



# DLR / magazin

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt · Sonderdruck

## DIE WINDMASCHINEN



# Die Windmaschinen

Überall, wo es um das Verhalten im Luftstrom geht, kommt der Windkanal ins Spiel. Im DLR, in Europa und weltweit. Das DLR-Magazin widmet den imposanten Maschinen eine Artikelserie.

Teil 1:  
Sinn und Zweck. Überblick. Bedeutung.

Von Jens Wucherpfennig

Sie zählen zu den größten Forschungsmaschinen der Welt, und es gibt praktisch kein Flugzeug, das nicht in ihnen untersucht wurde: Windkanäle. Mit ausgeklügelter Technik wird in ihnen meist anhand verkleinerter Modelle erforscht, wie zukünftige Flugzeuge, Raumschiffe, Züge oder Autos aerodynamisch günstig gestaltet werden können. Aber auch Schiffe, Häuser, Tiere und selbst Menschen sind in Windkanälen untersucht worden.

Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig

Alles, was gut fliegen soll, muss eine bestimmte aerodynamische Form haben. Das wussten bereits die Gebrüder Wright vor dem Erstflug ihres Motorflugzeugs im Jahr 1903. Anfangs haben die amerikanischen Luftfahrtpioniere deshalb Modelle ihres Fluggeräts getestet, indem sie es auf einem Fahrrad hochhielten und kräftig in die Pedale traten – eine eher holperige Angelegenheit und nicht reproduzierbar. Schon 1872 waren Forscher in England auf eine andere Idee gekommen: Anstatt das Modell in der Luft zu bewegen, bewegten sie mittels Gebläse die Luft am fixierten Modell vorbei, eine Umkehr der Wirklichkeit: Der Windkanal war geboren.

Heute werden in Windkanälen auch Raumgleiter, Autos, Züge und selbst Hochhäuser auf Luftwiderstand und das Wirken von Kräften untersucht. Grundsätzlich werden zwei Windkanal-Arten unterschieden: Beim „Eiffel-Windkanal“ erfolgt die Rückströmung der Luft über die Umgebung, meist der Halle, in der der Windkanal aufgebaut ist. Allerdings hat der Eiffel-Windkanal entscheidende Nachteile bei der Strömungsqualität, dem Energieverbrauch und der Schallabstrahlung. Beim von Ludwig Prandtl entwickelten „Göttinger Windkanal“ erfolgt die Rückströmung über einen geschlossenen Kreislauf. Dies verbessert die Strömungsqualität und reduziert die Schallabstrahlung. Die meisten Windkanäle weltweit nutzen diese „Göttinger Bauart“.

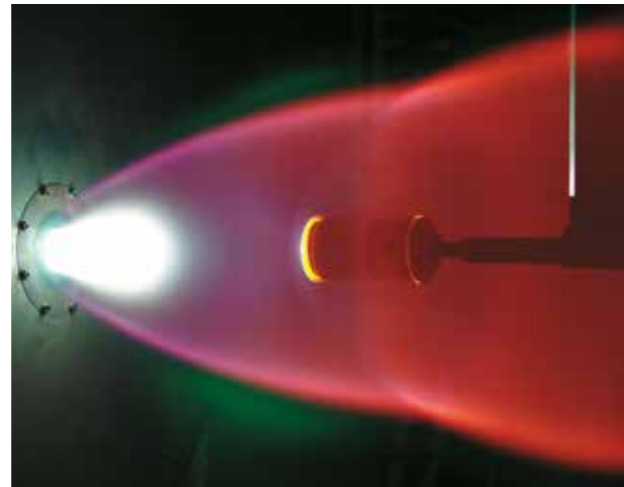
Heute führt beim größten Teil der europäischen Luft- und Raumfahrt-Projekte kein Weg am DLR und der DLR-Tochter Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW) vorbei. Sie betreiben insgesamt mehr als 20 Windkanäle verschiedenster Größe und Bauart. Wie viele genau, ist gar nicht so leicht zu sagen, denn neben den großen und oft Millionen Euro teuren Windkanälen gibt es eine ganze Reihe kleiner und kleinster Anlagen, die beispielsweise in DLR\_School\_Labs eingesetzt werden. Die Vielzahl an Windkanälen ist notwendig, da jeder nur einen bestimmten Bereich der Wirklichkeit realistisch abbilden kann. Beispielsweise sind Niedriggeschwindigkeitskanäle für Strömungsgeschwindigkeiten bis etwa 500 Kilometer pro Stunde aussagekräftig, transsonische Windkanäle für Geschwindigkeiten nahe der Schallmauer und jenseits davon. Und Hyperschallkanäle reproduzieren Geschwindigkeiten bis zu 30.000 Kilometer pro Stunde, wie sie beispielsweise beim Wiedereintritt eines Raumfahrzeugs in die Erdatmosphäre eine Rolle spielen.

Wenn es um experimentelle Forschungsprojekte oder die Überprüfung neuer Simulations- und Messtechnik geht, werden diese vor allem in Göttingen, Braunschweig und Köln bearbeitet,

## Im Verbund stärker

Die Stiftung Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW) wurde vom DLR und der niederländischen Partnerorganisation NLR als Non-profit-Organisation eingerichtet. Ihre Aufgabe besteht im Betrieb, im Unterhalt und in der Weiterentwicklung von zehn Windkanälen in den beiden Ländern.

Vier der Windkanäle befinden sich in Göttingen. Schwerpunkt ist hier die Forschung. Großmodelle werden in den Niederlanden getestet. So wurde dort beispielsweise die Gesamtform des Eurofighters untersucht, während in Göttingen Spezialuntersuchungen an den Triebwerkeinläufen vorgenommen wurden. Neben staatlichen Aufträgen nehmen die DNW auch Aufträge aus der Industrie an, so die Verbesserung der Aerodynamik von Lastkraftwagen. Der DNW-Verbund gilt zudem als ein Vorreiter einer gesamteuropäischen Luft- und Raumfahrtforschung auf dem Gebiet der Windkanaltechnik.



Experiment zum Wiedereintritt von Raumfahrzeugen in die Erdatmosphäre im lichtbogenbeheizten Windkanal des DLR Köln

während in dem viel größeren Large Low-Speed Facility, kurz LLF, in den Niederlanden in fortgeschrittenem Entwicklungsstadium Untersuchungen an deutlich größeren, oft das ganze Flugzeug darstellenden Modellen durchgeführt werden. Lediglich in den größten Windkanälen der Welt, wie am NASA Ames Research Center, können ganze Flugzeuge, bis hin zu einer Boeing 737, getestet werden. Dafür sind allerdings gigantische Windkanal-dimensionen und Motorleistungen von sechs mal 22.500 PS notwendig. Verständlich, dass die Kosten dafür sehr hoch sind und Untersuchungen auf ein Mindestmaß beschränkt werden. In kleineren Windkanälen werden eher Detailuntersuchungen an Flugzeugen und Raumfahrzeugen, zum Beispiel an Steuerungsflächen, durchgeführt. Hier können eher mal Experimente und Theorien überprüft werden. Ein Spezialfall ist der Braunschweiger Niedriggeschwindigkeits-Windkanal: Er gilt als leistungsfähigste aeroakustische Windkanal der Welt und hilft, Lärmquellen zu erkennen und Wege zur Lärminderung zu finden. – So hat jeder Windkanal seine Stärken auf einem bestimmten Gebiet.

Nur selten können Objekte in Originalgröße im Windkanal untersucht werden; Autos bilden hier eine Ausnahme, da sie nicht zu groß sind und sie dank der relativ niedrigen Luftgeschwindigkeiten, um die es hier geht, gut in großen Windkanälen untersucht werden können. Für Flugzeuge oder Gebäude müssen maßstabsgerechte Modelle gebaut werden. Ein Problem besteht jedoch darin, dass die Luftströmung sich bei kleinen Modellen anders verhält als bei den Objekten in ihrer tatsächlichen Größe. Hier bedienen sich die Windkanalexperten eines Tricks: Indem sie den Luftdruck erhöhen oder die Temperatur im Windkanal verringern, passen sie die Lufteigenschaften dem Maßstab des Modells an. Im Göttinger Hochdruckwindkanal beispielsweise wird die Luft auf 100 bar komprimiert, das entspricht dem Druck in 1.000 Meter Meerestiefe. So können platzsparend beispielsweise kleine Eisenbahn-Modelle im Maßstab 1:100 getestet werden.

Windkanalexperimente sind stets mit hohen Kosten verbunden. Daher werden die Versuche durch numerische Strömungssimulation am Computer (CFD, Computational Fluid Dynamics) begleitet. Zusammen mit Experimenten an „echten“ Flugzeugen sind diese drei Methoden Basis jeder Flugzeugentwicklung. In der Anfangszeit der Computerära glaubten einige Entwickler, eines Tages ganz auf Windkanalexperimente verzichten zu können. Heute weiß man, aufgrund der Komplexität von Strömungen wird man auf Untersuchungen in Windkanälen in naher Zukunft nicht verzichten können.

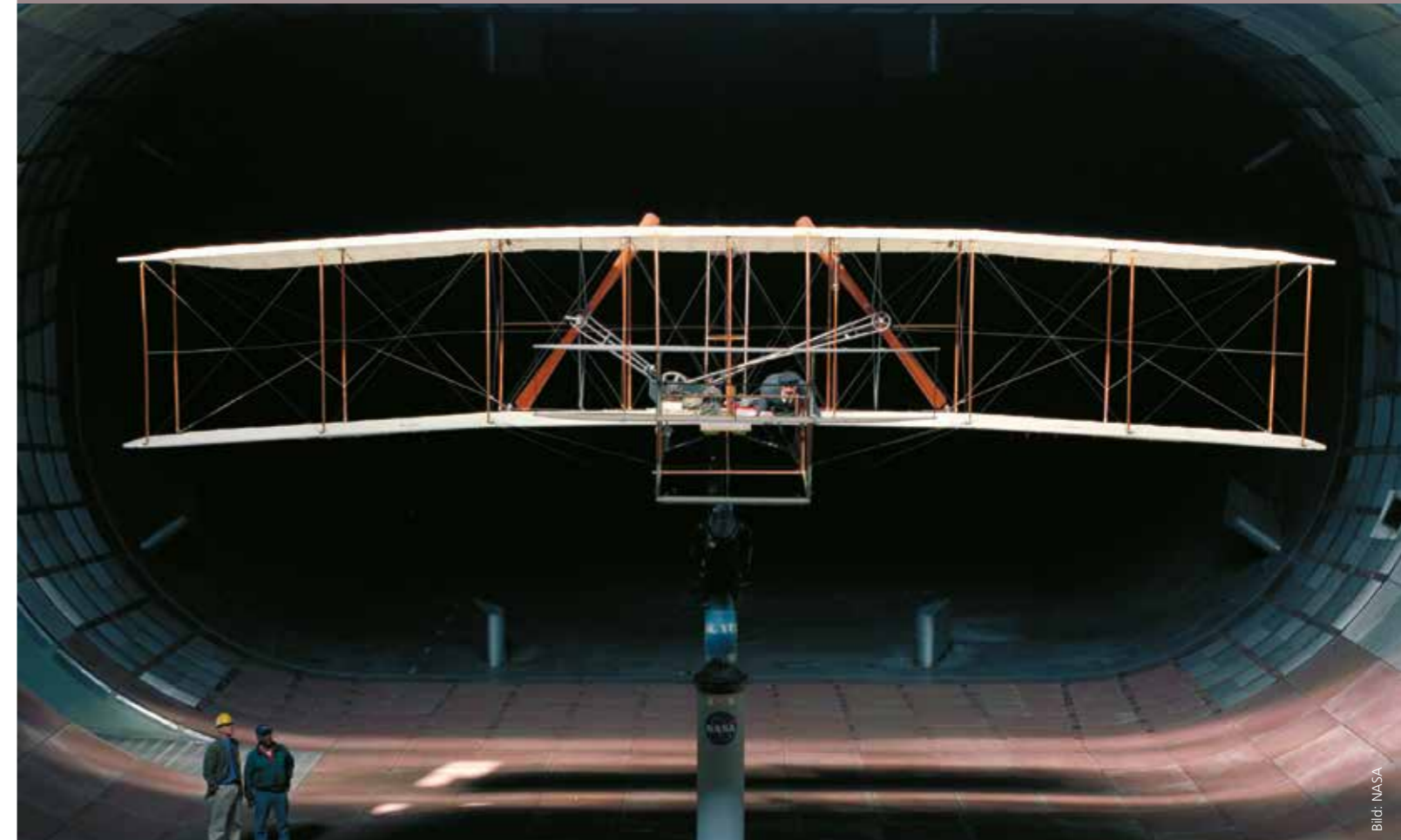


Bild: NASA

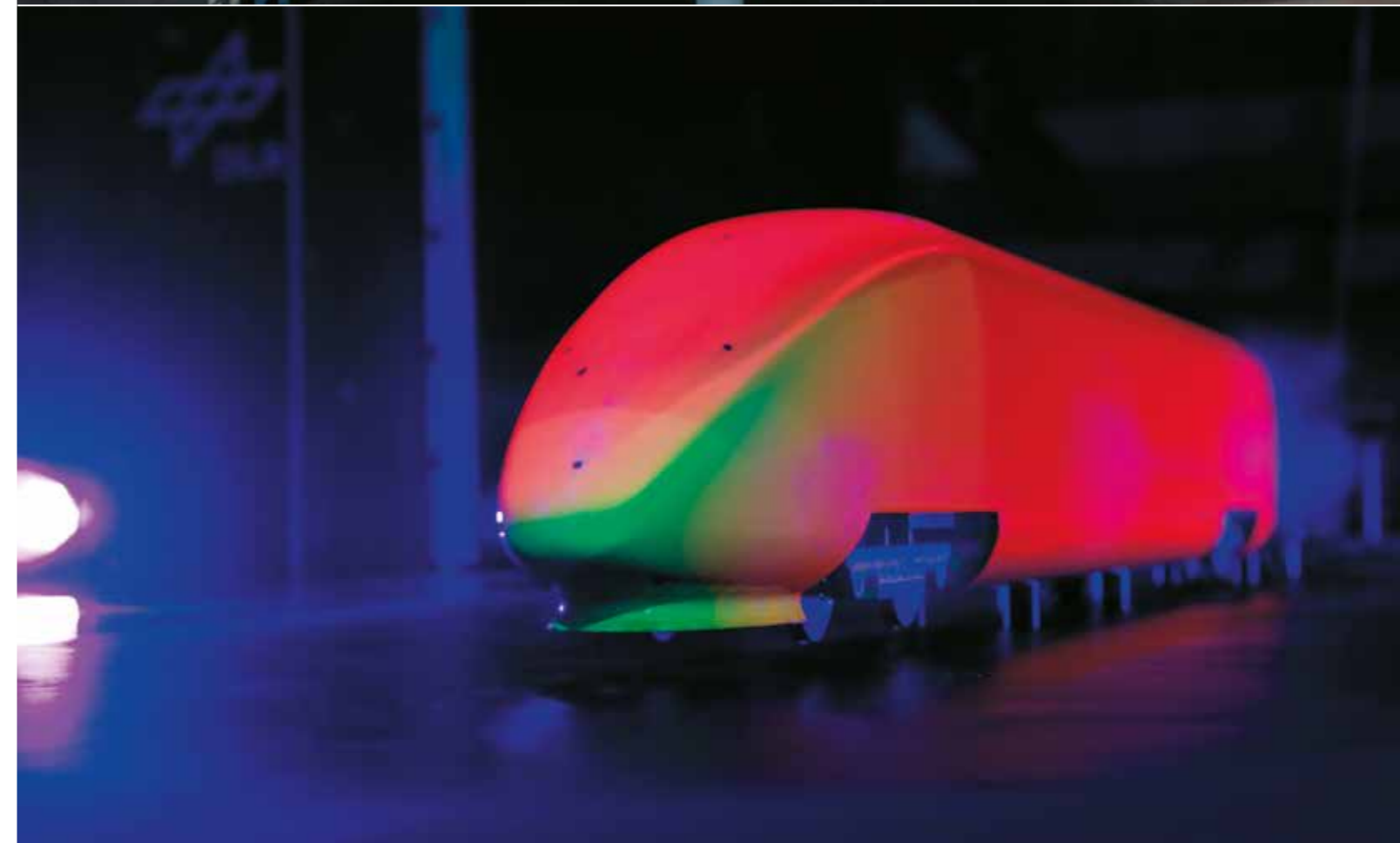


Bild oben: Einer der größten Windkanäle der Welt steht am NASA Ames Research Center. 1999 wurde ein Nachbau des Flugzeugs untersucht, mit dem die Brüder Wright 1903 zum ersten Motorflug der Welt abhoben. Bild unten: Im Seitenwindkanal Göttingen werden drucksensitive Farben an einem Zugmodell getestet

# Die wesentlichen Windkanaltypen

## Göttinger Bauart

Bei diesem Typ handelt es sich um einen Kanal mit geschlossener Luftrückführung. Das Axialgebläse fördert die Luft im geschlossenen Kreislauf. Man benötigt dafür eine relativ aufwändige Kanalröhre, die rechteckig angeordnet ist und besonders in der Rückführung relativ große Strömungsquerschnitte erfordert. Die komplizierte Konstruktion, der enorme Platzaufwand und die hohen Baukosten sind die Nachteile gegenüber der offenen Bauart ohne Rückführung.

Da die vom Gebläse erzeugte Luftströmung nach einem Umlauf wieder zum Gebläse gelangt, hat dieser Kanaltyp nur geringe Energieverluste und erlaubt hohe Windgeschwindigkeiten. Da vom Gebläse nur die entstehenden Strömungsverluste wieder aufgebracht werden müssen, ist die Antriebsleistung entsprechend geringer als bei der offenen Bauart ohne Rückführung. Das hält die Betriebskosten niedrig. Denn zum einen ist es der geringere Energieverbrauch selbst, der sich hier auswirkt, zum anderen sind es die geringeren Stromanschlusskosten, die bei größeren Windkanälen zu Buche schlagen. Die Investitionen für die Antriebseinheit sind geringer, für die Röhre des Kanals jedoch wesentlich höher als bei der Eiffelbauart.

Ein weiterer Kostenfaktor ist die Tatsache, dass Windkanäle gekühlt werden müssen: Bis zu 100 Grad werden die Wände heiß – wohlgemerkt: trotz Kühlung. Grund dafür ist, dass die gesamte in den Windkanal hineingesteckte Energie in Wärme umgewandelt wird. Durch den Strömungswiderstand der Luft entsteht Reibung, die Wärme produziert. Diese muss durch eine Kühlung abgeführt werden.

Für klimatisierte Windkanäle kommt wegen der Energiekosten nur eine Bauart mit Rückführung in Betracht; Klimakanäle wurden bisher ebenfalls nur in der Göttinger Bauweise ausgeführt. Die geschlossene Messstrecke hat im Gegensatz zur offenen Bauart den Vorteil, dass in ihr der Druck je nach Bedarf verändert werden kann.

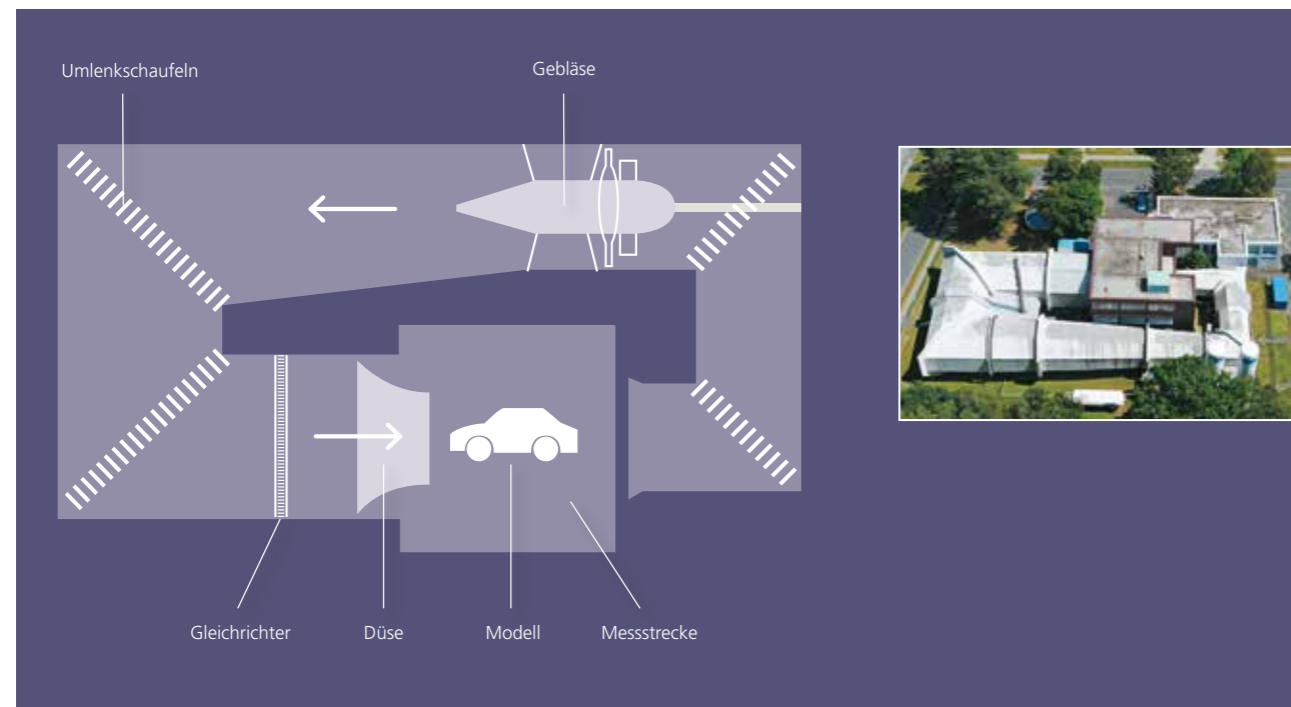
## Eiffeltyp

Das Hauptmerkmal des Eiffelkanals besteht darin, dass er die Versuchsluft aus der Umgebung ansaugt und sie wiederum ins Freie ausbläst. Man unterscheidet hier zwei Ausführungen, je nach Lage des Gebläses in der Kanalröhre. In dem einen Fall ist das Gebläse hinter der Messstrecke (blast type) angebracht, im anderen Fall vor der Messstrecke (blow type). Die Messstrecke kann als geschlossene oder als offene (Freistrahlmessstrecke) ausgeführt werden. Am einfachsten ist eine Messstrecke aufzubauen, deren leicht divergierende Wände allseitig geschlossen sind. Bei etwas höherem Bauaufwand ist auch eine offene Bauweise möglich. Hierbei ist aber eine druckdichte Ummantlung nötig, da in der Messstrecke eines Eiffelkanals stets Unterdruck herrscht.

Dieser im Freien aufgestellte Kanaltyp, also ein Kanal ohne Rückführung, hat den wesentlichen Nachteil, dass der Messbetrieb vom Wetter abhängig ist. Er ist deshalb nur in Ländern mit gemäßigttem Klima brauchbar.



Weitere Informationen:  
[www.DNW.aero](http://www.DNW.aero)



So funktioniert ein Windkanal Göttinger Bauart: Ein Gebläse beschleunigt die Luft, die in einem geschlossenen Kreislauf um das zu untersuchende Modell geführt wird. Umlenkschaufeln und Gleichrichter sorgen für eine möglichst gleichmäßige Strömung. Eine Düse reguliert die Geschwindigkeit, mit der die Luft auf das Modell trifft. Die Konstruktion ist auf dem Luftbild des Kryokanals Köln (KKK) gut erkennbar.

# So wichtig wie eh und je

Interview mit Professor Georg Eitelberg, Direktor der Deutsch-Niederländischen Windkanäle

## Windkanäle sind im Unterhalt teuer. Brauchen wir sie unbedingt?

Teuer ist ein relativer Begriff; Windkanäle zu nutzen, ist günstiger, als Flugzeuge als Versuchsträger einzusetzen. Im Allgemeinen bindet die experimentelle Forschung natürlich mehr Ressourcen als theoretisches Einzelgängertum, weil man für ein kompliziertes Experiment stets mehrere Fachrichtungen miteinander verbinden muss. Daher die sichtbaren Kosten. Aber die fallen überall an, wo man auf technisch-wissenschaftliche Infrastruktur angewiesen ist, auch bei großen Rechenzentren übrigens. Wir brauchen Windkanäle so lange, bis die rechnerischen Methoden die absolute Sicherheit in Sachen Aerodynamik künftiger Flugzeugentwicklungen bieten. Bisher ist dies nicht der Fall. Auch die kompliziertesten Rechenverfahren machen Gebrauch von der Modellbildung; diese Modelle müssen experimentell verifiziert werden.

## Warum werden so viele unterschiedliche Windkanäle benötigt?

Weil ein Windkanal immer für nur einen beschränkten Bereich des Fluges eine gute experimentelle Simulation bietet. Auch hier ist die Spezialisierung die Basis des Fortschritts. Auch für die Variation von Aufwand und Detaillierungsgrad, die notwendig ist, um die wissenschaftliche Fragestellung ausreichend zu beantworten, brauchen wir die verschiedenen Windkanäle.

## In den Siebziger- und Achtzigerjahren glaubten manche, Supercomputer könnten eines Tages Windkanalexperimente komplett ersetzen. Was ist aus dieser Vorstellung geworden?

Dies glauben immer noch manche. Der Leiter vom DLR-Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Prof. Andreas Dillmann, hat ausgerechnet, dass es noch circa zwei Generationen dauern wird, bis wir annähernd so weit sind. Allerdings haben die Rechner die Art der Windkanalnutzung jetzt schon verändert.



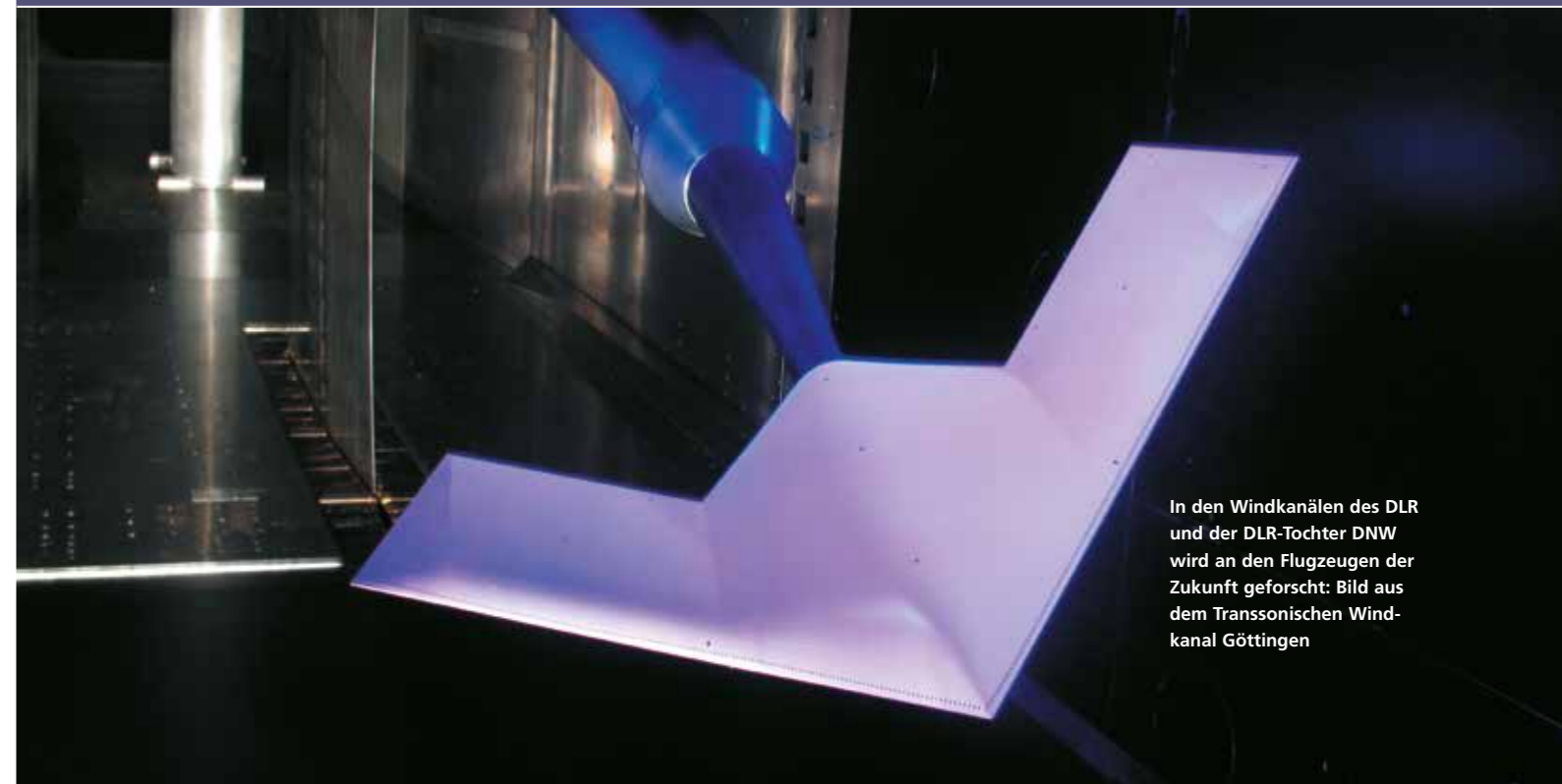
Prof. Dr.-Ing. Georg Eitelberg

## Windkanäle sind teilweise seit Jahrzehnten in Betrieb – was in der schnell getakteten Wissenschaft überrascht ...

Mag sein. Einerseits ist die immerwährende Nutzung zurückzuführen auf die gestiegenen Anforderungen der Luftfahrtforschung, andererseits spielt hier auch die Weiterentwicklung der Messtechniken und Datenakquisition eine wichtige Rolle. Was in der Tat konstant geblieben ist, ist, dass die Flugzeugmodelle immer noch von Luft umströmt werden.

## Welche Rolle werden Windkanäle neben Supercomputern und Flugexperimenten in Zukunft spielen?

Sie wird die gleiche sein wie heute, zwischen Supercomputern und Flugversuchen. Aber nicht alle Windkanäle werden diese Stellung auch einnehmen können. Nur die, die eine ausreichende Qualität bei der Verifizierung der aerodynamischen und aeroakustischen Modellbildung gewährleisten oder diejenigen, die eine Qualifizierung zur Simulation der Flugeigenschaften der Flugzeugentwürfe mitbringen, werden gebraucht. ●



In den Windkanälen des DLR und der DLR-Tochter DNW wird an den Flugzeugen der Zukunft geforscht: Bild aus dem Transsonischen Windkanal Göttingen

Blick in den Transsonischen Windkanal im DLR Göttingen. In der einen Meter breiten und einen Meter hohen Messstrecke justiert Techniker Andreas Grimme ein Modell des Versuchsflugzeugs X31.

# Wandelbarer Gigant

Teil 2 der Serie „Die Windmaschinen“

Von den Anfängen der Airbus-Familie bis zum Eurofighter und dem A400M – in einem der bedeutendsten Windkanäle Deutschlands wird seit fünfzig Jahren Luftfahrtforschung betrieben. Der Transsonische Windkanal Göttingen (TWG) wird auch heute noch für die Erforschung und Entwicklung künftiger Raumfahrzeuge, Flugzeuge und Hubschrauber eingesetzt.

## Das Überschall-Labor im DLR Göttingen

Von Jens Wucherpennig

Betrieben wird der Transsonische Windkanal Göttingen (TWG) von der Stiftung Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW), einer 1976 gegründeten gemeinsamen Tochter des DLR und des Niederländischen Luft- und Raumfahrtlaboratoriums (NLR). Im TWG kann simuliert werden, wie sich Flugzeuge im sogenannten transsonischen Bereich nahe der Schallgeschwindigkeit (etwa 1.000 Stundenkilometer) und darüber hinaus (bis zu mehr als zweifacher Schallgeschwindigkeit, Mach 2,2) verhalten. „Für diesen Geschwindigkeitsbereich ist der Göttinger Windkanal die wichtigste Anlage Deutschlands“, sagt Professor Georg Eitelberg, Direktor der DNW.

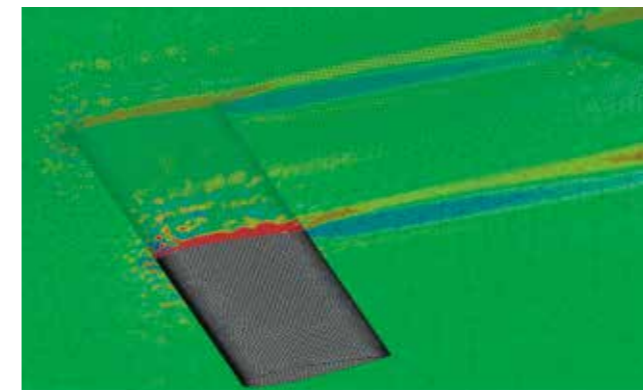
### Speziell für Unter- und Überschall

Der 50 Meter lange und zwölf Meter hohe Windkanal hat einen Wert von 45 Millionen Euro. In der 4,5 Meter langen, einen Meter hohen und einen Meter breiten Messstrecke lässt ein Verdichter mit einer Leistung von bis zu 12 Megawatt Luft an maßstabsgetreuen Modellen vorbeiströmen. Mit Hilfe modernster Technik kann diese Strömung sichtbar gemacht und zusammen mit ihrer Wirkung auf die umströmten Modelle vermessen werden. „Der TWG ist der Forschungswindkanal für Transsonik“, sagt Dr. Karl-Wilhelm Bock, Leiter der DNW in Göttingen und Köln. Transsonik ist ein Begriff aus der Aerodynamik. Dabei treten gleichzeitig Unter- und Überschallgeschwindigkeiten in der Luftströmung auf. Da diese Übergangsbereiche als besonders kritisch gelten, weil sich dabei die Flugeigenschaften dramatisch verändern, gibt es mit dem TWG einen eigenen Windkanal, der diese Phänomene untersucht.

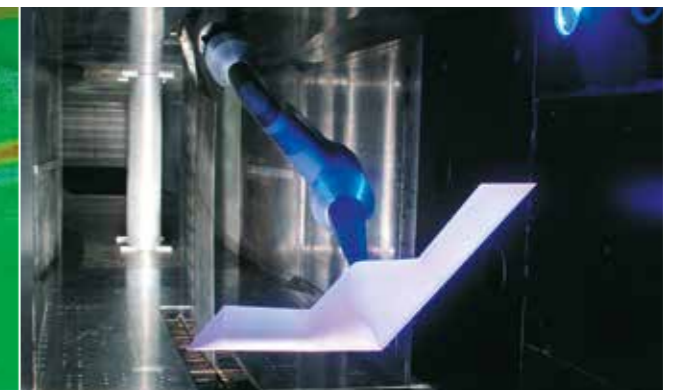
Dafür verfügt der Windkanal über drei verschiedene, austauschbare Messstrecken: für Machzahlen bis 0,9, bis Mach 1,2 und ab Mach 1,3 bis 2,2. Die gewünschte Geschwindigkeit wird dabei durch die verwendete Düse, einen Verstelldiffusor, der den Kanal enger oder weiter macht, und die Drehzahl des Antriebs bestimmt. Diese tonnenschweren Messstrecken können vor einem Versuch elegant ausgewechselt werden: auf Luftkissen. Der Antrieb besteht aus einem Motor mit bis zu 12 Megawatt Leistung. Damit könnten 200.000 Sechzig-Watt-Glühlampen zum Leuchten gebracht werden. Der Motor treibt einen Verdichter an, der das erzeugte, was einen Windkanal ausmacht: Wind. Bis zu acht hintereinander angeordnete Propeller – Verdichterstufen genannt – drehen sich mit maximal 1.400 Umdrehungen in der Minute und verdichten dabei die Luft. Sollen im Windkanal die höchsten Geschwindigkeiten erzeugt werden, dann werden alle acht Verdichterstufen verwendet. Es können aber auch vier Stufen ausgekoppelt werden.

### Pionierleistungen in der Messtechnik

Dass der TWG der Forschungswindkanal für Transsonik in Deutschland ist, liegt daran, dass die Forschung im TWG relativ günstig ist – relativ im Vergleich zu größeren Windkanälen. „Im TWG kostet ein Messtag etwa 25.000 Euro“, so der Windkanalleiter Göttingen und Köln. In größeren Windkanälen ist zum Teil ein Mehrfaches an Investitionen nötig – für Forschungsvorhaben besonders in der Anfangsphase oft ein Handicap. Darum ist es kein Zufall, dass im TWG Meilensteine in der experimentellen Aerodynamik gesetzt worden sind. Hier wurde eines der ersten



Computersimulation der Wirbel um ein Flügel- und ein Leitwerk-Modell, wie sie bei Windböen entstehen können. Solche Modellkonfigurationen sind typisch für den TWG.



Modell eines unbemannten Nurflüglers. Am oberen Bildrand gut sichtbar ist die Aufhängung des Modells.

# Der Transsonische Windkanal Göttingen in Zahlen

Länge	50 Meter
Höhe	12 Meter
Gewicht	Mehrere hundert Tonnen
Messstrecken-abmessungen	1 Meter x 1 Meter x 4,5 Meter
Antriebsleistung	12 Megawatt
Baujahr	1963
Modernisierungen	1992, 2009
Geschwindigkeitsbereich	Mach 0,3–2,2
Kosten	Insgesamt hat der Windkanal einen Wert von 45 Millionen Euro, ein Messtag kostet 25.000 Euro



So sah der Transsonische Windkanal Göttingen bei seiner Fertigstellung 1963 aus. Seitdem gab es mehrere Modernisierungen.

## Fakten

- Der TWG ist der entscheidende Forschungswindkanal Deutschlands für seinen Geschwindigkeitsbereich. Untersuchungsbeispiele sind wiederverwendbare Raumfahrzeuge ähnlich dem Spaceshuttle, elastische Tragflügel für Transportflugzeuge oder leise Hubschrauberrotoren. Für die Grundlagenforschung werden neuartige Steuerungssysteme, der Strömungslärm in Passagierflugzeugen oder der Einfluss von Böen und Turbulenzen auf Flugzeuge untersucht.
- Aufgrund der anfallenden Wärme arbeiten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter auch im Winter meist mit T-Shirts am Windkanal. Im Sommer kann es bis zu 40 Grad warm werden.
- Die Messstrecken werden auf Luftkissen bewegt.
- Die Propeller-Schaufeln, die im Verdichter den Wind erzeugen, werden von derselben Firma hergestellt, die auch die Ventilatoren in Straßentunneln baut.

## Messtechniken

- 6-Komponenten-Kraftmessungen
- Messung von lokalen Oberflächendrücken
- Widerstandsermittlung über Gesamtdruckverlust
- Einlauf- und Durchflussmessungen
- Schatten- beziehungsweise Schlierenoptik, Einzelbild/Video
- Ölbild-Visualisierungen
- Infrarot-Thermografie
- Particle Image Velocimetry (PIV, Felddrücke)
- Pressure sensitive Paint (PSP, flächige Oberflächendrücke)
- Background oriented Schlierensystem (BOSS, Deformation)
- Modelldeformations- und Positionserfassung (IPTC)

Bilder mit druckempfindlichen Farben (Pressure Sensitive Paint – PSP) aufgenommen. Damit ließen sich erstmals flächendeckend und nicht nur punktuell durch Strömung verursachte Druckschwankungen sichtbar machen – „eine Revolution in der Messtechnik“, sagt Bock. Weitere Beispiele sind die Erforschung spezieller transsonischer Flügelprofile, die besonders widerstandsfähig sind.

Die große Antriebsleistung ist der Grund dafür, dass der Windkanal im Betrieb ständig durch Wasser gekühlt werden muss. „Sonst würde er immer heißer werden“, erklärt der Windkanalleiter. Dennoch herrschen an der Anlage ständig Temperaturen von 30 bis 40 Grad Celsius. Außerdem kann es laut werden, weshalb sich die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler während einer Messung in einer geschützten Messwarte aufhalten. Das gesamte Gebäude, in dem sich der Windkanal befindet, ist schallgedämmt.

Der TWG wurde 1963 in Betrieb genommen, um die nach dem Zweiten Weltkrieg wiedererstandene deutsche Luft- und Raumfahrtindustrie zu unterstützen. „Vergleichbare Anlagen gab es damals in Deutschland nicht“, sagt Karl-Wilhelm Bock. 1992 sowie 2009 wurde der TWG umfangreich modernisiert. Dabei sind die Leistungen des Windkanals deutlich ausgebaut worden.

### Raumfahrzeuge und Airbus-Anfänge

Der TWG ist die größte Anlage, die von der Stiftung Deutsch-Niederländische Windkanäle auf dem Gelände des DLR-Standorts in Göttingen betrieben wird. Windkanäle der DNW befinden sich in Amsterdam und Marknesse in den Niederlanden sowie in Göttingen, Braunschweig und Köln. Hauptaufgabe der DNW sind Windkanal-Untersuchungen für die Grundlagenforschung oder im Auftrag der internationalen Luft- und Raumfahrtindustrie. Beispiele für Auftragsmessungen im TWG sind wiederverwendbare Raumfahrzeuge ähnlich dem Spaceshuttle, elastische Tragflügel für Transportflugzeuge oder leise Hubschrauberrotoren. Oft werden hier Details, wie die Lufteinläufe von Airbus-Flugzeugen, eingehend betrachtet. Für die Grundlagenforschung werden neuartige Steuerungssysteme, der Strömungslärm in Passagierflugzeugen oder der Einfluss von Böen und Turbulenzen auf Flugzeuge erforscht. Pro Jahr werden im TWG Messungen im Wert von mehr als 2,5 Millionen Euro durchgeführt. ●



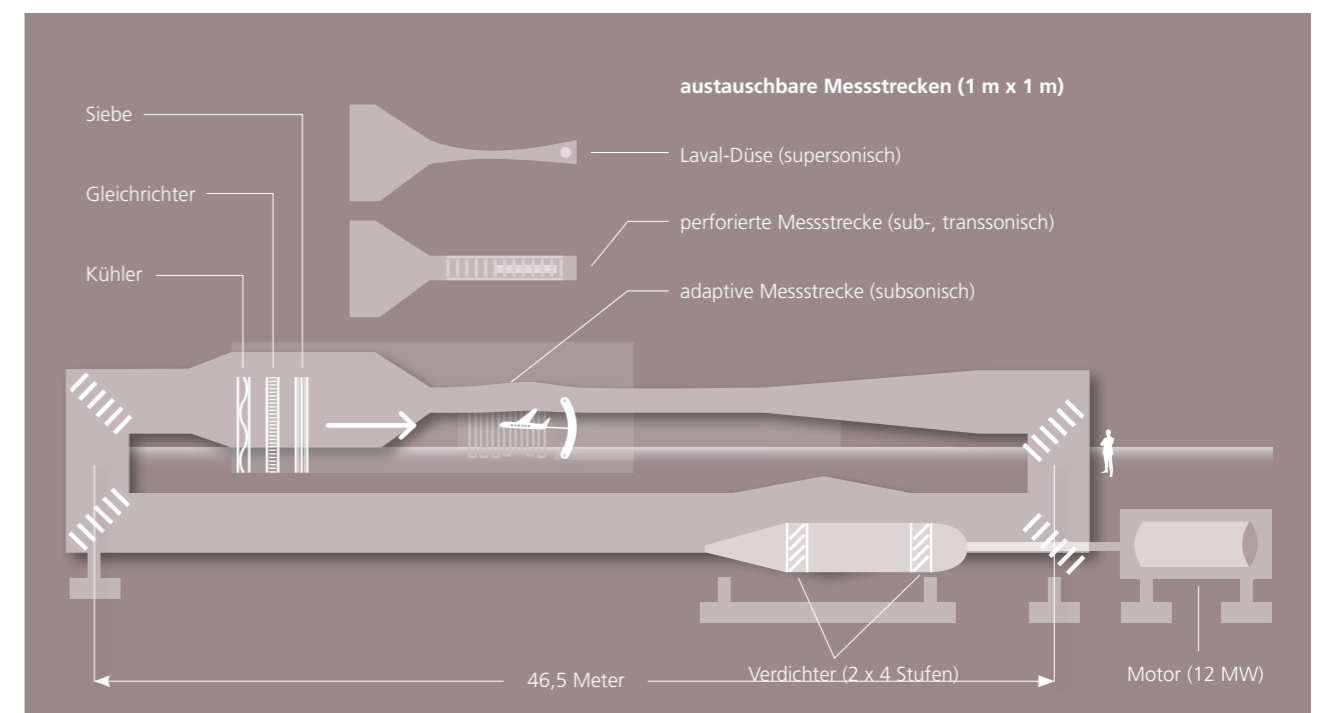
Weitere Informationen:  
[www.DNW.aero](http://www.DNW.aero)



Je nach Bedarf können die Messstrecken des Transsonischen Windkanals auf Luftkissen (unter dem Messstreckenblock in Gelb zu erkennen) ausgewechselt werden



Der Transsonische Windkanal heute: 50 Meter lang und hunderte Tonnen schwer. Von den Anfängen der Airbus-Familie bis zum Eurofighter und A400M – in einem der bedeutendsten Windkanäle Deutschlands wird seit fünf Jahrzehnten für die Luftfahrt geforscht.



Aufbau des Transsonischen Windkanals: Der Motor treibt einen Verdichter an, der die Luft in Pfeilrichtung um das Modell treibt. Zuvor muss sie gekühlt und von Verwirbelungen befreit werden. Dafür sorgen Kühler, Gleichrichter und Siebe. Für unterschiedliche Fragestellungen gibt es verschiedene Messstrecken.

# Motten, Menschen, Monumente

Teil 3 der Serie „Die Windmaschinen“

**Motten, Menschen und Monumente – es gibt fast nichts, was nicht schon im Windkanal untersucht worden ist. Was haben wir dabei von Heuschrecken gelernt? Wie veränderten Windkanalversuche das Skispringen? Und warum sollten Fische, Panzer und weibliche Brüste in einen Windkanal? Dies und mehr im dritten Teil der Serie „Die Windmaschinen“.**

Tests im Windkanal sind nicht nur für Flugzeugkonstrukteure interessant

Von Jens Wucherpfennig

Wer im April 2012 den Kontrollraum des 1-Meter-Windkanals im DLR Göttingen betrat, hörte ein vielstimmiges Zirpen und ungewöhnliches Flattern. Überall waren seltsame Kartons aufgestellt. Aufgeregte Wissenschaftler wiesen darauf hin, die Tür zu schließen, „damit keine entwischt“. Ein Blick in die Kartons verriet, wer gemeint war: Heuschrecken und Moten. Forscher der Universität Oxford hatten sie mitgebracht, um sie mit modernster Messtechnik im Windkanal zu untersuchen. Dafür hatten sie den Kontrollraum kurzerhand in einen überdimensionalen Brutkasten für die Insekten verwandelt. Die Wissenschaftler wollten von den außergewöhnlichen Flugeigenschaften der kleinen Tiere lernen. Die Erkenntnisse bringen Ingenieure dem Bau von Mikro-Flugzeugen näher, die eines Tages ähnlich wie Insekten fliegen sollen.

Tiere haben eine lange Tradition als wissenschaftliche Untersuchungsobjekte – ihre Leistungen zu verstehen und nachzuahmen, war immer schon Ziel von Forschern. So lag es nahe, dass bereits in den Anfängen der Aerodynamik Vögel als Vorbild für Flugzeuge im Windkanal untersucht wurden. So wurden zu Beginn des 20. Jahrhunderts tote Tauben präpariert und auf einer Stange oder an Fäden hängend einer Luftströmung ausgesetzt – mit mäßigem Erfolg. Immer wieder stellten die Wissenschaftler damals fest, dass tote Tiere nicht mehr dieselben aerodynamischen Eigenschaften besitzen wie lebende. Darum gibt es heute Versuche mit lebenden Tauben, Falken oder Eulen, die auf verschiedenste Art und Weise dazu gebracht werden, an den Messgeräten der Forscher vorbeizufiegen – allerdings ohne dass die Tiere dabei Schaden nehmen.

## Reise in die Urzeit

Neben den Vögeln haben es auch die anderen großen Flieger der Natur in den Windkanal geschafft: Flugsaurier – natürlich nur als Modelle. So untersuchte der Paläontologe Prof. Eberhard Frey vom Naturkundemuseum Karlsruhe einen der agilsten Flugsaurier: den Pterosaurier *Ramphorhynchus*. Dabei wurde er vom DLR Göttingen unterstützt. Die Forscher untersuchten vor allem die Aerodynamik und Gleitperformance der Flugsaurier. Auch diese Ergebnisse sollen der Entwicklung neuartiger Klein-Flugzeuge dienen.

Vögel, Flugsaurier und fliegende Insekten im Windkanal – das ist nachvollziehbar. Doch vor einigen Jahren steckten Forscher aus Südkorea Fische in einen Windkanal. Das seltsame Experiment wird verständlicher, wenn man weiß: Es handelte sich erstens um fliegende Fische und zweitens nur um ausgestopfte Exemplare. Diese Tiere zeigen erstaunliche Leistungen. Bis zu 40 Sekunden können sie in der Luft bleiben und dabei eine Geschwindigkeit


von bis zu 70 Kilometern pro Stunde erreichen. Dabei nutzen sie einen besonderen aerodynamischen Trick: den sogenannten Bodeneffekt. In der Nähe der Erd- oder Wasseroberfläche kann sich unter dem Flügel ein Luftpolster bilden, das für zusätzlichen Auftrieb sorgt. Dieses Prinzip wird seit Langem von speziellen Flugzeugen, den Bodeneffektfahrzeugen, genutzt. Doch vielleicht bergen fliegende Fische noch einiges mehr an nützlichen Phänomenen ...

## Wie weiter fliegen mit dem Ski?

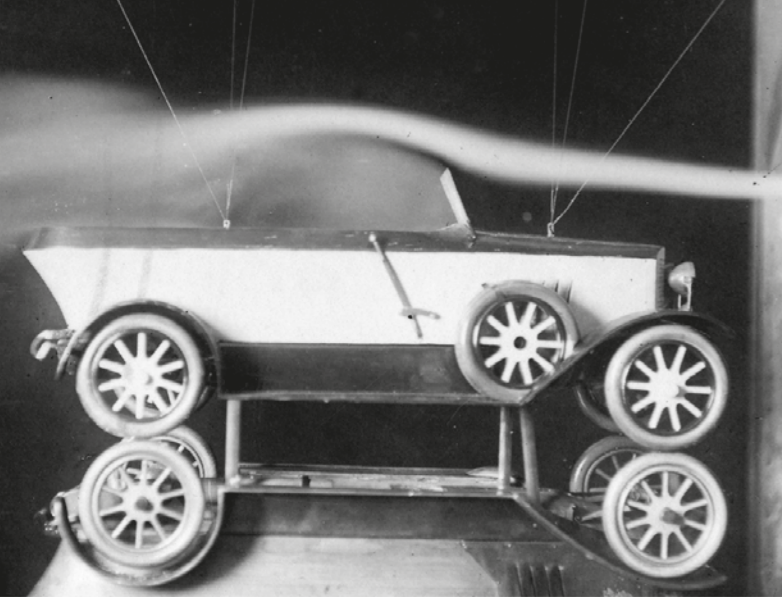
Werden Menschen in einem Windkanal Luftströmen ausgesetzt, so geht es dabei allerdings nicht um Erkenntnisse, die zu besseren Flugmaschinen führen sollen. Bei den ersten Versuchen mit Menschenpuppen sollte herausgefunden werden, wie der Mensch selbst möglichst weit fliegen kann. Der Schweizer Flugzeugingenieur Reinhard Straumann erkannte als erster bereits 1924 den entscheidenden Einfluss der Luft als tragenden Faktor beim Skispringen. Ab 1926 beschäftigte er sich wissenschaftlich mit dem Wintersport und untersuchte die Beziehung von Geschwindigkeit, Technik, Körperhaltung und Schanzprofilen. Er führte hierzu Messungen bei Sprungveranstaltungen durch und experimentierte mit Springerpuppen im Göttinger Windkanal des DLR-Vorgängers AVA (in der Literatur übrigens stets falsch als Windkanal der Uni Göttingen angegeben). Er veröffentlichte 1926/27 seine Theorie über die aerodynamisch günstigste Körperhaltung.

Straumann kam zu der Erkenntnis, dass der Springer die besten Weiten erzielen kann, wenn er eine Flughaltung annimmt, die dem aerodynamischen Prinzip von Flugzeugtragflächen nachempfunden ist. Dabei segeln die Springer in weiter Körpervorlage parallel zu ihren 2,60 Meter langen und bis zu sechs Kilogramm schweren Sprung-Ski mit angelegten Armen. Nur die Hände sollen wie Fischflossen im Wasser die Richtung korrigieren: daher die Bezeichnung Fisch-Stil. Straumanns Theorie wurde jedoch erst zwanzig Jahre später praktisch umgesetzt. Ab 1953 etablierte sich dieser Stil bei der ersten Vierschanzentronee. Bis in die Achtzigerjahre hinein dominierte, mit leichten Variationen, die nach vorne gestreckte Flughaltung mit paralleler Skiführung. Im Zusammenhang mit dem Ende der Achtzigerjahre etablierten V-Stil wird der Fisch-Stil heute meistens wegen der parallelen Skihaltung als Parallel-Stil bezeichnet. Einer der erfolgreichsten deutschen Skispringer, Jens Weißflog, erzielte seine Siege mit diesem Stil.

Meistens, wenn Menschen in einem Windkanal untersucht werden, geht es um Sport. Sowohl die Rennrodler als auch die Bob- und Skifahrer des deutschen Teams sind 1974 in



Sportler im Windkanal: Der querschnittsgelähmte Skifahrer Georg Kreiter fährt seine Wettbewerbe auf einem sogenannten Monoski. Welche Körperhaltung dabei optimal ist, wurde von Forschern des DLR Göttingen im Windkanal der TU Hamburg-Harburg untersucht.



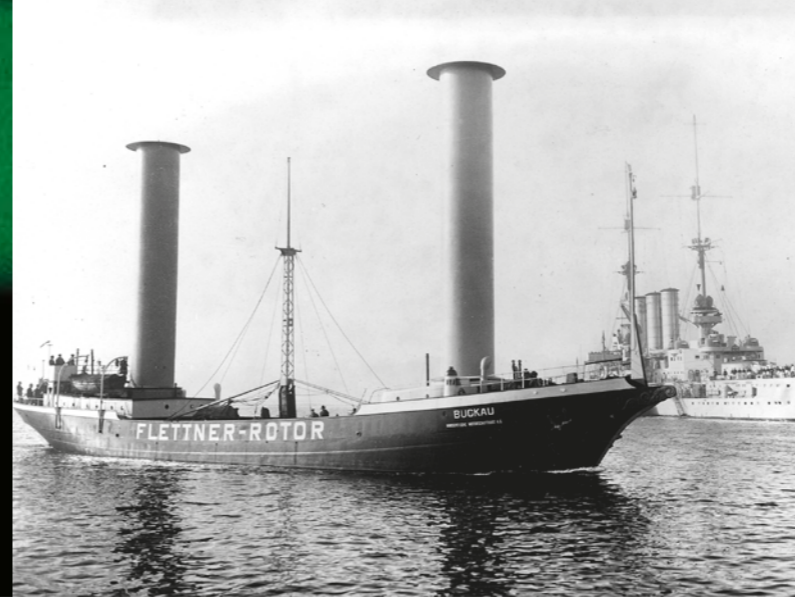
Oben: Die Aerodynamik eines Kraftfahrzeugs wird am Modell untersucht. Rauch macht die Luftströmung sichtbar (1921).

Unten: Auch für Hochgeschwindigkeitszüge bringen Untersuchungen im Windkanal wichtige Erkenntnisse. Hier ein Modell aus dem DLR-Projekt Next Generation Train (NGT).



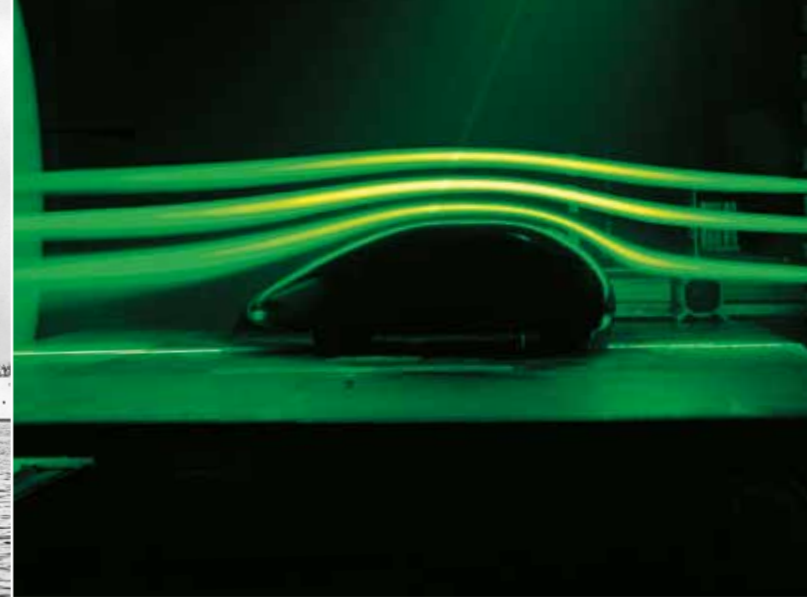
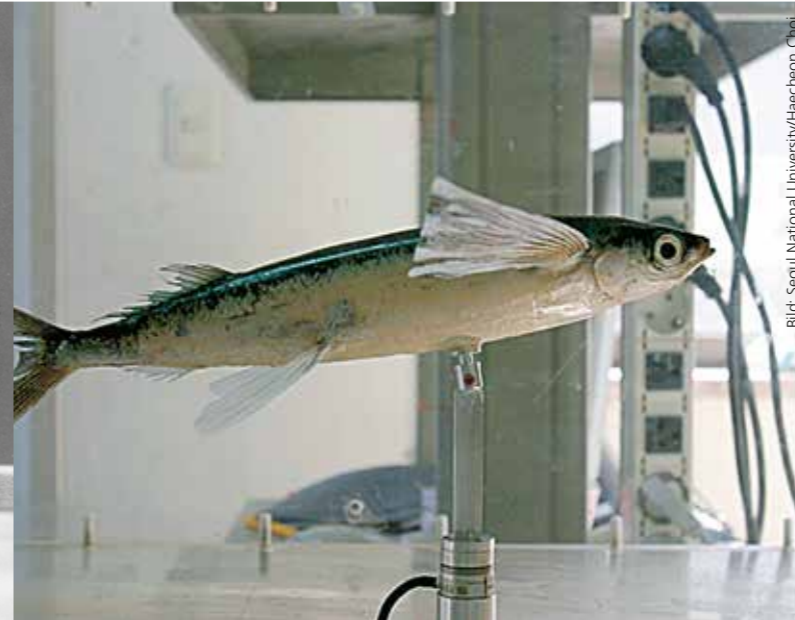
Oben: Heuschrecken sind hervorragende Flieger und können als Vorbild für Mini-Flugzeuge dienen. Sie wurden deshalb im DLR Göttingen im Luftstrom untersucht.

Unten: Lokomotiven-Modelle in Windkanalversuchen führten zu den seitlich angebrachten Betz-Bleichen, die den Rauch am Führerhaus vorbeileiten (1922)



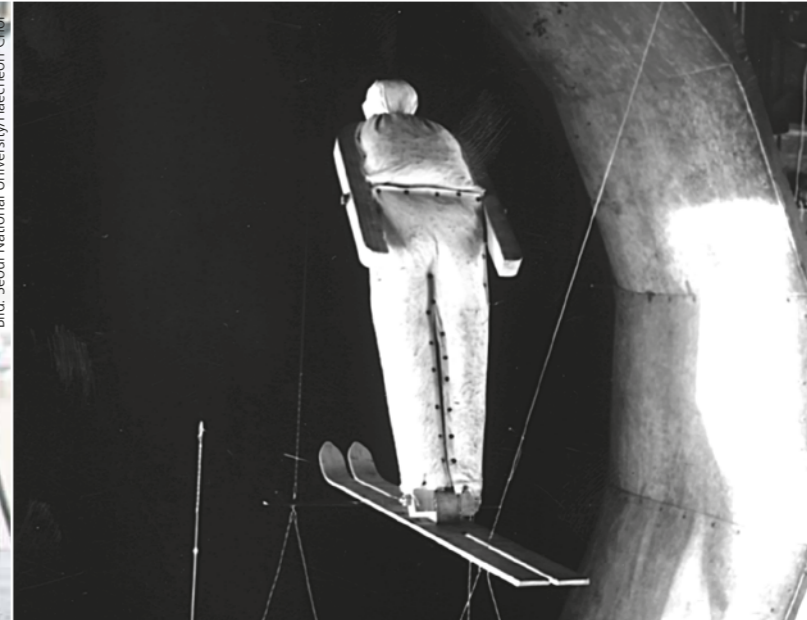
Oben: Das Flettner-Rotorschiff Buckau auf seiner ersten Versuchsfahrt im Kieler Hafen 1924. Untersuchungen zur besseren Nutzung des Windes für seinen Antrieb fanden auch in Windkanälen statt.

Unten: Ein ausgestopfter fliegender Fisch im Windkanal an der Seoul National University in Korea



Oben: Der sogenannte Schlör-Wagen wurde 1939 wie ein Flügel auf Rädern gebaut. Seine ausgefeilte Aerodynamik ist im Windkanal sichtbar.

Unten: Tests mit einem Skispringer-Modell im Parallel-Stil in einem Windkanal des DLR-Vorgängers AVA Göttingen (1927)



Vorbereitung auf die Olympischen Winterspiele in einem Göttinger Windkanal untersucht worden – darunter Christa Kinshofer und Rosi Mittermaier. Das Wissen um die aerodynamisch günstigste Körperhaltung versprach, einige Zehntel-Sekunden schneller zu sein als die Konkurrenz. Heutzutage sind solche Windkanaltests für viele Sportler nichts Ungewöhnliches mehr. Doch es waren wieder einmal Göttinger Forscher beteiligt, als sich zum ersten Mal Sportler mit körperlichen Behinderungen in einem Windkanal auf ihre Wettkämpfe vorbereiteten. 2010 waren bei den Wissenschaftlern Mitglieder der deutschen Paralympics-Nationalmannschaft im Ski Alpin zu Gast. Dabei ging es darum, den Luftwiderstand, den Auftrieb der Ski und die Kippmomente – also Kräfte, die einen Fahrer nach hinten oder vorne drehen können – zu messen.

Dass Flugzeuge und Autos in Windkanälen erforscht werden, ist nachzuvollziehen. Auch Raumschiffe und Hochgeschwindigkeitszüge auf ihre aerodynamischen Fähigkeiten zu untersuchen, ist verständlich. – Warum also nicht auch Schiffe in Windkanälen vermessen? Naheliegender ist dies vor allem bei einem Flugzeugträger. Denn Start und Landung auf einem schwimmenden Flugplatz stellen besondere Ansprüche

an die Aerodynamik. An einem Modell des geplanten deutschen Flugzeugträgers Graf Zeppelin wurden 1937 im Göttinger Windkanal Fädchen-Messungen der Aerodynamik landender Flugzeuge durchgeführt. Der Flugzeugträger Graf Zeppelin wurde allerdings nie in Dienst gestellt – der Kriegsverlauf verhinderte seinen Einsatz, 1947 versenkten ihn die Sowjets bei Zielversuchen.

#### Das Rotorschiff des Anton Flettner

Eine äußerst ungewöhnliche Schiffskonstruktion verdankt sogar ihren Antrieb einer speziellen aerodynamischen Lösung und wurde deshalb im Windkanal untersucht: Das Rotorschiff. Dabei handelt es sich um ein Schiff, das mit sogenannten Flettner-Rotoren anstelle von Segeln zusätzlich zu einem herkömmlichen Hauptantrieb bewegt wird. Flettner-Rotoren sind rotierende Zylinder, an denen der Seitenwind so vorbeiströmt, dass an der Vorderseite ein Unterdruck entsteht. Dieser wiederum zieht das Schiff vorwärts. Der Erfinder Anton Flettner baute 1924 das erste Rotorschiff, die Buckau, die 1926 den Atlantik überquerte und für viel Aufsehen sorgte. Flettner kam auf die Idee durch Vorarbeiten des Göttinger „Vaters der Aerodynamik“ und Gründers der ersten Vorgängerinstitution des DLR, Ludwig Prandtl.

Prandtl wollte die drehenden Zylinder ursprünglich als Ersatz für Flugzeugflügel einsetzen – was sich aber als nicht praktikabel erwies. Flettner griff diese Idee dann für seinen Schiffsantrieb auf. Viele Tests der Rotoren und des Schiffmodells in Göttinger Windkanälen gingen der Jungfernfahrt der Buckau voraus.

#### Brücken? – Auch Brücken!

Auch Objekte, die sich gar nicht bewegen sollen, werden in Windkanälen untersucht: Bauwerke. Wie wichtig dies ist, zeigt das Beispiel der Tacoma-Narrows-Brücke. Das monumentale Bauwerk im US-Staat Washington galt bei ihrer Fertigstellung im Juli 1940 als eine der größten der Welt. Bereits im November desselben Jahres stürzte sie auf dramatische Weise ein, eindrucksvoll in Foto und Film festgehalten. Die Ursache lag in der Aeroelastik, der Wechselwirkung zwischen Aerodynamik und Struktur. In Göttingen wurde die Aeroelastik maßgeblich zur Wissenschaft entwickelt. Immer wieder halfen DLR-Forscher, Brücken und andere Bauwerke auf ihre aeroelastische Sicherheit zu untersuchen. Ostseebrücken wurden ebenso wie Windkraftanlagen oder die Kuppel des Münchener Hauptbahnhofs als Modelle im Windkanal getestet.

Seit mehr als 100 Jahren sind immer wieder die unterschiedlichsten Lebewesen, Menschen und Objekte Gegenstand von Untersuchungen im Windkanal gewesen. Die eingangs erwähnten Panzer sollten übrigens nicht aerodynamisch optimiert werden. Es ging um die Frage, wie die Klimaanlage der Fahrzeuge möglichst nicht die eigenen Abgase ansaugt. Manchmal allerdings lehnen die Forscher eine Anfrage auf Windkanalnutzung ab. Als vor einigen Jahren für ein Kunstprojekt eine Form der weiblichen Brust in einem Göttinger Windkanal inszeniert werden sollte, lautete die Antwort: Negativ, im Windkanal wird geforscht – an einem besseren Verständnis der Welt und was wir daraus lernen können. ●

#### Weitere Informationen:

DLR.de/100jahre/  
s.DLR.de/2vj2  
s.DLR.de/3s18  
s.DLR.de/176e





# In eisigem Wind

Teil 4 der Serie „Die Windmaschinen“

Die niedrigstehende Herbstsonne dringt durch den Morgennebel, der sich mit weißem Dampf mischt und einer achteckigen Betonkonstruktion ein mystisches Ambiente verleiht. Schon mancher Besucher des DLR Köln fragte – halb rätselnd, halb beeindruckt –, um was für eine Anlage es sich bei der Stahlbetonröhre im Norden des Standorts denn handele. Die Antwort ist schnell gegeben: der Kryo-Kanal Köln (KKK). Die Erklärung bedarf einiger Worte mehr.

## Der Kryo-Kanal Köln der DNW

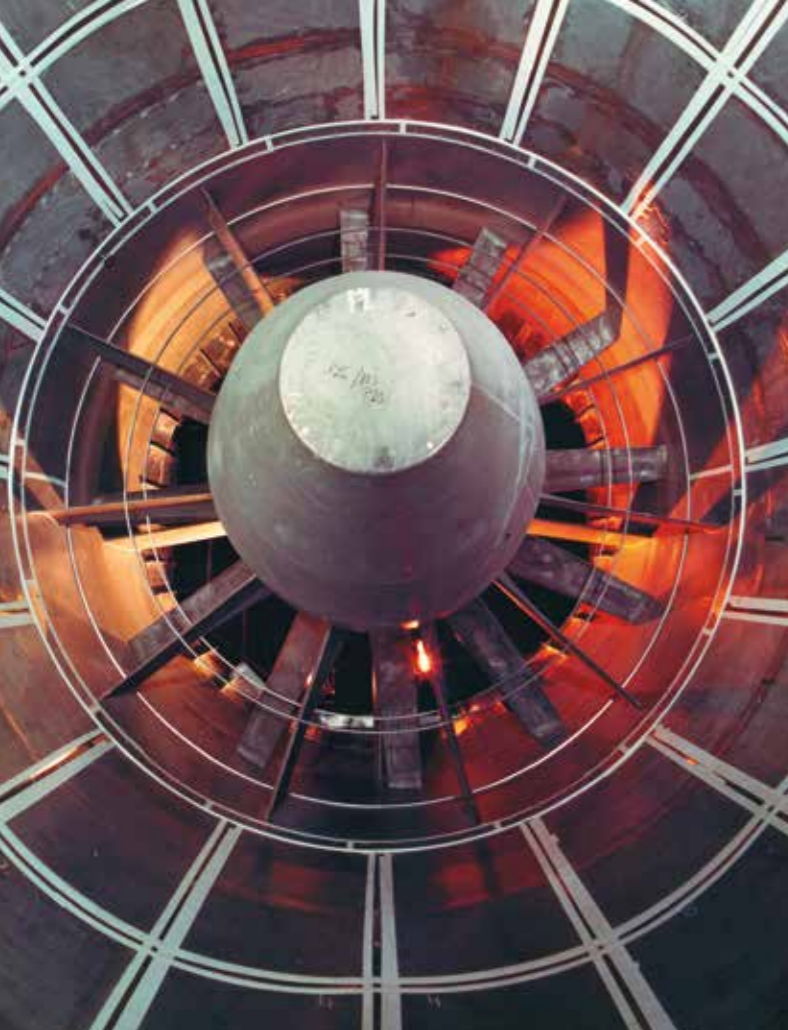
Von Michel Winand

Der kryogene Unterschallwindkanal ist einer von weltweit drei Windkanälen für aerodynamische Untersuchungen in der Luft- und Raumfahrt sowie der Verkehrsforschung und wird von der Stiftung Deutsch-Niederländische Windkanäle (DNW) betrieben. Die DNW ist eine vom DLR und dem Dutch National Aerospace Laboratory (NLR) gegründete gemeinnützige Stiftung nach niederländischem Recht. 1962 nahm der Kanal als erste Versuchsanlage am neuen Standort der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) seinen Betrieb auf. In seinen 52 Jahren hat der Windkanal an der Entwicklung von vielen Generationen von Luftfahrzeugen mitgewirkt: Der Alpha Jet wurde hier ebenso getestet wie der Jet-Trainer MAKO und der Airbus A380. Doch auch Schienenfahrzeugmodelle wie der Next Generation Train durchlaufen hier ihre aerodynamische Erprobung. Die Deutsche Bahn zertifizierte den Kryo-Kanal Köln dafür, Messungen für die Abnahme von Hochgeschwindigkeitszügen durchzuführen. Namhafte Industrieunternehmen wie Bombardier, Siemens und Alstom sind genauso Kunden beim kryogenen Windkanal der DNW wie die Solarforscher des DLR, die hier den Einfluss von Wind auf spezielle Solar-Receiver von Turmkraftwerken testen.

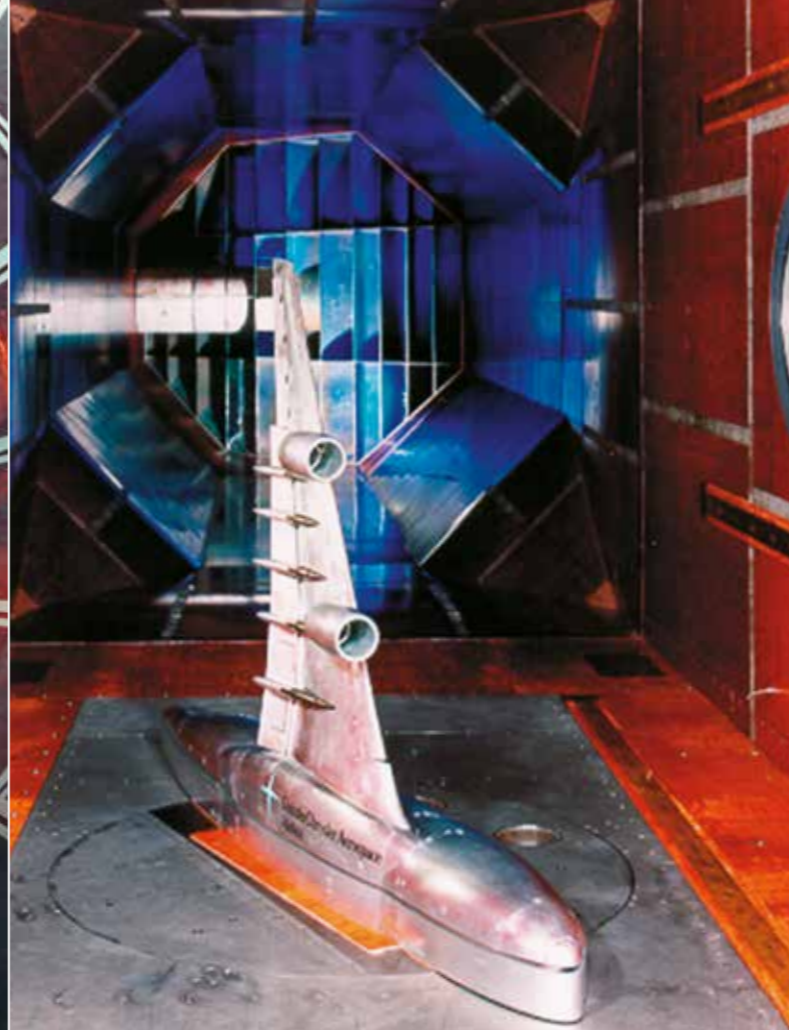
### Altbewährte und moderne Technik

Ein neues Aufgabengebiet ist es, Windkraftprofile zu untersuchen. Durch die immer größer werdenden Offshore-Windkraftanlagen werden auch hier hohe Reynoldszahlen bei kleiner Machzahl erreicht. (Die Reynoldszahl beschreibt das Verhältnis von Trägheitskraft zur Reibungskraft, die Machzahl gibt das Verhältnis zur Schallgeschwindigkeit an.) Hier ist aerodynamisches Fachwissen gefragt, das aus der Luftfahrtforschung stammend im DLR eine lange Geschichte hat.

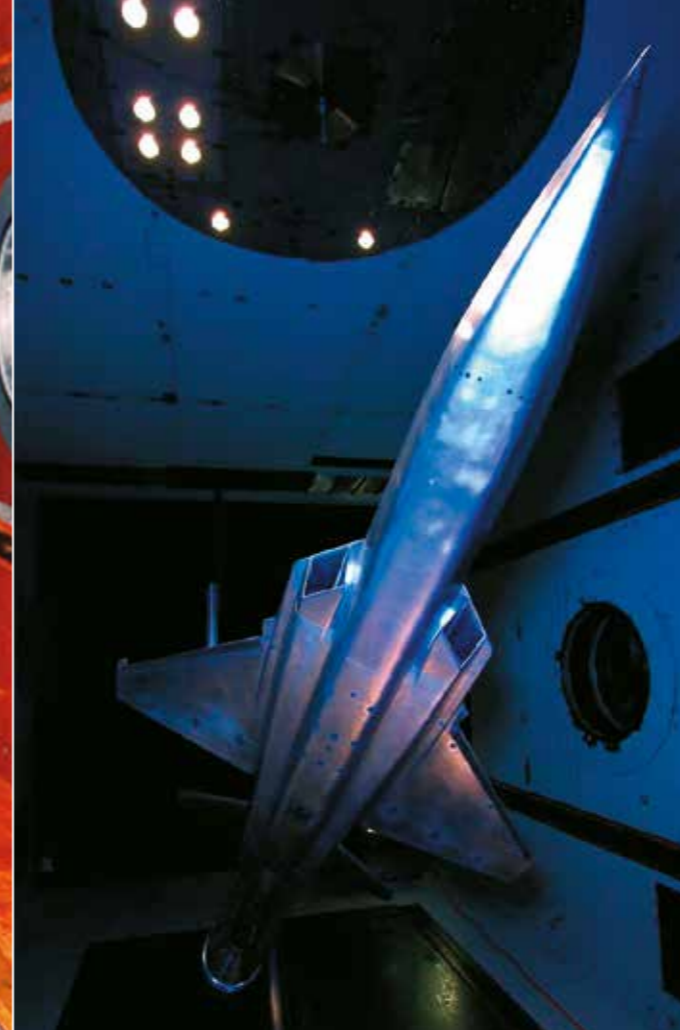
Dem Konstruktionsprinzip nach ist der KKK ein Umlaufkanal, wie ihn der Göttinger Wissenschaftler Ludwig Prandtl bereits Anfang des 20. Jahrhunderts ersann. Der Windkanal ist 135 Meter lang, verfügt über eine geschlossene Messstrecke und erreicht Geschwindigkeiten bis zu 0,38 Mach, was rund 420 Kilometern in der Stunde entspricht. Soweit nichts Besonderes – zumindest nicht in der Welt der Windkanäle. Das Besondere des Kanals liegt im ersten „K“. Die Temperatur der durch den Kanal strömenden Luft, des sogenannten Kanalgases, kann



Der riesige Rotor erzeugt Windgeschwindigkeiten von rund 490 Kilometern pro Stunde



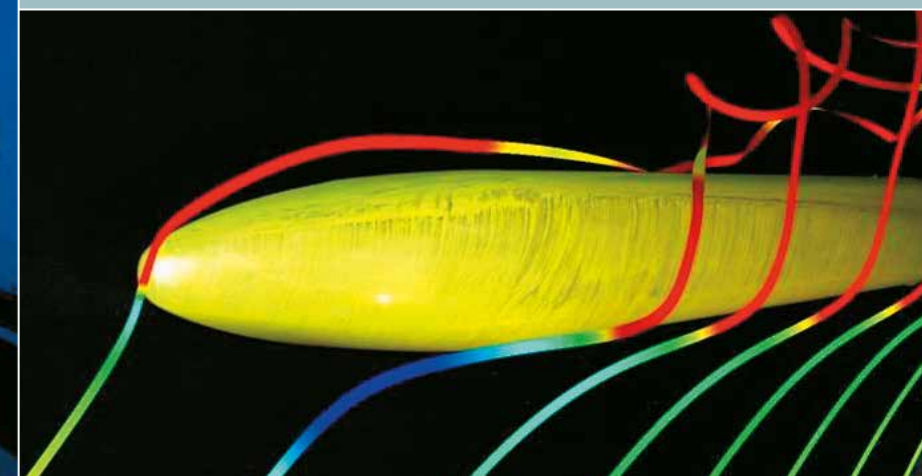
Halbmodell eines Airbus A380 im Windkanal – abhängig von der Fragestellung reichen schon Teile der Gesamtstruktur für präzise Messungen aus



Das Modell des Jet-Trainers MAKO zeigt, wie variabel die Strömung bei verschiedenen Flugmanövern im Windkanal untersucht werden kann



Mit diesem Zugmodell aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff messen die DLR-Wissenschaftler unter anderem den Lärm eines Hochgeschwindigkeitszuges



Computersimulation des Effekts von Seitenwind auf ein Zugmodell. Bei Windkanaltests werden auch die bei numerischen Simulationen verwendeten Daten überprüft.

zwischen 300 und 100 Kelvin variiert werden. Dies entspricht der Spanne von plus 27 bis minus 173 Grad Celsius. Erreicht werden die extremen Minusgrade durch das Einspritzen von flüssigem Stickstoff. Dieser flüssige Stickstoff wird in großen Tanks neben dem Gebäude gelagert. Kommt er zum Einsatz, sorgt er für die eingangs beschriebene, zuweilen pittoreske Stimmung um das Gebäude.

Bei der dann erreichten tiefen Temperatur des Kanalgesetzes lässt sich die Reynoldszahl steigern. Vereinfacht gesagt, werden die Luftmoleküle durch die extreme Kälte gefroren, wodurch sich die freie Lauflänge der Moleküle verkleinert. So lässt sich das Größenverhältnis der Luftmoleküle an den Maßstab der Windkanalmodelle anpassen. Im Ergebnis erhalten die Wissenschaftler hochpräzise Messergebnisse unter realitätsnahen Bedingungen. Denn im Gegensatz zu den nicht kryogenen Windkanälen können im KKK die Einflüsse von Mach- und Reynoldszahl auf die aerodynamischen Werte der Windkanalmodelle separat untersucht werden.

„Die Technik des Kanals ist aufwändig: Allein für das Abkühlen des Kanalgesetzes, das Reduzieren seiner Feuchte und das Herunterkühlen der Dämmschichten der Anlage werden etwa 80 Tonnen Stickstoff benötigt. Um den Windkanal wirtschaftlich betreiben zu können, arbeiten wir im Schichtbetrieb“, sagt Dipl.-Ing. Rüdiger Rebstock, Leiter des Kryo-Kanals Köln. Durch den Schichtbetrieb erreicht Rebstock mit seinen Mitarbeitern auch eine hohe Effizienz. Bis zu 15 verschiedene Versuchskonfigurationen können in einer Woche unter eiskalten Bedingungen getestet werden.

### Anspruchsvolle Messverfahren

Bei diesen eiskalten Tests kommt hochmoderne Messtechnik zum Einsatz. Zur Dokumentation der aerodynamischen Eigenschaften der Windkanalmodelle werden neben herkömmlichen Kraft- und Druckmessverfahren (beispielsweise Dehnmessstreifen) auch Hitzdrahtverfahren (temperaturabhängige Messung von elektrischen Widerständen zur Ermittlung der Strömungsgeschwindigkeit) und Heißfilmverfahren (Luftmassenmessung) eingesetzt. Zur Bestimmung des Übergangs von laminarer zu turbulenter Strömung auf Flügelprofilen wird neben der Infrarotmesstechnik das sogenannte TSP (Temperature Sensitive Paint) verwendet. Hierbei wird die Temperaturveränderung, die beim Strömungsumschlag entsteht, durch Farbe sichtbar gemacht. Diese Information ist wichtig, um die Vergleichbarkeit von Rechenverfahren und numerischer Simulation zu überprüfen. Neue laser-optische Messverfahren wie die Particle Image Velocimetry (PIV) vervollständigen das Portfolio der Einrichtung. Bei den PIV-Messungen werden dem Kanalgas Partikel hinzugefügt, die in schneller Abfolge mit einem pulsierenden Laser beleuchtet und von einer Kamera fotografiert werden. Anhand der veränderten Position der einzelnen Partikel lassen sich die Bewegungsrichtung und die Geschwindigkeit der Strömung ermitteln.

Die extremen Minustemperaturen in der Messstrecke stellen besondere Anforderungen an die Messtechnik und auch an die Windkanalmodelle selbst. Für die Modelle können nur Materialien verwendet werden, die auf Temperaturschwankungen nicht mit einem übermäßigen Schrumpfen oder Ausdehnen reagieren.

Diese Effekte würden die Aerodynamik und somit die Messergebnisse verfälschen. Ein großer Vorteil des Kältekanals allerdings ist, dass auch Modelle aus speziellen Aluminiumlegierungen, Stahl oder kohlefaserverstärktem Kunststoff eingesetzt werden können. Denn die auf solche Modelle wirkende Drucklast ist im Kryo-Kanal geringer als in Windkanälen, die unter Druck betrieben werden.

### Mit dem Zug im Kanal

Von den Vorzügen des KKK versprochen sich auch die Bahnforscher im DLR etwas: Sie testeten Modelle eines künftigen Hochgeschwindigkeitszuges im eisigen Wind. „Die Möglichkeiten des Kryo-Kanals waren für uns wichtig, weil nur in ihm die für uns maßgebliche Reynoldszahl erreicht werden kann“, sagt Dr. Joachim Winter, Leiter des DLR-Projekts Next Generation Train (NGT). „Im KKK haben wir gelernt, dass wir zur Modellierung der Strömungen am NGT nicht nur den Triebwagen brauchen, sondern auch den Mittelwagen, also einen Waggon“, resümiert Winter. In Köln fanden er und seine Kollegen nicht nur eine ausreichend lange Messstrecke, sondern – nach Verstärkung des Windkanalrotors – auch die der Realität am nächsten kommenden Bedingungen.

Vom Bezug der Testobjekte zu unserem Alltag ist allerdings kaum etwas zu ahnen, wenn man an dem fensterlosen Beton-Koloss vorbeigeht. Schon gar nicht, wenn er sich von Zeit zu Zeit in eine mystische Dampfwolke hüllt. ●

### Gute Nachbarschaft

Der Kryo-Kanal ist mit seinem besonderen Leistungsspektrum in Köln in guter Gesellschaft: Auf dem Gelände des DLR befinden sich außerdem die Über- und Hyperschallkanäle sowie der lichtbogenbeheizte Windkanal des DLR-Instituts für Aerodynamik und Strömungstechnik. Kleinere Versuchskanäle werden vom Institut für Antriebstechnik betrieben, während im benachbarten Europäischen Transschall Windkanal kryogene Bedingungen im Überschallbereich erzeugt werden können.

### Der Kryo-Kanal Köln in Zahlen

Kanallänge .....	135 Meter
Messstrecke .....	2,4 x 2,4 x 5,4 Meter
Temperatur .....	100 bis 300 Kelvin
Antriebsleistung .....	1,4 Megawatt
Baujahr .....	1961
Geschwindigkeit .....	bis Mach 0,4

# Ballons für den Mars und Autos auf Eis

Zahl und Vielfalt von Windkanälen sind einfach verblüffend. Im fünften Teil der Serie Windkanäle werden einige besonders extreme Beispiele vorgestellt: die größten, kältesten, verrücktesten – und einer, der als Kulisse für einen Hollywood-Film diente ...

## Teil 5 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpennig

Riesige Dimensionen, eine Mischung aus Rundungen und eckigen Formen – Windkanäle können architektonisch sehr interessant sein. Kein Wunder, dass ein Windkanal bereits in einem Science-Fiction-Film als Kulisse für eine futuristische Welt diente. Es handelt sich um den Hollywood-Blockbuster *Aeon-Flux*, eine Comic-Verfilmung aus dem Jahr 2005 mit Oskar-Preisträgerin Charlize Theron in der Hauptrolle. Der Film spielt im Jahr 2415. Der Großteil der Menschheit wurde im Jahr 2011 von einer heimtückischen Seuche getötet. Die fünf Millionen Überlebenden fristen ihr Dasein in der letzten verbliebenen, von einer Mauer umgebenen Stadt Bregna. Gedreht wurde in Berlin – unter anderem im Großen Windkanal des Aerodynamischen Parks in Berlin-Adlershof. Die röhrenförmige Anlage mit einem Durchmesser zwischen 8,5 und 12 Metern wurde von 1932 bis 1934 gebaut. Das heute sanierte Baudenkmal wird, da es statisch nicht sehr belastbar ist, nur selten und ausschließlich für kleine Personengruppen geöffnet. Der Große Windkanal steht als Teil des früheren Standorts der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt unter Denkmalschutz.

Der kälteste Windkanal Europas steht in Köln und wird von den Deutsch-Niederländischen Windkanälen (DNW) betrieben, einer Tochtergesellschaft des DLR und der holländischen Partnerorganisation NLR. Im Kryo-Kanal Köln, kurz KKK, kühlt flüssiger Stickstoff die Temperatur bis auf minus 173 Grad Celsius ab, damit Modelle von Flugzeugen oder Schienenfahrzeugen untersucht werden können. Den KKK stellte das DLR-Magazin 144 (Dezember 2014) im Teil 4 seiner Windkanalserie näher vor.

### Von ganz speziellem Wiener Charme

Ganze Autos, Hubschrauber und sogar Züge können in einer einzigartigen Anlage in Österreich untersucht werden: im Klima-Wind-Kanal (Wien), KWK. Er ist Teil von Rail Tec Arsenal – eine international tätige Prüfstelle für Klimatests an Schienen- und Straßenfahrzeugen. Den Kern dieses Prüfzentrums bilden zwei getrennte Klima-Wind-Kanäle, in denen unabhängig voneinander Fahrzeuge unter extremen Witterungsbedingungen getestet werden können. Die Dimensionierung der Versuchsanlage macht dieses Testzentrum weltweit einzigartig: Der große Kanal ist 100 Meter lang, der kleine 31 Meter. Die erzielbaren physikalischen Parameter (Temperaturen von minus 50 bis plus 60 Grad Celsius, Windgeschwindigkeiten bis 300 Kilometer pro Stunde), die Möglichkeit, nicht nur jedes denkbare Klima zu erzeugen, sondern auch Fahrtverläufe (Tunnelfahrten, Stadtfahrten etc.) zu simulieren, suchen ihresgleichen.

Seit 1. Januar 2003 ist dieser größte Klima-Wind-Kanal der Welt in Betrieb. Rail Tec Arsenal pachtet die Anlage über die geplante Nutzungsdauer von 35 Jahren und sorgt für die internationale Vermarktung und den Betrieb. An der Betreibergesellschaft sind alle großen europäischen Schienenfahrzeughersteller beteiligt. Ziel ist es, Sicherheit, Komfort und Zuverlässigkeit bei Schienen- und Straßenfahrzeugen zu optimieren.

Im März 2014 wurde im Klima-Wind-Kanal Wien zusätzlich eine Vereisungseinrichtung für Luftfahrzeuge eröffnet. Wo sonst vor allem Schienen- und Straßenfahrzeuge aus aller Welt unter extremen Klimabedingungen getestet werden, steht der Luftfahrtindustrie nun auch ein leistungsfähiger Icing Wind Tunnel für Zulassungstests zur Verfügung. Wenn ein Luftfahrzeug hohe Wolkenschichten durchfliegt, gefrieren unterkühlte Wassertröpfchen schlagartig und bilden dann binnen weniger Minuten eine zentimeterdicke Eisschicht an kritischen Komponenten wie Triebwerken, Rotoren, Tragflügeln oder Sensoren (Lesen Sie dazu auch den Magazin-Beitrag ab Seite 20.). Für die Zulassung dieser Bauteile und des gesamten Luftfahrzeugs ist daher der Nachweis zu erbringen, dass die vorgesehenen Schutzmaßnahmen gegen Vereisung ausreichen und die Eisbildung die Flugsicherheit nicht beeinträchtigt. Die Luftfahrtindustrie benötigt für die Entwicklung, Erprobung und Zulassung ihrer Produkte Anlagen, in denen Vereisungstests durchgeführt werden können. Mit dem mobilen Icing Rig lässt sich der längste Klima-Wind-Kanal der Welt in den weltweit größten Vereisungs-Windkanal für Luftfahrzeuge umrüsten.

Grafische Darstellung des Klima-Wind-Kanals Wien: modernster Windkanal nach alter Göttinger Bauart.

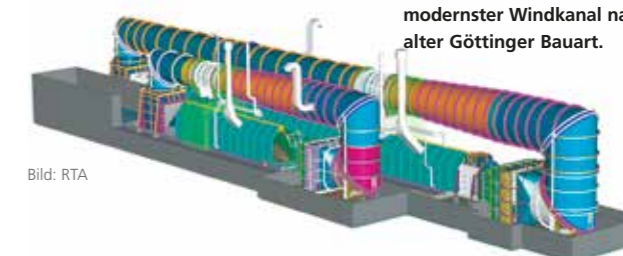


Bild: RTA

### Wolkensimulation zu ebener Erde

Für die Zulassungstests müssen das Durchfliegen unterschiedlicher Wolkenarten und die dort auftretenden Vereisungsbedingungen bei minus zwei bis minus dreißig Grad Celsius und

Schauplatz eines Hollywood-Blockbusters: Im großen Windkanal des Aerodynamischen Parks in Berlin-Adlershof wurde 2005 ein Science-Fiction-Film gedreht.

Bild: Steffen Zahn



Bild: MAN



Bild: NASA/JPL-Caltech

Bild: NASA/JPL-Caltech

GANZE LKW, HUBSCHRAUBER UND Sogar Züge können im Klima-Wind-Kanal (KWK) in Wien, dem modernsten Klima-Wind-Kanal der Welt, untersucht werden. Er ist Teil von Rail Tec Arsenal, einer international tätigen Prüfstelle für Klimatests an Schienen- und Straßenfahrzeugen. Den Kern dieses Prüfzentrums bilden zwei getrennte Klima-Wind-Kanäle, in denen unabhängig voneinander Fahrzeuge unter extremen Witterungsbedingungen getestet werden können.

Seit 1. Januar 2003 ist der KWK in Betrieb. Rail Tec Arsenal pachtet die Anlage für 35 Jahre. An der Betreibergesellschaft sind alle großen europäischen Schienenfahrzeughersteller beteiligt.

Bild: RTA



Der größte Windkanal der Welt steht in Kalifornien. In ihm hat selbst ein Flugzeug in Originalgröße Platz.

In dem amerikanischen Windkanal wurden nicht nur Flugzeuge, sondern auch Objekte aus der Raumfahrt untersucht, wie der Landefallschirm, der 2012 den Mars-Rover Curiosity sicher auf den Mars brachte.

einen Propeller mit 13 Meter Durchmesser an, der die Luft bis zu 222 Kilometer pro Stunde schnell am Testobjekt vorbeiströmen lässt. Die Messstrecke ist 21 Meter lang und zehn Meter breit. Ursprünglich nur für die Forschung von General Motors genutzt, kann der Windkanal seit einigen Jahren auch von privaten Kunden wie Rennfahrern in Anspruch genommen werden. Kosten: 2.000 Dollar pro Stunde.

Während Privatpersonen aufgrund der hohen Kosten und Sicherheitsbestimmungen normalerweise einen Windkanal nicht nutzen können, greift seit den Neunzigerjahren des vergangenen Jahrhunderts ein neuer Trend um sich: der alte Menschheits Traum, frei zu fliegen. Möglich machen dies „Bodyflying“- oder „Indoor Skydiving“-Anlagen. Dafür entstand eine spezielle Windkanal-Art: der Vertikalwindtunnel (VWT). Dabei handelt es sich um einen Windkanal, der – im Gegensatz zu einem traditionellen Windkanal für aerodynamische oder aeroakustische Messungen – über eine vertikale Messstrecke (Flugkammer) verfügt. Die ersten vertikalen Windkanäle wurden als sogenannte Trudeltürme im Bereich der Luftfahrtforschung eingesetzt. Heute nutzt man Vertikalwindtunnel vorwiegend im Sport- und Freizeitbereich als Trainingsanlagen für Fallschirmspringer.

Wie unterschiedlich diese Windkanäle auch sein mögen, fast alle basieren auf dem vor mehr als 100 Jahren von Ludwig Prandtl entwickelten Windkanal Göttinger Bauart. ●

mit Tröpfchengrößen von 15 bis 40 Mikrometern simuliert werden. Eine der größten Herausforderungen dabei ist es, die Wassertröpfchen bei Minustemperaturen flüssig zu halten, wie dies auch in hoch liegenden Wolken der Fall ist. Erreicht wird diese „Wolkenbildung zu ebener Erde“ durch eine aufwändige Aufbereitung von Wasser und Druckluft und eine komplexe Steuerung. Der Windkanal erlaubt Vereisungstests bis zu einer Geschwindigkeit von knapp 300 Kilometern pro Stunde bei einem Vereisungsquerschnitt von 8,75 Quadratmetern. Damit lassen sich kritische Eisansammlungen an Triebwerken, Rotoren oder Tragflügeln von Hubschraubern oder auch Kleinflugzeugen unter realen Flugbedingungen untersuchen.

Aufgrund seiner Größe und der hohen Kühlleistung der Gesamtanlage bietet der Icing Wind Tunnel weltweit die einzige Möglichkeit, Triebwerke bis 1.800 PS unter Vollast zu testen. Das ist vor allem deshalb von Bedeutung, weil die Eisbildung einen starken Einfluss auf die Leistung des Triebwerks haben kann und daher nur im Betrieb realistische Aussagen möglich sind.

### Im Land der Superlative

Der von seinen Abmessungen her größte Windkanal der Welt befindet sich in den USA. In ihm können nicht nur Modelle von Flugzeugen, wie sonst in Windkanälen üblich, sondern Flieger in Originalgröße untersucht werden – bis zur Größe einer Boeing 737. Der 80 mal 120 Fuß große Windkanal gehört zum Ames Research Center der NASA. Die Messstrecke ist umgerechnet 24,4 mal 36,6 Meter groß. Das Zentrum befindet sich in Moffett Field (Kalifornien) an den Grenzen der Städte Mountain View und Sunnyvale und wurde am 20. Dezember 1939 als zweites Labor des National Advisory Committee for Aeronautics (NACA) gegründet. Gründungsmitglied des Vorgängers der NASA war der amerikanische Physiker und spätere Präsident der Johns Hopkins University, Joseph S. Ames. Ihm zu Ehren erhielt die Forschungsstätte zunächst die Bezeichnung Ames Aeronautical Laboratory. Mit Gründung der US-Raumfahrtbehörde im Jahre 1958 wurde Ames in die NASA integriert und ist heute eines der Außenzentren.

Der in den Achtzigerjahren errichtete Windkanal dient der Erforschung aerodynamischer Eigenschaften neuer Entwicklungen in der Luft- und Raumfahrt. Ein Schwerpunkt ist dabei die Überprüfung von Simulationen, die in Supercomputern durchgeführt wurden. Außerdem wird daran geforscht, die Quellen des Lärms zu ermitteln, die im Betrieb der Fahr- und Flugzeuge entstehen. Eine ganze Reihe wegweisender Experimentalflugzeuge wurde hier untersucht. Beispielsweise die XV-15 – Vorbild für das erste serienreife Kipprotorflugzeug, die V-22 Osprey. Dabei handelt es sich um ein senkrecht startendes und landendes Flugzeug, das die Propeller an den Flügelspitzen kippen kann. In dem amerikanischen Windkanal wurden aber nicht nur Flugzeuge, sondern auch Objekte aus der Raumfahrt untersucht. So konnte hier der Landefallschirm in Originalgröße getestet werden, mit dem der Mars-Rover Curiosity 2012 sicher auf dem Mars auftraf.

Auch der größte Windkanal für die Automobil-Forschung steht in den USA. 301 Meter lang ist der Kanal im General Motors Aero Lab in Warren, Michigan. Ein 4.500 PS starker Motor treibt



Weitere Informationen:  
[bit.ly/1wI7W5P](http://bit.ly/1wI7W5P)  
[1.usa.gov/1Cjd74k](http://1.usa.gov/1Cjd74k)



Bodyflying-Anlagen, hier eine auf der EXPO in Shanghai, basieren auf der Technik von Windkanälen

# Surfen auf dem Luftstrom

Seit ihrer Erfindung sind Windkanäle in erster Linie für die Forschung im Einsatz. Seit einigen Jahren werden aber auch Exemplare gebaut, die einen alten Menschheitstraum wahr werden lassen: den Flug ohne Hilfsmittel.

## Teil 6 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpennig

Bodyflying – wörtlich „Körper-Fliegen“ – heißt die relativ neue Freizeitsportart, bei der Menschen in einem speziellen Windkanal schweben können. Im sogenannten Vertikalwindtunnel wird ein aufsteigender (vertikaler) Luftstrom erzeugt. Die Luft wird mit einer Geschwindigkeit von 180 bis 200 Kilometern pro Stunde nach oben geblasen. Das entspricht der durchschnittlichen Geschwindigkeit eines menschlichen Körpers im freien Fall in Bauchlage. Wenn sich ein Mensch in diesen Luftstrom legt, fliegt er quasi auf der Stelle. Durch den Einsatz von Händen und Füßen kann der „Bodyflyer“ seinen Körper in unterschiedliche Richtungen bewegen – auf- und abschweben, Seitwärtsbewegungen oder Drehungen ausführen.

Der Vertikalwindtunnel ist im Prinzip ein normaler Windkanal, der lediglich aufgerichtet ist. Wie andere Windkanäle auch, verfügt er über Gebläse zur Erzeugung des Luftstroms und eine Düse zu dessen Beschleunigung, Diffusoren, die die Strömung gleichmäßig machen, und eine Messstrecke oder Flugkammer. Wie bei herkömmlichen Windkanälen gibt es bei Vertikalwindtunneln zwei verschiedene Arten der Luftführung: geschlossen und offen. In Ersterem zirkuliert die Luft in einem geschlossenen Ringsystem – dieses System wird Göttinger Bauart genannt, da es auf den Göttinger Vater der Aerodynamik Ludwig Prandtl zurückgeht. Beim offenen Vertikalwindtunnel wird die Luft aus der Umgebung angesaugt und oben wieder aus dem Kanal ins Freie ausgestoßen. Die Göttinger Bauart ist nicht nur wetterunabhängig, sondern auch leiser, energieeffizienter und turbulenzärmer. Oft werden auch Freifallsimulatoren, die gar keine Windkanäle sind, als Vertikalwindtunnel bezeichnet. Diese bestehen nur aus einem netzüberspannten Propeller, sind somit simpler, bieten aber auch schlechtere Flugbedingungen.

Ursprünglich wurden Vertikalwindtunnel für die Luftfahrtforschung entwickelt und eingesetzt – als sogenannte Trudeltürme. Darin sollte der gefährliche Flugzustand des Trudelns simuliert werden, um ihn verstehen und vermeiden zu können. Anstelle von Menschen flogen damals Flugzeugmodelle im vertikalen Luftstrom und wurden dabei von Kameras

beobachtet. Der erste Trudelturm ist heute noch erhalten und steht als technisches Denkmal in Berlin-Adlershof.

Dass Menschen oder menschliche Puppen in Windkanälen untersucht wurden, ist nichts Ungewöhnliches (in Folge 3 unserer Windkanalserie vom September 2014 berichteten wir darüber). Vor allem Wintersportler wie Skispringer, Skifahrer oder Bobfahrer haben die Möglichkeiten des Windkanals genutzt, um ihre Haltung aerodynamisch zu optimieren. Auf einem ähnlichen Motiv basiert auch das Bodyflying. Es war ein Fallschirmspringer und Mitarbeiter des Apollo-Programms, der 1964 erstmals einen Flug in einem Vertikalwindtunnel in der Wright Patterson Air Force Base absolvierte. Wenige Jahre später begann das Präzisionsfreifallteam „The Golden Knights“ der amerikanischen Streitkräfte, regelmäßig dort zu trainieren. Der erste rein kommerzielle Freifallsimulator eröffnete 1982 in Las Vegas.

In den späten Neunzigerjahren setzte ein regelrechter Boom im Bau vertikaler Windkanäle für den Freizeitbereich ein. Seit 1998 wurden weltweit etwa 20 klassische Vertikalwindtunnel eröffnet. Die höchste Flugkammer in Europa ist 17 Meter hoch und wurde 2008/9 in Bottrop eröffnet. Der Vertikalwindtunnel ist nach Göttinger Bauart konstruiert. Ein Flugerlebnis gibt es dort ab einem Preis von 50 Euro und ab einem Alter von vier Jahren. ●

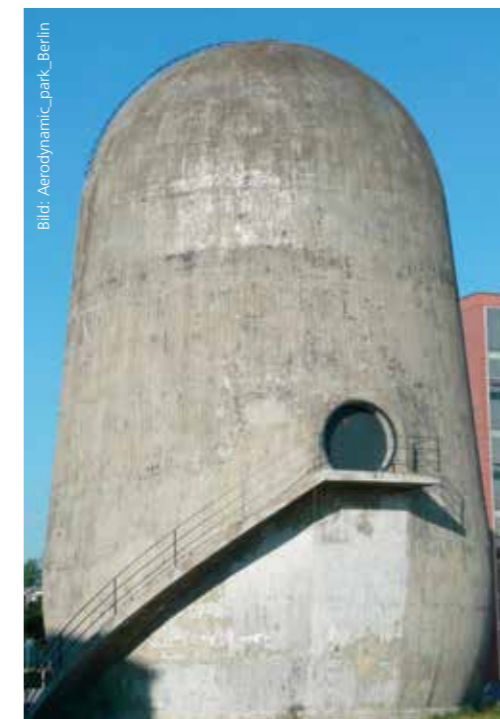
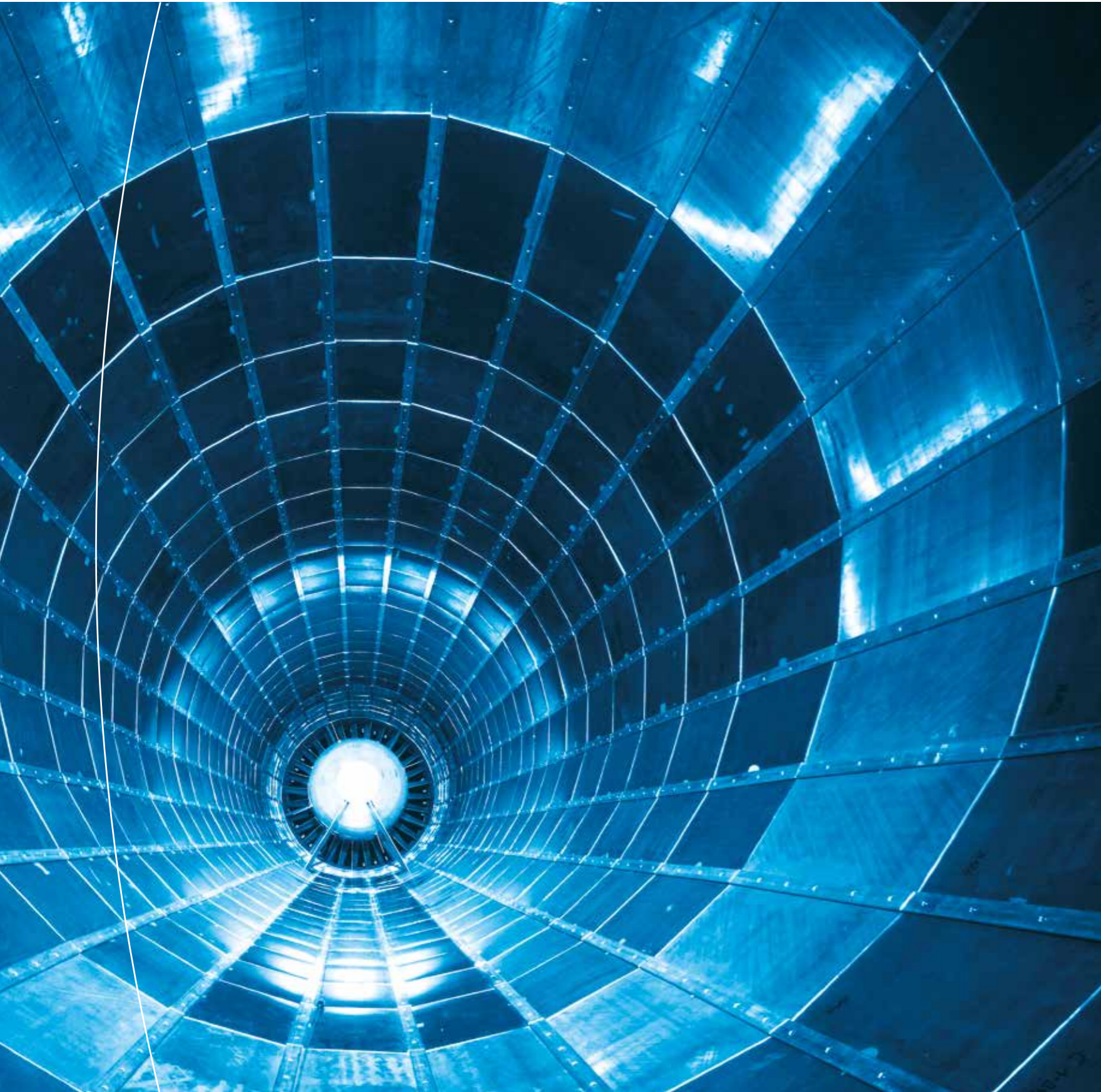


Bild: Aerodynamic\_park\_Berlin

Historisches Vorbild: der Trudelturm in Berlin-Adlershof



Verdichter des Europäischen Transschall-Windkanals ETW (European Transonic Windtunnel)

Bild: ETW

# EUROPAS VORZEIGEWINDKANAL STEHT IN KÖLN

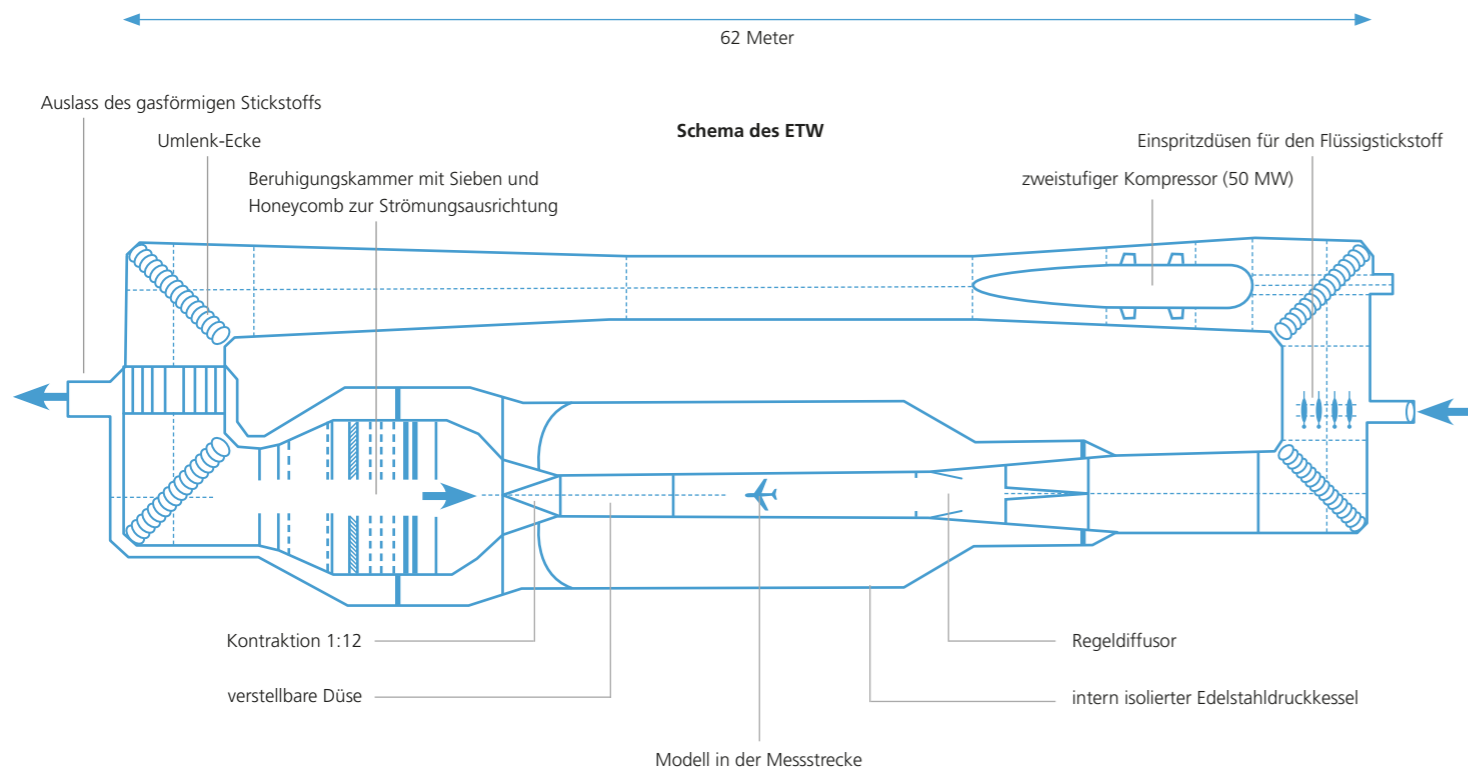
Teil 7 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpfennig

Die größten und leistungsstärksten Windkanäle sind aufgrund ihrer enormen Kosten oft nationale Großprojekte. Darum wundert es nicht, dass sich für den Bau des modernsten Windkanals der Welt – des Europäischen Transschall-Windkanals ETW – gleich vier Länder zusammenschlossen. Frankreich, Deutschland, Großbritannien und die Niederlande. Der 1993 fertiggestellte ETW wird von der ETW GmbH betrieben, die als eigenständiges Non-Profit-Unternehmen 1988 gegründet wurde. Der Windkanal geht auf eine Forderung der NATO-Länder in den Siebzigerjahren zurück, tatsächliche Flugzustände unter Laborbedingungen am Boden darzustellen und somit neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen. Der ETW ist der weltweit führende Windkanal, wenn es darum geht, Luftfahrzeuge unter wirklichkeitstreuen Flugbedingungen zu testen. Lange bevor der erste Prototyp für einen Flugtest zur Verfügung steht, können in ihm die Leistungsfähigkeit und die Flugbereichsgrenzen eines Neuentwurfs genauestens und in einzigartiger Qualität bestimmt werden. Das reduziert die technischen und wirtschaftlichen Risiken, die mit der Entwicklung neuer Luftfahrzeuge verbunden sind, erheblich. Hersteller aus aller Welt nutzen die außergewöhnlichen Möglichkeiten dieser Hightech-Einrichtung, um ihre zukünftigen Produkte leistungsfähiger, wirtschaftlicher und umweltfreundlicher zu machen.

## Tiefkühlatmosphäre gewährleistet realistische Berechnungen

Das Verfahren, mit dem im ETW Flugzeug-Modelle getestet werden, ist etwas ganz Besonderes: Hier wird bei tiefen Temperaturen von minus 160 Grad Celsius und dem 4,5-fachen Druck der Erdatmosphäre geforscht. Das ist notwendig, weil die Flugzeug-Modelle viel kleiner sind als die zukünftigen Flugzeuge, deren Flugverhalten man hier lange vor dem Bau erproben will. Würde man aber diese „Mini-Flieger“ einfach bei Zimmertemperatur testen, so hätte das eine unerwünschte Nebenwirkung: Im warmen Zustand sind die Moleküle der Luft im Verhältnis zu den kleinen Flugzeug-Modellen viel zu groß und es würde zu viel Reibung entstehen. Also muss man – damit die Berechnungen auch stimmen – die Luft-Moleküle beruhigen und ihre Abstände zueinander künstlich verkleinern. Genau das erreicht man durch die tiefen Temperaturen: Die Luft wird quasi „geschrumpft“, wobei „Luft“ beim ETW aus dem Luftbestandteil Stickstoff besteht. Dieser wird flüssig in den Windkanal eingespritzt, verdampft und gasförmig Richtung Modell beschleunigt – nach dem Prinzip eines Windkanals Göttinger Bauart. Gegen die Reibung im Windkanal arbeitet ein Verdichter mit 50 Megawatt an – das entspricht der Leistung von etwa 500 Mittelklasse-Pkw. Dafür werden gewaltige Stickstoffmengen benötigt: an einem Messtag bis zu 1.500 Tonnen. Da die gelagerten Reserven bei diesem Bedarf rasch aufgebraucht sind, stehen ständig vier Lkw bereit, die täglich im Pendelverkehr bis zu 600 Tonnen von dem Gas aus einer 20 Kilometer entfernten Fabrik auf das Gelände in Köln-Porz transportieren, um den Vorrat aufzufüllen.



Durch die tiefen Temperaturen und den hohen Druck ist auch im Modellmaßstab alles wieder im richtigen Verhältnis und die hier ermittelten Werte helfen – zusammen mit Computer-Simulationen und vielen anderen Arbeiten – bei der Entwicklung der Flugzeuge von morgen. Der ETW erlaubt Messungen bei tiefen Temperaturen (minus 163 Grad Celsius bis 40 Grad Celsius), hohen Drücken (1,15 bis 4,5 bar) und Windgeschwindigkeiten, wie sie bei Start und Landung oder im Reiseflug auftreten (0,15 bis 1,35 Mach). Pro Tag können bis zu drei Testkonfigurationen untersucht werden.

### Separate Regelung von Druck, Temperatur und Geschwindigkeit

Ein wesentlicher Parameter, der die Eigenschaften einer Strömung angibt, ist die sogenannte Reynolds-Zahl. Diese dimensionslose Kennzahl einer Strömung ist definiert durch Strömungsgeschwindigkeit, eine charakteristische Länge im Strömungssystem und die dynamische Viskosität der strömenden Flüssigkeit. Der Wert der Reynolds-Zahl von Flugzeug und Modell muss ebenso wie die Form und die Mach-Zahl gleich sein, um ein ähnliches Strömungsfeld zu erhalten. Der ETW erreicht Reynolds-Zahlen von bis zu 50 Millionen für Vollmodelle und bis zu 85 Millionen für Halbmodelle. Die Messstrecke hat einen rechteckigen Querschnitt von 2,4 Meter Breite und zwei Meter Höhe, was Modelle von etwa 1,5 Meter Flügelspannweite (Vollmodelle) beziehungsweise Halbspannweite (Halbmodelle) erlaubt. Durch die separate Regelung von Druck, Temperatur und Geschwindigkeit können Mach-Zahl, Reynolds-Zahl und Staudruck getrennt voneinander gesteuert werden. Dies macht es möglich, die Auswirkungen von Modelldeformation und der Skalierung isoliert zu betrachten. Neben dem ETW gibt es weltweit nur noch einen Windkanal in den USA mit vergleichbaren Eigenschaften: Die NTF (National Transonic Facility) der NASA am Langley Research Center.

Die Investitionen zur Errichtung des ETW im Jahr 1994 betragen circa 330 Millionen Euro. Die Betriebskosten von zehn Millionen Euro pro Jahr muss der ETW aus den Aufträgen von Windkanal-Kunden decken. Ein Messtag kostet abhängig von den genauen Anforderungen etwa 90.000 bis 120.000 Euro. Der ETW beschäftigt 34 Mitarbeiter.

Die aktuellen Teilhaber der Betreibergesellschaft European Transonic Windtunnel GmbH sind das DLR mit 45 Prozent für Deutschland, das Department of Business, Innovation and Skills (BIS) mit 45 Prozent für das Vereinigte Königreich und das National Aerospace Laboratory (NLR) mit zehn Prozent für die Niederlande. Frankreich schied im Jahr 2012 aus dem Verbund aus und konzentriert sich auf seine nationalen Anlagen.

ETW.de

## KALT UND UNTER DRUCK



Interview mit Dieter Schimanski, Manager Tests & Operations am ETW

**Der ETW ist der einzige Windkanal der Welt, an dem mehr als zwei Länder beteiligt sind. Hat das einen besonderen Grund?**

■ In den Siebzigerjahren wollten einige NATO-Länder Flugzeuge unter bislang unerreichten realitätsnahen Bedingungen testen. Der dafür nötige Windkanal war sehr aufwändig – und teuer. Deshalb haben sich die wichtigsten NATO-Länder dafür zusammenschlossen – Deutschland, Frankreich, England, die Niederlande – und anfangs waren auch die USA noch beteiligt.

**Welche Rolle spielte die militärische Forschung dabei?**

■ Natürlich hatte das Militär – ebenso wie die zivile Luftfahrtindustrie – großes Interesse an dem Projekt. Allerdings wurde der ETW erst 1993 und damit nach dem Ende des Kalten Krieges fertiggestellt. In Europa gab es seitdem weitaus weniger militärische Großprojekte als erwartet. Heute wird der ETW überwiegend zivil genutzt.

**Haben Sie ein Beispiel für bedeutende Untersuchungen im ETW parat?**

■ Wir haben wertvolle Beiträge zur Entwicklung der Airbus-Flugzeuge A 380 und A 350XWB geliefert. Beim A 350 haben wir der Firma Airbus ermöglicht, einen signifikant leichteren Flügel zu entwickeln. Auch zum Erfolg der Geschäftsflugzeuge von Dassault Falcon haben wir maßgeblich beigetragen.

**Was kann der ETW, was andere Windkanäle nicht können?**

■ Nur der ETW kann die Flugzustände künftiger Großflugzeuge unter realistischen Laborbedingungen abbilden. Herkömmliche Windkanäle berücksichtigen meist nicht, dass die Luftmoleküle entsprechend der Größe der Flugzeugmodelle herunterskaliert werden müssten. Im ETW gelingt uns das, indem wir den Kanal herabkühlen und unter Druck setzen.

**Der ETW in Kürze**

Der Europäische Transsonische Windkanal ETW hat den Anspruch, zu den weltweit führenden Windkanälen zu zählen. Er ist der einzige Windkanal, der von mehr als zwei Ländern gebaut wurde. 1993 wurde er von Frankreich, Deutschland, Großbritannien und den Niederlanden am DLR-Standort in Köln fertiggestellt. 2012 schied Frankreich aus dem Betreiberkonsortium aus. Der Windkanal erreicht seine realistische Darstellung von Flugzuständen dadurch, dass tiefkalter Stickstoff an Modellen unter hohem Druck vorbeigeblasen wird. Dazu sind bis zu 1.500 Tonnen Stickstoff pro Messtag nötig.

**Warum wurde dieser Windkanal gerade in Köln gebaut?**

■ Es war klar, dass er an einem bestehenden nationalen Luftfahrt-Forschungsstandort, wie das DLR einer ist, errichtet werden sollte. Der Standort Köln hatte einige Vorteile gegenüber den Partneereinrichtungen: Hier gab es zum einen ein leistungsstarkes Energienetz, das jederzeit erlaubt, die erforderlichen 50 Megawatt für den Betrieb des Windkanals zu liefern. Außerdem musste ein Stickstoffkraftwerk in der Nähe sein – der ETW benötigt bis zu 1.500 Tonnen dieses Kühlmittels am Tag. Eine solche Anlage befindet sich gleich auf der anderen Rheinseite. Die räumliche Nähe zum DLR hat sich für beide ausgezahlt: Die langjährige Kooperation mit verschiedenen DLR-Instituten hat zum beiderseitigen Erfolg beigetragen.

**Wie intensiv wird der ETW von Forschern genutzt?**

■ Der mit etwa 70 Prozent überwiegende Teil an Tests dient der Entwicklung neuer Produkte, rund 30 Prozent der Windkanalexperimente im ETW sind Forschungsarbeiten. Diese Forschungsarbeiten werden bis heute allerdings wesentlich von der Industrie geprägt. Wir wünschen uns, dass der ETW auch regelmäßig von Wissenschaftlern aus Universitäten und Forschungsanstalten genutzt werden könnte. Aber das scheitert bisher daran, dass die entsprechende Finanzierung nur unregelmäßig erwirkt werden kann.

**Wie nutzen zivile Flugzeughersteller den ETW?**

■ Der ETW sollte eigentlich dazu dienen, Flugleistungen im Reiseflug vorherzusagen. Solange die Strömung anliegt, kann diese Aufgabe inzwischen aber weitestgehend von Computersimulationen erledigt werden. Die Fähigkeiten der Anlage werden deshalb insbesondere für die Flugbereiche genutzt, in denen Strömungsablösung auftreten kann und in denen Computersimulationen keine verlässlichen Ergebnisse liefern können: in der Start- und Landephase sowie in den Fluggrenzbereichen bei hohen Fluggeschwindigkeiten. Unsere Gesellschafter investieren aktuell in die Anlage, um den ETW an diesen veränderten Kundenbedarf anzupassen.

**Was bedeutet die fortschreitende Entwicklung von Computersimulationen für den ETW?**

■ Beide Werkzeuge haben ihre ganz eigenen Stärken, ergänzen sich und sind aus der Flugzeugentwicklung nicht mehr wegzudenken. Eine Simulation kann beispielsweise kurzfristig beantworten, ob eine Konturveränderung tendenziell besser oder schlechter für die Leistungsfähigkeit ist. Das Experiment bietet in diesem Zusammenspiel neben Verifikation und der damit verbundenen Minimierung von Entwicklungsrisiken auch einen signifikanten Produktivitätsvorteil gegenüber der numerischen Simulation.



Bild: ETW

# KATHEDRALEN DER AERODYNAMIK

Teil 8 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpfennig

Windkanäle sind einzigartige Bauwerke, die besondere Anforderungen an die Herstellung mit sich bringen. Doch wer baut überhaupt die Windmaschinen mit ihren teils gigantischen Ausmaßen? Windkanäle sind keine gewöhnlichen Bauten – oft hunderte Tonnen schwer, mit einem Energiebedarf, der schon einmal dem einer Kleinstadt entsprechen kann, und der Fähigkeit, in ihrem Inneren einen Orkan zu erzeugen. Nicht nur Wissenschaftler können bei ihrem Anblick mit Ehrfurcht erfüllt werden. Wenn die Aerodynamik eine Religion wäre, wären die Windkanäle ihre Kathedralen. Und wie die Sakralbauten stellen auch die Windmaschinen die Erbauer vor große Herausforderungen.

Obwohl es tausende Windkanäle weltweit gibt, existieren keine Firmen, die allein von ihrem Bau leben. „Dafür werden einfach zu wenige Windkanäle neu gebaut“, sagt Dr. Andreas Bergmann, Leiter des Niedergeschwindigkeitswindkanals Braunschweig. Allerdings gibt es einige wenige Unternehmen, die auf den Entwurf von Windkanälen spezialisiert sind: Aiolus Engineering in Kanada, Jacobs in den USA und bis vor Kurzem Turbulufttechnik (TLT) aus Zweibrücken in Deutschland, die unter anderem den großen französischen Windkanal S1MA entworfen haben. Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Unternehmen, die kleinere Windkanäle anbieten, wie die Hyperschall- und Strömungstechnik GmbH in Lindau bei Göttingen. Diese stellen zumeist Windkanäle für die Forschung und Lehre zum Beispiel an Universitäten her. Außerdem gibt es Firmen wie die Wallner und Brand Ingenieurgesellschaft (WBI) beziehungsweise die Schreiber, Brand und Partner Ingenieurgesellschaft (SBI), die sich auf den Bau von Windkanälen für die Automobilindustrie spezialisiert haben. „Die Genauigkeitsanforderungen an Windkanäle für die Luftfahrt sind allerdings höher als die für Automobiluntersuchungen“, erläutert Bergmann.

„DAS DLR ZÄHLT ZU DEN BESTEN,  
WENN ES UM DEN AERODYNAMISCHEN  
ENTWURF VON WINDKANÄLEN GEHT.“

Der Bau eines Windkanals läuft ähnlich wie ein Hausbau ab. Zunächst muss sich der Bauherr, also der Windkanalbetreiber, überlegen, was sein Windkanal alles können soll. Dies wird in einem sogenannten Lastenheft festgehalten. Dann übernimmt normalerweise eine der Firmen, die auf das Entwerfen von Windkanälen spezialisiert sind – sie fungiert später auch als Architekt. Die eigentlichen Bauarbeiten werden dann ausgeschrieben. Allerdings sind die ausführenden Baufirmen zumeist bekannt. Bergmann: „Die Anforderungen an die Statik und den Stahlbau sind beispielsweise so speziell, dass nur wenige in Frage kommen und man Erfahrung mit ähnlichen Vorhaben voraussetzt.“ Die Produktion von Motoren mit mehr als zehn Megawatt Leistung können ebenfalls nur Spezialisten wie ABB, die Lloyd Dynamowerke (LDW), General Electric oder Siemens. Ähnlich wie beim Hausbau gibt es auch die Möglichkeit, einen Windkanal schlüsselfertig herstellen zu lassen. „Aber da sollte man mit Abstrichen in der Qualität rechnen“, so Bergmann.

Zu Beginn der Strömungsforschung wurden Windkanäle in Eigenbau hergestellt. So ließen die Brüder Wilbur und Orville Wright um 1900 ihren ersten Windkanal von ihrem Angestellten Charlie Taylor mit einer Luftschraube bauen, die wie ein Fahrrad angetrieben wird. Kein Wunder, waren die Flugpioniere selbst doch Fahrradhersteller, die so manche Erkenntnis aus dem Fahrradbau auf die Herstellung von Flugzeugen übertrugen.

Die Luftfahrtforschungseinrichtungen wie der Vorläufer des DLR, die Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen (AVA), haben ihre Windkanäle zumeist selbst konstruiert und dann von Baufirmen errichten lassen. „Das ist bis heute so geblieben“, erklärt Bergmann: „Das DLR zählt zu den Besten, wenn es um den aerodynamischen Entwurf von Windkanälen geht.“ Bergmann selbst kann auf eine langjährige Erfahrung im Bau von Windkanälen zurückblicken. Der von ihm geleitete Niedergeschwindigkeits-Windkanal Braunschweig war früher ein rein aerodynamisch optimierter Windkanal. Dann sollte er zu einem der leisesten Windkanäle der Welt umgebaut werden. „Wir hatten anfangs eine externe Firma mit dem Entwurf beauftragt. Dann haben wir festgestellt, dass wir mit unseren eigenen Berechnungen die Leistung deutlich verbessern können – und ihn nach unseren Vorgaben bauen lassen“, sagt Bergmann.



Bau des Göttinger Windkanals 6 im Jahr 1935: Man sieht die Montage der Kanalrohre und die Stahlkonstruktion für das den Kanal umgebende Gebäude



Großbaustelle für den weltweit ersten Kryokanal: Der GR II im Bau 1941

Die Braunschweiger DLR-Wissenschaftler hatten so großes Vertrauen in ihre Berechnungen, dass sie erstmals auf ein sonst übliches Vorgehen im Windkanalbau verzichteten. „Normalerweise wird von jedem Windkanal zunächst ein funktionsfähiges Modell zum Beispiel im Maßstab eins zu zehn gebaut. Damit soll die Richtigkeit der Konstruktion überprüft werden. Das haben wir in unseren Rechnern simulieren können – und damit Kosten und Aufwand gespart“, erläutert Bergmann. Kein Wunder, dass DLR-Forscher wie Bergmann als Windkanal-Experten auch bei externen Projekten gefragt sind. Vor Kurzem wurde er unter anderem vom Automobilhersteller VW als Berater beim Bau zweier neuer Windkanäle engagiert. Die eigentliche Entwicklung führte eine andere Firma aus. „Am Ende haben wir im DLR den aerodynamischen Entwurf maßgeblich beeinflusst“, so Bergmann.

Automobilfirmen sind heute die wichtigsten Auftraggeber für neue Windkanäle. „Nach dem ETW (European Transonic Windtunnel in Köln, siehe Folge 7 im DLR-Magazin 147 vom September 2015, d. Red.) und dem DNW/LLF ist in der westlichen Welt kein neuer Windkanal für die Luftfahrtforschung gebaut worden“, sagt Bergmann. Die millionenschweren Großanlagen bleiben jahrzehntelang in Betrieb – oft weit über die ursprünglich geplante Laufzeit hinaus – und werden meist modernisiert statt neu gebaut. Anders sieht es in China aus: Dort sind in den vergangenen Jahren viele neue Windkanäle für die Luft- und Raumfahrtforschung entstanden. – Ein klares Indiz für die Ambitionen des Reichs der Mitte auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrtforschung.

Beim Bau des neuen Turbinenprüfstands NG-Turb im DLR Göttingen: Der 77 Tonnen schwere Verdichter wurde durch das offene Dach eingesetzt





# 318 METER FÜR EXKLUSIVE STRÖMUNGSTESTS

Die Deutsch-Niederländischen Windkanäle (DNW) sind die wichtigste Organisation für Windkanalmessungen in Europa. Ihr Prunkstück steht in den Niederlanden und gilt als eines der besten Großforschungsgeräte der Welt – in ihm kann sogar eine Landebahn simuliert werden ...

## Teil 9 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpfnig

Die DNW sind aus den beiden nationalen Luftfahrtforschungseinrichtungen Deutschlands und der Niederlande entstanden – dem DLR und dem NLR. 1975 beschlossen beide Einrichtungen, gemeinsam das Projekt eines neuen Windkanals gewaltigen Ausmaßes umzusetzen. Dafür wurde eigens eine Tochtergesellschaft unter holländischem Recht für den Betrieb gegründet. Das war die Geburtsstunde des DNW-LLF (Large Low-speed Facility). Im Laufe der Zeit ist eine ganze Reihe weiterer großer Windkanäle hinzugekommen, die unter dem Dach der DNW vereint sind.

1980 wurde der Große Niedergeschwindigkeitswindkanal in Marknesse fertiggestellt. 1981 fanden die ersten Tests an einem Airbus-Modell statt. „Sämtliche Modelle der Airbus-Flotte sind hier untersucht worden“, sagt Professor Georg Eitelberg, Managing Director der DNW, „und darauf sind wir auch stolz.“ Der LLF ist strategischer Bestandteil der europäischen Forschungsinfrastruktur für Luftfahrt.

Doch auch international hat der LLF einen guten Ruf. So wurden hier Modelle aller großen Flugzeugproduzenten der Welt untersucht. Dazu zählen EMBRAER aus Brasilien, COMAC aus China, Dassault aus Frankreich und sogar Boeing aus den USA. Letzterer ist besonders erstaunlich, denn aufgrund der Konkurrenz von Airbus und Boeing werden Testeinrichtungen normalerweise nicht gemeinsam genutzt. Dennoch haben die Amerikaner in dem europäischen Windkanal sogar Tests am teuersten und umfangreichsten Rüstungsprogramm der Welt durchgeführt – am sogenannten Joint Strike Fighter F-35. Das erste in Serie gefertigte Tarnkappen-Mehrzweckkampfflugzeug soll in den kommenden Jahrzehnten das Rückgrat der Luftwaffen der USA und mehrerer Nato-Partner bilden.



Größe ist relativ: Obwohl die meisten Objekte nur als Modell in den Windkanal kommen, sind sie doch so groß, dass sie, wie dieses Hubschraubermodell in sieben Meter Höhe, nur per Kran erreicht werden können. Im Vergleich zu den gewaltigen Dimensionen des Windkanals allerdings erscheint das Modell winzig.

Bild: DNW



2014 wurden im DNW-LLF die Propeller des APIAN-Modells (Advanced Propulsion Integration Aerodynamics and Noise) vermessen

Laut Eitelberg haben einige besondere Stärken des LLF die Amerikaner überzeugt: Die Steuerungs- und Messtechnik sowie die Spezialität, dass im LLF so wie nirgendwo sonst Start und Landung von Flugzeugen untersucht werden können. Für die F-35 spielt dieser Bereich eine besonders kritische Rolle: Eine Variante ist als Senkrechtstarter vorgesehen, was besondere Anforderungen an die Aerodynamik stellt. Für die Untersuchungen wurde ein 1,5 Meter großes Modell – „das kleinste, das wir je untersucht haben“, so Eitelberg – im Windkanal mit laufendem Triebwerk getestet. Militärische Projekte wie die F-35 sind allerdings die Ausnahme. Den weitaus größten Teil aller Untersuchungen im Großen Niedergeschwindigkeitswindkanal nehmen zivile Projekte ein.

Trotz der gewaltigen Ausmaße des LLF werden hier keine Flugzeuge in Originalgröße getestet. Die größte Messstrecke ist 9,5 mal 9,5 Meter groß und 20 Meter lang. Dafür ist ein Windkanal mit einer Länge von 318 Metern notwendig. Wollte man die Messstrecke noch größer haben, würden die Kosten wegen der Ausmaße eines entsprechenden Windkanals ins Astronomische wachsen.

Das größte Objekt, das je in dem Windkanal in den Niederlanden untersucht worden ist, war ein Original-Flügel eines Airbus 320. – Gewöhnlich werden Flugzeugmodelle im verkleinerten Maßstab erforscht. Im LLF könnten kleine Zivil-Flugzeuge zwar auch in Originalgröße getestet werden. Doch es ist wenig nützlich, bereits fliegende Flugzeuge zu untersuchen. Außerdem müssten sie für den Versuch mit aufwändiger Messtechnik ausgestattet werden, was erhebliche Kosten verursacht. Ein Modell in Originalgröße wäre laut Eitelberg teurer als das Flugzeug und darum ebenfalls keine Alternative. Windkanalmodelle sind nämlich nicht einfach verkleinerte Versionen des Originals, sondern an die Ansprüche der Forscher angepasste Sonderanfertigungen voller Sensoren und Messtechnik.

Auch die Untersuchung im LLF ist teuer. Eine Woche ist ab 250.000 Euro zu haben. Es ist klar, dass bei solchen Summen die Hauptkunden, die vom Betreiber, den DNW, akquiriert werden müssen, aus der Luftfahrtindustrie stammen. Allerdings gibt es auch europäische Forschungsprogramme, die es Forschungsinstitutionen ermöglichen, Untersuchungen gemeinsam mit der Industrie im LLF durchzuführen.

Neben der Luftfahrtforschung, die den Großteil der Tests ausmacht, gibt es auch Untersuchungen für andere Bereiche wie die Energie- und Verkehrsforschung. „Viele Lkw-Hersteller lassen ihre Fahrzeuge hier testen“, sagt Eitelberg. Zwar haben Automobilhersteller eigene Windkanäle, in denen auch die Untersuchungen an verkleinerten Modellen laufen. „Aber nur bei uns kann ein Sattelschlepper in Originalgröße getestet werden“, so Eitelberg. Und auch Hersteller von Windkraftanlagen nehmen die Test-Einrichtung in Anspruch – sie testen Windräder sogar im rotierenden Zustand.

Im Laufe seines 35-jährigen Bestehens wurde der LLF ständig modernisiert und die Möglichkeit, aerodynamische Prozesse zu untersuchen, wurde verbessert. Er zählt jetzt zu den leisesten Windkanälen der Welt – das ist wichtig, wenn dort nach den Ursachen von Lärmentstehung bei Flugzeugen geforscht wird. Eine weitere Stärke des LLF ist die bereits erwähnte Möglichkeit, Triebwerke zu simulieren. „Und drittens haben wir die beste Landebahnsimulation der Welt“, sagt Eitelberg. Unter diesen Voraussetzungen, darin ist sich der DNW-Direktor sicher, wird der LLF auch in Zukunft eine wichtige Rolle in der Luftfahrtforschung spielen.



Auch das teuerste Rüstungsprojekt der Welt, der Joint Strike Fighter F-35 der USA, wurde im LLF in Marknesse untersucht – ein Qualitätsausweis für den Windkanal

Bild: DNW

## Ein Tag im Windkanal

**8:30 Uhr:** Der Tag startet mit einem Briefing in der Leitwarte des LLF. Der Kontrollraum des Windkanals ist voll – dieses Mal ist ein großes Team beteiligt. Bis zu 20 Mitarbeiter des DNW sind in der Aufbauphase eines neuen Versuchs dabei, dazu kommen noch zehn DLR-Kollegen. Arbeitssprache ist Englisch. Es gibt Kaffee, doch gemütlich geplaudert wird nicht – der Windkanal ist für neun Tage gebucht, für fast 75.000 Euro pro Tag, das sind mehr als 2,50 Euro pro Sekunde Messzeit. Und diese Zeit wird genau gestoppt. „Wenn bei uns etwas nicht läuft, läuft die Uhr weiter und damit die Kosten“, so Bartels. „Dann versuchen wir, die Probleme auch außerhalb der Messzeit am Abend zu lösen – gestern bis 23 Uhr.“ Nur falls beim Windkanal eine Störung auftritt, wird die Uhr angehalten, die Zeit zur Fehlerbehebung wird dann nicht berechnet.

Es wird klar: Dieser Versuch ist besonders. Hubschrauber-Tests im LLF kommen nur selten vor, und jetzt wird erstmals ein neues Highspeed-Kamerasystem unter der Decke eingesetzt, das mit vier Kameras Stereo-Aufnahmen vom Rotor macht.

Heute soll zunächst der Schwebeflug getestet werden.

**9:10 Uhr:** Bevor der eigentliche Versuch startet, muss jedoch sichergestellt werden, dass der Rotor keine Unwucht aufweist. In einem echten Hubschrauber würde das für die Passagiere sehr ungemütlich werden. Bestehen Unwuchten am Modell, müssen diese, wie Autoreifen, ausgetauscht werden. Ein Hubschraubermodell für den Windkanal ist dabei komplexer als ein echter: Es gibt Kabel und Drucksensoren im Rotor, die durch die großen Fliehkräfte immensen Belastungen ausgesetzt sind.

**9:36 Uhr:** Die Vortests laufen gut. Der Rotor zeigt keine Unwucht.

**9:40 Uhr:** Plötzlich Unruhe. Ein Motor, der eine der beiden Taumelscheiben der META und damit den Rotor mitsteuert, läuft nicht mehr. Der Rotor wird gestoppt. Ein Kran bringt rasch Mitarbeiter zum Modell in 6,7 Meter Höhe. Es wird geprüft, ob der Motor wirklich ausgetauscht werden muss. Ein Austausch wäre knifflig – der Motor sitzt tief im Modellinneren. Es wird spekuliert: Am Vortag hat der Motor 7,5 Stunden am Stück durchgehalten – das war ungewöhnlich lange ...

**10:30 Uhr:** Erleichterung. Der Motor bewegt sich wieder, ein Austausch ist nicht nötig.

**10:53 Uhr:** Die Vortests sind abgeschlossen. Jetzt wird die bislang offene Messstrecke durch ein Tor geschlossen.

**11:30 Uhr:** Der eigentliche Versuch startet, zunächst ohne Wind. Es wird das Verhalten des Rotors im Schwebeflug untersucht. Dabei entsteht vergleichsweise wenig Lärm.

Die meisten Daten bekommen die in diversen Messcontainern sitzenden DLR-Mitarbeiter in Echtzeit angezeigt. Kein Vergleich zu früher, als alles auf Magnetbändern gespeichert und erst später mühsam ausgelesen wurde.

**12:02 Uhr:** Der Wind wird eingeschaltet. Mit mehr als 100 Kilometern pro Stunde bläst er am Modell vorbei. Das entspricht der typischen Landesituation von Helikoptern, dem Übergang vom Reiseflug bis zum Aufsetzen. Gerade dann sind Hubschrauber am lautesten.

Jetzt geht auch eine Mikrofontraverse in Startposition. Sie stoppt jeden halben Meter und vermisst den vom Rotor abgestrahlten Lärm auf einer Fläche von 6 mal 6 Metern.

**12:29 Uhr:** Die erste Versuchsreihe ist durch. Mittagspause.

**12:35 Uhr:** Das Tor geht mit einem Zischen auf und gleitet auf Luftkissen zur Seite. Für einige Mitarbeiter wird es keine Mittagspause geben, sie justieren ihre Messtechnik neu und checken das Modell.

**13:47 Uhr:** Das Tor wird wieder geschlossen. Kurz darauf startet der Rotor neu. Beginn der nächsten Versuchsreihe. Diesmal mit aktiver Rotorsteuerung.

**14:05 Uhr:** Das Mikrofonarray fährt wieder in Position. Dann wird abermals der Wind angestellt und trifft diesmal auf einen Rotor, der jetzt für einen Sechs-Grad-Sinkflug angestellt ist. In dieser Konfiguration ist er besonders laut. Die Traverse mit den Messgeräten bleibt einige Sekunden in einer Position, misst und fährt dann in kleinen Schritten zum nächsten Messpunkt weiter.

**14:26 Uhr:** Die Mikrofontraverse fährt auf Ausgangsstellung, dann wiederholt sich der Vorgang des Abtastens. So wird Stück für Stück ein kompletter Lärmteppich erstellt. Zwischendurch haben die DLR-Wissenschaftler die Steuerphase der Rotorblätter, die mit der META aktiv angesteuert werden, verändert.

Die ankommenden Messergebnisse sehen gut aus. Dr.-Ing. Berend van der Wall schaut sich die Sofortauswertung der Mikrofonmessungen an. Deutlich ist erkennbar, dass bei aktiver Steuerung der Rotorblätter der Lärm geringer ist. „Bis zu sechs Dezibel weniger – das ist eine Welt in der Lärmreduktion“, freut sich van der Wall. Dann zeigt er auf eine Linie auf einem Bildschirm: „Hier ist ein Signal tot. Wahrscheinlich ein Kabel gebrochen.“ Im Gegensatz zum Motor ist das bei vielen hundert Sensoren kein Problem. „Ich sage später einem Techniker Bescheid, der soll das Blattkabel von Blatt gelb überprüfen“, so van der Wall.

**16:15 Uhr:** Die für den Messtag vorgesehenen Versuchsreihen sind abgeschlossen. Der Rotor wird abgestellt, das Tor öffnet sich wieder. Für die meisten DLR-Mitarbeiter ist die Arbeit allerdings nicht zu Ende: Sie werten die Daten aus, lassen den Ablauf Revue passieren, bereiten den nächsten Messtag vor.



Nicht Raumschiff Enterprise, aber vergleichbar mit dessen Kommandobrücke: die Leitzentrale des DNW



Die „Kunden“ des Windkanals – in diesem Fall Wissenschaftler des DLR – sitzen in verschiedenen Räumen und Containern voller Messtechnik



Inspektion in fast sieben Meter Höhe: Forscher, die in der Windkanaltestzeit ein Problem zu beheben haben, müssen nicht nur schnell eine Lösung finden, sondern auch schwindelfrei sein.



Muss der Motor ausgetauscht werden? Das wäre knifflig – der Motor sitzt tief im Modellinneren. Zum Glück gelingt es, ihn wieder zum Laufen zu bekommen.

## DAS BESONDERE DER LANDEBAHN-SIMULATION

Wenn sich ein Flugzeug bei der Landung dem Boden nähert, verändert dieser das aerodynamische Verhalten des Flugzeugs, da die Luft nicht mehr frei unter dem nach unten fliegenden Flugzeug ausweichen kann. Dabei entsteht zumeist ein höherer Auftrieb, abhängig von den genauen Eigenschaften der Aerodynamik des Flugzeugs und der Triebwerkeinstellungen während der Landung. Um realistische Ergebnisse zu erzielen, muss der Windkanal die Landebahn simulieren. Zu diesem Zweck ist am Boden des LLF ein schnelllaufendes Band eingebaut. Es bewegt sich mit der gleichen Geschwindigkeit wie der Luftstrom, der am Modell vorbeiströmt, das sich ja in Wirklichkeit nicht bewegt. Im LLF ist dies bei Geschwindigkeiten von bis zu 80 Metern pro Sekunde möglich.

## DER PREIS EXKLUSIVER LEISTUNGEN

Universitäten und kleine Forschungseinrichtungen können sich Untersuchungen im LLF bei Preisen ab 250.000 Euro pro Woche nicht leisten. Es müssen also europäische Fördermittel in Anspruch genommen werden, wenn Universitäten Windkanäle nutzen wollen.

Zudem werden große Windkanäle in gewissen Zyklen betrieben. Es gibt nur eine begrenzte Zahl an Projekten im Rahmen der Luftfahrtforschungsprogramme. Wenn die Phase beginnt, in der in einem solchen Programm die Windkanaluntersuchungen anstehen, sollen die Windkanäle möglichst rund um die Uhr und nur dafür zur Verfügung stehen. Wenn jedoch keine Tests anstehen, fallen dennoch Kosten für den Erhalt der Technologie und der Infrastruktur an. Zu klären, wer dafür die Verantwortung übernimmt, ist für das Management immer wieder eine Herausforderung.

## TEST FÜR LEISERE UND VIBRATIONSÄRMERE HUBSCHRAUBER

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Fortschrittliche Taumelscheibenkonzepte“ erprobt das DLR-Institut für Flugsystemtechnik die sogenannte Mehrfach-Taumelscheibe (META) im LLF als Beitrag zur aktiven Rotorsteuerung. Die Rotoren der meisten Hubschrauber werden mit Hilfe von Taumelscheiben gesteuert. Die Rotoren sind unter bestimmten Betriebsbedingungen die Hauptquelle des Lärms, den Hubschrauber abstrahlen. Besonders im Landeanflug können durch die Kollision der Blattspitzenwirbel mit denen nachfolgender Rotorblätter sehr laute Geräusche entstehen. Im Windkanalversuch wird untersucht, ob durch geschicktes dynamisches Verstellen der Rotorblätter die vibratorischen Anteile der Lasten und der Lärm verringert werden können. In heutigen Hubschraubern der klassischen Bauart (ein Hauptrotor, ein Heckrotor) mit einer konventionellen Steuerung wird der Rotor über eine einzige Taumelscheibe gesteuert. Bei Rotoren mit vier und mehr Blättern sind solche Einsteuerungen mit nur einer Taumelscheibe nicht möglich. Im DLR-Versuch sind die Rotorblätter abwechselnd an den zwei konzentrisch umeinander angeordneten Taumelscheiben der META angeschlossen. Durch diesen Trick wird eine blattindividuelle Rotorsteuerung ohne aktive Komponenten im drehenden System ermöglicht. Neben diversen anderen Sensoren (Mikrofone, Dehnmessstreifen, Beschleunigungssensoren, etc.) sind beim Versuch vier Hochgeschwindigkeitskameras im Einsatz, um die elastischen Verformungen der Blätter aufzunehmen und so Rückschlüsse auf die in jeder Situation wirkenden Blattbelastungen zu ermöglichen. Die Forscher versprechen sich durch den Einsatz der META eine bedeutende Verringerung des abgestrahlten Lärms und der in Hubschraubern auftretenden Vibrationen. Leiter des Projekts FTK-META-WK ist Rainer Bartels aus dem DLR Braunschweig.

# EXKLUSIV, WANDELBAR UND IMPOSANT

In den letzten 100 Jahren sind Windkanäle zum unverzichtbaren Bestandteil der Aerodynamik-Forschung geworden. Aber ihre Bedeutung geht weit über die Intention ihrer ursprünglichen Erbauer hinaus. Immer wieder wurden diese Großforschungsanlagen an neue Herausforderungen angepasst. Und mit ihnen entstand eine ganz eigene Art der modernen Architektur. Der zehnte und letzte Teil der Windkanalserie fasst die interessantesten Fakten noch einmal zusammen.

Teil 10 der Serie „Die Windmaschinen“

Von Jens Wucherpfennig

Als die ersten Windkanäle im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts gebaut wurden, erhofften sich die Konstrukteure – egal ob der Franzose Gustave Eiffel oder der in Göttingen wirkende Ludwig Prandtl – ein Hilfsmittel zum Untersuchen der ersten Flugmaschinen, seien es Luftschiffe oder Flugzeuge. Doch es dauerte nicht lange, bis die einmaligen Möglichkeiten, die die „Windmaschinen“ boten, auch für andere Zwecke genutzt wurden. Alles, was sich entweder selbst schnell durch die Luft bewegt oder aber von der Luft umströmt wird, kommt für Windkanaltests infrage. So kam es, dass bald erste Eisenbahnmodelle untersucht wurden. Damals wollte man herausfinden, wie verhindert werden kann, dass der Rauch der Lokomotive ins Führerhaus dringt. Untersuchungen im Windkanal lieferten die Antwort und damit bald auch die Lösung in Form der Beetzschen Rauchschilde, die den Dampf umleiten. Andere Fragestellungen waren: Was ist die optimale Haltung von Skispringern, um möglichst große Weiten zu erzielen? Untersuchungen mit einer menschenähnlichen Puppe im Windkanal zeigten, dass eine ruhige Haltung mit am Körper anliegenden Armen viele Vorteile bietet – die Geburtsstunde des Parallel-Stils im Skispringen.

## Außergewöhnliche Testobjekte

Immer wieder zeigte sich, dass die Frage, was in einem Windkanal untersucht werden soll, ebenso vom Spleen des einzelnen Forschers wie vom historischen und gesellschaftlichen Umfeld abhängig war. So wurden während der Zeiten des Ersten und Zweiten Weltkriegs die Windkanäle nicht nur in Deutschland fast ausschließlich zur Erforschung von Kampfflugzeugen oder der ersten Raketen verwendet. Zudem bewiesen Untersuchungen an Artillerieprojektilen im zehn mal zehn Zentimeter großen Überschallkanal in Aachen, dass eine erhöhte Reichweite der Geschütze nicht nur eine Sache des verwendeten Rohrs oder Zündstoffs war, sondern bis zu 50 Prozent von den aerodynamischen Eigenschaften des Geschosses abhing. Kriegszeiten waren auch Hoch-Zeiten für den Bau neuer Windkanäle. Wie die gesamte Wirtschaft, so wurde auch die Forschung in den Dienst des „Totalen Kriegs“ gestellt.



Bild: DNW

Im Niedergeschwindigkeitswindkanal des DLR Braunschweig



Unsichtbares sichtbar gemacht: Windkanäle zeigen, wie Objekte umströmt werden. Das Bild aus dem DLR\_School\_Lab Göttingen veranschaulicht das.

Als nach dem Versailler Vertrag von 1919 dem Deutschen Reich Luftfahrtforschung verboten worden war, mussten sich die Forscher teils andere Aufgaben suchen. So gelangte das Wissen aus der Luftfahrt in den Automobilbau und führte dort zum Boom der sogenannten Stromlinienfahrzeuge. Die Aerodynamiker halfen, eine ganze Palette von Fahrzeugen zu kreieren, deren Formgebung sich nach aerodynamischen Gesichtspunkten richtete. Beispiele wie der Schlörwagen der Göttinger Aerodynamischen Versuchsanstalt, quasi ein „Flügel auf Rädern“, der Rumppler Tropfen-Wagen oder der Mercedes-Benz T 80 üben bis heute eine Faszination auf viele Betrachter aus.

Auf der anderen Seite war es wohl nur der Idee des Schiffingenieurs Anton Flettner zu verdanken, dass aus einer theoretischen Überlegung Prandtl's für einen drehenden Flugzeugflügel der sogenannte Flettner-Rotor wurde: Ein drehender Zylinder auf Deck ist in der Lage, ähnlich wie ein Segel aus der Kraft des Windes ein Schiff anzutreiben. In jüngerer Zeit wurde diese Idee im „E-Ship 1“ umgesetzt.

#### Kostspielige Forschungsinstrumente

Der Bau und Unterhalt von Windkanälen war von Anfang an eine kostspielige Sache. Je größer die „Windmaschinen“ wurden, und je mehr Hightech in ihnen steckte, desto teurer wurden sie. Kein Wunder, dass die größten europäischen Windkanäle heute von einem internationalen Verbund betrieben werden. Das trifft auf den Europäischen Transsonischen Windkanal in Köln ebenso zu wie auf die Deutsch-Niederländischen Windkanäle, unter deren Dach gleich eine ganze Reihe großer Windkanäle in Holland sowie in den DLR-Standorten Köln, Göttingen und Braunschweig vereint sind.

Windkanäle auf der ganzen Welt erwiesen sich als erstaunlich langlebig. Obwohl sie doch in einem Bereich eingesetzt werden, der zur Spitze der Hochtechnologie zählt, und für den die neuesten Super-Computer gerade gut genug sind, sind viele Windkanäle seit Jahrzehnten im Einsatz. Natürlich spielt dabei der hohe Preis für den Neubau eines großen Windkanals eine Rolle. Hinzu kommt jedoch, dass sich Windkanäle als sehr flexibel zeigten und immer wieder mit neuester Messtechnik modernisieren ließen. Manchmal gehen diese Modernisierungen aber auch weit darüber hinaus und greifen massiv in die bauliche Substanz ein, wie beim Transsonischen Windkanal Göttingen, der nach mehreren solcher „Faceliftings“ kaum noch Ähnlichkeit mit dem Ursprungskanal hat.

Nutzer von Windkanälen schätzen überdies die Erfahrungen und die Vergleichbarkeit der Messergebnisse in einem bewährten Windkanal. Die Windkanal-Experten kennen ihr Untersuchungsinstrument und wissen neue Daten richtig einzuschätzen. Jeder Neubau benötigt hingegen

zunächst eine gewisse Einarbeitungszeit, in der die Betreiber seine Stärken und auch Schwächen kennenlernen. Trotz dieser Argumente sagt die Zahl der Neubauten von Windkanälen etwas über die Forschungsprioritäten einer Gesellschaft aus. Während in Europa und Nordamerika seit über 25 Jahren kein neuer richtig großer Windkanal gebaut worden ist, dafür aber viele Windkanäle für die Automobilindustrie entstanden, schießen in China solche Anlagen wie Pilze aus dem Boden. Ein Beleg für die Ambitionen einer aufstrebenden Luftfahrtnation.

Dafür ist in der westlichen Welt ausgehend von den Vereinigten Staaten eine neue Art der Nutzung von Windkanälen populär geworden: Für die Modersportart des „Skydiving“ sind an vielen Orten Windkanäle gebaut worden, die nichts mehr mit Forschung zu tun haben. Hier geht es einfach um die Möglichkeit, das Prinzip des Windkanals für die Erfüllung des Menschentraums einzusetzen, ohne Hilfsmittel im Luftstrom zu fliegen.

#### Begehrte Beute

Während der Neubau von Windkanälen ein Anzeichen für große Ambitionen in der Luftfahrt ist, bedeutete auf der anderen Seite der Verlust von Windkanälen für das betreffende Land einen Rückschlag in der Fähigkeit, in der modernen Luftfahrt mitzumischen. Prominentestes



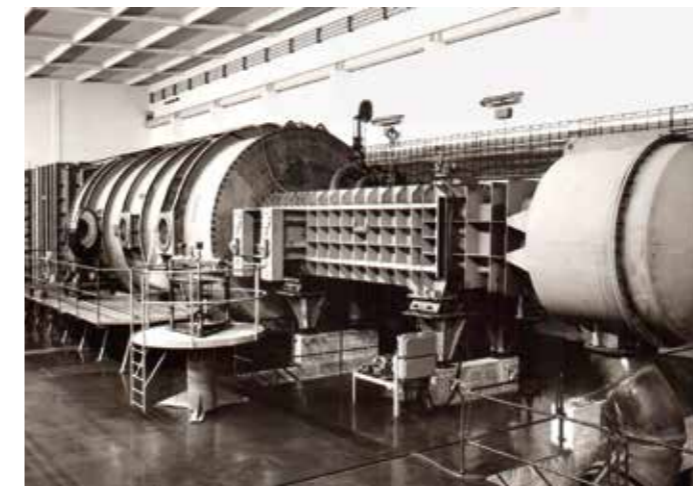
Gesteuert werden Windkanäle aus teils futuristisch anmutenden Kommandozentren, wie hier im Großen Niedergeschwindigkeitswindkanal in den Niederlanden

Beispiel dafür ist Deutschland, dem nach dem Zweiten Weltkrieg nicht nur Luftfahrt, sondern auch Luftfahrtforschung jahrelang verboten war. Sichtbares Zeichen dafür war die Demontage fast sämtlicher Windkanäle auf dem Gebiet des ehemaligen Deutschen Reichs. Nicht alle Windkanäle wurden jedoch zerstört. Viele Anlagen wurden von den alliierten Siegermächten in Deutschland ab- und in ihren Heimatländern wieder aufgebaut. So gelangte beispielsweise ein Windkanal für Hochgeschwindigkeitsforschung, der von dem Team um Wernher von Braun für die Untersuchung neuer Raketen entwickelt worden war, in die Vereinigten Staaten. Ein Braunschweiger Windkanal leistete nach dem Krieg im Vereinigten Königreich seine Dienste, und die Franzosen demontierten in den Alpen ein ganzes Ensemble von noch nicht einmal ganz fertiggestellten Hochleistungswindkanälen, um sie in Frankreich in Betrieb zu nehmen. Diese französischen Windkanäle deutschen Ursprungs sind übrigens bis heute noch im Einsatz. Der ehemalige Braunschweiger Windkanal wurde inzwischen stillgelegt, ein Teil, die sogenannte Kompressorschnecke, gelangte wieder nach Deutschland zurück und steht heute als Denkmal auf dem DLR-Gelände in Braunschweig. Auch die Sowjetunion nahm mehrere erbeutete deutsche Windkanäle nach dem Zweiten Weltkrieg für eigene Zwecke in Betrieb.

#### Extravagante Bauten

Völlig abseits ihrer Nutzung für die Forschung und für kommerzielle Interessen sind Windkanäle Vertreter einer ganz eigenen Architekturform geworden. Egal ob als hundert Meter lange dicke Röhren, die sogenannten Rohrwindkanäle, oder als Windkanäle Göttinger Bauart, die wie der Buchstabe O geformt sind, – die Windmaschinen haben ihren eigenen Stil. Nicht nur die äußere Form, sondern auch die innere Gestaltung hat dabei eine besondere Ästhetik; bei den großen Exemplaren beispielsweise sind es riesige Propeller inmitten eines gewölbten Raums. Der große Windkanal in Berlin-Adlershof und der dortige eiförmige Trudelwindkanal stehen nicht nur als Relikte der Forschung, sondern als Zeugen einer speziellen Art von Architektur unter Denkmalschutz. Wer diese ungewöhnlichen Bauten gesehen oder besser noch, einmal in ihnen gestanden hat, wird diesen ganz eigenen Eindruck nie vergessen. So ist es auch kein Wunder, dass gerade dieses Ensemble in Berlin-Adlershof immer wieder einmal als Ort für Filmproduktionen dient. Am eindrucksvollsten hat wohl der Hollywood-Blockbuster „Aeon Flux“ die Windkanäle in Szene gesetzt, ein Science-Fiction-Film, für den die Bauten aus den Dreißigerjahren die perfekte Kulisse für eine utopische, fremdartige Welt der Zukunft abgaben.

Und dies scheint tatsächlich eine treffende Beschreibung von Windkanälen zu sein: ungewöhnliche, ja fremdartige Bauten, oft aus einer vergangenen Zeit stammend, in denen doch hochmoderne Forschung stattfindet, womit sie quasi Brücken zwischen Vergangenheit und Zukunft schlagen.



Windkanäle sind oft erstaunlich lange Zeit im Einsatz. Immer wieder müssen sie modernisiert werden, wie der Transsonische Windkanal in Göttingen. Er wurde seit seinem Bau 1963 mehrfach umgerüstet.

## DIE WINDKANALSERIE IM ÜBERBLICK

- 1 **Die Windmaschinen**  
Sinn und Zweck. Bedeutung. Typen. – Ein Überblick  
DLR-Magazin 141, März 2014
- 2 **TWG – Transsonischer Windkanal Göttingen**  
Wandelbarer Gigant – das Überschall-Labor in Göttingen  
DLR-Magazin 142, Juni 2014
- 3 **Ungewöhnliche Experimente**  
Motten, Menschen, Monumente – Vielfalt von Fragestellungen  
DLR-Magazin 143, September 2014
- 4 **KKK – Kryo-Kanal Köln**  
In eisigem Wind – altbewährte und moderne Technik  
DLR-Magazin 144, Dezember 2014
- 5 **Windkanäle der Superlative**  
Ballons für den Mars und Autos auf Eis – der kälteste, der größte, der verrückteste  
DLR-Magazin 145, April 2015
- 6 **Windkanal-Know-how für den Freizeitbereich**  
Surfen auf dem Luftstrom – Bodyflying  
DLR-Magazin 146, Juni 2015
- 7 **ETW – Europäischer Transschall Windkanal**  
Europas Multitalent steht in Köln – kalt und unter Druck  
DLR-Magazin 147, September 2015
- 8 **Die Erbauer**  
Kathedralen der Aerodynamik – Königsdisziplin für die Architekten  
DLR-Magazin 148, November 2015
- 9 **LLF – Großer Niedergeschwindigkeitswindkanal – Large Low-speed facility**  
318 Meter für exklusive Strömungstests – der Gigant von Marknesse  
DLR-Magazin 149, März 2016
- 10 **Monumente der Forschung**  
„Ode an den Windkanal“ – Teil 10 und Schluss der Magazinserie  
DLR-Magazin 150, Juni 2016