

Modelle der Technik – Wie Ingenieure die Realwelt in Entwurfsmodelle umsetzen

Heinz Duddeck

Erklärendes und planerisches Denken, insbesondere das wissenschaftliche, ist weitgehend Denken in Modellen, oft mit starken Reduktionen. Rutherfords Atom-Modell, die Doppel-Helix in der Genetik, Keynes' ökonomische Theorie der Beschäftigung sind Beispiele hierfür. Der Mensch versteht die Welt offenbar nur über eine Reduktion der komplexen Realität auf wesentliche Eigenschaften in für ihn erfassbaren vereinfachten Darstellungen. Die entsprechenden Modelle der Technik haben spezifische Charakteristika, weil sie nicht nur auf Verstehen aus sind, sondern auch auf Prognosen des zukünftigen Verhaltens technischer Werke. Ingenieure müssen mit ihren technischen Modellen außerdem absichern, daß sich die Artefakte in ihrer jeweiligen komplexen Realwelt schadensfrei bewähren. An konkreten Beispielen wird erläutert, was das Spezifische technischer Modelle ist.

Technik muß zukünftiges Verhalten erfassen

Wenn grob vereinfachende Zuweisungen erlaubt sind: Die Geistes- und Sozialwissenschaften fragen, was der Mensch ist, tut und tat, manchmal auch, was er tun sollte. Die Naturwissenschaften fragen, wie die Welt ist, was sie antreibt. Die Technikwissenschaften wollen die physische Welt verändern. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Modelle der Einzelwissenschaften. Ingenieure setzen etwas in die Welt, was zuvor nicht vorhanden war, was im Evolutionsplan der Natur – so es einen überhaupt gibt – gar nicht vorgesehen war (vgl. Titelbild dieses Heftes). Sie bauen Fabriken und Computer, Maschinen und Flugzeuge, Kraftwerke und Chemieanlagen, Straßen und ICE-Strecken, Brücken und Tunnel. Das alles wird zunächst im Kopf, in Zeichnung und Zahl, dann in Fertigungsanweisungen konzipiert, bevor es real entsteht. Worauf gründet sich das Vertrauen, daß Technik, aus Wissenschaft und Fertigung entlassen, so wie geplant funktionieren wird, selbst keinen Schaden erleiden und Menschen und Sachen bei der Nutzung nicht gefährden wird? Brückenbauer versprechen, ihr Werk werde bei angemessener Pflege 100 Jahre und mehr überdauern und auch nicht beim Jahrhundertsturm und bei Erdbeben einstürzen, selbst wenn schon Theodor Fontane „Tand, Tand ist das Gebilde von Menschenhand“ auf den Einsturz der Tay-Brücke 1879 dichtete. Flugzeugingenieure – auch die der Concorde – versprechen, daß richtig gewartete und regelmäßig überprüfte Flugzeuge in ihrer konzipierten Lebenszeit nicht abstürzen. Und wenn dennoch Brücken und Flugzeuge, Raketen und Seilbahnen, Stromversorgungsnetze und Verfahrensanlagen der Chemie – wenn auch selten – versagen? Wo lag der Fehler? In der Grundkonzeption, in der technischen Qualität, in der Nutzung, in nicht erfaßten

Risiko-Szenarien? Waren die Entwurfsmodelle fehlerhaft, unvollständig, unzulässig?

Ingenieure müssen in Prognosemodellen die Zukunft einfangen, nicht nur wie das Werk funktionieren wird (Gebrauchszustand), sondern auch was es in den Nutzungsjahren potentiell erleben und erleiden könnte. Dazu müssen die innerhalb von Wahrscheinlichkeitsgrenzen möglichen Gefährdungsszenarien definiert werden. Daher unterscheiden sich die Modelle der Technik und die ihrer Wissenschaften von denjenigen anderer Wissenschaften. Sie sind nicht nur Erklärungsmodelle, sondern liefern auch die Kriterien für Handlungsanweisungen, z. B. wie ein Staudamm in allen seinen Details zu entwerfen ist, damit er langfristig „sicher genug“ ist.

Bis gegen Ende des 19. Jahrhunderts herrschte die Auffassung vor, daß Modelle, wie z. B. das mechanische Modell, die Wirklichkeit widerspiegeln. Wir sind heute bescheidener geworden: Unsere Denkmodelle versuchen im Sinne heuristischer Hypothesen die Wirklichkeit so einzufangen, daß wir deren wesentliche Phänomene mit unseren menschlichen Denkstrukturen erfassen können. Die Wirklichkeit wird nicht abgebildet, sondern in eine für den jeweiligen Zweck geeignete, vereinfachte Darstellung übersetzt. Nachfolgend wird unter Modell nur die mathematisch berechenbare Darstellung technischer Zusammenhänge verstanden. Die physischen Versuchsmodelle, z. B. von Prototypen oder Strukturen in verkleinertem Maßstab, sind nicht angesprochen.

Beispiel: Küstenschutzsperrwerk

In Abb. 1 ist das fertige Oosterschelde-Sperrwerk gezeigt, das verhindern soll, daß noch einmal – wie 1953 – Südholland überflutet wird. Wenn der Leser sich vorstellt, er sei der für dieses Bauwerk verantwortliche Ingenieur: Was schießt da in sei-

nen Kopf? Welche Hauptprobleme müßte er mit einem Team an Fachleuten lösen?

1. Für die Höhe des Wehrs muß die höchste Flut, die Jahrtausendflut und die Wellenhöhe beim zugehörigen Sturm bekannt sein. Wer kann das zuverlässig voraussagen? Darf man von vergangenen Statistiken in die Zukunft hinaus extrapolieren? Und wenn der Wasserspiegel infolge Welt-Treibhauseffekt steigt? Ist hier ein Grenz-Restrisiko überhaupt zulässig? Wie ist dies alles übersetzbar in eine Flut- und Wellenhöhe für das Modell zum Entwurf des Wehres?
2. Welche Kräfte wirken beim Brechen der Wellen dieses Jahrtausendsturms auf die Stahltoie, die Betonpfeiler, den Baugrund? Rutscht gar ein Pfeiler wegen Auskolkungen in einigen Jahren weg? Wie sehr darf den aus Bohrproben bestimmten Kennwerten der Wasserdurchlässigkeit des Baugrunds vertraut werden? Gibt es unentdeckte schlechtere Bodenschichten?
3. Wenn die Oosterschelde durch das Bauwerk so eingeengt wird, sind dann die Strömungsverhältnisse ganz anders? Lagert sich Schlick dort ab, wo er es nicht darf? Vielleicht sogar in den weiter landeinwärts liegenden Hafenbecken? Werden die zu schützenden Polder wegen der anderen Vorflutströmungen ökologisch verändert? Gibt es hierfür Berechnungsmodelle, deren Ansätze, methodische Berechnungen und Ergebnisse kritische Anlieger überzeugen?
4. Wie baut man überhaupt ein solches Bauwerk in fließendem Wasser? Vielleicht so wie in Abb. 2: Fertigteil-Hohlkörper in ausgebaggertem Trockendock, aus dem die Pfeiler nach dem Fluten herausgeschwommen und auf vorbereitete Sohlenbefestigungen abgesenkt werden? Wasserdichter Beton also und das Versprechen, der Stahl darin werde trotz Salz- und Brackwasser 200 Jahre lang nicht korrodieren.
5. Sollen wir vorab im Labor in kleinerem Maßstab erst einmal üben? Jedoch was? Und trifft dies die Wirklichkeit? Worin haben wir schon Erfahrungen? Brauchen wir noch Experten für Sonderfragen, für noch zu Erforschendes? Gibt es ähnliche Projekte irgendwo auf der Welt? Was ist dort „schiefgegangen“? Doch die haben ja noch gar nicht die Jahrtausendflut erlebt. Darf man Erfahrungen überhaupt übertragen? Das Sperrwerk (Abb. 1) ist doch ganz und gar ein Unikat. Es hat so, an dieser Stelle, mit diesen Aufgaben keinen Vorläufer.
6. Welche Einsprüche von Einzelnen und Bürgerinitiativen sind zu erwarten? Protestieren die Fischer, die Segler, die Naturschützer? Stehen Aufwand und Schutzfunktion überhaupt in einem vertretbaren Verhältnis?
7. Und dann: Was kostet dies? Wer finanziert dies? Wie zuverlässig können Bauzeit und Preise ermittelt werden? Wie groß ist der Ansatz für Unvorhersehbares, für Zeitverzögerungen und Zusatzmaßnahmen aus Einsprüchen?



*Abb. 1
Das Oosterschelde-Sperrwerk des Delta-Projekts in den Niederlanden. Die 3.000 m lange Flutbarriere besteht aus 65 vorgefertigten Betonpfeilern mit 62 stählernen Wehrklappen dazwischen.
Foto: Das Sturmflutwehr in der Oosterschelde, Rijkswaterstaat, Holland*

Wenn die Pläne gezeichnet sind, die Aufträge vergeben, ist längst entschieden, daß das Bauwerk seine Funktionen mit diesem so entwickelten Entwurf die 200 Jahre Lebensdauer erfüllen soll. Die Kriterien dafür liefern die Entwurfsmodelle, mit denen die Ingenieure die zukünftigen Bau-, Dauer- und Grenzzustände einfangen. Und dann nach Fertigstellung – bei den ersten großen Stürmen – die schlaflosen Nächte: Was alles kann bei diesem Realtest versagen? Und wenn das Telefon in einer der Sturmflutnächte klingelt: Die ungeheure Erleichterung, es ist nur die Tochter, die ihre späte Heimkehr meldet.

Was Gesamtmodelle eines Entwurfsprozesses enthalten

Die Technikwissenschaften arbeiten an der Entwicklung der Entwurfs- und Entscheidungsmodel-



*Abb. 2
Pfeiler des Sperrwerks im Bauzustand (30 bis 39 m hoch), die vom Trockendock in die Sperre eingeschwommen werden.
Foto wie Abb. 1*



Abb. 3
Der z. Zt. höchste
Turm der Welt
(553 m), der
CN-Tower in
Toronto.
Foto: E. Heinle u. F.
Leonhardt, „Türme
aller Zeiten, aller
Kulturen“, Deutsche
Verlags-Anstalt
Stuttgart 1988

le. Sie müssen zunächst erforschen, was für die Einzelmodelle von Bedeutung ist, um daraus – meist durch Reduktionen auf Vereinfachungen hin – für die Praxis brauchbare technische Modelle vorzuschlagen. Die in das Gesamtkonzept eingehenden Teilmodelle werden mit den Abb. 3 und 4 an einem Beispiel aus dem Bauingenieurwesen erklärt (weil der Verfasser sich hier besser auskennt).

1. **Einwirkungen.** Ist in einem kreativen Akt aus Intuition und Erfahrung die Entwurfsidee eines technischen Projektes geboren, die die speziellen Aufgaben prinzipiell erfüllen könnte, dann sind zunächst – meist stark idealisierte – Modelle für die Einwirkungen zu finden (Abb. 4). Für den Turm (Abb. 3) u. a.: Ersatzwindkräfte für den turbulenten stärksten Sturm, wobei Windeinwirkung und Form des Turms gekoppelt sind; Schwingbeiwert (Erhöhung der Windkräfte) für Wirbelablösungen am Schaft; Temperaturwerte für Sonneneinstrahlung; Ersatz-Massenkräfte für Erdbebeneerschütterungen. Bei Projekten mit großem Gefährdungspotential (wie z. B. Kernkraftwerken) gehören zu den Einwirkungen auch hypothetische Fälle, für die es so gut wie keine Erfahrungen gibt: Aufprall eines abstürzenden Flugzeugs, Explosion einer Gaswolke in nächster Nähe, Sabotageakte, Versagen eines der redundanten Trag- oder Sicherungselemente und mögliche Kombinationen gleichzeitiger Einwirkungen. In allen Fällen sind Entscheidungen notwendig, welche Zahlenwerte aus den streuenden Kollektiven der realen Zustände für den Entwurf maßgebend sein sollen. Welches Modell z. B. für die Wirkung eines Fahrzeugbrandes im Straßentunnel? Wenn Langzeitfolgen wichtig sind: Wie viele Wechselbeanspruchungen eines nicht mehr perfekt runden ICE-Rades müssen schadensfrei bleiben? Die Forschung fragt, welche Einwirkungen überhaupt auftreten und wie sie in Maß und Zahl umgesetzt werden können. Für die Praxis sind starke Idealisierungen erforderlich. Hier muß der Ingenieur die Kunst des richtigen Weglassens und der zulässigen Vereinfachung beherrschen. Die Einwirkungsmodelle sind keine Erklärungsmodelle von Phänomenen wie die der Physik.

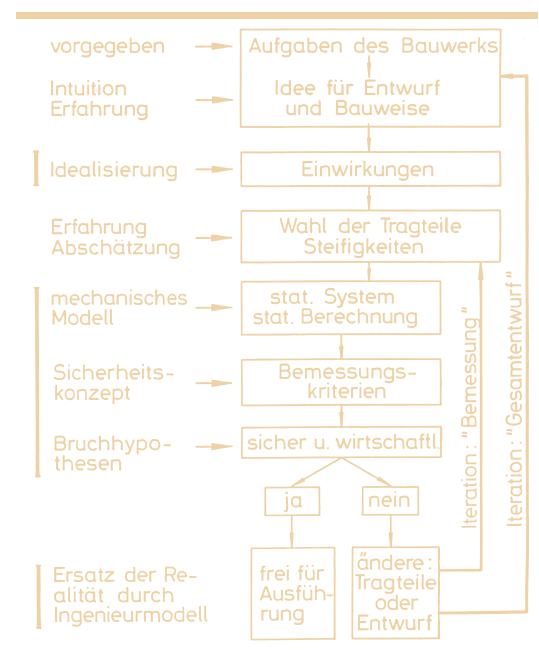
2. Dem **Strukturmodell** geht der Entwurf der Konstruktion voraus. Welche Formen und Abmessungen z. B. für die Pfeiler des Sperrwerks (Abb. 2) die richtigen sind, ist eine Ingenieurfindung, die nicht aus mathematischen Prozessen (Ausnahme: Optimierungsalgorithmen) folgt. Will man die Antwort der Konstruktion auf die Einwirkungen analysieren, muß zunächst die Realstruktur in ein Strukturmodell übersetzt werden, das sich berechnen läßt. Beim Turm (Abb. 3): Der Schaft wird zum eindimensionalen, im Boden eingespannten Stab, die Kanzel zu zweidimensionalen Platten und Kegelschalen, der Baugrund zum dreidimensionalen elastisch-plastischen Körper. In analoge Strukturmodelle werden Autoka-

Abb. 4
Der Entwurfsprozess
in Modellen
(hier für Bauwerke)

rosserien, Maschinen, Flugzeuge, Brücken und Staudämme umgesetzt. Die numerischen Modelle der Computer-Technik erschließen (z. B. in finiten Elementen) beliebige Strukturen wie Tunnelvortriebe im Gebirge, Schiffskörper in Meereswellen, Roboter und Werkzeugmaschinen in ihren Arbeitsprozessen, Herzklappen und Operationseingriffe in Skeletteile. Die Strukturmodelle müssen die realen Körper in Systeme mit äquivalenten Körperabmessungen und Steifigkeiten übersetzen. Es gibt aber auch Strukturmodelle für Netzwerke, wie den Verkehr, die Stromversorgung einer Stadt, die Abwasserleitungen usw..

3. Das **Stoffmodell** setzt das Materialverhalten in mathematische Abhängigkeiten um, im einfachsten Fall, wie innere Spannungen und Verformungen voneinander abhängen. In Abb. 5 ist ein komplexes Stoffmodell für Steinsalz z. B. zur Berechnung von unterirdischen Abfalldeponien dargestellt. Es verknüpft dreidimensionale Verkürzungen (ϵ) mit Spannungen (δ) in Abhängigkeit von der Temperatur (T), der Zeit (t), der Beanspruchungsgrenzen (F) und erfordert die experimentelle Bestimmung vieler Stoffkonstanten (E , η) und Parameter. Abb. 5 soll dem Leser nur prinzipiell zeigen, wie Stoffverhalten in mechanisch-mathematischen Funktionen ausgedrückt wird. Sind z. B. unterirdische Deponien in Salz für toxische Abfälle langfristig zu analysieren, müssen Stoffmodelle auf 10.000 Jahre und mehr extrapolierbar sein. Hier sind die Werkstoff-Wissenschaften gefragt, zutreffende Stoffmodelle zu finden, nicht nur für Metall, Beton, Holz und Keramik, sondern auch für Baugrund, Fels, flüssige und gasförmige Berechnungsstrukturen.

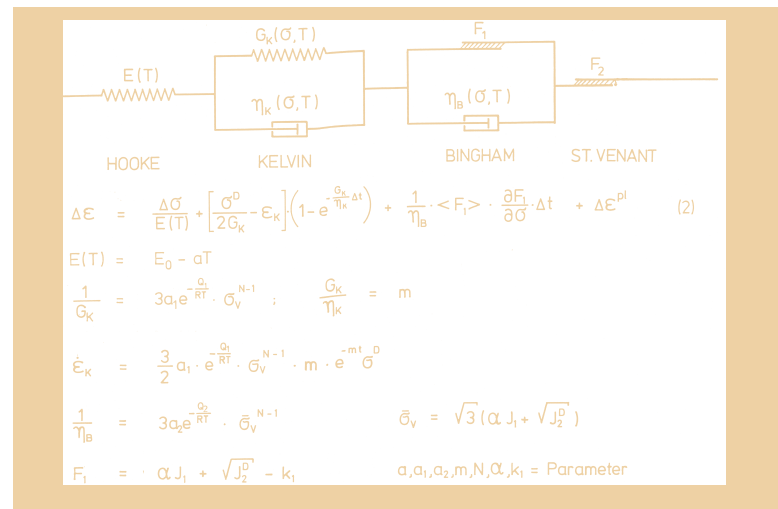
4. **Berechnung.** Mit den Einwirkungen, dem Strukturmodell und den Modellen für das Stoffverhalten ermitteln die Berechnungsverfahren die



für die Entwurfsentscheidungen relevanten Zustände. Beim Turm (Abb. 3) u. a. die Verbiegungen, die Neigung der Antenne, die Spannungen im Schaft, die Bodenpressungen unter dem Fundament. Die Berechnungen sind oft stark nichtlinear. Komplexe Strukturen (ein Bergwerk) erfordern die Lösung von Gleichungen mit mehreren 100.000den von Unbekannten. Die Ergebnisse lassen sich in Computergraphik-Bildern bunt veranschaulichen. Mit den Fortschritten der letzten Jahre lassen sich heute vorausberechnen: Crash-Simulationen von Fahrzeugen, kontaminierende Versickerungen von Schadstoffen im Boden, Langzeitschädigungen von Beton durch atmosphärische Aggressivität, Strömungs- und Temperaturfelder von in die Atmosphäre eintauchenden Raumfahrzeugen, Bewegungen der Erdkrustenplatten, auf Tumorbereiche beschränkte Temperaturerhöhungen durch Schwingungswellen in der Krebstherapie.

5. Für das **Sicherheitskonzept** ist ein weiteres Modell erforderlich, das den zu vermeidenden Zustand definiert und den erforderlichen Sicherheitsabstand von solchen Grenzsituationen festlegt. Solche Grenzsituationen können sein: Der Turm (Abb. 3) darf nicht umfallen, der Beton nicht aufreißen, die Funkmastneigung muß auch beim stärksten Sturm beschränkt bleiben, die Restaurantbesucher sollen die Windschwingungen physiologisch noch ertragen können. Das Festlegen solcher Grenzen und der einzuhaltenden Abstände davon („Sicherheitszahlen“) ist ein intellektueller Entscheidungsprozess, der durch Sicherheitstheorien, welcher Schaden mit welchen Wahrscheinlichkeiten und wem noch zumutbar ist, gestützt wird. Hier entscheiden Ingenieure über Gefährdungsrisiken, zugleich aber auch über Aufwand und Kosten in Relation zum erwünschten Sicherheitsstandard. Welcher Preis für ein erdbebensicheres Bauen in Stuttgart gegen ein Erdbeben, das mit solchen Richterskalenwerten äußerst unwahrscheinlich ist? In der extremsten Jahrtausendsturmflut mag das Sperrwerk (Abb. 1) wohl örtlich reparierfähig beschädigt werden, aber auf keinen Fall einstürzen (Sicherheitszahl von z. B. 1,1 ausreichend). Der Turm (Abb. 3) ist für den Berechnungswind mit z. B. 1,7-fachem Abstand vom Unfallszenarium zu bemessen. Wenn im Entwurfsstadium solche Kriterien nicht eingehalten werden, ist (Abb. 4) entweder die Konstruktion zu verstärken oder die Entwurfsidee insgesamt zu verändern oder gar zu verwerfen. Es gibt jedoch auch technische Systeme, die man nicht „auf der sicheren Seite liegend“ entwerfen kann. Die Modelle für die Fertigungsstraßen von Autofabriken, für den Verkehrsfluß in einer Stadt, die verfahrenstechnische Regelung einer Kläranlage (Abb. 6) müssen sehr genau Ist-Zuständen entsprechen. Hier kann man nicht „Sicherheiten“ vorhalten. Die Modelle technischer Prozessabläufe folgen nicht dem Entwurfsschema (Abb. 4). Doch auch

hier sind Annahmen über Eingangswerte, Berechnungen, über Prozesse und Versagensszenarien erforderlich. Verkehrsprozesse enthalten auch Modelle des sozialen und psychologischen Verhaltens der Verkehrsteilnehmer.



Und wenn die Modelle die Realität verfehlen?

Schadensfälle sind seit eh und je die Schrittmacher der Ingenieurkunst, von den spektakulären Einstürzen französischer Kathedralengewölbe bis zu den durch ein Erdbeben herausgefilterten fehlerhaften Bauten wie kürzlich am Marmarameer in der Türkei. Versagensfälle sind zugleich auch ein sehr harter Realitätstest der Entwurfsmodelle. Bei der Tay-Brücke 1879 waren die rechnerisch angesetzten Windlasten zu klein. Wenn Stahlschornsteine durch windinduzierte Schwingungen einstürzen, waren die Modelle für die Einwirkungen (s. Abb. 4) unzureichend. Bei der Koblenzer Rheinbrücke (Abb. 7) hatte das Strukturmodell die Schwachstellen, die bei der Vorbaumontage ausbeulten, nicht richtig erfaßt. Beim Space-Shuttle Challenger-Unglück war die Frostsprödigkeit der Zuführungsleitungen übersehen worden. Beim Reifenbruch des ICE-Unglücks in Eschede ist die Ermüdungsfestigkeit überschätzt worden (Sicherheitsmodell in Abb. 4).

Die Analyse von Schadensfällen führt oft zur Revision und Vervollständigung der Modelle. Wenn bei Serienproduktionen Prototypen getestet werden können, ist eine Adaption der Berechnungsmodelle möglich. Dies gilt auch für Funktionsmodelle wie bei einem Klärwerk (Abb. 6) oder bei Elektroversorgungsnetzen, bei denen eine aus Erfahrungen gespeiste allmähliche Adaption auf Realitätsnähe hin möglich ist.

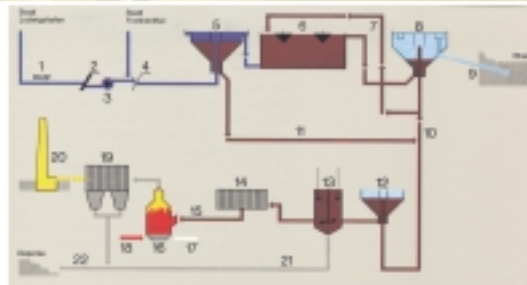
Bauingenieurprojekte sind dagegen meist Unikate, selbst wenn Erfahrungen aus ähnlichen Bauten vorliegen. Daher ist hier das Risiko größer.

Bauingenieure fragen sich in der Entwurfsphase, wie man vorab das findet, was man – wie sich erst nach dem Schadensfall herausstellt – vergessen hat. Bei

*Abb. 5
Stoffmodell für Stein-
salzgebirge, das
elastisches (Hooke),
visko-plastisches
(Kelvin, Bingham)
und fließendes
(St. Venant) Ver-
halten simuliert*



Abb. 6
Abwasserkläranlage
für die Stadt
Ludwigshafen und
die BASF,
2 u. 4 Rechenanlage,
3 Pumpwerk,
5 Grobentschlammer,
6 Belebungsbecken,
8 Nachklärbecken,
12 Schlammmeindiker,
13 Konditionierung,
14 Filterpressen,
16 Wirbelschichtöfen,
19 Elektrofilter,
20 Schornstein,
21 Ascherücklauf.
Foto: Hochtief AG,
Essen



den meisten Schäden sind jedoch nicht Modellmängel, sondern grobe Fehler, z. B. bei der Herstellung, die Ursache.

Das Erfinden „richtiger“ Modelle ist in denjenigen Fällen von besonderer Bedeutung, bei denen weder Erfahrungen noch Adaptionen möglich sind: bei der Abbildung von Grenz- und Katastrophen-Szenarien, die wir hoffentlich nie erfahren werden. Der Flugzeugabsturz auf ein Kernkraftwerk, die Schiffskollision mit einem Großbrückenpfeiler (wie bei der Öresundbrücke), der größte denkbare Unfall mit Brand und Explosion in einem Chemiewerk, der Black-out-Ausfall im Elektronetz, der Bruch einer Staumauer (wie die der Drei-Schluchten im Jangtsekiang). Hier kann nur allein in Berechnungsmodellen analysiert werden, daß und wie Zuverlässigkeit gewährleistet ist.

Die Modelle der Technik sind nicht die Wirklichkeit. Sie sind nur so lange richtig, wie sie nicht durch Erfahrungen revidiert werden müssen. William James pragmatisches „what works, is correct“ gilt daher für die Modelle der Ingenieure nur begrenzt. Die Geschichte technischer Schadensfälle zeigt, daß übermäßiges Vertrauen in bisherige Entwurfsansätze und Übertragung von bisher Erfolgreichem auf erweiterte Anwendungen oft zu Katastrophen führte. Andererseits ist nichts „lehrreicher“ als ein spektakulärer Schadensfall (die Tacoma Narrows Bridge 1940 z. B. für die Entwicklung aerostabiler Hängebrücken).

Abb. 7
Einsturz der
Koblenzer Rhein-
brücke im Bau-
zustand 1971.
Foto: Joachim Scheer

Das Denken in Modellen ist erst spät in die Technik gekommen. Tempel und Wasserleitungen sind schon seit Jahrtausenden gebaut worden. Doch erst mit der Entwicklung der Technikwissenschaften ab dem 17. und 18. Jahrhundert hat der Mensch versucht, in mathematisierten Gedankenmodellen zu erfassen, wie etwas funktioniert, um damit besser zu planen, was noch herzustellen ist. Dies erforderte große Abstraktionsleistungen. Selbst ein so ingenieurpraktischer Wissenschaftler wie Galilei gab Spannungsverteilungen in einem belasteten Balken an, die falsch sind. Es hat 100 Jahre von Galilei bis Euler gebraucht, um einen Elastizitätsmodul eindeutig zu definieren. Bauingenieure setzen den Beginn ihrer wissenschaftlich fundierten Technik in das Jahr 1742, in dem drei Mathematiker-Mönche Papst Benedikt XIV. ein Gutachten zur Sanierung der gerissenen Petersdom-Kuppel vorlegten, das die erforderlichen Ringanker auf technisch-mathematischem Wege errechnete.

Heute sind Modelle in allen Bereichen der Technik – und weit darüber hinaus (z. B. in der Medizin, in Klimaprognosen) – unverzichtbare Instrumente, um vorauszusagen, wie sich das, was der Mensch in der Welt und mit der Welt tut, in Zukunft verhalten wird. Die Technikwissenschaften haben an der Entwicklung solcher Modelle einen sehr großen Anteil.

Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Heinz Duddeck
Technische Universität Braunschweig
Institut für Statik
Beethovenstraße 51
38106 Braunschweig

Literatur

- [1] Duddeck, H.: Und sie fertigen nur die ‚Gestelle‘ dieser Welt...? Ingenieure und das zubringende Wissen der anderen Wissenschaften; Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften; Ber. u. Abh. Bd. 2 (1996), 361-389
- [2] Duddeck, H.: Wie konsistent sind unsere Entwurfsmodelle?; Bauingenieur 64 (1989); 1-8
- [3] Pahl, G. u. Beitz, W.: Konstruktionslehre – Handbuch für Studium und Praxis; Berlin, Springer-Verlag; 4. Aufl. 1997
- [4] Scheer, J.: Einstürze von Bauwerken – Fakten, Ursachen, Folgen; Abh. Braunsch. Wiss. Gesellschaft; Bd. 48 (1997); Goltze, Göttingen 1998; 132-166

