

## DER EINSATZ VON WINDKANÄLEN IM KONSTRUKTIVEN INGENIEURBAU – AERODYNAMISCHE MODELLVERSUCHE IM 20. JAHRHUNDERT

### *Zusammenfassung*

*Für weitgespannte Brücken, hohe Gebäude oder andere windanfällige Konstruktionen, wie komplexe Schalen- oder Membrankonstruktionen, werden heute noch Versuche in Windkanälen durchgeführt, um zusätzliche Berechnungsdaten für digitale Modelle zu gewinnen.<sup>1</sup> Die anfänglichen Gründe für Versuche in Windkanälen am Beginn des 20. Jahrhunderts waren die Notwendigkeit von Berechnungsgrundlagen für dynamisches Verhalten von Gebäuden. Zudem beförderten neue theoretische Erkenntnisse auf dem Gebiet der Aerodynamik und technische Entwicklungen im Bau von Windkanälen die Etablierung von Windkanalversuchen auch im konstruktiven Ingenieurbau. Aus welchen Bereichen diese Innovationen übernommen und wie und wo diese für Konstruktionen im Bauwesen adaptiert wurden, soll anhand von Beispielen Inhalt dieses Aufsatzes sein.*

### *Abstract*

*For long-span bridges, tall buildings or other wind-sensitive structures like complex shell or membrane structures, wind tunnel tests are still carried out today to gain additional data for calculations in digital models. The initial reason for conducting tests in wind tunnels at the beginning of the 20<sup>th</sup> century was the necessity for calculation data for the dynamic behaviour of buildings, which was amplified by collapses, as well as the desire for optimisation in the industry. The new theoretical findings in aerodynamics and the technical developments in the construction of wind tunnels were also crucial for the establishment of wind tunnel tests in structural engineering. The subject of this paper will be where these developments originated, how they were adapted and where these processes could take place for certain types of construction.*

---

<sup>1</sup> Dorigatti, Francesco: *Boundary layer wind tunnel model testing – current practice*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical Models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 889–892.

## Einleitung: Einsturzrisiko Wind

Am Ende des 19. Jahrhunderts und im Laufe des 20. Jahrhunderts entstanden erstmals durch die Verwendung neu entwickelter Materialien, wie Spannbeton, und Konstruktionsarten, wie vorgespannte Seilnetzkonstruktionen, sowie verbesserter Berechnungsmethoden neuartige Bauwerke mit beachtlichen Spannweiten und bis dahin unerreichten Höhen und dennoch außergewöhnlicher Leichtigkeit. Vor allem im Bereich der Ingenieurbauten hat sich die Verwendung von Stahl und Stahlbeton etabliert, welcher durch die Entwicklung verbesserter und optimierter Konstruktionsarten und Tragwerke im Bau von Brücken, Hochhäusern, Funktürmen, leichten Schalen oder hängenden Dächern eingesetzt werden konnte.<sup>2</sup> Die erhöhten Gefahren für weitspannende, hohe oder besonders leichte Konstruktionen ausgehend von Wind, waren den Ingenieurinnen und Ingenieuren des 20. Jahrhunderts bereits bekannt, vor allem wegen mehrerer Einstürze von Brücken aufgrund aerodynamischer Einflüsse im



*Abb. 1 Tacoma Narrows Bridge in Washington nach dem Einsturz 1940, Planung: Leon S. Moisseiff, Bauzeit: 1938–1940*

---

<sup>2</sup> Addis 2021 (Anm. 1), S. 205–206, 367.

19. Jahrhundert, wie etwa des Brighton Chain Pier in England 1836, der Wheeling Bridge über dem Ohio River 1854, der Lewiston-Queenston Bridge über dem Niagara River 1864 oder der Niagara-Clifton Bridge 1889. So hatte der deutsch-amerikanische Brückenbauer John August Roebling (1806–1869) schon im 19. Jahrhundert beim Bau seiner Hängebrücken für eine ausreichende Aussteifung gegen Windlasten gesorgt.

Mit dem zunehmenden Wunsch der Materialoptimierung und noch gewagteren Konstruktionen am Limit des Möglichen wurden Windlasten jedoch häufig unzureichend berücksichtigt. So kam es im November 1940, nur vier Monate nach Fertigstellung der Brücke, zum wohl bekanntesten Brückeneinsturz infolge von Resonanzschwingung, erzeugt durch Windeinflüsse, als die Tacoma Narrows Bridge versagte (Abb. 1). Die Hängebrücke besaß damals die drittgrößte Hauptspannweite weltweit, welche durch eine milde Brise, wie es in der Literatur beschrieben wird, in Schwingung versetzt wurde, bis die Brücke brach und ins Wasser stürzte.

Vor allem in den Jahren zwischen 1930 und 1940 wurden Brücken mit größeren Spannweiten oder gewagteren Proportionen gebaut, welche jedoch häufig anfällig für aerodynamische Schwingungen waren und teilweise kostenintensiv in den Folgejahren verstärkt werden mussten, so etwa auch die Golden Gate Bridge im Jahr 1953.<sup>3</sup>

## Windkanalversuche an Modellen

Durch diesen verheerenden Einsturz und folgende kostspielige Verstärkungen an Brücken, an denen Windlasten unzureichend berücksichtigt worden waren, erließen viele Länder unter Berücksichtigung meteorologischer Daten sowie von Erfahrungswerten Berechnungsvorschriften, welche jedoch oft starke Vereinfachungen erforderlich machten. Denn Windlasten sind vor allem bei weitgespannten, hohen oder komplex gekrümmten Bauwerken kaum rein rechnerisch zu erfassen. Um realistische Windlastannahmen in Berechnungen integrieren zu können, erwies es sich als die wirtschaftlichste Methode, die notwendigen Daten aus Versuchen an Modellen im Windkanal zu gewinnen.<sup>4</sup>

Für die Versuche im Windkanal baute man maßstäbliche Modelle des zu prüfenden Bauwerkes, um daran gemessene Werte mittels Ähnlichkeitsmechanik auf das Verhalten des realen Objektes übertragen zu können. Die Auswertung von Versuchen im Windkanal erfolgte anfangs meist nur optisch, dazu wurde die Bewegung von Modellen fotografisch dokumentiert oder Windströmungen und Verwirbelungen mithilfe von Rauch, Nebel oder anderen beweglichen

---

<sup>3</sup> Steinman, David Bernard: *Suspension Bridges. The Aerodynamic Problem and Its Solution*. In: IABSE publications 14 (1954), S. 209–213.

<sup>4</sup> Beutler, Johannes: *Beitrag zur statischen Windbelastung von Seilnetzwerken-Ergebnisse von Windkanaluntersuchungen*. In: Esquillan, Nicolas; Saillard, Yves (Hg.): *Proceedings of the IASS Colloquium on Hanging Roofs, Continuous Metallic Shell Roofs and Superficial Lattice Roofs*, Paris 9–11 July 1962. Amsterdam 1963, S. 76–77.

Objekten, wie Fäden am Objekt, besser sichtbar gemacht. Erst mit der Verwendung von Manometern, deren Prinzip zum Messen von Drücken in Gasen oder Flüssigkeiten schon aus der Chemie oder Medizin bekannt war, konnten die entstehenden Winddrücke am Modell auch quantitativ bestimmt werden. Dazu wurden Flüssigkeitsmanometer eingesetzt und die Messstellen durch mit Flüssigkeit gefüllte Glasröhrchen verbunden, sodass durch den Pegel am Manometer der statische Druck dort bestimmt werden konnte. Durch das Drehen der Modelle konnte der Winddruck aus unterschiedlichen Windrichtungen bestimmt, fotografisch festgehalten und anschließend ausgewertet werden.<sup>5</sup>

## Arten und Entwicklungen von Windkanälen

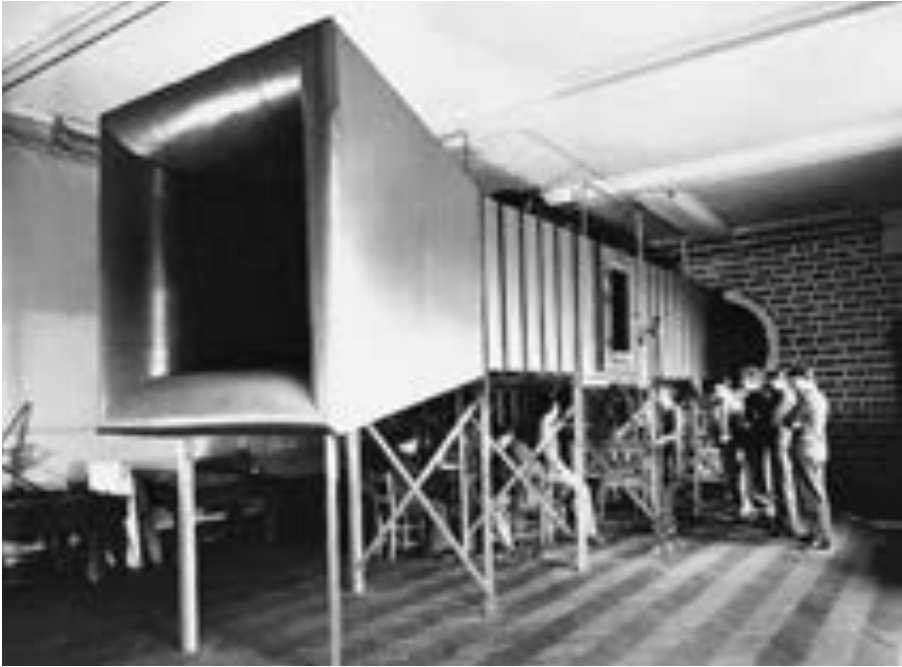
Windkanäle selbst wurden erst am Beginn des 20. Jahrhunderts entwickelt. Man unterschied zwischen dem offenen, mit Außenluft gespeistem Windkanal, welcher häufig nach Gustave Eiffel (1832–1923) als Eiffel-Kanal bezeichnet wird und dem geschlossenen sogenannten Göttinger Kanal. Die Art des Eiffel-Kanals wurde bereits am National Physical Laboratory verwendet, bevor Eiffel diesen 1909 in seinem *Laboratoire Aerodynamique* errichten ließ. Dieser Typ Windkanal wurde in der Regel nicht für Modellversuche im konstruktiven Ingenieurbau eingesetzt.

Der zweite Typus wurde erstmals 1908 von Ludwig Prandtl (1875–1953) an der Universität Göttingen entwickelt, woher auch die Bezeichnung stammt. Offene Windkanäle (Abb. 2) saugen Luft von außen an und blasen diese auch wieder in die Umgebung aus, wohingegen die Luft in geschlossenen Windkanälen verbleibt und somit einen geschlossenen Kreislauf bildet. Ab den 1960er-Jahren wurden in den USA die geschlossenen Windkanäle zu Grenzschichtkanälen weiterentwickelt, die erst später auch in Europa zum Einsatz kamen. Im Prinzip sind Grenzschichtwindkanäle konstruktiv und von der Funktionsweise genauso wie geschlossene Windkanäle, jedoch können durch die Texturierung der Oberflächen realistischere, turbulente und realistischere, turbulente Winde erzeugt werden. Der Name leitet sich von den von Prandtl entdeckten Grenzschichten in natürlichem Wind ab, die durch raue Oberflächen entstehen und die Windgeschwindigkeit beeinflussen.<sup>6</sup> In diesen Windkanälen wurden Flugzeuge, Flugzeugteile, wie etwa Propeller, Fahrzeuge oder Munition getestet. Ihre Entwicklung und Optimierung basierte auf den Bedürfnissen der Luft- und Raumfahrtindustrie, die vor allem in den Zeiten der beiden Weltkriege massive finanzielle Förderung erfuhr. Da es kaum wirtschaftlich war, eigene Windkanäle für Versuche an Gebäudemodellen zu betreiben, wurden diese vorhandenen Einrichtungen auftragsweise mit Versuchen für den konstruktiven Ingenieurbau betraut.

---

<sup>5</sup> Addis, Bill: *The historical use of physical model testing in wind engineering*. In: ders. 2021 (Anm. 1), S. 711–751.

<sup>6</sup> Ebd., S. 771–716.



*Abb. 2 Beispiel eines offenen Windkanals am Aeronautical Laboratory des East London College (1909)*

## **Windkanalversuche im Brückenbau**

Der Einsturz der Tacoma Narrows Bridge führte unter anderem zu Modellversuchen im Windkanal, welche die Gründe des Einsturzes ermitteln sollten, und später vermehrt zu dynamischen Modelluntersuchungen für neue Brückenprojekte. Zu nennen sind hier die Versuche zum Einsturz der Brücke durch Frederick Burt Farquharson (1895–1970) im Structural Research Laboratory an der University of Washington und die Untersuchungen zur Windstabilität von Brücken durch David Bernard Steinman (1886–1960) oder Theodore von Kármán (1881–1963). Christopher Scruton (1911–1990) versuchte als Folge des Einsturzes in den 1940er-Jahren, allgemeinere Entwurfsprinzipien für Bauteile und Details von Hängebrücken zu entwickeln, was nur durch dynamische Modellversuche in der Aerodynamischen Abteilung des National Physical Laboratory (NPL) möglich war, in welcher er tätig war. Seine modellstatisch ermittelten Verbesserungen bezüglich Stabilität waren so überzeugend, dass das Verkehrsministerium einwilligte, bis Ende der 1940-Jahre einen noch größeren Windkanal bauen zu lassen, in welchem auch gesamtheitliche Modelle untersucht werden konnten. Durch

Tests an gesamten Konstruktionen sollte vor allem das Zusammenwirken und die Kopplung der verschiedenen Schwingungsformen aller Teilstücke eines Bauwerkes besser verstanden werden.<sup>7</sup> Scrutons Versuche wurden teilweise im Zuge der Planung für die Severn Brücke zwischen 1946 und 1951 am NPL durchgeführt und sollten die Windstabilität des von den Bauherren bevorzugten Entwurfes einer dann doch nicht ausgeführten Fachwerkträgerbrücke bestätigen.<sup>8</sup> Aus politischen Gründen wurde entschieden, den entwickelten und getesteten Brückenentwurf für die Forth Road Bridge (fertiggestellt 1964) zu verwenden und den Bau der Severn Bridge zu verschieben. Trotzdem war geplant, einen ähnlichen Entwurf für die Severn Bridge zu verwenden, bis die Konstrukteure auf großen Druck von außen das Gewicht der Fahrbahn verringern sollten, sodass ein Entwurf der Brücke mit stählernen Hohlkastenträgern ausgearbeitet wurde. Einer Anekdote zufolge ist es einem Zufall zu verdanken, dass dieser Entwurf auch ausgeführt wurde. Da man befürchtete, das Testen und Ausarbeiten der neuen Variante würde zu lange dauern, wollte man wiederum eine Fachwerkbrücke wie ursprünglich geplant ausführen. Dazu wurde aufgrund von leichten Änderungen im Vergleich zur Forth Road Bridge ein Abschnittsmodell gebaut, welches im Windkanal getestet wurde. In einer frühen Phase der Modellversuche löste sich das Modell im Windkanal und wurde im Ventilator komplett zerstört, sodass aufwendig ein neues Modell gebaut werden musste. Diese Chance nutzte man unter anderem mithilfe von Scruton, um Versuche an dem neuen Entwurf mit aerodynamisch geformten Hohlkastenträgern durchzuführen. Diese hatten im Vergleich zur Forth Road Bridge bei nur zwei Drittel Stahlaufwand hohe Sicherheitsfaktoren zum Ergebnis, sodass die Variante weiterverfolgt und schließlich auch 1961–1966 ausgeführt wurde.<sup>9</sup>

Nicht zuletzt durch die erfolgreiche Ausführung der Severn Bridge erlangte das NPL weltweite Bekanntheit in Sachen aerodynamischer Expertise. So fand auch die erste International Conference on Wind Effects on Buildings and Structures 1963 in Teddington statt und begründete somit eine internationale Fachgemeinschaft.<sup>10</sup>

Auch der deutsche Ingenieur und Professor Fritz Leonhardt (1909–1999) war mit den Versuchen von Scruton bekannt und beschäftigte sich nur wenig später mit ähnlichen Problemstellungen in seinen eigenen Brückenentwürfen. Leonhardt führte Windkanalversuche zur Bestimmung von Windwiderstandsbeiwerten verschiedener Querschnitte durch, wobei die konventionellen Brücken mit Fachwerkversteifungsträgern schlechter als schlanke Hohlkastenträger abschnitten und die scharfen Kanten der Stäbe zu Kármánschen Wirbelstraßen führten. Außerdem empfand Leonhardt die hohen Fachwerkträger nicht ästhetisch und befremdlich

7 Scruton, Christopher: *An experimental investigation of the aerodynamic stability of suspension bridges*. In: IABSE congress report 3 (1948), S. 463–473.

8 Scruton, Christopher: *An investigation of the oscillations of suspension bridges in wind*. In: IABSE congress report 4 (1952), S. 37–55.

9 Wooton, Leslie Roger: *Kit Scruton: An Appreciation*. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 35 (1990), S. 299–314.

10 Ebd., S. 306.

an ansonsten leicht wirkenden Brückentragwerken. Leonhardt stellte zudem fest, dass Kopelschwingungen in Hängebrücken nur durch das gegenläufige Schwingen der beiden Tragkabel möglich sind, sodass er für einen Monokabelbrückenentwurf, welchen er ab etwa 1955 entwickelt hatte, in der Hauptöffnung nur ein Tragkabel wählte. Von diesem einen Tragkabel wurde die Fahrbahn über sich diagonal kreuzende Seile, welche im Querschnitt ein Dreieck bildeten, abgehängt. Das daraus entstehende Seilfachwerk bildete mit der Fahrbahntafel einen Dreigurtträger und verlieh der Fahrbahn somit hohe Torsionssteifigkeit.<sup>11</sup>

Das beschriebene System der Monokabelhängebrücken wurde von Leonhardt an zwei Entwürfen durchgearbeitet, einer davon für den Wettbewerb der Tejo-Brücke in Lissabon zwischen 1958 und 1959. Dafür wurden im Windkanal der Technischen Hochschule Stuttgart Windwiderstandsbeiwerte unter diversen Anblaswinkeln im Vergleich zu konventionellen Brücken bestimmt. Anhand dieser Versuche ließ sich nachweisen, dass sich die Gefahr von Schwingungen durch einen geeigneten Entwurf der Konstruktion deutlich vermindern lässt. Zusätzlich wurden aerodynamische Versuche im Windkanal des NPL durchgeführt, welche ebenfalls die Stabilität des Monokabelentwurfes gegen gekoppelte Schwingungen bestätigten. Aus seinen Versuchen schloss Leonhardt, dass mit Monokabelhängebrücken sehr hohe Spannweiten bei niedrigem Eigengewicht und dennoch aerodynamischer Stabilität erreicht werden können.<sup>12</sup>

Die Ergebnisse dieser Versuche verwendete Leonhardt auch bei anderen Konstruktionen als Entwurfsprinzipien weiter, wie zum Beispiel bei der Planung von Schrägkabelbrücken, welche nach Leonhardts Meinung sogar noch bessere Eigenschaften in Bezug auf die Windstabilität aufwiesen als Hängebrücken. Da die vielen unterschiedlich langen Schrägkabel auch verschiedene Eigenfrequenzen hätten, würde sich eine hohe Systemdämpfung ergeben, sodass Resonanzschwingungen unmöglich wären, wobei die Fahrbahntafel die vorher in Versuchen im Windkanal optimierten Querschnitte aufweisen müsste.<sup>13</sup> Diese Annahmen ließ Leonhardt durch Scruton in Versuchen für die Kniebrücke in Düsseldorf überprüfen, wobei Beobachtungen nach Fertigstellung der Brücke die Versuchsergebnisse bestätigten.<sup>14</sup>

Ein Pionier und Experte auf dem Gebiet der Aerodynamik im Ingenieurwesen war Alan Garnett Davenport (1932–2009), welcher das Fachgebiet maßgeblich geprägt hat. Bereits in seiner Doktorarbeit an der Bristol University hatte sich Davenport mit dem Verhalten von Konstruktionen im turbulenten Wind beschäftigt, was ihn zu experimentellen Untersuchungen motivierte. Dies führte dazu, dass Davenport zusammen mit Kollegen 1965 an der University of Western Ontario einen der ersten Grenzschichtwindkanäle spezifisch zum Testen von Bau-

---

<sup>11</sup> Leonhardt, Fritz: *Aerodynamisch stabile Hängebrücke für große Spannweiten*. In: IABSE congress report 7 (1964), S. 156–161.

<sup>12</sup> Ebd., S. 161–163.

<sup>13</sup> Leonhardt, Fritz: *Seilkonstruktionen und seilverspannte Konstruktionen*. In: IABSE congress report 9 (1972), S. 120.

<sup>14</sup> Leonhardt, Fritz; Zellner, Wilhelm: *Vergleiche zwischen Hängebrücken und Schrägkabelbrücken für Spannweiten über 600 m*. In: IABSE publications 32 (1972), S. 146–148.

werken mit noch realistischerem natürlichem Windverhalten baute. Dieser Windkanal führte zur Gründung des Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory (BLWTL). In dieser Einrichtung wurden in den folgenden Jahren zahlreiche Versuche für Brücken mit großen Spannweiten durchgeführt, eine der ersten war die A. Murray MacKay Bridge in Halifax, welche zwischen 1967 und 1970 errichtet wurde. Die Brücke sollte aus leichten orthotropen Fahrbahnplatten und hochfesten Stählen gebaut werden, wodurch die Konstruktion sehr leicht werden sollte. Diese Leichtigkeit war unter anderem ein Grund, Versuche an einem Gesamtmodell im Maßstab 1:320 und an Teilmodellen durchzuführen. Außerdem konnten Teile des Modells abgenommen werden, um das Verhalten der Brücke im Bauzustand im Windkanal zu untersuchen. Davenport wurde rasch als anerkannter Experte bekannt und führte Versuche für zahlreiche große Brückenbauwerke weltweit im BLWTL durch. Die universitäre Einrichtung in Kanada war mit diesen Versuchen im Grenzschichtwindkanal in den 1960er-Jahren weltweit führend, in anderen Teilen der Welt kamen diese erst später zum Einsatz.<sup>15</sup>

## Windkanalversuche für weitgespannte Flächentragwerke

Die innovativen und auf Windlasten hin optimierten Brückenentwürfe, welche mit dem Beginn dynamischer Versuche im Windkanal entstanden, zeigen sehr deutlich, welchen Einfluss die Modellversuche auf die technische Weiterentwicklung, aber auch auf die Gestaltung von Brücken dieser Zeit hatten. Nicht nur im Brückenbau, sondern auch in anderen Bereichen war die Durchführung von Modellversuchen im Windkanal unabdingbar für die Verwirklichung von Bauwerken. Vor allem ab den 1960er-Jahren, als leichte Flächentragwerke, wie etwa Seilnetz-, Hängedach- und Zeltkonstruktionen immer beliebter wurden, fehlte es an praktischen Grundlagen für die Errichtung derselben. Johannes Beutler (Lebensdaten unbekannt) von der Deutschen Bauakademie in der DDR führte deshalb um 1960 im achteckigen Windkanal des aerologischen Observatoriums Lindenberg bei Beeskow Versuche für Seilnetzkonstruktionen durch. Im Windkanal wurden Modelle von hyperbolisch-paraboloiden Baukörpern aus Kunststoff getestet (Abb. 3). Die Ober- und Unterseiten der Modelle wurden mit Messstellen ausgestattet und bei zwei Windgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Anströmrichtungen der Winddruck und Windsog ermittelt und grafisch dargestellt. Zusätzlich wurden Kleinbildfilme erstellt, welche maßstabsgerecht optisch vermessen werden konnten. Die Ergebnisse dieser Versuche ermöglichten, trotz der idealen und unrealen Windverhältnisse, grundlegende Erkenntnisse über Wirbelbildungen, Schwingungsverhalten, Flattern und Vorspannungsbedingungen komplexer Flächen im Wind.<sup>16</sup>

---

<sup>15</sup> King, J. Peter C.: *The foundation and the future of wind engineering of long span bridges – contribution of Alan Davenport*. In: Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003), S. 1529–1546.

<sup>16</sup> Beutler 1963 (Anm. 4), S. 77–84.





*Abb. 3 Versuchsaufbau für Versuche an Modellen von Hyparschalen aus Kunststoff im achteckigen Windkanal des aerologischen Observatoriums in Beeskow*

*Abb. 4 Modell der Alster-Schwimmhalle, beklebt mit Fäden im Maßstab 1:175 im Windkanal des Forschungsinstituts für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (1969)*



Frei Otto (1925–2015) ließ mit seinem Institut für leichte Flächentragwerke (IL) in Stuttgart Versuche in Windkanälen für konkrete Projekte durchführen. Für den Deutschen Pavillon für die Weltausstellung 1967 in Montréal fertigte man ein Modell aus geschichtetem Sperrholz im Maßstab 1:150 an. Am Modell wurden mit einem Druckmanometer Druckdifferenzen ermittelt. Außerdem wurde das Modell mit einer Ruß-Petroleum-Mischung eingefärbt, um aus den unterschiedlichen Windrichtungen Strömungsbilder zu erzeugen und Ablösezonen zu bestimmen. Die Versuche wurden am Institut für Aero- und Gasdynamik der Technischen Hochschule Stuttgart am Campus Vaihingen durchgeführt.<sup>17</sup>

In den 1970er-Jahren war es dann zwar möglich, die Eigenfrequenz von vorgespannten Seilnetzkonstruktionen rechnerisch zu ermitteln, jedoch konnte man keine Berechnungen zum dynamischen Verhalten im natürlichen Wind durchführen. Deshalb griff man auch beim Großprojekt für die Sportstätten der Olympischen Spiele 1972 in München erneut auf Versuche an Modellen und im Speziellen auf Versuche im Windkanal von festen und

<sup>17</sup> Protokoll über die Arbeiten des Institutes für leichte Flächentragwerke an den Modellversuchen und Auswertungen am Projekt ›Deutscher Pavillon, 1967, Weltausstellung Montreal‹ von Frei Otto, März 1967 (Archiv des Deutschen Architekturmuseum Frankfurt, ohne Signatur).

verschieblichen Modellen und Modellausschnitten zurück.<sup>18</sup> Die Windkanalversuche wurden an der Landesgewerbeanstalt in München und am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren der Universität Stuttgart durchgeführt.<sup>19</sup>

Ebenfalls am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren der Universität Stuttgart wurden Modellversuche zur Bestimmung von Windlastannahmen für die Dachschale der Alster-Schwimmhalle in Hamburg, bestehend aus zwei Hyparschalen, durchgeführt. Das Modell im Maßstab 1:175 (Abb. 4) wurde vom Forschungsinstitut selbst hergestellt und umfasste die Dachschale aus den zwei symmetrisch angeordneten Hyparflächen, die Seitenwände der Schwimmhalle und die unsymmetrisch angegliederten Bauten. Es wurden vier Messreihen mit unterschiedlichen Modellkonfigurationen durchgeführt. Des Weiteren wurde das Modell mit Wollfäden beklebt, um Strömungsuntersuchungen und -beobachtungen in Bezug auf unterschiedliche Windeinfallswinkel zu machen.<sup>20</sup>

Für die Bundesgartenschau 1975 in Mannheim sollte eine Halle in Form einer Gitterschale entstehen, wiederum war Frei Otto in die Planung involviert, wie auch das Ingenieurbüro von Ove Arup. Unter anderem erforderten die Konstruktionsweise und Schalengeometrie Versuche im Windkanal, um realistische Werte für die Windlasten in den Berechnungen zu erhalten. Für die durch die British Hydrodynamics Research Association im Windkanal des Cranfield Institute durchgeführten Versuche wurden mehrere hohle Messmodelle im Maßstab 1:200 hergestellt. Um Windströmungen und Turbulenzen zu beobachten, wurden zusätzlich noch Versuche mit Rauch im Windkanal durchgeführt.<sup>21</sup>

Die Verwendung von Messmodellen im Windkanal war auch über die deutsch- und englischsprachigen Gebiete hinaus verbreitet. So führte in Italien das Istituto di Aeronautica del Politecnico di Torino unregelmäßig Versuche im Windkanal für den konstruktiven Ingenieurbau durch. Die Tests erfolgten ab den 1960er-Jahren überwiegend in Zusammenarbeit mit dem bekannten Modellversuchslaboratorium Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) in Bergamo. Das Laboratorium verfügte über keinen eigenen Windkanal, sodass eine Alternative gesucht wurde. Guido Oberti (1907–2003), später Leiter des ISMES, war gleichzeitig Dozent am Politecnico di Torino, wodurch die Verbindung zum dort vorhandenen Windkanal zustande kam. Partner am Politecnico war Carlo Mortarino (1916–1993), welcher den Lehrstuhl für Aerodynamik innehatte und am Aufbau des Windkanals beteiligt war. Im Windkanal in Turin

---

18 Schlaich, Jörg; Altmann, H.; Bergermann, Rudolf u.a.: *Das Olympiadach in München*. In: IABSE congress report 9 (1972), S. 365–376.

19 Olympia-Baugesellschaft (Hg.): *Olympische Bauten München 1972, 2. Sonderband, Bestandsaufnahme Herbst 1970*. Stuttgart 1970, S. 27.

20 FKFS-Bericht Nr. 3/1969, von Jürgen Potthoff, 23. Januar 1969 (Universitätsarchiv Stuttgart, 131/2/688), S. 2–12.

21 Schmid, Benjamin; Weber, Christiane: *From physical to digital – the form-finding and measuring models of the Mannheim Multihalle*. In: Campbell, James W. P.; Baker, Nina; Driver, Michael u.a.: *Timber and Construction. Proceedings of the ninth Conference of the Construction History Society*. Queens' College, University of Cambridge, 1–3 April 2022. Cambridge 2022, S. 485–495.

wurden unter anderem auch Bauwerke von Pier Luigi Nervi (1891–1979) getestet, wie die Norfolk Scope Arena und die St. Mary Cathedral in San Francisco.<sup>22</sup>

Die komplexe Geometrie und die ausgesetzte Lage des Opernhauses in Sydney erforderten am Beginn der 1960er-Jahre ebenfalls Windkanalversuche. Für das bekannte Bauvorhaben wurden Modelle in den Windkanälen der Southampton University und des NPL getestet. Es wurde die Verteilung der Windlasten auf die Schale aus unterschiedlichen Richtungen und mithilfe von Fäden die Strömungsbildung bestimmt. Zur Auswertung wurden elektronische Computer eingesetzt, deren Kapazität und Geschwindigkeit stark begrenzt war, aber trotzdem essenziell für die Durchführung des Projektes waren.<sup>23</sup>

## Windkanalversuche für hohe Bauwerke

Der Drang der Ingenieurinnen und Ingenieure, immer höher zu bauen, sollte nicht nur imponieren und die Fortschrittmöglichkeiten aufzeigen, sondern wurde auch aus technischen Gründen notwendig. Bei Kühltürmen nimmt etwa die natürliche Zugkraft mit der Höhe zu, höhere Schornsteine verhindern Luftverunreinigungen im Lebensraum des Menschen besser als niedrigere, hohe Brückenpfeiler von Infrastrukturbauwerken ermöglichen kürzere Wege über Täler und Hochhäuser verringern den Bodenverbrauch. Bei all diesen Themen war das Ingenieurwesen gefordert, will doch die wirtschaftlichste Lösung gefunden werden, welche oft eine gewisse Schlankheit erfordert. So bildeten aerodynamische Betrachtungen von hohen Bauwerken ebenfalls ab den 1960er-Jahren ein Desiderat im Bauingenieurwesen.<sup>24</sup> Vorläufer hierfür sind etwa Versuche für das Empire State Building in New York, für welches 1932 Untersuchungen an einem 1:250-Modell aus Aluminium im Windkanal des US Bureau of Standards durchgeführt wurden (Abb. 5).<sup>25</sup>

Auch am NPL wurden nicht nur Brücken als Modelle im Windkanal getestet, sondern auch Hochhäuser, wie der GPO-Tower (heute BT Tower) in London und ein ähnlicher Turm mit quadratischem Querschnitt in Birmingham. Aus diesen Tests an Hochhäusern ergab sich das Desiderat eines neuen, speziell für industrielle Zwecke erforderlichen Aerodynamikkanals, welcher aus finanziellen Gründen von der Regierung nie realisiert wurde.<sup>26</sup>

In Italien ließ Pier Luigi Nervi in Zusammenarbeit mit dem ISMES am Politecnico di Torino ähnliche Versuche für ein Hochhaus durchführen. Bei diesem Projekt handelte es sich um

---

22 Neri, Gabriele: *Capolavori in miniatura. Pier Luigi Nervi e la modellazione strutturale*. Mendrisio 2014, S. 146–147, 160–162 und 235–238.

23 Watson, Anne (Hg.): *Building a Masterpiece: The Sydney Opera House*. Sydney 2006, S. 93. Whitbread, R.E.; Packer, M.A.: *Wind pressure measurements on a model of the proposed new Sydney Opera House, National Physical Laboratory Aeronautical Division, Report 1049*. London 1962.

24 Leonhardt, Fritz: *Hohe, schlanke Bauwerke*. In: IABSE congress report 9 (1972), S. 213–242.

25 Addis 2021 (Anm. 5), S. 732–733.

26 Wooton 1990 (Anm. 9), S. 299–314.



Abb. 5 Modell im Maßstab 1:250 des Empire State Building im Windkanal des National Bureau of Standards (1932)

den Stock Exchange Tower in Montréal, damals das höchste Gebäude der Stadt. Wollte man erst Versuche in Kanada durchführen, beharrte man schließlich doch darauf, den Windkanal in Turin zu verwenden, um die Versuche direkt überwachen zu können.<sup>27</sup>

Das BLWTL unter dem bekannten Windingenieur Davenport hat ebenfalls Versuche für namhafte Hochhausprojekte im Windkanal durchgeführt. Das Projekt des World Trade Centers in New York war eines der ersten, an welchem Davenport als beratender Ingenieur beteiligt war. Damals gab es den Windkanal am BLWTL noch nicht,

sodass er Versuche am Windkanal der Colorado State University und am NPL durchführen ließ. Besondere Aufmerksamkeit wurde der dynamischen Wirkung des Windes auf die Türme gewidmet, einschließlich der aerodynamischen Interferenz bei Windrichtungen, bei denen sich einer der Türme in Gegenwind zum anderen befand. Als Ergebnis der Versuche wurden in den beiden Türmen zähelastische Dämpfer installiert, um die windinduzierten Bewegungen zu mindern. Weitere ikonische Hochhäuser, an deren Planung Davenport in Form von Modellversuchen im Windkanal beteiligt war, sind etwa der Sears Tower (heute: Willis Tower) in Chicago oder der CN Tower in Toronto. Für beide Projekte wurden Modelle samt Umgebung gebaut und im Windkanal des BLWTL getestet.<sup>28</sup>

## Fazit

Die beschriebenen Beispiele zeigen, dass an vielen Einrichtungen, vor allem universitärer Art, Versuche für aerodynamische Probleme im Bereich des Bauingenieurwesens durchgeführt wurden. Dies verdeutlicht, dass die Methode der Modelluntersuchung im Windkanal weit verbreitet war und von vielen Ingenieurinnen und Ingenieuren an Universitäten durchgeführt

<sup>27</sup> Neri 2014 (Anm. 22), S. 146–147.

<sup>28</sup> Isyumov, Nicholas: *Alan G. Davenport's mark on wind engineering*. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104–107 (2012), S. 12–24.

werden konnte. In der Regel waren die dafür eingesetzten Windkanäle an Universitäten jedoch nicht speziell zur Untersuchung von Bauwerken, sondern für andere Spezialdisziplinen, wie zum Beispiel der Flugzeug- oder Fahrzeugdynamik gebaut worden. Als Beispiele dazu lassen sich gleich zwei Einrichtungen an der Universität Stuttgart nennen, welche eigene Windkanäle besaßen, nämlich das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren<sup>29</sup> und das Institut für Aerodynamik und Gasdynamik mit seinem Kurzzeitüberschallwindkanal.<sup>30</sup>

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, wurden die vorhandenen Windkanäle in Stuttgart durch Aufträge von Frei Otto oder Fritz Leonhardt auch für Untersuchungen von Bauwerken genutzt, jedoch nur vereinzelt. Vor allem Fritz Leonhardt wandte sich in einigen Fällen lieber an das NPL, da dieses mehr Erfahrung in diesem Bereich und vermutlich auch die spezialisiertere Ausrüstung für aerodynamische Versuche von Ingenieurkonstruktionen hatte. Das NPL war bereits 1902 eröffnet worden und hatte den Auftrag, als staatlich finanzierte Einrichtung die messtechnische Bestimmung von Konstanten zum Beispiel in der Meteorologie zu standardisieren. Zugleich sollte wissenschaftliche Grundlagenforschung betrieben sowie die Entwicklung und Verbesserung neuer Technologien vorangetrieben werden. Eine zusätzliche Finanzierung ergab sich aus eben jenen kommerziell durchgeführten Versuchen für die Industrie, in diesem Fall die Bauindustrie. Vorbild für das Laboratorium war die bereits 1887 außerhalb von Berlin eingerichtete Physikalische Technische Reichsanstalt. Durch das breite Aufgabenfeld entwickelte sich das NPL rasch zu einer namhaften Institution innerhalb Großbritanniens und war durch angewandte Forschung im Bereich der Radar- oder Nukleartechnik beispielsweise während der Kriege von großer Bedeutung.<sup>31</sup> Bereits ab 1903 verfügte das NPL über einen ersten Windkanal mit vertikalem Windstrom zur Bestimmung von Windlasten, weitere folgten wenige Jahre später.<sup>32</sup> 1918 wurde am Laboratorium eine eigene Abteilung für Aerodynamik eingerichtet, wodurch der Vorsprung, welchen man sich bereits durch den frühen Einsatz von Windkanälen erarbeitet hatte, auf diesem Gebiet noch weiter ausgebaut wurde. Die Vorreiterrolle für Versuche im Ingenieurbau konnte vor allem durch die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse und Technologien aus den Forschungen zur Flugzeugtechnik in Windkanälen während der beiden Weltkriege erreicht werden. Nach dem Zweiten Weltkrieg und der Zerstörung von Bereichen des Laboratoriums begann man mit dem Ausbau und der Erneuerung desselben. In diesem Zuge installierte man auch neue Windkanäle und profitierte dabei vom Innovationsschub durch

---

29 Potthoff, Jürgen; Schmid, Ingobert C.: *Wunibald I.E. Kamm – Wegbereiter der modernen Kraftfahrttechnik*. Berlin/Heidelberg 2012, S. 39–60.

30 Universität Stuttgart: *Institut für Aerodynamik und Gasdynamik – Geschichte des Instituts*, <<https://www.iag.uni-stuttgart.de/institut/historie/>> (30.03.2023).

31 Magnello, Eileen: *A Century of Measurement. An Illustrated History of The National Physical Laboratory*. Bath 2000, S. 8–10.

32 Addis 2021 (Anm. 5), S. 713.

die vorangegangenen kriegswichtigen Forschungen der Luftfahrttechnik.<sup>33</sup> Diese Form der Innovationsschübe durch Kriegsergebnisse, bekannt aus der Technikgeschichte<sup>34</sup>, lässt sich dank des Technik- und Wissenstransfers aus der Luftfahrttechnik in das Bauwesen nicht nur am NPL festhalten, sondern trifft generell auf sämtliche Prüfeinrichtungen im Bauwesen nach den Kriegen zu.<sup>35</sup>

Bereits in den 1940er-Jahren waren zahlreiche Versuche und Untersuchungen zu Brücken durchgeführt worden, motiviert durch Ressourcenknappheit und die Notwendigkeit realistischerer Berechnungswerte. Die Einführung von leichten, weitgespannten Flächentragwerken wie Schalen, Membranen und Seilnetzen in die Architektur ab den 1950er-Jahren ergab weiteren Bedarf an aerodynamischen Modellversuchen, wofür am NPL, welches sich zu einem wahren Zentrum unter anderem im Ingenieurwesen entwickelt hatte, die Pionierarbeit geleistet wurde. Versuche für diese Art von Bauwerken wurden bis in die 1970er-Jahre fortgeführt, bis der zuständige Arbeitsbereich am NPL aufgelöst und die Agenden ausgegliedert wurden.<sup>36</sup> Ein Grund für die Aufgabe der Abteilung könnte neben administrativen Veränderungen auch das Aufkommen von computerbasierten Berechnungs- und Simulationsverfahren im Ingenieurwesen sein, welche die Ermittlung von Daten als Berechnungsgrundlagen erleichterte. Die dynamischen Untersuchungen an Modellen im Windkanal konnten jedoch nicht vollständig ersetzt werden, wie es für manche statischen Probleme im Bauingenieurwesen der Fall ist. Ein weiterer Grund für die Aufgabe der Abteilung war vermutlich die wachsende Konkurrenz durch nordamerikanische Institutionen, welche bereits ab der Mitte der 1960er-Jahre mit Grenzschichtwindkanälen arbeiteten, wie etwa das BLWTL in Kanada, sodass die bis dato führende Rolle Großbritanniens nach Nordamerika verlagert wurde. Diese speziellen Windkanäle wurden immer häufiger konsultiert und das BLWTL wurde zu einem der bedeutendsten Zentren der aerodynamischen Windkanalversuche überhaupt. Außerdem beförderte die zunehmende Vernetzung der Windingenieurinnen und Windingenieure ab den 1960er-Jahren durch Konferenzen und Publikationen die Verbreitung und Aufweitung der Disziplin.

Auch heute werden für besonders windanfällige Bauwerke noch Versuche und Messungen an physischen Modellen in Windkanälen durchgeführt, da das komplexe aerodynamische Verhalten von Gebäuden trotz zur Verfügung stehender digitaler Modelle und Computermodelle bis dato oft nur unzureichend vorauszusagen und zu berechnen ist.

---

33 Magnello 2000 (Anm. 31), S. 49–50, 123–125 und 214–215.

34 Ludwig, Karl-Heinz; König, Wolfgang: *Technik, Ingenieure und Gesellschaft. Geschichte des Vereins Deutscher Ingenieure 1856–1981*. Düsseldorf 1981.

35 Für die Materialprüfanstalt Stuttgart siehe: Weber, Christiane: *Physical modelling at the University of Stuttgart*. In: Addis 2021 (Anm. 1), S. 415–425.

36 Magnello 2000 (Anm. 31), S. 49–50, 123–125 und 214–215.