

Heinz Duddeck

## Modelle in den Technikwissenschaften

### 1 Einleitung

Historiker erzählen, wie es war,  
Philologen, was Texte meinen.  
Physiker und Biologen erklären uns, wie die Welt ist,  
Philosophen, wie sie sein soll.  
Mathematiker verknüpfen logische Gebilde, die es gar nicht gibt.  
Und Astronomen sehen nur das, was längst Vergangenheit ist.  
Doch Ingenieure, die haben es ungleich schwerer: die arbeiten daran, was erst in der  
Zukunft *sein wird* – freilich beschränkt auf Artefakte.

Ingenieure setzen etwas in die Welt (Abb. 1), was vorher nicht existierte. Darum sind auch ihre Modelle zum Teil wesentlich anders als die der Naturwissenschaftler. Da, wo Naturwissenschaftler technische Konstrukte planen und fertigen, die sich in der zukünftigen Realität bewähren müssen – Weltraumsonden, Fusionsreaktoren, Produktionsverfahren der Chemie –, sind sie eigentlich Ingenieure. Sie wissen es oft nur nicht. Man erkennt es an den Bindestrich-Techniken: Laser-, Nano-, Bio- und Medizin-Technik. Um Technik vor Geisteswissenschaftlern zu legitimieren, sei Hans Blumenberg bemüht: Gottes Welterschöpfung hat einen „Spielraum des Unverwirklichten“ gelassen. Hier kann der Mensch – also der Ingenieur – „authentisch Neues“ ohne „Nachahmung der Natur“ realisieren.<sup>1</sup> – Wohl ironisch genug gestartet, muß ich es auch begründen. Ich will das exemplarisch an Teilen meines Faches tun.

### 2 Technische Entwurfsmodelle

Alles in Abbildung 2, im künstlichen Hafen von Nagoya, ist Technik. Alles war zunächst im Kopf, im Computer, auf Papier und wurde mit Modellen für das, was in 100, 200 Jahren geschehen kann, abgesichert. Auch die hypothetischen Gefährdungen: Explosion

---

<sup>1</sup> Blumenberg, H.: Nachahmung der Natur. In: Wirklichkeiten, in denen wir leben, Reclam 7715, 1981, S. 83.



Abbildung 1  
Türme der Welt



Abbildung 2  
Hafen Nagoya



Abbildung 3  
Normandie Brücke

eines Gasbehälters, Schiffsstoß gegen den Kai, Erdbeben. Technik erfordert auch funktionelle Modelle: für die Logistik der Verladeprozesse, den Betrieb der Öl-, Gas- und Silo-Anlagen. Bei der Normandie-Brücke (Abb. 3) erfassen Entwurfsmodelle unter anderem den Jahrhundertsturm mit Eisregen, LKW-Staus und Stöße bei Schlaglöchern, den Bruch einiger Kabel und die Auskolkungsgefahr der Pfeilerfundamente im Fluß.

Entwurfsmodelle bilden nicht die tatsächliche zukünftige Wirklichkeit ab. Sie überbieten sie mit Ansätzen in Fraktalen von Wahrscheinlichkeiten, mit Sicherheitsmargen. Wir untersuchen auch hypothetische Szenarien, für die es keine Erfahrungen gibt, wir keine Erfahrungen machen wollen: den GAU im Kernkraftwerk, Staudammgefährdung durch Jahrtausenderdbeben, den Brand im Tunnel, das Jahrtausendhochwasser im Hamburger Hafen. Beim Entwurf von Bauwerken (z. B. Abb. 1) koppeln wir mehrere Teilmodelle (Abb. 4): die für Einwirkungen (Sturm, Erdbeben), das mechanische Strukturmodell (der ganze Toronto-Tower ersetzt durch einen eindimensionalen Balken), Modelle für Bruch- und Sicherheitshypothesen (zweifache Sicherheit gegen Umfallen oder schon gegen Risse im Schaft).

Entwurfsmodelle haben spezifische Charakteristika: Sie sind keine Erklärungsmodelle der Realität. Ausnahmen: Wir suchen Schadensursachen oder wir sind – wie bei Stoffmodellen – der Physik nahe. Sie ersetzen die gesamte komplexe Realsituation durch

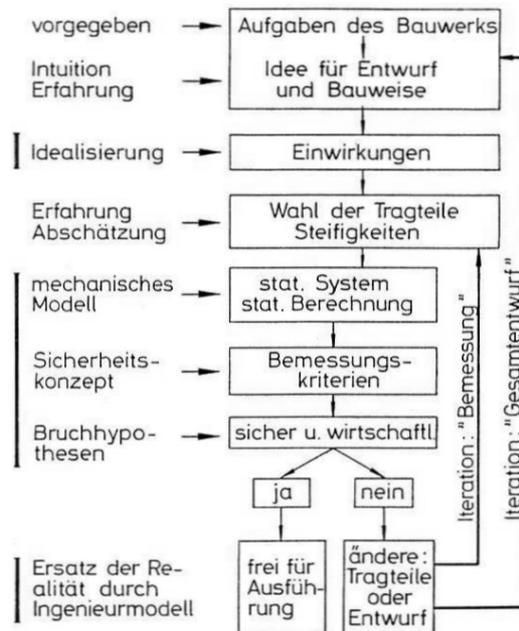


Abbildung 4  
Entwurfsmodell

starke Reduktion auf wesentliche Phänomene. Naturgesetze findet man dagegen nur in künstlich geschaffener, auf einen Aspekt reduzierter Experimentiersituation. Entwurfsmodelle fangen die Realität, auf der sicheren Seite liegend, ein. Schon die verbal formulierten Szenarien möglicher Grenzsituationen sind Modelle. Technische Modelle haben meist Anwendungsgrenzen. Sie sind bei Zugewinn an Wissen offen für Revisionen. Technische Modelle wollen nicht wahr, sondern nur hinreichend zuverlässig richtig sein. Sie liefern Entscheidungskriterien für das Machbare, Verantwortbare; leider nicht für Wertefragen (ob sinnvoll, wünschenswert).

### 3 Asse-Tieflager für radioaktive Abfälle

Zukunft muß manchmal sehr komplex eingefangen werden. Im Salzstock Asse bei Wolfenbüttel (Abb. 5) wurde vor 30 Jahren (1967–1978) schwach radioaktiver Abfall eingelagert. Das Bergwerk (Abb. 6) mußte mit Salz und Lauge gefüllt und abgeschlossen werden. Es entstand das erste Endlager radioaktiver Abfälle in Deutschland.

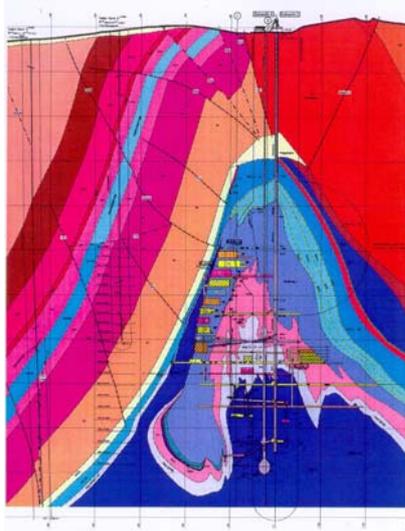


Abbildung 5  
Asse-Schnitt

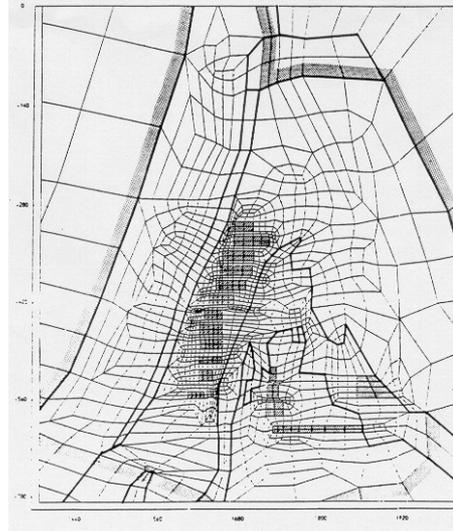


Abbildung 7  
FEM-Modell Asse

Ingenieure müssen Antworten geben, unter anderem auf folgende Fragen:

- Welche kritischen Szenarien sind in 10.000 Jahren mit welchen Wahrscheinlichkeiten möglich?
- Löst die Schutzlauge das Salz auf? Stürzt das Bergwerk ein?
- Wieviel kontaminierte Lauge wird durch die rheologische Salzkonzvergenz herausgepreßt, 100 ... 500 m<sup>3</sup> pro Jahr?
- Werden in 10, in 500, in 10.000 Jahren Nuklide in das Grundwasser austreten? Und in welcher Konzentration?
- Werden – fragt das Bergamt – Eiszeiten in zukünftigen 150.000 Jahren das Lager freilegen?

Antworten sind nur mit Modellen möglich. Die Wissenschaften müssen diese Modelle liefern. Dies sind unter anderem: Struktur- (Abb. 7) und Stoffmodelle für die Deformationen und Spannungen in den 10.000 Jahren, Prozeßmodelle für chemisch-physikalische Reaktionen der Abfallbehälter mit der Schutzlauge, hydrologische Modelle für innere Konvektions- und externe Bergwasserströme aus Dichtedifferenzen.

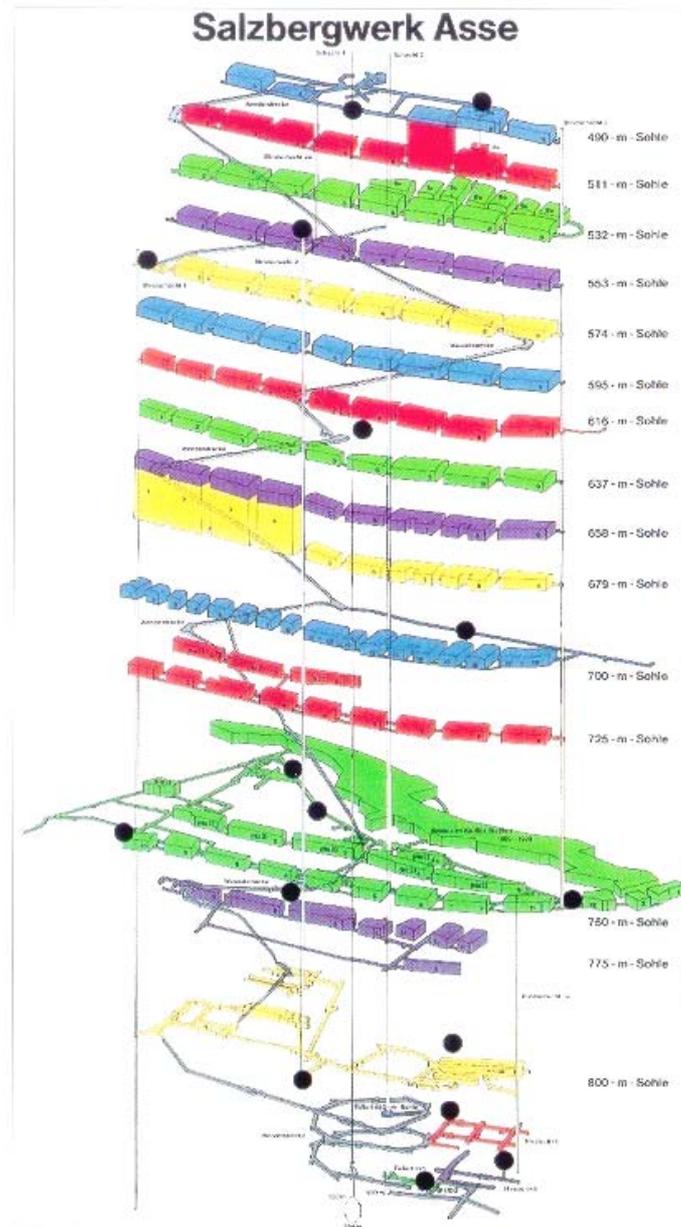


Abbildung 6  
Kammersystem Asse



Abbildung 8  
Kläranlage

#### 4 Vielfalt der Modelle

Ingenieure müssen zuverlässig voraussagen, daß die entworfenen Werke ihren Zweck erfüllen und niemanden – auch nicht Natur und Gesellschaft – schädigen werden. Und sie haften dafür. Ganz im Gegensatz zu den Wirtschaftswissenschaftlern, den fünf Weisen des Bundeskanzlers, die jährlich die Ergebnisse ihrer Modellberechnungen vorlegen. Wenn Historiker – oder Hegel und Marx – es wagten, Modelle für die Zukunft zu entwerfen, scheiterten sie sehr. Auch Religionen bieten Zukunftsaussagen an. Freilich, Heilsmodelle sind gegen Verifizierungsversuche immun.

Die technischen Modelle sind so vielfältig wie die technischen Projekte. Sie sind sehr spezifisch an die technischen Ziele angepaßt: biologisch-chemische für Abwassertechnik (Abb. 8), Modelle für computergesteuerte Fertigungstechnik in Produktionsstraßen (Abb. 9), Modelle für blackout-sichere Verbundnetze der Stromversorgung, Modelle für Funktion und Fertigung von Mikro-Chips. Im Gegensatz zu den Naturwissenschaften, die kumulativ an Erklärungsmodellen arbeiten, sind Ingenieure vielfach gezwungen, jeweils speziell für ein einzelnes Projekt eigene Modelle zu entwickeln. Das Finden zutreffender Modelle ist oft sogar Aufgabe der in der Praxis tätigen Ingenieure. Daher muß Ausbildung an den Technischen Universitäten das Finden und Absichern von Modellen lehren.



Abbildung 9  
Fertigungsstraße im Pkw-Werk

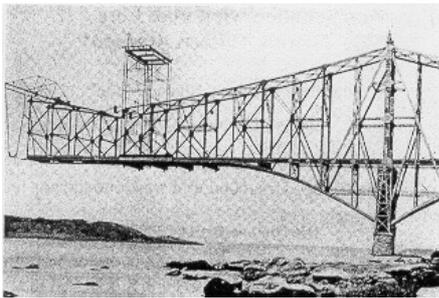


Abbildung 10  
Quebec-Brücke

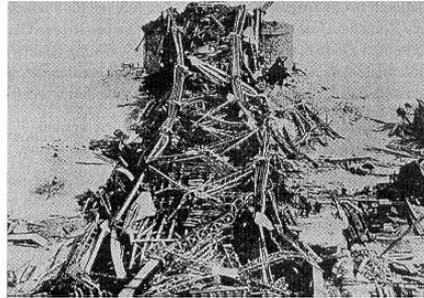


Abbildung 11  
Einsturz Quebec-Brücke

## 5 Antworten auf die gestellten Fragen

### 5.1 Wer ist Richter über die Adäquatheit der Modelle?

Technische Modelle unterliegen einem harten Realitätstest. Das Laborexperiment liefert eigentlich nur die Parameter der Modelle. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen die Quebec-Brücke 1907 vor und nach dem Einsturz. Die Modelle des Ausknickens von Druckstäben waren noch nicht hinreichend entwickelt. Einstürze in Bauzuständen sind häufiger als in Endzuständen. Wenn der Realitätstest der Scharfrichter über Modelle ist, dann wäre dies William James Theorem „What works is correct.“ „True“ sagte er nicht.

Doch leider ist dies nicht so einfach: Für die Modelle hypothetischer Katastrophenfälle wollen wir auf keinen Fall Realitätstests erfahren (z. B. Flugzeugabsturz auf Kernkraftwerk). Hierfür bleiben nur Plausibilität und logische Konsistenz als „Richter“, weil wir in Unerfahrenes hinaus extrapolieren. Man kann auch in der Technik sehr wohl mit falschen Modellen richtige Ergebnisse erzielen, wenn man sie nur gut genug an Meßdaten kalibriert. Je ärmer an Erfahrung, desto reicher an Irrtümern beim Modell.

Die meisten Schadensfälle sind durch menschliches Versagen oder durch in den Modellen nicht erfaßte Einflüsse verursacht. Also suchen Ingenieure verzweifelt nach Modellen, mit denen sie das finden, was man später als 'vergessen' erkennt. Abbildung 12 zeigt den Bau der Hängebrücke in Osaka.



Abbildung 12  
Osaka-Brücke

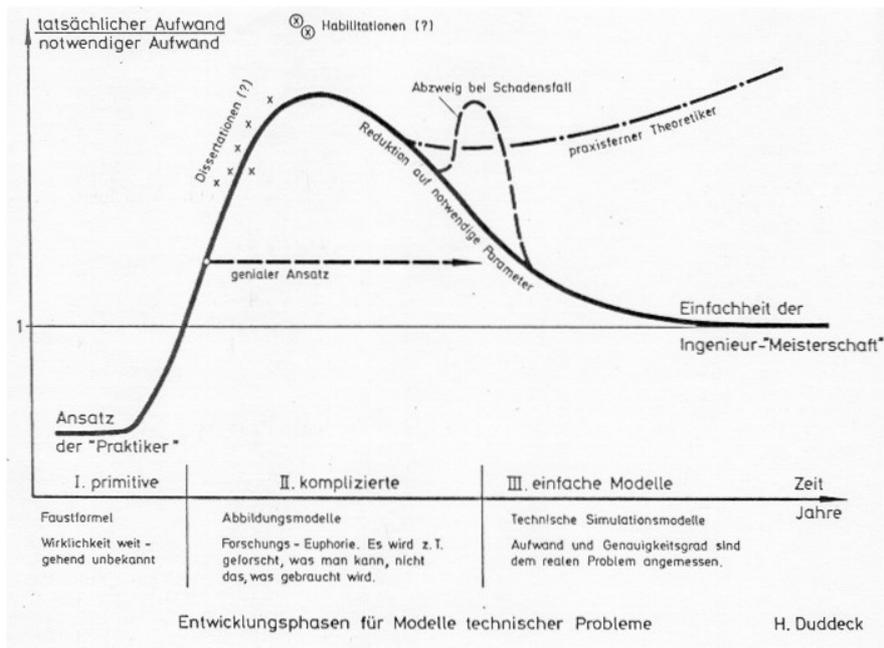


Abbildung 13  
Entwicklungskurve

## 5.2 Zur Entwicklung technischer Modelle

Die Entwicklung technischer Modelle läßt sich am besten mit der Aufwandskurve (Abb. 13) über den Zeitraum von zum Beispiel 30 Jahren erklären. Die Horizontale „1“ kennzeichnet die Meisterschaft: Der Aufwand an Modellkomplexität, an Intelligenz, Arbeit, Geld, Computerzeit entspricht genau dem für das Projekt erforderlichen Aufwand. Modellentwicklungen für zum Beispiel einen Roboter, eine Brücke, Anwendungen der Lasertechnik, Verfahrenstechnik der Müllverbrennung, vielleicht sogar für eine Nierentransplantation, beginnen mit einer primitiven Phase, in der das Werk gelingt, obwohl man nicht genau weiß warum. Wenn die Forschung das Problem entdeckt, steigt der Aufwand steil an: Es herrscht eine Euphorie des Forschens und Erklärens. Da wird oft auch erforscht, was man zufällig kann, nicht, was man braucht. Doktoranden beherrschen noch nicht die Kunst des richtigen Weglassens. Die Wissenschaften müssen jedoch dazu beitragen, daß die Modelle auch in die Meisterschaft abschwingen. Dies ist die Phase der Entwicklung hinreichender technischer Modelle. Tritt ein Schadensfall ein (z. B. beim Brückeneinsturz), gibt es Millionen an Forschungsgeldern. Ausnahme-Begabungen ge-

lingt ein genialer Ansatz. Freilich weiß man erst sehr viel später, daß dieser genial war. Da gibt es aber auch die unbeirrten praxisfernen Theoretiker, die noch dann an Verfeinerungen des Modells arbeiten, wenn dies niemand braucht, weil Meister-Ingenieure das Problem längst auf ein Modell reduziert haben, das einfach und zugleich korrekt ist.

### 5.3 Ist ein Modell „wissenschaftliche Wahrheit“?

Technische Modelle sind nicht auf Welterklärung aus, sondern auf In-die-Welt-Bringen. Sie sind „wahr“, oder besser „richtig“, wenn sie zu Artefakten führen, die alle Erwartungen erfüllen.

### 5.4 Werden Modelle durch ihre Erfinder geprägt?

Der starke Realitätsbezug vereinheitlicht Modelle international: Tunnel werden in Japan genauso berechnet wie in Europa. Doch beim Methodischen gibt es auch in der Technik die von Thomas Kuhn aufgedeckte Bindung an zeitliche Paradigmen. „Wer einen Hammer hat, sieht überall Nägel“, sagt Neil Postman bei einem Vortrag in der Technischen Universität Braunschweig im Jahre 1995. Wer finite Elemente beherrscht, berechnet auch Herzklappenflattern mit finiten Elementen und den erlernten Modellen. Vielleicht kann man dies als eine gewisse Fesselung ansehen. „Etablierte“ Modelle verführen Ingenieure, sie für die Wirklichkeit zu halten. Ihre blinde Anwendung (das Rechnen) läßt das Denken verkümmern. Und wenn Architekten auch zu den Ingenieuren zählen: Sie leiden eher an der Fesselung durch den jeweiligen modischen Zeitgeist. Doch das ist eher Baukultur und Mode, nicht Modell.

## 6 Schluß

Das Erfinden und das Entwickeln von geeigneten Modellen – oft für sehr spezielle Einzelprobleme – sind wesentliche Aufgaben der Technikwissenschaften. Daher träumen wir Ingenieure davon, daß die Informatik uns alle Mühen des Berechnens abnimmt, damit Ingenieure endlich das tun, was ihre eigentliche Aufgabe ist: das Hans Blumenbergsche „authentisch Neue im Spielraum des Unverwirklichten“<sup>2</sup> zu erfinden. Und die Modelle dazu, die sichern, daß das Neue nicht nur richtig, sondern vielleicht sogar gut ist, also Modelle für Werteprobleme. Doch wahrscheinlich träumen wir davon noch in 100 Jahren.

---

<sup>2</sup> Blumenberg, ebenda, S. 83.

### *Bildnachweis*

Abb. 1: Heinke, E. & F. Leonhardt: Türme aller Zeiten aller Kulturen, DVA 1988.

Abb. 2, 3, 12: Structural Engineering International, IABSE, Zürich.

Abb. 5, 6: GSF – Jahresberichte, Institut für Tieflagerung.

Abb. 9: Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig.

Abb. 10, 11: Tarkow, J.: A disaster in the making, 1986.