

# Bauphysik – Wohin? Gedanken jenseits des Mainstreams

Bruno Keller

## 1 Einführung: Weshalb „wohin“?

Wenn man sich Gedanken über die Zukunft eines Wissensgebietes machen will, so kann es von Nutzen sein, sich zuerst mit seiner Entstehung zu befassen.

Die Revolution der Architektur der Moderne hat in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit ihrem Primat der Form zu einer radikalen Abkehr von traditionellem, historisch gewachsenem Wissen geführt. Zusammen mit der Verwendung neuer noch wenig beherrschter Materialien wie Beton, Stahl, Glas kam es in der Folge zu einer Anhäufung von Bauschäden. Diese zu beheben und in Zukunft zu vermeiden verlangte die eingehende Befassung mit den physikalischen Zusammenhängen an einem Bau. So waren die ersten so genannten „Bauphysiker“ eigentliche Schadenexperten. Mit der Zeit wurde so aus einem impliziten, exemplarischen Wissen aller Beteiligten eine explizite, strukturierte Wissenschaft, die Bauphysik. Nach *Weingärtner* (Wissenschaftstheorie) wird ein Wissensgebiet dann zu einer Wissenschaft, wenn dafür an einer Universität ein Lehrstuhl besteht. Damit ist die Bauphysik in den europäischen Staaten aber noch nicht in den USA u. a. O. zur Wissenschaft geworden.

Ging es anfänglich um die Schadensvermeidung und -behebung so kam in den 1980er Jahren als Folge der Energiekrisen der 1970er das Bedürfnis nach Gebäuden mit einem geringen Energiebedarf dazu – eine weitere Verschärfung der Anforderungen – und heute sind wir dazu mit den Grenzen der Belastbarkeit der Umwelt konfrontiert und versuchen auch den Materialaufwand und seine Wiederverwertung zu verbessern (Bild 1). Parallel dazu haben sich die Ansprüche an den Lärmschutz wegen des rasch wachsenden Verkehrsvolumens massiv erhöht.

Die Bauphysik befasst sich mit allen materiellen und energetischen Wechselwirkungen des Bauwerkes mit seiner inneren – Komfort, Bewohner – und äußeren Umgebung – Klima. Sie befasst sich also mit allen Aspekten der Dauerhaftigkeit, der Behaglichkeit und des Energieverbrauchs von Bauten.

Damit sieht man die Bauphysik nicht einfach als reine Wissenschaft, sondern auch als ein gesellschaftlich relevantes Gebiet an, ist doch das Bauwesen und damit der Gebäudepark der größte Materialbeweger und Energieverbraucher in einem Land und stellt einen erheblichen Bestandteil des Volksvermögens dar.

Begleitend zur Entwicklung und im Bewusstsein um die gesellschaftliche Relevanz muss man sich deshalb gewisse Eigenschaften des Bauwesens, also des Feldes in dem sich die Bauphysik bewegt, bewusst sein:

1. Das Bauwesen befasst sich mit großen Materialmengen. Man hat es sehr bald mit vielen Tonnen und vielen Quadratmetern zu tun. Verbunden damit sind relativ niedrige spezifische Kosten. Teure Hightech-Produkte haben damit von vornherein wenige Chancen.
2. Es besteht ein ausgesprochener Hang zur Exemplarität: Jeder Bau ist etwas spezielles, was dazu führt, dass jedes Mal „das Rad neu erfunden“ wird. Das Abstraktionsvermögen der Hauptbeteiligten ist sehr beschränkt. Noch so fundierte theoretische Erkenntnisse finden deshalb nur sehr langsam Eingang.
3. Veränderungen am Bau gehen sehr langsam vor sich. So verändern die meisten Industriestaaten ihren Gebäudepark nur um ca. 1,5 bis 2 % pro Jahr und dies obwohl oder gerade weil das Bauwesen ca. 8 bis 11 % des BIP ausmacht.
4. Nach einer europäischen Untersuchung haben mehr als 90 % aller Unternehmen im Bauwesen weniger als 10 Angestellte und damit nur wenig Reserven für deren Weiterbildung.

Man kann sich deshalb fragen, was eine Wissenschaft in dieser Umgebung soll und wie und wo sie etwas beitragen kann.

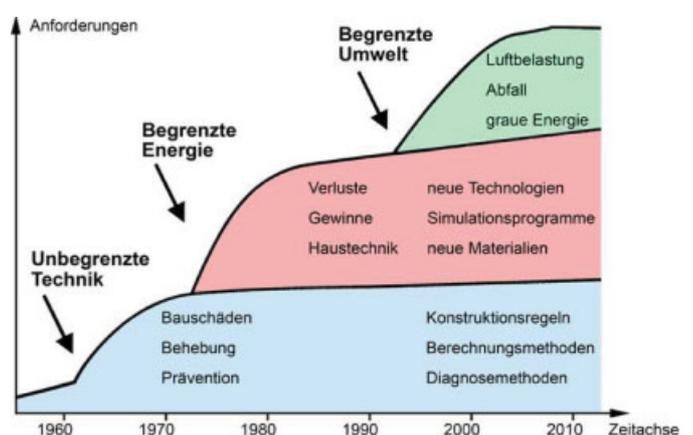


Bild 1. Die Entwicklung der Anforderungen an Bauten und ihre Folgen

## 2 Wo sind wir und was können wir tun?

Man kann heute mit gutem Gewissen sagen, dass die Bauphysik von der Zeit der Schadensprävention bis heute große Fortschritte gemacht hat. Eigentlich wären fast alle Grundlagen vorhanden um schadensfreie Bauten mit sehr geringem Energiebedarf, großer Lebensdauer und weitgehender Wiederverwertbarkeit zu realisieren.

Man kann heute den Feuchte- und Wärmetransport durch Materialien, Luftströmungen, die Schallausbreitung, die Tageslichtverteilung und sogar die Brandentwicklung und Ausbreitung sehr weitgehend berechnen und simulieren.

Manchmal hat man Probleme mit der Menge der dabei benötigten Parameter und damit der Übersicht oder mit der Beschaffung der nötigen Materialwerte.

Trotzdem versuchen verschiedene Kollegen, mehr und mehr Simulationsprogramme – thermische Raumsimulation + CFD + Feuchte + Schall (?) – zusammen zu fügen und damit ein Gebäude „total“ zu simulieren.

Was erreicht man damit? Für die Schadensanalyse bei bestehenden Bauten, wo also alle relevanten Parameter bekannt sind, können solche Programme quasi post festum nützliche Dienste leisten. Für konzeptionelle Planungsaufgaben erweist sich aber gerade die Vielzahl der Parameter als ein Problem: Der Resultatraum weist genau so viele Dimensionen auf, wie als Parameter in das Programm eingehen. Der menschliche Geist übersieht aber höchstens drei Dimensionen und ist so mit dieser Viel-Dimensionalität vollständig überfordert. Selbst wenn man ein vermeintliches Minimum, z. B. für den Energiebedarf gefunden zu haben meint, ist es noch völlig offen, ob dies ein relatives oder ein absolutes Minimum darstellt und „wo“ man sich damit im Resultatraum befindet. Diese Problematik zusammen mit dem Faktum dass in Planungsprozessen meist viele der benötigten Parameter noch nicht festgelegt sind, verlangt bei allen beteiligten Teilgebieten vielmehr eine Reduktion der Komplexität auf die allerwesentlichsten 2 bis 3 Parameter, ganz nach der 20/80-Regel, wonach 80 % der Folgen auf 20 % der Ursachen beruhen und diese 20 % gilt es herauszufinden und übersichtlich darzustellen. Es gilt quasi eine Problemstellung nach Parametern mit sinkender Relevanz und steigender Komplexität zu entwickeln und von so einer „Taylor-Reihe“ nur die ersten zwei Glieder mitzunehmen. Um das zu entwickeln ist menschliche Intelligenz und damit Abstraktionsvermögen erforderlich und die kann nicht durch den fleissigen Idioten namens Computer ersetzt werden.

Die thermische Optimierung konnte so z. B. auf nur drei relevante Parameter eines Raumes reduziert und damit übersichtlich gestaltet werden:  $K$ ,  $\gamma$  und  $\tau$  (Bild 2). Ähnliches kann man beim Tageslicht tun und müsste man im Bereich Feuchte tun.

Im Bereich des Feuchtetransports und der Feuchtespeicherung hat man die Mittel der Thermodynamik, d. h. der Phänomenologie weitgehend und mit Erfolg ausgereizt. Auch der kombinierte Wasser und Salztransport verzeichnet Fortschritte. Allerdings ist eine Komplexitätsreduktion in der oben skizzierten Form noch nicht erfolgt. Die Problematik besteht noch in der nicht sehr einfachen messtechnischen Bestimmung der wesentlichen Parameter der Materialien und was noch vollständig fehlt, ist eine



Bild 2. Die Nullenergiestunden (ZEH) eines Raumes als Optimierungsgröße in Funktion des Gewinn-zu-Verlustfaktors  $\gamma$  für verschiedene Werte der Zeitkonstanten  $\tau$ : 50 h, 100 h, 200 h und 400 h, je ohne, mit innerem (SS 2) und äußerem (SS 5) Sonnenschutz

Rückführung auf die molekulare Struktur der Materie. So wie die statistische Mechanik und die Thermodynamik für große Teilchenzahlen ineinander übergehen, so müssten die makroskopischen Parameter für den Feuchtetransport aus der molekularen Struktur der Stoffe abgeleitet werden können. Damit würde sich das Tor zu einem wissenschaftlich fundierten „Material-Design“ öffnen, d. h. die Erzeugung von Materialien mit gewünschten Eigenschaften.

Europäische Projekte wie NANOCEM versuchen dies zurzeit für Zement zu leisten, stehen aber noch ganz am Anfang und leider ist kein einziger Vertreter aus der Bauphysik daran beteiligt. Erste Ansätze mit selbstähnlichen Strukturen (Bild 3) und mit Methoden molekularer Auflösung: Rasterkraftmikroskopie (Bild 4) sind versucht worden, erfordern aber noch eine Ergänzung durch weitere Methoden wie NMR, Gamma-Streuung etc.

Man kann sich generell fragen, was für das Bauen, sein Verständnis und seine Auswirkungen nützlicher sein kann, einerseits die bestehenden und in großen Mengen verwendeten Materialien wie Beton, Ziegelstein, Holz etc. im obigen Sinne tiefer zu verstehen und damit effizienter und gezielter zu produzieren oder andererseits die Schaffung neuer Super-High-tech Materialien. Ersteres ist rela-

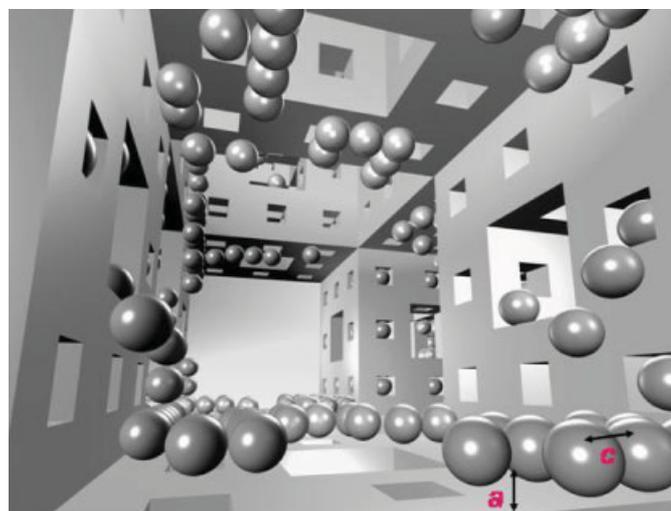


Bild 3. Modell der Wasserabsorption in einer selbstähnlichen Struktur (sog. Prä-Fraktal)

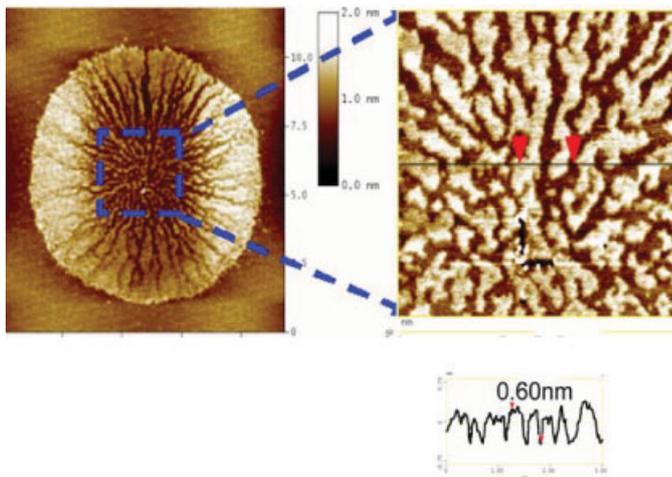


Bild 4. Molekularer Wasserfilm der Dicke von zwei Wassermolekülen auf Glimmer, abgebildet mit einem Rasterkraftmikroskop



Bild 5. Das erste (kommerzielle) „3-l“-Gebäude ( $E_w = 27 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ ) Europas in Genf, in Betrieb seit 1985

tiv mühsam und letzteres weist einen großen „Sexappeal“ auf. Die meisten der in letzter Zeit neu geschaffenen Materialien wie

- Aerogele, also nano-poröse Materialien als transparente Dämm-Materialien;
- Phasenwechselmaterialien (PCM), sie gestatten im Komfortbereich mehr Wärme zu speichern;
- Vakuumisolierpaneele (VIP), sie gestatten Wärmedämmung auf kleinstem Raum;
- spektral selektive Beschichtungen, sie gestatten eine bessere Ausnützung der Einstrahlung;
- elektrochrome Schichten, sie versprechen einen eleganten regelbaren, variablen Sonnenschutz;
- Materialien mit steuerbarem Schwingungs- und insbesondere Dämpfungsverhalten,

haben sich bis heute infolge hoher Herstellkosten und z. T. fraglicher Langzeitstabilität nur verschwindend kleine Marktanteile erobern können. Für die Lösung spezieller Problemstellungen am Bau können sie einen Beitrag leisten. Energetisch das größte Potential hätten elektrochrome Schichten auf anorganischer, also nicht LCD Basis, welche aber leider trotz ca. 20 Jahren Entwicklungszeit bis heute nicht zu vernünftigen Preisen und mit einer genügend großen Regeldynamik verfügbar sind. Alle anderen steuern etwas bei zu energetisch effizienteren Bauten und etwas größerer architektonischer Gestaltungsfreiheit bei deren Entwurf bei, eröffnen aber keine gänzlich neuen Perspektiven.

Heute weiß man, wie man Bauten mit sehr hoher Behaglichkeit, sehr geringem Energiebedarf, nicht wesentlich erhöhten Kosten und trotzdem großer architektonischer Gestaltungsfreiheit errichten kann (Bild 5). Mehrere Tausend solcher Bauten belegen dies allein schon in der Schweiz. Es sind keine besonderen und aufwendigen speziellen Einrichtungen und Materialien dazu notwendig (Bild 6).

Obwohl man eigentlich weiß, wie solche Bauten funktionieren, werden aber weltweit immer noch Dutzende von Bauten mit Sensoren ausgerüstet und über Jahre ausgemessen und die Daten in Zahlenfriedhöfen deponiert.



Bild 6. Erstes kommerzielles Gebäude mit Quellaftung und TAB (Strahlungsheizung und -kühlung) der Schweiz (und Europas?), thermischer Energiebedarf  $< 34 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ , in Betrieb seit 1991

Solche Niedrigenergiebauten zeigen, dass Gebäude und Haustechnik in zunehmendem Maße eine Synthese eingehen, bei der das Gebäude und seine Bauart die Randbedingungen stellen und die Haustechnik nur noch eine ergänzende und stark angepasste Rolle spielt. Sehr geringe Temperaturunterschiede zur Umgebung und zwischen den Systemen führen auch automatisch zu exergetisch guten Ansätzen, so dass kein großer Bedarf mehr für eine spezielle exergetische Optimierung verbleibt, es sei denn für die Wahl der Quellen und der Transformationssysteme, wie Wärmepumpen etc.

Der Weg zu solchen Bauten (Bild 7) ist allerdings von vielen „Leichen“, sog. „Trends“ gepflastert:

- Wintergärten und Atrien von denen man heute weiß, dass sie zwar eine erhöhte Lust für den Nutzer ermöglichen, aber zum Energiehaushalt nur wenig beitragen, wenn nicht sogar kontraproduktiv wirken;
- Tageslichtumlenk-„Akrobatik“, wobei man lange gebraucht hat um zu merken, dass das maximale Einsparpotential mit 6 bis  $12 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  gering ist im Vergleich zu einer effizienten Beleuchtung, und zudem Tageslicht-

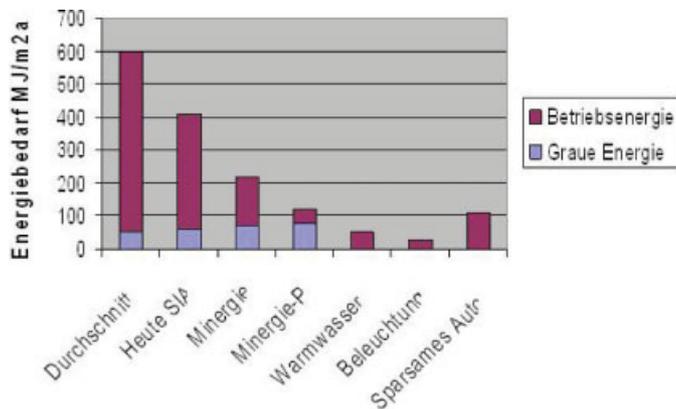


Bild 7. Die Entwicklung des thermischen Gebäudeenergiebedarfs in der Schweiz

- quantität allein ohne visuelle Verbindung zur Außenwelt für den Benutzer von wenig Wert ist;
- Süd-orientierte Passiv-Solar-Häuser, bis man gemerkt hat, dass das wirklich energie-effiziente Haus unabhängig von der Orientierung sein, also mit dem Beitrag der diffusen Strahlung des bedeckten Himmels auskommen kann und muss, und damit wenig Energie bei allen Witterungszuständen braucht;
  - natürliche Lüftung, bis man gemerkt hat, dass man dabei nur die Transportenergie der Ventilatoren, also ca. 5 bis 10 kWh/m<sup>2</sup>a einspart und man immer über das haustechnische System kompensiert, wenn die Außenlufttemperatur nicht dem Komfortanspruch entspricht;
  - transparente Wärmedämmungen mit grauslichen Auswirkungen auf die Erscheinung von Bauten, bis man gemerkt hat, dass moderne Wärmeschutzverglasungen nicht nur billiger sondern auch effizienter sind als TWD-Systeme und zudem noch Tageslicht hereinlassen.

Mit solchen Übungen wurde viel Zeit vertan, wurden Ressourcen verschwendet und der Verbraucher verunsichert. Eine Konsolidierung ist notwendig und im Gange.

Man weiß oder könnte wissen, dass

- das Gebäude die Randbedingungen für die Haustechnik und damit für den Energiebedarf setzt,
- die so bestimmten Spitzenwerte der Leistungsdichten die mögliche Qualität der Haustechnik bestimmen,
- Heizen und Kühlen bis auf das Vorzeichen äquivalent sind und durch dasselbe System bewältigt werden können,
- Leistung und Energie nur durch ein Zeitintegral verbunden sind.

Trotzdem haben wir Normen, welche sich nur auf thermische Energie, und zwar meist auf Heizenergie, beziehen, andere sich nur mit der Heizleistung und wieder andere mit der Kühlleistung, meist noch gekoppelt mit der Lüftung, befassen. Dass es notwendig wäre eine andere Normenstruktur zu kreieren, welche

- eine Bedarfsbestimmung für thermische Energie und Leistung erlaubt, dem Architekten also zeigt, wie man ein Gebäude gestalten muss, damit der thermische Leistungs- und Energiebedarf klein bleibt,
- mit einer Bedarfsdeckungsnorm dem Haustechniker zeigt, wie er den verbleibenden thermischen Bedarf möglichst intelligent und effizient decken kann,

ist auf europäischer Ebene noch nicht bekannt. Ein diesbezüglicher Versuch im Freigarten Schweiz ist am Widerstand der Simulanten und am mangelnden Abstraktionsvermögen der Beteiligten leider gescheitert.

Man stellt fest, dass die emotionale Fixiertheit vieler Beteiligter und die damit verbundene Blockade logischen Denkens viel Zeit und Energie kostet.

Die grundsätzliche Problematik des Energiebedarfs von Bauten liegt damit heute nicht mehr bei der Technik. Es sind vor allem zwei Faktoren, welche sich auswirken und allen Bemühungen Grenzen setzen:

- Der riesige Bestand der Industrieländer (OECD) mit sehr ineffizienten bestehenden Bauten und die sehr langsame Veränderung dieses Bestandes: 1 bis 2 % pro Jahr;
- Der riesige Nachholbedarf und das damit verbundene rasche Wachstum des Gebäudeparks in Ländern wie China, Indien etc. Dieses geschieht zudem mit sehr niedriger Energieeffizienz, sowohl betreffend die Bauproduktion wie auch den Betrieb der so erstellten Bauten.

Das damit verbundene rasche Ansteigen des Energiebedarfs einerseits und die nur langsam mögliche Bedarfsreduktion bei den Industriestaaten andererseits würde zu einem massiven Versorgungsengpass in den nächsten Jahren bis Jahrzehnten führen. Dies zu beeinflussen liegt aber nicht mehr im Bereich der Bauphysik, unabhängig davon, ob man in Zukunft nun 4-l-, 3-l- oder 2-l-Häuser baut.

Entwicklung Energieverbrauch bei 1.5%/Jahr

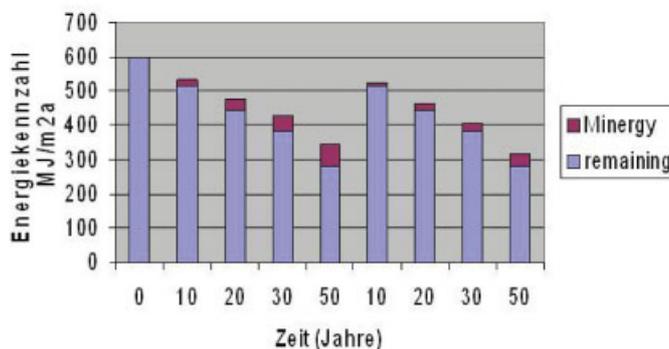


Bild 8. Entwicklung des mittleren thermischen Gebäudeenergiebedarfs falls alle Neubauten nur noch MINERGIE (links, < 42 kWh/m<sup>2</sup>a) oder MINERGIE-P-Niveau (rechts, < 28 kWh/m<sup>2</sup>a) aufweisen würden; blau: verbleibende, bestehende Bauten

Energy Need now + future (Exajoule/y)

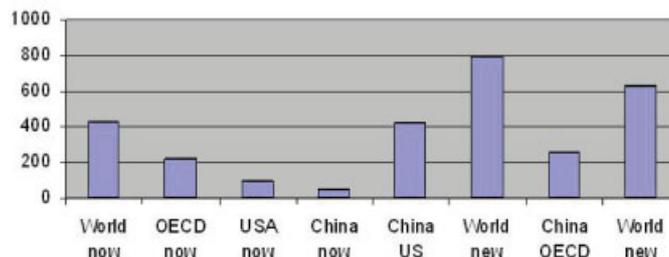


Bild 9. Gesamtenergieverbrauch Welt, OECD, USA und China und was aus dem Weltverbrauch würde, wenn China den Energiestandard der USA bzw. der OECD-Staaten erreichen würde

### 3 Fazit

Wenn man das Feld der Bauphysik so mit etwas Distanz betrachtet, so scheinen doch ein paar Schlussfolgerungen notwendig und möglich:

- Die Bauphysik hat in den letzten Jahrzehnten viel zum besseren Bauen beigetragen.
- Es besteht aber nach wie vor ein sehr großer Ausbildungsbedarf auf allen Ebenen vom Handwerker bis zur universitären Hochschule.
- Zu diesem Zweck müssen die wichtigsten Erkenntnisse und Zusammenhänge auf das Wesentliche reduziert und transparent gemacht werden: 20/80er Regel.
- Es besteht ein sehr großer Transferbedarf der Erkenntnisse in Europa für die sinngemäße Übertragung auf die Orte mit der größten Bauaktivität: China, Indien etc.
- Aber auch Länder wie die USA und Japan haben einen sehr großen Nachholbedarf.
- Ein wesentliches Forschungspotential besteht im besseren Verständnis der Großmengen-Baustoffe bis auf die molekulare Ebene. Ob dazu die Bauphysik oder die Materialwissenschaften mehr beitragen, sei offen gelassen.
- Mengen- und Kostenfragen begrenzen die Ausbreitung von High-Tech-Entwicklungen von vornherein. Für spezielle Probleme können aber durchaus gute Lösungen erwartet werden.

Nachdem der große Strom der baulichen Energieforschung und auch andere Gebiete ziemlich ausgeschöpft sind, stellt sich für viele deshalb die Frage,

- ob man sich vermehrt der Lösung angewandter Detailprobleme, Produktentwicklungen etc. widmen sollte, damit sich in Richtung FH bewegen, aber vordergründig sehr nützliche Arbeit leisten sollte, oder
- ob man zum Materialwissenschaftler mutieren und damit zwar grundsätzlichere Fragestellungen angehen, so möglicherweise neue Horizonte eröffnen, aber gleichzeitig den direkten Kontakt zur Bauphysik verlieren sollte?

Die tiefer als bisher gehende Erforschung übergreifender Gebiete, wie

- Behaglichkeit, d. h. mit Physiologie, Psychologie, Toxikologie etc.
- Städtebauphysik, d. h. mit Gebäudeaerodynamik, Kollektivphänomenen, Klimatologie etc.

eröffnet weitere Perspektiven, wird aber nicht von der Bauphysik sondern von den anderen beteiligten Wissenschaften dominiert.

Mir scheint deshalb, dass die Forschung in der Bauphysik an einem Scheideweg angelangt ist und man sich ernsthaft Gedanken über ihre strategische Zukunft machen müsste.

#### Autor dieses Beitrages:

Prof. Dr. Dipl.-Phys. Bruno Keller, Professur für Bauphysik, Institut für Hochbautechnik, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Wolfgang Pauli Str. 15, CH-8093 Zürich

## Angewandte Baudynamik



Helmut Kramer

### Angewandte Baudynamik

Grundlagen und Praxisbeispiele

Reihe: Bauingenieur-Praxis  
2006. 250 Seiten,  
160 Abb. Broschur.  
€ 55,-\* / sFr 88,-  
ISBN 978-3-433-01823-1

Schwingungsprobleme treten in der Praxis zunehmend auf und müssen bei der Planung beachtet werden. Das Buch weckt das Grundverständnis für die Begrifflichkeiten der Dynamik und die den Theorien zugrunde liegenden Modellvorstellungen.

Die wichtigsten Kenngrößen werden beschrieben und mit Beispielen verdeutlicht.

Darauf baut der anwendungsbezogene Teil mit den Problemen der Baudynamik anhand von Beispielen auf. Mit diesem Rüstzeug kann sich der Nutzer in spezielle Fälle wie Glockentürme, dynamische Windlasten oder erdbebensicheres Bauen einarbeiten.

#### Aus dem Inhalt:

- Einordnung der Baudynamik
- Technisches Regelwerk
- Begriffe und Kenngrößen
- Bewegungen starrer Körper
- Stoßvorgänge - Beispiele
- Freie Schwingungen
- Beispiele
- Erzwungene Schwingungen
- Beispiele
- Amplitudenreduktion
- Beispiele
- Menscheninduzierte Schwingungen - Beispiele
- Einführung in die Baugrunddynamik - Beispiele
- Erschütterungsschutz
- Beispiele
- Meßtechnik

Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und  
technische Wissenschaften GmbH & Co. KG

Für Bestellungen und Kundenservice:  
Verlag Wiley-VCH  
Boschstraße 12  
69469 Weinheim  
Telefon: +49(0) 6201 / 606-400  
Telefax: +49(0) 6201 / 606-184  
E-Mail: service@wiley-vch.de

**Ernst & Sohn**  
A Wiley Company  
[www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

\* Der e-Preis gilt ausschließlich für Deutschland  
001825076...my Irrtum und Änderungen vorbehalten.