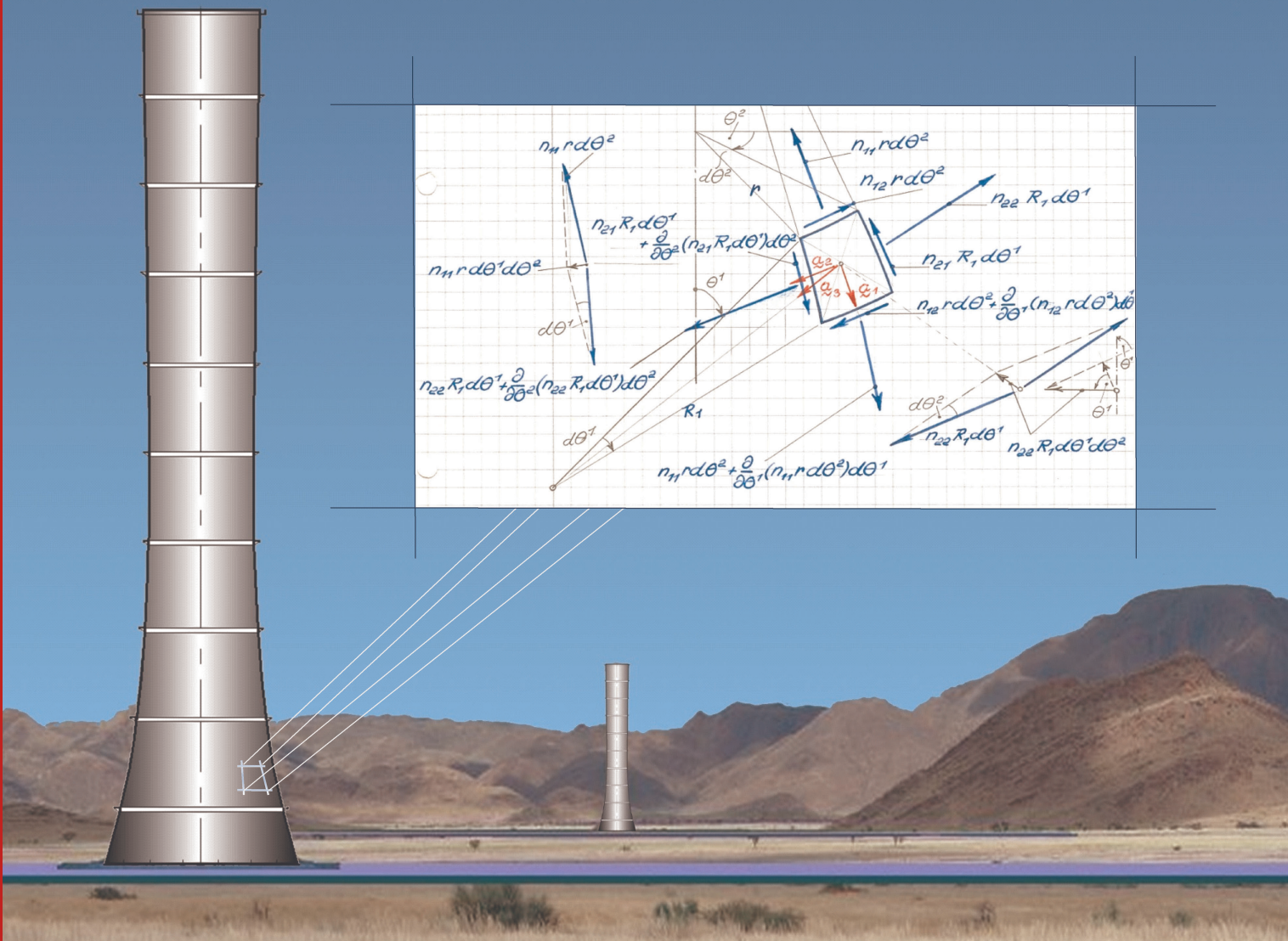


Die richtungsweisende Zeitschrift im Bauingenieurwesen



M. Andres, H. Beem, U. Eckstein, R. Harte, D. Jun, U. Montag, R. Wörmann

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. mult. Wilfried B. Krätzig
– über ein erfülltes Leben und Wirken in Forschung, Lehre und Praxis

Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. mult. Wilfried B. Krätzig

– über ein erfülltes Leben und Wirken in Forschung, Lehre und Praxis

M. Andres, H. Beem, U. Eckstein, R. Harte, D. Jun, U. Montag, R. Wörmann

1 Beruflicher Werdegang

Am 7. März dieses Jahres verstarb nach kurzer, schwerer Krankheit Professor em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. mult. Wilfried B. Krätzig im Alter von 84 Jahren. WBK, wie er häufig kurz und prägnant genannt wurde, studierte, promovierte und habilitierte an der TU Hannover. Nach einer zweijährigen Gastprofessur an der University of California in Berkeley wurde er 1970 auf den Lehrstuhl für Statik und Dynamik der Ruhr-Universität Bochum berufen, den er bis 1998 innehatte. Sein fast 30-jähriges Wirken in der Gründungsphase des dortigen Bauingenieurwesens ist durch viele beeindruckende Erfolge in Forschung und Lehre geprägt. Er betreute als Doktorvater und Mentor insgesamt 60 Dissertationen und sieben Habilitationen und warb für die Ruhr-Universität Bochum zwei Sonderforschungsbereiche ein.

Seine Schüler, Partner und beruflichen Freunde haben durch seinen Tod einen großen und schmerzlichen Verlust erlitten. Bis wenige Monate zuvor war Wilfried Krätzig körperlich und geistig fit (**Bild 1**). Um das bis ins hohe Alter zu erreichen, sind Selbstdisziplin und eine aktive Lebensweise erforderlich. Kaum ein anderer hat diese Tugenden besser verkörpert als der Verstorbene. Geboren und aufgewachsen in der Freien Hansestadt Hamburg war er ein Hamburger durch und durch: Sachlich, zurückhaltend, verlässlich und



Bild 1. Wilfried B. Krätzig

stets überaus rational in seinen Bewertungen und Entscheidungen, allesamt hanseatische Eigenschaften.

Demzufolge verlief auch seine Ingenieurkarriere geradlinig: Studium an der Technischen Hochschule in Hannover, danach vier Jahre als Tragwerksplaner und Bauleiter bei der Eduard Züblin AG, dann zurück nach Hannover mit Promotion und Habilitation in Rekordzeit von nur sechs Jahren, bei Lehrmeistern wie den Professoren Pestel, Pflüger und seinem Doktorvater Zerna. Über einen knapp zweijährigen Auslandsaufenthalt als Associate Professor an der University of California in Berkeley ging es 1970 direkt auf den Statiklehrstuhl der neugegründeten Ruhr-Universität Bochum.

Obwohl die meisten seiner Studenten und Mitarbeiter Krätzig eher als einen „Theoretiker“ bezeichnen würden, der großen Wert auf die fundierte Vermittlung der theoretischen Grundlagen gelegt hat, hat er stets auch die Probleme der Ingenieurpraxis als Ausgangspunkt seiner Forschungsarbeiten gesehen. Nach seinem Duktus sollten die ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen dadurch gekennzeichnet sein, dass sie der Fachwelt die Erkenntnisse der Physik, Mathematik und Informatik zur Lösung ihrer Praxisprobleme zugänglich machen.

Seine Forschungsaktivitäten lassen sich in vier Phasen einteilen: Zunächst seine grundlegenden Arbeiten zum Tragverhalten von Schalen, niedergelegt in dem Buch Mechanik der Flächentragwerke, das er 1985 veröffentlichte und in dem die Tensoranalysis zur Formulierung einer konsistenten Schalenbiegetheorie genutzt und damit dem Ingenieur zugänglich gemacht wurde. Das Buch ist heute noch für viele Experten das Grundlagenwerk der Schalentheorie.

In seiner 2. Schaffensphase hat Wilfried Krätzig die Bedeutung der Baudynamik erkannt. Die Benennung seines „Lehrstuhls für Statik und Dynamik“, wohl einer der ersten in dieser Kombination in Deutschland, verdeutlicht das. Seine intensiven Forschungen zur Vorhersage des Verhaltens von Stahlbetonstrukturen unter dynamischen Wind- und Erdbebeneinwirkungen sowie zur statischen und dynamischen Stabilität von Schalenträgwerken ermöglichten es ihm, den Sonderforschungsbereich 151 „Tragverhalten und

Dr.-Ing. Matthias Andres

Prüfingenieur für Baustatik
Geschäftsführender Gesellschafter

Dr.-Ing. Hermann Beem

Gesellschafter

Dr.-Ing. Ulrich Eckstein

Gesellschafter

Prof. Dr.-Ing. Reinhard Harte

Bergische Universität Wuppertal
Prüfingenieur für Baustatik
Gesellschafter

Prof. Dr.-Ing. Daniel Jun

Hochschule Ruhr West Mülheim
Gesellschafter

Dr.-Ing. Ulrich Montag

Brandschutzsachverständiger
Geschäftsführender Gesellschafter

Dr.-Ing. Ralf Wörmann

Geschäftsführender Gesellschafter

Krätzig & Partner
Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH
Beratende Ingenieure
Buscheyplatz 9–17, 44801 Bochum
www.kup-ing.de



KRÄTZIG & PARTNER
Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH

Tragfähigkeit von Baukonstruktionen unter dynamischen Einwirkungen“ an die Ruhr-Universität Bochum zu holen. Der seither andauernde Erfolg der Fakultät Bauingenieurwesen der Ruhr-Universität bei der Beantragung und Bearbeitung von Sonderforschungsbereichen ist hierdurch maßgeblich eingeleitet worden.

Mit seiner 3. Schaffensperiode betrat er Neuland, indem er kurz vor seiner Emeritierung den zweiten Sonderforschungsbereich 398 „Lebensdauerorientierte Entwurfskonzepte unter Schädigungs- und Deteriorationsaspekten“ nach Bochum holte. Er hatte nämlich als einer der Ersten weltweit erkannt, dass wissenschaftliche Grundlagen zur Planung und Instandhaltung von Bauwerken über ihren gesamten Lebenszyklus fehlen. Auf ihn geht dieses Design for Durability zurück. Nahezu die Hälfte der beantragten und dann auch genehmigten Projekte der ersten Phase war am Lehrstuhl von Wilfried Krätzig angesiedelt. Deren grundlegenden Ergebnisse prägen viele Bereiche des Bauingenieurwesens bis heute.

Mit seiner Emeritierung begann die 4. Schaffensphase. Mit großem Engagement und der ihm eigenen Gründlichkeit befasste er sich mit der Weiterentwicklung der von Jörg Schlaich propagierten solarthermischen Aufwindtechnologie. Zunächst war es nur der Blick auf die strukturellen Anforderungen an den extrem hohen Aufwindturm, später waren es auch die Grundlagen zur Beschreibung des thermodynamischen Auftriebs und die Ermittlung der resultierenden elektrischen Leistung und der sie bestimmenden Parameter, die ihn tagtäglich beschäftigten.

In der Lehre hat Krätzig die Modernisierung der klassischen Baustatik, wie viele sie aus Hirschfelds Zeiten kannten, hin zu einer rechnerorientierten, matriziellen Formulierung vorangetrieben. Er öffnete damit vielen seiner

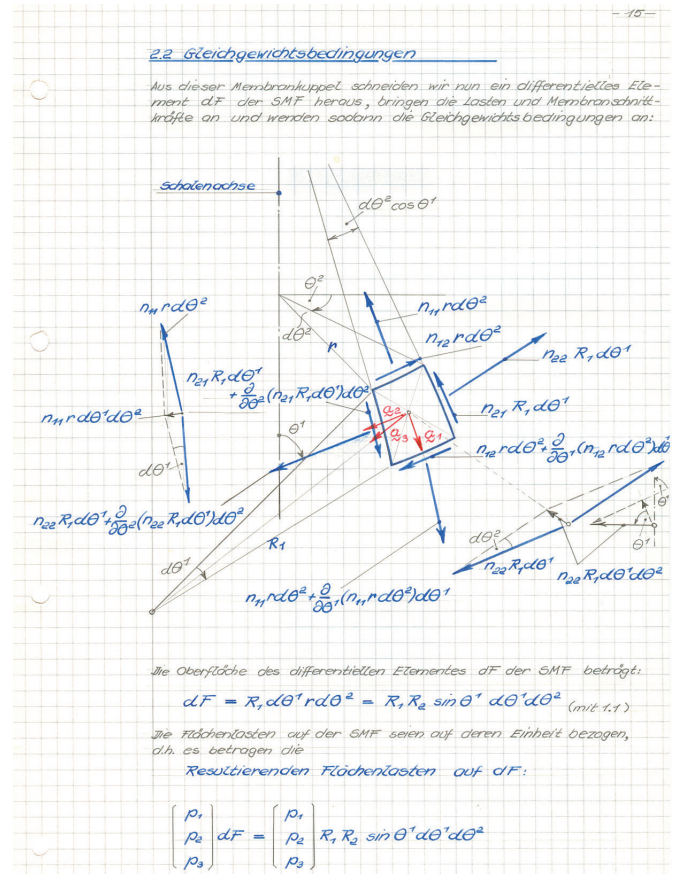


Bild 2. Tensorielles Schalengleichgewicht (Original WBK)

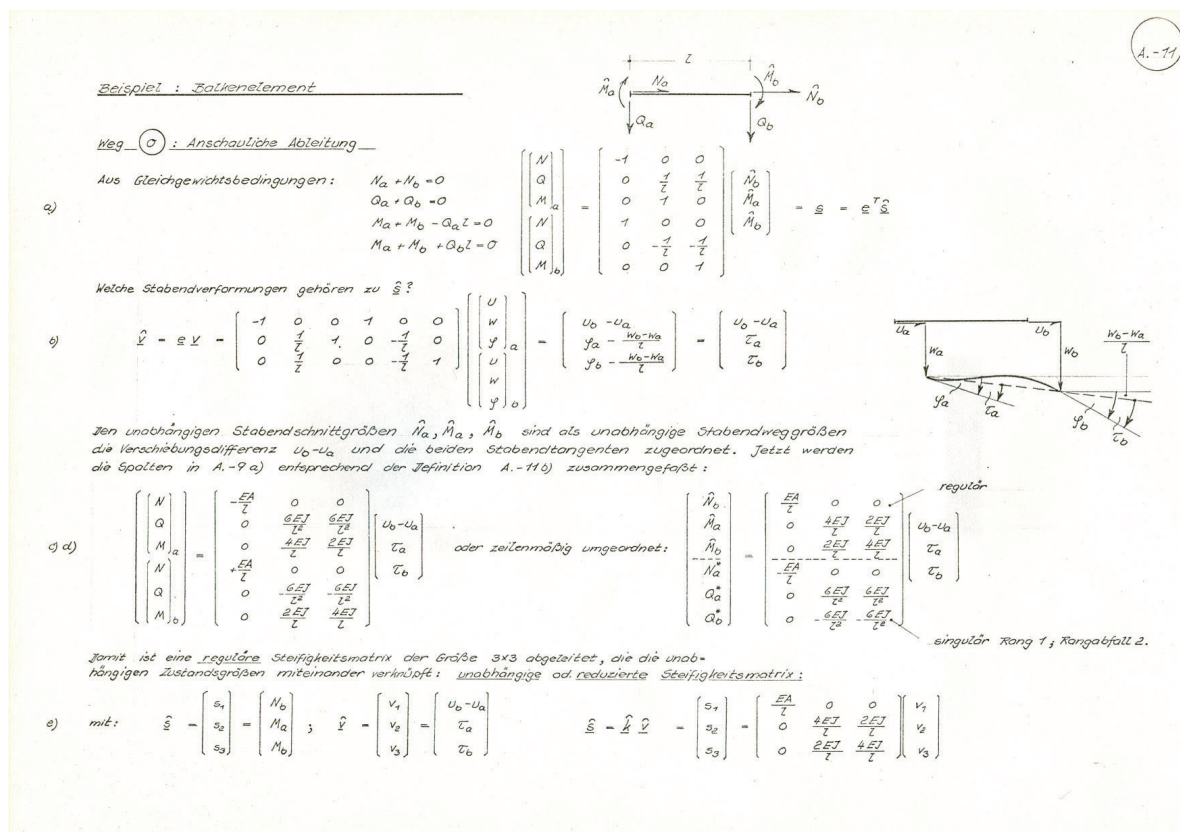


Bild 3. Finites Balkenelement (Original WBK)

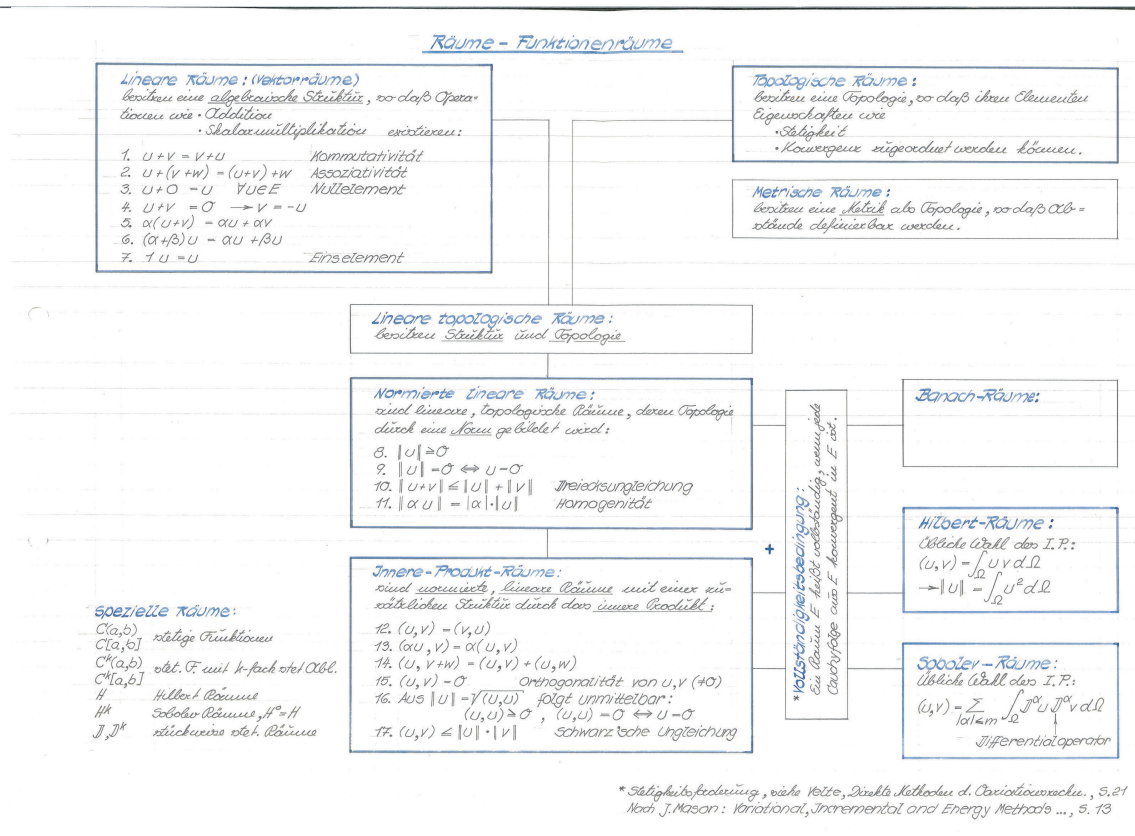


Bild 4. Mathematische Grundlagen – Funktionenräume (Original WBK)

Schüler den Weg zum Verständnis der Finite-Elemente-Methode.

Die Diskussion über das Curriculum der Baustatik und Baudynamik hat er über lange Jahre als Vertreter und Vorsitzender des Fakultätentages für Bauingenieur- und Vermessungswesen geprägt. Er hat damit wesentlichen Anteil an der Harmonisierung und Modernisierung der Lehre in den deutschsprachigen Bau fakultäten. Basierend auf seinen Vorlesungsunterlagen hat er verschiedene Grundlagenwerke für die Lehre initiiert, wie die Bücher Tragwerke 1 bis Tragwerke 3 [1], [2], [3], die an vielen Universitäten in Deutschland als grundlegende Literatur für die Baumechanik und Baustatik eingesetzt werden. Obwohl die Bücher damals vom Springer Verlag gesetzt wurden, hätte man ohne Probleme auch seine einzigartigen handschriftlichen Originalaufzeichnungen zum Druck heranziehen können (Bild 2). Es dürfte nur wenigen von uns gelingen, ein finites Balkenelement auf einer Seite vollständig herzuleiten (Bild 3). Seine Interessen waren nicht allein ingenieurwissenschaftlicher Art, sondern er beschäftigte sich darüber hinaus auch mit grundsätzlichen Fragen aus Mathematik und Naturwissenschaften und ordnete seine Erkenntnisse – wie immer – klar und übersichtlich (Bild 4).

Seine wissenschaftlichen Ergebnisse hat er in circa 350 Publikationen in Zeitschriften, bei wissenschaftlichen Tagungen, in Forschungsberichten und in einschlägigen Lehr- und Fachbüchern [1], [2], [3], [4], [5] veröffentlicht. Er war Herausgeber und Mitglied in den editorial boards zahlreicher Fachzeitschriften, sowie Mitgründer und Präsident der „EASD – European Association for Structural Dynamics“. In seiner Zeit als Professor hat er über 60 Dissertationen als Doktorvater betreut und bei sieben Habilitationen als Mentor mitgewirkt. Viele seiner Schüler sind inzwischen selbst

auf Professuren in Deutschland oder im Ausland berufen worden. Sie konnten sich stets seiner Unterstützung sicher sein. Neben wichtigen fachlichen Hinweisen und Diskussionen gab er auch wertvolle didaktische Hilfestellungen. Dass er die Reisen zu internationalen Tagungen auch immer genutzt hat, seine Doktoranden in Geschichte und Kulturgeschichte fortzubilden, wissen diese bis heute zu schätzen.

Doch auch andere konnten auf seine Unterstützung bauen. Eine ganze Forschergeneration im Bauingenieurwesen wurde von ihm als langjähriger Fachgutachter der DFG begleitet und – soweit möglich – gefördert. Auch stand er bereits weit vor der Wende in engem Kontakt zu Universitäten in der damaligen DDR. Anfang der 1990er-Jahre hat er dann mit viel Engagement die Aufbauarbeit an den klassischen Universitäten in Dresden und Weimar gefördert, wodurch sie beide mittlerweile zu den Eliten der Bauingenieurausbildung in Deutschland gehören. Nicht zuletzt dafür haben ihn beide mit einem Ehrendokortitel ausgezeichnet, Dresden 1994 und Weimar 2012.

Zahlreiche weitere Ehrungen, wie 1987 die Ehrennadel der VGB, 1991 die Carl-Friedrich-Gauß-Medaille, 1994 der Max-Planck Forschungspreis, 2000 die Werner-Heisenberg-Medaille, 2003 das VDI Ehrenzeichen, sowie die Ehrenmitgliedschaften der EASD European Association of Structural Dynamics und der IASS International Association of Shell and Spatial Structures beweisen die große Wertschätzung, die er in der nationalen und internationalen Forschergemeinschaft genoss und weiter genießt.

Folgerichtig wurde ihm vor einem Jahr das Verdienstkreuz am Bande des Verdienstordens der Bundesrepublik Deutschland verliehen.

In der Verleihungsurkunde heißt es:

„Prof. Dr. Wilfried Krätzig hat sich als Wissenschaftler und Staatsbürger Verdienste erworben, die zum Wohl unseres Gemeinwesens wie auch zum Ansehen unseres Landes weltweit beigetragen haben. Als verdienten Lohn hat ihm Bundespräsident Joachim Gauck die höchste Auszeichnung, die die Bundesrepublik Deutschland zu vergeben hat, zuerkannt.“

Wilfried Krätzig hat das Wort Innovation nicht nur benutzt, er hat es gelebt. Er war immer Vordenker von Neuem, hat seine Konzepte und Ideen zunächst mit viel Sorgfalt entwickelt, dann andere von seinen Ideen überzeugt und sie in seinem Sog mitgezogen. Wir haben mit seinem Tod einen weltweit anerkannten Wissenschaftler, herausragenden Hochschullehrer, beeindruckenden Ingenieur und umsichtigen Prüfstatiker verloren, der seine Fachdisziplin in Theorie und Praxis maßgeblich mitgeprägt hat.

Er hat aber auch den Kontakt zur Baupraxis nie vernachlässigt, als Prüfenieur für Baustatik und viele Jahre als Mitglied des für die Anerkennung von Prüfenieuren zuständigen Ausschusses beim Bauministerium NRW. Er war rund 20 Jahre Vorsitzender des VGB-Ausschusses „Bautechnik bei Kühltürmen“, deren Richtlinien er maßgeblich geprägt hat. Hiermit ist Deutschland zur führenden Nation beim Bau großer Naturzugkühltürme geworden.

2 Baupraktisches Werk

Einen Überblick über die Bandbreite des baupraktischen Werks von Wilfried Krätzig soll eine Auswahl herausragender Projekte geben, an deren Bearbeitung er in seinem Ingenieurbüro Krätzig & Partner maßgeblich mitgewirkt hat.

2.1 Kryogener Etylentank der VYNOVA Wilhelmshaven

Im Zuge der Erweiterung des Etylenlagers der ICI Wilhelmshaven (heute VYNOVA Wilhelmshaven) wurde im Jahre 1991 der Bau eines Tanks zur Lagerung von 4000 t tiefkalten Flüssigethylen erforderlich. Er besteht im wesentlichen aus zwei inneren Stahltanks als flüssigkeits- und gasdichte Hülle des Speichermediums sowie aus dem Spannbetonzylinder mit Stahlbetonbodenplatte als umgebende Sicherheitshülle (**Bild 5**). Krätzig & Partner wurden mit der Durchführung des Statischen Berechnung und Konstruktion dieser Sicherheitshülle beauftragt. Dabei stellten die Lastfälle Gasdruckwelle und Leckage der inneren Stahltanks mit Nachweis der Standsicherheit und Dichtigkeit des Spannbetonzylinders unter dem kryogenen Temperaturschock von -104°C erhebliche Anforderungen, denen nur mit nicht-linearen Berechnungsmethoden begegnet werden konnte [6].

2.2 Zustimmung im Einzelfall für den Musical Dome Köln

Im Rahmen einer Zustimmung im Einzelfall wurde Wilfried Krätzig im Jahre 1996 von der Obersten Bauaufsicht in NRW, dem Bauministerium, mit der Baustatischen Prüfung und Bauüberwachung der Dachkonstruktion des Musical Dome in Köln beauftragt. Das zunächst als mobile Konstruktion in Glas-Stahl-Bauweise mit textiler Dachkonstruktion entworfene Theater steht seit dieser Zeit in unmittelbarer Nachbarschaft des Kölner Doms und des Hauptbahnhofs. Mit einer Auslegung für 1 700 Zuschauer ist der Musical Dome noch heute das größte Theater der Stadt. Die Dachkonstruktion mit ihren vier stählernen Dreigurtbin-



Bild 5. Kryogener Etylentank Wilhelmshaven

Abb.: Wiemer & Trachte GmbH, Hamburg



Bild 6. Musical Dome Köln

Abb.: Gaudi Musical GmbH, Alsdorf



Bild 7. Berliner Hauptbahnhof

Abb.: DB Projekt GmbH Knoten Berlin

dern und der blauen Textilmembran ist schon aus der Ferne Blickfang für jeden Besucher (Bild 6). Aus Sicht des Tragwerksplaners und Prüfengeieurs stellte die Dachkonstruktion mit vorgespannter tragender Dachhaut aufgrund ihres hochgradig geometrisch-nicht-linearen Verhaltens für damalige Verhältnisse höchste Ansprüche hinsichtlich der Windlastansätze und der einzusetzenden Rechenverfahren.

2.3 Berliner Hauptbahnhof

Am neuen Hauptbahnhof Berlin waren Krätzig & Partner und Wilfried Krätzig selbst in unterschiedlicher Funktion beteiligt. Es begann im Jahre 1996 mit der gutachterlichen Beurteilung der Brücke über den Humboldt-hafen hinsichtlich der Gründung und der Durchführung der Stahlrohrbögen durch den Stahlbeton-Mittelteil. Später wurde die Stabilität und Imperfektionsempfindlichkeit des Ost-West-Glasdaches, das mit einer Spannweite der unter- und überspannten Binder von 70 m die Bahnsteige auf einer Länge von etwa 320 m überdacht, begutachtet. Für Krätzig & Partner bestand schließlich in den Jahren 1997 bis 2002 die Hauptaufgabe in der Tragwerksplanung für die Haupttragwerke des Bahnhofs, die 15 Stahlbeton- sowie Spannbetonbrücken auf Stahlstützen, die 9 m über Geländeneiveau die Gleiskörper der Fern-, Regional- und S-Bahn in Ost-West-Richtung sowie die Bahnsteige und das Glasdach tragen (Bild 7). Bis heute ist Krätzig & Partner mit der Auswertung der Monitoring-Daten zum Verformungsverhalten der verformungssensiblen Brücken und mit den Konsequenzen für die Nachstellung der Brückenlager beauftragt und kontinuierlich dort tätig.

2.4 200 m-Kühlturm Niederaußem

Im RWE Kraftwerk Niederaußem im linksrheinischen Braunkohlerevier westlich von Köln entstand mit dem Block K zwischen 1997 und 2002 der damals modernste Braunkohlekraftwerksblock der Welt mit einer elektrischen Leistung von 965 MW. Die Tragwerksplanung des zugehörigen Naturzugkühlturms, der mit einer Höhe von 200 m lange Zeit der weltgrößte Naturzugkühlturm war (Bild 8), lag in der Hand des Ingenieurbüros Krätzig & Partner. Um den chemischen Angriffen der in Hochlage in den Kühlturm eingeleiteten gereinigten Rauchgase zu begegnen, wurde er als weltweit erster Kühlturm mit einem Beton mit erhöhtem Widerstand gegen Säureangriff und mit einer Vorspannung des oberen Randglieds ausgeführt. Nach dem gleichen Entwurfsprinzip von Krätzig & Partner wurden in den Folgejahren auch die insgesamt vier Kühltürme der RWE-Kraftwerke in Neurath und in Hamm geplant und errichtet. Insgesamt sind in der Schaffenszeit von Krätzig über 100 Kühltürme weltweit von Krätzig & Partner planend, prüfend oder gutachtlich bearbeitet worden. Aktuell werden mehrere Kühltürme in Polen und Indien nach Krätzig & Partner-Design gebaut [7].



Bild 8. Naturzugkühlturm Niederaußem

Abb.: RWE Energie AG, Essen



Bild 9. Steinkohlekraftwerk Datteln

Abb.: Krätzig & Partner GmbH, Bochum

2.5 Steinkohlekraftwerk Datteln

Die Uniper Kraftwerke (ehemals E.ON Kraftwerke) baut seit 2007 – mit genehmigungsrechtlich bedingten Unterbrechungen – einen Steinkohlekraftwerksblock mit einer elektrischen Leistung von 1100 MW. Neben der Grundlastversorgung soll der Standort zukünftig die Umgebung mit Fernwärme versorgen und Bahnstrom erzeugen. Krätzig & Partner war in diesem Projekt für die baustatische Prüfung der Nebenanlagen (Wasseraufbereitung, Schaltanlagegebäude etc.) und Nebengebäude (Sozial- und Verwaltungsgebäude etc.) verantwortlich und erstellte darüber hinaus die Tragwerksplanung für den 178 m hohen Naturzugkühlturm (Bild 9).

2.6 Solarthermisches Aufwindkraftwerk

Angelehnt an seine großen Erfahrungen mit Naturzugkühltürmen befasste sich Krätzig in seinem letzten Lebensjahrzehnt besonders mit der von Jörg Schlaich propagierten Aufwindtechnologie. Seit 2007 wurden verschiedene Vorentwürfe für solare Aufwindkraftwerke erstellt, meist ge-

meinsam mit dem Ingenieurbüro Niemann & Partner in Bochum. Im Jahr 2008 beauftragte die Solar Millennium AG in Erlangen das Ingenieurbüro Krätzig & Partner mit der technischen Planung eines 750 m hohen Solarkamins in Stahlbetonbauweise für ein Aufwindkraftwerk an einem Standort in Spanien. Beim statischen Entwurf des Kamintragwerks wurden die von Niemann & Partner erarbeiteten standortspezifischen Windlastansätze und Kohärenzfaktoren sowie eine realistische Gründungssituation am geplanten Standort berücksichtigt. Der Auftrag umfasste Berechnung, Konstruktion und Massenermittlung des Solarkamins. Die mit minimal 25 cm sehr dünne Stahlbetonschale wird durch äußere Spannbetonringe ausgesteift. Die Standardanalyse und -bemessung nach Eurocode konnte durch eine nicht-lineare Tragwerksberechnung überprüft und bestätigt werden (Bild 10).

2.7 Neubau der Gebäude IA und IB der Ruhr-Universität Bochum

Wilfried Krätzig hat nahezu seine gesamte Hochschulzeit an der Ruhr-Universität Bochum in der 6. Etage des Gebäudes IA verbracht. Zuletzt durfte er mit ansehen, wie diese seine ehemalige Wirkungsstätte einem Neubau weichen musste. Das Gebäude IA des Bauingenieurwesens und das Gebäude IB des Maschinenbaus wurden im Zuge des Hochschul-Modernisierungs-Programms des Landes NRW vollständig rückgebaut und werden derzeit neu errichtet. Um Gesamtansicht und -konzeption des Universitätscampus zu wahren, werden beide Gebäude mit ihrer bisherigen Silhouette in Stahlbetonskelettbauweise mit aussteifenden Kernen und aufwendiger Elementfassade ausgeführt (Bild 11). Sie dienen zusammen mit dem bereits sanierten Ge-



Bild 11. Gebäude IA und IB der Ruhr-Universität Bochum

Abb.: Gerber Architekten, Dortmund; H.-J. Landes

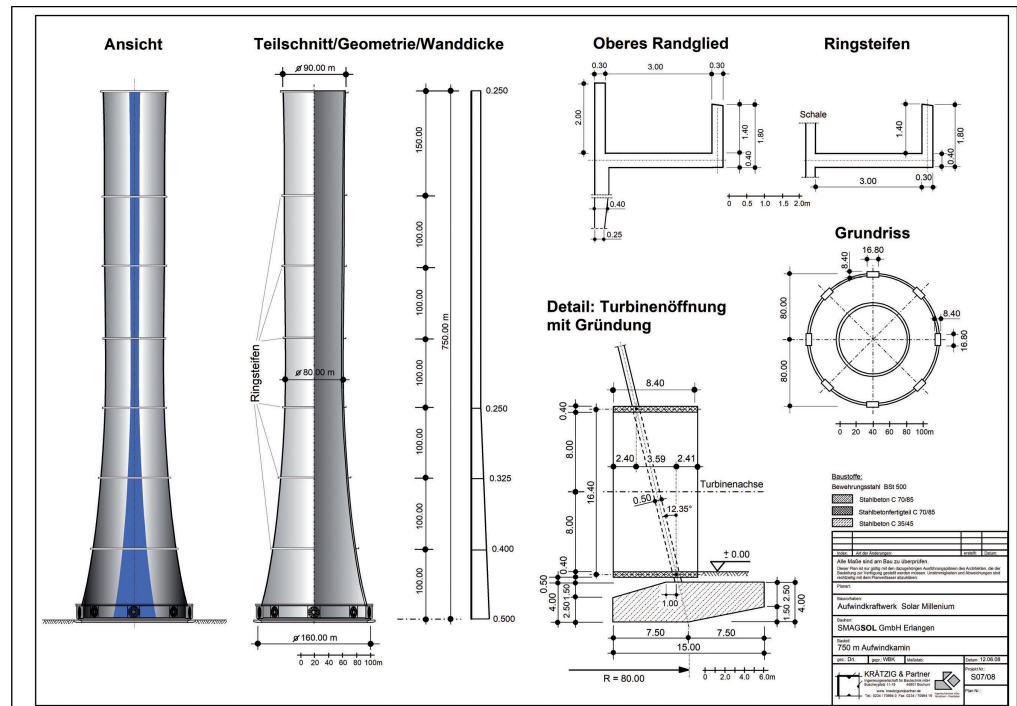


Bild 10. Solarthermisches Aufwindkraftwerk mit 750 m hohem Solarkamin

Abb.: Krätzig & Partner GmbH, Bochum

bäude IC und dem neu errichteten Gebäude ID als neue Heimat der Ingenieurwissenschaften an der Ruhr-Universität. Beim Rückbau wie auch beim Neubau waren seine Prüfingenieurpartner Reinhard Harte, Ulrich Eckstein und Matthias Andres prüfend und bauüberwachend beteiligt, sodass Krätzig einen direkten Einblick in die Planung und den Bauablauf nehmen konnte – wie immer sehr interessiert und mit vielen Anregungen.

3 Wissenschaftliches Werk

In Abschnitt 1 wurde die Vielfältigkeit von Wilfried Krätzigs Forschungsinteressen bereits eingehend dargestellt. Bei allem gilt die Erforschung des Tragverhaltens von Naturzugkühltürmen als seine Königsdisziplin. Im Oktober 2016, wenige Wochen vor Beginn seiner Erkrankung, nahm Wilfried Krätzig noch in tragender Funktion an der International Conference on Industrial Chimneys and Cooling Towers ICCT2016 in Rotterdam teil und hielt dort eine der Keynote-Lectures zum Stabilitätsverhalten der extrem dünnen Stahlbetonschalen von Naturzugkühltürmen. Da dies sein letzter Vortrag war, sollen die wissenschaftlichen Hintergründe dieser Forschungsarbeit hier nochmals zusammengefasst dargestellt werden.

3.1 Beulsicherheit

3.1.1 Experimenteller Ansatz

Bekanntlich neigen dünne Schalenstrukturen unter Druckbeanspruchungen zu Instabilität, dem sogenannten Beulen. Ausgelöst durch den Einsturz von drei Kühltürmen in Ferrybridge/UK im Jahre 1965 und getrieben vom Wirtschaftswachstum und der hierfür notwendigen Energieversorgung wurden in Deutschland umfangreiche Forschungen zum Tragverhalten von Kühltürmen betrieben, vorrangig in Bochum unter der Führung von Wolfgang Zerna und Wilfried Krätzig. Im Jahre 1976 veröffentlichte Mungan [8] aufgrund seiner umfangreichen, experimentellen Untersuchungen

sein Konzept zur Überprüfung der Beulsicherheit von hyperbolischen Schalen nach dem sogenannten lokalen Stabilitätskriterium, international bekannt als Buckling Stress State Approach – BSS.

Heute ist klar, dass in diesem Konzept zusätzliche Partialsicherheiten impliziert sind, um der unbekannten Größenordnung der zu erwartenden Imperfektionen beim Bau der Schale Rechnung zu tragen. Dies führt zu sehr niedrigen rechnerischen Beulsicherheiten und in Konsequenz zu größeren Wanddicken [9]. Zudem berücksichtigt das Konzept nur den biaxialen Spannungszustand an einem spezifischen Punkt der Schale und ignoriert damit deren globales Tragverhalten sowie die spezifischen Randbedingungen.

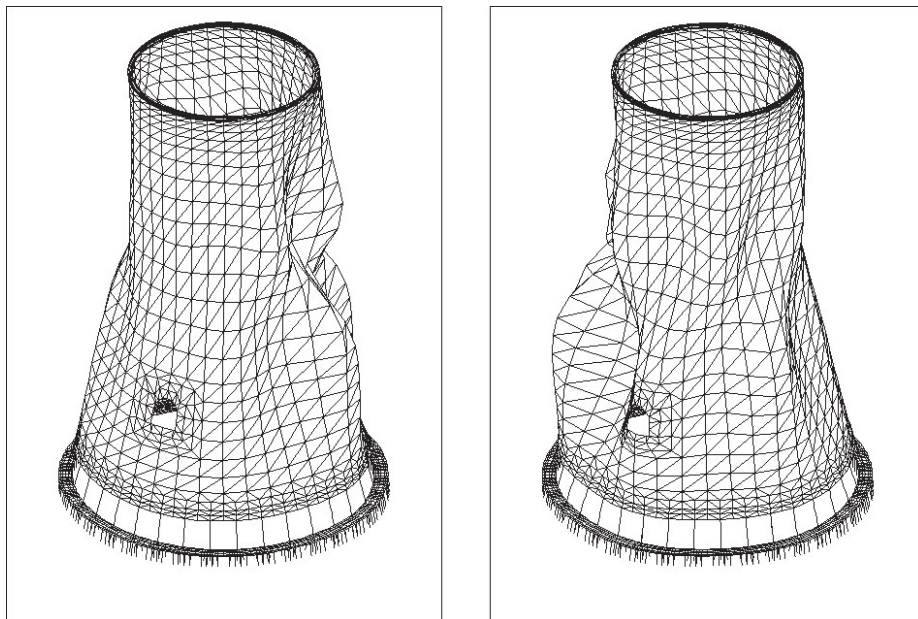


Bild 12. Beulformen des Naturzugkühlturms Datteln für zwei verschiedene Windrichtungen

3.1.2. Numerischer Ansatz

Moderne Finite-Elemente-Methoden erlauben die globale, das heißt ganzheitliche, Untersuchung der Beulsicherheit der Schale. Hierzu dient zunächst die Lösung eines linearen Eigenwertproblems mittel der elastischen Gesamtsteifigkeitsmatrix der Schale inklusive Randgliedern, Stützen und Gründung.

$$\{K_{el} + \lambda_{crit} K_{geom}(P^0)\} \times V_{eig} = 0, \quad (1)$$

$$\det \{K_{el} + \lambda_{crit} K_{geom}(P^0)\} = 0, \rightarrow \lambda_{crit} = v_{buckl} \quad (2)$$

mit K_{el} – globale elastische Steifigkeitsmatrix, $K_{geom}(P^0)$ – geometrische Steifigkeitsmatrix als Funktion des globalen Lastvektors P^0 , V_{eig} – normalisierte (erste) Beulverformung, λ_{crit} die gesuchte Beulsicherheit bezogen auf den Lastvektor P^0 .

Zur Illustration zeigt Bild 12 die Beulformen eines 178,10 m hohen Naturzugkühlturms unter der Lastkombination $G + W_{ext} + W_{int}$ (Eigengewicht + Wind + Innensog) für zwei verschiedene Windrichtungen, die zur geringsten Beulsicherheit v_{buckl} führen.

Dieser globale numerische Ansatz dient heute bei modernen Kühlturmentwürfen als Entwurfskriterium für eine wirtschaftliche, aber hinreichend sichere Wahl der Wanddicke der Kühlterschale. Es ist aber zu beachten, dass eine lineare Eigenwertanalyse das reale nicht-lineare Tragverhalten niemals korrekt wiedergeben wird. Die Alterung des Materials wie auch die beim Bau unvermeidlichen, werkstofflichen und geometrischen Imperfektionen führen zu einem nicht-linearen Tragverhalten, das für die Dauerhaftigkeit des Schalentragwerks von Bedeutung werden kann. Es gehört zu Wilfried Krätzig's Hauptverdiensten, die Entwicklung von geeigneten und zuverlässigen numerischen Methoden für die Erfassung des nicht-linearen Tragverhaltens von Stahlbetonschalen entscheidend vorangetrieben zu haben. Dies soll nachfolgend auf der Grundlage von [10] ansatzweise erläutert werden.

3.2 Design for Durability

3.2.1 Berechnungsmethode

Im Gegensatz zur linear elastischen Finite-Elemente-Methode müssen die verwendeten Schalenelemente einen geschichteten Aufbau haben, um die Materialnichtlinearitäten in den Schichten erfassen zu können. Das bedeutet, dass jeder Gauss-Integrationspunkt eines Elementes eine Kette von Integrations-Unterpunkten aufweist, einen in jeder Schicht. An diesen Unterpunkten, sozusagen auf Materialpunktebene, müssen geeignete 3D-Werkstoffgleichungen der betreffenden Baustoffe berücksichtigt werden [11]. Die Materialpunktebene, die niedrigste makroskopische Simulationsebene, sammelt alle Materialeigenschaften, die sich gewöhnlich in einem 3D-Kontinuum einstellen können:

- nicht-linear elasto-plastisches σ - ϵ -Verhalten des Betons unter Druckbeanspruchung inklusive Mikro-Rissbildung,
- elastisch-sprödes Bruchverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung mit geringer Zugfestigkeit,
- elasto-plastische Materialmodellierung des Bewehrungsstahls,
- nicht-lineares inelastisches Verbundverhalten zwischen Stahl und Beton.

Eine derartige, nicht-lineare Simulation basiert auf der tangentialen Steifigkeitsbeziehung:

$$K_T(V, d) \cdot \dot{V} = \dot{P} = P - \dot{P}_I(V, d) \quad (3)$$

Da K_T und $\dot{P}_I$ auf den jeweils bekannten Verformungen des Grundzustandes V beruhen, ist die tangential Steifigkeitsbeziehung nicht-linear und erfordert eine iterative Lösung der inkrementellen Verformungen $\dot{V}$.

Wie in Bild 13 dargestellt, folgt die endgültige FE-Analyse einem Lösungspfad auf verschiedenen Ebenen, der sogenannten multi-level iteration technique, wie sie erstmals von Krätzig in [12] beschrieben und später auch auf Kühltürme übertragen wurde [13], [14]. Für jeden neuen Lastschritt beginnt die Iteration mit einem neuen globalen Vektor der Ungleichgewichtskräfte, die ausgehend von den auf die globalen Freiheitsgrade bezogenen Inkrementen in je-

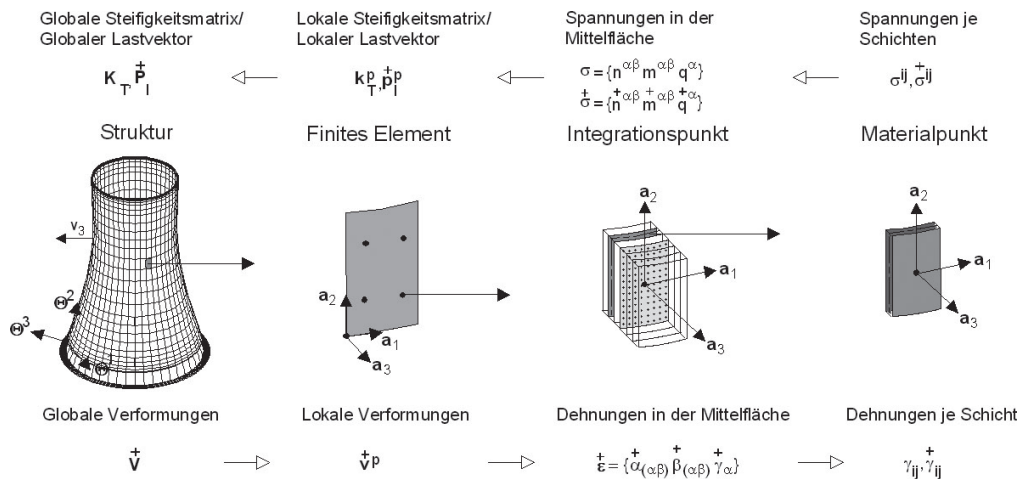
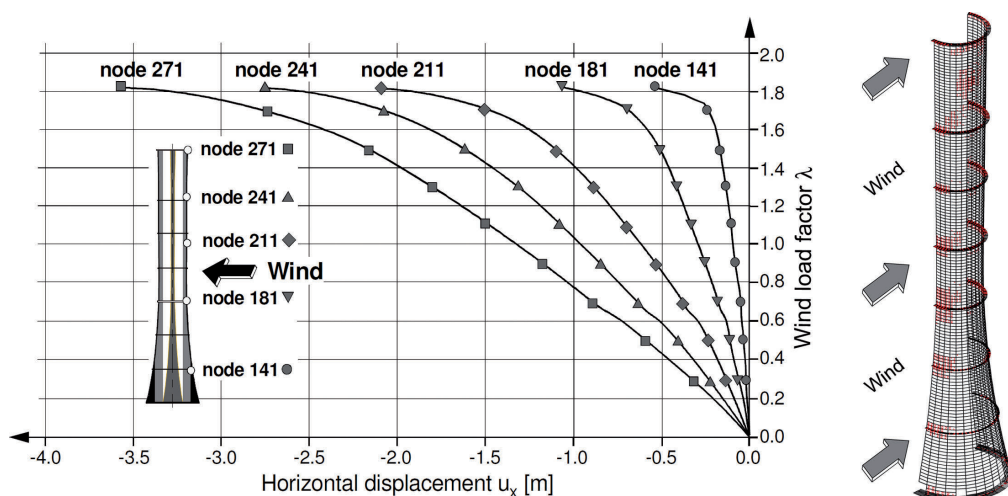


Bild 13. Finites Schichtenelement und Multi-Level Simulation

Bild 14. 750 m Aufwindturm: Nicht-lineare Verformungen bezogen auf den Lastfaktor λ der Last-Kombination $G + \lambda W$ (links) und simulierte Rissbildung kurz vor dem Versagen bei einem Lastniveau $G + 1.85 W$ mit max. Rissweite $w = 1,8$ mm (rechts).

dem Gauss-Integrationspunkt eines Elementes auf die lokalen Elementfreiheitsgrade und weiter auf die Materialpunktebene transformiert werden müssen. Dort werden die Dehnungsincrementen mittels der Werkstoffbeziehungen in Spannungsincrementen überführt, die dann wieder über die lokale Elementebene auf die globale Tragwerksebene rücktransformiert werden, um einen neuen Vektor der Ungleichgewichtskräfte $\vec{P}_I$ für den nächsten Iterationsschritt zu ermitteln.

3.2.2 Nicht-lineare Simulation

Mit dieser numerischen Methode wurde eine Vielzahl von nicht-linearen Untersuchungen an Kühltürmen durchgeführt. Exemplarisch sind in Bild 14 die Ergebnisse für den von Krätzig & Partner entworfenen 750 m hohen Prototypen eines solarthermischen Aufwindkraftwerks gezeigt [15]. Die nicht-linearen Horizontalverschiebungen in verschiedenen Höhenschnitten sind über den Windlastfaktor λ aufgetragen und zeigen eine maximale Verformung von etwa 3,6m an der Turmkrone. Die Darstellung der Rissentwicklung verdeutlicht, an welchen Stellen die Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons überschritten haben und welche Rissbreiten dort zu erwarten sind.

4 Schlussworte

Der Vortrag bei der ICCT2016 in Rotterdam sollte Wilfried Krätzigs letzter sein. Für die, die ihn dort noch als vitalen und engagierten Vortragenden und Gesprächspartner erleben durften, ist sein plötzlicher Abschied schwer nachvollziehbar (Bild 15).



Bild 15. Wilfried B. Krätzig als Keynote-Lecturer bei ICCT2016 in Rotterdam, September 2016

Für uns als seine Partner in der 1983 gegründeten Krätzig & Partner Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH waren seine Visionen und seine Führungsqualitäten von besonderer Bedeutung. Seit Gründung des Büros sind mittlerweile sieben seiner ehemaligen Schüler verantwortlich dort tätig (Bild 16). Wir, seine Partner und die 40 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Ingenieurbüros Krätzig & Partner, haben ihn nicht nur als beeindruckenden Ingenieur und vorbildlichen Prüfstatiker kennengelernt, sondern auch als väterlichen Freund und Ratgeber.

Zum Schluss möchten wir den Verstorbenen selbst zu Wort kommen lassen. Wir veröffentlichen hier erstmalig einen Auszug der Rede, die er am 17. Februar 2016 anlässlich der Verleihung des Bundesverdienstkreuzes gehalten hat:

„Herr Bundesminister Professor Laermann, Herr Präsident Dr. Bökamp, sehr geehrter Herr Landrat Schade, Frau Bürgermeisterin Gronau, meine Damen und Herren, Kollegen, Freunde und Familienmitglieder, Ich freue mich außerordentlich über diese hohe, ganz ungewöhnliche Auszeichnung, für die ich dem Herrn Bundespräsidenten sehr herzlich danke. Ich danke Ihnen, Herr Landrat Schade, in angemessenem Maße auch Ihrem Presseferenten, für Ihre und die anderen viel zu lobend ausgefallenen Laudationes. Mein Dank gilt Ihrem gesamten Stab, voran Ihrer Büroleiterin Frau Kaul, sowie allen an diesem Verfahren Beteiligten, zuerst dem Antragsteller Herrn Professor Karl-Hans Laermann und seinem „Zuträger“, meinem Partner und Kollegen Professor Reinhard Harte, dann allen Gutachtern:

Herrn Dr. Jürgen Hoefeld, Programmdirektor Ingenieurwissenschaften der DFG, Herrn Dr. Heinrich Bökamp, Präsident der Ingenieurkammer-Bau NRW, Herrn Ltd.Min.Rat Dieter Eschenfelder, Gruppenleiter im Bauministerium NRW, Herrn Reinhold Jesorsky, Geschäftsführer der VDI-Gesellschaft Bautechnik.

Meine große Freude mischt sich mit erheblichen Zweifeln ob der Berechtigung dieser Auszeichnung. Als Hamburger bin ich versucht, eine Hausfrau zu zitieren, die zu einem Nachbarschaftskaffee – ein Stück trockenen Streuselkuchens mit einer Tasse Kaffee – eingeladen hat, und einen viel zu prächtigen Blumenstrauß erhält: „Aber das war ja nu’ wirklich nicht nötig!“

Der Widmung und meinen Vorrednern folgend erhalte ich diese hohe Auszeichnung als Ingenieur und als Ingenieurwissenschaftler, als ein Vertreter der Technik. Technik, Bautechnik besonders, muss immer dem Wohle und dem Fortschritt der Gesellschaft dienen. Das kann sie nur, wenn Ingenieure sich in vielfältiger Weise – über ihre eigentlichen Berufsaufgaben hinaus – öffentlich und politisch einbringen.

Als ich im Herbst 1957 mein Studium an der TH Hannover mit dem Diplom beendet hatte, war dies eine komplett andere Zeit: Professoren kamen mit der Straßenbahn zur TH,

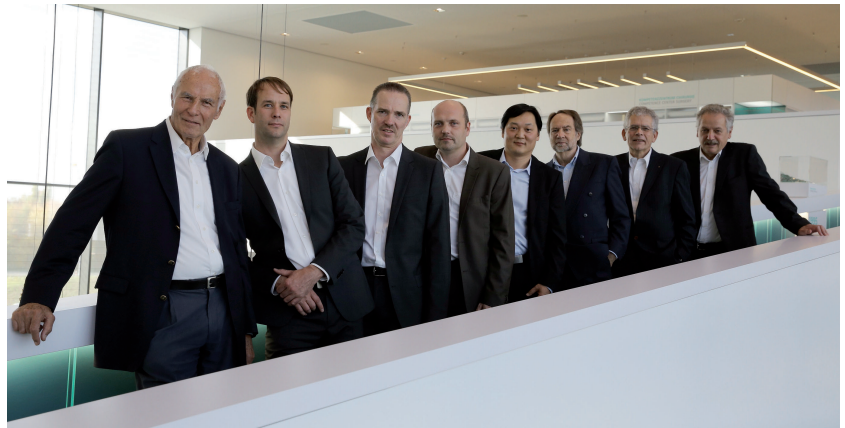


Bild 16. Wilfried B. Krätzig – Gründer und Vordenker der Krätzig & Partner Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH (v.l. Wilfried B. Krätzig, Ralf Wörmann, Ulrich Montag, Matthias Andres, Daniel Jun, Hermann Beem, Reinhard Harte, Ulrich Eckstein)

Papier wurde grundsätzlich doppelseitig beschrieben, Strümpfe noch gestopft und hier wurde „malocht“. Ich ging ins Ruhrgebiet in die Bauindustrie, dem lukrativsten Angebot folgend. Schnell lernte ich die zupackende Art der Menschen hier an Rhein, Ruhr und Wupper schätzen, und die liebliche Umgebung im Bergischen Land lieben. Eine Hochschullaufbahn stand damals nie zur Diskussion, schon aus finanziellen Gründen.

Nach vier Jahren sah dies anders aus, und ich kehrte 1962 an die TH Hannover zurück, als wissenschaftlicher Assistent an das Institut für Massivbau.

Mein damaliger Chef, Prof. Dr. Wolfgang Zerna, in diesem Jahr wäre er 100 Jahre alt geworden, hat uns junge Mitarbeiter immer ermahnt, den Kontakt in die DDR nicht abreißen zu lassen, weshalb ich früh jenseits der Mauer Kontakte knüpfen konnte. Zerna waren als Offizier in US-Gefangenschaft die Augen für die Internationalität der Wissenschaften geöffnet worden, was er auf uns junge Institutsmitarbeiter übertrug. Internationalität war übrigens an deutschen Universitäten Anfang der 1960er-Jahre durchaus nicht verbreitet. Als ich einem anderen, von mir hochverehrten Professor an der TH vom Besuch eines Sprachkurses in GB vorschwärmte, sagte er kühl: „Auf den Boden unseres Erzfeindes würde ich niemals meinen Fuß setzen“.

Die Tätigkeit am Hannoveraner Institut brachte mich früh mit der DFG, der Deutschen Forschungsgemeinschaft, in engen Kontakt, über eine Zuse Z22R, einen Computer der Firma Zuse. Ich erfuhr dabei die große Bedeutung der DFG für die deutschen Wissenschaften. Damals wie heute finanzieren die Länder-Hochschulministerien primär Lehre und Ausbildung. Überspitzt formuliert war Forschung Privatvergnügen der Professoren. Es ist das große Verdienst der DFG und weiterer Institutionen, zum Beispiel der AvH, die Forschung nicht nur satzungsgemäß gefördert, sondern in den Fokus von Politik und Öffentlichkeit gerückt und als nationale Aufgabe verankert zu haben. Forschung, vor allem natürlich natur- und ingenieurwissenschaftliche, schafft nun einmal die Grundlagen zukünftiger nationaler Wohlfahrt!

1968 finanzierte mir die DFG in einem bemerkenswert unbürokratischen Verfahren einen Forschungsaufenthalt an der UC Berkeley, an das sich eine Gastprofessur anschloss. Das gewährte Stipendium war für eine dreiköpfige Familie völlig unzureichend – damals waren hier die Lebenshaltungskosten in den USA unbekannt – aber der Wert dieses Aufenthaltes war für mich ohnehin unbezahlbar: Ich ge-

wann tiefe Einblicke in den American Way of Life, dieses Think Big, in amerikanische Universitäten und das US-Bauwesen; im Detail in die UC Berkeley, den ASCE und den NCEES.

Die BI-Fakultät der UC Berkeley war zu diesem Zeitpunkt im US-Hochschulranking die Nr. 1. Fakultät und Universität waren in jeder Hinsicht Weltspitze: Sammelpunkt wissenschaftlicher Eliten der Welt. Das US-Rankingsystem war für mich neu und faszinierend, es näher kennenzulernen. Als ich 1983 dem Staatssekretär im Bundesforschungsministerium, Herrn Dr. Harro Piazzolo, und einigen seiner leitenden Herren auf seine Bitte hin dies erläuterte und ihm danach vorschlug, sein Ministerium sollte etwas Analoges für Deutschland aufbauen, meinte er: „Wirklich interessant, aber juristisch abenteuerlich – Ein Bundesminister benotet Länderuniversitäten“.

In Berkeley wurde mir die wichtige Rolle der ASCE, der American Society of Civil Engineering, im öffentlichen Leben des Landes bewusst. 1852 gegründet, vier Jahre vor dem VDI, der deutschen Partnerorganisation, ist sie der wichtigste Ansprechpartner der Washingtoner Regierung in Fragen der Infrastruktur und deren Sicherheit. Seit damals bin ich Mitglied im ASCE, im VDI war ich es schon vorher. Während meiner aktiven Tätigkeit im VDI habe ich versucht, dem VDI und der VDI Gesellschaft Bautechnik eine ähnliche Rolle in Deutschland mit zu erarbeiten: Sehr schwierig!

Schließlich zum NCEES, dem National Council of Examiners for Engineers and Surveyors. Er examiniert die PEs, die Professional Engineers. Da er auch den Prüfungsstoff dieser Examina definiert, besitzt er einen großen indirekten Einfluss auf die Lehrpläne der BI-Fakultäten. In den Gründungsgesprächen der Ingenieurkammer-Bau NRW unter der Leitung von Herrn Kollegen Funke hatte ich versucht, ähnliche Gedanken in den entstehenden Ingenieurkammern zu verankern. Heute wäre dies in Deutschland von großer Hilfe: Nach dem Wildwuchs ingenieurwissenschaftlicher Bachelor-Studiengänge an unseren Hochschulen ist es m.E. für die Kammern unverzichtbar, nicht nur die Anteile technischer Fächer zukünftiger Bauingenieure pauschal zu definieren, sondern auch deren Schwerpunkte. Der Staat macht dies ja auch für seinen höheren technischen Verwaltungsdienst durch das OPA f.d.h.t.V. in Bonn. Im Sommer 1970 wurde ich an die Ruhr-Universität Bochum berufen. Meine Frau und ich haben uns hier sehr schnell eingelebt, besonders nach unserem Hausbau im EN-Kreis. In Bochum hatte ich Gelegenheit, ein großes Hochschulinstitut mit aufzubauen. Nach dem Vorbild des Department of Structural Engineering in Berkeley gehörte dazu auch eine Schriftenreihe, die technisch-wissenschaftlichen Mitteilungen TWMs. Übrigens: Autor des ersten Heftes war Herr Prof. Niemann.

Unter anderem diese TWMs verbreiteten die Bekanntheit des jungen Bochumer Instituts in Deutschland und Europa, vor allem auch in der DDR. In den 1980er-Jahren wurde mir bewusst, dass neben dem Inhalt ausführliche Literaturverzeichnisse – auf die ich als Herausgeber immer gedrungen hatte – den besonderen Wert der TWMs in der DDR ausmachten. Die DDR stellte ja den großen Bruder im Osten als Forschungs-Weltmeister heraus, was er nicht war. Schon auf dem Postweg blieben daher manche TWMs in den Stasi-Filtern hängen, aber auch an den Hochschulen verschwanden sie aus den Lehrstuhlbibliotheken. So habe

ich immer wieder verloren gegangene TWMs in die DDR geschickt, oft an private Deckadressen mit privaten Absendern.

Nach der Wende war ich einer der wenigen Wessie-Wissenschaftler, die die Leistungsfähigkeit der Bauingenieurwissenschaften in der DDR ganz gut überblicken konnten. Deswegen wurde ich auch um Mitwirkung bei der wissenschaftlichen Evaluierung der entsprechenden Fakultäten gebeten. Dabei war mein höchstes Ziel, dass die Hochschulen in der DDR ihren deutlichen Rückstand gegenüber europäischen Standards schnell aufholten, was auch Maßstab meiner sich anschließenden Sanierungs- und Aufbauhilfen dort war. Ich weiß, dass dieses Ziel ganz gut gelungen ist, und ich freue mich jedes Mal, wenn mir dies aus den neuen Bundesländern bestätigt wird.

Bei internationalen Forschungskontakten Richtung Osten brauchte man vor der Wende unendlich viel Geduld. Dies habe ich im FTBV erfahren. Dieses Koordinierungsgremium für Studieninhalte der deutschen, österreichischen und schweizerischen Bauingenieur fakultäten traf sich einmal jährlich und hatte dazu auch immer Teilnehmer aus der DDR eingeladen. Immer ohne Erfolg und ohne Antwort. Als ich 1984 zum Vorsitzenden dieser Institution gewählt wurde, kam ich auf die Idee, die Einladungen zukünftig über das Bundesforschungsministerium an das Ostberliner Ministerium für Hochschulangelegenheiten zu senden. Jetzt kam zwar immer noch kein Teilnehmer, aber immerhin eine Antwort. Doch im Oktober 1989 tauchte unerwartet Prof. Gerhard Burkhard aus Weimar bei unserem Treffen in Hannover auf. Ich habe ihn am letzten Abend persönlich zum Bahnhof gebracht, damit er mit dem Interzonenzug pünktlich vor Ablauf seines Curfews um Mitternacht die Grenze überquerte. Ich wollte sicherstellen, dass es keinen Vorwand für ein erneutes Fernbleiben von DDR-Vertretern in den nächsten 20 Jahren geben konnte. Vier Wochen später war die Mauer gefallen.

Von dieser Episode waren es noch acht Jahre bis zu meiner Emeritierung an der Ruhr-Universität. Die vielen, bei dieser Ehrung erwähnten „nebenberuflichen“ Aktivitäten insbesondere für den Aufbau Ost konnte ich mir nur leisten, weil ich absolut zuverlässige, tüchtige Mitarbeiter hatte, im Hochschulinstitut und natürlich im Ingenieurbüro Krätzig & Partner. Ihnen Allen bin ich zu tiefem Dank verpflichtet. Ein ganz besonderer Dank gilt natürlich meiner Familie und in allererster Linie meiner lieben Frau: Ihnen Allen steht ein Anteil an dieser hohen Auszeichnung zu! Gestatten Sie mir abschließend noch einen kurzen Blick nach vorn, in die Zukunft. In meinem Leben habe ich früh die Mühsal des Erklommens internationaler Forschungsgipfel erfahren, in Teilgebieten der deutschen Bauforschung und -technik. Daher gilt meine Sorge der Zukunft deutscher Ingenieurwissenschaften. Sind sie noch innovativ genug? Dauernd Innovation zu rufen, reicht vielleicht nicht! Der Schlüssel für Innovationen liegt ja weit im Gestern, und man muss weit voraus schauen, um innovativ erfolgreich zu sein. Noch vor 50 Jahren waren die Deutschen fasziniert von Entdeckungen und neuer Technik. Das war der Boden für die Kultur technischer Innovationen, aus deren Segnungen unser heutiger Wohlstand resultiert.

Heute dagegen herrscht weithin ein innovations-skeptischer Konservatismus, der an Neuerungen stets zuerst das Negative entdeckt. Eine weitgehend saturierte Gesellschaft glaubt sich gegen alle Veränderungen absichern zu können,

charakterisiert durch Regel- und Normenfetischismus. Das mag der gegenwärtigen Sicherheit dienen, ein innovatives Klima tötet es ab.

...

Ich komme, wie Sie gesehen haben, ja noch weit aus dem 20. Jahrhundert, vermutlich einem der finstersten Jahrhunderte in Europas Geschichte. In seiner ersten Hälfte schien es keine Konstellation zu geben, die nicht die schlimmstmögliche Wendung nahm. In der zweiten Hälfte dann haben wir Deutsche als integrativer Teil Europas unverträgliches Glück gehabt. Hoffentlich vergessen wir nie, wie unwahrscheinlich dies alles war, und hoffentlich bleibt uns dieses Glück treu!

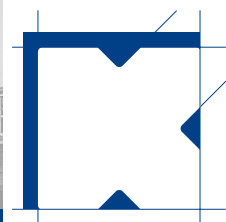
Abschließend nochmals mein ganz besonderer Dank. Sie Herr Landrat Schade und Ihr Team haben ja weiß Gott in dieser Zeit wichtigeres zu tun, als einen alten Mann zu dekorieren: Daher nochmals mein Dank an Alle!“

Der aufmerksame Leser wird festgestellt haben, dass der Geehrte nicht, wie bei solchen Reden üblich, nur auf sein Wirken zurück blickt, sondern dass er die dabei gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse nutzt, sich wissenschaftspolitisch klar zu positionieren und seinen Blick mahnend in die Zukunft zu richten, eine Zukunft, die er nun nicht mehr erleben darf.

Wir, seine Schüler und Partner, werden uns bemühen, sein ingenieurwissenschaftliches Werk zu wahren und in seinem Sinne fortzusetzen.

Literatur

- [1] Krätzig, W. B.; Harte, R.; Meskouris, K.; Wittek, U.: Tragwerke 1 – Theorie und Berechnungsmethoden statisch bestimmter Stabtragwerke. 5. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2010.
- [2] Krätzig, W. B.; Harte, R.; Meskouris, K.; Wittek, U.: Tragwerke 2 – Theorie und Berechnungsmethoden statisch unbestimmter Stabtragwerke. 4. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, 2005.
- [3] Krätzig, W.B.; Basar, Y.: Tragwerke 3 – Theorie und Anwendung der Methode der Finiten Elemente, Springer-Verlag, Berlin, 1997.
- [4] Basar, Y.; Krätzig, W.B.: Mechanik der Flächentragwerke, Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1985.
- [5] Basar, Y.; Krätzig, W.B.: Theory of Shell Structures. In: Fortschritts-Berichte VDI, Reihe 18 (2000), Nr. 258, VDI Verlag, Düsseldorf.
- [6] Harte, R.: Spannbetonbehälter als Sicherheitshülle für einen kryogenen Ethylen-Lagertank. Beton- und Stahlbetonbau 89 (1994), Heft 2, S. 29–34.
- [7] Andres, M.; Peters, J.; Szczepaniak, P.; Wörmann, R.: The Use of Different Codes and Design Approaches for Recent Cooling Tower Projects in Different Countries. In: Industrial Chimneys and Cooling Towers ICCT 2014, Prague, 2014, pp. 11–18.
- [8] Mungan, I.: Buckling Stresses of Hyperboloidal Shells. In: Journal of Structural Division ASCE, Vol. 102 (1976), Iss. 10, pp. 2005–2020.
- [9] Krätzig, W.B.; Andres, M.; Eckstein, U.: Buckling of Natural Draft Cooling Towers and Structural Safety – Retrospect and Prospect. In: Industrial Chimneys and Cooling Towers ICCT2014, Prague, 2014, pp. 299–308.
- [10] Krätzig, W.B.; Andres, M.; Eckstein, U.; Harte, R.; Jun, D.: Influence of Imperfections on the Buckling Safety of Natural Draft Cooling Towers. In: Industrial Chimneys and Cooling Towers ICCT2016, Rotterdam, 2016, pp. 237–247.
- [11] Krätzig, W.B.; Petryna, Y.S.: Assessment of Structural Damage and Failure. In: Archive of Applied Mechanics, Vol. 71 (2001), Iss. 1, pp. 1–15.
- [12] Krätzig, W.B.: Multi-Level Modeling Techniques for Elasto-Plastic Structural Response. In: Computational Plasticity, Part 1. Proc. 5th Int. Conf. CIMNE. Onate, E. et al. (eds.). Barcelona, 1997, pp. 457–468.
- [13] Krätzig, W.B.; Harte, R.; Lohaus, L.; Wittek, U.: Naturzugkühltürme. In: Betonkalender 2007, Ernst & Sohn, Berlin, 2007, S. 231–322.
- [14] Krätzig, W.B.; Gould, P.L.; Harte, R.: Shell Structures for Power Technology. In: Fifty Years of Progress for Shells and Spatial Structures. IASS Jubilee Book. Mungan, I., Abel, J.F. (eds.). Madrid, 2011, pp. 165–194.
- [15] Krätzig, W.B.; Graffmann, M.; Harte, R.; Montag, U.: Power Towers. On Structural Engineering Problems of Solar Updraft Chimneys. SEMC 2010, Zingoni, A. (ed.), Cape Town, 2010, CD-ROM.



Brandschutzplanung · Tragwerksplanung · Prüfung · Überwachung · SiGe-Koordination

Buscheyplatz 9-17 · D-44801 Bochum · Telefon: 0234 70994-0 · www.kup-ing.de

KRÄTZIG & PARTNER
Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH