdichten Käfig mit der Kapsel fällt und nach der Abbremsung mangels Würmern versucht, an die Oberfläche des Granulats zu kommen. Der Maulwurf sollte eine dünne Schnur hinter sich herziehen, die mit einem tragfähigen Bergungsseil verbunden ist.

Wir haben diesen Vorschlag nicht realisiert. Allerdings existierte zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme auch kein anderes tragfähiges Konzept. Deshalb wurde provisorisch ein Haken auf der Rückseite der Fallkapsel befestigt, der über den Rand der Kapsel hinausragte. Dieser Haken war über ein dünnes Seil mit dem mitfallenden starken Bergungsseil verbunden. Am Rand des Abbremsbehälters wiederum wurden zwei dünne Kunststoffstäbe installiert, die eine Art Lasso, ebenfalls aus dünner Drachenschnur aufspannten. Während des Eintauchens der Fallkapsel sollte der Haken dieses Lasso mit sich ins Granulat reißen. Nach dem Fluten der Röhre sollte man, so die Idee, lediglich das Lasso aus dem Granulat ziehen müssen, an diesem sollte sich der Haken befinden, an dem wiederum die dünne Schnur und daran das starke Bergungsseil. Und es funktionierte.

Ferdinand Porsche wird der Grundsatz zugeschrieben, dass eine Entwicklung nicht dann genial ist, wenn man ihr nichts mehr hinzufügen kann, sondern umgekehrt, wenn man nichts mehr weglassen kann. Die Entwicklung einer technisch anspruchsvolleren Lösung nahmen wir folglich bis heute nicht in Angriff.

*Ulrich Kaczmarczik*

ules. The variant whereby the granules are syphoned after each drop for as long as is necessary to expose the top of the drop capsule was rejected at the outset since it would take far too much time.




*Die „Konstruktions-Skizze“ von Torsten Bolik. Torsten Bolik's sketch.*

## THE TAMING OF THE DROP CAPSULE

For Drop Tower operations to proceed efficiently an important aspect is to be able to quickly recover the drop capsule after each launch. Thus, during the planning of the Drop Tower it was necessary to develop a system with the aid of which the capsule – which after each drop lodges itself up to 6 m deep in polystyrene granules – could be retrieved and connected to a winch with which it could be extracted from the gran-

Not an easy task. Accordingly each staff member was asked to submit an idea. For engineers this kind of competition proves naturally motivating and can sometimes bear extraordinary fruit. One such unorthodox idea can be seen on the original sketch from our then research student Torsten Bolik. His suggestion was for a specially trained mole to be dropped in a pressure-tight cage together with the capsule. After deceleration, unable to find any worms, it would then

try to get to the top of the granules. The mole would pull a thin cord behind it, connected to a load-bearing recovery rope.
It was a suggestion we did not implement. However, at the time of commissioning there was no other viable concept. Therefore a hook was provisionally fixed to the back of the drop capsule, sticking out from behind the edge of the capsule.

This hook was connected via a thin rope to the strong recovery rope which was also dropped. At the edge of the decelerating container two thin synthetic rods were in turn installed forming a kind of lasso, also made of thin kite string. As the capsule became immersed, the hook was supposed to wrench this lasso with it into the granules. After flooding the tube the idea was to have to simply pull the lasso out of the granules, the hook being attached to it, the thin cord in turn connected to the hook, and the strong recovery rope linked to the cord.And lo and behold – it worked.

To Ferdinand Porsche is attributed the principle that an innovation is not brilliant when there is nothing more to be added but, on the contrary, when there is nothing more to be omitted. Consequently we have to the present day refrained from trying to develop any more technically sophisticated solution.

*Ulrich Kaczmarczik*

*„Die Zeit am ZARM war in vielerlei Hinsicht aufregend, herausfordernd und lehrreich – und ich möchte sie nicht missen.“*

*“My time at ZARM was from many points of view exciting, challenging and instructive – I would not have wanted to miss it.”*

PROF. DR.-ING. PETER WULF
*Professor für Technische Mechanik und Numerische Strömungssimulation an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1994 – 1998 Professor of Technical Mechanics and Numerical Flow Simulation, Hamburg University of Applied Sciences; Research Associate at ZARM from 1994 to 1998*

*„Die Zeit im ZARM war für mich eine spannende, interessante und inspirierende Zeit. Ich habe viel gelernt und nette, interessante Menschen kennengelernt.“*

*“The period I spent at ZARM was an exciting, interesting and inspiring time. I learned a great deal and got to know interesting, likeable people.”*

PROF. DR. ANTJE OHLHOFF
*FB Ingenieurwissenschaften und Mathematik Angewandte Mathematik und Informatik Fachhochschule Bielefeld; Mitarbeiterin des ZARM 1999 – 2004 Prof. Dr. Antje Ohlhoff, Department of Engineering and Mathematics, Applied Mathematics and Information Science, University of Applied Sciences Bielefeld, Research Associate at ZARM from 1999 to 2004*

## Dr. Heinz Riesenhuber MdB

*Bundesminister für Forschung und Technologie a. D.*
*Minister for Research and Technology 1982 – 1993*
*Member of the German Bundestag*

Herzlich beglückwünsche ich Sie zu 25 Jahren erfolgreicher Forschung im größten erdgebundenen Weltraumlabor der Welt, die dazu beigetragen hat, Bremen zu einem der wichtigsten Raumfahrtstandorte Deutschlands und weltweit zu machen.

Das kleinste Bundesland Bremen war immer ein bedeutender Standort für die deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie gewesen. Durch die Gründung des ZARM-Instituts im September 1985 durch Professor Hans J. Rath fand dies auch an der noch jungen Bremer Universität, die bis dahin eher sozial- und geisteswissenschaftlich ausgerichtet war, seinen Niederschlag.

Als mir Professor Gottfried Greger – in meinem Ressort damals zuständig für das Referat Weltraumtechnik und Neue Orbitalsysteme – Ende 1986 von den Bremer Plänen zum Bau eines Freifallturms am ZARM-Institut berichtete, fiel dies in eine Zeit, die für die Weltraumforschung besonders schwierig war. Die Katastrophe des Spaceshuttle Challenger Anfang 1986 und die drohende Kostenexplosion bei der Planung der Internationalen Raumstation machten die langfristige Vorausschau auf die Entwicklung der internationalen Raumfahrt und auf die Rolle Deutschlands in diesem Umfeld unsicher.

Der Vorschlag, mit dem Fallturm Bremen das weltweit erste Labor für erdgebundene Forschung unter Weltraumbedingungen zu errichten, ein Labor also, das nicht nur kostengünstig, sondern auch permanent verfügbar sein würde, erschien mir wegweisend. Ich hielt dies für eine sehr gute Grundlage, die zukünftige Forschung im Orbit fundiert zu entwickeln. Und ich hielt dies für eine hervorragende Idee, den Anspruch Deutschlands auf eine führende Rolle bei Entwicklung und Betrieb der geplanten Raumstation international zu untermauern.

Deshalb habe ich diese Planung als Bundesforschungsminister sehr gerne nach Kräften unterstützt. Und ich habe dann mit großer Freude, mit Spannung und mit Zuversicht im September 1990 mit einem Knopfdruck das erste Freifallexperiment ausgelöst und damit den Fallturm Bremen offiziell in Betrieb genommen.

Inzwischen wurden weit über 5.000 Fallexperimente durchgeführt. Unsere positive Einschätzung von damals hat sich als richtig erwiesen. Gleichzeitig hat das ZARM mit den verschiedensten Materialien erfolgreich eine eigenständige Forschung in der Schwerelosigkeit aufgebaut, die weltweit einen Spitzenruf genießt und die künftig ganz neue technologische Entwicklungen anstoßen kann. Zahlreiche herausragende wissenschaftliche Veröffentlichungen belegen dies ebenso wie die weltweite Vernetzung des ZARM und die Fallanlagen, die nach Bremer Vorbild in den USA, Japan und jüngst in China entstanden sind.

Ich freue mich mit Ihnen allen – mit dem Gründer und langjährigen Leiter Professor Hans J. Rath und mit seinem Spitzenteam – sehr über den wachsenden Erfolg, der das ZARM und den Fallturm Bremen zu einem Leuchtturm mit weltweiter Strahlkraft gemacht hat.

Ich wünsche dem ZARM und allen, die hier mitarbeiten, auch für – mindestens – die nächsten 25 Jahre herzlich besten Erfolg und viele weitere gute Ideen für zukunftsweisende Initiativen!

Mit herzlichen Grüßen

Allow me to offer my hearty congratulations on 25 years of successful research in the world's largest "earthbound space laboratory" which has contributed to making Bremen one of the most important space centers in Germany and worldwide.

Germany's smallest federal state, Bremen, was always a major location for the German aeronautical and space industry. Through the founding of the ZARM institute in September 1985 by Professor Hans J. Rath this came to be consolidated by the fledgling University of Bremen which until that time had placed greater emphasis on social studies and the humanities.

When at the end of 1986 Professor Gottfried Greger – at that time responsible under my jurisdiction for the ministerial department of space technology and new orbital systems – informed me about plans to build a free fall tower attached to the ZARM institute in Bremen, this came at a particularly difficult time for space research. The Challenger space shuttle catastrophe at the beginning of 1986 and the threatening cost explosion in the planning of the International Space Station cast a shadow over any long-term prognosis for the development of international space technology and Germany's particular role therein.

The proposal that, with the Bremen Drop Tower, the world's first laboratory for earthbound research under space conditions should be established, in other words a laboratory that would not only be cost-effective but also permanently available, seemed to me to be groundbreaking. I considered this to be a very good basis for the far-reaching future development of orbital research. Moreover, I considered it to be an excellent way of internationally reinforcing Germany's claim to a leading role in the development and running of the proposed space station. Therefore as Germany's Federal Minister for Research I was more than happy to support the planning to the best of my ability.

And it was then with great pleasure, with much anticipation and with confidence that in September 1990 at the touch of a button I launched the first free fall experiment and with it officially inaugurated the Bremen Drop Tower.

Since then well over 5,000 experiments have been conducted. The positive assessment we made at the time has proved to be right. At the same time ZARM has, with the greatest variety of materials, successfully established its own independent research into weightlessness, globally enjoying a first-class reputation and being in a position to initiate the newest of technological developments. Numerous outstanding scientific publications testify to this, as do ZARM's global network and those drop installations which have sprung up along the lines of the Bremen model in the USA, Japan and most recently China.

I share my delight with you all – with the founder and long-standing head Professor Hans J. Rath and with his first-class team – in the growing success which has made ZARM and the Bremen Drop Tower a beacon visible the world over.

I heartily wish ZARM and all those who work for it every continuing success for – at least – the next 25 years and many more excellent ideas for forward-looking initiatives!

## Hans Koschnick

*Bürgermeister und Präsident des Senats der Freien Hansestadt Bremen a. D.*
*Retired Mayor · Retired President of the Senate of the Free Hanseatic City of Bremen*

Mit großem Respekt und ein wenig Stolz über die gelungene Entwicklung des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation gratuliere ich dem ZARM herzlich zum 25-jährigen Bestehen. Es war ein schwieriger Durchsetzungsprozess, aber die Erfolge nach der Arbeitsaufnahme sind ein Beleg für die Sinnhaftigkeit der damaligen Entscheidung. Für einen, der sich wie ich sehr für den Ausbau des Raumfahrtstandortes Bremen und nicht zuletzt für ERNO eingesetzt hat, war die Entscheidung für die Gründung des ZARM eine wichtige Untermauerung dieser Bemühungen. So will ich heute aus voller Überzeugung Dank sagen.

Ich wünsche dem Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation weiterhin eine erfolgreiche Arbeit und eine allzeit glückliche Hand bei der Einwerbung von zusätzlichen Fördermitteln.

With deep respect and a fair degree of pride regarding the successful development of the Center of Applied Space Technology and Microgravity I cordially congratulate ZARM on its 25th anniversary. Convincing the decision-makers of the time was a difficult process but the success once the idea was put into operation fully testifies to the rightness of the decision. For a person like myself who immensely struggled to further develop Bremen as a location for space research and technology, not least the ERNO company (EADS-Astrium today), the decision for the foundation of ZARM was a major reinforcement of these efforts.

Today, I would like to express my wholehearted gratitude. I deeply wish ZARM every further success and an ever agile hand when it comes to procuring new subsidies.

## Prof. Dr. Dr. h.c. Jürgen Timm

*Rektor der Universität Bremen a. D.*
*Former President of the University of Bremen*

Die Gründung des ZARM 1985 fiel in eine Zeit, in der die Universität Bremen noch sehr um ihre Anerkennung und Wertschätzung als bedeutende norddeutsche Forschungsuniversität kämpfen musste. Ich habe die Gründung dieses Zentrums als Rektor in ganz besonderer Weise gefördert und begleitet. Mit diesem Forschungszentrum und insbesondere mit der Inbetriebnahme des Fallturms 1990 konnten ganz wichtige Meilensteine in der Entwicklungsgeschichte der Universität Bremen erreicht werden.

Der Fallturm wurde das weithin sichtbare Symbol für unsere Bemühungen, der sozial- und geisteswissenschaftlichen Prägung der Anfangszeit der Universität einen starken natur- und ingenieurwissenschaftlichen Zweig hinzuzufügen. Heute kann man mit großer Befriedigung feststellen, dass dies sehr erfolgreich gelungen ist. ZARM und Fallturm sind nicht nur für die Bremer Bürger, sondern auch für die „scientific community" überregional und international ein Markenzeichen der Universität. Sie haben erheblich dazu beigetragen, dass die Universität Bremen heute einen hervorragenden Ruf genießt. Es ist fraglich, ob die positive Entwicklung der Universität ohne den Fallturm ähnlich schnell und ähnlich beeindruckend verlaufen wäre. Umso mehr freue ich mich über den anhaltenden Erfolg des ZARM-Instituts und über die damit vielfach verbundene anhaltend hohe Attraktivität der Universität und des sie umgebenden Technologieparks.

Ich will nicht versäumen, Hans J. Rath und seiner Mannschaft für die geleistete Arbeit und den überall sichtbaren Erfolg zu gratulieren und ganz herzlich zu danken. Ich wünsche ihm, seinen Mitarbeitern und dem ZARM insgesamt weiter eine so gute Entwicklung wie bisher und noch viele neue überraschende Erfolge in den kommenden Jahren.

The foundation of ZARM in 1985 fell at a time in which the University of Bremen was still struggling for recognition and esteem as an important north German research university. As the rector, I had a special role to play in communicating and supporting the foundation of the Center of Applied Space Technology and Microgravity. With this research center, and particularly with the inauguration of the Drop Tower in 1990, very significant milestones in the development of University of Bremen were laid.

The Drop Tower became the visible symbol of our efforts, adding a strong branch of natural and engineering sciences to the social sciences and humanities which had been the university's original focus. Today one can say with great satisfaction that this has been a huge success. ZARM and the Bremen Drop Tower have become synonymous with our university not only for the citizens of Bremen but also for the trans-regional scientific community. You have contributed significantly to the fact that the University of Bremen today enjoys an outstanding reputation. It is questionable whether the positive development of our university could have been comparably rapid and impressive without the Drop Tower. I am all the more delighted about the lasting success of the ZARM institute and about the associated and enduring attractiveness of our university and its neighboring Technology Park.

I do not want to miss this opportunity, therefore, to extend my warmest thanks and congratulations to Hans J. Rath and his team. I wish him, his co-workers and everyone at ZARM a continued positive development and many surprising successes in the years ahead.

# Highlights aus
# Research I

der Forschung

Highlights

# Kapillare Kanalströmungen

*PD Dr.-Ing. Michael Dreyer*
*Leiter der Arbeitsgruppe Fluid Dynamics and Multiphase Flow*
*Head of the Group Fluid Dynamics and Multiphase Flow*

TEAM
*M. Sc. Peter Canfield · Dipl.-Ing. Frank Ciecior*
*Dr.-Ing. Michael Conrath · Dipl.-Ing. Holger Faust*
*Dipl.-Ing. Eckart Fuhrmann · Dipl.-Ing. Diana Gaulke*
*Dr.-Ing. Aleksander Grah · Dipl.-Math. Jörg Klatte*
*Dipl.-Phys. Nikolai Kulev · Dipl.-Ing. Ronald Mairose*
*Dipl.-Ing. Peter Prengel · Dipl.-Ing. Yvonne Reichel*
*Dipl.-Ing. Ming Zhang*

Oberflächenströmungen beherrschen diverse Bereiche des menschlichen Lebens. Fundamentales Verständnis und die Beherrschung dieser Strömungen sind von großer Bedeutung für Wissenschaftler und Ingenieure. Der herausragende Effekt hierbei ist die Oberflächenspannung, die für das Auftreten kapillarer Kräfte verantwortlich ist. Die Oberflächenspannung ist das Ergebnis intermolekularer Kohäsion, der Anziehungskraft zwischen Molekülen in einer Flüssigkeit. An der Oberfläche sind diese Kräfte nicht mehr kompensiert, was die Oberflächenspannung zur Folge hat. Als Folge verhält sich die freie Oberfläche wie eine elastische Membran. Ein Beispiel hierfür kann beobachtet werden, wenn man ein Glas bis knapp über den Rand mit Wasser füllt.

Intermolekulare Anziehungskraft zwischen unterschiedlichen Molekülen wird als Adhäsion bezeichnet. Die Adhäsionskräfte zwischen der Flüssigkeit und der Festkörperoberfläche führen somit ebenfalls zu Kapillarkräften. Die Kapillarkräfte nehmen mit abnehmenden Längenskalen stark zu. Somit sind diese beispielsweise für Mikrokanäle und biologische Strömungen von großer Bedeutung. Auf der Erde können Kapillarkräfte nur bei verhältnismäßig kleinen Längenskalen (Mikrometer bis Millimeter) experimentell untersucht werden. Bei Bedingungen kompensierter Gravitation können Kapillarkräfte auch bei größeren Längenskalen (Zentimeter bis Meter) studiert werden. Daher sind Experimente bei Mikrogravitation ein wichtiges Feld der Strömungsmechanik.

Kapillarkräfte sind nicht nur für kleinskalige terrestrische Anwendungen interessant. Die ungewöhnlichen Beschleunigungsbedingungen, unter denen Raumfahrzeuge operieren, stellen besondere Ansprüchen an Systeme, die Flüssigkeiten enthalten. Hierzu gehören unter anderem Treibstofftanks, Wärmetauscher und Lebenserhaltungssysteme. Unter der Bedingung kompensierter Gravitation sind die Auswirkungen von Auftrieb, Konvektion und Sedimentation stark verringert oder gar nicht existent. Diese Effekte können daher nicht zur Positionierung, Transport oder Trennung von Fluiden verwendet werden.

In den letzten Jahrzehnten sind diverse Techniken zur Handhabung von Flüssigkeiten im All entwickelt worden. Kapillare Techniken finden bei der Treibstoffversorgung breite Anwendung, da diese keine beweglichen und daher störungsanfälligen Teile benötigen. Kapillare Kanäle verfügen über mindestens eine freie Oberfläche. Aufgrund der reduzierten Schwerkraft dominieren die Kapillarkräfte und ermöglichen eine kontinuierliche Strömung des Treibstoffs zum Triebwerk. Aufgrund der freien Oberfläche kann sich der Treibstoff an nahezu beliebiger Stelle entlang der freien Oberfläche befinden, um angesaugt werden zu können. Zusätzliche Einrichtungen wie Siebe und Zwischenspeicher erhöhen die Zuverlässigkeit der Treib-

stoffversorgung. Zur Entwicklung der hierzu erforderlichen Bauteile ist ein genaues Verständnis der Kapillareffekte und eine genaue Modellierung der Kapillarströmung erforderlich.

Ein einfaches Beispiel eines Kapillarkanals besteht aus zwei parallelen Platten. Diese Struktur ermöglicht die Bildung von zwei freien Flüssigkeitsoberflächen. Zwischen den Platten bilden sich zwei Menisken (gekrümmte Oberflächen). Kräfteeinwirkungen, zum Beispiel aufgrund von Druckunterschieden, fördern die Flüssigkeit entlang des Kanals.

Druckunterschiede gegenüber der umgebenden Gasphase definieren die Form der gekrümmten Oberflächen. Beim Erreichen eines bestimmten Volumenstromes können die Druckunterschiede nicht mehr durch die Oberflächenspannungskräfte aufgefangen werden. Die Oberflächen kollabieren und Gas dringt in die Strömung ein. Diese Volumenstrombegrenzung ist von der Kanalgeometrie sowie den Fluideigenschaften abhängig. Das Ziel aktueller Untersuchungen ist das Verständnis der Volumenstrombegrenzung.

Um die Interaktion zwischen Strömung und Oberfläche zu verstehen, sind zahlreiche Experimente unter Bedingungen reduzierter Gravitation durchgeführt worden. Diese fanden im Fallturm Bremen sowie bei ballistischen Raketenflügen und Parabelflügen statt. Zurzeit laufen die Vorbereitungen für die unmittelbar bevorstehenden Experimente an Bord der Internationalen Raumstation ISS.

In den letzten Jahren sind diverse Experimente mit Hilfe von Raketenflügen durchgeführt worden. Hierbei wurden mehrminütige Videos von den Strömungen aufgenommen sowie Strömungsdaten erfasst. Es wurden unterschiedliche Versuchsflüssigkeiten verwendet, wie zum Beispiel Silikonöl. Die Versuche zeigten, dass Volumenströme unterhalb eines kritischen Wertes stabile Flüssigkeitsoberflächen ergaben sowie dass sich die Krümmung der Oberflächen den Druckverhältnissen anpasst. Wird dieser kritische Volumenstrom überschritten, kollabieren die Oberflächen und Gas dringt in die Flüssigkeitsphase ein.

Dieses Phänomen wird als Choking-Effekt bezeichnet und kann mit ähnlichen Vorgängen in kompressiblen Gasströmungen verglichen werden. Choking tritt beispielsweise bei Strömungen durch Düsen auf, bei denen die Strömungsgeschwindigkeit durch die Schallgeschwindigkeit begrenzt wird.

Die Volumenstrombegrenzung bei Kapillarströmungen ist detailliert beschrieben und eine neue Kennzahl, der Speed Index, hergeleitet worden. Der Speedindex bemisst die Volumenstrombegrenzung und ist in diesem Sinne mit der Mach-Zahl für stationäre Strömung vergleichbar. Bleibt der Speed Index unter dem Maximalwert von Eins, so bleiben die Oberflächen stabil und die Strömung eine stationäre Einphasenströmung. Wird der Wert Eins erreicht, kollabieren die Oberflächen und die Strömung wird zweiphasig, es befinden sich Gasblasen in der Strömung. Diese Theorie wurde in den letzten Jahren erweitert, um auch instationäre Effekte beschreiben zu können, wie zum Beispiel Beschleunigungen in der Strömung.

Die neue Theorie ist auch geeignet, oszillatorisches Verhalten der Strömung zu beschreiben. Bei instationärer Strömung sinkt der maximale Volumenstrom im Vergleich zu stationärer. Andererseits führt der Choking-Effekt bei instationärer Strömung nicht zwangsläufig zum Kollaps der Oberflächen. Erreicht der Speed Index den Wert Eins, befindet sich die Strömung im überkritischen Strömungsregime und kann unter bestimmten Voraussetzungen stabil bleiben.

Die theoretische Beschreibung umfasst somit drei Regime: das unterkritische, das stabile überkritische und das instabile Strömungsregime. Die Begrenzung des instationären Volumenstroms im überkritischen Regime wird durch einen Dynamischen Index bestimmt. Dieser wird durch die Wechselwirkung der Drücke an der Oberfläche definiert und erreicht den Wert von Eins beim Kollaps der Oberflächen. Die mathematischen Modelle zur Bestimmung der Oberflächenkontur und des kritischen Volumenstroms sind anhand von Experimenten validiert worden und können nunmehr zur Auslegung von Bauteilen im Bereich der Treibstoffversorgung im All verwendet werden.

In naher Zukunft werden an Bord der ISS Versuche mit Kapillarströmungen in Kanälen unterschiedlicher Geometrie und bei verschiedenen Strömungszuständen durchgeführt.

Der Versuchsaufbau wurde in Kooperation mit EADS Astrium Friedrichshafen entwickelt und ermöglicht die Variation diverser Strömungsparameter, wie zum Beispiel die Kanallänge, den Volumenstrom, dessen Beschleunigung sowie die Oszillation der Strömung. Die Messstrecke des Versuchs ist variabel und austauschbar und ermöglicht somit die Untersuchung unterschiedlicher Kanalgeometrien. Der Versuchsaufbau wurde im April 2010 durch den Flug STS-131 des Spaceshuttle Discovery zur ISS transportiert. Die Inbetriebnahme in der Microgravity Science Glovebox wird von den Astronauten durchgeführt. Danach wird die Versuchseinheit vollständig von der Bodenkontrollstation am ZARM in Bremen aus ferngesteuert. Im Rahmen der Mission werden Hochgeschwindigkeitsvideodaten aufgenommen, verarbeitet und zusammen mit anderen Telemetriedaten nach Bremen gefunkt. Im Laufe des Experiments werden außerordentlich große Datenmengen anfallen. Deren Auswertung wird die vorhandenen mathematischen Modelle von Kapillarströmungen validieren und so deren Zuverlässigkeit zur Optimierung technischer fluidmechanischer Bauteile erhöhen.

Wir möchten uns ganz herzlich bei unserem Kollegen Prof. Mark Weislogel der Portland State University und seinem Team für seine Mitwirkung bedanken. Das CCF-Experiment wird wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie durch die Raumfahrt-Agentur des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. unter dem Förderkennzeichen 50WM0845 gefördert und in Kooperation mit der NASA durchgeführt. Experimenthardware und Software sowie der Support während der Betriebsphase werden von EADS Astrium Friedrichshafen geliefert.

## Capillary Channel Flows

Interfacial fluid flows govern many aspects of human life and human activities. A solid physical understanding of such flows and the capability of predicting them are essential for scientists and engineers alike. The distinguishing factor of these flows is the substantial influence of liquid surface tension, which is also responsible for capillary forces. Surface tension itself is the result of intermolecular cohesive forces that cause like molecules in a liquid to attract one other. At the surface of a liquid, these cohesive forces are not balanced, thus causing surface tension. This results in the tendency of the open surfaces of a liquid to behave like an elastic membrane, or a stretchy "skin". Surface tension can be displayed by filling a glass of water 'above the brim' and is utilized by water striders to walk on water. Intermolecular attraction of unlike molecules results in adhesive forces. The adhesive forces between a liquid and a solid, e.g. water and glass, lead to capillary forces. The importance of capillary forces increases dramatically at smaller length scales, for instance in micro-conduits or in many biological flows. Unfortunately, on Earth only experiments with small length scales may be performed to examine the effects of capillary forces. However, in space the situation changes. Due to the reduced relevance of gravity, capillary forces remain significant even at larger length scales in the range of centimeters. This is why experiments in microgravity represent such a powerful tool in this field of research.

But capillary forces are not only important for small scale terrestrial applications. The unique environment of spacecraft requires special solutions for systems containing liquids such as propellant tanks, heat transfer units, and life support systems. In microgravity, natural convection, sedimentation, buoyancy and hydrostatic pressure are significantly altered and may not be used to position, pump, separate, stratify, or de-stratify fluid bodies, with or without free surfaces. In the last decades, some techniques have been developed that make use of capillary forces to pump and position liquids without the necessity of moving parts or hydrostatic pressure. For instance, liquid acquisition

devices are widely used in propellant management systems to position liquid fuel and to pump it towards the thrusters. Liquid acquisition devices often contain capillary channels, which are structures that provide a liquid path. Capillary channels are often open to one or more sides resulting in free liquid surfaces. Due to the absence of gravity, capillary forces are dominant and can be used to maintain a flow path to the outlet, i.e. the thrusters. The advantage of this technique is that the inlet may be located anywhere along the axis of the channel. As long as the liquid bulk is connected to the channel, liquid can be withdrawn. Additional devices such as refillable reservoirs and screen devices ensure that no bubbles are present in the liquid that is provided to the thrusters of the spacecraft. When designing such devices, it is vital to understand the principles of capillary channel flows and to be able to model them.

A simple example of a capillary channel is a parallel plate channel. This structure provides the boundary conditions for the existence of free surfaces. Two liquid menisci (the curved surface of a contained liquid) are formed between parallel plates. External forces, such as a pressure drop created by a pump, drives the flow of liquid through the channel. Pressure gradients along the channel are balanced by the local curvature of the free surface. At a certain flow rate, the internal flow-induced pressure can no longer be balanced by the curvature-based surface pressure and the surfaces collapse. This limitation of surface stability depends on the geometry of the channel and on the properties of the liquid. Finding and explaining this limit is the goal of ongoing research.

In order to understand the interaction of the flow with the free surface, various capillary channel experiments have been conducted in the low-gravity environment of the Drop Tower, onboard suborbital rockets, and soon further experiments will follow onboard the International Space Station. In the last years, capillary channel flow experiments were performed onboard rocket flights. Videos of the experiments were shot onboard the rockets, which each provided six minutes of microgravity during a suborbital ballistic flight. Different liquids such as silicon oil were used at various flow rates. The experiments showed that for flow rates below a critical value, the free surface remains stable and the curvature of the free surface increases with increasing flow rate. If the flow rate is increased above a critical value the surfaces collapse and gas ingestion occurs. This phenomenon is called choking and can be related to similar effects in compressible gas flows. For example, choking occurs in compressible gas flows

*„Das ZARM war für mich der Grundstein meiner wissenschaftlichen Karriere. Von Professor Rath habe ich viel gelernt, eines aber beeindruckt mich noch heute besonders, das ist sein Motto: ‚Nichts ist erfolgreicher als der Erfolg‘ und er hat natürlich vollkommen Recht damit, wie zuletzt die Gründung eines DLR-Instituts in Bremen zeigt. Das ZARM ist bis heute eine einmalige Forschungseinrichtung in Europa und kann stolz nach 25 Jahren auf unzählige Erfolge in der Forschung unter Weltraumbedingungen zurückblicken.“*

*“ZARM laid the foundation for my scientific career. I learned a great deal from Professor Rath, but what still particularly impresses me today is his motto: ‘There is nothing more successful than success’. And here of course he is completely right, not least as the establishment of a DLR institute in Bremen goes to show. To date ZARM constitutes a unique research facility in Europe and can look back with pride at countless successes over the past 25 years of research conducted under space conditions.”*

PROF. DR.-ING. CHRISTOPH EGBERS
*Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungslehre (LAS), Leiter des Instituts für Verkehrstechnik, Fakultät Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen, Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1989 – 2000 Chair of Aerodynamics and Fluid Mechanics, Head of Traffic Engineering Institute, Faculty of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering, Brandenburg University of Technology, Cottbus; Research Associate at ZARM from 1989 to 2000*

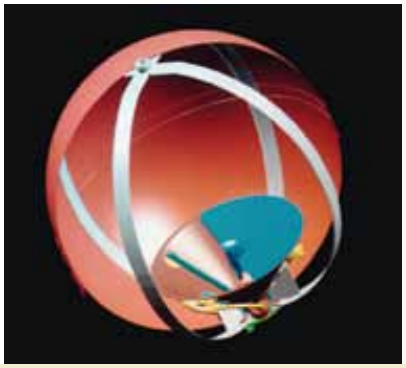
when the flow velocity reaches the speed of sound in the throat of a nozzle and the mass flow rate cannot be increased.

Flow rate limitation in capillary flows in microgravity has been explained in detail and a speed index has been derived from the conservation equations of mass and momentum in one-dimensional flows. This speed index corresponds to the Mach number for compressible gas flow. If the speed index is smaller than one the free surfaces remain stable and a steady single-phase flow at the outlet is maintained. A speed index of one leads to an unstable surface configuration and two-phase flow at the outlet. Recently, the choking theory for capillary flows in microgravity was extended to explain unsteady effects which result from transient flow rate changes. This includes surface oscillations such as those that were observed during an experiment on a rocket flight. In unsteady flow, the maximum flow rate decreases in comparison to steady flow. On the other hand, the choking effect does not necessarily cause the surfaces to collapse. When the speed index reaches unity, a supercritical flow regime is reached. Under certain circumstances, stable flow is temporarily possible in the unsteady supercritical regime. Thus, the theory encompasses three flow regimes: subcritical flow, stable supercritical flow, and unstable flow. The supercritical stability limit is given by the dynamic index which is defined by the interaction of pressures and it reaches unity for unstable flow. The models for predicting the shape of the free surface and the critical flow rate have been validated by experiments and may now be used to design liquid acquisition devices for propellant management in space or other applications.

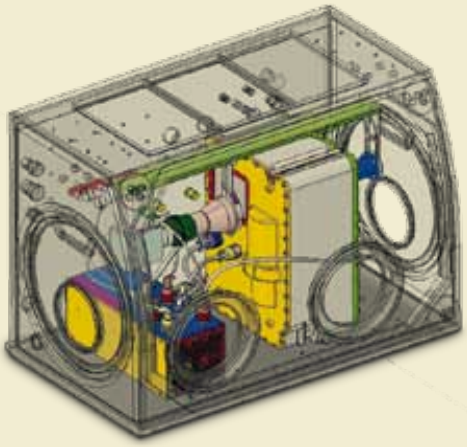
Soon capillary channel flows with different geometries and different flow modes will be studied onboard the International Space Station (ISS). To this end, a payload has been built in co-operation with EADS Astrium Friedrichshafen that will allow the CCF team (from ZARM, University of Bremen, and Portland State University, Oregon, USA) to examine capillary channel flows whilst varying several parameters like free surface length, flow rate, acceleration of the fluid, and oscillation. The test channel of the experiment may be exchanged, thus enabling the geometry of the capillary channel to be varied. In this way it is possible to examine parallel plates, groove, and wedge geometries all in the same experimental set-up. The payload containing the experiment was transported to the ISS on the STS-131 mission of the spaceshuttle Discovery in April 2010. In the near future, astronauts will install the experiment into the Microgravity Science Glovebox allowing the team to control it from a ground station at ZARM in Bremen, Germany. During its mission, high speed video data will be recorded, processed, and subsequently downlinked to Earth together with telemetry data of the sensors that are built into the experimental set-up. Ultimately, the experiment onboard the ISS will generate vast amounts of data that will deepen our understanding of capillary channel flows and help to design better models for applications such as liquid management systems in space.

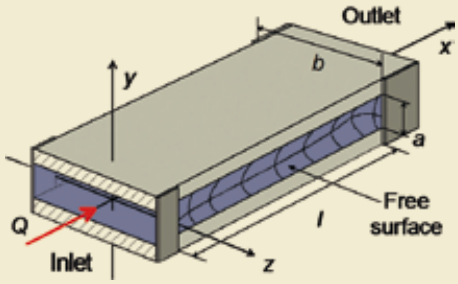
We acknowledge with pleasure the contribution of our American co-investigator Prof. Mark Weislogel from Portland State University, Oregon, and his team. The CCF experiment onboard the ISS is funded by means of the Federal Ministry of Economics and Technology through the German Aerospace Center (DLR) under grant number 50WM0845 and is executed in co-operation with NASA. The CCF hardware and software was built by EADS Astrium Friedrichshafen, who will provide the support during operations as well.

*Treibstofftanks im Weltraum nutzen Kapillarkanäle zur Positionierung und zum Transport von Treibstoff. Diese verlaufen vorzugsweise parallel zur inneren Tankwand (rot) und bilden einen Kanal bestehend aus nahezu parallelen Platten (grau). Aufgrund der reduzierten Schwerkraft und der geringen Restbeschleunigungen dominieren Kapillarkräfte das Verhalten der Strömung im Kapillarkanal. Bei einem kritischen Volumenstrom kollabieren die freien Oberflächen der Flüssigkeit und Gas wird in die Strömung eingesaugt. Propellant tanks in space use liquid acquisition devices to position liquid fuel and to pump it towards the thruster. They may include vanes (coloured grey) that run close to and parallel to the inner surface of the the tank (coloured red). Due to the absence of gravity and very low residual accelerations, capillary forces dominate the flow of the liquid that is located between a vane and the inner surface of the tank. At a critical flow rate, the free liquid surfaces along the vane may become unstable and collapse, ingesting unwanted gas bubbles into the flow in the process.*

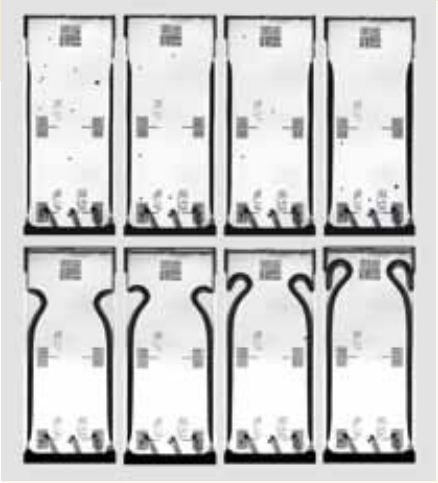


*Zeichnung eines Kapillarkanals bestehend aus parallelen Platten: der Flüssigkeitseintritt ist bei x=0 und strömt mit einem Volumenstrom Q zum Austritt. Die freie Oberfläche bildet die Grenze zwischen der Flüssigkeit und der Gasphase. Die Oberfläche ist beweglich und ihre Krümmung wird durch die Druckdifferenz definiert. Drawing of a parallel plate capillary channel used in experiments: Liquid enters the channel at the inlet and flows through the channel towards the outlet at a flow rate Q. The free surface at the side is the interface between the liquid and the environment. The surface is movable and its curvature is affected by the pressure in the system.*






*Auf der Raumstation ISS wird das CCF-Experiment in der Microgravity Science Glovebox installiert. Im Rahmen der Missionszeit werden große Datenmengen gesammelt, die eine einzigartige Datenbasis für alle Arten der Flüssigkeitshandhabung im Weltraum bilden. The Capillary Channel Flow experiment payload will be installed in the Microgravity Science Glovebox onboard the International Space Station. During its mission, vast amounts of data will be collected which will result in a unique data base for all fluid handling problems in space.*



*Kameraansichten des Kapillarkanals bei einer Strömung von unten nach oben. Die freien Oberflächen sind als schwarze Kontur links und rechts im Kanal zu erkennen. Die obere Bilderreihe zeigt eine stabile Strömung. Wird der Volumenstrom erhöht und ein kritischer Wert erreicht, kollabieren die Oberflächen und Gas wird in die nunmehr zweiphasige Strömung eingesaugt. Dieses wird in der unteren Bilderreihe dargestellt. Images are recorded to visualise the curvature of the liquid free surface in the direction of the flow. In the displayed image sequences, the channel is recorded from above and liquid flows through a parallel plate capillary channel from the inlet at the bottom through the outlet at the top. The liquid free surface is visible as a dark film on either side of the capillary channel. The upper row is an image sequence showing a steady liquid surface at increasing flow rates. As the flow rate increases, the free surface and the internal pressure are no longer in balance and the liquid surface begins to collapse, ingesting gas into the flow of the process. This is displayed in the lower row of images.*

# Geheimnisvolle Quantenteilchen – Unheimliche Quantenwelt

*Prof. Dr. Claus Lämmerzahl*
*Leiter der Arbeitsgruppe Fundamental Physics in Space*
*Head of the Group Fundamental Physics in Space*

TEAM
*Dipl.-Phys. Steffen Aksteiner (QUEST) · Dipl.-Ing. Stefanie Bremer*
*Dr. Elias Castellanos · Prof. Dr. Victor Z. Enolskii · Claus Gebhardt*
*Prof. Dr. Domenico Giulini (QUEST) · Dr. Dipl.-Phys. Ertan Göklü*
*Dipl.-Phys. André Großardt (QUEST) · Dr. Dipl.-Math. Eva Hackmann*
*Dr. Sven Herrmann · Dipl.-Phys. Meike List · Dipl.-Phys. Dennis Lorek*
*Dipl.-Phys. Zelimir Marojevic · Dipl.-Phys. Hauke Müntinga*
*PD Dr. Volker Perlick · Dipl.-Ing. Peter Prengel*
*Dipl.-Phys., Dipl.-Math. Patricia Rademaker (QUEST)*
*Dipl.-Phys. Andreas Resch · Dipl.-Ing. Benny Rievers*
*Dipl.-Phys. Isabell Schaffer · Dipl.-Phys. Hanns Selig*
*Dipl.-Phys. Andrea Sondag · Dipl.-Ing. Marcus Stadtlander*
*Hongxiao Xu*

Atome und Elementarteilchen, aus denen wir aufgebaut sind, verhalten sich vollkommen anders als klassische, makroskopische Körper wie beispielsweise Tennisbälle. Diese seltsamen Quantenphänomene und die entsprechenden Experimente am Fallturm werden hier kurz dargestellt.

Die Quantenmechanik handelt von den kleinsten Objekten, von den Atomen und Elementarteilchen wie Elektronen und Quarks – letztere bilden die Neutronen und Protonen, die Bausteine der Atomkerne – aus denen alle Moleküle und damit auch wir und die Welt aufgebaut sind. Diese Objekte sind nicht nur sehr klein und sehr leicht – kleiner als ein milliardstel Millimeter und leichter als ein quintillionstel Kilogramm (10.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Elektronen wiegen ein Kilogramm) – sondern sie verhalten sich auch ganz anders als wir es aus unserem Alltag gewohnt sind. Hier nun ein paar Kostproben dieser seltsamen Quantenwelt.

Stellen wir uns ein Doppelspaltexperiment vor. Dies besteht aus einer Quelle von Atomen, die alle mit der selben Geschwindigkeit auf einen Schirm fliegen. In diesem Schirm sind zwei parallele Spalte, durch welche die Atome hindurchfliegen können. Hinter diesem Doppelspalt ist noch ein Schirm, auf den die Atome auftreffen und dabei jedesmal einen schwarzen Punkt hinterlassen (Abbildung 1, siehe ab Seite 72).

Nachdem genügend Atome durch den Doppelspalt hindurchgeflogen sind, erscheint auf dem dahinterliegenden Schirm ein Interferenzmuster. Dies besagt, dass die Atome in gewissen Gebieten bevorzugt auftreffen und in anderen Gebieten gar nicht. Atome verhalten sich anders als „normale“ klassische Teilchen wie die erwähnten Tennisbälle: Führt man dasselbe Experiment mit Tennisbällen durch, erhält man kein solches Interferenzbild, sondern einen Doppelstrich auf dem Schirm (Abbildung 2). Damit ist schon gezeigt, dass die Welt kleinster Teilchen ganz andere Phänomene in sich birgt als unsere makroskopische, klassische Welt. Es zeigt sich, dass das Phänomen der Interferenz von Quantenteilchen dadurch beschrieben werden kann, dass man die Quantenteilchen als Welle mit einer bestimmten Wellenlänge, der de-Broglie-Wellenlänge, darstellt. Ein analoges Beispiel sind Wasserwellen, die durch zwei Öffnungen hindurchtreten: die Wellen löschen sich in bestimmten Richtungen aus und verstärken sich in andere Richtungen. Jedes einzelne Atom verhält sich aber auch wie ein Teilchen, denn es hinterlässt auf dem Schirm nur einen geschwärzten Punkt. Dies ist der Welle-Teilchen-Dualismus, der sich nicht auflösen lässt, sondern den man nur als physikalische Tatsache akzeptieren kann.

## Atome wissen immer alles

Es wird aber noch schlimmer, unheimlicher: Wir nehmen wieder die Atomquelle, den Doppelspalt und den Schirm. Jetzt lassen wir aber jede Stunde nur ein Atom durch diesen Apparat fliegen. Das bedeutet, wenn ein nächstes Atom losfliegt, ist das vorherige schon lange auf dem Schirm aufgetroffen und hat seine Schwärzung hinterlassen. Nun lassen wir tausende von Stunden lang jede Stunde ein Atom durch diesen Doppelspalt fliegen. Das Experiment ergibt nun erstaunlicherweise wieder dasselbe Interferenzmuster. Obwohl immer nur ein Atom durch das Gerät fliegt, müssen die Atome alle irgendwie etwas voneinander wissen, denn sonst könnten diese nicht diese korrelierten Interferenzmuster erzeugen. Ist es nicht unheimlich, dass das erste Atom schon irgendwie weiß, was das letzte ein paar tausend Stunden später macht?

Es geht aber noch verrückter: Wir bauen nun dieses Interferenzexperiment tausendfach in gleicher Weise auf. Wir bringen ein Experiment nach Köln, eines nach Berlin, das nächste nach New York, eines auf den Mond, auf den Mars, auf Planeten um andere Sterne, in anderen Galaxien – kurz: wir verteilen diese ganzen Experimente irgendwie im ganzen Universum. Nun lassen wir durch jedes Doppelspaltexperiment nur ein einziges Atom fliegen, welches auf seinem Schirm nur einen einzigen Punkt schwärzt. Wir bringen dann alle Experimente wieder auf die Erde und nach Bremen zurück, bauen alle Schirme aus, legen sie übereinander und sehen – das Interferenzbild! Das kann nur bedeuten, dass das eine Atom, welches auf dem Mond durch den Doppelspalt geflogen ist, wusste, was die anderen Atome in den anderen Experimenten im Universum machen. Alle Atome im Universum wissen irgendwie von allen anderen Atomen. Erschreckend – aber schlichte experimentelle Tatsachen!

Will man wissen, durch welchen Spalt das Atom fliegt, indem man zum Beispiel ein Messgerät in einen Spalt bringt, dann verschwindet das Interferenzmuster. Das Atom will sich einfach nicht in die Karten schauen lassen. Die Atome scheinen den gesamten Versuchsaufbau zu kennen, lassen sich durch den Experimentator nicht hinters Licht führen. Das bedeutet auch, dass eine Messung den Zustand des Atoms grundlegend ändert. Man kann in der Quantenwelt keine Messung durchführen, ohne das gemessene Objekt zu beeinflussen. Dies impliziert auch, dass man Quantenzustände nicht kopieren, klonen, kann: zum Kopieren eines Zustandes müssten wir erst den ursprünglichen Zustand ausmessen, was aber sofort das ursprüngliche Quantensystem verändert.

Und noch ein verrücktes, spannendes Beispiel: Man kann nachschauen, durch welchen Spalt das Atom fliegt, nachdem das Atom durch den Doppelspalt geflogen ist, und auch dann verschwindet das Interferenzbild. Das kann man beispielsweise dadurch erreichen, dass man statt des zweiten Schirms zwei Teleskope aufstellt, die direkt auf jeweils eine der Spalten gerichtet sind und welche die durch jeweils einen Spalt geflogenen Atome registrieren. Das Ergebnis: das Interferenzmuster verschwindet. Der Experimentator kann auch ganz spontan entscheiden, ob er den zweiten Schirm stehen lassen will oder die beiden Teleskope schauen lassen will. Diese Entscheidung kann fallen, lange nachdem das Atom durch den Doppelspalt geflogen ist (dies ist unter dem Namen „delayed choice“-Experiment bekannt). Alle Atome, die dann auf den Schirm fallen, ergeben ein Interferenzmuster – im Falle der Teleskopbeobachtung verschwindet es. Das bedeutet, dass die Atome nicht nur alles über den gesamten Versuchsaufbau wissen, sie wissen es auch während der gesamten Zeit, die das Experiment dauert. Die Atome lassen sich nicht austricksen. Weder dadurch, dass der Experimentator heimlich in einem Spalt nachschaut, noch dadurch, dass er erst so tut, als schaue er nicht nach, sich aber kurz vor Ende des Versuches anders entscheidet. Die Atome, sie wissen immer alles.

## Atome lassen sich nicht austricksen

Die Atome wissen also über das gesamte Doppelspaltexperiment Bescheid. Wenn man nachschauen will, durch welchen Spalt die Atome fliegen, wird das Experiment zerstört. Wir können nicht sagen, durch welchen Spalt die Atome fliegen, sie fliegen irgendwie durch beide Spalte. In Bezug auf die Spalte haben die Atome also die Eigenschaft des „sowohl als auch“. Bei

Tennisbällen können wir genau sagen, durch welchen Spalt diese fliegen. Makroskopische Körper haben demnach die Eigenschaft des „entweder, oder". Nun kann man anstelle der Atome auch Moleküle durch Doppelspalte schicken. Und in der Tat zeigen sich selbst bei Fullerenen (Moleküle aus Kohlenstoffatomen), die 60 und mehr Atome besitzen, Interferenzstreifen. Man versucht nun, noch größere Moleküle durch Doppelspalte zu schicken, um diesen Übergang von der quantenmechanischen Welt des „sowohl als auch" zur klassischen Welt des „entweder, oder" auszutesten. Eine der spannendsten Fragen der experimentellen Quantenmechanik ist also, wann und wie das „sowohl als auch" zu einem „entweder, oder" wird.

Sie ahnen es schon: es kommt noch schlimmer. Nehmen wir also wieder Atome zur Hand, wobei wir jetzt Atome mit Spin, einem Eigendrehimpuls, nehmen (Atome, die sich um eine Achse um sich selbst drehen). Wenn man nun misst, ob die Drehrichtung der Atome die +z-Achse oder die –z-Achse ist, dann wird man feststellen, dass (bei Gleichverteilung der Atome) die eine Hälfte der Messungen eine Drehung um die +z-Achse und die andere Hälfte eine Drehung um die –z-Achse ergibt. Jetzt schicken wir die Atome auf einen Kristall, der den Atomstrahl aufspaltet (wie beim Doppelspalt, nur dass hier die Aufspaltung groß ist), sodass der eine Strahl in die +x-Richtung und der andere Strahl in die –x-Richtung geht. Jetzt messen wir bei beiden Strahlen die Drehrichtung der Atome. Dann passiert folgendes: Misst man bei dem in +x-Richtung fliegenden Strahl die eine Drehrichtung, zum Beispiel +z, dann misst man bei dem in –x-Richtung fliegenden Strahl die entgegengesetzte Drehrichtung, in unserem Beispiel –z. Und das, obwohl die beiden Atomstrahlen nichts mehr miteinander zu tun haben. Auch hier scheint es wieder zu sein, dass die beiden Teilstrahlen wissen, was woanders gemessen wurde. (Da nicht klar ist, was bei der ersten Messung als Messergebnis herauskommt, kann diese Anordnung auch nicht dazu verwendet werden, mit Überlichtgeschwindigkeit Informationen zu senden.) Atome, die sich so verhalten, nennt man „verschränkt". Diese Analyse wurde zuerst von Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen im Jahr 1935 durchgeführt und hat das Verständnis der Quantenmechanik bis zur heute sehr modernen Quanteninformationstheorie wesentlich vorangebracht.

Noch eine Kostprobe des erstaunlichen, unheimlichen Wissens der Atome? Bitteschön: Wir nehmen wieder einen Atomstrahl, der durch einen Kristall aufgespalten wird. Der zweite Strahl trifft auf einen Doppelspalt und trifft danach auf einen Schirm. Dabei stehen vor dem Doppelspalt Analysatoren, das heißt Filter, die nur eine Drehrichtung durchlassen. So werden zum Beispiel durch den rechten Spalt nur solche Atome durchgelassen, die sich in +z-Richtung drehen, durch den linken Spalt nur solche, die sich in –z-Richtung drehen. Nun messen wir beim ersten Strahl (ohne Doppelspalt) ebenfalls die Drehrichtung. Zunächst messen wir, ob die Atome sich in +z- oder –z-Richtung drehen. Wird beim ersten Strahl eine +z- Drehrichtung gemessen, dann muss im zweiten Strahl das Atom in einer –z-Drehrichtung sein. Dann kann man sagen, durch welchen Spalt das Atom fliegt, sodass es kein Interferenzbild gibt. Misst man beim ersten Strahl, wie sich das Atom in x-Richtung dreht, dann weiß man nicht, wie sich das Atom bezüglich einer Ausmessung der z-Drehrichtung verhält. Daher weiß man nicht, durch welchen Spalt es fliegt und es erscheint ein Interferenzmuster. Das bedeutet: Durch eine Änderung der Messung der Drehrichtung im ersten Strahl kann man im zweiten Strahl das Interferenzmuster manipulieren. Dabei kann die Messung im ersten Strahl sehr weit weg sein vom den ursprünglichen Atomstrahl aufspaltenden Kristall, dem Doppelspalt und Schirm beim zweiten Strahl, sodass keine (klassische) Information von der Messung im ersten Strahl an den zweiten Strahl übermittelt werden kann. Auch dies ist eine weitere Variation der Tatsache, dass Quantenteilchen immer alles wissen. Diese spezielle Anordnung nennt man einen „Quantenradierer" (Abbildung 3). Es existieren noch viele weitere Beispiele ähnlicher Anordnungen, die alle unser normales Verständnis der Welt auf die Probe stellen – wie beispielsweise die Quantenteleportation oder abhörfreie Quantenkryptografie – worauf wir an dieser Stelle aber nicht weiter eingehen wollen.

Zum Abschluss beschreiben wir aber noch ein weiteres berühmtes Quantenexperiment, den Aharonov-Bohm-Effekt. Beim Aharonov-Bohm-Effekt geht es wieder nur um den einfachen Doppelspalt, wobei jetzt zwischen den Spalten eine Spule angebracht wird. Die Atome kommen gar nicht zu dieser Spule, sie haben keinen Kontakt mit ihr, fliegen auf dem Wege zum Schirm an ihr vorbei (Abbildung 4). Dennoch verschieben sich die Interferenzstreifen, wenn man Strom durch die Spule fließen lässt. Die Atome „spüren", ob ein Strom fließt oder nicht. Klassische Teilchen können das nicht. Quantenteilchen wissen irgendwie über alles Bescheid …

## Kann man das verstehen?

Das alles sind experimentelle Fakten, die man auch theoretisch beschreiben kann. Aber verstehen wir das auch? Damit kommen wir zu der bedeutsamen philosophischen Frage, was wir denn unter „Verstehen" zu verstehen haben. Eine erste einfache Interpretation wäre, dass Verstehen zunächst nur Gewöhnung ist. An die alltäglichen klassischen Phänomene, wie das Fallen eines Apfels, haben wir uns von Klein auf gewöhnt, es verwundert uns nicht mehr. Nur wenn wir Phänomene sichtbar machen, die nicht alltäglich sind, wie diese Quantenphänomene oder die Konstanz der sehr großen Lichtgeschwindigkeit, dann wird unser Vorstellungsvermögen arg strapaziert.

Unser „Gewöhnungsverstehen" ist aber vollkommen verschieden vom naturwissenschaftlichen Verstehen. Auf der naturwissenschaftlichen Ebene ist alles verstanden, denn wir haben einen konsistenten Satz von Formeln, eine Theorie (die Quantenmechanik), mit der all diese Effekte präzise beschrieben werden können. In dieser Theorie sind die Quantenteilchen Felder (Wellen), die sich über den ganzen Raum ausbreiten, den ganzen Raum explorieren und deshalb immer alles „mitbekommen". Es gibt bisher kein Experiment, welches unser theoretisches, wissenschaftliches Verständnis dieser Phänomene in Frage stellt. Im Gegenteil, es wird immer wieder aufs Trefflichste bestätigt.

## Discoschwirrer und Gleichschrittläufer

Ganz besonders gut lassen sich solche und weitere Phänomene mit ultrakalten Atomen beobachten. Seit 1991 gibt es Interferenzexperimente mit Atomen und seit 1994 gibt es – mit der Realisierung der von Satyendranath Bose und Albert Einstein 1925 vorhergesagten Bose-Einstein-Kondensate ultrakalte Atome, die Temperaturen von weniger als einem milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (–273,15° C) besitzen. Diese Bose-Einstein-Kondensate entstehen, wenn die Atome so weit abgekühlt sind, dass sich ihre de-Broglie-Wellenlängen überlappen und sie sich dadurch beeinflussen und abstimmen können. Alle Atome nehmen dadurch sozusagen denselben Zustand an. Während warme Atome so wie junge Leute in einer Disco herumschwirren, nehmen ultrakalte den Zustand eines Soldatenregiments an, in dem alle im Gleichschritt laufen. Diese Kondensate bilden einen Quantenzustand, der alle Atome umfasst. Da sehr viele Atome – das können Milliarden sein – bei solchen Kondensaten involviert sind, sind diese Quantenzustände sehr groß und können makroskopische Ausmaße bis über Millimeter hinweg einnehmen (Abbildung 5). Wir haben es damit mit Quantenmechanik auf der Skala der klassischen Physik zu tun. Das eröffnet ganz neue Möglichkeiten die beschriebenen Quanteneffekte neu zu testen und zu beobachten.

Solche Bose-Einstein-Kondensate können seit einiger Zeit auch im Fallturm in Bremen hergestellt werden (Abbildung 6). Dabei werden in einer Vakuumkammer auf einem Atomchip (Abbildung 7) Atome gefangen und mittels Laserlicht gekühlt. Damit können die oben beschriebenen Experimente in Zukunft durchgeführt werden. Im Fallturm hat man dabei den Vorteil, dass der Apparat zusammen mit den Atomen fällt, sodass sie sich im Experiment sehr lange frei bewegen können und man sie lange beobachten kann. Auch ist es möglich, dass im Freien Fall noch tiefere Temperaturen als bisher erreicht werden können. Die Interferenzstreifen werden umso dichter, je größer die Masse der Quantenteilchen und deren Geschwindigkeit ist. Um bei ganz großen Molekülen überhaupt noch Interferenzstreifen sehen zu können, müssen diese ganz langsam fliegen. Ganz langsame Teilchen würden aber

im Labor sofort auf den Tisch oder den Boden fallen. Daher sind auch in diesem Fall Experimente in der Schwerelosigkeit von großem Vorteil.

Mit diesen ultrakalten Atomen und Bose-Einstein-Kondensaten können aber nicht nur die sonderbaren Phänomene der Quantenmechanik neu und verbessert getestet werden, sondern sie bereiten auch den Weg zur Entwicklung neuer Technologien. So können mit den beschriebenen Interferometern Beschleunigung und Rotation sehr genau gemessen werden. An verschiedenen Orten auf der Welt wird bereits an der Entwicklung von neuen, auf Atominterferometrie basierenden Beschleunigungs- und Rotationssensoren (Akzelerometer und Gyroskope) gearbeitet. Diese können beispielsweise auf Satelliten zur Navigation eingesetzt werden. Akzelerometer und Gyroskope haben aber auch das Potenzial, die Gravitation besser auszutesten. So gibt es einen Vorschlag, den Schiff-Effekt oder das sogenannte frame-dragging, das Mitführen von Bezugssystemen aufgrund der Rotation von gravitierenden Körpern, wie es zum Beispiel bei der Erde der Fall ist, besser auszumessen. Auch wurde eine Mission vorgeschlagen, das Gravitationsgesetz in den äußeren Regionen des Sonnensystems mit Hilfe von atominterferometrischen Akzelerometern besser auszumessen. Aufgrund der ungenauen Messungen der Bewegung der äußeren Planeten und der bei den Pioneer-Sonden gemessenen anomalen Beschleunigung im äußeren Sonnensystem ist das eine spannende wissenschaftliche Fragestellung.

## Die Fluktuation der Raum-Zeit-Geometrie

Eine Gravitationsbeschleunigung beeinflusst das Interferenzbild genauso wie es im Aharonov-Bohm-Effekt geschieht: Stellt man die Spalte horizontal, so wirkt auf den oberen Strahl ein etwas kleineres Gravitationspotenzial als auf den unteren Strahl. Diese Differenz des Gravitationspotenzials ist proportional zur Gravitationsbeschleunigung und ergibt genau wie in Abbildung 4 eine Verschiebung der Interferenzstreifen. Auch neue, verbesserte Tests der Quantenmechanik sind in der Schwerelosigkeit, also im Fallturm oder im Weltraum, möglich. Das sind beispielsweise Tests der Quantenreflexion und Quantenstreuung, die Suche nach einer fundamentalen Dekohärenz oder einer Nichtlinearität in der Quantenmechanik. Die spannendsten Experimente sind aber diejenigen, in denen Quanteneffekte mit Effekten der Gravitation gemeinsam vorkommen. Wir suchen immer noch nach einer Theorie, die die Gravitation mit der Quantenmechanik vereinigt und konsistent beschreibt. Es gibt zwar Ansätze einer neuen Theorie der Quantengravitation, die jedoch keineswegs im Stadium einer abgeschlossenen Theorie sind. Was dringend benötigt wird, sind Experimente, die einen möglichen Effekt der Quantengravitation zeigen. Ein allgemein akzeptiertes Szenario ist, dass analog dazu ein quantisiertes elektromagnetisches Feld Quantenfluktuationen zeigt, eine Quantisierung der Gravitation zu Fluktuationen der Raum-Zeit-Geometrie auf kleinsten Skalen führt (Abbildung 8). Solche Fluktuationen der Raum-Zeit-Geometrie haben einen kleinen Einfluss auf die Universalität des Freien Falles (Äquivalenzprinzip), auf das Auseinanderlaufen von Wellenpaketen von Quantenteilchen und implizieren eine Dekohärenz der Quantenzustände. Vielleicht können ja in Zukunft durch Experimente mit ultrakalten Atomen solche kleinsten Effekte nachgewiesen werden, die darauf hinweisen, wie die Gravitation zu quantisieren ist.

Zusammenfassend: Ultrakalte Atome ermöglichen einen neuen Zugang zu verbesserten Tests ungewohnter Phänomene der geheimnisvollen Quantenwelt. Sie stehen aber auch im Zentrum von neuen Technologieentwicklungen von Akzelerometern und Gyroskopen, die zur Navigation von Satelliten aber auch zu neuen weltraumbasierten Tests von Gravitationstheorien und zur Suche nach möglichen Quantengravitationseffekten verwendet werden können. An diesen Entwicklungen sind wir am ZARM mit unseren experimentellen und theoretischen Projekten im Rahmen der QUANTUS- und PRIMUS-Kollaborationen wie auch des Exzellenzclusters QUEST beteiligt.

## The Mysteries of Quantum Particles – the Weirdness of the Quantum World

The atoms and elementary particles of which we are comprised behave completely differently from classical, macroscopic bodies such as tennis balls. The following sets out to provide a short description of these strange quantum phenomena and of the corresponding experiments conducted in the Bremen Drop Tower.

Quantum mechanics deals with the smallest objects, atoms and elementary particles such as electrons and quarks – the latter are what neutrons and protons, the building bricks of atomic nuclei, consist of – and from these are made up all molecules, and thus ourselves and the whole world. These objects are not only very tiny and very light – smaller than a billionth of a millimeter and lighter than a nonillionth of a kilogram (10,000,000,000,000,000,000,000,000,000,000 electrons weigh one kilo) – but they also behave completely differently from what we are otherwise accustomed to in everyday life. Here now is a little taste of this weird world of quantum particles.

Imagine a double-slit experiment. This consists of a source of atoms all fired towards a screen at the same velocity. In the screen there are two parallel slits through which the atoms can pass. Behind this double slit is yet another screen which the atoms hit, each time leaving a black dot (figure 1, see pages 72–75). After enough atoms have passed through the double slit an interference pattern emerges on the screen behind. This indicates that the atoms prefer to hit certain areas and to avoid others. Atoms behave differently from “normal” classical particles, such as the aforementioned tennis balls. If these were to be the subject of the same experiment the result would not be an interference pattern as above but rather two distinct lines on the screen (figure 2). This alone shows that quite different phenomena are present within the world of the smallest particles as opposed to in our classical, macroscopic world. It becomes apparent that the phenomenon of quantum particle interference can be described by representing quantum particles as a wave with a particular wavelength, known as the de Broglie wavelength. An analogous example is that of water waves which pass through two openings: the waves cancel each other out in some directions and become amplified in others. However, each individual atom behaves like a particle, since it leaves only a blackened dot on the screen. This is what is known as wave-particle duality – a phenomenon which cannot be resolved but which must simply be accepted as a physical fact.

### Atoms always Know Everything

However, it gets worse and weirder. Let us again take our atomic source, the double slit and the screen. This time, however, we will only allow one atom per hour to pass through the apparatus. This means that when the next atom is launched the previous one has long since hit the screen and left its black mark. Now we send a single atom through this double slit every hour over thousands of hours. Remarkably the experiment yields the same interference pattern. Although never more than one atom is shot through the assembly at a time, the atoms must somehow know about each other, since otherwise they would not be able to produce such correlated interference patterns. Is it not weird that the first atom to be launched already somehow seems to know what the last one is going to do, a few thousand hours later?

The madness does not end here, however. We now set up this interference experiment in exactly the same way thousands of times. We take one experiment to Cologne, one to Berlin, the next to New York, one to the Moon, one to Mars, to planets belonging to other stars, to other galaxies – in short we somehow distribute all these experiments over the whole universe. In each double-slit experiment we now fire merely a single atom which makes just one single black mark on its respective screen. Then we bring all the experiments back to Earth and back to Bremen, dismantle all the screens, lay them on top of one another and – lo and behold, we get the same interference pattern! This can only mean that the atom which hurtled through the double slit on the Moon knew what all the other

atoms in all the other experiments elsewhere in the universe were doing. All atoms in the universe are somehow in the know about all other atoms – terrifying, yet simple experimental facts!

If we want to know which slit an atom passes through, for example by placing a measuring instrument in the slit, then the interference pattern disappears. The atom is simply not prepared to "reveal its cards". The atoms seem to know the whole experimental set-up and will not let themselves be hoodwinked by the experimenter. This also means that making any measurement fundamentally alters the state of the atom in question. In the quantum world there is no such thing as making a measurement without influencing the object being measured. This also implies that quantum states cannot be copied or cloned: in order to copy a state we would first have to measure the original state – but this would immediately alter the original quantum system.

Here is yet another freakish and intriguing example: an atom having passed through the double slit, one can check through which slit it passed and here, too, the interference image will disappear. This can be achieved, for example, by setting up two telescopes instead of the second screen, each of which is directed at one of the slits and which register the atoms passing through each respective slit. The result: the interference pattern disappears.

The experimenter can also spontaneously decide whether to leave the second screen as it is, or whether to allow observations from both telescopes. This decision can be taken long after the atom has passed through the double slit (known as the "delayed choice" experiment). All atoms which then hit the screen produce an interference pattern; where there is telescopic observation this disappears. This means that not only do the atoms know everything about the whole of the experimental set-up, but they also do so for the whole duration of the experiment. The atoms cannot be fooled – neither through the experimenter secretly looking through a slit, nor by his pretending not to look but changing his mind just before the end of the experiment! The atoms always know everything.

## Atoms Cannot be Fooled

So the atoms know everything about the whole of the double-slit experiment. Trying to ascertain through which slit the atoms pass destroys the experiment. We simply cannot say through which slit the atoms travel – somehow they travel through both. As far as the slits are concerned, therefore, the atoms possess a property of "both/and". In the case of tennis balls we can say with precision through which slit they are shot. Thus, we can say macroscopic bodies possess a property of "either/or". Now instead of firing atoms through double slits we can also fire molecules. And indeed even in the case of fullerenes (molecules from carbon) which possess 60 atoms or more interference bands can be seen. Now we try to shoot even larger molecules through double slits in order to pinpoint the transition from the quantum mechanical world of "both/and" to the classical world of "either/or". In other words one of the most exciting questions in experimental quantum mechanics is when and how "both/and" becomes "either/or".

You guessed it – it gets worse. Let us once again take some atoms, though this time atoms with spin, that is with their own rotational momentum (atoms which rotate around themselves around an axis through their center of mass). If we now measure whether the atoms' direction of rotation is the +z axis or the –z axis then we will find that (with an equal distribution of atoms) half of the measurements indicate rotation around the +z axis and half around the –z axis. Now we fire the atoms against a crystal which splits the atomic beam (as with the double slit, only here the splitting is large) so that one beam goes in the +x direction and the other in the –x direction. Now we measure the direction of rotation of the atoms for both beams. The result is as follows: if we measure one direction of rotation, for example +z, in the case of the beam traveling in the +x direction then in the case of the beam traveling in the –x direction the opposite direction of rotation is measured, in our example –z. This occurs

even though both atomic beams no longer have anything to do with one another. Here once again it seems that both partial beams know what has been measured elsewhere. (Since it is not clear what result is going to emerge from the first measurement this set-up cannot be used to send information at superluminal velocity.) Atoms which behave in this way are known as "entangled". This analysis was first carried out by Albert Einstein, Boris Podolsky and Nathan Rosen in 1935 and has played a major part in advancing our understanding of quantum mechanics up to and including today's highly modern theory of quantum information.

How about another insight into the remarkable and uncanny knowledge which atoms seem to possess? Then here goes: once again let us take an atomic beam which is split by a crystal. The second beam hits a double slit, then a screen. In front of the double slit are analyzers, that is to say filters which only admit one direction of rotation. Thus, through the right-hand slit, for example, only those atoms rotating in the +z direction are admitted, and through the left-hand slit only those rotating in the –z direction. Now we also measure the direction of rotation in the case of the first beam (without the double slit). First we measure whether the atoms rotate in the +z or the –z direction. If we measure a +z direction of rotation for the first beam, then the atom in the second beam has to be in a –z direction of rotation. Then it is possible to say through which slit the atom passes and accordingly there is no interference image. If in the case of the first beam we measure the atom rotating in the x direction, then we do not know how the atom behaves with regard to a measurement of the z direction of rotation. Therefore it is not possible to know through which slit it passes, and an interference pattern appears. This means that by altering the measurement of the direction of rotation in the case of the first beam, the interference pattern in the second beam can be manipulated. This is the case even if the measurement in the first beam is at a considerable distance from the crystal which split the original atomic beam, from the double slit and the screen of the second beam, with the result that no (classical) information can be transmitted to the second beam from the measurement in the first beam. This, too, is a further variation on the fact that quantum particles always know everything. This special set-up is known as a "quantum eraser" (figure 3). Further examples of similar set-ups exist, all of which challenge our normal understanding of the world – for example quantum teleportation or non-interceptible quantum cryptography – but we will not go into those now.

Finally, however, let us describe yet another famous quantum experiment, namely the Aharonov-Bohm effect. Here once again we are dealing merely with a simple double slit, though now a solenoid is placed between the slits. The atoms never come near this solenoid and have no contact with it, shooting past it on their way to the screen (figure 4). Nevertheless, the interference bands are displaced when electric current is passed through the solenoid. Note that there will be no magnetic or electric field outside a very long solenoid. Nevertheless, the atoms "sense" whether there is a flow of electric current or not. Classical particles cannot do this; quantum particles, on the other hand, somehow seem to know everything ...

## Can we Understand the Quantum World?

These are all experimental facts which can also be described theoretically. But do we also understand them? We ask ourselves the philosophical question as to what we understand by "understand". A simple interpretation would be that understanding is initially a matter of familiarization. Since we were young we have been accustomed to everyday classical phenomena such as the falling of an apple, and these no longer surprise us. It is only when phenomena become visible which do not occur everyday, such as these quantum phenomena or the constancy of the immense speed of light, that our powers of imagination become severely strained. Our "understanding through familiarization", however, is completely different from scientific understanding. At a scientific level everything is understood, for we have a consistent set of formulae, a theory (quantum mechanics) with which all these effects can be described precisely. According to this theory quantum particles are fields (waves) which extend throughout all of space and which explore all

of space, thus always "fathoming" everything. So far there has been no experiment which has called our theoretical, scientific understanding of these phenomena into question. On the contrary, it has been utterly confirmed time and time again.

## Twirling at the Disco or Marching in Step

These and other phenomena can be particularly well observed with ultracold atoms. Interference experiments with atoms have been carried out since 1991, and since 1994, with the realization of Bose-Einstein condensates as predicted in 1925 by Satyendranath Bose and Albert Einstein, there have been ultracold atoms possessing temperatures of less than a billionth of a degree above absolute zero (–273.15° C). These Bose-Einstein condensates are created when the atoms are cooled so much that their de Broglie wavelengths overlap and they can thus influence each other and co-ordinate with themselves. All atoms thereby assume the same state, so to speak. Whereas warm atoms twirl around like the younger generation on a disco floor, the ultracold assume the state of a regiment of soldiers all marching in step. These condensates form a quantum state which encompasses all atoms. Since a very large number of atoms – they can be in the billions – are involved in such condensates, these quantum states are very large and can take on macroscopic dimensions up to and exceeding millimeters (figure 5). Here we are dealing with quantum mechanics on the scale of classical physics. This opens up completely new possibilities for testing and observing the previously described quantum effects.

For some while it has also been possible to produce such Bose-Einstein condensates in the Bremen Drop Tower (figure 6). This involves atoms being caught in a vacuum chamber on an atom chip (figure 7) and cooled by means of laser light. In this way it will be possible to conduct the experiments described above in the future. The Drop Tower has the advantage that the apparatus falls together with the atoms so that they can move freely for a long time during the experiment and can be observed over a longer period. Moreover, it is possible that in free fall even lower temperatures can be reached than hitherto. The interference bands become denser the greater the mass of the quantum particles and their velocity is. In order to be able to see interference bands at all when it comes to large molecules these need to travel slowly. Really slow particles in the laboratory, however, would immediately land on the table or on the floor. Therefore experiments in weightlessness are of great benefit here, too.

With these ultracold atoms and Bose-Einstein condensates not only can the peculiar phenomena of quantum mechanics be tested in new and better ways but they also pave the way for the development of new technologies. Thus, with the described interferometers acceleration and rotation can be measured very precisely. Work is already taking place in various parts of the world on the development of new acceleration and rotation sensors (accelerometers and gyroscopes) based on atomic interferometry. These can, for example, be used on satellites for navigation purposes. However, accelerometers and gyroscopes also have the potential to offer better means of testing gravitation. The suggestion has been made to improve the measurement of the Schiff effect, or so-called frame-dragging, the dragging of reference frames as a result of the rotation of gravitating bodies, as is for example the case as far as the Earth is concerned. A mission has also been suggested to investigate possibilities for improving the measurement of the law of gravity in the outer regions of the solar system with the aid of accelerometers based on atomic interferometry. Given the imprecise measurements of the movements of the outer planets and the anomalous acceleration measured by the Pioneer space probes in the outer solar system this is indeed a gripping scientific question.

## Fluctuation of Spacetime Geometry

A gravitational acceleration influences the interference image just as much as in the case of the Aharonov-Bohm effect: if the slit is placed horizontally then a slightly smaller gravitational potential acts on the upper beam than on the lower one. This difference in the gravitational potential is proportional to the gravitational acceleration and results in a displacement of the interference bands, just as in figure 4. New,

improved tests in quantum mechanics are also possible in weightlessness, i.e. in the Drop Tower or in space. Examples are tests in quantum reflection and quantum scattering, the search for fundamental decoherence or nonlinearity in quantum mechanics. However, the most exciting experiments are those in which quantum effects and gravitational effects occur together. We are still searching for a theory which will unify gravitation with quantum mechanics and consistently describe both physical domains. Approaches are being made towards a new theory of quantum gravitation but are not yet at the stage of a finalized theory. We urgently need experiments which will indicate a possible effect of quantum gravitation. One generally accepted scenario is that, analogous to the way a quantized electromagnetic field shows quantum fluctuations, so a quantization of gravity leads to fluctuations in the spacetime geometry on the smallest scales (figure 8). Such fluctuations in the spacetime geometry have a small influence on the universality of free fall (equivalence principle) and on the broadening of the wave packets of quantum particles, and imply a decoherence of quantum states. Perhaps by conducting experiments with ultracold atoms it will be possible in the future to prove such miniscule effects indicating how gravitation is to be quantized.

To summarize we can say that ultracold atoms provide a new approach to improved tests of unfamiliar phenomena from the mysterious quantum world. At the same time, however, they are at the center of the new technological developments of accelerometers and gyroscopes which can not only be used for navigating satellites but also for new space-based tests on theories of gravitation and in the search for possible quantum gravitational effects. These are the very developments in which we at ZARM are participating through our experimental and theoretical projects within the QUANTUS and PRIMUS collaborations as well as in the framework of the cluster of excellence QUEST.

*„Das ZARM ist eine große Familie, die dem und der Einzelnen viel Raum zu individueller Entwicklung gibt, aber nach außen hin mit großer Entschlossenheit und Geschlossenheit auftritt. Familienmitglieder erfahren Geborgenheit, Freunde und Nachbarn erhalten stets Zuwendung und Unterstützung, und Gäste werden mit offenen Armen empfangen. Gütigkeit und Herzenswärme, Toleranz und Vertrauen sind das Geheimnis der liebevollen, patriarchischen Führung. Wohl dem, lieber Hans J. Rath, der dieses Erfolgskonzept kopieren kann!“*

*“ZARM is one big family which gives every member great scope for individual development but which presents itself to the outside with great resoluteness and unity. Family members experience a sense of security, friends and neighbors always receive attention and support, and guests are welcomed with open arms. Benevolence and warmth, tolerance and trust are the secrets of a benign and patriarchal stewardship. Lucky they, Hans J. Rath, who can emulate your recipe for success!”*

PROF. DR. HANSJÖRG DITTUS
*Direktor des DLR-Instituts für Raumfahrtsysteme, Bremen; am ZARM seit 1986, Stellvertretender Institutsleiter des ZARM 1990 – 2008 Director DLR Institute of Space Systems, Bremen; at ZARM since 1986, Deputy Director ZARM from 1990 to 2008*

*„Bremen ist zu meinem zweiten zu Hause geworden. Ein Teil meiner Gedanken ist immer noch in Bremen bei meinen Kollegen vom ZARM.“*

*“Bremen has become my second home. Part of my mind is still in Bremen and with my colleagues from ZARM.”*

PROF. DR. HIROSHI NOMURA
*Professor, Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Chiba, Japan. Am ZARM 1989–1992 Professor, Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University, Chiba, Japan. With ZARM from 1989 to 1992*

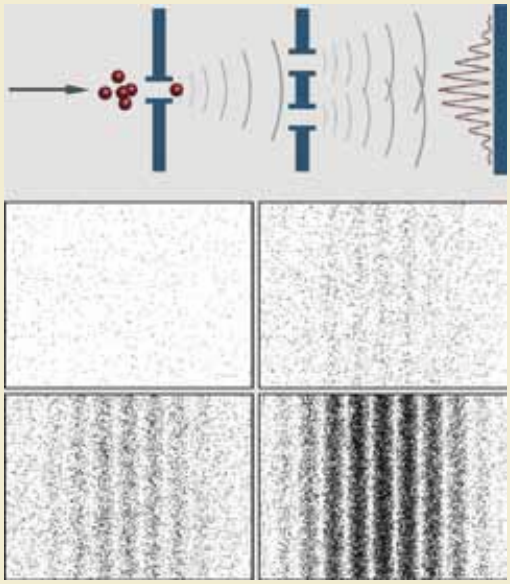
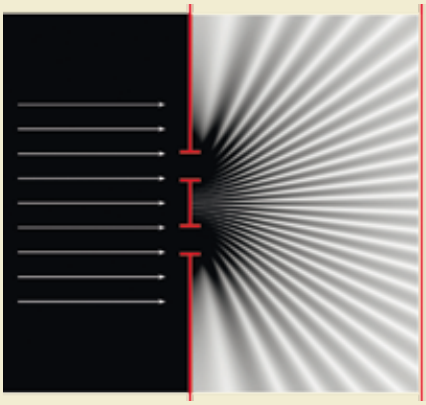
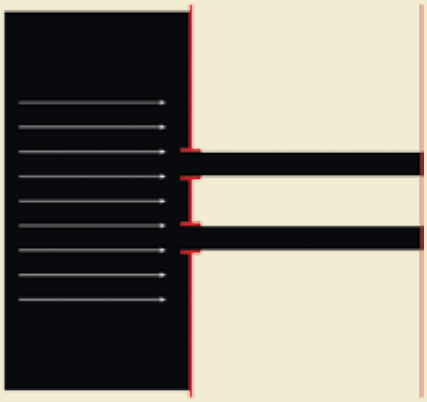


ABBILDUNG 1 *Das „Entstehen" des Interferenzbildes: die einzelnen Atome scheinen zufällig auf den Schirm aufzutreffen. Erst nach einer großen Anzahl von Atomen bildet sich ein Interferenzmuster heraus.* FIGURE 1 *The "creation" of an interference image: individual atoms appear to hit the screen randomly. It takes a large number of atoms before an interference pattern begins to emerge.*




*(a) Quantenteilchen treten durch einen Doppelspalt*
*Quantum particles pass through a double slit*




*(b) Klassische Teilchen treten durch einen Doppelspalt*
*Classical particles pass through a double slit*

ABBILDUNG 2 *Das Interferenzmuster bei Quantenteilchen und das entsprechende Experiment mit klassischen Teilchen, bei dem es kein Interferenzmuster, sondern nur zwei Streifen gibt. Die Schwärzung entspricht der Wahrscheinlichkeit, bei einer Messung ein Teilchen vorzufinden (in weißen Gebieten sind keine Teilchen anzutreffen). Im Vergleich zu den klassischen Teilchen können Quantenteilchen in alle Richtungen laufen.*
FIGURE 2 *The interference pattern with quantum particles and the corresponding experiment with classical particles, resulting in just two bands and not in an interference pattern. The blackening corresponds to the likelihood of finding a particle during a measurement (no particles are to be found in the white areas). Unlike classical particles quantum particles can move in all directions.*

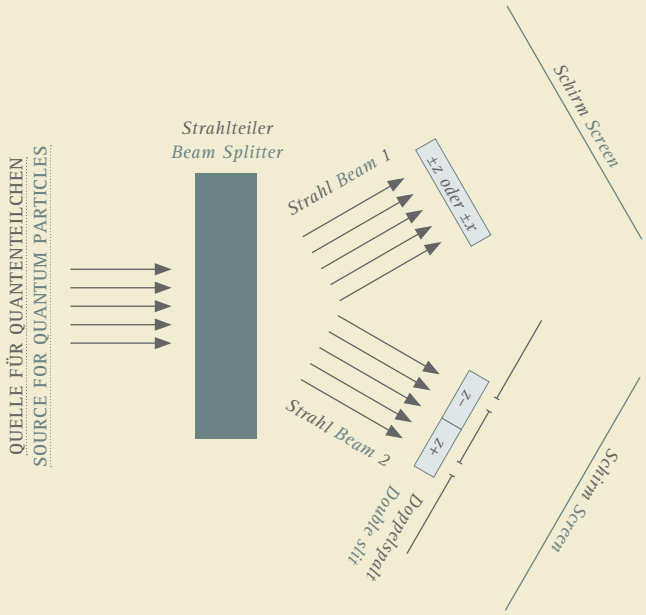
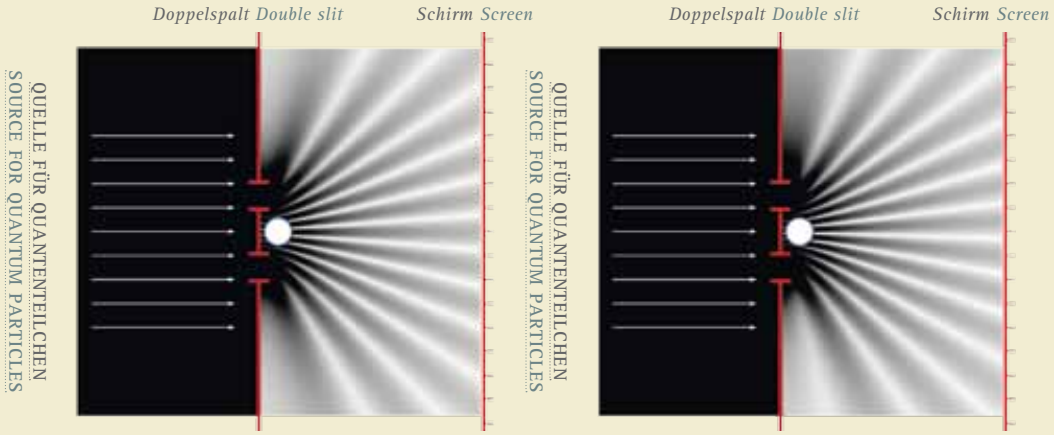



ABBILDUNG 3 *Der „Quantenradierer". Wird in Strahl 1 die Drehrichtung der Atome um die z-Achse gemessen (das Messgerät ist gelb dargestellt), gibt es beim Strahl 2 kein Interferenzbild nach dem Doppelspalt. Wird hingegen die Drehrichtung um die x-Achse gemessen, gibt es ein Interferenzbild. Durch Messung am Strahl 1 wird das Ergebnis des Doppelspaltexperiments am Strahl 2 beeinflusst.* FIGURE 3 *The "quantum eraser" If in beam 1 the direction of rotation of the atoms is measured around the z-axis (the measuring instrument is shown in yellow), then in beam 2 there is no interference image behind the double slit. If on the other hand the direction of rotation is measured around the x-axis, then there is an interference image. Through making measurements on beam 1 the result of the double-slit experiment on beam 2 is influenced.*




*(a) Kein Strom fließt durch die Spule*
*No electric current flows through the solenoid*

*(b) Strom fließt durch die Spule*
*Electric current flows through the solenoid*

ABBILDUNG 4 *Der Aharonov–Bohm–Effekt. Das linke Interferenzbild erhalten wir, wenn kein Strom durch die Spule fließt. Fließt ein Strom durch die Spule (rechts), dann verschieben sich die hellen und dunklen Streifen des Interferenzbildes (wo auf dem Schirm vorher Weiß war, ist nun Grau). Man bedenke, dass außerhalb der Spule kein Magnetfeld existiert und die Quantenteilchen nie in das Innere der Spule kommen.* FIGURE 4 *The Aharonov-Bohm effect. The left interference image is produced when no electric current flows through the solenoid. When electric current flows through the solenoid (right) then the light and dark bands of the interference image are displaced (areas on the screen that were previously white now become grey). Outside the solenoid there is no magnetic field and the quantum particles never reach the inside of the solenoid.*

ABBILDUNG 5 *Die Ausdehnung eines Bose-Einstein-Kondensates nach einer Expansionszeit von einer 1 s auf eine Länge über 2 mm (Expansionszeiten: Bild A: 30 ms, Bild B: 500 ms und Bild C: 1 s). Im Bild C ist das Bose-Einstein-Kondensat schon deutlich ausgedünnt. Solche Messungen sind nur im Fallturm möglich. (Aus: Science 328, 1540 (2010).)* FIGURE 5 *The enlargement of a Bose-Einstein condensate after an expansion time of 1 s to a length of 2 mm (expansion times: picture A: 30 ms, picture B: 500 ms and picture C: 1 s). In picture C the Bose-Einstein condensate is already significantly thinned out. Measurements such as these can only be made in the Drop Tower. (From Science 328, 1540 (2010).)*

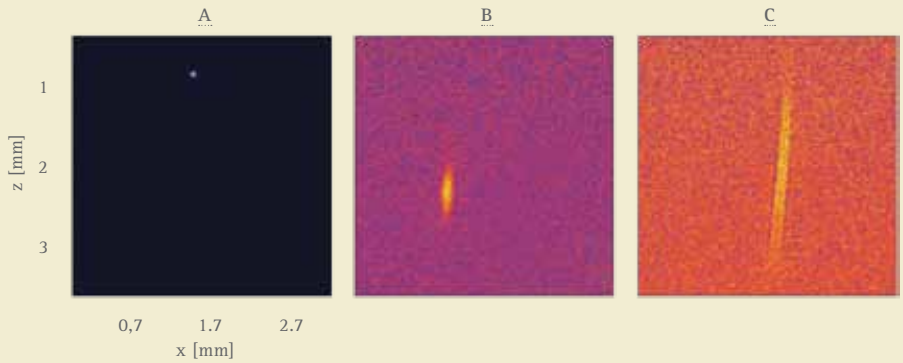


ABBILDUNG 6 *Arbeiten (hier durchgeführt von Hauke Müntinga) an der Fallkapsel, in der das Bose-Einstein-Kondensat erzeugt wird. Herr Müntinga arbeitet gerade an der Hochvakuum-Pumpe. Auf der Ebene darunter ist die Vakuum-Kammer zu sehen, in der sich das Bose-Einstein-Kondensat befindet. Auf der darüberliegenden Ebene befinden sich die Laser, optische Bänke und die Laser-Steuerungselektronik. Unten befindet sich weitere Steuerungselektronik sowie die Energieversorgung. Alles zusammen wiegt über 600 kg.* FIGURE 6 *Working on the drop capsule (undertaken here by Hauke Müntinga) in which the Bose-Einstein condensate is produced. Müntinga is working here on the high vacuum pump. On the level below the vacuum chamber can be seen in which the Bose-Einstein condensate is situated. On the level above are the lasers, optical tables and laser control electronics. Underneath there are more control electronics as well as the power supply. The total weight is over 600 kg.*

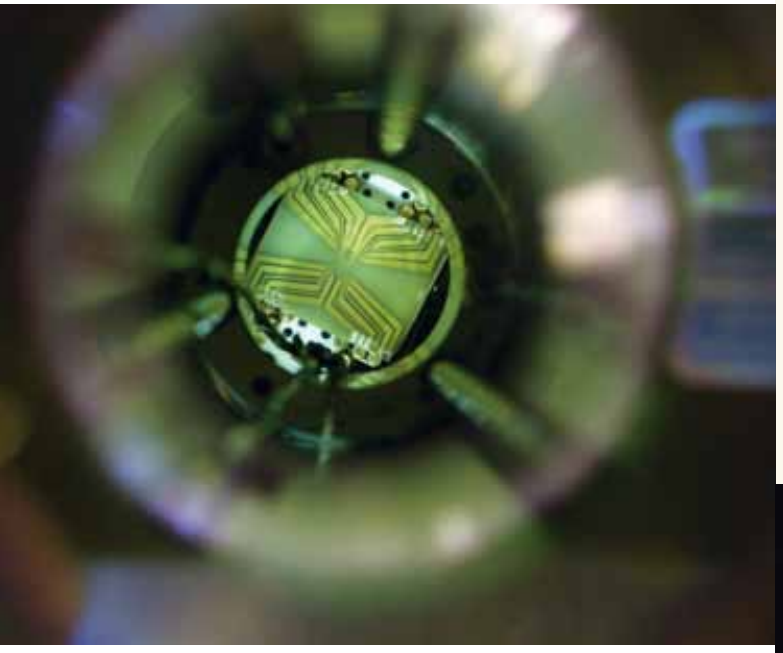


ABBILDUNG 7 *Nahaufnahme des Atomchips. In kleinem Abstand über seiner Oberfläche werden, vermöge der durch die Leiter auf dem Chip erzeugten magnetischen und elektrischen Felder, die kalten Atome gefangen und mittels Laserlicht und Verdampfung zu einem Bose–Einstein–Kondensat abgekühlt.*
FIGURE 7 *Close-up of the atom chip. At a small distance above its surface, and with the help of the magnetic and electric fields created by the conductors on the chip, the cold atoms are caught and by means of laser light and evaporation cooled into a Bose-Einstein condensate.*

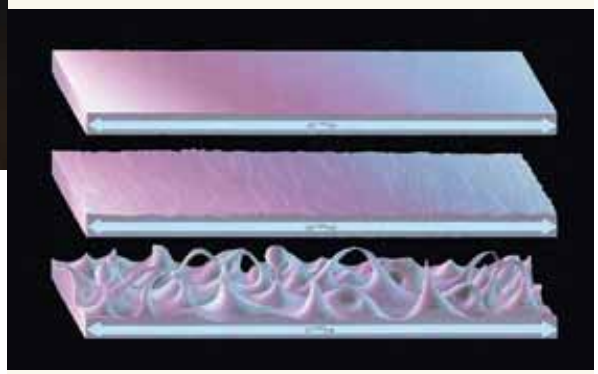


ABBILDUNG 8 *Die Raum-Zeit fluktuiert auf kleinsten Skalen.*
FIGURE 8 *Spacetime fluctuates on the smallest scales*

# Mysterium Gravitation: Fallen alle Körper gleich?

*Prof. Dr. Hansjörg Dittus*
*Direktor des DLR-Instituts für Raumfahrtsysteme, Bremen*
*Stellvertretender Institutsleiter des ZARM 1990 – 2008*
*Director DLR Institute of Space Systems, Bremen*
*Deputy Director ZARM from 1990 to 2008*

CO-AUTOREN CO-AUTHORS
*Prof. Dr. Claus Lämmerzahl · Dipl.-Phys. Hanns Selig*
*Dipl.-Phys. Andrea Sondag*

Die Gravitation ist eine der geheimnisvollsten und mysteriösesten Kräfte, die wir kennen. Sie ist die Kraft, die uns im Alltag am meisten vertraut ist und uns Bodenhaftung gibt. Ohne Gravitation verlöre die Bananenschale auf dem Gehweg ihr Gefahrenpotenzial. Sie ist die Kraft, die am längsten bekannt ist und über die seit jeher spekuliert wird: Was ist ihr Ursprung? Wodurch entfaltet sich ihre Wirkung? Gleichzeitig ist die Gravitation die schwächste der bekannten Grundkräfte. Die Wirkung akkumuliert sich nur dadurch zu großen Effekten, weil es keine „Gravitations-Ladungen“ mit unterschiedlichen Vorzeichen gibt, die sich gegenseitig neutralisieren könnten.

In der Physik gibt es seit langer Zeit Experimente zur Wirkung der Gravitation. In der Regel beschreiben die mit Experiment und Beobachtung gefundenen Gesetze die Natur der Gravitation, erklären können sie diese bisher jedoch nicht. Es ist ein großes Ziel der Physik, eine Erklärung für die Gravitation zu finden. Dieses Ziel kann vermutlich nur durch eine vereinheitlichte Betrachtung der vier elementaren Kräfte erreicht werden. Die gegenseitige Befruchtung von Theorie und Experiment spielt dabei eine entscheidende Rolle. Einige Theorien zur Vereinheitlichung der elementaren Wechselwirkungskräfte sagen Abweichungen von den bisher als gültig akzeptierten Gesetzen voraus, allerdings sind diese Abweichungen extrem winzig und würden nur mit sehr großem technischen Aufwand nachweisbar sein. Am ZARM wird seit vielen Jahren auf diesem Gebiet der experimentellen Physik geforscht. Ein Nachweis solcher Abweichungen hätte revolutionäre Auswirkungen auf das physikalische Weltbild unserer Zeit. Das macht die Erforschung der Gravitation in den Grenzbereichen des technisch Machbaren unglaublich spannend.

Die Situation in der experimentellen Gravitationsphysik Anfang der 1990er-Jahre waren gezeichnet von einer fast euphorischen Suche nach Abweichungen vom Newton’schen $1/r^2$-Abstandgesetz und, damit verbunden, einer eventuellen Verletzung des Schwachen Äquivalenzprinzips. Eine Verletzung des Schwachen Äquivalenzprinzips, einer der zentralen Hypothesen der Einstein’schen Gravitationstheorie, der Allgemeinen Relativitätstheorie von 1915, wäre damit unter Umständen der entscheidende Hinweis auf das große Ziel der fundamentalen physikalischen Forschung: die Vereinigung der vier fundamentalen Wechselwirkungskräfte in einer universalen Theorie.

Das Schwache Äquivalenzprinzip besagt, dass der Freie Fall für alle Körper (idealisiert auf Punktmassen) unabhängig von ihrer Zusammensetzung universal ist, das heißt, sie fallen stets gleich schnell. Den entscheidenden Anstoß für die Vermutung einer Verletzung der Äquivalenz von träger und schwerer Masse hatte eine von Ephraim Fishbach, Carrick Talmadge und Mitarbeitern 1986 veröffentlichte neue Analyse der von Eötvös’schen Torsionswaagen-Experimente aus dem Jahr 1922 gegeben. Den Autoren der neuen Analyse

der umfangreichen Experimente zur Universalität des Freien Falls hatten sich die von Baron von Eötvös veröffentlichten Ergebnisse der gemessenen Torsionsperioden für die vielen unterschiedlichen Materialien als Funktion des jeweiligen, materialabhängigen Verhältnisses von Atommasse zu Baryonenzahl dargestellt. Die Darstellung lässt einen scheinbaren Trend erkennen, der seinerzeit nahelegte, dass Neutronen und Protonen unterschiedlich an das Gravitationsfeld ankoppeln, was bei einer Verletzung des Schwachen Äquivalenzprinzips zu erwarten wäre. Mit dem verblüffenden Resultat der Reanalyse wurde schnell vermutet, dass mit hoch präzisen Messungen des Fallverhaltens von Körpern unterschiedlicher Zusammensetzung in Experimenten mit State-of-the-Art-Technologie eine Verletzung des Schwachen Äquivalenzprinzips bestätigt werden könnte. Es lag also zur damaligen Zeit nahe, auch den Fallturm Bremen unmittelbar nach seiner Fertigstellung für die Durchführung von Hochpräzisions-Experimenten zum Freifallverhalten zu nutzen.

Um entsprechende Experimente, die die Genauigkeit früherer Experimente übertreffen, durchführen zu können, muss der differenzielle Fallweg zweier Testmassen in einem Fallturm-Experiment bei ca. 100 m Fallhöhe auf mindestens $10^{-12}$ – $10^{-13}$ m genau bestimmt werden, entsprechend einem Prozent eines Atomdurchmessers.

Daraus leiten sich direkt wesentliche andere Voraussetzungen für das Freifallexperiment ab: Bei einer Fallzeit von insgesamt 4,7 s müssen die beiden zu vergleichenden Testmassen innerhalb 1 s auf besser als ein tausendstel Millimeter (1 µm) positioniert werden. Bei einer Positionier-Ungenauigkeit von 1 µm müssen zur Vermeidung von Effekten durch das inhomogene Gravitationsfeld der Erde auch die Testmassen in allen Achsen und Dimensionen auf besser als 0,1 µm gefertigt werden.

Für das Messverfahren wurde eine SQUID-basierte Messtechnik (SQUID: Superconducting Quantum Interference Device) gewählt, bei dem die relative Bewegung der beiden Testmassen induktiv erfasst wird. Das Messsystem wurde unter der Leitung von Wolfgang Vodel am Institut für Festkörperphysik der Friedrich-Schiller-Universität Jena entwickelt. Entscheidend für den Einsatz der SQUIDs war es, die für Niob zur Supraleitung kritische Temperatur von 7,2 Kelvin (ca. –266° C) zu erreichen, was durch Verwendung speziell, ebenfalls vom Institut für Festkörperphysik der Universität Jena entwickelter, falltauglicher 20-Liter-Helium-Kryostaten (Dewars) möglich wurde. Mit einem ersten Testmassen-Paar, noch aus supraleitendem Niob und einer Hartbleilegierung gefertigt, konnten Versuche mit einer Genauigkeit von besser $10^{-7}$ durchgeführt werden. Die Testmassen befanden sich für die Versuche in einer Vakuumzelle, die vollständig magnetisch geschirmt war. Mit diesen und darüber hinausgehenden Versuchen wurde das Design des Experimentmoduls für die Hochpräzisionsexperimente entwickelt. Entscheidend für die Durchführung wesentlich präziserer Experimente ist die Fertigung der Gehäuse-Struktur aus Zerodur-Glaskeramik und der Testmassen-Paare, die die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und den Betrieb der evakuierten Testkammer bei ca. 4 Kelvin, der Temperatur des flüssigen Heliums, berücksichtigt.

Für die Fertigung und Beschichtung der Testmassen besteht eine enge Zusammenarbeit mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt, Braunschweig. Dem Team von Frank Löffler gelang es, hohlzylindrische Testmassen aus speziellen Aluminium-Legierungen, kristallinem Silizium und aus Platin-Iridium-Legierungen herzustellen, die die geforderten Genauigkeiten im Mikrometerbereich und die Anforderungen an die Parallelität aller Flächen tatsächlich erfüllten. Die als Hohlzylinder geformten Testmassen werden während des Versuchs ineinander positioniert, sodass ihre Schwerpunkte im Idealfall zusammenfallen, aber zu Versuchsbeginn um maximal 1 µm voneinander entfernt sind. Der innere Zylinder hat einen Durchmesser von 10 mm und eine Länge von 20 mm, der äußere Zylinder ist entsprechend 34 mm im Durchmesser und 45 mm lang. Nach ihrer Fertigung werden die Testmassen hauchdünn mit Niob beschichtet. Die bei 4 Kelvin supraleitende Deckschichtdicke dient der Verdrängung der induzierten Magnetfelder. Die Auswahl der Testmassen richtet sich nach mehreren Kriterien:

Während einerseits für ein Testmassen-Paar ein möglichst großer Unterschied im Verhältnis von Baryonenzahl zu Atomgewicht angestrebt wird, also Elemente, die möglichst diametral im chemischen Periodensystem zu finden sind, muss auf der anderen Seite auch die rein praktische Seite für ihre Hochpräzisionsfertigung beachtet werden. Insbesondere das zu weiche Niob stellte sich als wenig brauchbar heraus, Beryllium konnte ebenfalls nicht verwendet werden, da die spanende Bearbeitung extreme Arbeitsschutzmaßnahmen erfordert.

Zur exakten Positionierung der Testmassen vor dem Versuch wurde ein aus mehreren Elektroden bestehendes Positioniersystem (elektrostatisches Positioniersystem, EPS) entwickelt, mit dem die Testmassen hinlänglich schnell im Mikrometerbereich längs aller drei Raumachsen verschoben werden können. Dazu werden die die Testmassen umgebenden Glaskeramik-Strukturen mit Gold beschichtet, und mittels eines Laserschneidverfahrens die Elektroden ausgeschnitten. Die Elektroden werden während des Freifalls, bevor die SQUID-Messung beginnt, abgeschaltet.

Das Fallturm-Experiment wurde in enger Verbindung zu zwei Weltraumexperimenten entwickelt und aufgebaut. Die SQUID-basierte Messtechnik soll in ähnlicher Form für die STEP-Mission (Satellite Test of Equivalence Principle) zum Einsatz kommen, bei der das Äquivalenzprinzip bis zu einer Genauigkeit von $10^{-18}$ (0,000000000000000001) getestet werden soll. Diese Mission steht unter der Leitung des W. W. Hansen Laboratory der Stanford University (USA). Die hohlzylindrischen Testmassen sollen dabei die Erde auf einem sonnensynchronen Orbit umkreisen, sodass ein das Äquivalenzprinzip verletzendes Signal periodisch mit der Orbitfrequenz auftreten sollte. Um systematische Fehler bei einer Koinzidenz von Signal- und Orbitfrequenz zu vermeiden, wird der Satellit zur Signalmodulation in Rotation senkrecht zu seiner Fortbewegungsrichtung versetzt. Um die erforderliche experimentelle Genauigkeit zu erlangen, muss der Satellit mit einem hochpräzisen Lage- und Orbit-Regelungssystem ausgerüstet sein, das den Satellit bzgl. der empfindlichen Achse, der Symmetrieachse der Testmassen, auf eine Restbeschleunigung von nur $10^{-14}$ m/s$^2$ ausregelt.
Ein zweites, derzeit in Vorbereitung für einen Orbitalflug in 2014/2015 befindliches Satellitenprojekt ist die französische Mission MICROSCOPE (Micro-Satellite à Traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence). Auch dieser Satellit wird auf einem sonnensynchronen Orbit geflogen. Im Gegensatz zur STEP-Mission werden die Testmassen aber mittels eines elektrostatischen Positioniersystems in einem Closed-Loop-Regelkreis in ihrer Position gehalten, und die jeweilige Haltekraft, die der jeweils auf die Testmasse wirkenden Beschleunigung entspricht, mittels zusätzlicher Elektroden kapazitiv gemessen. Mit MICROSCOPE soll eine Genauigkeit von $10^{-15}$ erreicht werden. An MICROSCOPE ist das ZARM direkt mit Freifalltests der Messinstrumente und mit sehr umfangreichen Missionssimulationen beteiligt. Die Missionsdatenanalyse wird in sehr enger Zusammenarbeit mit den französischen Projektpartnern teilweise auch am ZARM durchgeführt werden.

Zusätzlich zu den bisherigen Experimenten besteht die langfristige Planung darin, sogar einzelne Atome als Testmassen zu verwenden. Die hierfür in Frage kommenden Techniken der Atominterferometrie und des Bose-Einstein-Kondensats (BEC) bedürfen noch viel Entwicklungsarbeit, um neue Rekorde beim Test des Äquivalenprinzips zu ermöglichen. Auf diesem Gebiet ist das ZARM im Rahmen der QUANTUS-Kollaboration beteiligt.

Welche Technik auch zur Anwendung kommt, die Erforschung der Gravitation ist und bleibt unglaublich spannend!

## The Mystery of Gravity: Do All Bodies Fall in the Same Way?

Gravity is one of the most mysterious and enigmatic forces we know. It is the force with which we are the most familiar in everyday life and the one which keeps us firmly on the ground. Without gravity the banana skin lying on the pavement would no longer be a hazard. It is the force which has been known to us for the longest time and which has long since been the subject of speculation: what are its origins and what makes it work the way it does?

At the same time gravity is the weakest of the known fundamental forces. Its action only accumulates to produce large effects because there are no "gravitational charges" with different signs which could neutralize one another.

Experiments on the effects of gravity have been carried out in physics for a very long time. Generally speaking the laws that are arrived at through conducting experiments and making observations describe the nature of gravity but as yet have not been able to explain it.

It is one of the great goals of physics to find a way of explaining gravity. It is probable that this goal can only be achieved through a unified consideration of the four fundamental forces. The cross-fertilization of experiment and theory plays a decisive role here. Some theories on the unification of elementary interactions predict deviations from those laws whose validity has so far been accepted, though these deviations are miniscule and could only be proven with enormous technical effort. Experimental research in this field has taken place at ZARM for a great many years. To prove such deviations would have revolutionary implications for our contemporary understanding of the physical world. This makes the investigation of gravity incredibly exciting in those regions that are on the threshold of what is technically possible.

Experimental gravitational physics at the beginning of the 1990s was characterized by an almost euphoric quest for deviations from Newton's inverse-square law $1/r^2$ and thus also for a possible violation of the weak equivalence principle. A violation of the weak equivalence principle, one of the central hypotheses of Einstein's theory of gravitation (the general theory of relativity of 1915) would thus conceivably be the crucial clue as to the great aim in fundamental physical research, namely the unification of the four fundamental interaction forces into a single universal theory.

The weak equivalence principle states that free fall for all bodies (idealized as point masses) is universal, irrespective of their composition, in other words they will always fall in the same way. It was a new analysis of the 1922 von Eötvös torsion balance experiments published in 1986 by Ephraim Fishbach, Carrick Tamadge and associates which provided the decisive impetus for the supposition of a deviation from the equivalence of inertial and gravitational mass. For the authors of this new analysis of these extensive experiments on the universality of free fall, the results of the torsion periods measured for the many different materials which Baron von Eötvös had published had been represented as a function of the respective material-dependent ratio between atomic mass and baryon number. This representation reveals an apparent trend which at that time suggested that neutrons and protons couple differently to the gravitational field, which is what would be expected if the weak equivalence principle were to have been violated. With the startling result yielded by this re-analysis it was quickly conjectured that with high-precision measurements of the free fall behavior of bodies of differing composition in experiments reflecting state-of-the-art technology it would be possible to confirm a violation of the weak equivalence principle. At the time, therefore, it seemed natural to also use the Bremen Drop Tower, immediately after its completion, for carrying out such high-precision experiments testing the free fall behavior of various bodies.

To be able to carry out corresponding experiments which exceed the precision of previous experiments, the differential trajectory of two test masses needs to be determined to at least $10^{-12}$ m to $10^{-13}$ m in a Drop Tower experiment at a drop height of approximately 100 m, corresponding to one per cent of an atomic diameter. From this, other essential pre-requisites for the free fall experiment can be directly extrapolated: during the first second of a total drop time of 4.7 s the two test masses have to be positioned to within a precision of a thousandth of a millimeter (1 µm).

With a positioning imprecision of 1 µm the test masses must also be produced to better than 0.1 µm in all axes and dimensions so as to avoid effects caused by the Earth's inhomogeneous gravitational field which can mimic a violation of the equivalence principle.

This measurement procedure meant the choice of a SQUID-based measurement technique (Superconducting Quantum Interference Device) in which the relative motion of both test masses is inductively determined. The measurement system was developed at the Institute of Solid State Physics at the Friedrich Schiller University of Jena under the direction of Wolfgang Vodel.

Crucial for the use of SQUIDs was to attain the critical temperature of 7.2 Kelvin (approx. –266° C) for the superconductivity of niobium, made possible through the application of special droppable 20 liter helium cryostats (dewars) also developed by the Institute of Solid State Physics at the University of Jena. With a first pair of test masses, still produced from superconducting niobium and a hard lead alloy, it was possible to conduct experiments to a precision better than $10^{-7}$. For the experiments the test masses were located in a vacuum cell which was completely magnetically shielded. With these and subsequent experiments the design of the experimental module was developed for high-precision experiments. Crucial for the carrying out of substantially more precise experiments is the manufacturing of an encasement structure made from Zerodur glass ceramics and of pairs of test masses which takes into consideration the differing expansion coefficients and the operating of the evacuated test chamber at approximately 4 Kelvin, the temperature of liquid helium.

For the manufacturing and coating of the test masses there is a close collaboration with the German national metrology institute PTB in Braunschweig. Frank Löffler's team has been successful in producing hollow cylindrical test masses made from special aluminum alloys, crystalline silicon and platinum iridium alloys which absolutely fulfill the requisite precision in the micrometer range and the necessity for parallelism of all surfaces. The test masses formed as hollow cylinders are positioned inside each other during the experiment so that ideally their centers of gravity coincide to within 1 µm at the beginning of the experiment. The inner cylinder has a diameter of 10 mm and a length of 20 mm; the outer cylinder is correspondingly 34 mm in diameter and 45 mm long. After being manufactured the test masses are given a very thin coating of niobium. The surface layer which superconducts at the low temperatures we obtained in liquid helium serves to suppress the induced magnetic fields. The choice of test masses is determined according to several criteria: whereas on the one hand the largest possible difference in the ratio of baryon number and atomic weight is striven for in a test mass pair, i.e. elements which are as diametrically opposed as possible in the chemical periodic system, on the other hand purely practical aspects need to be taken into consideration regarding their high-precision machining. In particular niobium, which is too soft, proved to be of limited usefulness. Nor can beryllium be used since its machining calls for extreme industrial safety measures.

For the exact positioning of the test masses before running the experiment a positioning system consisting of several electrodes (electrostatic positioning system, EPS) was developed with which the test masses can be moved sufficiently quickly in the micrometer range along all three spatial axes. For this the glass ceramic structures surrounding the test masses are coated with gold, and by means of a laser cutting pro-

cedure the electrodes are removed. The electrodes are deactivated during the free fall before the SQUID measurement begins.

The Drop Tower experiment was developed and set up in close conjunction with two space experiments. The SQUID-based measurement technique is intended for use in a similar form for the STEP mission (Satellite Test of Equivalence Principle) in which it is proposed to test the equivalence principle to a precision of $10^{-18}$. This mission is being headed by the Stanford University W. W. Hansen Laboratory (USA). The intention is for hollow cylindrical test masses to revolve around the Earth on a sun-synchronous orbit with the result that a signal violating the equivalence principle is supposed to occur periodically with the orbital frequency. To avoid systematic errors with a coincidence of signal and orbit frequency the satellite is placed in rotation vertically to its direction of motion for signal modulation. To achieve the necessary experimental precision the satellite needs to be equipped with a high-precision attitude and orbit control system that adjusts the satellite with regard to the sensitive axis, the test masses' axes of symmetry, to a residual acceleration of no more than $10^{-14}$ m/s$^2$.

A second satellite project currently in preparation for an orbital flight in 2014/2015 is the French mission MICROSCOPE (Micro-Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Equivalence). This satellite, too, will fly on a sun-synchronous orbit. Unlike the STEP mission, however, the test masses will be held in position by means of an electrostatic positioning system in a closed-loop control system, and the respective retention force corresponding to the acceleration acting in each case on the test mass will be capacitively measured by means of additional electrodes. With MICROSCOPE it is intended to reach a precision of $10^{-15}$, and ZARM is directly involved in the project with its free fall testing of measuring instruments and with extensive mission simulations. The analysis of the mission data in close co-operation with the French project partners will also partly be carried out at ZARM.

In addition to experiments so far conducted long-term planning even envisages the application of individual atoms as test masses. The eligible techniques here of atomic interferometry and Bose-Einstein condensates (BEC) still require much development before they can permit new records to be achieved in the testing of the equivalence principle. ZARM's involvement here is within the collaborative QUANTUS framework.

Whichever technique is applied in the end, the investigation of gravity is unbelievably exciting and always will be!

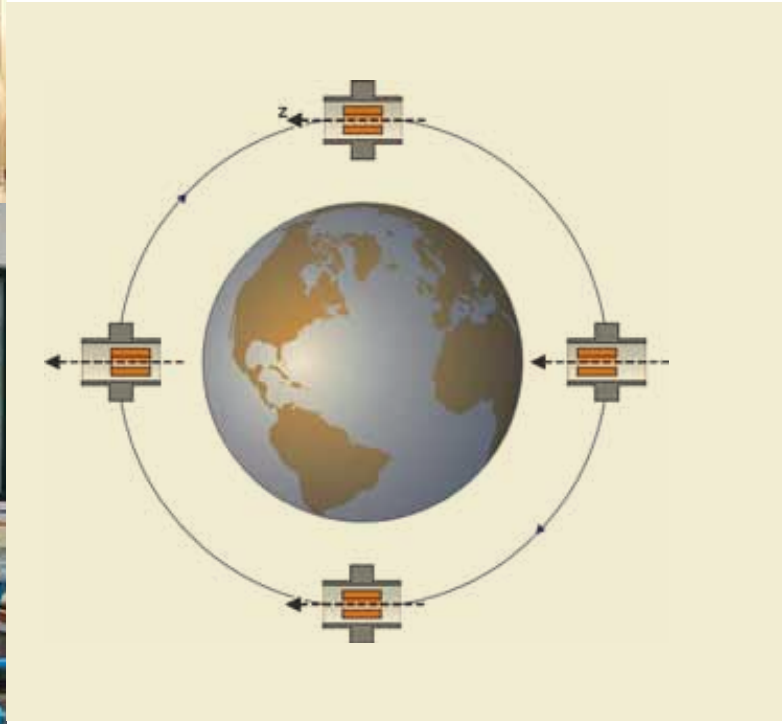
*„Das ZARM hat mich sehr stark beeindruckt mit dem visionären und technisch anspruchsvollen Engineering, das zum Erbauen und zum Betrieb des Fallturms und der Anlagen drumherum nötig war und ist. Dies basierte ganz offensichtlich auf der Ausstrahlung von Prof. Rath, die er in einen unglaublichen Elan seiner Truppe umwandeln konnte. Kurz gesagt: organisatorisch genial und technisch meisterhaft und faszinierend. Ich bin nach wie vor sehr beeindruckt."*

*"ZARM greatly impressed me with its visionary and technically sophisticated engineering which was, and is, necessary for the construction and operating of the Drop Tower and the facilities surrounding it. This was quite clearly down to Professor Rath's charisma which he was able to transform into incredible drive on the part of his team. In a nutshell: organizationally brilliant whilst technically masterful and spellbinding. I remain every bit as impressed."*

**PROF. DR. FRIEDRICH DINKELACKER**
*Professor für Technische Verbrennung an der Leibniz-Universität Hannover; Leiter des Instituts für Technische Verbrennung; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1993 – 1994 Professor of Technical Combustion, University of Hanover; Head of the Institute of Technical Combustion; Research Associate at ZARM from 1993 to 1994*

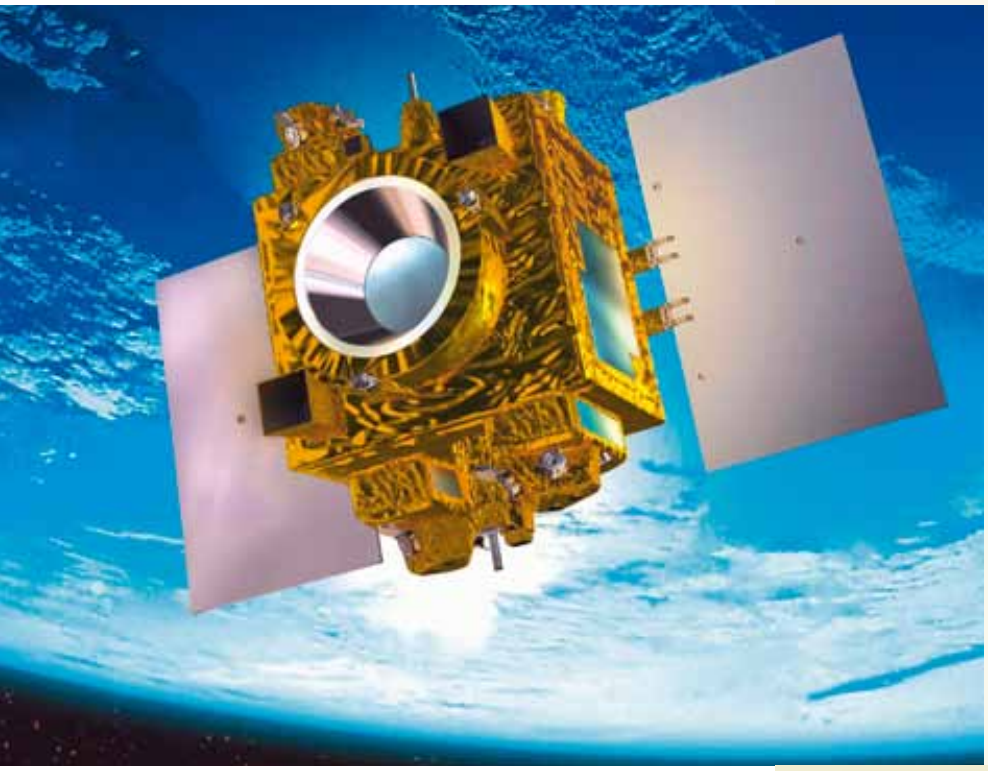
*Wissenschaftler vom ZARM, der Universität Jena, ONERA (Frankreich) und der Stanford University (USA) vor einem Satellitenmodell in den späten 1990er-Jahren. Es besteht seit vielen Jahren eine enge internationale Zusammenarbeit im Bereich der Gravitationsforschung. Das ZARM ist an der Entwicklung von Schlüsseltechnologien beteiligt. Scientists from ZARM, the University of Jena, ONERA (France) and Stanford University (USA) in front of a satellite model in the late 1990s. For many years there has been close international collaboration in the field of gravitational research. ZARM is involved in the development of key technologies.*

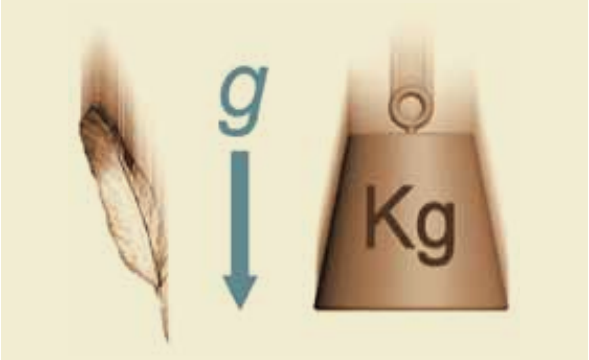
*Fallkapsel mit einem Experiment zum Test des Äquivalenzprinzips. Der technologisch sehr anspruchsvolle Versuchsaufbau ist in einen Vakuum-Behälter integriert, der mit Hilfe flüssigen Heliums gekühlt wird. Die relative Bewegung zweier Testmassen wird mit einer Messtechnik erfasst, die durch den Einsatz von SQUID-Technik extrem kleine Relativbewegungen messen kann. Vor den Freifallexperimenten muss das Kühlgefäß mit dem flüssigen Helium befüllt werden. Drop capsule with an experiment for testing the equivalence principle. The technologically highly sophisticated experimental set-up is integrated into a vacuum container which is cooled with the aid of liquid helium. The relative movement of two test masses is established with a measurement technique that can measure extremely small relative movements through the use of SQUID technique. Before the free fall experiments take place the cooling vessel must be filled with the liquid helium.*




*Bei einem Test des Äquivalenzprinzips im Erdorbit wird die relative Bewegung zweier Testmassen entlang einer definierten Richtung gemessen (gestrichelter Pfeil). Die Testmassen müssen für diese Tests aus verschiedenen Materialien bestehen. Die Abbildung zeigt schematisch nur die Testmassen und nicht den Satelliten, der die Testmassen umgibt. Die Frage, ob im Schwerefeld alle Körper gleich fallen, kann bei Experimenten in einer Erdumlaufbahn mit höchster Präzision beantwortet werden, da Störungen der Messung weitestgehend vermieden werden können. Die restlichen Störungen, die auf den Satelliten einwirken, können durch präzise Bahn- und Lageregelungsmanöver minimiert werden. When testing the equivalence principle in the Earth's orbit the relative movement of two test masses along a defined direction is measured (dotted arrow). For these tests the test masses must consist of different materials. The illustration schematically shows only the test masses and not the satellite surrounding them. The question as to whether all bodies in a gravitational field fall in the same way can be answered with extreme precision in Earth-orbiting experiments since measurement interference can be eliminated to a great extent. Other disturbances which have an effect on satellites can be minimized through precise control maneuvers of orbit and location.*

*Der französische Kleinsatellit MICROSCOPE im Erdorbit (künstlerische Sicht). Das ZARM ist an der Entwicklung und an den Tests der Messinstrumente aktiv beteiligt. Mit MICROSCOPE soll ein neuer Rekord der Genauigkeit bei der Überprüfung des Äquivalenzprinzips erreicht werden. Mit MICROSCOPE kommt die Wissenschaft den Antworten auf die großen Fragen der Gravitationsforschung einen großen Sprung näher. MICROSCOPE wird im Jahr 2014/2015 für ein Jahr die Erde umkreisen und Daten produzieren, die auch am ZARM ausgewertet werden sollen. The French mini-satellite MICROSCOPE orbiting the Earth (artist's impression). ZARM is actively involved in the development and testing of measurement instruments. MICROSCOPE is striving to attain a new record level of precision in testing the equivalence principle. MICROSCOPE brings science a major step closer to answering the great questions of gravitational research and will in 2014/2015 orbit the Earth for a year, producing data which will also be evaluated at ZARM.*






*Dem Äquivalenzprinzip zufolge fallen im Vakuum alle Körper gleich schnell. Gilt das auch, wenn man sehr genau nachmisst? Möglicherweise nicht! According to the equivalence principle all bodies in a vacuum fall at the same speed. But is this still the case if we measure again with the highest precision? Possibly not!*

# Feuer und Flamme – Zündender Umweltschutz

*Dipl.-Ing. Christian Eigenbrod*
*Leiter der Arbeitsgruppe Energy and Propulsion Systems*
*Head of the Group Energy and Propulsion Systems*

TEAM
*Dr. Konstantin Klinkov · Dr.-Ing. Peter Rickmers*
*Dipl.-Ing. Manfredo Reimert · Dipl.-Ing. Frank Giese*
*Dipl.-Techno-Math. Hans-Christoph Ries · Dipl.-Ing. Michael Peters*
*Günther Marks*

Bis heute werden mehr als 90% unseres weltweiten Energiebedarfs durch Verbrennung erzeugt. Die steigenden Bemühungen um den Schutz unserer Umwelt führen dabei auch zur Erforschung und Entwicklung von Treibstoffen, die durch eine verbesserte $CO_2$- Bilanz weniger umweltbelastend sind. Hierzu zählen die Bio-Treibstoffe, wie Biogas, Biodiesel und Methanol. Das ZARM untersucht seit einigen Jahren darüber hinaus auch biosynthetische Kraftstoffe, wie BTL-Diesel und BTL-Kerosin (BTL = biomass to liquid). Im Unterschied zu den Vorgenannten werden diese Treibstoffe nicht aus ölhaltigen Früchten gewonnen, sondern aus allen pflanzlichen Reststoffen. Damit möchte man dem Problem der Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ein Stück weit aus dem Weg gehen. Man stelle sich hierzu nur eine Gemüsetheke im Supermarkt vor, bei der das Obst und Gemüse mitsamt seinen Stengeln und Blättern präsentiert würde. Es bliebe wohl kaum Platz für andere Waren.

Noch deutlicher wird es, wenn man bedenkt, wie wenig des Pflanzenmaterials tatsächlich für die Herstellung von Mehl verwendet wird und wie viel mehr an verwertbaren Bio-Abfällen übrig bleibt.

Zwar besteht Verbrennungsabgas zu weit mehr als 90% aus $CO_2$ und Wasser, den verbleibenden Rest teilen sich aber je nach Verbrennungsführung besonders giftige oder umweltschädliche sogenannte „Minoritäten“, wie Ruß, Schwefelverbindungen und Stickoxide. Speziell Stickoxide, die sowohl am Sommersmog in den Städten, als auch an der Entstehung des sauren Regens maßgeblichen Anteil haben, können ganz unabhängig davon entstehen, ob es sich um fossile Treibstoffe oder solche aus Biomasse bis hin zum solaren Wasserstoff handelt. Sie entstehen einfach aufgrund hoher Temperaturen durch Reaktion der Luftgase Sauerstoff und Stickstoff miteinander. Deren Ausstoß zu reduzieren, ist seit vielen Jahren ein Schwerpunkt der Verbrennungsforschung. Zwar können Katalysatoren das Autoabgas „entsticken“, jedoch kostet dies viel Geld, benötigt zusätzliche Energie zur Herstellung und Entsorgung der Katalysatoren und verbraucht andere wertvolle Ressourcen, wie Platin. Sehr aufwendig wird eine solche Maßnahme bei großen Gaskraftwerken. Und bei Flugantrieben, die ihre Abgase zu allem Überfluss auch noch in den besonders klimarelevanten großen Höhen emittieren, sind Abgaskatalysatoren schlechthin undenkbar. In jedem Fall sind Primärmaßnahmen, die die Entstehung von Stickoxiden verhindern solchen Sekundärmaßnahmen vorzuziehen, die gebildetes Stickoxid wieder zu zerlegen versuchen.

Da die Bildung von Stickoxiden bei Temperaturen oberhalb 1500° C nahezu sprunghaft ansteigt, ist die vielversprechendste Methode schlicht die, derartige Temperaturen zu jeder Zeit und an jedem Ort sicher zu unterschreiten. Zwar scheinen 1.500° C eine sehr hohe

Temperatur zu sein, schmilzt doch Stahl schon bei 1.450° C, jedoch sind tatsächlich für eine natürliche Flamme, wie eine Kerzenflamme, ein Holzfeuer, eine Erdgasflamme oder eine Kohlenstaubfeuerung, Temperaturen unterhalb 1.500° C unerreichbar niedrig. Dass eine Stecknadel in einer Kerzenflamme nicht schmilzt, ist lediglich dem Umstand zu danken, dass die Reaktionszone mit Temperaturen oberhalb 2.000° C sehr klein ist und die Nadel diese Hitze sehr schnell in Bereiche ableiten kann, in denen sie die Wärme gegen die Luft wieder abgeben kann. Gleiches gilt für Brennkammern in Autos, Kraftwerken und Flugtriebwerken, bei denen zum Teil darüber hinaus ausgeklügelte Kühltechnologien angewandt werden müssen.

Wie kann man aber niedrige Verbrennungstemperaturen erzielen? Das ist im Prinzip einfach: Man muss dem Kraftstoff nur soviel Luft beimischen, dass nur ein Teil zur Verbrennung genutzt wird, während der Rest die Flamme kühlt, indem er deren Wärme aufnimmt. So einfach das Prinzip, so schwierig ist dessen technische Umsetzung und sie ist bis heute nur ansatzweise gelungen. Man stelle sich hierzu ein Triebwerk eines modernen Verkehrsflugzeuges vor. Hierin wird die angesaugte Luft im Verdichter auf Drücke bis zu 43 bar verdichtet und dabei auf Temperaturen bis zu 550° C aufgeheizt. In der Brennkammer wird dann Kerosin in diese heiße Luft eingespritzt, bevor das heiße Abgas durch Turbine und Schubdüse entspannt wird. Um die Stickoxidbildung zu unterbinden, muss in der Brennkammer nicht nur die Kraftstoffmenge im Vergleich zur Luftmenge entsprechend niedrig sein, der Kraftstoff muss auch noch vollständig verdampfen und mit der Luft zu einer gleichmäßigen Mischung „verrührt“ werden, bevor das Gemisch brennen darf. Nur ein derart homogenes Gemisch erfüllt die Voraussetzungen, nicht an manchen Stellen zu mager zu sein, um brennen zu können, aber auch nicht zu fett, um für wenig Stickoxid zu garantieren. Leider bringt der Kraftstoffspray soviel Geduld freiwillig nicht auf. Die Kraftstofftropfen zünden in der heißen Hochdruckumgebung nach wenigen tausendstel Sekunden von selbst und verbrennen im ungemischten Zustand mit heißer, stickoxidreicher Flamme.

Will man eine Verbrennungsführung derart gestalten, dass einerseits zu frühe Selbstzündung unterbleibt und dass andererseits eine stabile Verbrennung garantiert wird (für ein Flugtriebwerk ein durchaus wünschenswerter Zustand), dann muss man zunächst sehr genau wissen, was während des Selbstzündprozesses von Tropfen und Sprays physikalisch und chemisch passiert. Mit diesem Wissen können dann Strategien entwickelt werden, wie man ein homogenes mageres Gemisch erzeugen kann, ohne dass es einer zu frühen Selbstzündung unterliegt. Das ZARM erforscht deshalb seit vielen Jahren das Selbstzündverhalten verschiedenster Kraftstoffe mit dem Ziel, die Selbstzündung eines Sprays in einer Maschine numerisch simulieren zu können und damit den Ort der größten Wahrscheinlichkeit für die Selbstzündung weltweit erstmalig vorhersagen zu können.

Ein Einspritzstrahl in einen Zylinder eines modernen Dieselmotors besteht aus rund 100 Milliarden Tropfen. Das ist eine Eins mit elf Nullen und entspricht etwa der Anzahl an Sternen in unserer Milchstraße. In einem wesentlich größeren Flugtriebwerk sind die Tropfen zwar größer, ihre Anzahl ist dennoch noch wesentlich höher. Diese Tropfen zünden nicht isoliert, sondern beeinflussen sich während der Zündung. Kleine Tropfen sind schnell verdampft und fliegen auf anderen Bahnen als große Tropfen. Benachbarte Tropfen bilden zwischen sich schnell ein Brennstoffdampfgemisch niedriger Temperatur, während sie auf der abgewandten Seite weniger Dampf entlassen, dieser aber schneller aufheizt. Kerosin wiederum besteht aus mehr als 100 chemischen Komponenten. Ihre Reaktionsmechanismen beeinflussen sich gegenseitig und selbst wenn sie es nicht täten, Reaktionsmechanismen sind nur für zwei Handvoll dieser Komponenten bekannt. Für die Simulation der Zündung eines einzelnen Tropfens aus einem Stoff mit bekanntem Reaktionsablauf benötigt ein moderner Rechner je nach Umgebungsbedingungen zwischen wenigen Minuten und mehreren Stunden.

Es scheint also so, als müsse der Ingenieur, der an Maschinen so lange probiert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt ist, zwar vielleicht unendlich lange

brauchen, aber in jedem Fall schneller sein als die Forscher des ZARM. Wir wollen zeigen, wie es dennoch geht.

Alles beginnt mit Fallturm-Experimenten an einzelnen Brennstofftropfen. Die Bedingungen der Schwerelosigkeit sind hierzu ideal. Zum einen erlauben sie, Tropfen zu untersuchen, die so groß sind (Anfangsdurchmesser 0,75 mm), dass man sie an einem dünnen Saphirfaden aufhängen kann und sie, derart „verankert“, während des Freifalls der Kapsel mit modernsten Lasermesstechniken untersuchen kann. Zum anderen sind Tropfenflammen in Schwerelosigkeit kugelförmig, und da eine Kugel ausschließlich über den Radius beschrieben wird, können alle Vorgänge längs eines Radius und damit eindimensional beschrieben werden. Wir werden noch sehen, wie viel Aufwand das spart. Drittens können die realen Tropfen eines technischen Sprays einer Maschine mit Durchmessern von wenigen tausendstel Millimetern einer turbulenten Strömung so gut folgen und ist ihre Lebensdauer so kurz, dass die natürlicherweise radiale und damit kugelsymmetrische Verdampfung nur wenig gestört wird. Damit verhalten sich die großen Tropfen im Fallturm-Experiment ähnlich wie die kleinen Tropfen in einer echten Maschine. Lediglich die Zeitskalen der Prozesse sind entsprechend der Größe der Objekte verschieden.

Vor jedem Abwurf der Fallkapsel wird ein Tropfen unterhalb eines elektrisch beheizten Ofens erzeugt und an dem Saphirfaden aufgehängt. Der Ofen ist auf die jeweilige Versuchstemperatur vorgeheizt. Der Ofen und der Tropfen darunter sind in einem Druckbehälter untergebracht, der auf den jeweiligen Versuchsdruck bedrückt ist. Nach dem Ausklinken der Kapsel, im Freien Fall, wird also der Tropfen möglichst schnell in die Heizzelle eingefahren und der Selbstzündprozess mittels Hochgeschwindigkeitskamera und Laser-Interferometer beobachtet. Dabei zünden Kohlenwasserstoffe mitnichten plötzlich zu einer sichtbaren Flamme. Im Gegenteil: Sofort nach Beginn der Verdampfung laufen in der Umgebung die ersten Vorreaktionen ab. Diese produzieren nicht nur zusätzliche Wärme, sondern auch ein schwaches, mit bloßem Auge nicht sichtbares Leuchten am Übergang von Blau zu Ultraviolett. Da diese Reaktionen bereits Verbrennungswärme produzieren, spricht man auch von einer kalten Flamme. Unter bestimmten Bedingungen verbrennt der gesamte Tropfen ausschließlich nach den Mechanismen der kalten Verbrennung. Das Hauptprodukt dieser kalten Verbrennung ist Formaldehyd. Formaldehyd ist ein farbloses, stechend riechendes und äußerst giftiges Gas. In Verbrennungsmaschinen ist dies dennoch ohne Bedeutung, da die nachfolgende heiße Verbrennung mit der bekannten gelben Flamme das Formaldehyd sofort verbrennt. Bei den Versuchen werden die Zeiten bis zum ersten Auftreten der kalten Flamme und bis zur Zündung der heißen Flamme gemessen.

Bei den Stoffen, für die chemische Reaktionsmechanismen vorliegen, werden die Experimente auch parallel simuliert. Bei diesen Rechnungen wird der Reaktionsfortschritt in kleinsten Zeitschritten berechnet. Die Länge eines Zeitschritts richtet sich danach, wie viel passiert. So sind die Zeitschritte in der Anfangsphase relativ lang, während sie zu den Hauptreaktionszeiten nur billiardstel Sekunden betragen können. Für einen einfachen Stoff, wie n-Heptan, werden dabei mehr als 400 einzelne Reaktionen verfolgt. Jetzt kann man sich vorstellen, welchen großen Vorteil die Kugelsymmetrie hat, bei der nur längs eines einzigen beliebigen Radius gerechnet werden muss. Ist Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation erreicht, können wir mit Fug und Recht behaupten, den Prozess in seinen physikalischen und chemischen Dimensionen verstanden zu haben.

Die nächsten Schritte zur Annäherung an einen Spray sind dann dem Computer vorbehalten. Hier werden jetzt Tropfen mit kleinen Anfangsdurchmessern gerechnet, wie sie in realen Maschinen erzeugt werden. Solche kleinen Einzeltropfen sind experimentell nicht untersuchbar. Außerdem zeigen die Simulationen, dass ein einzelner Tropfen in dem großen Luftvolumen der Heizzelle nicht zünden würde, da die Zündverzugszeit länger dauert, als ein zündfähiges Gemisch erhalten bleibt, bevor es sich mit der Luft verdünnt. Deshalb wird die Umgebung im Computer stark verkleinert und entspricht am Ende dem Volumen, das in einem Spray

ein realer Tropfen für sich alleine hätte. Man kann sagen, dass diese Simulationsbedingungen bereits Ähnlichkeit mit einem Spray haben. Allerdings wären im entsprechenden Spray alle Tropfen exakt gleich groß und auch in einem Exakt gleichen Abstand zueinander – ein Zustand, der in einem realen Spray niemals auftritt. Dennoch zeigen Vergleiche zu Experimenten, die am ZARM an realen Sprays im Heißwindkanal durchgeführt werden, schon eine sehr gute Übereinstimmung. Schon jetzt ist die Vorhersage des Zündortes eines Sprays mit guter Genauigkeit möglich.

Der letzte Schritt zum technischen Spray besteht jetzt darin, mit Hilfe kommerzieller Softwarepakete die Bildung eines technischen Sprays in der Strömungsumgebung einer Maschine zu simulieren. Dabei werden nur die Verdampfung der Tropfen und die Tropfenflugbahnen simuliert. Das Ergebnis solcher Simulationen sind Datenreihen, die längs der Tropfenflugbahnen angeben, welche Temperaturen und welche Brennstoff-/Luftkonzentrationen an jedem Ort vorliegen. In der Simulation der Einzeltropfenzündung werden diese Daten benutzt, um die Umgebungsbedingungen während der Rechnung zu verändern. Damit werden die noch fehlenden Wechselwirkungen zwischen benachbarten Tropfen erstmalig berücksichtigt. Rechnet man für möglichst viele Tropfenbahnen jeweils eine Einzeltropfenzündung, erhält man viele Zündorte. Deren Verbindungsfläche ist die gesuchte Ebene der wahrscheinlichsten Sprayzündung. Abschließend können diese Simulationen jetzt wieder mit Experimenten an entsprechenden Versuchsträgern wie dem Bremer Heißwindkanal überprüft werden.

Bleibt das Problem der fehlenden chemischen Reaktionsmechanismen. Tatsächlich wurde dieses Problem zu einem Hauptarbeitsfeld der Verbrennungsforschung des ZARM. Die Lösung, die eigentlich nur der Versuch ist, dieses Problem zu umgehen, besteht darin, zum Beispiel das komplexe Kerosin durch ein Kraftstoffgemisch zu ersetzen, welches lediglich aus Komponenten besteht, deren Mechanismen man kennt. Ein solcher Modellkraftstoff muss sich dann beispielsweise bezüglich seiner Zündzeiten ähnlich verhalten wie der reale Treibstoff. Selbstverständlich müssen die Komponenten der Modellkraftstoffe auch im realen Treibstoff vorhanden sein. So gibt es für einen realen Treibstoff wie Kerosin viele verschiedene Modellkraftstoffe. Beispielsweise einen für die Zündung, einen für die Verbrennung, einen für die Rußbildung, einen für die Stickoxidbildung usw.

Es bleibt ein offenes Arbeitsgebiet für die weltweite chemische Forschung, den Reaktionsfortschritt für weit mehr als zwei Handvoll Kraftstoffe zu erforschen.

## Pollution Control – Ignition!

Up to the present day more than 90 % of worldwide energy production is achieved through combustion. Increasing efforts here to protect our environment are now leading to research and development on fuels with a lower impact on the environment thanks to an improved $CO_2$-balance, including biofuels such as biogas, biodiesel and methanol. Beyond this, ZARM has in recent years been investigating biosynthetic fuels such as BTL diesel and BTL kerosene (BTL = biomass-to-liquid). Unlike the aforementioned these fuels are not derived from fruits containing oils but from vegetable residuals. This is to avoid possible competition between interests in food and energy production. Imagine the vegetable counter of your supermarket presenting fruit and vegetables including their stalk and leaves. There would be barely any space left for other products. The point becomes even clearer when considering how little of the total biomass is actually used to produce flour and how much more utilizable organic waste remains.

Although more than 90 % of combustion exhaust consists of $CO_2$ and water, the remainder is split – depending on the fuel and how the combustion process is controlled – between toxic or environmentally harmful so-called “minorities” such as soot, sulphuric compounds and nitric oxides. The nitric oxides in particular, responsible for summer smog in our cities and acid rain, are generated irrespectively of whether we use

fossil fuels or fuels from biomass or even solar hydrogen. They simply originate from reactions between the air components oxygen and nitrogen at high temperatures. To reduce their emission has been a key concern of combustion research for many years. Although catalytic converters can reconvert nitric oxides from car exhausts this is cost-intensive, needs additional energy for production and proper disposal, and consumes other precious resources such as platinum. To remove nitric oxides from power stations is very complicated and to remove them from aero-engines, which unfortunately release their exhaust at those high altitudes which have a particular bearing on our climate, is completely impractical. In all cases, primary countermeasures that may prevent the formation of nitric oxides are preferred over those that try to dissociate nitric oxides once they have been generated.

As the formation of nitric oxides dramatically increases once temperatures exceed 1,500° C, the simple prevention lies in being sure to avoid these temperatures, at all times and in all places. Although 1,500° C may seem to be a very high temperature – after all steel already starts to melt at 1,450° C – for natural flames like a candle flame, a wood fire, a natural gas flame or a coal dust furnace temperatures below 1,500° C are unattainably low. The fact that a pin does not melt in a candle flame is only because the reaction zone with temperatures above 2,000° C is very small and the needle can rapidly conduct the heat into areas in which it can then release it to the air. The same goes for the cylinder of internal combustion engines, the combustion chambers of power stations and aero-engines which in some cases require additional sophisticated cooling technologies.

But how can low combustion temperatures be achieved? In principle it is easy: you have to add so much air to the mixture that only a small amount is used for combustion, the larger remaining part being used to cool the flame by taking over its heat. Easy in principle, this is hard to accomplish and thus far has only been rudimentarily achieved. Imagine a modern jet engine. The intake air is compressed to a pressure of up to 43 bar and in so doing heated up to 550° C. Kerosene is injected into this hot air in the subsequent combustion chamber prior to releasing the hot exhaust through the turbine and thruster. In order to prevent the formation of nitric oxide, not only must the amount of intake air be sufficiently high, the fuel must also be completely pre-vaporized and “well-stirred” with the air to a homogeneous pre-mixture before it may be allowed to burn. Only such a homogeneous pre-mixture satisfies the requirement of not being in some places too meagre to burn and not being too rich to guarantee low nitric oxide formation in others. Unfortunately a fuel spray is hardly as patient. Fuel droplets ignite in the high-pressure/high temperature environment by themselves after a few thousandths of a second and burn in their non-premixed state in a hot flame rich in nitric oxide.

Aiming for a process preventing premature auto-ignition on the one hand and guaranteeing a stable combustion on the other (as is desirable for an aero-engine) one has to understand in detail what happens physically and chemically during the ignition process of droplets and sprays. With this knowledge strategies may then be developed as to how to generate a homogeneous lean pre-mixture without it being subject to premature auto-ignition. Therefore, for many years ZARM has been investigating the auto-ignition behavior of many different fuels aiming for a numerical simulation of spray ignition to be able to make the world’s first prediction regarding the most probable location of auto-ignition.

The fuel jet of a modern diesel-engine consists of about 100 billion droplets. That is a one with eleven zeros and corresponds to the number of stars in the Milky Way. In a significantly larger aero-engine, the droplets are larger but their number is by far greater. These droplets do not ignite individually but interfere with each other during ignition. Small droplets are quickly vaporized and follow different trajectories from the larger droplets of a spray. Neighboring droplets rapidly generate a rich mixture of low temperature in between each other, while on their outer sides less vapor is released, though heating up more quickly. Kerosene, like other technical fuels, consists of more

than 100 chemical components. Its reaction mechanisms interfere with each other and even if they did not, reaction mechanisms are only known for a handful or two of these components. Depending on the environmental conditions, a modern super computer needs minutes to hours to calculate the ignition of a single droplet with a known reaction mechanism. Thus, it might seem that an engineer trying to experimentally find the optimum solution would take forever but still be quicker than the ZARM scientists. We want to show how it can nevertheless be done.

It all starts with Drop Tower experiments on single fuel droplets, for which microgravity conditions are ideal. Firstly they enable the investigation of droplets so large (initial diameter of 0.75 mm) that they can be suspended to a thin sapphire fiber and, pinned in this way, can be examined applying state-of-the-art laser diagnostic tools. Secondly, droplet flames are spherical in microgravity and as a sphere is exclusively defined by its radius, all processes may be described along an arbitrary radius in one dimension. We shall see how much effort this saves. Thirdly, droplets as small as some thousandths of a millimeter in a real machine can follow the turbulent streamlines very easily. In addition, their lifetime is so short that the radial and thus spherical vaporization is only slightly disturbed. Thus, the large droplets in a in a drop tower experiment behave similarly to the small droplets in a real engine. Only the time scales are different, according to the diameters in question.

In a drop tower experiment a droplet is generated beneath an electrically heated furnace and suspended to the sapphire fiber prior to each capsule release. After release of the capsule the droplet is rapidly moved into a preheated furnace and the vaporization and ignition process is monitored with high-speed cameras and a laser-interferometer. The furnace and the droplet generation assembly below are mounted together in a vessel pressurized to the required level. Hydrocarbons in no way suddenly ignite into a visible flame. On the contrary: initial pre-reactions occur in the vicinity of the droplets' surface immediately after the beginning of vaporization. These reactions not only emit additional heat but also release a very faint glow in the transitional region between blue and ultraviolet, invisible to the naked eye. These reactions are known as "cool flame". In certain circumstances the droplet might be consumed wholly under conditions of cold combustion. The main product of this cold combustion is formaldehyde. This is a colorless, foul-smelling and extremely poisonous gas. In combustion engines, however, this is of no significance as the subsequent hot combustion with the familiar yellow flame will immediately burn the formaldehyde. The goal of the experiments is to measure the time until the first appearance of the cool flame and until hot ignition.

With those fuels where chemical reaction mechanisms are available, the experiments are numerically simulated in parallel. In so doing the reaction progress is broken into smallest time intervals. The duration of a time interval depends on how much happens. Thus, during the initial phase these steps are rather long whereas during the main reaction phase they may be as short as a quadrillionth of a second. For a simple fuel such as n-heptane more than 400 individual reactions are calculated with each time interval. Therefore one can now imagine how great the advantage of spherical symmetry is, calculating only along a single arbitrary radius. Once agreement between experiment and simulation has been achieved we can safely claim to have understood the process in its physical and chemical dimensions.

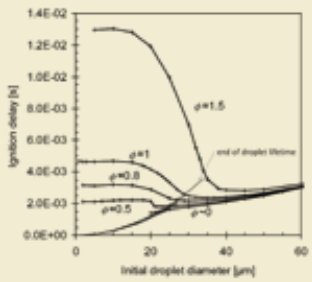
The ensuing steps for approximating a spray are left solely to the computer. Now, droplets with small initial diameters are calculated as they are created in real machines. These can no longer be validated through experiment. The simulations further reveal that a single small droplet would not ignite within the large air volume of the furnace. This is because the induction time to ignition is longer than an ignitable mixture remains present before being dissipated into the air. For this reason, the ambient volume is greatly reduced numerically, finally corresponding to the volume that a real droplet would have on its own. It is fair to say that these conditions already exhibit some similarity to

a spray, even if in such a spray each droplet would have the same size and be equidistant from each other one – a state which never exists in a real spray. However, comparison with experiments on real sprays performed in a hot wind tunnel show a very good correlation. The prediction of the ignition location is already now possible with a high degree of accuracy.

The final step towards a technical spray lies in applying commercial software packages to calculate the spray formation in a real engine. Here only vaporization and the droplet trajectories are simulated. The results are data delivering temperatures and fuel/air concentrations along the droplet trajectories. These data are used within the droplet ignition simulations in order to vary the ambient conditions during the simulation. Here for the first time the missing interaction between neighboring droplets is taken into consideration. Calculating a single droplet for as many trajectories as possible yields many ignition instances. Connecting these ignition points delivers in turn the plane of the most probable spray ignition. Finally, these calculations can be compared with related experiments in the Bremen hot wind tunnel.

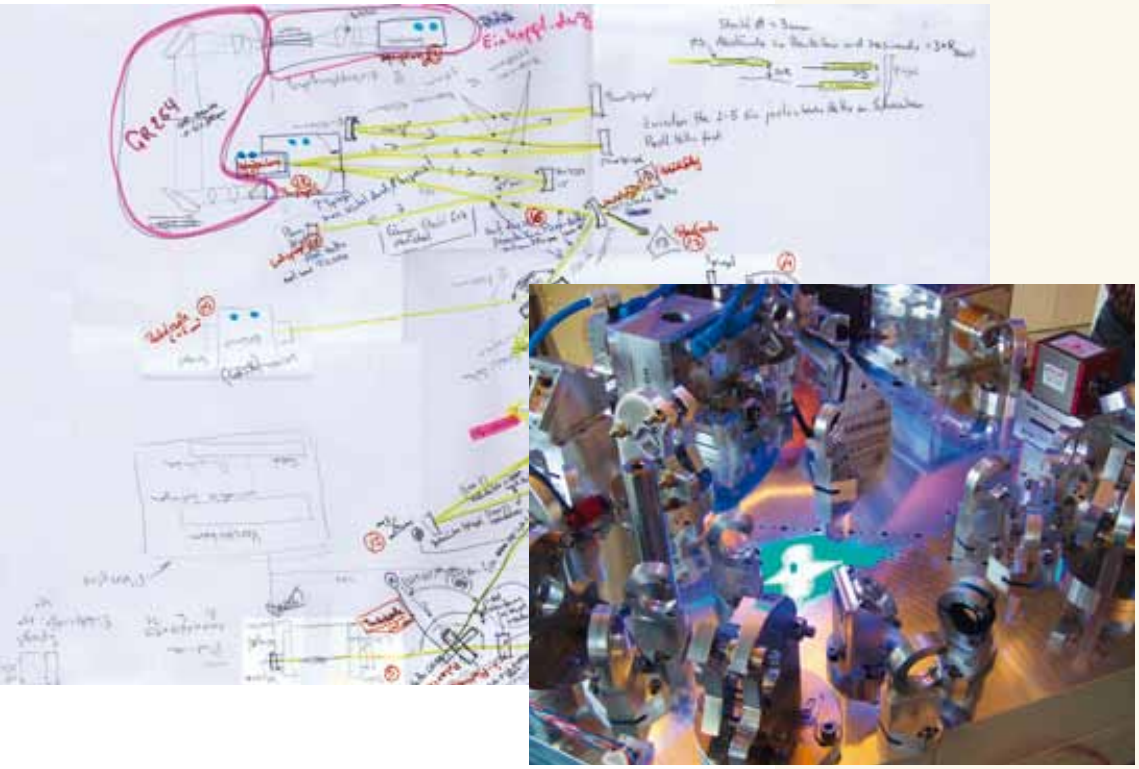
This still leaves the problem of missing chemical reaction mechanisms. Indeed this has become one of the main fields of ZARM's research activities. The solution, which is actually only an attempt to circumvent the problem, is to be found in substituting the complex real fuel by a fuel mixture that consists only of components of known reaction mechanisms. Such a model fuel must behave similarly to the real fuel as far as its ignition properties are concerned. Needless to say, the model fuel components must also be present in the real fuel. This results in different model fuels for each individual problem: one for ignition, one for combustion, another for soot formation and yet another for nitric oxide formation etc. It remains an unresolved issue for worldwide chemical research to investigate reaction mechanisms for at least a handful of pure components.

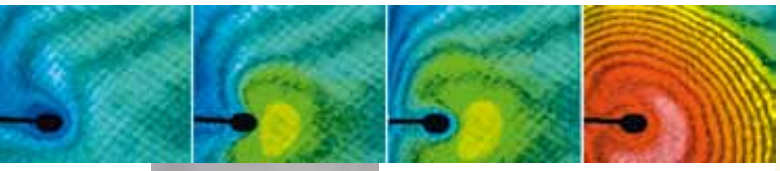
*Proben der technischen Kraftstoffe, für deren numerische Simulation es galt, Modellkraftstoffe zu finden. Testing of technical fuels, for the numerical simulation of which it was necessary to find model fuels.*




*Die Grafik zeigt, dass die Zündverzugszeit einzelner n-Heptan-Tropfen bei gegebenem Druck und Temperatur zunächst kürzer wird, je kleiner ihr Anfangsdurchmesser ist. Ist der Tropfen aber verdampft, ohne gezündet zu haben, so steigt die Zündverzugszeit wieder an. Dies umso mehr, je kraftstoffreicher das Gemisch ist (ϕ = 0 bedeutet: ein Tropfen in einem unendlichen Luftvolumen, ϕ = 0,5 steht für magere Verbrennung, ϕ = 1 bedeutet: genau so viel Luft, wie zur Verbrennung nötig ist, ϕ = 1,5 steht für fette Verbrennung). The graphic shows that the ignition delay time of individual n-Heptane droplets at a given pressure and temperature at first becomes shorter the smaller their initial diameter is. However, if the droplet vaporizes without having ignited then the ignition delay time increases again. This is all the more pronounced the greater the amount of fuel in the mixture (ϕ = 0 means a droplet in an infinite air volume, ϕ = 0.5 represents lean combustion, ϕ = 1 means as much air as is necessary for combustion, ϕ = 1.5 represents rich combustion).*

*Nur ein knappes dreiviertel Jahr später: Fast unverändert wird die Skizze zu einem Prototypen realisiert. Der erste abstimmbar gepulste UV-Scheibenlaser der Welt. Scarcely nine months later: almost without change the sketch is transformed into a prototype – the world's first tunable pulsed UV disk laser.*





*Falschfarben-Interferogramme der Zündung eines n-Heptan-Tropfens. Blau steht für kühl, Rot für heiß. a) Aufheizung und Verdampfung, b) Zündung der kalten unsichtbaren Flamme, c) Brennen der kalten Flamme, d) Zündung der heißen sichtbaren Flamme. False-color interferograms of the ignition of an n-Heptane droplet. Blue represents cool, red stands for hot. a) Heating and vaporization, b) ignition of the cool invisible flame, c) burning of the cool flame, d) ignition of the hot visible flame.*

*Ein Tröpfchen reicht: An einem Saphir-Faden aufgehängt und in heiße Hochdruckumgebung gebracht, erzählt es uns alles, was wir über die Selbstzündung wissen wollen. One droplet suffices. Hanging on a sapphire thread and introduced into a hot high-pressure environment, we can find out everything we want to know about auto-ignition.*

# ZARM-orbital: Navigation auf fremden Himmelskörpern

*Dipl.-Ing. Daniel Bindel*
*Leiter der Arbeitsgruppe Aerospace Control Systems*
*Head of the Group Aerospace Control Systems*

TEAM
*MSc. André Brito · Rüdiger Bruns*
*MSc. Gilberto Arantes Junior · Dr. Ralf Keil*
*MSc. Anantha Komanduri · Dipl.-Ing. Peter Offterdinger*
*Dipl.-Ing. Davide Padeletti*

Die Exploration des Weltraums fasziniert die Menschen seit Langem und fordert Höchstleistungen von Ingenieuren und Raumfahrtagenturen. Nach vielen Missionen, die Landemodule auf dem Mond, dem Mars und sogar dem Saturnmond Titan abgesetzt haben, ist das Wissen über unsere Nachbarn im Sonnensystem enorm gewachsen. Aber auch die Komplexität der Systeme hat zugenommen. Waren es anfangs feste Landeeinheiten, wurden später bereits fahrbare Systeme eingesetzt. Die Mission Pathfinder/Sojourner Mitte der 1990er-Jahre hat hier bereits Maßstäbe in der Kooperation von festen und mobilen Einheiten gesetzt. Auch am ZARM arbeiten wir an der Entwicklung dieser neuen Technologien.

Die Entwicklung hin zu immer komplexer vernetzten Systemen wird vom Bremer RIMRES-Projekt (Rekonfigurierbares Integriertes Mehr-Roboter Explorations-System) aufgegriffen. Neben einem Landemodul mit festem Standort sollen auch kleine Rover zur Erkundung der Umgebung eingesetzt werden. Sie sind mit modularen Boxen bestückt, die zum Beispiel Batterien, Kommunikationssysteme oder wissenschaftliche Instrumente enthalten. Durch die hohe Mobilität dieser Rover soll auch der Aktionsradius um das Landemodul erhöht werden. Boden- und Gesteinsproben können gesucht, eingesammelt und analysiert werden.

Ein Problem ist jedoch die Navigation dieser Rover. Auf Mond oder Mars existiert kein Navigationssystem wie beispielsweise das GPS auf der Erde. Wie also verhindert man, dass sich die Einheiten verirren und nicht zum Landemodul zurückfinden? In der Vergangenheit vertraute man dafür auf die optische Überwachung. So wurde beispielsweise auf dem Mars der Sojourner Rover nur innerhalb der Kamerasichtweite der Pathfinder-Sonde eingesetzt.

Für längere Strecken und bei autonomer Bewegung muss ein Rover allerdings ein eigenes Navigationssystem erhalten. So können die Umdrehungen der Räder gemessen und die Bilder der Bordkamera ausgewertet werden, um den zurückgelegten Weg aufzuzeichnen. Kleine Beschleunigungssensoren geben Auskunft darüber, wie schnell das Fahrzeug in verschiedene Richtungen fährt.

Diese Methoden haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass ihre Genauigkeit mit der zurückgelegten Strecke abnimmt. Selbst kleinste Fehler, wie etwas Schlupf an den Rädern oder Ungenauigkeiten der Beschleunigungssensoren führen durch die Aufsummierung der Einzelmessungen zu immer größeren Abweichungen zwischen der geschätzten und der

wahren Position. Auch die Navigation mittels orbitaler Satelliten ist aufgrund der geringen Häufigkeit der Überflüge keine perfekte Alternative.

Das ZARM hat daher begonnen, spezielle Navigationssysteme für den Einsatz auf anderen Himmelskörpern zu entwickeln. Hierbei werden allerdings noch weitere Randbedingungen berücksichtigt: So sollten die Technologien dazu dienen, eine möglichst autonome Navigation für die mobilen Einheiten bereitzustellen. Eine Hilfe von außen, beispielsweise von der Bodenkontrollstation oder zusätzlicher Infrastruktur, sollte für die Funktionalität nicht notwendig sein. Aufgrund der technischen Funktionsprinzipien der Systeme kann allerdings eine gewisse Abstufung in der Reichweite vorgenommen werden.

Der direkte Nahbereich zwischen zwei Einheiten kann heutzutage bereits autonom von Videosystemen abgedeckt werden. Das Bild der Kamera wird nach optischen Merkmalen durchsucht (wie zum Beispiel Kanten und Ecken). In der Datenbank des Computers existiert ein 3D-Modell des Zieles. Durch einen Vergleich der internen Daten mit dem sichtbaren Bild, kann über Schätzmethoden herausgefunden werden, wie weit der andere Rover entfernt ist und in welche Richtung er gedreht ist. Diese Technologie wird auch eingesetzt, um sich anderen Satelliten oder Raumstationen zu nähern und anzudocken. Je nach Qualität der optischen Systeme und der Sichtverbindung können hier bis zu 100 Meter überbrückt werden.

Für größere Entfernungen, bei denen eine direkte Sichtverbindung durch Steine oder kleine Hügel behindert wird, können nur Systeme mit hochfrequenten Radiowellen eingesetzt werden. Sie durchdringen bis zu einem gewissen Grad Materie, haben eine höhere Reichweite und geringere Anforderungen an die Ausrichtungsgenauigkeit als optische Methoden. Mit einem solchen System können Richtung und Entfernung zwischen zwei Sensoren ermittelt werden. In einem Polarkoordinatensystem ist es mit diesen Informationen dann möglich, die relative Position zwischen den beiden Einheiten zu bestimmen. Am ZARM und am Hochfrequenzlabor der Universität Bremen wird für diese Anwendung ein integriertes REIPOS-System (Relativer Interferometrischer Positionssensor) entwickelt.

Die Idee dieses Hochfrequenzsystems ist das Ausnutzen einer Antennenanordnung auf dem Sensor. Auf der Platine selbst muss die Einstrahlrichtung einer Funkübertragung des Partner-Sensors ermittelt werden. Dies kann jedoch nicht über eine schwenkbare Parabolantenne gelöst werden, da jedes mechanisch bewegte Element Ausfallrisiken birgt (wie zum Beispiel eine Blockade der Lager, Überhitzung der Motoren). Setzt man mehrere Antennen ein, wird ein eintreffendes Radio-Signal von den verschiedenen Antennen eines Antennen-Arrays zu unterschiedlichen Zeitpunkten empfangen. Durch einen Vergleich dieser Signale kann der minimale Zeitversatz zwischen den Antennen ermittelt werden. Aufgrund der Abmessung der Sensoren von etwa 6 bis 8 cm Durchmesser und der Lichtgeschwindigkeit von 300.000 km/s ergeben sich Zeitunterschiede von unter einer milliardstel Sekunde. Nur mit Hilfe von mehreren synchronen Heterodyn-Empfängern (elektrische Schaltung zum Empfang und zur Verarbeitung hochfrequenter elektromagnetischer Signale) kann die Messung des Zeitunterschiedes technisch realisiert und mit Mikrocontrollern weiter verarbeitet werden.

Die Entfernung zwischen den beiden Einheiten wird über die Laufzeit des Signals bestimmt. Auch hier arbeiten zwei Sensoren zusammen; eine Einheit wird als Signalquelle genutzt, eine andere Einheit als Antwortstation, die das Signal wieder zurückschickt. Dabei werden unterschiedliche Frequenzen benutzt, um den Hin- und Rückweg nicht zu stören. Natürlich sind auch solche Hochfrequenzsysteme in ihrer Reichweite und Sendeleistung beschränkt. Daher lässt sich das REIPOS-System bei einem Einsatz in einer modularen Robotermission auch als Kommunikationsknotenpunkt nutzen. Dazu wird es während der Geländeerkundung durch den Rover als Funkfeuer zusammen mit einem Batteriemodul abgesetzt. Der Aktionsradius des Fahrzeuges wird dadurch erweitert und die Datenverbindung zum festen Landemodul aufrechterhalten. Auch der Einsatz mehrerer REIPOS-Sensoren in einem

Gebiet ist unproblematisch, da über Protokolle sichergestellt werden kann, dass es nicht zu Datenkollisionen kommt.

Für sehr großräumige Erforschungen der Planetenoberfläche ist das REIPOS-System allerdings nicht geeignet – es müssten zu viele Funkstationen eingesetzt werden. Für Fahrten über eine Distanz von mehreren Kilometern wird daher ein Sternennavigationssystem entworfen. Mit einer Kamera, einem sogenannten Sternen-Sensor, wird ein Bereich des Himmels beobachtet. Da die Sterne sehr gut vor dem schwarzen Hintergrund zu erkennen sind, kann ihre Position im Kamerabild ermittelt werden. Mittels einer Datenbank wird berechnet, welche Sterne zu sehen sind, in welche Richtung der Sternen-Sensor also blickt. Wird dieses Gerät nun auf dem Rücken eines Rovers befestigt, während dieser über einen kugelförmigen Planeten fährt, ergibt sich direkt die Position des Fahrzeuges durch den Normalenvektor auf der Planetenkugel. Jedoch sind echte Oberflächen durch Berge, Steine und Sandflächen geprägt. Der Rover steht also nicht immer waagerecht. Ein eingebautes Inklinometer misst daher, in welche Richtung das Fahrzeug verkippt ist, um diesen Horizontalen-Fehler rechnerisch zu korrigieren. Aufgrund der technischen Ungenauigkeiten der verfügbaren Sternen-Sensoren und der Inklinometer ergeben sich Fehler von etwa 500 m auf dem Mond oder 2 km auf der Erde. Die Messung und Berechnung ergeben als Ausgabe eine Winkelinformation (Länge und Breite auf der Planetenoberfläche), sodass der Fehler bei größerem Planetendurchmesser ansteigt.
Interessant ist die Analogie zur Schifffahrt: Ähnliche Navigationsmethoden werden dort bereits seit Jahrhunderten angewendet (Nutzung von Sextanten), um über die lokale Horizontalebene und ein Referenzobjekt am Himmel (Sonne oder Sterne) die eigene Position feststellen zu können.

Die oben beschriebenen Technologien können neben dem Einsatz auf fremden Himmelskörpern allerdings auch in anderen Bereichen der Raumfahrt Anwendung finden. Das autonome Erkennen von Mustern und Konturen eines Objektes kann zum Beispiel dazu genutzt werden, um sich einem defekten Satelliten oder einem Trümmerteil zu nähern und daran anzudocken. Bei der heutigen Problematik des Weltraumschrottes ist das ein notwendiger Punkt, um ausgediente Raumfahrtkomponenten aus der Erdumlaufbahn zu entsorgen.

Die kooperative Navigation von vielen Einheiten untereinander, wie sie beim REIPOS-System angedacht wird, kann auch dabei helfen, zukünftige Satelliten-Schwärme zu kontrollieren. Die Entwicklung der letzten zehn Jahre hat gezeigt, dass aufgrund der Preisvorteile immer mehr kleine Satelliten von Universitäten und Hochschulen entwickelt und gestartet werden. Für eine breitere wissenschaftliche Anwendung werden dabei aber auch Überlegungen von Schwärmen und Formationen mit berücksichtigt werden. Zur Feststellung der Satellitenpositionen und Orientierungen innerhalb der Formation und zum Breitband-Datenaustausch kann dazu auch eine weiter entwickelte REIPOS-Technologie verwendet werden. Dies gilt natürlich umso mehr, wenn solche Schwarm-Missionen bei unseren Nachbarkörpern im Sonnensystem durchgeführt werden.

## Navigation on Distant Celestial Bodies

The topic of space exploration has fascinated humankind for several decades and has called for the highest feats on the part of engineers and space agencies. Knowledge about our neighbours in the solar system has drastically increased after several missions that have placed landing modules on the Moon, Mars and even the Saturn moon Titan. Yet the complexity of such systems has also grown. While in the beginning there were only fixed landing units, later on mobile systems came into use. The Pathfinder/Sojourner mission has already set new standards for the co-operation of fixed and mobile units. At ZARM we too have been working on the development of these new technologies.

This development towards increasingly networked systems has been taken up by the Bremen RIMRES (Reconfigurable Integrated Multi-Robot Exploration System) project. Besides a landing module with a fixed position small rovers are also to be used for the exploration of the surrounding area. They are equipped with modular boxes which contain batteries, communication systems or scientific instruments. Due to the high mobility of these rovers, the intention is to enlarge the operating range around the landing module. Soil and rock samples can be searched for, collected and analyzed.

One problem in this scenario, however, is the navigation of these rovers. On the Moon or on Mars there are no global navigation systems like GPS or GALILEO on Earth. How, then, can one avoid units getting lost and not finding their way back to the landing module? In the past, much trust was placed in optical surveillance. For example, the Sojourner rover on Mars was only used within the visual camera range of the Pathfinder probe.

For longer distances and for autonomous movement, a rover must be equipped with its own navigation system. This can be done by measuring the wheel turns or analysing the images from the board camera, to track the path already taken. Small acceleration sensors also give data about the movement and speed of the vehicle in different directions. However, all of these methods have one crucial drawback – their accuracy decreases as the distance covered increases. With every further metre traveled by the rover, the navigation solution becomes less precise. Even small errors like the slip of the wheels on the ground or small errors by the acceleration sensors lead to increasing differences between the calculated and the real position. This is because all of the single measurements are totaled together to compute the full solution. Nor is navigation by orbiting satellites a real alternative as either a great number of satellites must be used or navigation can only be done at very rare opportunities since in the case of a small number of satellites they are not always visible.

Therefore ZARM has started development of specialized navigation systems for application on distant celestial bodies. In this connection other constraints have also been taken into consideration. Thus, the technologies are intended to enable mostly autonomous navigation for the mobile units. Extra help from outside, for example from the ground station or additional infrastructure, should not be required for full functionality. Although based on the technical working principle of the systems, some limitations must, however, be made for the operating distance.

Today the direct close-up range between two units can already be covered by autonomous video systems. The camera image is scanned for optical characteristics (e.g. corners or edges). In the computer database a 3D model of the target exists. By comparison of the internal data with the visible image, the distance and the relative orientation between the two rovers can be figured out by estimation algorithms. This type of technology is also used to approach a satellite or a space station and dock with it. Depending on the quality of the optical systems and the line of sight several dozen, and up to a hundred, meters can be covered by this method.

For larger distances, where a direct line of sight is hindered by rocks or small hills, only systems with high-frequency radio waves can be used. Up to a certain degree these pass through matter and generally have a greater operational range and less stringent requirements regarding alignment precision than optical methods. In principle such a system is able to determine the direction and the distance between two sensors. With this information the relative position between the two units can be calculated in a polar reference system. At the ZARM institute and at the High Frequency Laboratory of the University of Bremen, a small integrated REIPOS (Relative Interferometric Position Sensor) system is currently under development for that specific purpose.

The main idea behind this high frequency system is the utilization of an array of antennas on the sensor surface. The incoming direction of a radio transmission from the partner sensor must be evaluated directly on the sensor circuit board. However, that cannot be solved by a pivoting parabolic antenna because every moving mechanical element carries the possibility of malfunction (e.g. blocking of the bearings, overheating of the motors). But by using multiple antennas a special effect can be used. The incoming radio signal is received by the different antennas at different instances of time. By comparing these signals the minimal time delay between the antennas can still be determined. Due to the physical dimensions of the sensor of approx. 6 to 8 cm diameter and the speed of light of 300,000 km/s the time differences are below one billionth of a second. Only by using multiple synchronous heterodyne receivers can the measurement of the time differences be technically realized. It is later evaluated by a microcontroller.

The distance between the two units is determined by the turnaround time of the signal. For these measurements two sensors have to work together, one unit as a signal source and the other as an answering station that sends back the signal. Two different frequencies are used so as to not disturb each other's forward and return path. Of course such high frequency systems are limited in their operating distances and transmitting power. Therefore the REIPOS system can be used as a communication node in a modular robotic mission. For this functionality it is deployed from a rover during its terrain exploration. Together with a battery module it forms a communication and navigation beacon. The activity range of the vehicles is therefore increased and the communication link to the fixed landing module can be kept live all the time. The application of several REIPOS sensors within a region is also no problem because any data collision can be avoided thanks to the protocol layer. It is an even better idea to place several sensors to increase navigation accuracy and communication routing abilities.

Unfortunately the REIPOS system is not suitable for large-scale exploration of a planetary surface as too many relay nodes would have to be employed. Therefore for rover missions of several kilometers or more a star navigation system has been designed. With a so-called star-sensor a certain area of the sky is observed. Since the stars are clearly visible against the sky's black background their position within the camera image can be determined. By using a database it is possible to calculate which stars are actually seen and therefore in which direction the star-sensor is looking. When this device is now mounted on the back of the rover while it is moving on the surface of a spherical planet, the position of the vehicle is given directly through the normal vector on the planetary sphere. Unfortunately real surfaces are characterized by hills, rocks and inclined areas. The rover does not always stand perfectly horizontally. An integrated inclinometer is therefore used to measure the tilt of the vehicle. Any horizontal error can then be numerically removed from the star-camera result. Due to the technical inaccuracy of the available star-sensors and inclinometers the range of errors is about 500 m on the Moon and 2 km on the

Earth. The measurements and calculations rely on angular information (longitude and latitude on the planetary surface), thus the error increases with higher planetary diameters.

It is interesting to note that these technological methods have already been used for centuries in ocean-going shipping (use of sextants) to determine the current position with the help of the local horizontal plane and a reference object on the sky (Sun or stars).

Besides planetary applications the technologies described above can also be used in other areas of space technology. The autonomous detection of the patterns and contours of another object can be used to approach a malfunctioning satellite or a wreckage and to dock onto them. Given the current problems of dangerous space debris, such technology can be an essential part of a clean-up strategy for lower orbits. Old satellites or rocket parts can be intercepted and brought back towards the Earth's atmosphere for disposal.

Co-operative navigation between a range of units, as is envisaged by the REIPOS system, can also help to control satellite swarms in the future. Developments over the last ten years have resulted in many small satellites being built and launched by universities, since costs have been drastically reduced. For broader scientific applications, ideas for swarm constellations and formations must also be taken into consideration. A further advanced REIPOS technology can be used to determine the position and orientation within such formations and for high data rate communication between the satellites. This becomes even more interesting when these missions are conducted on other celestial bodies in the solar system where no GPS backup exists for determining positions.

*„Das ZARM hat mir das Privileg zugestanden, am Beginn der Entwicklung einer einzigartigen strömungsmechanischen Forschung innerhalb der faszinierenden Umgebung kompensierter Gravitation mitzuwirken."*

*"ZARM gave me the privilege of being involved in the very beginnings of a unique form of fluid mechanics research within the fascinating environment of compensated gravity."*

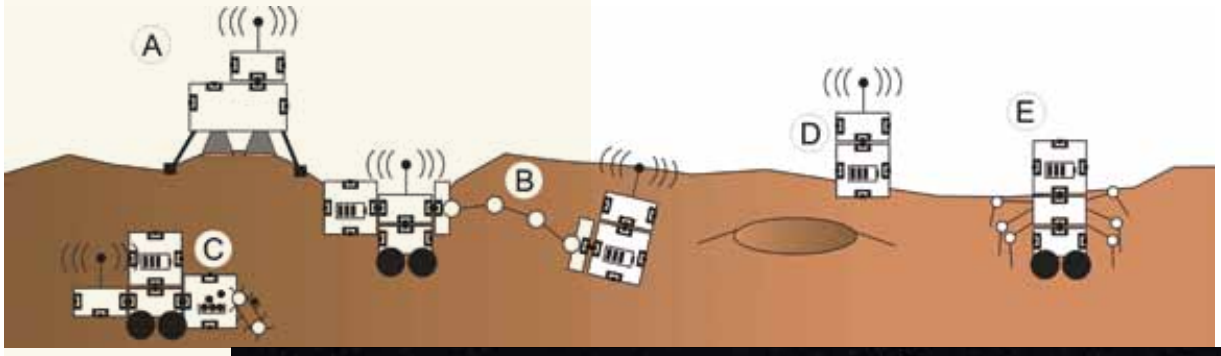
PROF. DR-ING. ANTONIO DELGADO
*Lehrstuhl für Strömungsmechanik der Universität Erlangen-Nürnberg; Mitarbeiter des ZARM 1987 – 1992 Chair of Fluid Mechanics University of Erlangen-Nuremberg; Research Associate at ZARM from 1987 to 1992*

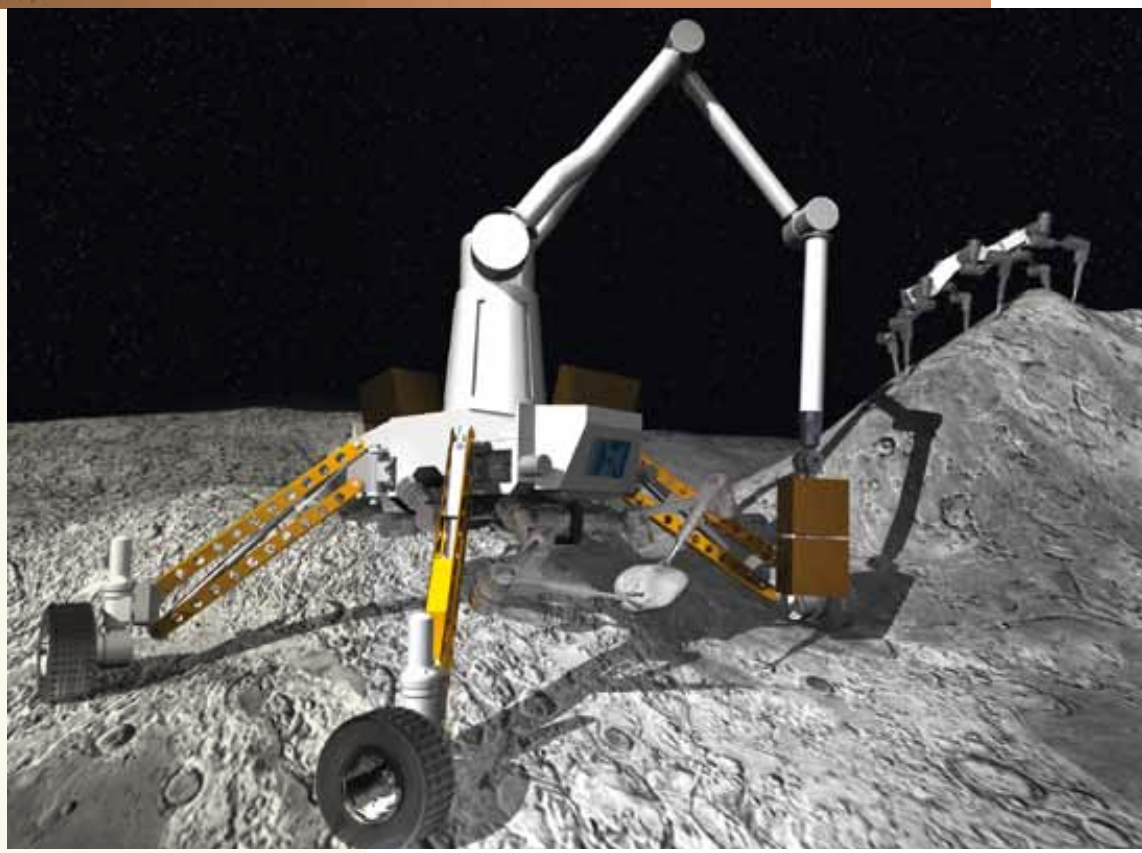
*„Das Vertrauen von Prof. Rath in seine Mitarbeiter gab mir die Freiheit, mich wissenschaftlich voll zu entwickeln. Dies war die beste Startbedingung für meine weitere Arbeit."*

*"The trust placed by Professor Rath in his associates gave me the freedom to develop completely as a scientist. This was the best possible launch pad for my later work."*

PROF. DR. ARZHANG KHALILI
*Max-Planck-Institut für Marine Mikrobiologie, Bremen, Leiter der Gruppe: Mathematische Modellierung und Prof. for Computational Science at the JACOBS University, Bremen; Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1986 – 1991 Max Planck Institute for Marine Microbiology, Bremen, Head of Section: Mathematical Modelling and Professor for Computational Science at the JACOBS University, Bremen; Research Associate at ZARM from 1986 to 1991*

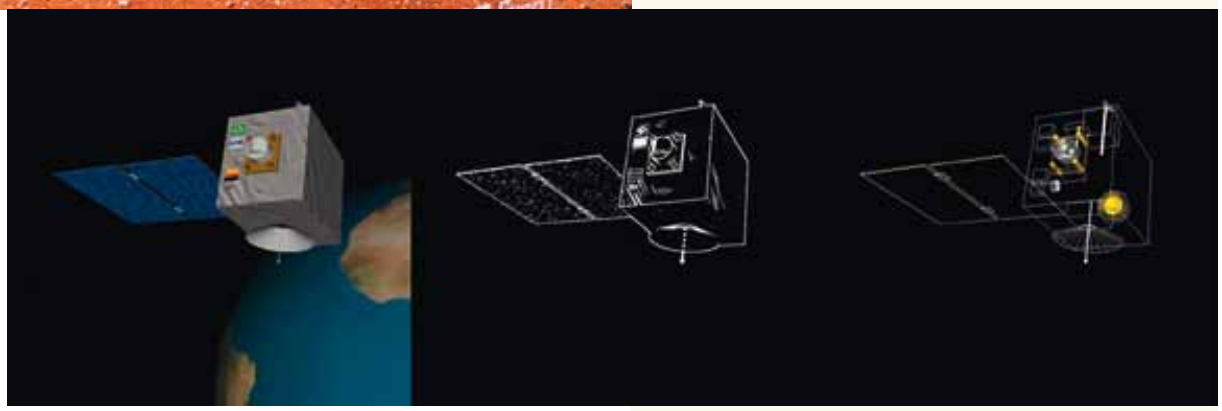
*Grafik: DFKI Deutsches Forschungszentrum für Künsliche Intelligenz GmbH, Robotics Innovation Center Bremen. Drawing: DFKI, Robotics Innovation Center Bremen.*



*RIMRES-Rover bei Absetzen eines zusammengesetzten Nutzlast-Moduls auf dem Mond. Rendering: DFKI, Robotics Innovation Center Bremen. RIMRES-Rover setting down a composite payload module on the Moon. Rendering: DFKI, Robotics Innovation Center Bremen.*

*Sonde Pathfinder und Roboter Sojourner auf dem Mars. Künstlerische Darstellung: NASA. Pathfinder probe and Sojourner robot on Mars, artist's impression: NASA.*



*Verschiedene Phasen der Visuellen Navigation: Kamerabild, Kantenerkennung, Abgleich mit internem 3D-Modell. Various phases of visual navigation: camera picture, edge detection, adjustment to an internal 3D model.*

## Dr. Horst Binnenbruck

*Ehemaliger Leiter der Forschung unter Weltraumbedingungen (bis 2006) in der Deutschen Raumfahrtagentur (DARA/DLR)*

*Former Director of Research under Space Conditions (until 2006) at German Aerospace Center (DARA/DLR)*

Das 20-jährige Jubiläum der Inbetriebnahme des Fallturms ist ein gegebener Anlass, einmal zurückzuschauen auf die Zeit, als die Entscheidung für seinen Bau fiel. Für die bemannte Raumfahrt war es eine schwere Zeit aufgrund der Spaceshuttle-Katastrophe von 1986 mit gravierenden Auswirkungen auf die Forschung unter Weltraumbedingungen. In dieser, für die Forschung unter Weltraumbedingungen geradezu depressiven Phase, reifte bei dem jungen Professor Dr.-Ing. Hans J. Rath die Idee, auch in Deutschland eine bodenständige Versuchseinrichtung für die Forschung unter Weltraumbedingungen zu bauen und zu betreiben. Vorbild waren die weltweit einzigen Freifallversuchseinrichtungen des NASA Lewis-Research-Center.

Schon bald wurde aus dieser Idee ein konkreter Plan, der bei den damaligen Entscheidungsträgern auf fruchtbaren Boden fiel. Das damalige Bundesministerium für Forschung und Technologie, hier ist besonders der damalige Leiter des zuständigen Referats Prof. Dr. Gottfried Greger hervorzuheben, hatte die Finanzierung der technischen Ausrüstung des Fallturms übernommen. Die Sicherstellung der Gesamtfinanzierung des Fallturms Bremen war schon keine leichte Aufgabe, die Realisierung aber war nur dadurch möglich, dass ein vom Pioniergeist beseeltes junges Team sich an die Arbeit machte, auf einer „grünen Wiese“ das zu erstellen, was wir heute feiern. Damit ist die Frage nach den Vätern des Erfolgs wohl eindeutig beantwortet!

Mit der Inbetriebnahme des Fallturms 1990 stand den Wissenschaftlern, die sich am Programm „Forschung unter Weltraumbedingungen“ beteiligten, nunmehr eine schnell zugängliche Versuchseinrichtung mit ausgezeichneter Mikro-g Qualität zur Verfügung. Ein großer Vorteil des Experimentierens im Fallturm ist die „Abschaltbarkeit“ der Schwerkraft für eine kurze Zeit. Die Herausforderung an den Experimentator besteht im Wesentlichen darin, eine geeignete „Antwortfunktion“ des zu untersuchenden Phänomens zu ermitteln und diese messtechnisch zu erfassen. So können unter Umständen auch Phänomene untersucht werden, die sich erst nach längerer Mikro-g Zeit „bemerkbar“ machen. Der 20-jährige Betrieb des Fallturms hat gezeigt, dass das Spektrum der erwarteten Experimentierfelder, von technologischen Erprobungen bis hin zu wegweisenden Experimenten in der Physikalischen Grundlagenforschung, voll und ganz realisiert werden konnte. Der jüngste Erfolg, die Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats unter Schwerelosigkeit, ist hierfür ein überzeugendes Beispiel!

Der Fallturm Bremen hat sich zu einem integralen Bestandteil der Forschung unter Weltraumbedingungen in Deutschland und Europa entwickelt, das ZARM maßgeblich zur Qualitätssteigerung des Programms „Forschung unter Weltraumbedingungen“ beigetragen und damit auch das weltweite Ansehen der Forschung in Deutschland gesteigert.

Die damalige Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten DARA hat in ihrem Grußwort zur Einweihung des ZARM mit Fallturm 1990 die Hoffnung ausgesprochen, dass dem Fallturm ein „großer Erfolg“ beschieden sein möge! Heute wissen wir: Es war nicht nur ein großer Erfolg, sondern auch Vorbild für ein herausragendes, optimistisches Engagement in Forschung und Technik, bei dem neue Wege beschritten wurden. Dem Land Bremen entstand ein neues Wahrzeichen, dem Naturschutzgedanken wurde durch Einbau von Nisthöhlen für Falken Rechnung getragen!

Horst Binnenbruck

The 20th anniversary of the commissioning of the Bremen Drop Tower provides a good incentive to look back to the time when the decision to build it was taken.

Following the Spaceshuttle Challenger disaster in early 1986 manned spaceflight, and thus Research under Space Conditions, went through a difficult time. It was during this depressing phase for space sciences that the idea of the young professor Hans J. Rath to build and operate a ground-based facility for research under space conditions reached maturity. NASA's Lewis-Research-Center in Cleveland, Ohio, with the world's one and only freefall facility, served as the model.

Soon the idea turned into a serious plan and found support with the decision-makers of the time. The former Federal Ministry for Research and Technology – a special commendation goes here to Prof. Dr. Gottfried Greger, head of the responsible department – had to allocate funding for the Drop Tower's technical installations. To ensure the total budget for a drop tower like this was a difficult task and its realization was only possible thanks to a young team endowed with the pioneering spirit to build on the green fields that we are celebrating today.

With the inauguration of the Drop Tower in 1990 scientists who were participating in the program "Research under Space conditions" now had a facility offering quick and easy access and of outstanding microgravity quality. One big advantage of experimenting in a drop facility is that gravity can be switched off for a short time. The scientists' challenge is mainly to find the appropriate step response and to accurately measure it. By doing so even phenomena that normally become noticeable only after longer periods of microgravity can in some cases be investigated.

The twenty years of the Bremen Drop Tower operation have demonstrated that the spectrum of the anticipated fields of interest, from technology testing to ground-breaking fundamental research in physics, has been fully represented. The recent success in generating the first Bose-Einstein condensate in microgravity may be regarded as a further impressive example!

The Bremen Drop Tower has become an integral part of research under space conditions in Germany and Europe, the Center of Applied Space Technology and Microgravity having contributed significantly to the intensified quality of the Research under Space Conditions program and thus also to the worldwide reputation of research in Germany.

During the Drop Tower's inauguration in 1990, the former German Space Agency (DARA) expressed its hope that the Bremen Drop Tower would become a success story! Today we can give the answer: not only has it been a great success but also an example of a remarkable and optimistic commitment into ground-breaking new research and technology.

The city state of Bremen has acquired a new landmark – and environmental conservation was taken into consideration too by providing an eyrie for the resident falcons!

Horst Binnenbruck

## Dr.-Ing. Martin Zell

*Head of ISS Utilisation Department Directorate of Human Spaceflight ESA/ESTEC*

ZARM ist ein weltweit bekanntes Synonym für den Fallturm Bremen, der neben dem Airbus für Parabelflüge, den suborbitalen Raketen Texus, Maxus und Maser und der orbitalen Forschungskapseln FOTON/BION eine unverzichtbare Säule für die Vorbereitung der Forschung auf Langzeitmissionen und besonders Columbus und der Internationalen Raumstation darstellt. Der außerordentlich professionell organisierte Fallturmbetrieb erlaubt perfekte Experimentvorbereitung und -durchführung, welche in vielfacher Hinsicht weltweit einzigartig ist und allseits hohe Anerkennung findet.

Die Forschung am Fallturm trägt somit zur Sicherung des Erfolgs der europäischen Forschung im Weltraum bei und produziert oftmals außergewöhnliche eigenständige Forschungsergebnisse in Wissenschaft und Technologie, die in vielen hochrangigen Journals publiziert werden. Die erfolgreiche Durchführung vieler, durch die ESA geförderte Projekte, die oft in enger Zusammenarbeit mit der Raumfahrtindustrie durchgeführt wurden, hat darüber hinaus wesentlich zur Anerkennung dieser Forschungseinrichtung in der europäischen Bevölkerung beigetragen und wird auch von vielen internationalen Forschungsinstitutionen außerhalb Europas gerne besucht und genutzt. Dies fördert gleichzeitig die internationale Kooperation von Forscherteams, welche ZARM als „ihr“ Mikrogravitationslabor auf der Erde erachten.

Wir danken Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath und seinen Mitarbeitern für die äußerst angenehme und fruchtbare langjährige Zusammenarbeit. Diese Wertschätzung wird auch durch die Aufnahme des Fallturms in die kurze Liste der ESA External Facilities ausgedrückt. Wir wünschen Hans J. Rath, seinen Mitstreitern und den Nutzern am ZARM auch für die Zukunft viel Erfolg.

Mit den besten Wünschen für die Zukunft!

ZARM is globally recognized as synonymous with the Bremen Drop Tower, which, alongside Airbus for parabolic flights, the suborbital rockets Texus, Maxus and Maser and the FOTON/BION orbital research capsules, plays a vital role when it comes to the preparation of research on long-duration missions and particularly Columbus and the International Space Station. The highly professionally organised operations at the Drop Tower allow experiments to be prepared and executed with a perfection which is in many regards globally unique as well as being universally highly acclaimed.

Thus, research conducted at the Drop Tower contributes to the continued success of European space research and frequently produces exceptional independent scientific and technological research findings which are published in a number of high-ranking journals. Moreover, the successful completion of many ESA-sponsored projects, often carried out in close collaboration with the space industry, has significantly contributed to the research institute's degree of recognition among the European population and it is also frequently visited and utilised by many international research institutions from outside Europe. At the same time this promotes international co-operation between research teams who consider ZARM to be "their" microgravity laboratory on Earth.

Our thanks go to Professor Hans J. Rath and his associates for the highly agreeable and fruitful collaboration which we have experienced over many years. This esteem is also reflected in the Drop Tower's inclusion in the ESA External Facilities short-list. We wish Hans Rath, his colleagues and the users of ZARM every continued success. With best regards for the future!

Martin Zell

# Die Versuchseinric

# ZARM Tes

htungen des ZARM

t Facilities

# Der Fallturm Bremen und wie er funktioniert

*Dipl.-Ing. Christian Eigenbrod*
*Technischer Direktor der Fallturmbetriebsgesellschaft mbH*
*Scientific and Technical Head ZARM Drop Tower Operation and Service Company*

ZARM-FAB mbH ZARM DROP TOWER OPERATION AND SERVICE COMPANY
*Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath (Director General)*
*Dipl.-Oec. Peter von Kampen · Dipl.-Ing. Manfred Behrens*
*Dipl.-Ing. Dieter Bischoff · Dipl.-Ing. Andreas Greif*
*Dipl.-Ing. Michael Heseding · Dipl-Ing. Ulrich Kaczmarczik*
*Dipl.-Angl. Birgit Kinkeldey · Dr.-Ing. Thorben Könemann*
*M. A. Caroline Leuenberger · Dipl.-Ing. Torsten Lutz*
*Dipl.-Ing. Simon Mawn · Dipl.-Ing. Fred Oetken · Mikka Pilath*
*Andreas Pommerening · Irina Schön · Dipl.-Ing. Jan Siemer*
*M. A. Christine Steinseifer-Jeske · M. A. Silke Zierenberg*

Lassen wir einen Wassertropfen fallen und beobachten ihn während des Fallens, dann stellen wir fest, dass er nach einem Einschwingvorgang annähernd Kugelgestalt annimmt. Hierfür sorgt die Oberflächenspannung des Wassers, die versucht, dem Tropfen die Form zu geben, die dem energetischen Minimum entspricht – eine Kugel hat bei kleinster Oberfläche das größte Volumen. Wird der Tropfen entsprechend den Fallgesetzen schneller, dann verformt ihn die ruhende Luft, durch die er fällt, zur bekannten Tränenform. Noch besser als bei Wasser kann man dies bei einem flüssigen Bleitropfen beobachten. Blei hat nicht nur die höhere Oberflächenspannung, sondern bleibt durch seine größere Masse und damit seine größere Trägheit auch länger kugelförmig.

Genau das bildete den Hintergrund der ersten Freifalltürme: bereits Ende des 18. Jahrhunderts wurde in Bristol (UK) der erste Turm zur Herstellung möglichst sphärischer Schrotkugeln errichtet. 1782 ließ William Watts flüssiges Blei durch ein Sieb über sechs Stockwerke in die Tiefe tropfen, bevor er sie in einem Wasserbecken auffing. Dieses simple Prinzip zur einfachen Herstellung sehr runder Kugeln verbreitete sich rasch um den Globus. Der Krieg – doch der Vater aller Dinge? Einen Moment lang müssen wir es noch annehmen.

Wie wir wissen, war die Entwicklung der Raumfahrt während und nach dem Zweiten Weltkrieg maßgeblich militärisch begründet. Auch der Mondflug der Saturn-Raketen des Wernher von Braun und seiner Mitstreiter war in erster Linie das Ergebnis eines Wettlaufs der Großmächte USA und Sowjetunion um die Vormachtstellung im All. In diesem Kontext ließ von Braun, zur Unterstützung der Entwicklungen der Raumfahrt, Freifalltürme in Huntsville und Cleveland bauen. Hier testete er die Funktion von Komponenten während ballistischer, antriebsloser, Phasen. Mit wissenschaftlicher Grundlagenforschung hatte er noch wenig im Sinn.

Erst parallel zur Entwicklung des Fallturms Bremen bis zum ersten Abwurf im September 1990 besann man sich auch in den USA auf den Nutzen solcher Anlagen über den reinen Gerätetest hinaus. Heute sind Freifall-Anlagen aus der Forschung unter Weltraumbedingungen nicht mehr wegzudenken. Doch wie funktionieren sie und wofür kann man sie einsetzen?

Betrachten wir zunächst den Begriff „Schwerelosigkeit“ etwas genauer. Die Äquivalenz von schwerer und träger Masse wurde von Sir Isaac Newton im Jahr 1687 postuliert und geht auf Überlegungen Galileo Galileis aus dem Jahr 1636 zurück. Das Äquivalenzprinzip besagt, dass schwere und träge Masse eines Massenpunktes in dem Sinne identisch sein müssen, dass alle Körper, unabhängig von Ihren Eigenschaften wie Form, Größe oder chemische Zusammensetzung im Vakuum auf gleiche Art fallen. Dieses Postulat stellte später auch die Grundlage für Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie dar.

Da die Gravitation damit eine der Masse innewohnende Kraft ist, darf genau genommen auch nicht von „Schwerelosigkeit“ gesprochen werden: Immer dort, wo mit Materie experimentiert wird, verbleiben kleine gravitative Wechselwirkungen, die in Restbeschleunigungen resultieren. Daher spricht man korrekter von Mikrogravitation immer dort, wo man versucht, die Wirkung der Schwerkraft bis nahe 0 zu reduzieren. Wenn Vorgänge „gravitationsabhängig“ sind, bedeutet dies, dass im entsprechenden mathematischen Ausdruck die gravitative Beschleunigung im Nenner steht. Jeder weiß: ein Nenner kann beliebig klein werden, er darf aber nicht exakt 0 sein. Ein Zustand, der natürlich nicht auftritt, ist also auch mathematisch nicht beschreibbar.

Tatsächlich ist das Prinzip des Freien Falls im Vakuum die einzige Möglichkeit, die Erdbeschleunigung zu kompensieren. Hier wird die Erdbeschleunigung nicht ausgeschaltet, aber es wird ihr keine Reaktionskraft entgegen gesetzt und somit kann sie im mitfallenden Bezugssystem nicht festgestellt werden. Vakuum ist deshalb wichtig, da das konstant beschleunigte Freifallsystem mit zunehmender Geschwindigkeit durch die ruhende Luft Reaktionskräfte erführe und mithin abgebremst würde. Das zuvor Gesagte ist dennoch gültig, denn es bleiben kleinste gravitative Wechselwirkungen zwischen den mitfallenden Komponenten eines Experiment-Aufbaus.

Der vertikale Fall wie im Fallturm Bremen ist nicht die einzige Möglichkeit, die Schwerkraft zu kompensieren. Im Gegenteil – Mikrogravitation kann im Erdschwerefeld auf allen denkbaren Vakuum-Freifall-Trajektorien realisiert werden. Das sind zum Beispiel Wurfparabeln, denen Forschungsflugzeuge der NASA, ESA und der japanischen JAXA zu folgen versuchen, aber auch suborbitale Raketen-Flüge, bei denen nach Ausschalten des Antriebs im Vakuum des unteren Weltraums die Wirkung der Schwerkraft stark reduziert ist. Wie stark, hängt von der Gipfelhöhe der Rakete und damit von der Restdichte der Atmosphäre ab, durch die sie „fällt“. Ein Satellit oder eine Raumstation, die man in eine kreisförmige Bahn um die Erde bringt und denen man eine Bahngeschwindigkeit aufprägt, bei der Erdanziehungskraft und Zentrifugalkraft entgegengesetzt gleich groß sind – also die Trägheitskraft die Massenkraft kompensiert – „fallen“ dauerhaft um die Erde. Dies so lange, bis die Bremskräfte der hochreichenden Restatmosphäre sie derart auf ihrer Bahn abbremsen, dass sie in dichtere Schichten eintreten und schließlich in einer Parabelbahn der Erde zustreben. Bei den hochfliegenden Geostationären Satelliten geschieht dies extrem langsam, sodass sie erst nach Jahrhunderten auf die Erde zurückfielen. Eine niedrig fliegende Raumstation muss von Zeit zu Zeit „angeschoben“ werden, um im Orbit zu verbleiben. Es wird klar: ein Satellit, den man auf seiner Kreisbahn anhalten würde, fiele wie die Fallkapsel im Fallturm Bremen senkrecht nach unten. Umgekehrt ist die Fallkapsel nichts anderes als ein Satellit mit einer Bahngeschwindigkeit, die lediglich der Umfangsgeschwindigkeit der Erdoberfläche entspricht und damit nahezu senkrecht nach unten fällt. Nahezu senkrecht, da die Bahngeschwindigkeit im Ausklinkpunkt der Kapsel in 120 m Höhe ein wenig größer ist als am Boden. Erbsenzähler? Dies führt immerhin zu einer Abweichung von 13 mm zum Lot. Das ist dann wichtig, wenn beispielsweise für verbrennungsdiagnostische Versuche ein Hochenergie-Laser von oben in die Kapsel eingespiegelt wird.

Natürlich ist die Experimentierzeit in der fallenden Kapsel kurz im Vergleich zu einem Raumstationsexperiment – für den einfachen Freien Fall im Fallturm Bremen nur 4,74 s. Das scheint wenig. Doch ist es für sehr viele Fragestellungen eine ausreichend lange Zeit. Tatsächlich ist es in jedem Fall eine Frage der Zeitskala, auf der sich das interessierende Phänomen abspielt. Um zum Beispiel des Wassertropfens zurückzukehren, kann man sich leicht vorstellen, dass der Wassertropfen seine Kugelform wesentlich schneller annimmt als ein Honig- oder Öltropfen. Und beim Wassertropfen bleibend, hängt die Zeit bis zur Kugelsymmetrie auch von der Größe des Tropfens ab. Je kleiner das zu untersuchende Objekt ist, umso schneller ändert sich die Gestalt nach „Abschalten“ der Schwerkraft und umso schneller führen dämpfende Einflüsse zum stationären Zustand unter reduzierter Schwerkraft. Hier werden auch die Grenzen eines Fallturms deutlich. Wichtig sind nicht nur die inneren Vorgänge im Unter-

suchungsgegenstand, sondern auch immer die Prozesse an seiner Oberfläche oder, allgemeiner, an einer Grenzfläche. Will man zum Beispiel eine Metallschmelze sehr langsam abkühlen und erstarren lassen, dann müsste man ihr Volumen sehr stark verkleinern, um es im Fallturm untersuchen zu können. Verkleinert man aber zu stark, dann werden die Oberflächeneffekte oder die Effekte, die an der Wand eines Containers wirken, dominant. Dies würde die Ergebnisse unzulässig stark beeinflussen.

Dennoch können Experimente aus dem gesamten Spektrum der physikalischen, chemischen und biologischen Forschung sinnvoll durchgeführt werden. Auch biologisch? Ausdrücklich: Ja. Zwar kann man in 4,74 s Bäume nicht beim Wurzelschlagen beobachten, aber wenn man dies täte und feststellte, dass „gravitaktisches“ Verhalten die Wachstumsrichtung beeinflusst, bliebe immer noch die Frage, warum das so ist. Will man diese Frage beantworten, muss der Wissenschaftler die einzelne Zelle und die Wirkung der Gravitation betrachten. Tatsächlich forschen Wissenschaftler am Fallturm intensiv an Pflanzenzellen, Pilzsporen und einzelligen Lebewesen. Diese Objekte sind derart klein, dass Eigenschaftsänderungen im Freifall innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde beobachtet werden können.

Da es dennoch Experimente gibt, für die eine Ausdehnung der Experimentierzeit eine wesentliche Erweiterung des Forschungsspektrums darstellt, haben die Ingenieure des ZARM in den vergangenen 10 Jahren eine Technologie entwickelt, die es erlaubt die Experimentierzeit bei gleicher Turmhöhe nahezu zu verdoppeln. Sie machen es genauso wie die Nutzer suborbitaler Raketenflüge: Sie werfen die Fallkapsel nach oben, anstatt sie von oben fallen zu lassen. Dabei wird die bis zu 500 kg schwere Versuchskapsel von einem Katapult unterhalb der Abbremskammer, in einer viertel Sekunde auf 170 km/h beschleunigt, in die Vakuumröhre geworfen. Sobald die Kapsel den Beschleuniger verlassen hat, fliegt sie antriebslos auf einer nahezu senkrechten Vakuum-Parabel bis in die Turmspitze und zurück in den Auffangbehälter. Wäre man „Astronaut“ der Fallkapsel, würde man nicht bemerken wie die Kapsel oben langsamer wird, die Flugrichtung sich ändert und sie mit wieder zunehmender Geschwindigkeit zum Boden zurückkehrt. So „bemerkt“ auch das Experiment nichts als eine durchgehende Mikrogravitationszeit von 9,3 s. Dabei darf man nicht den Fehler begehen und an einen Pfeil denken, der von einem Bogen senkrecht nach oben geschossen wird. Der dreht sich kurz nach Erreichen der Gipfelhöhe um und kommt mit der Spitze voran zurück. Dies würde bedeuten, dass die Experimentierzeit nach der Hälfte der Flugzeit durch eine Rotation unterbrochen wäre. Tatsächlich dreht sich der Pfeil aber nur durch die aerodynamische Wechselwirkung mit der Luft. Im Vakuum des Fallturms käme auch der Pfeil mit den Federn voran zum Boden zurück.

Die eigentliche technologische Herausforderung bei der Katapultentwicklung bestand nicht in der Herstellung präziser Zielgenauigkeit, um den Abbremsbehälter zu treffen. Sie bestand auch nicht darin, die Wurfenergie so zu dosieren, dass die Kapsel unter keinen Umständen oben anschlägt. Die besondere Schwierigkeit bestand vielmehr darin, die Kapsel so störungsfrei zu beschleunigen, dass ihr kein Drehimpuls mitgegeben wird und sie aufrecht stehend, mit ihrer Spitze nach unten zeigend, aufsteigt und auch genau so aufrecht wieder unten ankommt. Nur so ist eine sichere Abbremsung des Experiments gewährleistet. Denn quer passt sie weder in den Auffangbehälter noch ist ihre Statik für eine Abbremsung in dieser Lage ausgelegt. Erreicht wurde dies, indem die Kapsel, die einen Durchmesser von 0,8 m hat, nur mit ihrer leicht abgeplatteten Spitze mit einem Durchmesser von 60 mm Durchmesser auf dem Beschleuniger steht. Hierdurch wird das übertragbare Drehmoment in so engen Grenzen gehalten, dass die Kapsel tatsächlich weniger kippt als beim einfachen Fall, bei dem die Kapsel dadurch kippen kann, dass sie, wie ein Glockenklöppel hängend zu einem zufälligen Moment ausgeklinkt wird. Die Fallröhre ist zwar vom umgebenden Betonturm getrennt, da ihr Fundament aber aus technischen Gründen in 13 m Höhe endet, übertragen sich die windinduzierten Turmschwankungen geringfügig auch auf die Fallröhre.

Die Fallkapsel selber ist ein Druckbehälter, in dem der normale Atmosphärendruck gegen ein Vakuum der Fallröhre von weniger als 1/10.000 des Normaldrucks gehalten wird. Für einen „Astronauten“ wäre sie kein lebenswerter Ort – Beschleunigung, wie Abbremsung erfolgen mit rund dem 30-fachen der normalen Erdbeschleunigung. Deshalb stellt die Fallkapsel ein vollständiges Labor dar – mit Experiment, Messtechnik und Experimentsteuerung – lediglich der Laborant ist durch Robotiken und eine Datenübertragung zur Übermittlung von Befehlen, Messdaten und Bildern ersetzt.

Bis zum heutigen Tag fiel die Kapsel mehr als 5.000 Mal durch den Turm: bis zu dreimal täglich, mit mehr als 150 verschiedenen Experimenten von Wissenschaftlern aus 42 Ländern an Bord. Das macht zusammen mehr als 6 ½ Stunden Mikrogravitation mit einer unübertroffenen Qualität von 1 Millionstel der Erdbeschleunigung. Und das alles fehlerfrei. Das ist der Fallturm Bremen!

## The Bremen Drop Tower and How It Works

If we release a droplet of water and observe it during free fall we see after a transient phase that the droplet becomes more or less spherical. This is due to its surface tension trying to shape the droplet to its energetic optimum – a sphere has the smallest surface at largest volume. When the droplet becomes faster the quiescent air through which it falls then deforms the droplet to the familiar teardrop shape. This can be observed even more so with a droplet from liquid lead. Besides having a larger surface tension lead has a greater mass and therefore greater inertia maintaining the spherical shape for longer.

This was precisely the background to the building of the first free fall towers: by the end of the 18th century the first ever drop tower had already been built in Bristol (UK) for the production of spherical lead shot, thus known as the Shot Tower. In 1782 William Watts allowed liquid lead to drip through a sieve over six floors for it then to be caught and frozen in a pool of water. This simple principle quickly spread around the globe. Is war – to quote Heraclitus – the father of all things after all? For the time being we must still assume so.

As we all know, progress in the development of astronautics during and after the second world war had a predominantly military background. Even the Saturn V lunar mission by Wernher von Braun and his associates was first and foremost the result of the battle for space between the great powers of the USA and the Soviet Union during the cold war years. It was in this context that von Braun built the first drop shafts in Huntsville and Cleveland to support space developments. There he tested the functionality of components during ballistic phases with no propulsion. Fundamental research was not at this point what he had in mind.

Only with the development of the Bremen Drop Tower and the release of the first drop capsule in September 1990 did the focus switch, in the USA too, to the use of such installations beyond the testing of equipment. Today research under space conditions cannot be imagined without them. But how do they work and what can they be used for?

Let us start by looking more closely at the term “weightlessness”. In 1687 Sir Isaac Newton postulated the equivalence of heavy and inertial mass. This was based on a consideration of Galileo Galilei going back to 1636. The equivalence principle states that the heavy and inertial mass of a mass-point are identical in the sense that all bodies fall in the same way in a vacuum irrespective of their shape, size or chemical composition. This postulate was the basis of Einstein’s later theory of general relativity.

Since gravity is thus a force inherent to mass, one may not strictly speaking use the word “weightlessness” in connection with matter: whenever dealing with material there will always be small gravitational interactions occurring, resulting in residual accelerations. This is

why we prefer to talk of "microgravity" whenever trying to reduce gravity close to zero. In all cases where phenomena are gravity-related this means that in the mathematical formulation gravity appears in the denominator. Everybody knows: the denominator may become infinitesimally small but never exactly zero. Thus, a state that does not exist in nature cannot be described mathematically either.

In actual fact the principle of free fall in a vacuum is the only way to compensate for the Earth's gravity. Here, the Earth's gravitational acceleration is not eliminated but there is no reaction force to counteract with it and thus it cannot be ascertained in the inertial system. A vacuum is essential as the constantly accelerated free fall system would experience the quiescent air reaction forces at increasing speeds and would thus be decelerated. The aforementioned remains valid, however, as even the smallest of gravitational interactions derived from the co-moving components of the experimental setup still remain.

The vertical drop as in the Bremen Drop Tower is not the only way to compensate for gravity. On the contrary – microgravity can be achieved in any possible vacuum-free-fall trajectory. Examples are the trajectory parabolas which the parabolic flight aircrafts of NASA, ESA and the Japanese JAXA are trying to follow; also in suborbital rocket flights, so-called "sounding-rockets", gravity is strongly reduced after switching off the propulsion system during ballistic flights in the vacuum of lower space. How much it can be reduced depends on the apogee the rocket can achieve and thus on the density of the surrounding residual atmosphere through which it "falls". Finally a satellite or space station launched into a circular orbit around the Earth with a track speed where the Earth's gravity is compensated for by an identical centrifugal force of inverted direction "falls" constantly around the Earth. How long it will do so for depends on the decelerating forces induced by the high reaching residual atmosphere acting until the orbiting object re-enters the denser atmosphere, finally aiming for the ground in a trajectory parabola. With high-flying geostationary satellites it occurs so slowly that it takes centuries until re-entry; a low-flying space-station will need to be given a push every half a year for it to remain in orbit. Now it becomes clear: a satellite stopped on its circular orbit would drop vertically like the Drop Tower capsule; conversely the drop capsule is nothing but a satellite with a track speed as low as the peripheral velocity of the Earth's surface, thus dropping almost vertically. We say almost vertically as the track velocity at the point of release at an elevation of 120 m is slightly larger than at ground zero. Are we splitting hairs here? This does after all lead to a deviation from true vertical of 13 mm. This is important when trying to mirror the beam of a high-energy laser into the falling capsule from behind, for example for research into combustion laser diagnostics.

Of course, the experiment time in the drop vehicle is short compared to a space station experiment. For the simple free fall in the Bremen Drop Tower it amounts to 4.74 s. This seems to be little, but in fact is sufficient to raise a number of individual questions. In all cases it is a matter of the time-scale of the phenomenon involved. To return to the example of the water droplet, it is easy to imagine that the latter achieves its spherical shape much more quickly than one from honey or oil. Sticking with this example, the time until a water droplet achieves sphericity also depends on its size. The smaller the sample the faster it responds after "switching off" gravity and the sooner damping effects lead to the quasi-steady state of reduced gravity. This also demonstrates the limits of a drop tower. Not only are the inner processes of a sample of interest but also surface phenomena, or more generally, interfacial phenomena. If you want to slowly cool down a sample of molten metal to final solidification you must make the sample very small in order to catch up with the Drop Tower's time-frame. However, if you make the sample too small, interfacial effects with the surrounding gas or a crucible become dominant. This would unacceptably influence the results.

Nevertheless meaningful experiments covering the whole spectrum of physical, chemical and biological research can be carried out. Biological experiments too? – absolutely! It may not be possible to monitor

trees growing roots in 4.74 s but if one could and ascertained that "gravitactical" behavior affects the direction of growth, the question as to why this happens would still remain open. To answer this question, scientists need to examine how individual cells are affected by gravity. Indeed, the behavior of plant cells, fungus spores and single cellular organisms such as ciliates has been intensively examined by Drop Tower scientists. These objects are so small that changes in behavior within fractions of a second can be observed during free fall.

As there are some experiments, however, for which the lengthening of microgravity time constitutes a significant improvement to the research field in question, the Drop Tower engineers have worked hard for more than ten years to develop a technology that allows the experiment time in the same tower to be almost doubled. They have done so in the same way as experimenters using sounding rockets: they thrust the drop capsule upwards instead of simply dropping it from above. In the process the vehicle weighing up to half a ton is, within a quarter of a second, accelerated by an enormous catapult from below the deceleration area to 170 km/h into the evacuated tube. As soon as the capsule detaches from the accelerator it flies in free fall on a nearly vertical parabola to the top of the tower and back to ground into the deceleration container. If you were a drop capsule "astronaut" you would not feel the capsule become slower at its apogee, change direction and drop back with increasing velocity. The experiment in turn only "feels" an end-to-end microgravity time of 9.3 s. One should not make the mistake here of imagining an arrow being released vertically upwards by a bow. This turns shortly after arriving at the apogee and drops back with its apex in front. This would mean that the experiment is interrupted by a 180° turn after half of the flight time. However, an arrow only turns due to aerodynamic interaction with air. In the vacuum of the Drop Tower, the arrow would also drop back with its feather-tail in front.

When developing the catapult, the main technological challenge was not in ensuring accuracy in the targeting of the deceleration container; nor was it in safely controlling the catapult's energy to prevent hitting the top end of the vacuum tube. The real difficulty was in accelerating the capsule in such a way as not to induce an angular momentum. It is extremely important to keep the capsule standing upright (with its apex constantly pointing downward). Only then can a safe entry of the capsule into the decelerating polystyrene pellets be ensured. On the slant the vehicle would not fit into the container, nor is it statically designed to withstand this orientation. In the end this was achieved by accelerating the 0.8 m diameter capsule via the 60 mm diameter flattened nose cone only. By doing so the transferable momentum is kept within narrow limits and the capsule in fact tilts less than during a simple drop in which the capsule might tilt as it hangs in the tube like a copper clapper and is released at an arbitrary moment. Even if the tube is detached from the outer concrete tower, since for technical reasons its foundation stops at 13 m elevation, there remains a slight transference of the tower's wind-induced swaying onto the drop tube.

The drop vehicle itself is a pressurized vessel keeping the atmosphere's normal pressure against the surrounding vacuum of 1/10,000 of normal pressure. For an "astronaut" this would be no place to live, neither during dropping nor during catapulting. Acceleration as well as deceleration amount to about 30 times the Earth's gravitational acceleration. Therefore the capsule constitutes a whole laboratory – with experiment, measurement and diagnostic devices and experiment control – and the laboratory assistant being substituted by robotics and a telemetry system for data, commands and images.

With over 150 different experiments carried out up to three times per day by scientists from 42 countries, the capsule has so far traveled through the tower more than 5,000 times. This adds up to more than 6 ½ hours of microgravity with an unsurpassed quality of only one millionth of the Earth's gravitational acceleration – and all error-free. This is the Bremen Drop Tower.

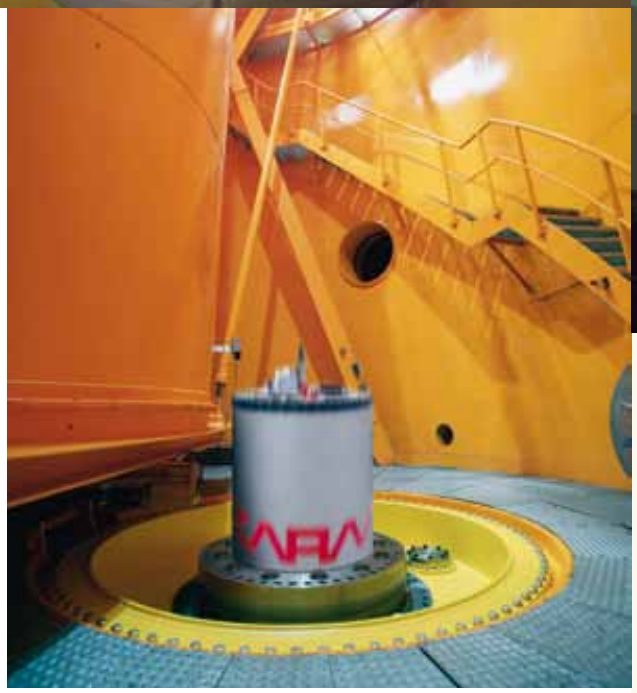
*Im Bild nicht zu sehen, aber für jeden Besucher der Turmspitze faszinierend: Meist scheint die rote Vakuumröhre je nach Wetter mehr oder weniger stark im Turm zu schaukeln. Dabei steht sie still und es ist der Besucher, der mit dem Betonturm im Wind schaukelt. What the picture does not show but what every visitor to the top of the tower finds fascinating – usually the red vacuum tube appears to be swaying to various degrees depending on the weather. In fact it remains still and it is the visitor who is swaying in the wind with the concrete tower.*

*Styropor ist bekanntlich sehr leicht. Um die bis zu 700 kg schwere Kapsel auf 6,5 m Bremsstrecke von 174 km/h auf 0 abzubremsen, benötigt es schon rund 2.000 kg dieser ultraleichten Kügelchen. Polystyrene is known for its lightness. Around 2,000 kg of these ultra-light pellets are needed to decelerate the capsule weighing up to 700 kg from 174 km/h to zero over a braking distance of 6.5 m.*

*Bevor es in den Turm geht, wird die Kapsel in der Integrationshalle druckdicht verschlossen. Before going into the tower the capsule is pressure-tightly sealed in the integration hall.*

*Ein Blick von unten in die evakuierbare Fallröhre auf den Auslösepunkt in 120 m Höhe. View from below into the evacuable drop tube of the point of release at a height of 120 m.*

*Nach jeder Abbremsung ist das Styropor unter der Fallkapsel verdichtet und liegt sehr locker dort, wo die Kapsel herausgezogen wurde. Entsprechend würde die Kapsel beim nächsten Versuch leicht durch den lockeren „Schusskanal" fallen und dann sehr hart abgebremst werden. Daher wird das Granulat nach jedem Versuch durch Umpumpen vergleichmäßigt. Hierdurch wird auch fast aller Staub entfernt, der durch die Reibung bei der Abbremsung entsteht. After each deceleration the polystyrene under the drop capsule is compressed and remains loose where the capsule has been extracted. This would mean the capsule would easily fall through the loose "launch canal" at the next test and then experience a very hard deceleration. Therefore the granules are evened out after each test using a pump. In the process practically all dust which gathers through the friction of the deceleration is removed as well.*



*Mit 170 km/h verlässt die Fallkapsel das Katapult. Links der Abbremsbehälter, der gleich in die Fallachse geschwenkt wird. At 170 km/h the drop capsule leaves the catapult. Left, the decelerating container about to be swung into the drop axis.*

*Bis zu sechs verschiedene Experimentaufbauten können in der Integrationshalle gleichzeitig für den Fallbetrieb vorbereitet werden. Up to six different experimental set-ups can be prepared simultaneously in the integration hall for drop experiments.*

*Der Fallturm braucht keinen Countdown, da nur ein einziges Experiment zu selben Zeit fällt. Günther Marks und Manfredo Reimert beobachten konzentriert die Messwerte, um den richtigen Zeitpunkt zum Auslösen eines Verbrennungsexperimentes abzupassen. The Drop Tower needs no countdown since only one experiment is carried out at a time. Günther Marks and Manfredo Reimert intently study the measurements in order to gauge the right moment to initiate a combustion experiment.*

# Hier geht's rund – die Großzentrifuge am ZARM

*Dipl.-Ing. Holger Oelze*
*Leiter der Arbeitsgruppe Experimental Fluid Dynamics/Hypergravity*
*Head of the Group Experimental Fluid Dynamics/Hypergravity*

MITARBEITER ASSOCIATE
*Henrik Kassai*

Im Jahr 1995 hatten die Wissenschaftler des ZARM eine hervorragende Idee, wie sie die Vielfalt der ihnen zur Verfügung stehenden Versuchsanlagen erweitern könnten. Nachdem sie nun schon jahrelang die Tücken und Geheimnisse der Schwerelosigkeit erforscht hatten und der Bau eines Katapultes sich noch verzögerte, begannen sie, an einer Versuchseinrichtung zu bauen, die es ihnen ermöglichte, in neue Dimensionen vorzudringen. Ziel war es, nicht länger die Schwerkraft zu reduzieren, sondern sie um ein Vielfaches zu erhöhen. Und da sie zugleich auch fleißige Besucher des Bremer Freimarktes waren, kamen sie auf die Idee ein Karussell zu bauen. Die Idee der Zentrifuge war geboren.

Mit Unterstützung des Bremer Senates und der Zentralwerkstatt der Universität nahm so in den Folgejahren das Vorhaben „Groß-Zentrifuge des ZARM" immer konkretere Formen an, sodass schließlich in 2005 neben dem Fallturm ein eigenes Labor für die Zentrifuge in Betrieb genommen werden konnte. Die Zentrifuge war im Vergleich zu anderen Zentrifugen extrem hoch aufgebaut, da auch die 190 cm langen Fallkapseln ohne große Modifikationen in die Zentrifuge eingebaut werden sollten.

Nachdem dann im Folgejahr noch die Steuerung und die benötigte Infrastruktur für die Durchführung von Experimenten fertig gestellt worden war, hätte es eigentlich losgehen können. Aber die Erweiterung des Versuchsparameters Gravitation war bei den Wissenschaftlern sowohl des ZARM als auch extern anfänglich nicht so stark nachgefragt wie erhofft, sodass es erst einmal nur Fahrten zur Inbetriebnahme gab. Da die Wissenschaftler des ZARM aber wie so oft über ihren eigenen Tellerrand hinweg schauten und sich schon immer für Dinge außerhalb des Turmes interessierten, erinnerte man sich, dass es im Bereich der Raumfahrt, besonders aber im Bereich der Luftfahrt Qualifizierungsversuche auf (kleineren) Zentrifugen in Berlin (DLR) und München (IABG) gab. Im Rahmen dieser Versuche müssen die zu zertifizierenden Objekte in allen drei Körperachsen jeweils in beide Richtungen getestet werden, sodass die Komponenten in insgesamt sechs Versuchen qualifiziert werden. Mit der Auseinandersetzung mit den beiden anderen Zentrifugen und dem Wissen um die hervorragenden Voraussetzungen und Möglichkeiten der Bremer Zentrifuge, definierte sich das Geschäftsfeld immer klarer: In den vergangenen fünf Jahren seit der Inbetriebnahme wurden die sicherheitsrelevanten Baugruppen nahezu aller Lieferanten im Bereich der Luftfahrt auf der Zentrifuge getestet. Hierbei reichte die Palette der zu prüfenden Objekte von kleinen Drucksensoren über Einbauten aus dem Galleybereich bis zur kompletten Power Supply Unit von Passagierflugzeugen.

Gleich eine der ersten Anfragen zeigte dem Team die vielfachen Möglichkeiten der Zentrifuge. Aus dem Süden der Republik kam die Anfrage, ob man auch einen sogenannten „Waste Water Tank" für einen Air-

bus A340-600 in der Zentrifuge testen könne. Der Tank hatte ein Fassungsvermögen von 750 l und sollte natürlich gefüllt getestet werden, sodass nach Berechnung aller Bauteile ein Gesamtgewicht von 1080 kg an der Zentrifuge hängen sollte – und das bei einer Beschleunigung von 9 g. Neben dem Gewicht sollte aber auch die Integration in den Zentrifugenraum eine Herausforderung darstellen, da sich die Zentrifuge nicht nur im ersten Stockwerk des Gebäudes befindet, sondern zudem auch noch über einen nur sehr eingeschränkten Zugang mit Hilfe eines Hubtisches verfügt, der das zur Verfügung stehende Volumen erheblich reduziert.

Nachdem der Versuchsaufbau einschließlich des Tanks im Zentrifugenraum aufgebaut, schließlich integriert und mit Wasser gefüllt war, stießen die Entwicklungsingenieure von Airbus hinzu, um den Test zu beobachten. Für alle Anwesenden war es ein nachhaltig imposantes Erlebnis, einen Versuchsaufbau von 208 cm x 178 cm x 138 cm Volumen und einem Gesamtgewicht von rund 1100 kg dabei zu beobachten, wie er mit einer Geschwindigkeit von etwa 26 m/s – also circa einer Umdrehung pro Sekunde – rotierte. Besonders beeindruckt waren die Entwicklungsingenieure, sahen sie doch erstmals, welchen Belastungen die von ihnen entwickelten Komponenten und Systeme während des Qualifizierungsprozesses ausgesetzt werden.

Ein anderer Kunde musste überrascht feststellen, dass die von ihm entwickelten Komponenten bei Weitem nicht der geforderten Qualität entsprachen und bis zur abschließenden Produktreife mehr als einmal in der Zentrifuge getestet werden mussten.

Bei dem Prüfling handelte es sich um einen im Allgemeinen nicht auf den ersten Blick als sicherheitsrelevant erkennbares System: einen Kühlschrank! Allerdings benötigt man nicht besonders viel Fantasie, sich vorzustellen, dass die Evakuierung eines Flugzeuges im Falle eines Crashs in der vorgeschriebenen Zeit ungleich schwieriger ist, wenn sich der Inhalt der Kühlschränke auf die vermeintlichen Fluchtwege verteilt. Deshalb muss sichergestellt sein, dass die Tür sich im Ernstfall nur einen minimalen Spalt öffnet. Bei dem zu testenden Kühlschrank versagte die Tür komplett, sodass sich der gesamte Inhalt des Kühlschranks auf dem Boden verteilte.

Wie in solchen Fällen üblich, fand ein paar Wochen später ein Wiederholungstest mit einem überarbeiteten Modell statt. Das Ergebnis war allerdings unverändert schlecht. Wieder öffnete sich die Kühlschranktür sperrangelweit. Auch die zwei folgenden Versuche brachten keine wesentlich besseren Ergebnisse und schon gar keine Freigabe, sodass der Frust bei unserem Kunden langsam wuchs. Schließlich kamen wir auf die Idee, die Beschleunigung – also auch die Belastung und Kräfte, die auf die Tür wirkten – langsam zu erhöhen, um so besser zu verstehen, was tatsächlich zum Tür-Versagen führte. Der Versuch brachte den lang ersehnten Erfolg: gleich im ersten Ansatz gelang es, die Tür so zu modifizieren, dass der Kühlschrank qualifiziert werden konnte.

Die Zentrifuge dient also nicht nur der Qualifizierung, sondern auch der Bestimmung der Dimensionierungsparameter, um das Design und die Auslegung der Bauteile entscheidend voranzubringen. Eine weitere Stärke der Zentrifuge ist, dass nicht nur die strukturelle Integrität der Komponenten überprüft werden kann, sondern auch deren nachhaltige Funktionsfähigkeit unter entsprechender Belastung. Ausgestattet mit einem Schleifring, der über viele Schnittstellen verfügt, sind der Zentrifuge sowohl bei der Steuerung als auch bei der Beobachtung der Testobjekte nahezu keine Grenzen gesetzt.

Ein Bauteil, bei dessen Test alle Möglichkeiten der Zentrifuge beispielhaft angewandt werden konnten, war eine zweistufige Airbus-Lüftungsklappe, bei welcher der kinematische Ablauf überprüft werden sollte. Die Testeinheit musste erst einmal mit der Flugzeugbordspannung versorgt werden, um dann entsprechend der realen Abläufe angesteuert zu werden. Die Verifikation erfolgte sowohl durch eine Videoaufzeichnung als auch durch eine Vermessung der Bewegungsabläufe.

Durch die sehr gute Ausstattung der Zentrifuge konnte also ein weiteres Bauteil auf eine einmalige Art und Weise qualifiziert werden. Die Zentrifuge hat sich in den letzten fünf Jahren zu einer gefragten Qualifizierungs- und Zertifizierungseinrichtung im Bereich der Luft- und Raumfahrt entwickelt, die in dieser Form kein zweites Mal in Europa existiert.

## Spinning Into Action – the Giant ZARM Centrifuge

In 1995 scientists from ZARM came up with a great way of increasing the range of experimental facilities available to them. Having for years researched into the mysteries and vagaries of weightlessness, and with the construction of a catapult not yet completed, they began to build a test installation which would enable them to move forward into new dimensions. The aim was no longer to reduce gravity but rather to increase it many times over, and being frequent visitors to Bremen's popular Freimarkt fair they hit on the plan of building a carousel. The idea of the centrifuge was born.

In the years which followed and with the backing of the Bremen Senate and the university central workshop facilities, the "giant ZARM centrifuge" project became more and more of a reality, culminating in the opening of a designated laboratory in 2005 alongside the Drop Tower. Compared with other centrifuges this one was built to an extreme height, since the 190 cm long drop capsules were also to be incorporated into the centrifuge without significant modification.

Once the control system and infrastructure necessary for conducting experiments had been completed during the following year, everything was ready to go. However, actual demand for the increase in the experimental parameter of gravitation, both among scientists from ZARM and those from outside, was at that stage less than had been hoped for, which meant that initially only commissioning tests were conducted. But since it had always been characteristic of the ZARM scientists not to be caught up in their own little world, consistently maintaining interests beyond the tower, they remembered that in the field of space technology, and specifically in aeronautics, there had previously been qualification tests in (smaller) centrifuges in Berlin (DLR) and Munich (IABG). The point of these experiments was to test the objects under certification with regard to all three body axes and in both directions, resulting in components being required to undergo a total of six experiments. From the knowledge of both these other centrifuges, and armed with an understanding of the excellent conditions and possibilities offered by the Bremen centrifuge, the business potential became increasingly clearly defined: the last five years since commissioning have seen safety-relevant modules from practically all suppliers within the aeronautical field being tested in the centrifuge. The range of objects under scrutiny has varied from small pressure sensors and galley installations right through to the complete power supply units of passenger aircraft.

One of the very first external requests demonstrated to the team the scope of possibilities which the centrifuge offered. From the south of Germany came an enquiry regarding the feasibility of testing a waste water tank for an Airbus A340-600 in the centrifuge. The tank had a capacity of 750 l and, needless to say, needed to be tested full, which meant that once all structural components had been included in the calculation a total weight of 1,080 kg would have to hang in the centrifuge – with an acceleration of 9g. As well as the consideration of weight, however, the actual integration into the centrifugal area was also to pose a challenge, the centrifuge not only being located on the first floor of the building but also only having very restricted access with the aid of a lifting table which considerably reduces the available volume.

Once the assembly including the tank had been set up in the centrifugal space, then finally integrated and filled with water, design engineers from Airbus arrived to observe the proceedings. For all those present it was a momentous experience, and one which left a lasting impression, to witness an experimental set-up of a volume of 208 cm x 178 cm x 138 cm and with a total weight of around 1,100 kg being rotated at a speed of approximately 26 m/s – that is, around one revolution per second. The impact on the design engineers was particularly great as they saw for the first time the amount of strain to which those components and systems which they had developed were subjected during the certifying process.

Another client was to learn to his surprise that the components which he had developed by no means lived up to the quality required and that they would need to be tested in the centrifuge more than once before being approved for production.

In this case the test item was a unit which one would not normally think of as having safety implications – a fridge to be precise! This said, it does not take much imagination to realize that in the event of a crash it is incomparably more difficult to evacuate an aircraft if its refrigerators have emptied their contents into the path of what are supposed to be the emergency exits! Thus, it must be ensured that in a worst-case scenario a fridge door will open by no more than a minimal gap. The door of the fridge being tested here failed completely, with its complete contents being dispersed onto the ground.

As is usual in such cases the test was repeated a few weeks later with a modified model. But the result was no better than the first time round. Again the fridge door thrust itself wide open. Nor did either of two subsequent attempts bring any significant improvement, let alone certification, and our client's frustration grew correspondingly. Finally we hit on the idea of slowly increasing the acceleration – and thus also the load and forces being applied to the door – so as to better understand what exactly was causing the door to fail. This test yielded the success everyone had been longing for: right at the first attempt it was possible to modify the door such that the fridge could qualify after all.

Thus, the centrifuge not only serves the purpose of certification but also plays a role in determining dimensioning parameters so that the design and construction of components may be significantly enhanced. A further benefit of the centrifuge is its ability not only to investigate the structural integrity of components but also their long-term functionality under corresponding strain. Equipped with a slip ring furnished with a large number of interfaces the centrifuge is subject to virtually no limitations – neither with regard to its control equipment nor to the observation of test objects.

A two-stage Airbus ventilation flap, the kinematic processes of which were to be examined, was an example of a component whose testing exemplified all the possibilities offered by the centrifuge. The test unit first needed to be supplied with on-board aircraft voltages so it could then be controlled according to real events. Verification was accomplished both by means of a video recording and by measuring the sequence of movements involved.

Once again, therefore, it was possible to qualify, in a unique fashion, a component thanks to the excellent features offered by the centrifuge. In the last five years the centrifuge has truly established itself as a much sought-after qualifying and certifying facility in the field of space technology and aeronautics which of its kind is unparalleled in Europe.

*Bis zu 1 Tonne Experimentgewicht rotieren an einem der 6 Meter langen Arme in weniger als 1 Sekunde einmal um den Raum. Die Experiment-Montierung erlaubt es die Orientierung des Testobjektes einfach zu ändern. Up to 1 ton of experimental weight rotates around one of the 6 meter long arms in less than 1 second once around the room. The experimental mounting permits the orientation of the test object to be altered easily.*

*Geschützt gegen den Fall der Fälle beobachtet der Operator (Henrik Kassai) unterhalb der Zentrifuge den Test im Kontrollraum. Protected against all eventualities, operator Henrik Kassai, beneath the centrifuge, observes the test in the control room.*

*Auch ungewöhnlich, aber praktisch: Die zentrale Tragkonstruktion der Zentrifuge wird eingebaut, bevor das Dach gegossen wird (2002). Also unusual but practical: the centrifuge's central supporting structure is installed before the roof is cast (2002).*

*Es gibt gute Gründe, warum die schwere Zentrifuge oberhalb des Kontrollraumes und der Büros installiert ist – einer davon betrifft die Sicherheit. Die vergleichsweise filigrane Kupplung bricht bei Überlastung und schützt den Rotor vor Verdrehung. There are good reasons for installing the heavy centrifuge above the control room and the offices – one of which concerns safety. The relatively filigree coupling breaks when overloaded and protects the rotor from becoming twisted.*

# Wasser, Wind und Sturm

*Dipl.-Ing. Christian Eigenbrod*
*Leiter der Arbeitsgruppe Energy and Propulsion Systems*
*Head of the Group Energy and Propulsion Systems*

TEAM
*Dipl.-Ing. Holger Oelze · Dr.-Ing. Peter Rickmers*

Strömungskanäle spielen in einem Forschungsgebiet, das experimentelle strömungsmechanische Fragestellungen verfolgt, naturgemäß eine große Rolle. So zählen die Strömungskanäle auch im ZARM zu den größten und aufwendigsten Versuchseinrichtungen.

Strömungskanäle dienen in der Forschung zu vielen Zwecken. Allgemein bekannt sind zum Beispiel Windkanäle, in denen die Gestalt von Automobilen im Versuch derart optimiert wird, dass ihr Strömungswiderstand und damit ihr Kraftstoffverbrauch minimiert werden. Gleichzeitig sollen Fahrgeräusche im Innenraum von Fahrzeugen wie auch in ihrer Umgebung reduziert werden, was zum Teil schon im Widerspruch zu vorgenanntem Ziel steht und bereits nach einem Kompromiss verlangt. Auch die Forderung nach guter Straßenhaftung durch höheren aerodynamischen Anpressdruck bei hohen Geschwindigkeiten steht im Widerspruch zum Ziel möglichst geringen Widerstands. Und schließlich möchten auch die Wünsche von Designern und damit letztlich Käufern nach einer gefälligen Form Berücksichtigung finden, die ebenfalls häufig Abstriche an der optimalen Strömungsform bedeuten. Allein an diesem Beispiel wird deutlich, wie vielfältig die Untersuchungsaufgaben und wie divers die Untersuchungsziele sein können.

Tatsächlich sind Windkanäle für die Untersuchung von Automobilen aber auch die einzigen, in denen Modelle in Originalgröße und unter „natürlichen“ Bedingungen getestet werden können. Schon bei Eisenbahnzügen oder gar Gebäudeumströmungen stößt man durch die schiere Größe der Objekte an Machbarkeitsgrenzen und bei Flugzeugen oder gar Raumfahrzeugen sind zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeiten nur so aufwendig zu realisieren, dass die Verwendung mehr oder weniger stark verkleinerter Modelle unumgänglich ist. Könnte man auch das strömende Medium, meist Luft, proportional verkleinern, beispielsweise indem man deren Zähigkeit herabsetzte, wäre die Übertragbarkeit vom kleinen Modell auf das große Original kein Problem. Leider stößt das aber auf enge Grenzen.

Eine Möglichkeit der Anpassung der Gaszähigkeit besteht in der Variation der Gastemperatur. Im Gegensatz zu Flüssigkeiten nimmt die Zähigkeit von Gasen allerdings mit steigender Temperatur zu, sodass man die Luft stark abkühlen muss, um in sogenannten Cryo (Tiefkalt)-Kanälen mit verkleinerten Modellen ähnliche Bedingungen herstellen zu können. Das ist aber nur begrenzt möglich. Eine andere Alternative der Annäherung wird im Wasser-Umlaufkanal des ZARM angestrebt. Zwar ist die Zähigkeit von Wasser wesentlich größer als die von Luft, jedoch kann man deshalb auch die Strömungsgeschwindigkeiten gegenüber dem Original drastisch herabsetzen. Dies bedeutet eine deutliche Reduzierung des apparativen Aufwandes. Ein weiterer Vorteil eines Wasserkanals liegt darin, dass es vergleichsweise einfach ist, die Umströmung von Körpern sichtbar zu machen. So kann man winzige, gasgefüllte Glasperlen in das Wasser bringen, welche die gleiche Dichte wie das Wasser haben, die sinnvoll eingebrachtes Licht streuen können und so die Strömung sichtbar machen. Eine andere Methode besteht darin, durch das Anlegen hoher Spannungen an einen durch den Kanal gespannten Draht, das Wasser zu elektrolysieren und die entstehenden Wasserstoff- und Sauerstoffbläschen zur Strömungssichtbarmachung zu nutzen. Noch ein Weg ist dass Einbringen von Tin-

ten-Fäden, die allerdings nach verhältnismäßig kurzer Zeit den Umlaufkanal vollständig einfärben. Diesen Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass Wasser inkompressibel ist. Damit können Strömungsformen, die sich aufgrund von Druckunterschieden und damit von Dichteunterschieden einstellen, nicht erzeugt werden. Dennoch können in einem Wasserkanal grundlegende Strömungsprobleme untersucht werden, und so erstaunt es nicht, dass am ZARM-Wasserkanal Rotorblätter von Windkraftanlagen genauso untersucht wurden, wie die Wirkung von Klappenkonfigurationen an Airbus-Tragflächen oder die Wechselwirkungen zwischen der Aufhängung eines Flugtriebwerkes mit der Tragfläche des Flugzeuges. Ja sogar Untersuchungen zur aerodynamischen Stabilität von Kraftwerksbrennern wurden am ZARM-Wasserkanal erfolgreich durchgeführt. Es konnte nicht nur gezeigt werden, dass die Nachlaufwirbel in der Strömung eines Drallbrenners sowie deren Periodizität sich im Wasserkanal-Versuch ganz ähnlich darstellen wie in einer Brennkammer, sondern es wurden auch Modifikationen erarbeitet, die den Stabilitätsbereich der Brennerströmung wesentlich erweitern helfen – dies, obwohl wegen fehlender Kompressibilität die thermische Expansion in der Flamme in keiner Weise nachgebildet werden kann.

Buchstäblich heiß her geht es im Heißwind-Kanal des ZARM, der eine vollständig andere Aufgabe verfolgt. Dieser knapp 50 m lange Kanal dient der realitätsnahen Untersuchung der Selbstzündung technischer Brennstoff-Sprays in heißer Hochdruckumgebung. In diesem Kanal werden die Bedingungen im Bereich der Kraftstoffeinspritzung von Brennern in Kraftwerks-Gasturbinen und Flugturbinen oder auch die Einspritzung in Dieselmotoren nachgebildet. Mit seinem Maximaldruck von 50 bar und einer Temperatur von bis zu 700° C realisiert der Kanal nicht nur die Bedingungen aktueller Flugtriebwerke (max. 43 bar), sondern geht über diese noch hinaus und kann so auch noch den Bereich der zukünftigen Entwicklung abdecken. Ziel der Untersuchungen, an denen neben Universitätsinstituten aus dem In- und Ausland auch Unternehmen der Kraftwerkstechnik, der Luftfahrt-Industrie, der Automobil- und Schifffahrtsindustrie beteiligt sind, ist die Erarbeitung von Strategien zur mageren Vormischverbrennung für die stickoxidarme Verbrennung. In Verbindung zu den Untersuchungen, die am Einzeltropfen im Fallturm Bremen durchgeführt werden und den numerischen Simulationen der Tropfen- und Sprayzündung, dient der Kanal damit zur Verifizierung numerischer Simulationen der Sprayzündung. Die hier gewonnen Ergebnisse bilden damit die direkte Schnittstelle zwischen der Grundlagenforschung z. B. am Fallturm und deren Simulationen zur Anwendung in technischen Einrichtungen.

Im Gegensatz zu einem Umlaufkanal ist der Heißwindkanal ein sogenannter blow-down Kanal. Hier wird die Strömung also nicht kontinuierlich hergestellt, sondern der Kanal arbeitet stoßweise und realisiert die gewünschten Strömungsbedingungen nur für eine kurze Zeit. In unserem Fall für maximal 1/10 s. Das klingt nach wenig, ist aber angesichts typischer Zündverzugszeiten im Bereich von wenigen 1/100 s durchaus ausreichend. Den Kanal muss man sich wie eine lange liegende Pressluftflasche vorstellen. Während die ersten 5 m vor dem Ventil (die Versuchsstrecke) kalt bleiben, wird der 40 m lange Speicherteil dieser „Flasche“ elektrisch beheizt. So wird im Kanal heiße Luft gespeichert. Der heiße Teil wird von dem kalten Teil des Kanals durch einen thermisch isolierenden Schieber getrennt. Dieser ist zwar nicht druckdicht, sodass diesseits und jenseits des Schiebers immer der gleiche Druck herrscht, er verhindert aber, dass während der Aufheizzeit die Messstrecke mitgeheizt wird. Sind Versuchsdruck und -temperatur erreicht, wird zu Versuchsbeginn der Isolationsschieber geöffnet. Jetzt besteht freier Durchgang zwischen heißem und kaltem Rohrteil. Anschließend wird das Ventil am Ende des Kanals schlagartig geöffnet. In 5/1.000 s wird hierdurch der 30 cm Querschnitt des Kanals freigegeben – man schlägt der Flasche sozusagen den Hals ab. Jetzt strömt das Gas aus und der Druck im Rohr fällt. Allerdings tut er dies nicht gleichzeitig an jedem Ort des Kanals, sondern zuerst am Ventil. Der Drucksprung läuft dann mit Schallgeschwindigkeit durch das Rohr, wird am Ende reflektiert und läuft zurück in Richtung Ventil. Solange diese Druckstufe unterwegs ist, wie gesagt, maximal 1/10 s, herrschen stromab der Druck-

stufe konstante Strömungsbedingungen mit einem Druck, der dem Ladedruck – reduziert um den Drucksprung – entspricht, einer Temperatur, die der Ladetemperatur, reduziert um die Temperatur infolge der Entspannung im Druckstoß, entspricht, und mit einer Strömungsgeschwindigkeit, die dem Querschnitt der stromab des Ventils eingebauten Düse entspricht. Alle diese Bedingungen werden ähnlich derer eingestellt, wie sie in realen Brennern vorkommen. Das Speicherrohr realisiert also die Bedingungen eines im Original kontinuierlich arbeitenden, großen Kompressors. In diese heiße Strömung wird jetzt der Kraftstoff eingespritzt und in der Messstrecke beobachtet, wann und wo das Spray verdampft und wo es zunächst kalt und schließlich heiß zündet. Hierzu ist es wichtig, dass nur die Luft heiß ist und nicht die Kanalwand. Wäre die Wand heiß, würde jeder Tropfen, der die Wand berührt, instantan zünden und zur Durchzündung des gesamten Sprays führen.

Beeindruckt der Heißwind-Kanal durch seine Größe, die ein eigenes Gebäude erforderlich machte, und durch die Gewalt der gespeicherten Energie, die bei einem gelegentlichen Schuss ohne Schalldämpfer lauthals deutlich wird, so beeindruckt der Hyperschall-Kanal des ZARM schließlich durch die enormen Strömungsgeschwindigkeiten, die mit ihm realisiert werden können. Wenngleich deutlich kleiner als der Heißwind-Kanal, ist er doch ähnlich aufgebaut und funktioniert auch ähnlich. Kein Wunder, stammt er doch vom selben Designer, Prof. Koppenwallner von der Hyperschall-Technologie Göttingen.

Der Hyperschall-Kanal dient der Untersuchung der Umströmung von Raumfahrzeugen während des Wiedereintritts in die Erdatmosphäre. Daher kann er Geschwindigkeiten bis zum 11-fachen der Schallgeschwindigkeit realisieren. Da es sich auch um einen blow-down Kanal nach dem Prinzip des Ludwieg-Rohres handelt, sind die Versuchszeiten ebenfalls nur rund 1/10 s lang. Auch hier wird ein heißes Gas unter einem Druck bis zu 100 bar in einem 24 m langen, in diesem Fall dreimal gewendeten Rohr gespeichert. Zu Versuchsbeginn wird ein Ventil schlagartig geöffnet, sodass das Gas solange unter konstanten Bedingungen durch eine Düse strömt, bis die Expansionswelle durch das gesamte Speicherrohr gelaufen ist, am Ende reflektiert wurde und vorne am Ventil wieder ankommt. Auch diese Welle läuft mit Schallgeschwindigkeit durch das Rohr und die Messzeit ist proportional zur Länge des Rohres. Der Unterschied zum Heißwind-Kanal besteht darin, dass der Kanal an der Austrittsdüse nicht zu Ende ist. Im Gegenteil – hier beginnt der eigentliche Hyperschallbereich. Will man eine Gasströmung bis zur Schallgeschwindigkeit beschleunigen, muss man nur den Querschnitt in einer Düse entsprechend verjüngen. Um über die Schallgeschwindigkeit hinaus zu gehen, muss man die Düse stromab des engsten Querschnitts wieder erweitern. Denn im Überschallbereich verhält sich ein Gas umgekehrt zum Unterschallbereich – erweitert man den Querschnitt, sinkt der Druck und die Geschwindigkeit erhöht sich proportional zum Aufweitungsverhältnis. Eine solche Düse wird Laval-Düse genannt, und wir kennen sie sowohl vom Triebwerksaustritt von überschallschnellen Düsenjägern wie von Raketendüsen, bei denen die Querschnittserweiterung meist Glockenform hat. Am Hyperschallkanal schließt sich die Messstrecke an diese Laval-Düse an. In der Messstrecke wird der Prüfling montiert und die Umströmung wird mittels Hochgeschwindigkeitskameras und Schlieren-Optik aufgezeichnet. Auch die Druckverteilungen auf der Oberfläche des Prüflings, die Informationen über die Kräfte, die auf einen Flugkörper während des Wiedereintritts wirken, werden über Kalibrierbohrungen und schnelle Drucksensoren erfasst. Hinter der Messstrecke schließt sich ein großer evakuierter Kessel an. Der Kessel wird so groß ausgelegt, dass sich sein Druck durch die Gasmenge, die während eines Schusses einströmt nicht wesentlich ändert. Mit Hilfe dieses Kanals wurden während tausenden Versuchen systematisch Formen von Flugkörpern und Klappenkonfigurationen auf der Suche nach der je nach Anwendung optimalen Gestalt untersucht.

## Water, Wind and Storm

For a research institute pursuing issues concerning experimental fluid mechanics, it follows that wind and water tunnel testing facilities should have a major role to play. At ZARM, too, these are therefore among the largest and most complex test installations offered.

Tunnels for testing flow in research serve a number of purposes. Wind tunnels, for example, are commonly known for their use in experimentally optimizing the shape of automobiles such that their drag, and thus their fuel consumption, is minimized. At the same time operating noises inside the vehicle as well as ambient ones should also be reduced, which in part already contradicts the previously mentioned goal and needs a compromise solution. The need for good road grip through high aerodynamic contact pressure at high speeds is also at variance with the goal of achieving the lowest possible resistance. Finally the desire for attractive configurations on the part of designers and not least customers must also be taken into consideration, which also leads to concessions when it comes to optimum flow shape. This example alone illustrates how varied experimental tasks and how diverse experimental goals can be.

Wind tunnels for investigating automobiles are generally speaking the only ones, however, in which models can be tested at their original size and under "natural" conditions. Already when it comes to trains, or even more so for the flow surrounding buildings, the sheer size of the objects in question brings us to the limits of what is feasible; in the case of aircraft, not to mention spacecraft, there is the additional factor that the realization of flow speeds is so complex that the use of scaled-down models, whether to a greater or lesser extent, is unavoidable. If it were simply possible to proportionally reduce the flow medium, usually air, for example by lowering its viscosity, then it would be no problem to apply the results of a scaled-down model to its large original. However, one quickly comes up against major limitations here.

One possibility for adjusting the viscosity of a gas is to vary its temperature. Unlike in the case of liquids, however, the viscosity of gases increases with higher temperatures with the result that the air must be significantly cooled in order to be able to create similar conditions in so-called cryogenic (i.e. very low temperature) tunnels with small-scale models. However, this is only possible to a limited extent. An alternative means of approximation is being researched in the ZARM circulating water tunnel. The viscosity of water may be significantly greater than that of air but it is therefore also possible to drastically reduce the flow speeds as opposed to the original. This means the apparatus can be considerably less complex. A further advantage of water tunnels lies in the fact that it is comparatively easy to make the flow around the test objects visible. Tiny glass beads filled with gas and with the density of water can be added to the water and can reflect appropriately generated light thus making the flow visible. Another method is, by means of applying high voltages to a wire stretched through the tunnel, to electrolyze the water and to use the resulting hydrogen and oxygen bubbles to make the flow visible. Yet another way is to use strands of ink, though these completely stain the water tunnel after a relatively short time. Pitted against these advantages is the disadvantage that water is incompressible. Thus, it is not possible to produce flow configurations that are created as a result of differences in pressure, and therefore differences in density. Nevertheless it is possible to investigate fundamental flow problems in a water tunnel and it is therefore no surprise that rotor blades from wind power plants have been analyzed in the ZARM water tunnel, as have the effects of flap configurations on Airbus wings, or the interactions between the mounting pylon of jet engines on an aircraft and the wings of the aircraft. Indeed it has even been possible to conduct successful experiments in the ZARM water tunnel into the aerodynamic stability of power plant burners. Not only could it be shown that the trailing vortices in the flow of a swirl burner as well as their periodicity produce very similar results in the water tunnel test to those of a combustion chamber but it was also possible to achieve modifications which greatly helped to extend the stability

region of the burner flow – even though lack of compressibility means there is no way of emulating the thermal expansion in the flame.

Things get literally very hot in the ZARM hot wind tunnel which fulfills a completely different function. The purpose of the tunnel, not quite 50 m long, is to realistically investigate the auto-ignition of technical fuel sprays in a hot high-pressure environment. In this tunnel the conditions which prevail in the field of fuel injection of burners in power plant gas turbines and aircraft turbines, or also injection into diesel motors, are emulated. With its maximum pressure of 50 bar and temperatures up to 700°C the tunnel not only realizes the conditions of present-day aircraft engines (max. 43 bar) but goes beyond these and is thus also able to anticipate future developments. The object of these experiments is to develop strategies for a lean premixed combustion for combustion low in nitric oxide emissions; they include the involvement of both German and foreign university institutes, firms from the fields of power plant technology, the aerospace industry and the automobile and shipping industries. In connection with the tests being conducted on single droplets in the Bremen Drop Tower and the numerical simulations of droplet and spray ignition the tunnel thus serves the purpose of verifying the numerical simulations of spray ignition. The results gained here thereby constitute a perfect interface between pure science, e.g. in the Drop Tower, and ways in which it can be simulated for application in technical facilities.

Unlike in a continuous flow tunnel the hot wind tunnel is a so-called blowdown tunnel. This means the flow is not produced continuously but the tunnel works intermittently, realizing the desired flow conditions for a short time only – in our case for a maximum of 1/10 s. This might not sound very much, but in the light of typical ignition delay times in the region of a few 1/100 of a second it is perfectly adequate. The tunnel can best be imagined as being like a horizontally compressed air cylinder. Whereas the first 5 m in front of the valve (the test section) remain cold, the 40 m long storage section of this "bottle" is electrically heated. In this way hot air is stored in the tunnel. The hot section is separated from the cold section of the tunnel by a thermally isolating slide valve. Although this is not pressure-tight, the pressure therefore being the same on both sides of it, it does nevertheless prevent the test section also being heated during the heating-up period. Once test pressure and temperature have been reached, the isolation valve is opened at the beginning of the test. Now there is a free passageway between the hot and cold parts of the tube. Then the valve at the end of the tunnel is abruptly opened. In 5/1,000 s the tunnel's 30 cm cross-section is opened up – the neck of the bottle is chopped off, so to speak. Now the gas escapes and the pressure in the tube drops. However, this does not happen simultaneously everywhere in the tunnel, but first at the valve. The change in pressure then travels at the speed of sound through the tube, is reflected at the end and moves back in the direction of the valve. As long as this pressure level is on the move, as we have said for a maximum of 1/10 s, constant flow conditions are prevalent downstream of the pressure level with a pressure which corresponds to the boost pressure less the change in pressure, with a temperature which corresponds to the loading temperature less the temperature resulting from the easing within the pressure surge, and with a flow velocity which corresponds to the cross-section of the nozzle built in downstream of the valve. All of these conditions are similarly adjusted to those which occur in real burners. Thus, the storage tube replicates the conditions of a large, continuously working compressor as compared with the original. The fuel is now injected into this hot flow and it is observed when and where in the test section the spray evaporates and where it ignites first cold, finally hot. Here it is important that it is only the air which is hot and not the tunnel wall. If the wall were hot, then every drop that touched it would instantaneously ignite and cause the whole spray to catch alight.

If the hot wind tunnel is impressive because of its size which necessitates a building of its own, and because of the sheer force of the energy it stores – which can be highly audible when it occasionally goes off without sound mufflers – then the ZARM hypersonic wind tunnel is ultimately impressive on account of the enor-

mous flow velocities which can be achieved within it. Though significantly smaller than the hot wind tunnel it is nevertheless similarly constructed and functions in a similar way – which is no surprise since both were designed by the same person, Professor Koppenwallner from Hyperschall-Technologie Göttingen.

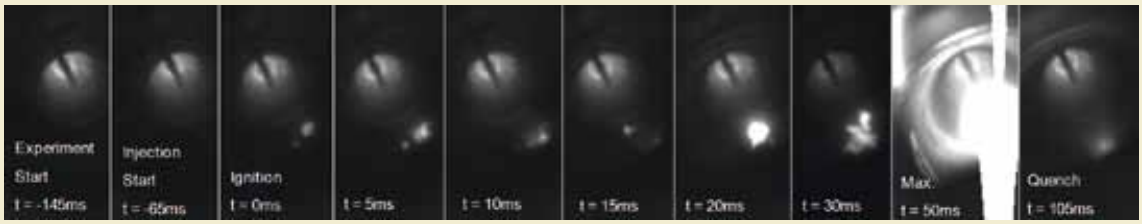
The purpose of the hypersonic tunnel is to investigate the flow surrounding spacecraft on their re-entry into the Earth's atmosphere. Therefore it is capable of achieving velocities of up to 11 times the speed of sound. Also a blowdown tunnel according to the principle of a Ludwieg tube, the test times are equally only around 1/10 s long. Here, too, a hot gas with a pressure of up to 100 bar is stored in a 24 m long charging tube, in this case doubled back on itself twice. At the beginning of the experiment a valve is abruptly opened so that the gas flows under constant conditions through a nozzle until the expansion wave has traveled through the whole charging tube, has been reflected at the end and has arrived back at the front valve. This wave, too, travels through the tube at the speed of sound and the measurement time is proportional to its length. The difference between this and the hot wind tunnel lies in the fact that the tunnel does not end with the exit nozzle. On the contrary – this is where the hypersonic region actually begins. If a gas flow is to be accelerated up to the speed of sound one only has to correspondingly taper the cross-section into a nozzle. To go beyond the speed of sound the nozzle needs to be enlarged again downstream from the narrowest cross-section. This is because gases in supersonic ranges behave inversely from those in subsonic ranges – enlarging the cross-section causes the pressure to drop and the velocity to increase proportionally to the expansion ratio. This kind of nozzle is known as a de Laval nozzle, and we know them from both the engine emissions of supersonic jet fighters as well as from rocket nozzles where the cross-sectional enlargement usually assumes a bell form. In the hypersonic tunnel the test section follows on from this de Laval nozzle. The test object is mounted in the test section and the flow is recorded by means of high-speed cameras and schlieren optics. The pressure distribution over the surface of the test object which contains information on the forces acting on a flying object during re-entry is ascertained through measurement orifices and fast-acting pressure-sensors. Behind the test section is attached a large vacuum chamber. The chamber is large enough to ensure that its pressure does not substantially alter as a result of the amount of gas which flows through during a test. With the aid of this tunnel the forms of projectiles and flap configurations have been systematically investigated in thousands of tests, in each case striving for the optimum shape depending on the application in question.

*„In dieser Zeit wurden meine Kinder Hannes, Lina und Heiko geboren, das Haus in Grasberg entstand, und ich selbst habe, ausgehend vom Fallturm, sehr viele schöne, auch internationale Bekanntschaften geknüpft und Freunde gefunden. Am Ende war das ZARM für mich Sprungbrett in einen schönen und interessanten Beruf."*

*"During this time my children Hannes, Lina and Heiko were born, our house in Grasberg was built and I for my part made a great number of good friends and acquaintances, international ones included, all emanating from the Drop Tower. For me ZARM proved to be a stepping stone to a satisfying and interesting profession."*

PROF. DR. JAN MIDDELBERG
*Professor für Bauphysik und Mathematik, Jade-Hochschule (FH Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth); Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ZARM 1987 – 1995*
*Professor of Building Physics and Mathematics, Jade University of Applied Sciences Wilhelmshaven/Oldenburg/Elsfleth; Research Associate at ZARM from 1987 to 1995*

*High-speed-Aufnahmen aus dem Inneren des Heißwindkanals. Die Blickrichtung ist vom Ende der Messstrecke stromauf. Man erkennt den Injektor (schwarzer Balken) vor dem glühenden Speicherrohr. 65 ms nach Einspritzbeginn (3. Bild von links) ist das erste Mal eine Zündung zu erkennen. Diese Sprayzündung bleibt zunächst auf einen kleinen Bereich lokalisiert und entwickelt sich über 50 ms bis zur heißen Zündung des gesamten Sprays (2. Bild von rechts). Das Spray brennt für weitere rund 50 ms bevor es erlischt. High-speed shots from within the hot wind tunnel, viewed upstream from the end of the test section. The injector (black beam) can be seen in front of the glowing charging tube. The first ignition can be seen 65 ms after the injection start (third picture from left). This spray ignition initially remains localized within a small area and develops over a period of 50 ms up until the hot ignition of the whole spray (second picture from right). The spray burns for approximately a further 50 ms before extinguishing.*




*Der Heißwindkanal des ZARM. Blick stromauf vom Schnellschlussventil (rechts) über die Messstrecke zum 40 m langen isolierten Speicherrohr. The ZARM hot wind tunnel. View upstream from the fast-closing stop valve (right) through the test section to the 40 m long insulated charging tube.*

*Ein Brenner einer Kraftwerksturbine im Wasserkanal. Das Wasser ist mit Wasserstoffbläschen durchsetzt. Ein Laser-Lichtschnitt und eine entsprechend lange Belichtungszeit machen die Strömung sichtbar. Deutlich zu erkennen ist z. B. ein Wirbel, der vom Licht geschnitten wird. In diesem Bereich, in dem die axiale Strömungsgeschwindigkeit reduziert ist, stabilisiert sich die Flamme. Die Versuche dienen unter anderem dazu, zu untersuchen, ob diese Strömungsgebiete stationär sind (erwünscht) oder ob sie sich periodisch bewegen und damit zu einer oszillierenden Verbrennung mit großen Druckschwingungen führen können. A power plant burner in the water tunnel. The water is interfused with hydrogen bubbles. The flow can be visualized by means of a laser light-section with correspondingly long exposure time. A vortex, for example, that is intersected by the light is clearly visible. In this region, in which the axial flow speed is reduced, the flame stabilizes. The tests also aim to investigate whether these flow regions are stationary (as desired) or whether they move periodically and could thus lead to an oscillating combustion with large pressure fluctuations.*

*Der Hyperschallkanal des ZARM. Das 3-fach gewendete Speicherrohr (rechts) endet in einem Schnellschlussventil. Daran schließt sich die Laval-Düse an, die das heiße Gas in den Hyperschallbereich (> Ma = 5) entspannt. Hieran schließt sich die Messstrecke an, die über eine Schlieren-Optik die Stoßwellen bei der Umströmung des Prüflings sichtbar macht. Nach der Messstrecke ist der Vakuumkessel angeordnet, der für konstante Bedingungen während des Versuchs sorgt. The ZARM hypersonic wind tunnel. The charging tube, twice doubled back on itself (right), ends with a fast-closing stop valve. A de Laval nozzle is attached which releases the hot gas into the hypersonic region (> Ma = 5). Here the test section begins, with the shock waves resulting from the flow around the test object visible thanks to schlieren optics. The test section is followed by the vacuum chamber which ensures constant conditions for the duration of the test.*

*Schlieren-Aufnahme des Stoßwellen-Systems bei der Umströmung eines Doppelkegels bei 9-facher Schallgeschwindigkeit. Die Bereiche, in denen die Stoßwellen eng an der Kontur anliegen sind nicht nur großen Kräften, sondern auch sehr hohen Temperaturen ausgesetzt. Diese Versuche dienen nicht nur dazu, die Kontur der Körper zu optimieren, sondern zeigen auch, an welchen Stellen besondere Hitzeschutz-Vorkehrungen getroffen werden müssen. Schlieren photograph of the shock wave system resulting from the flow around a dual cone at 9 times the speed of sound. The regions in which the shock waves closely fit the contour are not only subjected to large forces but also to very high temperatures. These tests not only serve to optimize the contours of the bodies but also show in which places particular heat protection measures need to be taken.*

*Doppelkegel werden am ZARM systematisch untersucht. Die Prüflinge sind auch mit einer großen Zahl kleiner Bohrungen versehen, durch die die Druckverteilung an der Oberfläche während des Versuchs gemessen werden kann. Dual cones are systematically investigated at ZARM. The test objects are also furnished with a large number of small orifices through which the pressure distribution on the surface can be measured during the test.*

*Blick in die Messstrecke des Hyperschallkanals auf einen zu untersuchenden Doppelkegel. Dieser rotationssymmetrische Prüfling ist ein verkleinertes Modell der Form eines Flugkörpers, der für den Wiedereintritt in die Erdatmosphäre verwendet werden soll. View looking into the test section of the hypersonic wind tunnel of a dual cone under investigation. This rotationally symmetric test object is a small-scale model of the form of a spacecraft intended to be used for re-entry into the Earth's atmosphere.*

ZARM und

ZARM an

d die Kunst
d the Arts

# ZARM und die Kunst

*Prof. Dr.-Ing. Hans J. Rath*
*Leiter ZARM-Institut · Geschäftsführer ZARM-FAB mbH*
*Director General of the ZARM institute · Director General of the ZARM Drop Tower Operation and Service Company*

Als im Oktober 1993 die lang gehegte Idee, im Gebäude des Fallturms eine Galerie einzurichten, zu einem konkreten Vorhaben zu werden schien, erwachte nach langer Zeit mein schon von Jugend an vorhandenes Interesse an der Kunst zu neuem Leben. Gemeinsam mit Susanne Hinrichs (damals Susanne Höner), die durch ihre kunstwissenschaftliche Ausbildung die nötigen Erfahrungen und Kenntnisse der Kunstszene mitbrachte, konnte die Idee der Kunst im Fallturm in die Tat umgesetzt werden.

Keine kommerziell betriebene Galerie sollte entstehen, in welcher der Verkauf von Kunst im Vordergrund steht, sondern vielmehr ein Forum, welches in der Lage ist, zukunftsweisende Wissenschaft und Forschung mit zeitgenössischen künstlerischen Positionen zu verbinden. Dabei denke ich, dass unsere Forschung und Wissenschaft in einem engen Verhältnis zur bildenden Kunst steht. Führt man sich vor Augen, dass beide Bereiche vermögen, Jahrhunderte überdauernde Werte zu schaffen, die Generationen nachhaltig beeindrucken und in ihrem Handeln beeinflussen, wird die einander entsprechende Bedeutung von Kunst und Forschung deutlich. Diese Tatsache hervorzuheben, diese scheinbar konträren Lebensbereiche einander gegenüberzustellen, einen Vergleich oder Bezug zu erzeugen und deutlich zu machen, dass sowohl Kunst als auch Wissenschaft unser Leben gleichermaßen betreffen, scheint mir eine wesentliche Aufgabe der Galerie im Fallturm. Dabei kann es nicht darum gehen, Künstler auszustellen, die sich mit ihrer Arbeit direkt und bewusst auf den Fallturm beziehen, auch wenn dies ein spannendes Unterfangen wäre. Die Galerie im Fallturm versucht vielmehr, künstlerische Positionen zu zeigen, die ihre Eigenständigkeit behaupten und ebenso Einfluss auf die Gesellschaft nehmen, wie unsere Forschung, wenn sie immer neue Technologien entwickelt, die unsere Lebensqualität verändern.

Ohne Zweifel ist der Galerieraum auf 13 m Höhe im äußeren Mantel des Turmes ein ganz außergewöhnlicher Ort, der – zwischen Himmel und Erde, im Begriff, in die Wolken hinauszuwachsen, und dennoch fest verwurzelt mit dem Globus – viele Assoziationen offen lässt. Verweilt der Besucher in diesem Raum, ist es immer wieder aufregend, sich zu vergegenwärtigen, dass sich genau in dieser Höhe, nur wenige Meter entfernt, die Stelle befindet, an der die Fallkapsel, angefüllt mit zahlreichen Experimenten und technischen Geräten, ihre Schwerelosigkeit verlässt. Durch die einzigartige Architektur, die ein unwiederholbares Spiel von Licht und Schatten zulässt, erhält der Raum an sich schon eine ganz eigene Aura, die den Besucher bannt und verdeutlicht, dass hier etwas Außergewöhnliches geschieht.

Im Jahr 1995 fanden die ersten drei Kunstausstellungen mit Werken von Abraham David Christian, Felix Droese und Sam Francis in der Galerie im Fallturm statt. Im selben Jahr gestalteten A. R. Penck und Felim Egan den damals noch leeren unterirdischen Katapultraum. Gleichzeitig stellten beide Künstler ihre zuvor in der Maschinenhalle des Fallturms angefertigten Zeichnungen in der Galerie aus. Die bisher letzten beiden Ausstellungen erfolgten 1997 – mit Arbeiten von Jürgen Waller und mir. Vielleicht sollte ich die schöne Galerie im Fallturm wiederbeleben.

Übrigens habe ich seit 1995 meine eigene Malerei wieder intensiviert, und das gilt bis zum heutigen Tag.

## ZARM and the Arts

When in October 1993 the long cherished idea of creating a gallery in the Drop Tower building finally took shape an interest in art going back to my youth was awoken from its long slumber to be given new life. Together with Susanne Hinrichs (then Susanne Höner), whose training in art history gave her the necessary experience in and knowledge of the art scene, it was possible to turn the idea of art in the Drop Tower into reality.

There was no intention here to set up a commercial gallery with an emphasis on selling art, but rather to create a forum which would be able to bring pioneering science and technology together with contemporary artistic positions. It is my view that the research and science we conduct bears a close relationship to visual art. If one considers the fact that both fields have been able to create values lasting for hundreds of years, leaving an enduring impression on generations and influencing them in their actions, then the mutually corresponding significance of art and research becomes clear.

To emphasize this fact, to juxtapose these apparently contrary domains, to elicit comparisons and connections and to make it clear that both art and science affect our lives in equal measure – this seems to me to be an essential task of the gallery situated in the Drop Tower. The point here is not to exhibit artists whose work directly or consciously makes reference to the Drop Tower, even though this would be an exciting endeavor. Rather, the Drop Tower gallery seeks to present artistic positions which assert their own independence and influence society in the same way as does our research when it continues to develop new technologies which change the quality of our lives.

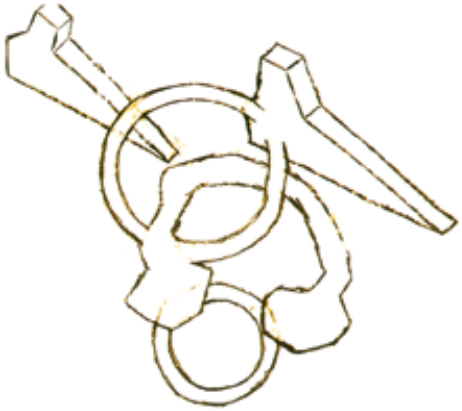
The gallery, 13 m high in the outer mantle of the tower, is without doubt a quite extraordinary place which – suspended between heaven and Earth, reaching up to the clouds and yet firmly rooted to the globe – leaves room for many associations. The visitor spending time in this room is always likely to get a kick from realizing that at precisely this height, only a few meters away, is the location where the drop capsule, replete with numerous experiments and technical gadgets, abandons its weightlessness.

Thanks to its singular architecture, which allows for a unique play of light and shadow, the room already acquires its own special aura, captivating visitors and making it quite clear that something exceptional is happening here.

The first three exhibitions in the Drop Tower gallery took place in 1995 with works by Abraham David Christian, Felix Droese and Sam Francis. In the same year A. R. Penck and Felim Egan designed the underground catapult room which was at that time still empty. The two artists simultaneously exhibited in the gallery the drawings they had previously produced in the machine hall of the Drop Tower. The last two exhibitions to be held were in 1997 – with works by Jürgen Waller and myself. Perhaps it is now time for me to rejuvenate this special gallery of ours.

Incidentally I have stepped up my own painting since 1995 and I am still going strong today!

*Abraham David Christian*
*ohne Titel without titel*
*New York, 1980/81 · Sammlung Grothe (Serie II)*
*New York, 1980/81 · Grothe collection (Series II)*



*Felix Droese*
*Geld Money*
*ohne Jahresangabe · Holzdruck*
*without year · wood print*

*Hans J. Rath*
*„Universe of Living Beings XX“ · 2010 · 36 x 48 cm*
*Tusche, Acryl und Filzstift auf Papier,*
*Indian ink, acrylic paint and felt pen on paper*

*Sam Francis*
*ohne Titel without title*
*1978 · monotype*

*Felim Egan und A.R. Penck (Foto rechts) bei der Arbeit: Entwürfe werden diskutiert und der Untergrund des Fallturms gestaltet. Felix Egan and A.R. Penck (right) at work: sketches are discussed and the base of the Drop Tower is designed.*

# Das ZARM in Zahlen

## Facts and Figures

Das ZARM-Institut ist eine wissenschaftliche Einheit im Fachbereich 4 (Produktionstechnik) der Universität Bremen.

| | |
|---|---|
| Anzahl Mitarbeiter* | 65 |
| weiblich | 16 |
| männlich | 49 |

*Stand September 2010

| | |
|---|---|
| Anzahl der Forschungsabteilungen* | 10 |
| Strömungsmechanik | 4 |
| Weltraumwissenschaften | 6 |

*Stand September 2010

| | |
|---|---|
| Anzahl der Promotionen* | 63 |
| Anzahl der Habilitationen* | 5 |
| Anzahl der Mitarbeiter, die einen Ruf an andere Universitäten und Hochschulen erhalten haben* | 11 |

*seit 1985

The ZARM institute is a scientific entity within Department 4 (Production Engineering) of the University of Bremen.

| | |
|---|---|
| Number of employees* | 65 |
| female | 16 |
| male | 49 |

*as of September 2010

| | |
|---|---|
| Number of research divisions* | 10 |
| Fluid Dynamics | 4 |
| Space Science | 6 |

*as of September 2010

| | |
|---|---|
| Number of doctorates awarded* | 63 |
| Number of habilitations awarded* | 5 |
| Number of employees to have been awarded professorships at other universities and institutes of higher education* | 11 |

*since 1985

Die ZARM-FAB mbH ist eine Gesellschaft des Landes Bremen. Sie betreibt den Fallturm Bremen, organisiert wissenschaftliche Tagungen, Kongresse und Messen und steht der Industrie zur Durchführung wissenschaftlich-technischer Dienstleistungen zur Verfügung.

| | |
|---|---|
| Anzahl Mitarbeiter* | 23 |
| weiblich | 9 |
| männlich | 14 |
| technischer Betrieb | 10 |
| Verwaltung | 5 |
| Kongressbüro | 8 |

*Stand August 2010

| | |
|---|---|
| seit 1990 durchgeführte Experimentabwürfe | 5500 |
| unterschiedliche Experimente | 152 |
| Anzahl verschiedener Nationen vertreten durch Wissenschaftler | 42 |

*Stand August 2010

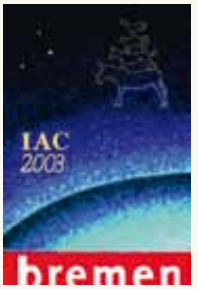
ZARM-FAB mbH (Drop Tower Operation and Service Company) is a company owned by the Federal State of Bremen. It runs the Bremen Drop Tower, organizes scientific conferences, congresses and fairs and makes scientific and technical services available to industry.

| | |
|---|---|
| Number of employees* | 23 |
| female | 9 |
| male | 14 |
| technical services | 10 |
| administration | 5 |
| convention bureau | 8 |

*as of August 2010

| | |
|---|---|
| Number of Drop Tower experiments | 5,500 |
| Number of different experiments | 152 |
| Number of nations represented by participating scientists | 42 |

*as of August 2010



Das ZARM-Institut und ZARM-FAB mbH haben seit 1990 rund 35 internationale Tagungen, Kongresse, Workshops und Messen organisiert. Eine Auswahl:

Since 1990 the ZARM institute and ZARM FAB mbH have organized around 35 international conferences, congresses, workshops and fairs, including the following:

GAMM 1998 und 2008 Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik

*ca. 1.000 Teilnehmer/participants*

Drop Tower Days 2000 und 2004

*jeweils circa 100 Teilnehmern/each with around 100 participants*

SSP'2001 Summer Session Program der International Space University (ISU)

*120 Teilnehmer/participants*

IAC 2003 – International Astronautical Congress 2003

*2.200 Teilnehmer/participants*

Norddeutsches Mechanikkolloquium 2004 und 2009

*jeweils circa 80 Teilnehmer/each with around 80 participants*

Q2C2 (2007) + Q2C4 (2009) From Quantum to Cosmos 2 + 4

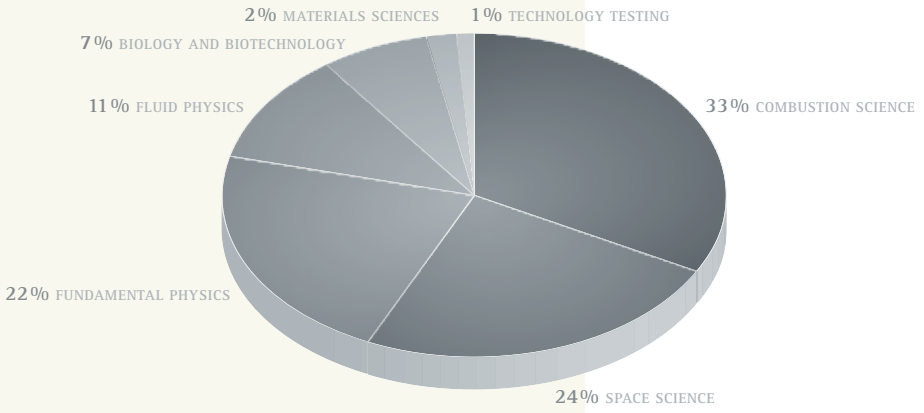
*jeweils circa 100 Teilnehmer/each with around 100 participants*

COSPAR 2010 - 38th Scientific Assembly of the Committee on Space Research

*3.800 Teilnehmer/participants*

Aufteilung der Fallturm-Experimente auf Disziplinen

Distribution of Drop Tower experiments according to discipline



HERAUSGEBER/PUBLISHER

©ZARM · Universität Bremen

Am Fallturm · 28359 Bremen · Germany

Telefon +49 (0)421 218 4296

info@zarm.uni-bremen.de

KONZEPT UND REDAKTION/CONCEPT AND EDITING

Christian Eigenbrod [ZARM] · Bettina Schaarschmidt [zielsinn.de]

Wir danken Britta Rath für ihre professionelle Unterstützung.

Thanks to Britta Rath for her professional support.

ÜBERSETZUNG/TRANSLATION

Graham Welsh · Leipzig [text@grahamwelsh.de]

GESTALTUNG/DESIGN

Frau Supiran gestaltet visuelle Kommunikation [supiran.com]

FOTOS/PHOTOS

Titelseite/Cover Zeichnung/Drawing Drop Tower Catapult: Jan Siemer

Gruppenfoto/Photo of ZARM Group: Mac-Fotoservice, Bremen

Seite/Pages 4, 56, 62, 34, 35, 36 (3), 37 (1) 51, 53, 101,105: Hansjörg Dittus

Seiten/Pages 36 (2), 37 (2), 38 (3), 39 (2). 82 (2). 90, 91, 114, 115, 120, 121, 128, 129, 135: ZARM

Seiten/Page 37 (1): Christian Eigenbrod

Seiten/Page 39 (3): Frank Koch

Seiten/Pages 39 (1), 46: Hanns Selig

Seite/Page 50 Portrait Herr Koschnick: Heinz-Josef Lücking

Seite/Page 46 Portrait Dr. Riesenhuber: Hermann Heibel

DRUCK/PRINTING

trigger.medien.gmbh · Berlin

AUFLAGE/PRINT RUN

600 Exemplare/Copies · November 2010

„Wichtig ist, dass man nicht aufhört zu fragen.“

“The important thing is never to stop asking.”

ALBERT EINSTEIN

ZARM Universität Bremen · ZARM-FAB mbH
Am Fallturm · 28359 Bremen · Deutschland
Telefon ZARM +49 (0)421 218 4296
Pressestelle/Public Relation ZARM-FAB mbH: +49 (0)421 218 4801
info@zarm.uni-bremen.de · fab@zarm.uni-bremen.de