

DAS MESSMODELL FÜR DIE ALSTER-SCHWIMMHALLE HAMBURG – EIN INTERDISZIPLINÄRES ZUSAMMENWIRKEN STUTTGARTER BAUINGENIEURE AUF DEM GEBIET DER MODELLSTATIK

Zusammenfassung

Die Alster-Schwimmhalle (1956–1973) in Hamburg von Niessen und Störmer mit ihrer expressiv schmetterlingsförmigen Dachform aus zwei hyperbolischen Paraboloiden wird von der Architekturgeschichte als Inkunabel der Nachkriegsmoderne gerühmt. Die Ausführung der komplexen Spannbetonschale konnte nur durch ein interdisziplinäres Team von Ingenieuren gelingen, da die Konstruktion weit über das hinaus ging, was damals mit den gängigen Rechenmethoden zu bewerkstelligen gewesen wäre. Deshalb wurden am Stuttgarter Institut für Modellstatik Versuche an einem erst in Mikrobeton geplanten und dann in Acrylglas ausgeführten großen Modell durchgeführt. Erst mittels dieser sogenannten hybriden Modellversuche war es möglich, die Schwimmhalle zu dimensionieren und nach langer Planungszeit zu realisieren.

Abstract

The Alster Swimming Pool (1956–1973) in Hamburg by Niessen and Störmer with its expressive butterfly-shaped roof form consisting of two hyperbolic paraboloids is praised by architectural history as an incunabulum of post-war modernism. The execution of the complex prestressed concrete shell could only succeed through an interdisciplinary team of engineers, as the construction went far beyond what could have been accomplished with the usual structural calculation methods at the time. Therefore, tests were carried out at the Stuttgart Institute for Model Statics on a large model, first planned in micro-concrete and then executed in acrylic glass. Only with the help of these so-called hybrid model tests it was possible to dimension the swimming hall and realise it after a long planning period.

Das Projekt für ein Hallenschwimmbad in Hamburg

Das Hallenschwimmbad an der Sechslingspforte im Stadtteil Hohenfelde entstand nach dem Zweiten Weltkrieg in Hamburg, einer Stadt, die während des Krieges durch Bombenangriffe schwer zerstört worden war. Nach der Phase des unmittelbaren Wiederaufbaus der Stadt entschied man sich 1956 für einen Neubau, um das Schwimmbad am Berliner Tor zu ersetzen. Dafür wurde im Jahr 1958 von den Hamburger Wasserwerken als Bauträger¹ und vom Senat der Freien und Hansestadt Hamburg als Bauherr ein Architekturwettbewerb ausgeschrieben, aus welchem die Entwürfe der Architekten Horst Niesen (1910–unbekannt) aus Wiesbaden und Rolf Störmer (1907–1982) aus Bremen als Gewinner hervorgingen, die anschließend mit einer gemeinsamen Entwurfsausarbeitung beauftragt wurden.²

Das geplante Hallenbad sollte gemäß dem Entwurf der Architekten durch ein weit auskragendes Schalendach überspannt werden, bestehend aus zwei achsensymmetrischen Hyparschalen (Abb. 1). Die Überdachung überspannt eine Fläche von circa 4.300 Quadratmetern. Da der Entwurf aus ästhetischen Gründen keine kontinuierlichen Unterstützungen der Schalenränder vorsah, ergaben sich durch die lediglich drei geplanten Stützen große, frei auskragende Schalenflächen.

Schalendächer aus hyperbolischen Paraboloiden waren in den 1950er-Jahren, vor allem durch die bereits publizierten Bauten von Félix Candela Outeriño (1910–1997), bei Architekten sehr en vogue. Die frei geformten Dachflächen entsprachen den Visionen der Nachkriegszeit von einer nach allen Seiten offenen und demokratischen Architektur und boten den Nutzern eine hohe Flexibilität.³ Die Form der Hyparschalen eignete sich dabei besonders für die Ausführung in Spannbeton, da die Spannglieder entlang der Erzeugenden einer Richtung der Hyparfläche, also entlang einer Gerade ohne Krümmung, verlegt werden konnten, was die Aufnahme der Zugkräfte in den Schalen begünstigte. Dies ist eine wichtige geometrische Eigenschaft der Hyparschalen und bringt Vorteile etwa auch im Hinblick auf die spätere Schalung.⁴

Im Falle der Alster-Schwimmballe sollten zwei gleiche Hyparflächen mit möglichst schlanken geraden Randträgern das Dach bilden, welche im Grundriss Rauten formen. Durch den einen gemeinsamen Tiefpunkt und die zwei weiteren der jeweiligen beiden Einzelschalen, ergeben sich die drei Auflagerpunkte des Gesamtdaches. Die beiden achsensymmetrischen Einzelflächen lassen sich, wie für hyperbolische Paraboide

¹ Wunder, Olaf: *Hamburg historisch: Die Schwimmhalle mit Schmetterlings-Flügeln*. In: Hamburger Morgenpost, 17. März 2018, S. 15.

² Redaktion Glasforum: *Alster-Schwimmhalle Hamburg*. In: Glasforum 24 (1973), H. 5, S. 21–26.

³ Holgate, Alan: *The Art of Structural Engineering. The Work of Jörg Schlaich and his Team*. Stuttgart/London 1997, S. 46.

⁴ Leonhardt, Fritz: *Spannbeton für die Praxis*. Berlin/München/Düsseldorf 1973, S. 581.



Abb. 1 Architekturmodell der Alster-Schwimmhalle der Architekten Niessen und Störmer

charakteristisch, als Regelflächen konstruieren.⁵ Durch die Spiegelsymmetrie der beiden Schalen ergibt sich in den Südwestansichten die von den Architekten intendierte Form eines ruhenden Schmetterlings, der über den gläsernen, selbsttragenden Wänden schwebt.⁶

Dieser Entwurf ging weit über das bisher bei Hallenbauten in Spannbeton Realisierte hinaus: Eine Herausforderung bei der Verwirklichung des Entwurfes waren insbesondere die Randträger, die trotz der wenigen Punkte zum Abtragen der Lasten möglichst schlank ausgeführt werden sollten, um die expressive Form der Schale möglichst leicht wirken zu lassen.⁷

Die Zweifel an der Ausführbarkeit dieses Entwurfs mit der enormen Auskragung bei lediglich drei Stützen waren so groß, dass die anfänglich beauftragten Ingenieure die Umsetzung ohne eine weitere Stütze nicht für möglich hielten und den Auftrag ablehnten.⁸

⁵ Leonhardt, Fritz; Schlaich, Jörg: *Das Hyparschalen-Dach des Hallenbades Hamburg Sechslingspforte. Teil I: Entwurf und Tragverhalten*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 65 (1970), H. 9, S. 207.

⁶ Redaktion *Glasforum* 1973 (Anm. 2), S. 21–22.

⁷ Leonhardt/Schlaich 1970 (Anm. 5), S. 207.

⁸ Bögle, Annette: *weit breittfloating roofs*. In: Bögle, Annette; Flagge, Ingeborg; Schmal, Peter Cachola (Hg.): *leicht weit/light structures*. Jörg Schlaich, Rudolf Bergermann. München/Berlin/London u. a. 2003, S. 89.

Das Stuttgarter Ingenieurbüro Leonhardt + Andrä übernimmt

Man musste sich daher nach einem neuen Team an Ingenieuren umsehen, das sich in der Lage sah, den gewagten Entwurf der Architekten Realität werden zu lassen. Fündig wurden die Hamburger in Stuttgart: Im Jahr 1964 wurde das Ingenieurbüro Leonhardt + Andrä mit der Tragwerksplanung beauftragt. Das Team um Fritz Leonhardt (1909–1999) war in der unmittelbaren Nachkriegszeit vor allem durch seine Erfolge im Brückenbau bekannt geworden. Ab den 1950er-Jahren übernahmen die Stuttgarter Ingenieure jedoch auch die Tragwerksplanung für gewagte Hochbauten: so für das BASF Hochhaus in Ludwigsburg (1853–1957, nach einem Entwurf von Hentrich & Petschnigg) oder für das Phoenix-Hochhaus in Düsseldorf (1955–1960, ebenfalls Hentrich & Petschnigg). Entscheidend für die Vergabe des Schalenbaus in Hamburg dürfte das Hängedach für die sogenannte Schwimmooper in Wuppertal (1954–1957, nach einem Entwurf von Friedrich Hetzelt) gewesen sein, die 1957 eingeweiht werden konnte.⁹

Bereits kurz nachdem Jörg Schlaich (1934–2021) als Projektleiter im Büro Leonhardt + Andrä die Tragwerksplanung übernommen hatte, tauchten Probleme auf. Die statischen Berechnungen erwiesen sich als Herausforderung, da es zum damaligen Zeitpunkt keine Vorlagen oder Referenzprojekte zur Berechnung des Tragverhaltens solch frei auskragender Hyparschalen ohne kontinuierliche Unterstützung der Randträger gab. Vor allem nicht in der geplanten Größe und mit einer Schalendicke von nur 8 Zentimetern.¹⁰ Die Ermittlung der Spannungsverteilung war mit den damals etablierten Methoden nicht möglich, weshalb die Ingenieure beschlossen, Versuche an einem Modell durchzuführen. Hierbei sollten die für die Bemessung der einzelnen Bauteile notwendigen Spannungen und Schnittgrößen ermittelt werden – eine Methode, die Leonhardt bereits Ende der 1930er-Jahre für Projekte im nationalsozialistischen Bauwesen in Stuttgart eingeführt hatte.¹¹

Das Institut für Modellstatik an der Technischen Hochschule Stuttgart

Bereits seit dieser Zeit arbeitete Fritz Leonhardt bei der Prüfung von Modellen mit Ingenieuren der Technischen Hochschule Stuttgart zusammen. In den 1930er- und 1940er-Jahren vor allem mit der Materialprüfungsanstalt (MPA) Stuttgart, die damals von Otto Graf (1881–1956) geleitet wurde.¹² Als Fritz Leonhardt 1957 als Professor für Massivbau an die Technische Hochschule Stuttgart berufen wurde, erreichte er in seinen Berufungsverhand-

⁹ Kleinmanns, Joachim; Weber, Christiane (Hg.): *Fritz Leonhardt (1909–1999). Die Kunst des Konstruierens/ The Art of Engineering*. Stuttgart/London 2009, S. 210.

¹⁰ Leonhardt/Schlaich 1970 (Anm. 5), S. 212.

¹¹ Weber, Christiane: *Physical modelling at the University of Stuttgart*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 416–420.

¹² Siehe dazu: Weber, Christiane; Ziegler, Volker: *Otto Graf (1881–1956) und die Baustoffprüfung an der Technischen Hochschule Stuttgart*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2011), H. 9 S. 594–603.

lungen, dass 1958 an der Fakultät für Bauingenieurwesen zusätzlich zur MPA das Institut für Spannungsoptik und Modellmessungen – begründet durch seinen Vorgänger Karl Deininger (1896–1956) – aufgewertet wurde, das sich ausschließlich mit baustatischen Untersuchungen an Modellen befasste. Das Institut konnte in den folgenden Jahren erfahrene Techniker ausbilden und unterrichtete junge Absolventen im Bau von Modellen und Versuchseinrichtungen.¹³ Bereits 1960 wurde der Physiker und Mathematiker Robert K. Müller (1925–2020) Mitarbeiter des Institutes. 1965 übernahm er die Verantwortung über den Bereich der Modellstatik und wurde 1967 schließlich Leiter der neu in Institut für Modellstatik umbenannten Einrichtung. Das Institut war zu dieser Zeit in Westdeutschland die einzige unabhängige universitäre Einrichtung seiner Art.¹⁴ An dieser Einrichtung in Stuttgart wurden viele Neuerungen in Bezug auf Messtechnik, Modellherstellung und Berechnungsverfahren entwickelt, wie etwa die automatisierte Messsteuerung von Dehnmessstreifen mithilfe digitaler Kleinrechner, die die Durchführung von Versuchen an komplexen Schalenträgwerken erst wirtschaftlich machte.¹⁵

Der Plan für ein Messmodell in Mikrobeton

Am Institut für Modellstatik (IMS) unter Robert K. Müller wurden für die geplante Alsterschwimmhalle erste Vorberechnungen durchgeführt, um sinnvolle Geometrie- und Querschnittswerte für den Bau des Modells zu erhalten.¹⁶ Da die Schwimmhalle in Spannbeton ausgeführt werden sollte, war es naheliegend, im Sinne der Ähnlichkeitsmechanik das Messmodell aus dem speziell für die Modellstatik entwickelten Mikrobeton zu planen. Am IMS wurden bereits wirklichkeitsnahe Modelle aus Mikrobeton angefertigt und Messungen daran durchgeführt. Beispielsweise wurde der Typus der Tonnenschale untersucht, welche in Realität eine Dicke von 6 Zentimetern besitzen sollte. Für Belastungsversuche wurde ein Modell im Maßstab 1:10 (Abb. 2), also mit einer Schalendicke von nur 6 Millimetern aus einem am Institut entwickelten Blähschiefer-Mikrobeton sowie verzinkten Stahldrähten als Bewehrung hergestellt und getestet.¹⁷

¹³ Müller, Robert K.: *Modellstatische Untersuchungen von Schalenträgwerken*. In: Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart (1973), H. 2, S. 6.

¹⁴ Weber 2021 (Anm. 11), S. 422.

¹⁵ Müller 1973 (Anm. 13), S. 6–7. Die Dehnmessstreifen, die einzeln oder als Rosetten auf den Modellen aufgebracht wurden, bestehen aus kleinen Streifen mit einem hauchdünnen Draht. Bei Dehnung ändert der Draht seinen elektrischen Widerstand, was gemessen werden konnte. Bei einer großen Anzahl an verwendeten Streifen konnte daraus die Beanspruchung und der Kräfteverlauf im Modell bestimmt werden. Müller, Robert K.: *Modellstatik an der Universität Stuttgart*. In: Südwestdeutsche Monatsschrift für Kultur, Wissenschaft und Reisen 16 (1969), Sonderausgabe, S. 102–103.

¹⁶ Müller, Robert K.; Kayser, Rolf: *Das Hyparschalen-Dach des Hallenbades Hamburg Sechslingspforte. Teil II: Modelluntersuchung*. In: Beton- und Stahlbetonbau 65 (1970), H. 10, S. 245.

¹⁷ Müller 1973 (Anm. 13), S. 41–43.

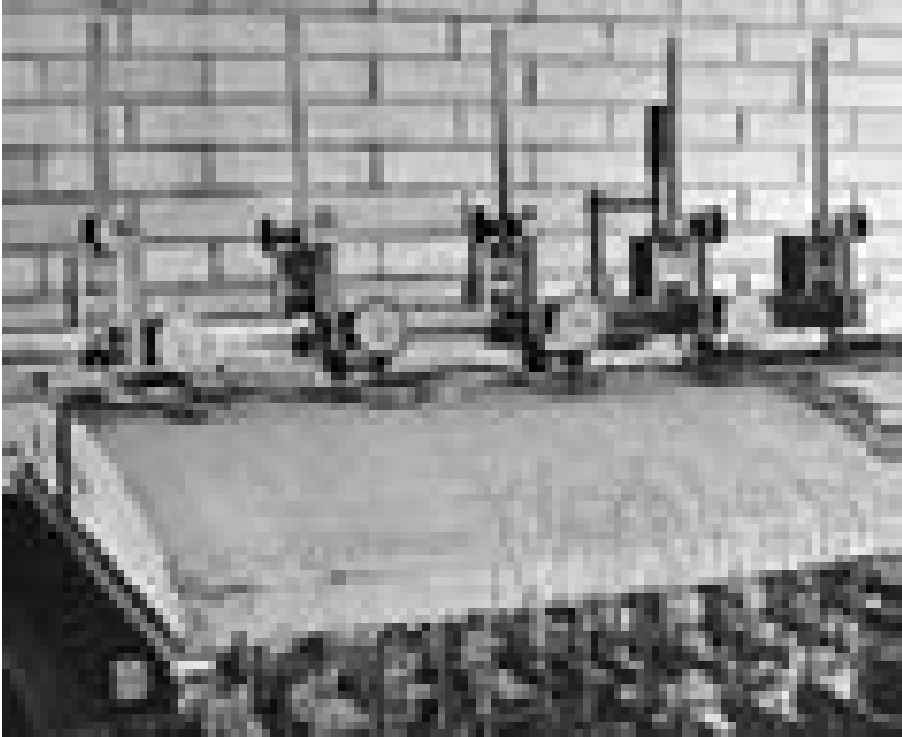


Abb. 2 Tonnenschale im Belastungsversuch am Institut für Modellstatik in den 1960er-Jahren

Modelle aus Mikrobeton waren zu dieser Zeit in anderen Versuchseinrichtungen im europäischen Raum eine probate Methode, um Versuche für Schalenbauten durchzuführen: So unternahm Eduardo Torroja Miret (1899–1961) in Spanien bereits in den 1930er-Jahren statische Modellversuche an Mikrobetonmodellen für Schalenbauten, wie etwa für die Markthalle in Algeciras oder die Pelota-Halle ›Frontón Recoletos‹ in Madrid.¹⁸ Die Versuche führte Torroja Miret in den Einrichtungen des Instituto de la Construcción y la Edificación¹⁹ und dem Laboratorio Central de Ensayo de Materiales de Construcción der Escuela de Ingenieros in Madrid durch.²⁰

Ein weiteres wichtiges Zentrum für modellstatische Untersuchungen hatte sich in Italien unter Arturo Danusso (1880–1968) an der Polytechnischen Universität Mailand entwickelt,

¹⁸ Antuña, Joaquín: *Eduardo Torroja and his use of models up to 1936*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 330–341.

¹⁹ Dieses wurde nach mehrmaliger Umstrukturierung schließlich als Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento bezeichnet.

²⁰ Antuña, Joaquín: *Eduardo Torroja and his use of models from 1939*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 477–502.

der ebenfalls bereits seit den 1930er-Jahren Versuche an Modellen aus Beton von Staudämmen durchführte, die auf den umfangreichen Versuchsreihen für den ›Boulder Dam‹ in den USA basierten.²¹ Die Erfolge dieser frühen Modellversuche in Italien führten 1946 zur Gründung eines unabhängigen Institutes unter dem Namen Istituto Sperimentale Applicazioni in Calcestruzzo (ISAC) in Bergamo. Dieses Institut wurde Anfang der 1950er-Jahre durch das Istituto Sperimentale Modelli e Strutture (ISMES) ersetzt²², das neben Modellen aus Mikrobeton für Staudämme auch Modelle für verschiedenen Hochhäuser in Mailand, wie etwa den ›Pirelli Tower‹ gebaut hatte, um Belastungsversuche daran durchzuführen.²³ Am ISMES ließ auch Pier Luigi Nervi (1891–1979) für verschiedene Projekte Versuchsmodelle in Mikrobeton produzieren und testen. Überliefert sind Fotos von Modellen für die St. Mary's Cathedral in San Francisco, den Newark International Airport in New Jersey und Teile der Mole Antonelliana in Turin. Auch die geschwungene Brückenkonstruktion über den Basento in der Nähe von Potenza von Sergio Musmeci wurde am ISMES als Modell in Mikrobeton geprüft.²⁴

In Stuttgart führte man für den Bau eines Modells aus Mikrobeton Vorversuche durch, mit dem Ergebnis, dass eine ausreichend genaue Schale mit maßstäblicher Korngröße, beidseitigen schlaffen Bewehrungsgittern und zweiachsiger Vorspannung mit einer Dicke von circa 1 Zentimeter herstellbar war.²⁵ Aus dieser herstellungstechnisch bedingten Mindestdicke ergab sich der Maßstab für die gesamte Schale in Mikrobeton, der so groß gewesen wäre, dass man nur eine Hälfte der Schalenskonstruktion im Modell hätte bauen können, was bedeutete, dass man nicht in der Lage gewesen wäre, das Tragverhalten als Zusammenwirken der beiden Hyparschalen im Modell zu untersuchen.²⁶

Durch den Bau der Modellschale in Mikrobeton erhoffte man sich grundlegende neue Erkenntnisse über das Tragverhalten weit gespannter Schalenbauten in Spannbeton. Da sich Spannbeton als Verbundbaustoff bei Überbelastung nicht elastisch verhält, sondern reißt und somit die Kräfte im Inneren der Schale umgelagert werden, versagten die bis dahin bekannten Berechnungsmethoden und Theorien in Bezug auf die Bruchsicherheit. Die Ingenieure waren auf Versuche angewiesen, um etwa Rissbildungen am Modell zu simulieren. Fritz Leonhardt plante daher, an diesem großen Modell aus Mikrobeton das Verhalten der Schale unter Gebrauchslast erst im rissfreien Zustand und dann nach Überbelastung zu untersuchen, um Aufschluss für die Kräfteumlagerung durch Risse zu gewinnen. Diese Versuche stellte er als Grundlagenforschungen zu vorgespannten Hyparschalen dar, wofür in Deutschland ein wirt-

²¹ Addis, Bill: *Models used during the design of the Boulder Dam*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 233–267.

²² Chiorino, Mario Alberto; Neri, Gabriele: *Model testing of structures in post-war Italy. The activity of ISMES, 1951-1974*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 441–442.

²³ Ebd., S. 451–452.

²⁴ Chiorino/Neri 2021 (Anm. 22), S. 445–467.

²⁵ Leonhardt/Schlaich 1970 (Anm. 5), S. 212.

²⁶ Müller/Kayser 1970 (Anm. 16), S. 245.

schaftliches Interesse bestehe, so Leonhardt in einem Antrag zur Einwerbung von Forschungsmitteln beim Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg. Dem Antrag vom 29. März 1965 legte Leonhardt neben einer Versuchsanleitung einen Plan der Schwimmhalle, gezeichnet von seinem Mitarbeiter Fritz Behringer, einen Kostenvoranschlag über 55.470 Deutsche Mark (circa 28.361 Euro) für die Modellherstellung, die Belastungsvorrichtung, die Messtechnik und die Auswertung der Versuche bei. Der Versuchsanleitung ist zu entnehmen, dass auf die Randträger vierzig Einzeldehnmessstreifen und auf die Schale 68 Dehnmessstreifen-Rosetten geklebt werden sollten, angeschlossen an eine vollautomatische Messanlage. Die Messergebnisse sollten mithilfe der elektronischen Rechenmaschine Zuse Z23 für vierzehn verschiedene Laststufen beziehungsweise Lastfälle die aufzubringende Vorspannung errechnen.²⁷

Das ausgeführte Modell aus Acrylglas

Da ein Modell aus Mikrobeton von mehr als 6 Metern Größe nicht in den Räumlichkeiten des Institutes für Modellstatik untergebracht werden konnte, beschloss man letztendlich, für die Versuche ein Modell aus Acrylglas zu verwenden, da es in diesem Material möglich war, eine Modellschalendicke von weniger als 1 Zentimeter herzustellen. An diesem Kunststoffmodell konnten allerdings nur Ergebnisse unter der Annahme eines linear elastischen Verhaltens der Schale gewonnen werden, was nicht dem realen Verhalten einer Spannbetonschale entspricht. Da man im Maßstab des Kunststoffmodells jedoch beide achsensymmetrischen Schalenflügel simulieren konnte, ließ sich daran das Zusammenwirken der Randträger und der Schalenflächen ohne Vereinfachungen erfassen, was durch reine Berechnungen zu dieser Zeit nicht möglich gewesen wäre.²⁸

Vorbilder für die Ausführung von Versuchsmodellen in Kunststoff finden sich am ISMES bereits ab der Mitte der 1950er-Jahre, als Zelluloid als Alternative für Mikrobeton eingesetzt wurde. Andere Kunststoffe verwendete man erst in den 1960er- und 1970er-Jahren.²⁹ In Madrid wurden einige wenige Modelle aus Kunststoff hergestellt, bekannt sind Modelle aus Acrylglas für den ›Canódromo‹ in Madrid und für die Sporthalle ›Palau Blaugrana‹ in Barcelona.³⁰ Auch Heinz Hossdorf (1925–2006) verwendete seit den 1960er-Jahren in seinem privaten Versuchslabor in Basel Modelle aus Kunststoff³¹, ebenso Heinz Isler (1926–2009) in seinem Büro in Lyssachsachen in der Nähe von Burgdorf.³² Diese Entwicklung verfolgten

²⁷ Antrag auf Forschungsmittel von Prof. Dr.-Ing. Fritz Leonhardt an das Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 29. März 1965 (Universitätsarchiv Stuttgart, 71/29a).

²⁸ Müller/Kayser 1970 (Anm. 16), S. 245.

²⁹ Chiorino/Neri 2021 (Anm. 22), S. 451–454.

³⁰ Antuña 2021 (Anm. 20), S. 502–506.

³¹ Cassinello, Pepa: *Heinz Hossdorf: his contribution to the development of physical model testing*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 551–567.

³² Chilton, John: *Heinz Isler and his use of physical models*. In: Addis, Bill (Hg.): *Physical models. Their historical and current use in civil engineering design*. Berlin 2021, S. 613–633.

die Ingenieure um Robert K. Müller am Institut für Modellstatik in Stuttgart genau: Anhand der publizierten Berichte des Institutes lässt sich dieser wissenschaftliche Austausch sehr gut nachvollziehen.³³

Eine wesentliche Rolle in diesen Transferprozessen fachlichen Wissens, die dazu führten, dass diese Innovationen in der Modellstatik im europäischen Raum überwiegend zeitgleich stattfanden, spielten internationale Verbände und Vereinigungen. Zu nennen sind die International Association for Bridges and Structural Engineering (IABSE), die International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), die Reunión Internacional de Laboratorios de Ensayo de Materiales (RILEM), der International Council for Building (CIB), das Comité Européen du Béton (CEB) und die International Federation for Prestressing (FIP).³⁴

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts und vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg kam es im Bausektor zu einer weitreichenden Internationalisierung und Vernetzung. Durch zahlreiche Kongresse, Tagungsbände und Zeitschriftenreihen kam es zu einem regen Wissenstransfer in Europa und darüber hinaus. Nachweisbar waren die Schalenbauer Eduardo Torroja Miret, Franco Levi (1914–2009), Pier Luigi Nervi, Felix Candela Outeriño, Ulrich Finslerwalder (1897–1988), Wolfgang Zerna (1916–2005), Jörg Schlaich, Heinz Isler, Ove Arup (1895–1988), Mamoru Kawaguchi (1932–2019) Mitglieder der IASS.³⁵ Über Tagungen, Vorträge und Tagungsbände, die die Ingenieure zu Veröffentlichung nutzten, fanden die technischen Innovationen sehr rasch internationale Verbreitung.

Das ausgeführte Messmodell in Acrylglas

Das Kunststoffmodell für die Alster-Schwimmhalle sollte dazu dienen, die Beanspruchungen des realen Bauwerkes auf Eigengewicht, Schneelasten, Stützenverschiebungen durch Setzungen im Baugrund und Windlasten an den Hochpunkten zu simulieren. Um die Herstellung des Modells günstig umzusetzen, musste es möglichst klein gehalten werden, was bedeutete, dass die Schalenstärke im Modell auf das Mindeste reduziert werden musste. Materialtechnisch ergab sich eine Schalendicke von 3 Millimetern, darunter hätten herstellungstechnisch unvermeidbare Toleranzen in der Schalendicke die Ergebnisse verfälscht. Aus der minimalen Modellschalendicke von 3 Millimetern und der realen Schalendicke von 8 Zentimetern ergab sich ein Maßstab von 1 : 26,67 für das Gesamtmodell und damit eine maximale Breite des Modells zwischen den Tiefpunkten von circa 4 Metern (Abb. 3).³⁶

³³ Unter anderem an den Besuchen der Stuttgarter Ingenieure an vergleichbaren Versuchseinrichtungen. Siehe dazu: IMS Berichte und Burggrave, Hilmar: *Mikrobeton für modellstatische Untersuchungen*. In: Berichte des Instituts für Modellstatik der Universität Stuttgart (1972), H. 1.

³⁴ Astudillo, Rafael: *Eduardo Torroja and the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*. In: *Informes de la Construcción* 66 (2014), H. 536, S. 1–6.

³⁵ The IASS – Actors and Projects, <https://iass-structures.org/A&P/> (19. Mai 2021).

³⁶ Müller 1973 (Anm. 13), S. 15–16.



Abb. 3 Modell aus Acrylglas auf Betonsöckeln ohne Belastungseinrichtung im Maßstab 1 : 26,67

Das für die Herstellung verwendete Acrylglas bezog das Institut für Modellstatik von der Firma Röhm & Haas in Darmstadt.³⁷ Das Acrylglas wurde in Tafeln und Blöcken gekauft. Jede Einzelschale bestand aus vier Streifen aus 3 Millimeter dickem Acrylglas³⁸ und wurde durch Erwärmen in einem Ofen und anschließender Lagerung auf einer Holzunterkonstruktion verformt (Abb. 4). Acrylglas kann durch Erwärmung über seinen Erweichungspunkt hinaus einfach verformt werden, jedoch schwindet das Material bei zu hohen Temperaturen stark. Diese Eigenschaft musste bei der Planung zum Bau eines Modells berücksichtigt werden.³⁹

Zum Verkleben der einzelnen Streifen mit X-Nähten verwendeten die Techniker verschiedene Klebstoffe, die dieselben Festigkeitseigenschaften wie Acrylglas bieten mussten.⁴⁰ Die lösungsmittelfreien Klebstoffe mussten mit äußerster Sorgfalt verwendet werden, um einwandfreie, kraftschlüssige Verbindungen zu fertigen. Für Acrylglas verwendete man am Institut Polymerisationskleber, der blasenfrei mithilfe von Injektionsspritzen in die Klebenähte eingebracht wurde.⁴¹

Die formgebende Holzunterkonstruktion, auf der das Acrylglas in Form gebracht wurde, bestand aus einer Grundplatte, auf welcher hochkant Spanplatten befestigt wurden, deren

³⁷ Andere Kunststoffe wurden auch bei der Firma Ciba in Basel, der Firma Bayer in Leverkusen oder der Firma Dynamit AG in Troisdorf angekauft. Müller, Robert K.: *Handbuch der Modellstatik*. Berlin/Heidelberg/New York 1971, S. 111.

³⁸ Müller 1973 (Anm. 13), S. 16.

³⁹ Müller 1971 (Anm. 37), S. 117.

⁴⁰ Müller 1973 (Anm. 13), S. 16.

⁴¹ Müller 1971 (Anm. 37), S. 118.



Abb. 4 Modellschale aus Acrylglas auf der formgebenden Holzunterkonstruktion

Oberkanten den Erzeugenden einer Richtung der Hyperfläche in einer Gerade (Abb. 4) folgten. Die Erzeugenden der anderen Richtung wurden durch aufgenagelte schmale Holzstäbe hergestellt. Die hohlen Randträger des Modells mit dreieckigem Querschnitt, welche sich entlang der Schalenränder zudem verdrehten, mussten direkt an der fertigen Schale aus kleinen Stücken gefertigt, angepasst und verklebt werden. Die Eckverbindungen der Randträger mussten unter Zuhilfenahme einer Kopierfräse direkt nach Holzvorlagen aus Acrylglasblöcken hergestellt werden. Die gesamte Oberfläche des fertigen Modells wurde anschließend geschliffen, um glatte Übergänge zu erhalten.

Das Modell wurde dann, um genügend Höhe unterhalb der Schale für die Belastungsvorrichtungen zu schaffen, auf drei Betonsockeln gelagert, die mit einem horizontalen Fachwerk ausgesteift waren, um Verschiebungen durch auftretende Horizontalkräfte zu vermeiden.⁴²

Die statischen Versuche – erste hybride Modellstatik

Um Lastfälle, wie Eigengewicht und Schneelast simulieren zu können, mussten viele Einzellasten an der Modellschale angebracht werden. Dazu teilte man die Schalenflächen und die Randträger in einzelne Felder ein, in deren Schwerpunkten kleine Löcher mit einem Durchmesser von 2 Millimetern gebohrt wurden. Durch diese Löcher wurden die Gewichte

⁴² Ders. 1973 (Anm. 13), S. 16–17.

aus Blei mit Ringen aus Gummi auf der Schale verankert (Abb. 5). Durch die Gummipuffer konnte die Be- und Entlastung des Modells nicht ruckartig, sondern kontinuierlich erfolgen. Diese Belastungsversuche wurden mit einer pneumatischen Hebevorrichtung gesteuert. Um Verschiebungen und Verdrehungen der Stützen aufgrund der Baugrundverhältnisse zu simulieren, wurden die Stützen auf Kugeln gelagert. So konnten die Stützen mithilfe von Gewichten in zuvor festgelegten Bahnen verschoben und verdreht werden.⁴³

Es wurden Versuche zur Ermittlung des Verhaltens der Schale bei Eigengewicht, bei Schneelast auf dem gesamten Dach bzw. verschiedenen Teilen des Daches, bei Einzelbelastungen an den Hochpunkten und bei Verschiebung und Verdrehung einzelner oder mehrerer Stützen in verschiedenen Kombinationen durchgeführt. Geprüft wurden in Modelltests insgesamt vierzehn Lastfälle. Die Messungen wurden mit 26 Einzeldehnmessstreifen und 317 Dehnmessstreifen-Rosetten durchgeführt, wobei nur eine Hälfte des achsensymmetrischen Daches mit Messpunkten versehen wurde. Alle vier Randträger einer Schalenhälfte hingegen waren mit Messstellen ausgestattet, da man das Zusammenwirken der beiden hyperbolischen Schalen testen wollte. Um die Schnittkräfte in den einzelnen Punkten bestimmen zu können, mussten Dehnmessstreifen-Rosetten jeweils genau deckungsgleich an die Ober- und Unterseite der Schale geklebt werden.⁴⁴

Damit Versuche mit dieser für die damalige Zeit enormen Vielzahl von Messstellen wirtschaftlich blieben, zeichnete man die Dehnungen mittels einer automatischen Messeinrichtung auf.



Abb. 5 Montage der Einzellasten aus Blei mit Gummiringen auf der Schale

⁴³ Müller/Kayser 1970 (Anm. 16), S. 246.

⁴⁴ Müller 1973 (Anm. 13), S. 18–21.



Abb. 6 Automatische Messanlage mit Lochstreifen-
drucken am Institut für Modellstatik



Abb. 7 Messuhren zur Durchführung von
Durchbiegungsmessungen am Modell

Die Ergebnisse konnten ausgedruckt und gleichzeitig auf Lochstreifen gestanzt werden (Abb. 6). Diese Anlage gehörte zu den ersten Computern, die im Bauwesen im Einsatz waren. Diese hybride Anwendung von physischen Modellen und Rechnern war damals höchst innovativ.⁴⁵ Die Messanlage bot weitere Vorteile: Sie konnte zeitgleich die einzelnen Messstellen durch einen zentralen Stufenabgleich auf Asymmetrien hin untersuchen, um diese in Bezug auf die Dehnung zu minimieren. So konnte bei 200 an die Anlage am Institut für Modellstatik angeschlossenen Dehnmessstreifen der zentrale Stufenabgleich mit einer Geschwindigkeit von drei Messstellen pro Sekunde und die eigentliche Messung mit zehn Messstellen pro Sekunde durchgeführt werden. Um einen eventuellen Einfluss des Kriechens zu verhindern, wurden die Messungen in periodischer Be- und Entlastung durchgeführt. Weitere Lastfälle konnten anschließend mithilfe eines Computerprogramms in Überlagerung der gemessenen Lastfälle simuliert werden.

Neben den hybriden Dehnungsmessungen wurden analoge Durchbiegungsmessungen mithilfe von Messuhren durchgeführt (Abb. 7). Die Messuhren waren dabei an einem Gerüst befestigt, das keinen Kontakt zum Modell haben durfte. Unter Belastung traten am Modell Durchbiegungen von circa 5 Millimetern auf.⁴⁶

⁴⁵ Müller, Robert K.: *Ein Beitrag zur Dehnungsmessung an Kunstharzmodellen*. Stuttgart 1964, S. 34–56.

⁴⁶ Müller/Kayser 1970 (Anm. 16), S. 247–248.

All diese ermittelten Messwerte konnten mithilfe einer Rechenmaschine und einem eigens dafür entwickelten Programm ausgewertet werden, um die Spannung an den einzelnen Messstellen, die verschiedenen Kräfte und deren Richtungen zu berechnen und grafisch darzustellen.⁴⁷ Die im Folgenden eingesetzten Berechnungen, wie etwa die Ermittlung der notwendigen Vorspannungen, basierten auf den Ergebnissen aus den Modellversuchen, die immer mit den rein rechnerisch erzielten Ergebnissen abgeglichen wurden: Zum Erstaunen der Beteiligten wichen die ersten Ergebnisse der Modellversuche stark von den Werten ab, welche in vorangegangenen Berechnungen ermittelt wurden. Nachdem man zunächst die Werte für falsch hielt, stellte sich bei genauer Betrachtung des Versuchs heraus, dass es während der Versuche am Modell eine leichte Bewegung der Auflagerpunkte nach außen gegeben hatte, die sich unverhältnismäßig stark auf die Messergebnisse auswirkte. Als unmittelbare Folge der Modellversuche wurden in der realen Bauausführung die beiden am weitesten entfernten Stützenfüße mit einem Zugband verbunden, um diese ungünstige Bewegung zu unterbinden.

Fazit

Die umfangreichen Versuche an dem in Stuttgart gebauten und noch heute als Torso – ohne Messeinrichtung – erhaltenen Modell trugen wesentlich dazu bei, dass die Alster-Schwimmhalle 1973 vollendet werden konnte.⁴⁸ Die Einweihung dieses neuen Hamburger Wahrzeichens sollte nicht allein als Verdienst der Architekten Niessen und Störmer und dem Entwurfspartner, dem Architekten Walter Neuhäusser (1926–2021) in Limburg⁴⁹, gelten. Ohne den innovativen Impetus einer Vielzahl von Ingenieuren unterschiedlicher Disziplinen in Forschungs- und Versuchseinrichtungen wäre die Realisierung der Schwimmhalle nicht möglich gewesen: Als Experte auf dem Gebiet von Spannbeton kommt dabei Fritz Leonhardt mit seinem Ingenieurbüro Leonhardt + Andrä in Stuttgart (seit 1970 Leonhardt, Andrä und Partner) eine zentrale Rolle zu. Innerhalb des Büros L + A waren Jörg Schlaich als Projektleiter und die Mitarbeiter Horstkötter und Schulze für die statischen Berechnungen des emblematischen Schalenbaus verantwortlich. Über Fritz Leonhardt, der bereits Ende der 1930er-Jahre bei Projekten, die über das bisher Realisierte hinausgingen, modellstatische Versuche eingesetzt hatte und der in Stuttgart Leiter des Instituts für Massivbau⁵⁰ war, kam das Institut für Modellstatik der Universität Stuttgart unter der Leitung von Robert K. Müller und dem

⁴⁷ Aufgrund der Querschnittsformen der Randträger konnten an deren Oberflächen lediglich die Spannungen bestimmt werden. Müller/Kayser 1970 (Anm. 16), S. 248–249.

⁴⁸ Weber, Christiane: *The last witnesses. Physical models in architecture and structural design, taking the Technical University in Stuttgart as an example*. In: Bowen, Brian; Friedman, Donald (Hg.): *Proceedings of the fifth international congress on construction history*, June 2015, Chicago, Illinois. Chicago 2015, S. 572.

⁴⁹ Redaktion Glasforum 1973 (Anm. 2), S. 21.

⁵⁰ Holgate 1997 (Anm. 3), S. 49.



Abb. 8 Gegenwärtiger Zustand des Modells im Foyer der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften an der Universität Stuttgart

Mitarbeiter Rolf Kayser ins Spiel. Die entscheidenden Versuche wurden durch das Institut für Modellstatik unter Mitarbeit von Jörg Peter am Institut für Massivbau durchgeführt.⁵¹ Um Windlastannahmen für die statischen Berechnungen der Dachschale und der gläsernen Wände treffen zu können, wurden außerdem Modellversuche im Windkanal durch das Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren an der Universität Stuttgart⁵² unter der Leitung von Paul Riekert (1902–1981), dem Bearbeiter Jürgen Pothhoff⁵³ und dem Gutachter Walther Pieckert⁵⁴ durchgeführt. Aus bautechnikhistorischer Sicht ist es interessant zu dokumentieren, wie rasch sich im Laufe des über mehrere Jahre laufenden Projekts die

⁵¹ Des Weiteren gehörten zum Projektteam der Prüflingenieur Wolfgang Zerna in Bochum mit seinen Mitarbeitern Rothert, Hofbauer und Windels, die bauphysikalischen Berater Wilhelm Schaupp in München und Hermann Schäcke in Hegnach bei Stuttgart.

⁵² Leonhardt/Schlaich 1970 (Anm. 5), S. 214.

⁵³ FKFS-Bericht Nr. 3/1969, von Jürgen Pothhoff, 23. Januar 1969 (Universitätsarchiv Stuttgart, 131/2/688).

⁵⁴ Leonhardt/Schlaich 1970 (Anm. 5), S. 214.

Mess- und Modellbaumethoden veränderten. Der Einsatz erster Rechneranlagen ermöglichte eine hybride Modellstatik, die letztlich zu einer rein rechnergestützten Bemessungsmethode führte. Diese Endphase der Modellstatik wurde von den unterschiedlichen Protagonisten verschieden interpretiert. Während Robert K. Müller und Fritz Leonhardt noch auf die Modellstatik setzten, erklärte der Projektleiter Jörg Schlaich in späteren Interviews die Ergebnisse als »desaströs«. ⁵⁵ Seiner Meinung nach könnten Modellversuche nur dazu dienen, Hypothesen zu falsifizieren und seien stets mit Vorsicht zu genießen. ⁵⁶

Nachsatz – der Zustand des Modells heute

Das im Beitrag beschriebene Modell aus Acrylglas ist eines der wenigen seiner Art, das wenigstens als Torso – ohne Prüfeinrichtungen – noch erhalten ist. Es steht heute im Foyer der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften an der Universität Stuttgart (Abb. 8). Das Modell ist in einem schlechten Zustand, da die Klebeverbindungen brüchig sind und das Acrylglas aufgrund der öffentlichen Aufstellung und den lichtbedingten Alterungserscheinungen des Kunststoffes teilweise gebrochen ist. Es war deshalb im Jahr 2009 bereits vom Abbruch bedroht, was jedoch verhindert werden konnte. Ziel ist es, in Kooperation mit der betreffenden Fakultät, vertreten durch Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Bischoff (Institut für Baustatik und Baudynamik) und den Vertretern der universitären Sammlungen, das Modell in einer geschützten Sammlung oder einem Archiv zu sichern. ⁵⁷

⁵⁵ Bögle, Annette; Cachola Schmal, Peter; Flagge, Ingeborg (Hg.): *Leicht weit/Light Structures – Jörg Schlaich, Rudolf Bergemann*. München/Berlin/London u. a., S. 97.

⁵⁶ Holgate 1997 (Anm. 3), S. 49.

⁵⁷ Weber 2015 (Anm. 48), S. 573.