Die Arbeit des Ingenieurs zwischen Wirklichkeit und Algorithmus: Einführungsvorlesung

Autor(en): **Bachmann, Hugo**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **88 (1970)**

Heft 49

PDF erstellt am: **27.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-84698

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

88. Jahrgang Heft 49 SCHWEIZERISCHE BAUZEITUNG 3. Dezember 1970

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, 8021 ZÜRICH, POSTFACH 630

Die Arbeit des Ingenieurs zwischen Wirklichkeit und Algorithmus

Von Prof. Dr. sc. techn. **Hugo Bachmann**

DK 62.007.2 : 159.955.662

Einführungsvorlesung, gehalten am 4. Juli 1970 an der ETH Zürich

Der Ingenieur, als Schöpfer technischer Werke oder als Forscher im Bereiche der technischen Wissenschaften, sieht sich vor immer schwierigere Aufgaben gestellt. Die Werke werden vielfältiger und komplizierter, die Forschungsthemen anspruchsvoller. Immer mehr und immer komplexere Bedingungen müssen beachtet werden. Dennoch sollten die Ergebnisse heutiger Ingenieurarbeit – dank Anwendung neuester Erkenntnisse und Methoden – besser, vollkommener sein als jene von gestern. Allerdings stehen dem Ingenieur neuartige Hilfsmittel zur Verfügung, zum Beispiel der Computer, moderne Versuchstechniken und Messverfahren. Diese erleichtern jedoch oft die Aufgabe nicht, sondern werfen wieder neue, andere Fragen auf. Schliesslich sollte der Ingenieur seine Arbeit nicht nur mit besseren Ergebnissen beenden, sondern er sollte diese Ergebnisse auch noch rationeller finden, sie innert kürzerer Zeit zur Verfügung stellen können. Die Tätigkeit des Ingenieurs wird anspruchsvoller, und es stellt sich für ihn die Frage, auf welche Weise er den steigenden Anforderungen gerecht werden kann.

Für die Bearbeitung einer bestimmten Aufgabe bildet das eigentliche Wissen – man kann es als Fachwissen bezeichnen – eine Basis. Bei der heutigen Komplexität der Aufgaben lässt sich jedoch damit noch keine Lösung finden. Vielmehr gewinnen weitere Gesichtspunkte eine immer grössere Bedeutung. Wie soll die Aufgabe angepackt werden, welches soll die Arbeitsmethodik sein? Was für Hilfsmittel sollen wo und auf welche Art eingesetzt werden? Und vor allem: Welche Teilstrecken auf dem Lösungswege sind wesentlich, welche sind weniger wichtig? Wo sollen die Schwerpunkte gesetzt werden? Zusammengefasst: Das Lösen einer Ingenieuraufgabe ist nicht nur eine Frage des Fachwissens, sondern immer mehr auch eine solche des Vorgehens und der Gewichtsverteilung, eine Frage des Überblicks.

Die Arbeit des praktizierenden Ingenieurs

Die Arbeit des statisch-konstruktiv tätigen, praktizierenden Ingenieurs beginnt mit der Aufgabe und endet mit dem realisierten Bauwerk (Bild 1). Beide, Aufgabe und Bauwerk, markieren die Wirklichkeit des Ingenieurs. Sie sind Anfangs- und Endstation eines vielgestaltigen Arbeitsprozesses.

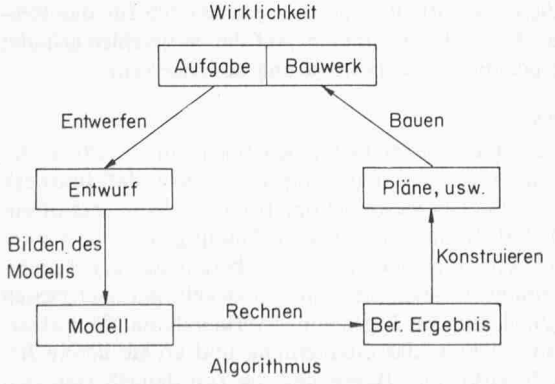


Bild 1. Die Arbeit des praktizierenden Ingenieurs.

Das Entwerfen

Die Aufgabe charakterisiert den Wunsch, den Anspruch an den Ingenieur, ein Bauwerk zu schaffen, das ganz bestimmte Eigenschaften aufweisen soll. Beim Entwerfen sieht sich der Ingenieur einem breiten Feld von Bedingungen, Wünschen und weiteren Aspekten gegenüber. Zunächst gilt es, gewisse absolute, auf jeden Fall einzuhaltende Bedingungen zu berücksichtigen. Diese ergeben sich vor allem aus der Funktion und der räumlichen Lage des Bauwerks, wie Art und Grösse der Nutzlasten, betriebliche Anforderungen, geometrische Begrenzungen und andere spezielle Voraussetzungen. Dazu kommt eine Vielzahl von Bedingungen, die nur so gut wie möglich erfüllt werden müssen. Beispielsweise soll ein Bauwerk möglichst sicher sein, möglichst geringe Verformungen aufweisen, gewissen ästhetischen Ansprüchen genügen usw. Ausserdem sind die örtlichen Gegebenheiten, wie Klima, Baugrund, Materialbeschaffung, wirtschaftliche Verhältnisse und so fort, in Betracht zu ziehen, woraus sich weitere Restriktionen ergeben. Schliesslich gesellen sich zu all diesen Bedingungen noch vielfältige Aspekte aus dem Wissen des Ingenieurs über die technischen Möglichkeiten, die Vor- und Nachteile bestimmter Baustoffe, Tragsysteme, Herstellungsverfahren usw.

Auf den ersten Blick scheinen diese vielen Bedingungen, Wünsche und Aspekte den Lösungsspielraum ausserordentlich stark einzuengen. Ein grosser Teil von ihnen weist gegensätzlichen Charakter auf. Zum Beispiel soll ein Bauwerk möglichst billig sein, aber auch möglichst wenig Unterhaltskosten verursachen. Oder es ist die Höhe eines Brückenträgers beschränkt; dennoch soll dessen Tragfähigkeit ein bestimmtes Mass nicht unterschreiten. Alle diese vielfältigen Ansprüche und Aspekte komplizieren wohl den Entwurfsprozess. Gerade sie aber sind es, welche dank ihrem vorwiegend widersprüchlichen Charakter dem gestaltenden Ingenieur eine erhebliche Freiheit verschaffen und damit ein schöpferisches Entwerfen ermöglichen. Ein bestimmter Entwurf kann nie sämtliche Ansprüche voll befriedigen. Welchen Aspekten mehr und welchen weniger Gewicht beigemessen werden soll, bestimmt der Entwerfende. Eine Entwurfsaufgabe kann deshalb auch nie zu einer einzigen, allein richtigen Lösung führen. Vielmehr gibt es stets mehrere mögliche Lösungen, so viele, wie fähige Entwerfer sich der Aufgabe eingehend annehmen. Und das ist etwas vom Faszinierendsten des Ingenieurberufes: Im Entwurf äussert sich, trotz Anwendung der allgemein gültigen Regeln von Wissenschaft und Technik, die Persönlichkeit des Entwerfers. Jeder wirklich zu Ende gedachte Entwurf trägt den Stempel des Entwerfers. Seine Ideen, seine schöpferische Phantasie und Intuition, aber auch sein Wissen und seine konstruktiv-praktische Erfahrung prägen das Gesicht eines guten Entwurfs. Der berühmte spanische Ingenieur *Edoardo Torroja* sagte zum Entwerfen von Tragwerken: «Alles hängt vom Urteil des Entwerfenden ab, da man keine Regeln geben kann, durch deren Befolgung man den bestgeeigneten Tragwerkstyp ableiten kann.»

Die Tätigkeit des Entwerfens bezieht sich aber nicht nur auf ganze Bauwerke. Entwurfsobjekt ist zum Beispiel auch ein Bauteil oder ein konstruktives Detail. Die vorangehenden

Feststellungen gelten daher sinngemäss auch für Teile und Einzelheiten eines Bauwerks.

Modell und Algorithmus

Ist das Entwerfen vorwiegend ein Akt der Synthese, so beginnt in der Folge die Analyse. Wir wollen diese in zwei wesentliche Phasen unterteilen: Das Bilden des Modells und das Rechnen, das heisst das Durchführen des entsprechenden Algorithmus.

Der Begriff Modell steht hier für die Vorstellung einer gegenüber der Wirklichkeit vereinfachten, idealisierten physikalischen Gegebenheit. Das Modell ist ein idealisiertes Abbild der Wirklichkeit. Es wird entscheidend präzisiert durch die grundlegenden Annahmen und Voraussetzungen für das nachfolgende methodische Rechenverfahren, den Algorithmus. Beim Bilden des Modells wird also das wirkliche bzw. das im Entwurf festgehaltene Werk gedanklich so vereinfacht, dass es einer Berechnung zugänglich wird.

Zum Beispiel wird eine neue Brücke aus den Baustoffen Beton und Stahl mit all ihren komplexen Eigenschaften gedanklich in das Modell eines dünnen, vollkommen elastischen Stabes verwandelt, damit an diesem die baustatische Berechnung durchgeführt werden kann. Die Tätigkeit «Bilden des Modells» beschränkt sich – gleich wie diejenige des Entwerfens – nicht auf ganze Bauwerke. Von Teilen eines Bauwerks oder von Einzelheiten der Baustoffe und Bauweisen werden ebenfalls Modelle gebildet. Oder es sind mit technischen Werken in Zusammenhang stehende Erscheinungen und Gegebenheiten, wie einwirkende Lasten, umgebende Medien – Luft, Wasser, Erde, Fels usw. – Anlass zur Bildung von Modellen. Beispielsweise ist bei Hoch- und Brückenbauten die «gleichmässig verteilte Nutzlast» ein die Wirklichkeit meist stark vereinfachendes Modell.

Deutlich zu trennen vom Bilden des Modells ist das nachfolgende Rechnen, das Durchführen des Algorithmus. Hierbei gilt es, die logischen Regeln von Mathematik und Mechanik auf das Modell anzuwenden. Wichtige Algorithmen für den praktizierenden Ingenieur stellt die Baustatik zur Verfügung. Die entsprechenden numerischen Berechnungen werden heute mehr und mehr durch Computer ausgeführt. Dies ist kennzeichnend für Algorithmen: Ohne eigentliches Denken kann der rein formalen Gesetzen gehorchende Rechengang mechanisch durchgeführt werden. Der denkende Mensch wird nicht mehr benötigt, zudem rechnet die Maschine unvergleichlich schneller als das menschliche Gehirn. Ein anderer Algorithmus ist beispielsweise das Verfahren zur Berechnung eines Stahlbetonquerschnittes nach der elastischen Festigkeitslehre. Mit den Annahmen «Ebenbleiben des Querschnitts», «elastisches Verhalten von Stahl und Beton» sowie «Vernachlässigung der Betonzugfestigkeit» ist das Modell umschrieben. Der Weg zu den Berechnungsergebnissen – Stahlquerschnitt, Betonspannungen usw. – ist Algorithmus.

Das Konstruieren

Durch das Entwerfen, das Bilden des Modells und durch das Berechnen hat sich der Ingenieur in den Bereich des Abstrakten begeben. Mit dem nachfolgenden Konstruieren beginnt der Weg zurück zur Wirklichkeit, zum Bauwerk. Konstruieren bedeutet Konkretisieren, die Realitäten wieder einführen.

Beim Konstruieren sind die Berechnungsergebnisse dem Ingenieur eine wertvolle Hilfe, niemals aber kann er sich allein auf diese stützen! Denn die Berechnungsergebnisse repräsentieren bloss das Verhalten des Modells. Und auch das beste Modell kann nie die wirklichen Verhältnisse vollumfänglich erfassen. Das Modell charakterisiert nur die vereinfachte Wirklichkeit. Der konstruierende Ingenieur muss jedoch seine Aufmerksamkeit auf die ganze Wirklichkeit richten. Er hat das beim Bilden des Modells Weggelassene, das nicht Erfasste, einzubeziehen. Gerade das aber ist es, was das richtige Konstruieren so schwierig, so anspruchsvoll macht. All die wirklichen oder möglichen Gegebenheiten aufzuspüren, die sich nicht im Berechnungsergebnis zeigen, stellt höchste Anforderungen an den Konstrukteur.

So gilt es, die spezifischen Eigenheiten des betreffenden Bauwerks oder Bauteils, die im statischen Modell nicht eingeführt wurden, zu beachten. Zum Beispiel werden Flachdecken nach der Plattentheorie berechnet unter der Voraussetzung, dass die Decke auf den Stützen frei drehbar gelagert sei. In Wirklichkeit sind jedoch die Stützen mit der Decke biegesteif verbunden. Die dadurch entstehenden Biegemomente, die sich nicht aus der Berechnung ergeben, dürfen bei der Bemessung von Stützen und Platte keinesfalls übersehen werden. Der grosse Brückenbauer und Konstrukteur *Robert Maillart* schrieb folgendes: «Angesichts der Unmöglichkeit der Berücksichtigung aller Nebenumstände kann jede Berechnung nur eine Grundlage für den Konstrukteur bilden. Je nach den Verhältnissen kann dann das Rechnungsergebnis direkte Anwendung oder Abänderung erfahren, und das zweite wird oft geschehen, wenn nicht ein Rechner, sondern ein Konstrukteur arbeitet.»

Ferner sind durch den konstruierenden Ingenieur die Besonderheiten der betreffenden Baustoffe und Bauweisen zu berücksichtigen. Auch sie werden durch die entsprechenden Modelle oft nicht erfasst. Beispielsweise ergibt die Bemessung unserer Flachdecken-Stütze wohl eine ganz bestimmte Längsarmierung, nicht aber die für die Stütze «lebenswichtigen» Bügel. Diese müssen nach bestimmten allgemeinen Regeln eingelegt werden. Denn was hilft die korrekt berechnete Längsarmierung, wenn sie nicht genügend gehalten, nicht am Ausknicken gehindert wird? Oder ein anderes Beispiel: Was nützt in einem Biegeträger die perfekt ermittelte Zugarmierung, wenn die entsprechenden Stäbe ungenügend verankert sind? Ein Fehler, der häufig gemacht wird.

Besonders schwierig ist das Konstruieren dort, wo es sich weder auf Berechnungsergebnisse noch auf allgemeine Regeln stützen kann. So ist das konstruktive Ausarmieren von Stahlbetontragwerken eine Kunst, die sich nur in beschränktem Masse lehren und erlernen lässt. *Emil Mörsch* kann als Begründer der wissenschaftlichen Betrachtungsweise des Stahlbetons bezeichnet werden. Er soll jeweils beim Anblick von Plänen, die nur aufgrund schulmässiger Bearbeitung der betreffenden Aufgabe angefertigt worden waren, auf gut schwäbisch bemerkt haben: «Da muss Eise nei!»

Das Konstruieren ist eine der wesentlichsten Tätigkeiten des Ingenieurs. Der sauberen konstruktiven Durchbildung der Bauwerke mit all ihren Einzelheiten muss grösste Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Schliesslich hat der Ingenieur die Ergebnisse seiner Arbeit mitzuteilen. Die wichtigste Sprache des Ingenieurs ist die Skizze, der Plan. Pläne werden ergänzt durch Beschriebe, Listen und Tabellen. Sie enthalten die nötigen Befehle für das Realisieren des Bauwerks, das Bauen. Auf diesen Befehlen gründet die grosse persönliche Verantwortung des Ingenieurs.

Beim Bauen

Mit dem Bauen beginnt für den Ingenieur die Phase der Verwirklichung seiner Vorstellungen. Er sieht das Bauwerk entstehen, so, wie er es in schöpferischer Arbeit entworfen, zum Modell abstrahiert, durch Berechnung geprüft und sorgfältig durchkonstruiert hat. Es wächst heraus aus den Fundamenten, nimmt Gestalt an und entwickelt gewissermassen seinen eigenen, für den Ingenieur unverkennbaren Charakter. Dies ist ein Erlebnis, das Genugtuung und grosse innere Befriedigung bewirkt. Das Bauen und die Zeit danach bedeuten für den Ingenieur jedoch ebenso eine Phase der Prüfung.

Schon mit dem heranwachsenden Bauwerk können sich allfällige Mängel zeigen. Vielleicht lassen sich diese durch improvisierte Massnahmen ganz oder teilweise noch beheben. Am fertigen Bauwerk hingegen ist dies oft nicht mehr möglich. Fehler oder schlecht durchdachte Einzelheiten können zu Schäden oder gar zu Einstürzen führen. Hier vermehrt der Ingenieur seine Erfahrung. Ohne Erfahrung keine Weiterentwicklung.

Die Arbeit des forschenden Ingenieurs

Die Arbeit des forschenden Ingenieurs geht aus von Phänomenen (Bild 2). Phänomene weisen auf die Wirklichkeit hin, sie stellen jedoch nie die ganze, umfassende Wirklichkeit dar. Ziel der Forschung ist es, die Phänomene und damit die Wirklichkeit auf wissenschaftliche Weise zutreffender als bis anhin zu erklären. Auch sollen Möglichkeiten geschaffen werden, welche eine Aussage über die zukünftige Wirklichkeit erlauben. Dabei scheint mir die Erkenntnis wesentlich, dass selbst erfolgreichste menschliche Forschungsarbeit die Wirklichkeit immer nur erhellen, nicht aber in all ihren Aspekten und inneren Bezügen wird erfassen bzw. voraussagen können. Forschen bedeutet immer nur den Versuch, einen Schritt auf einem Wege zu gehen, der für den Menschen unendlich lang ist und es vermutlich auch bleiben wird.

Das Experimentieren

Im allgemeinen lassen sich in der Arbeit des forschenden Ingenieurs zwei hauptsächliche Bereiche unterscheiden: die Phase des Experimentierens und diejenige der theoretischen Arbeit. Am Anfang der Experimentierphase steht das Planen der Versuche. Wie sollen die Versuche aufgebaut werden? Was soll beobachtet und gemessen werden? Die Planung von Versuchen gehört zu den schwierigsten Aufgaben des Forschers. Dies wird besonders deutlich, wenn man an die Komplexität heutiger Forschungsaufgaben und an den Aufwand denkt, den Versuche meist bedingen. Vorerst ist das derzeit vorhandene Wissen über die zu erforschenden Phänomene zusammenzutragen. Bekannte Aspekte, Folgen, Äusserungen sind festzuhalten und zu ordnen. Dieses Wissen bildet die Grundlage zur sogenannten Parameteranalyse. Hiermit sind in einem Wertungs- und Ausscheidungsprozess die voraussichtlich wesentlichen von den weniger wichtigen Parametern zu trennen. Ferner müssen die Variationsschritte und -grenzen der systematisch zu verändernden Parameter festgelegt werden.

Oft wird bei der Planung von Versuchen ganz oder teilweise von Hypothesen ausgegangen. Zeigt sich im Aufstellen von Hypothesen eine schöpferische Kraft des Forschers, so birgt dieses Vorgehen auch Gefahren in sich. Zum Beispiel können Versuchskörper, die ja ohnehin nur noch eine sozusagen «gefilterte» Wirklichkeit darstellen, durch den Forscher unbewusst so gestaltet werden, dass die Versuchsresultate eine vorher aufgestellte Hypothese beweisen müssen. Oder es werden die allgemeinen Ergebnisse durch die Vornahme ganz bestimmter und das Weglassen anderer Beobachtungen und Messungen beeinflusst. Es hat daher auch der Fall, vorgängig von Versuchen keine Hypothesen aufzustellen, seine volle Berechtigung: sich überraschen lassen, ohne vorgefasste Meinung, auch ohne irgendwelche Erwartungen an die Phänomene herangehen. Der Forscher wird hier die theoretische Arbeit unabhängiger beginnen und mit grösserer innerer Freiheit durchführen.

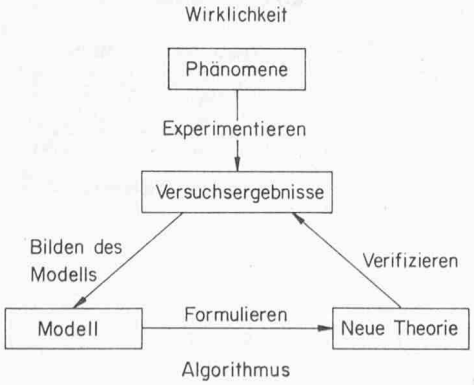


Bild 2. Die Arbeit des forschenden Ingenieurs.

Mit Abschluss der entsprechenden Planung sind die vorzunehmenden Versuche festgelegt. Die anzustrebende Versuchssituation, also die Versuchsobjekte, die Versuchsbedingungen, die Art und Weise der Beobachtungen und Messungen usw., ist umschrieben. Das Durchführen der Versuche entspricht dann weitgehend einem Verfahren, dessen Ablauf vorbestimmt ist. Die während den Versuchen registrierten Beobachtungen und Messungen stellen im allgemeinen noch nicht die eigentlichen Versuchsergebnisse dar. Um diese zu erhalten, ist eine erste Auswertung durchzuführen. Einfache Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern werden erfasst und dargestellt, wobei anstelle der Messwerte oft davon abgeleitete Grössen benützt werden.

Modell und Algorithmus

Mit dem Vorliegen der Versuchsergebnisse kann der forschende Ingenieur die eigentliche theoretische Arbeit beginnen. Die wichtigste und schöpferische Phase im Forschungsprozess ist das Bilden des Modells. Die zu erforschenden Phänomene, als Äusserungen der Wirklichkeit, nun näher umschrieben durch die Versuchsergebnisse, sind aufgrund eines Gedankenmodells zu erklären. Es handelt sich um denselben typischen Vorgang wie in der Arbeit des praktizierenden Ingenieurs: Es muss eine komplexe Wirklichkeit gedanklich in ein vereinfachendes Modell transformiert werden. Auch hier wird das Modell massgeblich charakterisiert durch die Annahmen und Voraussetzungen für den nachfolgenden Algorithmus. Während jedoch der praktizierende Ingenieur normalerweise in ihrer Art bekannte Modelle wählt, geht es in der Forschung darum, neue Modelle zu finden. Neue Modelle führen zu neuen Begriffen. Neue Begriffe bilden und diese mit Inhalt füllen ist ein zentrales Anliegen der Forschung. Auf das Bilden des Modells folgt das Formulieren der Zusammenhänge zwischen den wesentlichsten Parametern. Es muss der dem Modell entsprechende Algorithmus entwickelt werden.

Die neue Theorie

Modell und Algorithmus charakterisieren zusammen eine neue Theorie. Diese muss nun an den Versuchsergebnissen verifiziert werden. Der Grad der Übereinstimmung zwischen den aus dem neuen Modell herausgezogenen theoretischen und den gemessenen Grössen bildet im allgemeinen das massgebliche Kriterium für die Güte einer Theorie. Ist die Übereinstimmung schlecht, so müssen das Modell abgeändert und der entsprechende Algorithmus neu formuliert werden. Oder es sind die Versuche anders zu gestalten, so dass der Forschungsprozess wieder von vorne beginnt. Zeigt sich eine gute Übereinstimmung, so ist das Ziel der Forschungsarbeit erreicht. Die neue Theorie erlaubt eine Vorhersage in ähnlichen Fällen innerhalb der untersuchten Parameterbereiche.

Das Bilden von Modellen

Unsere bisherigen Betrachtungen haben gezeigt, dass sowohl in der Arbeit des praktizierenden Ingenieurs als auch in derjenigen des forschenden Ingenieurs zwei Bereiche existieren: der konkrete Bereich, umschrieben durch den Begriff «Wirklichkeit», und der abstrakte Bereich, in seinem Extrem charakterisiert durch den «Algorithmus». In beiden Fällen führt der Weg von der Wirklichkeit zum Algorithmus über das

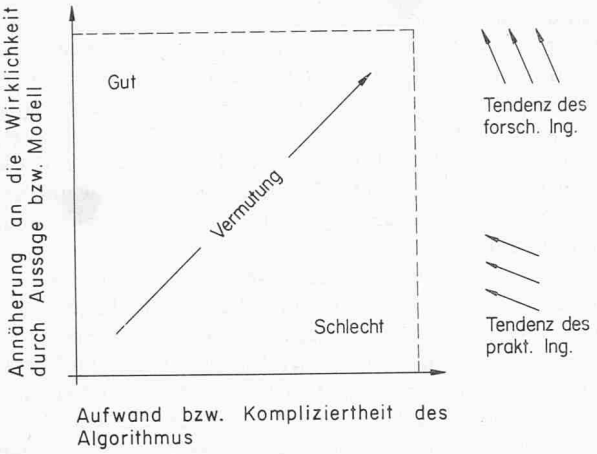


Bild 3.

Bilden von Modellen. Dem «Bilden des Modells» kommt in der Ingenieurarbeit eine hervorragende Bedeutung zu. Hier wird vieles vorbestimmt. Diese Arbeitsphase soll daher noch ausführlicher besprochen werden.

Anforderungen an das Modell

Die Zweckmässigkeit eines Modells hängt einerseits davon ab, in welchem Masse die Aussage der entsprechenden Theorie sich der Wirklichkeit annähert (Bild 3). Anderseits ist der Aufwand von grosser Bedeutung, welcher zur Gewinnung dieser Aussage erforderlich ist. An ein Modell sind daher die folgenden Ansprüche zu stellen:

1. Das Modell soll möglichst gut mit der Wirklichkeit übereinstimmen.
2. Das Modell soll zu einem möglichst einfachen Algorithmus führen.

Diese beiden Anforderungen entsprechen der Stellung des Modells zwischen Wirklichkeit und Algorithmus, den extremen Bereichen in der Arbeit des Ingenieurs. Man könnte daher vermuten, dass sich durch ein bestimmtes Modell die beiden Ansprüche nie gleichermassen erfüllen liessen: Dass bei einem Modell, dem ein einfacher Algorithmus entspricht, die Aussage weit von der Wirklichkeit entfernt liegen würde; oder dass ein Modell, welches der komplexen Wirklichkeit möglichst gut angepasst ist, viele Parameter berücksichtigen und darum stets zu einem komplizierten und aufwendigen Algorithmus führen müsse.

Diese Vermutung trifft jedoch nicht immer zu, wie verschiedene Beispiele noch zeigen werden. Es gibt Fälle, wo das wirklichkeitsnahe Modell keinen grösseren Rechenaufwand als das wirklichkeitsfremde Modell bedingt. Gut oder geradezu ideal ist ein Modell, das mit kleinem Aufwand eine sehr wirklichkeitsnahe Aussage erlaubt. Demgegenüber muss ein wirklichkeitsfremdes Modell, das einen komplizierten Algorithmus zur Folge hat, als schlecht oder oft sogar als unsinnig bezeichnet werden.

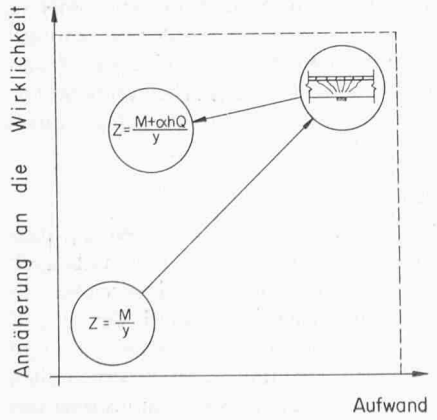


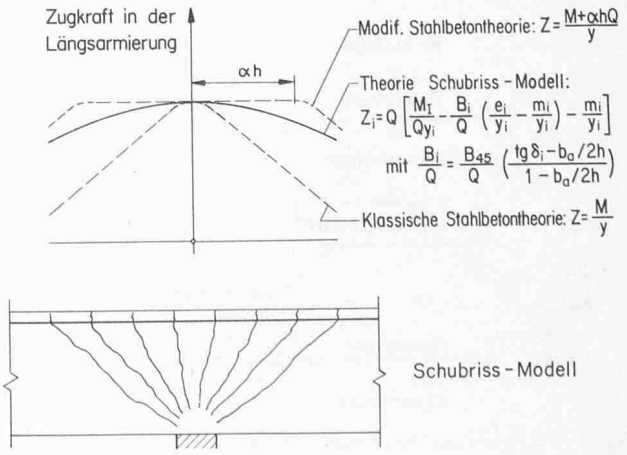
Bild 4a

Bild 4b

Der Ingenieur hat es normalerweise in der Hand, seine Modelle eher nach dem einen oder dem andern der beiden Ansprüche auszurichten. Dabei werden der forschende und der praktizierende Ingenieur unterschiedliche Tendenzen haben. Der forschende Ingenieur ist vor allem bestrebt, eine möglichst gute Annäherung der Aussage an die Wirklichkeit zu erreichen, und er wird weniger auf einen geringen Aufwand achten. Neue Einsichten in komplexe Zusammenhänge sind nur mit Hilfe wirklichkeitsnaher Modelle zu gewinnen. Der praktizierende Ingenieur hingegen ist aus ökonomischen Gründen normalerweise gezwungen, seinen Aufwand der Bedeutung des Bauwerks oder Bauteils anzupassen. Es gilt, mit vertretbarem Aufwand eine genügende Aussage zu erhalten. Die primäre Aufgabe des praktizierenden Ingenieurs ist ja nicht, die komplexe Wirklichkeit zu berechnen. Vielmehr hat er Ergebnisse anzustreben, welche zusammen mit sachgemässem Konstruieren ein sicheres und wirtschaftliches Bauen erlauben. Grundsätzlich bestehen im Felde «Aufwand–Annäherung an die Wirklichkeit» mannigfaltige Möglichkeiten. Dies soll anhand einiger Beispiele erläutert werden.

Nach der klassischen Stahlbetontheorie ist die Zugkraft in der Längsarmierung eines Trägers proportional zum Biegemoment des betrachteten Querschnittes (Bild 4). Demgegenüber haben Versuche gezeigt, dass in schubbeanspruchten Bereichen die Kraft in der Zugarmierung oft ein Mehrfaches des so errechneten Wertes beträgt. Die Erklärung dazu liefert – beispielsweise im Bereiche des Zwischenauflagers von Durchlaufträgern – ein möglichst wirklichkeitsnahes «Schubrissmodell». Die entsprechende neue Theorie ergibt eine gute Übereinstimmung zwischen den rechnerischen Werten und den Versuchsresultaten. Im Sinne der vorhin diskutierten Vermutung führt hier das wirklichkeitsnahe Modell zu einem verhältnismässig komplizierten Algorithmus. Für praktische Zwecke genügt es jedoch, die klassische Stahlbetontheorie zu modifizieren. Die Bemessung der Armierung kann nach den herkömmlichen Regeln vorgenommen werden, wenn vorgängig die Momentenlinie um ein Mass αh parallel zur Trägeraxe verschoben wird. Die so modifizierte Stahlbetontheorie führt gegenüber der klassischen Theorie mit einem nur unbedeutend erhöhten Aufwand zu einer viel besseren Erfassung der Wirklichkeit.

Das folgende Beispiel zeigt, dass ein wirklichkeitsnahes Modell nicht zu einem wesentlich komplizierteren Algorithmus führen muss als ein anderes, in diesem Falle überhaupt untaugliches Modell (Bild 5). Die Annahme vom Ebenbleiben der Querschnitte ist eine oft verwendete Hypothese. Sie wird üblicherweise auch bei der Unterscheidung verschiedener Brucharten von Stahlbeton-Biegequerschnitten zugezogen. Untersucht man jedoch die Verhältnisse am Modell eines Biegeriss-Elementes, so stellt man unter anderem fest, dass beträchtliche Relativverschiebungen zwischen der Zugarmie-



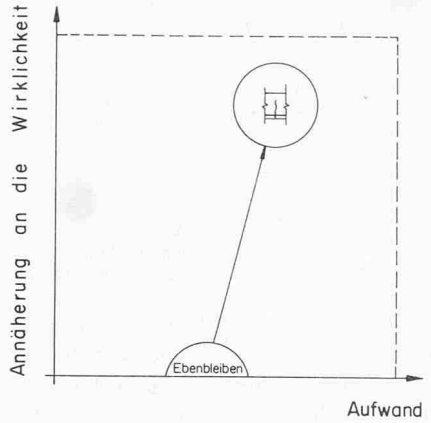
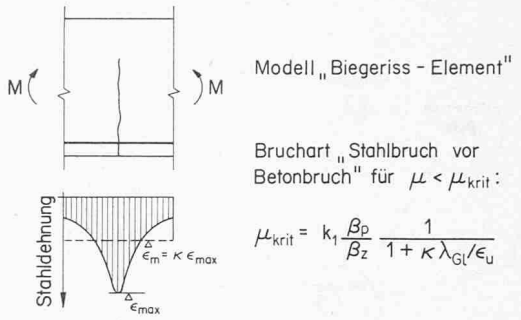


Bild 5a

Bild 5b



rung und dem umgebenden Beton auftreten. Die Querschnitte bleiben also nicht eben. Den Relativverschiebungen entsprechen Verbundspannungen, die eine ungleichmässige Verteilung der Stahldehnungen über die Länge des Risselementes bewirken. Dieser wesentliche Effekt kann durch den Verbundkoeffizienten $\varkappa$ berücksichtigt werden. Dadurch gelingt es unter anderem, eine realistische Formel für den kritischen Armierungsgehalt μ_{krit} anzugeben. μ_{krit} charakterisiert denjenigen Armierungsquerschnitt, bei dem gleichzeitig mit der Zerstörung der Betondruckzone der Stahl sich einzuschnüren beginnt. Mit dem wirklichkeitsnahen Modell des Biegeriss-Elementes ist es somit möglich, die Bruchart «Stahlbruch vor Betonbruch» zu erfassen. Diese Bruchart wurde in letzter Zeit bei verschiedenen Versuchen beobachtet. Sie konnte jedoch mit dem üblichen Modell, dem das «Ebenbleiben der Querschnitte» zugrunde liegt, nicht erklärt werden. Das wirklichkeitsnähere Modell ist hier ungleich leistungsfähiger, obwohl sich die Algorithmen bzw. die Formeln der beiden Modelle einzig durch den Koeffizienten $\varkappa$ unterscheiden.

Ein anderes Beispiel lässt erkennen, dass mathematische Brillanz der Algorithmen nicht für eine zweckmässige Lösung einer Aufgabe garantiert (Bild 6). Der Berechnung von hohen, wandartigen Stahlbetonträgern wird oft die elastische Scheibentheorie zugrunde gelegt. Sie führt zu komplizierten Differentialausdrücken. Der hohe Rechenaufwand ist jedoch nicht gerechtfertigt, da infolge der Rissebildung und der entsprechenden Umlagerung der inneren Kräfte das betreffende Modell recht weit von der Wirklichkeit entfernt ist. Demgegenüber ergibt das Modell «Bogen mit Zugband» eine bedeutend bessere Ausbildung der Armierung. Hier handelt es sich um einen nahezu idealen Fall: Das Wesentliche wird gerade durch ein Modell erfasst, das eine sehr einfache Berechnung ermöglicht.

Wie diese Beispiele zeigen, gehören zur Wirklichkeit des Stahlbetons auch die Risse. Trotzdem ist beim Bilden der Modelle lange Zeit von den tatsächlichen Folgen der Rissebildung kaum Notiz genommen worden. Das hat dazu geführt, dass Modelle in Gebrauch kamen, die weder realistisch sind noch eine einfache Berechnung erlauben. Dies zeigt auch die übliche Ermittlung von Schubspannungen nach der Stahlbetontheorie (Bild 7).

In einem homogenen prismatischen Balken mit Rechteckquerschnitt ergeben sich die Schubspannungen auf Grund der einfachen Biegelehre, welche das Ebenbleiben der Querschnitte sowie elastisches Materialverhalten voraussetzt. Die klassische Festigkeitslehre des Stahlbetons übernimmt das entsprechende Modell und vernachlässigt ausserdem die geringe Betonzugfestigkeit. Die Berechnung wird komplizierter, indem anstelle der normalen die ideellen Querschnittswerte einzusetzen sind. Die maximale Schubspannung beträgt etwa 85% derjenigen des ungerissenen Querschnitts. Die klassische Stahlbetontheorie behauptet somit, dass durch die Rissebildung die maximale Schubspannung im Querschnitt nicht etwa grösser, sondern kleiner wird. Ein Ergebnis, das dem gesunden Menschenverstand widerspricht.

In Wirklichkeit tritt im Querschnitt eines Biegerisses die maximale Schubspannung in der Biegedruckzone auf. Sie beträgt ein Mehrfaches derjenigen nach Stahlbetontheorie. Trotzdem ist eine Berechnung dieser Spannung kaum gerechtfertigt, da dort, wo die Schubbeanspruchung wesentlich ist, keine vertikalen Biegerisse, sondern schräge Schubrisse entstehen. In solchen Bereichen hat jede rechnerische Schubspannung in extremer Weise nur eine nominelle Bedeutung. Es genügt daher, als Mass für die Schubbeanspruchung die mit wenig Aufwand zu ermittelnde nominelle Schubspannung $\tau_{nom} = Q/b_0 h$ einzuführen.

Dieses Beispiel lässt folgendes erkennen: Allgemein wird es dort, wo der Rechenaufwand in keinem Verhältnis zur Wirklichkeitsnähe der Aussage steht und sich kein einigermassen realistisches Modell finden lässt, richtig sein, bewusst mit nominellen Grössen zu arbeiten, die einfach berechnet werden können, denen aber kein eindeutig definiertes Modell zugrunde liegt.

Wir haben früher festgestellt, dass der praktizierende Ingenieur in grösserem Masse als der forschende Ingenieur auf den Aufwand achten muss und deshalb gezwungen sein kann, seine Modelle weniger wirklichkeitsnah zu wählen. In manchen Fällen wird jedoch gerade das Bemühen um ein möglichst wirklichkeitsnahes Modell dem praktizierenden Ingenieur nicht nur zu einer realistischeren Beurteilung des Bauwerkes, sondern auch zu einer besseren Bewertung be-

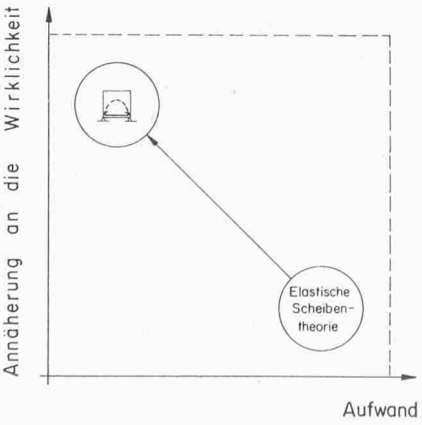
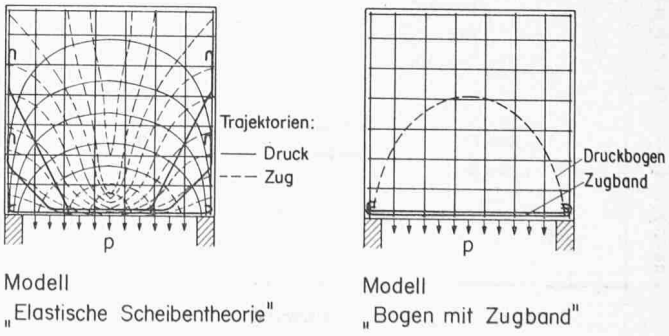


Bild 6a

Bild 6b



Modell „Elastische Scheibentheorie"

Modell „Bogen mit Zugband"

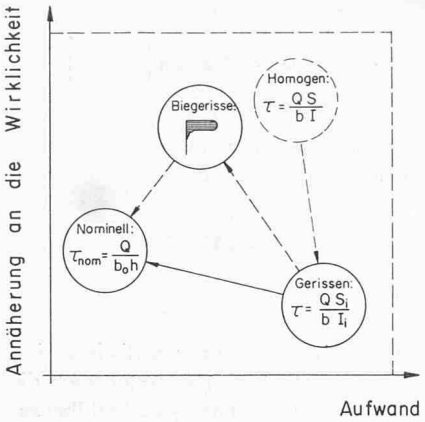


Bild 7a

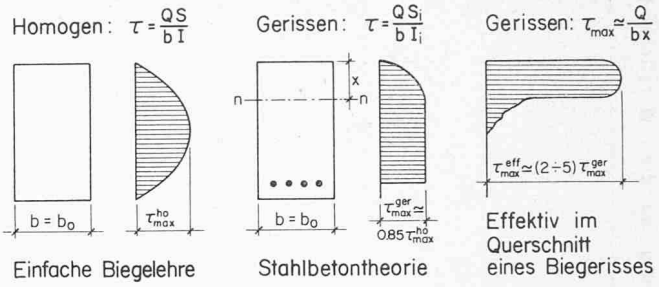


Bild 7b

stimmter Rechenverfahren und des entsprechenden Aufwandes verhelfen. Beispielsweise werden in einer schief gelagerten Brücke die Schnittkräfte massgeblich beeinflusst durch das Verhältnis Biegesteifigkeit zu Torsionssteifigkeit, $\lambda = EI/GK$ (Bild 8). Dieses Verhältnis wird durch Risse – wie sie in Tragwerken aus Stahlbeton und teilweise vorgespanntem Beton schon im Gebrauchszustand meist auftreten – erheblich vergrössert. Während gegenüber dem ungerissenen Querschnitt Biegerisse die Steifigkeit EI im Mittel auf etwa einen Drittel reduzieren, verringern Torsionsrisse die Steifigkeit GK auf einen Bruchteil des ursprünglichen Betrages. Das grössere λ des gerissenen Tragwerkes hat eine beträchtliche Verringerung der Torsionsmomente und eine entsprechende Umlagerung der Biegemomente zur Folge. Üblicherweise wird die Möglichkeit solcher Kräfteumlagerungen durch Rissebildung nicht beachtet. Hingegen werden mit erheblichem Aufwand für das ungerissene Tragwerk Einflusslinien berechnet und ausgewertet. Oft wird es jedoch richtiger sein, sich durch einfache Variation von λ über die möglichen Veränderungen der Schnittkräfte durch Rissebildung Rechenschaft zu geben, als mittels aufwendiger Algorithmen nur vermeintlicherweise eine gute Übereinstimmung mit der Wirklichkeit anzustreben. Allgemein kann jeder Algorithmus, und sei er noch so weit getrieben und verfeinert, nicht mehr hergeben, als das Modell wert ist, das ihm zugrunde liegt.

Das Modellbewusstsein

Wir haben vom Bilden der Modelle gesprochen und von den Anforderungen, welche an die Modelle zu stellen sind. Modelle richtig zu bilden, setzt jedoch das Bewusstsein voraus, dass jegliche Tätigkeit des Ingenieurs auf Modellen beruht. Dies scheint nach den bisherigen Ausführungen eine unnötige Feststellung zu sein. Tatsächlich mangelt es aber oft in erschreckendem Masse am Modellbewusstsein. Besonders deutlich zeigt dies die Geschichte des Bauingenieurwesens. Für neuartige Bauweisen oder Bauglieder wurden häufig keine neuen, adäquaten Modelle gebildet, sondern man ging recht unkritisch vom Bekannten, Herkömmlichen aus. Darauf weisen auch einige unserer Beispiele aus dem Gebiete des Stahlbetons hin. Von früheren, vermeintlich gleichen oder ähnlichen Aufgabenstellungen her wurden und werden oft auch heute noch einfach Verfahren, Algorithmen und damit unbewusst die entsprechenden Modelle übernommen.

Mangelhaftes Modellbewusstsein heisst auch ungenügendes Unterscheidungsvermögen zwischen Modell und Wirklichkeit. Dies kann groteske Folgen haben. Wir sprechen beispielsweise von «ungewollter» Einspannung einer Decke bei einem Endauflager. Offenbar stört uns die Einspannung, wir wollen sie nicht. Warum das? Für die Decke kann es doch nur günstig sein, wenn ihr Rand eingespannt ist! Wir sprechen offensichtlich darum von «ungewollter» Einspannung, weil unser Modell an der betreffenden Stelle ein frei drehbares Auflager aufweist! Das Modell hat das Bauwerk verdrängt. Nicht nur für die rechnerische Behandlung, sondern auch in unserem Fühlen und Denken. Die in Wirklichkeit günstige Einspannung ist zum Übel geworden.

Unbewusstes Vermischen von Modell und Wirklichkeit kann auch dazu führen, dass die Bauwerke den Modellen angepasst werden, anstatt umgekehrt. Beispielsweise wird bei einer massiven Brücke ein Rollenlager eingebaut, weil im statischen Modell ein frei drehbares, verschiebliches Auflager angenommen wurde. Oft wäre jedoch eine monolithische Verbindung die bessere und auch billigere Lösung.

Die Sicht für das Ganze

Wir haben festgestellt und an Beispielen erläutert, dass die Tätigkeit «Bilden des Modells» von grosser Bedeutung ist. Daneben dürfen jedoch die andern Phasen in der Arbeit des Ingenieurs nicht vernachlässigt werden. Wir müssen – auch wenn uns das bewusste Bilden der Modelle ein wesentliches Anliegen sein soll – die Sicht für das Ganze haben.

Zur Gewichtsverteilung

Leider besteht bei manchen Ingenieuren die Tendenz, der Berechnung ein übermässiges Gewicht beizumessen. Die Faszination, welche Formeln und Zahlen, überhaupt alles rational Erfassbare und genau Definierbare ausüben, trägt in hohem Masse dazu bei. Gerade hier, beim Durchführen des Algorithmus, hat sich aber der Ingenieur am weitesten von der

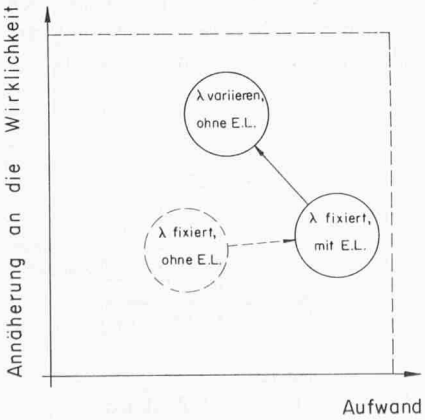
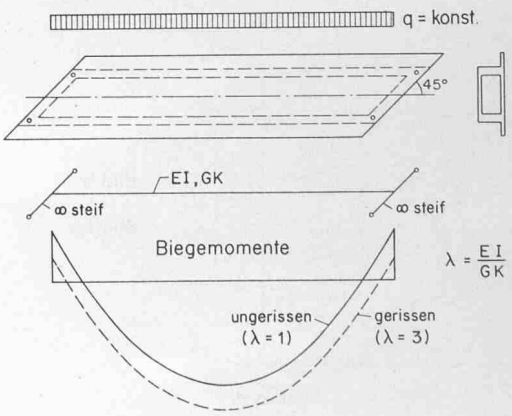


Bild 8a

Bild 8b



Wirklichkeit entfernt. Ein Ingenieur, der seine Aufmerksamkeit ausschliesslich oder vorwiegend auf Algorithmen richtet, macht seinem Stande keine Ehre. Denn sein Verhältnis zur Wirklichkeit ist höchst ungenügend. Ohne schöpferisches Entwerfen, ohne kritisches Bilden von Modellen sowie ohne sorgfältiges Konstruieren und ohne Bauen kann keine echte, keine lebendige Beziehung zur Wirklichkeit entstehen. Diese Beziehung aber ist es, welche die Arbeit des Ingenieurs erst zum Erfolg führen kann.

Untersucht man eingetretene Schäden, Einstürze usw., so stellt man nur selten fest, dass deren Ursache eine mangelhafte statische Berechnung war. Im Gegenteil: oft wurde gerade diese mit ausgeklügelter Raffiniertheit durchgeführt. Doch vor lauter Freude am Algorithmus wurden beispielsweise elementare konstruktive Belange vernachlässigt. Es fehlte die Sicht für das Ganze!

Ein Ausspruch von *Eugen Freyssinet,* der entscheidende Beiträge zur Entwicklung des Stahlbetons und Spannbetons geleistet hat, lautet in leichter Abwandlung wie folgt: «Bekanntlich ist es viel angenehmer, ein Programm zu schreiben und mit dem Computer zu spielen, als sich das Gehirn zu zermartern, wie man die Bauwerke mit der komplexen Realität in Einklang bringen kann.» Damit sei nichts gegen die Dienste gesagt, welche uns heute der Computer leistet. Dieser nimmt dem Ingenieur nicht nur geisttötende Routinearbeit ab. Der Computer hat auch Möglichkeiten zur Berechnung von Tragwerken geschaffen, die man sonst nicht zu bauen wagte. Doch Computer führen immer nur Algorithmen durch. Modelle können sie keine bilden. Konstruieren können sie auch nicht. Und zu ideenreichem Entwerfen sind sie schon gar nicht fähig. Das aber sind die wesentlichen Tätigkeiten des Ingenieurs. Sie prägen das Gesicht dieses Berufes.

Hatten diese kritischen Bemerkungen vorwiegend den wirklichkeitsfernen «Theoretiker» im Auge, so muss gleich beigefügt werden, dass es auch theorieferne «Praktiker» gibt. Beispielsweise darf der Ingenieur seine Tätigkeit nicht auf das Konstruieren beschränken. Ein Konstrukteur muss in der Lage sein, die Berechnungsergebnisse souverän zu interpretieren. Das aber ist nur möglich, wenn er das der Berechnung zugrunde liegende Modell kennt, wenn er sich also der verschiedenen Annahmen und Voraussetzungen voll bewusst ist. Achten wir also beim Konstruieren stets auf das Modell. Vergleichen wir es kritisch mit der Wirklichkeit. Modellbewusstsein schafft Wirklichkeitsbewusstsein!

Die Notwendigkeiten

Was benötigen wir also, um Ingenieure zu sein? Wir müssen die Sicht für das Ganze haben. Die einzelnen Arbeitsphasen sind sinnvoll einzuordnen. Das Entwerfen ist als schöpferische Arbeit aufzufassen. Wenn wir Versuche planen und durchführen, wollen wir dies unabhängig, mit grösstmöglicher innerer Freiheit tun. Und wir wollen bewusst Modelle bilden. Die Modelle sollen der komplexen Wirklichkeit angepasst sein, sie sollen aber auch zu vernünftigen Algorithmen führen. Beim Konstruieren haben wir auf das Modell zu achten, doch wollen wir uns auf die Wirklichkeit, auf das Bauwerk hin orientieren. Und beim Bauen schliesslich wollen wir unsere Erfahrungen vermehren.

Und was benötigen unsere Ingenieurstudenten hier an der Hochschule? Im propädeutischen Studium und auch am Anfang des technisch-wissenschaftlichen Unterrichts geht es vor allem um Algorithmen. Die Modelle sind gegeben. Die Algorithmen sind logisch aufgebaut, mit mathematischer Begabung zu erlernen. Sie bilden das Handwerkszeug des Ingenieurs. Dann aber wird es schwieriger, auch für den Lehrer: Die Fähigkeit, eine komplizierte technische Wirklichkeit in entsprechende Modelle abzubilden, kann nur beschränkt vermittelt werden. Sie muss vom Studenten durch eigene intensive Arbeit, durch selbständige Auseinandersetzung mit den Gegebenheiten entwickelt werden. Was wir Lehrer aber müssen und auch können, ist, im Studenten das Modellbewusstsein schaffen. Und das Verständnis, das Interesse für das Entwerfen, das Konstruieren und das Bauen wecken. Denn nur damit kann die für den Ingenieur so notwendige kritische Haltung gegenüber jeglichem Rezept und Verfahren entstehen. Diese kritische Haltung aber scheint mir entscheidend zu sein: Sie öffnet die Sicht für das Ganze.

Adresse des Verfassers: Dr. *Hugo Bachmann,* Assistenz-Professor für Massivbau an der ETH, 8006 Zürich, Leonhardstrasse 33.

Neues aus der Beton-Technologie

DK 666.97.002

Hinweis auf den österreichischen Betontag 1970 und Buchbesprechungen

Von Dr. sc. techn. **Adolf Voellmy,** dipl. Bauing., Zürich

Wie der Charakter des Menschen zunächst von seiner Erbmasse abhängt, aber dann in frühester Jugend durch seine Umgebung entscheidend geprägt wird, sind auch die Eigenschaften des Betons hauptsächlich von seinem Aufbau und seiner Herstellung abhängig, werden aber dann von dem Milieu seiner ersten Lebenszeit entscheidend beeinflusst.

Zur Meisterung dieser Verhältnisse möchten die folgenden Ausführungen mit Hinweis auf einige allgemeine Unterlagen auf neuere Forschungs-Ergebnisse aufmerksam machen.

A. Österreichischer Betontag 1970

Dass die neue Bautechnik für den Beton wie auch für dessen Hersteller bekömmlich ist, bekräftigte am österreichischen Betontag[1]) auch eine Ansprache des 100jährigen Unternehmungsleiters und Betonfachmanns Oberbaurat h.c. Dr. Ing. eh. *Kurt Innerebner,* der in Jugendfrische sein Glas auf das Wohl der Tagungs-Teilnehmer leerte. Es war ihm nichts von biologisch nachteiligen Auswirkungen des Betons anzumerken, auf deren kürzliche Ausschlachtung in der deutschen Presse unter anderem der Präsident des ÖBV, Direktor Dipl.-Ing. *Hubert Hrastnik,* humorvoll hinwies[2]).

Bei Eröffnung des Betontags wurde für das Jahr 2000 eine Verdoppelung des Bauvolumens in Betracht gezogen. Dementsprechend stand die Tagung im Zeichen des nur durch Planung, technologische Sicherheit und mit mechanisierten Ausführungen zu bewältigenden, rapiden Wachstums der Bautätigkeit.

Grösstes Interesse fanden die Vorträge bekannter Fachleute aus verschiedenen Ländern, welche Musterbeispiele städtebaulicher Planungen und rationeller Bauausführungen zeigten. Weitere Vorträge behandelten Fragen der Beton-Technologie und des Strassenbaues.

Die letzten Vorträge dienten zugleich als Einführung zu Besichtigungen an den nächsten Tagen, die zu gewaltigen Leistungen des österreichischen Bauwesens führten, nämlich

[1]) Ausführliches Tagungsprogramm siehe SBZ 1970, H. 15, S. 358.

[2]) Über die diesbezügliche, von anderweitig interessierten Kreisen in Gang gesetzte Pressekampagne orientiert:

Der Mensch im Nullfeld. Klima und Baustoff. Von *H. A. Erb.* 121 S. Format C5. Düsseldorf 1969, Betonverlag.