

Peter Költzsch

*Zum Problem der Modelle aus der Sicht der Technikwissenschaften **

Im folgenden sollen aus dem Bereich der Technikwissenschaften Antworten zu den Quæstiones disputatae (vgl. Rundbrief, S. 9ff.) gegeben werden, und zwar insbesondere zu:

Sind es Vorstellungen und Bestandteile unserer Lebenswelt, die wir zur Modellbildung verwenden? Wer ist der Richter darüber, daß ein Modell sich dem Ziel der Erkenntnis „angenähert“ hat? Ist ein überprüftes, adäquates Modell die „wissenschaftliche Wahrheit“ und damit das Produkt und Ziel der Wissenschaft? Was macht die Wissenschaft mit den Modellen?

In den Technikwissenschaften werden Modelle weitestgehend aus der realen „Lebenswelt“ abgeleitet. Wir unterscheiden dabei im wesentlichen folgende Modelltypen:

- Physikalisch ähnliche Modelle
- Physikalisch analoge Modelle
- Funktionsmodelle
- Computermodelle

1 Physikalisch ähnliche Modelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein gegenständliches Modell in derselben physikalischen Grundqualität abgeleitet, zum Beispiel ein Innenraummodell der historischen Semperoper Dresden für akustische Messungen im Modellmaßstab (siehe Abb. 1).

Als weitere Beispiele aus der akustischen Praxis der letzten Jahre lassen sich die Modelle eines Konzertsaaes, eines Schalldämpfers für ein Gasturbinenkraftwerk, eines Hubschraubers bzw. eines Flugzeuges und dessen Komponenten (z. B. Tragflügel) sowie das Modell eines Tunnels mit Kraftfahrzeugverkehr anführen.

* Der vorliegende Beitrag beruht auf einem Vortrag, der im Februar 2003 in der Sitzung der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse gehalten wurde. Er war nicht Gegenstand des Streitgespräches. Er wurde zusätzlich in die Dokumentation aufgenommen.



Abbildung 1
Raumakustisches Modell der historischen Semperoper (Maßstab 1:20)

Folgende Merkmale charakterisieren diese physikalisch ähnlichen Modelle: Es handelt sich nicht (nur) um Strukturmodelle und um Modelle, die in Ausnahmefällen zu ästhetischen Beurteilungen genutzt werden, sondern vor allem um operationelle Modelle, an denen „gearbeitet“ wird. Sie dienen zum Experimentieren, zur Untersuchung des Funktionsablaufes, zur exakten Messung und zur experimentellen Optimierung. Diese Modelle sind von gleicher physikalischer Grundqualität wie das Original. Es werden dabei nicht nur Geometrien modelliert (im allgemeinen: Verkleinerung), sondern auch Zeiten, Frequenzen, Strömungsgeschwindigkeiten, Fluideigenschaften, Werkstoffgrößen, Temperaturen und anderes mehr. Die Modelle unterliegen Zwangsbedingungen für ihre geometrische und physikalische Gestaltung, das heißt, die sogenannten Ähnlichkeitskennzahlen π müssen im Original und im Modell denselben Zahlenwert besitzen ($\pi = \text{idem}$). In der Praxis kann meist nur partielle Ähnlichkeit realisiert werden. Die Ergebnisse der im Modell durchgeführten Experimente werden mit Hilfe der Ähnlichkeitskennzahlen ($\pi = \text{idem}$) auf die Funktionsgrößen umgerechnet, die für das fiktive Original erwartet werden können.

2 Physikalisch analoge Modelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein gegenständliches oder ideelles Modell in einer anderen physikalischen Grundqualität abgeleitet, das heißt, es findet ein Wechsel der physikalischen Ebene statt. Als Beispiel sei die Analogie zwischen einem akustischen, einem mechanischen und einem elektrischen Netzwerk genannt (siehe Abb. 2).

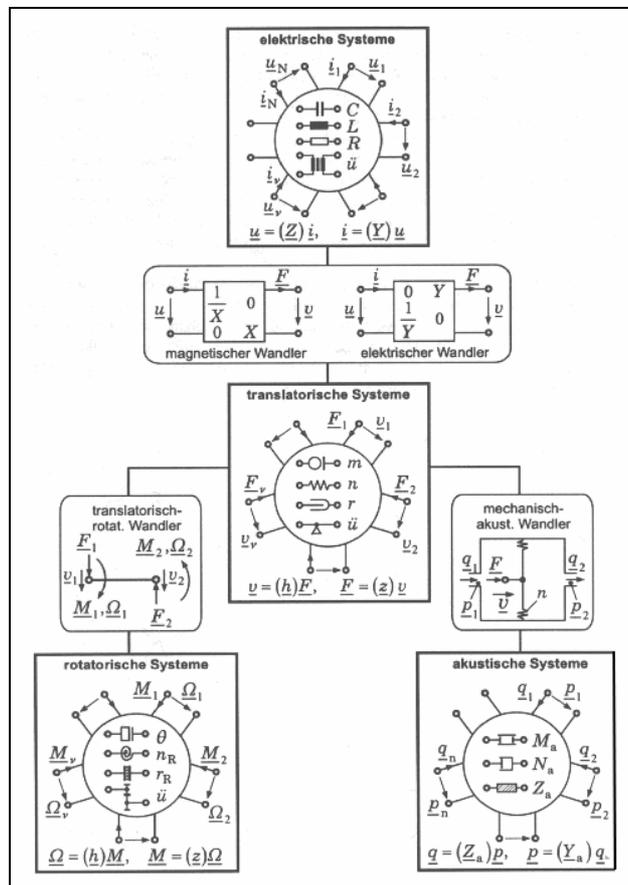


Abbildung 2
Analoge Netzwerkstrukturierung linearer dynamischer Systeme (nach Lenk)

Aus dem Bereich der Strömungsmechanik und der Akustik können weitere Beispiele angeführt werden: Die Analogie zwischen dem Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch in der Strömungsmechanik bzw. Verfahrenstechnik, die Analogie zwischen der dreidimensionalen Schallausbreitung in Fluiden und den zweidimensionalen Oberflächenwellen im Flachwasserbecken (aktuelle Nutzung z. B. bei der physikalischen Erklärung der Schallerzeugung von Hubschrauberrotoren) sowie die sogenannte Seifenhautanalogie, die die Höhenkoordinate einer gespannten Seifenhaut und die Stromfunktion einer ebenen, hydrodynamischen Potentialströmung in ein analoges Verhältnis setzt.

Diese physikalisch analogen Modelle werden durch folgende Merkmale charakterisiert: Auch hier handelt es sich um strukturelle und operationelle Modelle. Sie sind jedoch im Gegensatz zu den physikalisch ähnlichen Modellen von unterschiedlicher physikalischer Grundqualität. Allerdings besitzen sie – und das begründet ihre analoge Betrachtungsweise – die gleiche Struktur in den beschreibenden Differentialgleichungen und in den Randbedingungen. Sie kombinieren damit Erkenntnisgebiete aus grundverschiedenen Bereichen der Physik: Zum Beispiel verbinden sie bei Betrachtung eines Resonators die Grundgrößen der Elektrotechnik mit den Grundgrößen mechanischer Wellenleiter und den Grundgrößen eines Schallfeldes.

Die Modelle unterliegen Zwangsbedingungen für ihre geometrische und physikalische Gestaltung (Analogiebeziehungen). Die analogen Modelle können als gegenständliche Modelle, als fiktive Netzwerkmodelle oder als Computermodelle realisiert werden.

Das Arbeiten mit dem analogen Modell bedeutet seine Auslegung, die Durchführung von Experimenten am Modell (gegenständlich oder fiktiv) sowie die Rückübertragung der „Betriebsergebnisse“ vom Modell auf das zu gestaltende, fiktive Original.

3 Funktionsmodelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird ein Funktionsmodell geschaffen, das „lediglich“ den in der betreffenden Struktur stattfindenden Vorgang modelliert, zum Beispiel die Modellierung der Raumakustik eines Konzertsaaes durch ein synthetisches Schallfeld im schalltoten Raum (siehe Abb. 3).

Folgende Merkmale kennzeichnen die Funktionsmodelle: Aus der Realität wird nur der Vorgang an sich modelliert, nicht aber die tatsächliche Struktur. Damit kann einseitig die Funktion des Vorganges optimiert werden. Es erweist sich aber für die Praxis als unabdingbar, Funktion und Struktur für eine Optimierung des realen Vorganges letztendlich gemeinsam zu betrachten.



Abbildung 3

Großer schallreflexionsarmer Raum mit synthetischem Schallfeld, hier mit einem Versuchsaufbau zur subjektiven Ermittlung der scheinbaren Quellbreite (nach Blau)

4 Computermodelle

Vom gegenständlichen bzw. ideellen, fiktiven Original (Wirklichkeit) wird für einen Wirklichkeitsausschnitt ein abstraktes physikalisches Modell geschaffen, zu dessen Beschreibung eine mathematische Abbildung (mathematisches Modell) dient. So führt zum Beispiel das physikalische Modell eines realen Strömungsvorganges bei bestimmten Voraussetzungen zur mathematischen Abbildung in Form der Navier-Stokes-Gleichungen, die das physikalisch modellierte Strömungsfeld beschreiben.

Die mathematische Abbildung stellt also das Raum-Zeit-Verhalten der relevanten physikalischen Größen unter bestimmten Anfangs- und Randbedingungen dar.

Die mathematischen Gleichungen werden gelöst, die Ergebnisse werden mit Meßwerten validiert. Damit wird auch die gewählte physikalische/mathematische Modellbildung bewertet.

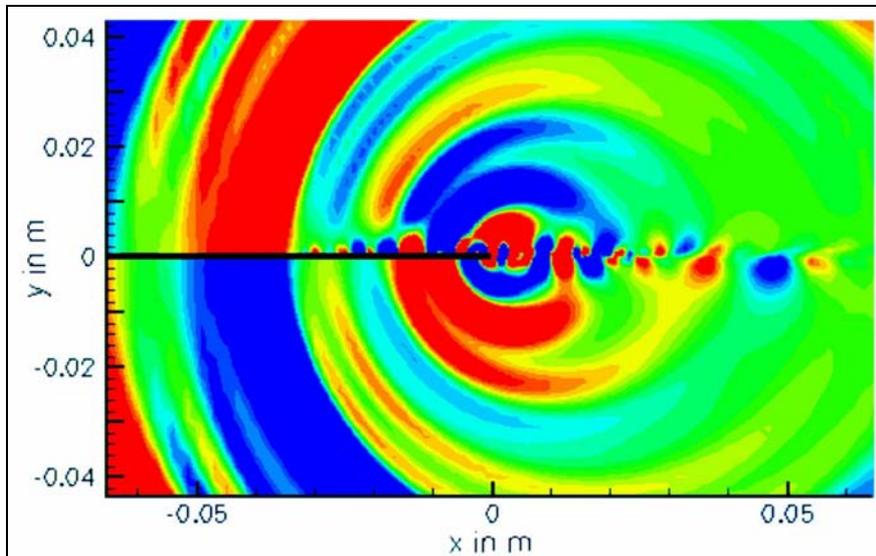


Abbildung 4
 Computersimulation der Schallerzeugung an der Hinterkante
 einer von links überströmten Platte (nach Bauer)

Charakterisiert werden diese Computermodelle durch folgende Eigenschaften: Es sind physikalisch-mathematische Abbildungen der Wirklichkeit, die durch Differentialgleichungen beschrieben werden. Die numerischen Simulationen am Computermodell schaffen damit virtuelle Realisationen der Wirklichkeit in der Form der Modellnachbildung. Die mit Hilfe der modernen Computertechnik möglichen Visualisierungen führen scheinbare Abläufe des wirklichen Geschehens vor. Die damit verbundene Bildhaftigkeit des Modellvorganges bewirkt stark faszinierende, aber eben pseudoreale Darstellungen der tatsächlichen physikalischen Vorgänge (siehe Abb. 4).

Die ständig anwachsenden Leistungen der Computer, insbesondere hinsichtlich Rechengeschwindigkeit und Speichervermögen, führen dazu, daß die Abstraktionen der Modelle immer wirklichkeitsnäher gestaltet werden können.

Allerdings gibt es gegenwärtig (mindestens) zwei Nachteile der Computermodelle bzw. -simulationen: einerseits die Verführung, hinter den Visualisierungen der Modellergebnisse die Wirklichkeit zu sehen. Dabei handelt es sich jedoch um eine Täuschung, der der Laie, die Öffentlichkeit und der Außenstehende erliegen. Andererseits gibt es Schwierigkeiten, die durch die Computermodelle und die numerischen Lösungen der Differentialgleichun-

gen selbst erzeugt werden, zum Beispiel Raum-Zeit-Diskretisierung, Stabilitätsprobleme, Einfluß leicht variierender Anfangsbedingungen, nichtphysikalische Wirkung der Ränder, Dämpfungen, Genauigkeit der Berechnung und anderes mehr. So führen beispielsweise die Ungenauigkeiten im strömungsmechanischen Computermodell der numerischen Aeroakustik zu verfahrensbedingten, scheinbaren Schallquellen, das heißt, es wird „numerisch“ Lärm erzeugt. Das numerische Verfahren erzeugt künstlichen Lärm, das Computermodell wird zur Schallquelle und schafft damit neue Wirklichkeiten!

5 Beispiel: Modellierungen in der Raumakustik

Am Beispiel der Raumakustik für einen Konzertsaal soll gezeigt werden, daß zu einem Problem der Wirklichkeit mehrere, sehr verschiedenartige Modellvarianten existieren, daß die Wege der Modellierung also vielfältig sein können. Alle Modelle dienen jedoch einem Zweck, nämlich der Gestaltung der sogenannten „guten Akustik“ des Konzertsales.

Experimentelle raumakustische Modellmeßtechnik mit physikalisch ähnlichen Modellen:

- Helmholtz-Zahl $He = idem$
- Verkleinerung der Geometrie des Raumes und der Schallwellenlängen, das heißt reziproke Frequenztransformation zum geometrischen Verkleinerungsmaßstab
- üblicher Maßstab: 1:20
- Impulsmeßmethode
- Akustische Modellierung der Reflexion/Absorption an den Raumboflächen
- Schallquellen: Knallfunkensender mit wählbaren Abstrahlcharakteristiken
- Empfänger: Modellkunstkopf, mit zwei Schalldruckempfängern
- Aufnahme von Raumimpulsantworten
- Berechnung der gewünschten raumakustischen Kriterien (z. B. Nachhallzeit, Deutlichkeitsmaß u. a.)
- Möglichkeit der Auralisation („Hineinhören“ in das Modell)
- Modell und Versuche: sehr teuer, zeitaufwändig
- Vorteile: Anschaulichkeit des Modells, wodurch die Zusammenarbeit der Akustiker mit dem visuell orientierten Architekten verbessert wird
- Optimierung von Details, zum Beispiel Neigung von Wand- und Deckenabschnitten, Oberflächengestaltung
- Physikalisch exakte Nachbildung von Beugungs- und Streuvorgängen (Problemfälle der Computersimulation)

Experimentelle raumakustische Modellmeßtechnik mit physikalisch analogen Modellen:

- Wasserwellenmodelle: (siehe z. B. bei Cremer),
- Grundlage: Analogie zwischen den Oberflächenwellen im Flachwasser und der Schallausbreitung in Luft
- Beobachtung in der Schnittebene des Raumes (zweidimensional)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wasserwellen: (20...30) cm/s, zeitlicher Ablauf kann mit dem Auge verfolgt werden
- Günstigste Wasserhöhe: (7...8) mm
- Aufnahme der Wellenbilder von den Reflexionen in zeitlich versetzten Augenblicken ergibt einen groben Überblick über die Wellenfronten

Computersimulation mit dreidimensionalen (digitalisierten) Raummodellen

- Geometrische Raumakustik
- Spiegelquellenmethode, Strahlverfolgungsverfahren (ray tracing), Schallteilchensimulationsverfahren (Monte Carlo)

Ziele:

- Raumimpulsantwort
- Auralisation: Hörbarmachung des Schallfeldes am Ort des Zuhörers im virtuellen Raum, erfolgt mit Raumimpulsantworten, mit „trocken“ (echofrei) aufgenommenen Schallsignalen (z. B. Musik) sowie mit Ohrübertragungsfunktionen, ermöglicht das „Hineinhören“ in fiktive Räume (nur im Rechner existent)

Synthetisches Schallfeld als elektroakustisch produziertes Funktionsmodell (Modellschallfeld) des Raumes

- Nachbildung natürlicher Schallfelder mit elektroakustischen Anlagen im reflexionsarmen (schalltoten) Raum (z. B. „Klonen“ der Semper-Oper nach Kraak)
- Erzeugung eines synthetischen Schallfeldes mit Hilfe von Lautsprechern

Vorteil:

- Systematische Änderungen einzelner Schallfeldkomponenten
- subjektive Beurteilung des Einflusses dieser Änderungen auf die raumakustische Qualität

Zusammenfassung

Modelle in den Technikwissenschaften werden im allgemeinen aus der Wirklichkeit abgeleitet. Sie gehören sowohl zur Kategorie „Modell von etwas“ (Pinkau: Modell als vereinfachter Vertreter der Außenwelt) als auch zur Kategorie „Modell für etwas“ (Pinkau: Modelle als Hilfsmittel auf dem Weg zur Wirklichkeit).

Modelle in den Technikwissenschaften sind, auch wenn es sich häufig – wie in der Architektur und im Bauwesen – um gegenständliche Modelle handelt, immer operationelle Modelle, das heißt, an ihnen wird experimentiert, simuliert, gemessen. Es gibt in den Technikwissenschaften sogar reine Funktionsmodelle, die von der Struktur der Wirklichkeit entkleidet sind.

Modelle in den Technikwissenschaften unterliegen starken Zwangsbedingungen. Betroffen sind davon die Abbildung der Wirklichkeit in das Modell, die Prozeßbedingungen und der Prozeßablauf, die Computersimulationen und auch die experimentelle Nachprüfung. Das drückt sich sowohl in den Bedingungen der physikalischen Ähnlichkeit ($\pi = \text{idem}$) aus als auch in den analogen Beziehungen bzw. der mathematischen Abbildung (z. B. Differentialgleichungen) für die physikalische Modellierung. Dabei verfügt die subjektive Gestaltung nur über geringe Einflußmöglichkeiten, so zum Beispiel bei der pragmatischen Entscheidung für eine partielle Ähnlichkeit gegenüber einer nur theoretisch möglichen, vollständigen physikalischen Ähnlichkeit. Offensichtlich ist aber diese subjektunabhängige Stringenz der Modellbildung der „Preis“ (der gern gezahlt wird!) für die „sehr genauen“ Lösungen der Probleme der Wirklichkeit mit Hilfe der Modellbildung in den Technikwissenschaften.

Als „Richter“ darüber, inwieweit sich ein Modell weiterentwickelt und dabei dem Ziel der Erkenntnis angenähert hat, also die Wirklichkeit nachbildet, entscheidet in den Technikwissenschaften einzig und allein das Experiment, das heißt die meßtechnische Nachprüfung am Original (Wirklichkeit).

Es gibt zahlreiche, grundsätzlich unterschiedliche Möglichkeiten der Modellbildung. Selbst bei einem Problem ist es meist zweckmäßig, verschiedenartige Möglichkeiten der Modellbildung zu realisieren und die dabei gewonnenen Erkenntnisse zur optimalen Gestaltung des Gegenstandes oder Prozesses zu kumulieren (siehe obengenanntes Beispiel der „guten Akustik“ eines Konzertsaaes).

In den Technikwissenschaften schaffen die verschiedenartigen Modellbildungen häufig neue Wirklichkeiten, die als Hindernisse oder auch als Vorteile beim Erkenntnisprozeß auftreten können.