

Die Zukunft der Statik

Manfred Bischoff¹, Kai-Uwe Bletzinger²

¹Institut für Baustatik und Baudynamik, Universität Stuttgart

²Lehrstuhl für Statik, Technische Universität München

Zusammenfassung: Seit ihrer Etablierung als theoretische Querschnittsdisziplin ist die Statik ein steter Treiber methodischer Innovation und digitaler Transformation. Ihr Gegenstand hat sich dabei vom Berechnen auf das Modellieren verschoben. Die Statik der Zukunft erschließt als kreative Disziplin bisher nicht gekannte Freiheiten und öffnet die engere Welt des Bauwesens für neue, interdisziplinäre Möglichkeiten. Anhand von vier Hypothesen zum Wesen der Statik wirft dieser Beitrag einen persönlichen Blick der Autoren auf Möglichkeiten und Herausforderungen in Forschung, Lehre und Praxis, die sich für deren Zukunft ergeben.

1 Zum Geleit

Die folgende Auseinandersetzung mit der *Zukunft der Statik* ist nicht der Versuch einer Prognose deren künftiger Entwicklung, sondern sie möchte Impulse für ihre aktive Gestaltung geben und einen Diskussionsbeitrag zum Selbstverständnis unserer Disziplin leisten. Der Aufsatz gibt persönliche Gedanken der Autoren zur Bedeutung und zum Wesen der Statik heute und in der Zukunft wieder. Er ist nicht das Ergebnis einer systematischen Analyse der Zukunft der Statik mit wissenschaftlichen Methoden, die dargestellten Überlegungen sind unvollständig und es gibt keine erschöpfende Würdigung relevanter Literatur zum Thema. Wir betrachten die Statik als technisch-wissenschaftliche Disziplin im engeren Sinne von *Strukturmechanik*, d. h. Aspekte der normativen Regelung oder material-, konstruktions- und anwendungsspezifischer Nachweisführung, die in der Baustatik-Praxis eine erhebliche Bedeutung haben, werden ausgespart.

2 Die Zukunft der Statik

2.1 Statik ist kreativ

Die Disziplin der Statik wird häufig unzulässig verkürzend auf den Aspekt der *Analyse* beschränkt. Zweifellos sind valide Modelle und effiziente Berechnungsmethoden für die Nachweise von Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit sowie Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Bauwerken von essenzieller Bedeutung. Baustatische Methoden und Kenntnisse sind jedoch auch bei der Konzeption von Bauwerken und beim Tragwerksentwurf – also bei der *Synthese* – von großem Wert. Baustatische Methoden sind nicht nur Rechenwerkzeuge, sie befähigen vielmehr zur systematischen Reflektion des Tragverhaltens und können so zum kreativen Entwurfsprozess beitragen (Bischoff [2]).

Ein simples Beispiel aus der Stuttgarter Baustatik-Vorlesung soll diese Überlegung illustrieren. Es soll ein Balkentragwerk entworfen werden, mit dem Ziel, die Wirkung einer exzentrisch angreifenden Einzellast symmetrisch zu gleichen Teilen auf die Lager zu verteilen. Abb. 1 (a) stellt die Situation dar. In dem mit einer gestrichelten Linie angedeuteten Entwurfsraum können beliebige Lager (an beiden Enden) sowie horizontale Balkenelemente (ggf. mit unterschiedlichen Querschnitten) und Gelenke beliebig angeordnet werden. Das Ziel ist es, gleich große Lagerreaktionen zu generieren, also $A_V = B_V = \frac{F}{2}$, was die naive Lösung eines Balkens auf zwei Stützen ausschließt.

Aus der Überlegung, dass Steifigkeit Kräfte anzieht, wird zunächst das rechte Lager ohne Einspannung, also möglichst flexibel, angenommen. Daraus ergibt sich die in Abb. 1 (b) dargestellte Situation, in der man, ausgehend vom rechten Ende des Tragwerks, mithilfe der Gleichgewichtsbedingungen einen Momentenverlauf ermitteln kann. Das Moment in der Balkenmitte ergibt sich zu null, am linken Ende des Balkens entsteht ein negatives Moment. Dieser für ein noch unbekanntes statisches System zunächst hypothetisch ermittelte Momentenverlauf impliziert die Positionierung eines Momentengelenks in Balkenmitte sowie eine Einspannung des linken Balkenendes, s. Abb. 1 (c).

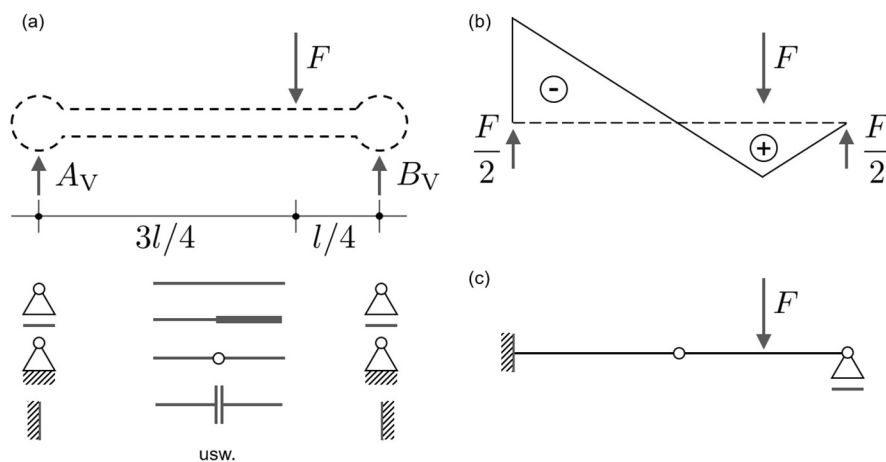


Abbildung 1: Entwurf eines Balkentragwerks mit vorgegebenen Lagerreaktionen; (a) Aufgabenstellung, (b) Momentenverlauf aus Gleichgewicht, (c) resultierender Entwurf

Das resultierende Tragwerk besteht aus einem Balken auf zwei Stützen (rechte Hälfte), der die Last aufnimmt und zu gleichen Teilen auf das rechte Lager und einen Kragarm (linke Hälfte) ablegt. Das ist nicht die einzige Lösung dieser Aufgabe, aber vielleicht die eleganteste. Entscheidend ist der Aspekt, dass sich diese einfache Aufgabe nicht, oder nur sehr umständlich und aufwändig mithilfe von Versuch und Irrtum, mit einem Stabwerkprogramm lösen lässt. Der hier skizzierte Lösungsweg basiert nicht auf „Herumprobieren“, sondern verwendet systematisch grundlegende baustatische Prinzipien – hier Schnittprinzip und Gleichgewicht. Ähnliche Anwendungsbeispiele kann man für das Kraftgrößenverfahren, das Verschiebungsgrößenverfahren, Einflusslinien und viele andere baustatische Methoden angeben.

Computerbasierte Entwurfswerkzeuge und Programme wie Grasshopper zur parametrischen Modellbildung gewinnen derzeit an Bedeutung. Methoden der grafischen Statik und die klassischen Arbeiten von Maxwell [8] werden in diesem Kontext wiederentdeckt und weiterentwickelt. In der Architektur werden vermehrt Methoden des „Computational Design“ und der Tragwerksoptimierung verwendet, bei der die Wechselwirkung zwischen Entwurfsprozess und statisch-mechanischem Verhalten berücksichtigt wird.

Interessant ist, wie selbstverständlich dabei Methoden (nichtlineare finite Elemente) und Verständnis (Gleichgewicht, Tragwerksverhalten) der Baustatik verwendet werden, ohne dass dies von den Bauingenieuren bemerkt würde. Dabei sind es gerade diese Methoden, die es erst erlauben, neue kreative Freiräume zu erschließen. Ein wesentliches Werkzeug dabei ist die systematische Untersuchung der Relevanz von Entwurfsparametern mittels der Sensitivitätsanalyse. Man denke z. B. an die Frage, in welchem Maße Variationen von Querschnittswerten, Spannweiten, Abmessungen von Aussparungen oder Materialparametern sich auf Schnitt- oder andere Bemessungsgrößen auswirken. Sensitivitätsanalysen sind wesentliche Grundlage von Entwurfsentscheidungen, erlauben die Klassifikation alternativer Entwürfe aber auch die Beurteilung von Zuverlässigkeit und Sicherheit. Trotz der grundlegenden Bedeutung von Sensitivitätsanalysen sind sie bis heute weder systematisch erschlossen noch in Praxis und Lehre eingegangen. An der TU München gehen wir voran und behandeln die systematische Sensitivitätsanalyse als eine Anwendung des Verschiebungsgrößenverfahrens bereits im vierten Semester (Bletzinger [3]). Wir arbeiten daran, unsere Studierenden auf neuartige Arbeitsweisen vorzubereiten, damit sie in der Lage sind, neben der klassischen „Berechnung“ gleichzeitig und ganz selbstverständlich auch zu „Bewerten“ und zu „Entscheiden“. Die Methode hat beste Chancen das Portfolio der konstruktiven Büros um viele Perspektiven zu erweitern (Fußeder und Bletzinger [4], Fußeder et al. [5], Hertle [7]).

2.2 Statik ist interdisziplinär

Die Statik hat sich an Universitäten und technischen Hochschulen in Deutschland aus den wachsenden Anforderungen an Theorie und wissenschaftliche Grundlagen als eigenständige Disziplin entwickelt. In Stuttgart wurde das Institut für Baustatik im Jahr 1958 – zunächst als „Lehrstuhl für Elastizitätslehre“ – gegründet. Dies geschah unter anderem auf Betreiben des neu berufenen Massivbauprofessors Fritz Leonhardt. Davor gab es eine „Stahlbaustatik“ und eine „Massivbaustatik“, die von den jeweiligen Professuren selbständig in Forschung und Lehre vertreten wurde. Ähnliche Geschichten kann man über andere Standorte erzählen.

Die Statik ist heute eine etablierte Querschnittsdisziplin und sie ist intrinsisch werkstoffübergreifend. Sie ist in Fakultäten für Bauingenieurwissenschaften durch ihre Schnittstellenfunktion zwischen der technischen Mechanik und den Konstruktions- und Entwurfsdisziplinen

und ihre methodische und wissenschaftliche Triebkraft unverzichtbar. Lehrstühle und Institute für Baustatik und Baudynamik sind wichtige Bindeglieder bei interdisziplinären Forschungsprojekten über das Bauen hinaus. Die in der Baustatik vorhandenen Kompetenzen in der Strukturmechanik und den numerischen Methoden sind meistens stärker ausgeprägt als etwa im Maschinenbau oder in der Luft- und Raumfahrttechnik. Viele unserer Absolventen, die in anderen Sparten arbeiten, berichten von der überlegenen Ausbildung im Bauwesen, die das interdisziplinäre Denken und Handeln fördert, gerade weil auf die wesentlichen, grundlegenden Zusammenhänge Wert gelegt wird, was sie in die Lage versetzt, das Gemeinsame spartenspezifischer Bezeichnungen oder Eigenarten sofort zu verstehen.

Neue Herausforderungen ergeben sich aus der gesamtheitlichen und deshalb interdisziplinären Behandlung von bedeutenden Fragestellungen wie Monitoring von Tragwerken im Betrieb oder gekoppelter Phänomene wie Bauwerk-Boden-Interaktion, Fluid-Struktur-Wechselwirkung im numerischen Windkanal oder Formfindung und Optimierung ganzer Tragwerke bzw. Bauwerksteilen.

Als ein typisches Beispiel für zukünftige Handlungsfelder sind wir an der TUM erfolgreich mit einem hochgerankten Projekt, das vom TUM Institute of Advanced Studies gefördert wird mit dem Titel „Adjoint-Based System Identification of Large-Scale Structures“. Dabei geht es um die Entwicklung von adjungierten Methoden der Sensitivitätsanalyse (siehe oben), die im Rahmen eines digitalen Zwillings für Monitoring und Schadensidentifikation von z. B. Brücken geeignet sind. Ein wesentlicher Treiber ist Siemens als Projektpartner und Finanzier, der bedeutende wirtschaftliche Chancen entdeckt hat. An den Themen erkennt man die Bedeutung computerorientierter Verfahren, ohne die diese typischerweise nichtlinearen und/oder transienten Aufgaben nicht bearbeitet werden können. Und dennoch ist das dafür notwendige Knowhow zur Modellierung physikalischer Zusammenhänge und der methodischen Umsetzung nicht mit dem zu verwechseln, was man derzeit unter „Digitalisierung“ der Arbeitsabläufe versteht. Die Baustatik besetzt im Rahmen der Digitalisierung eine einzigartige Stellung, sie sollte sich dessen bewusstwerden und auf vornehme Zurückhaltung verzichten. Wir sind völlig überzeugt, dass die genannten Handlungsfelder sehr bald von engagierten Ingenieurbüros übernommen werden können, die wir heute prototypisch an den Universitäten erkunden.

In der Zukunft wird dieser interdisziplinäre Aspekt der Statik in Forschung und Lehre weiter an Bedeutung gewinnen. Schnittstellen zu den ingenieurwissenschaftlichen Nachbardisziplinen und zur Architektur, aber auch zur Informatik und angewandten Mathematik und zu den Sozialwissenschaften müssen gepflegt und ausgebaut werden. Viele der drängenden Probleme unserer Gesellschaft erfordern zur Lösung interdisziplinäre Teams, über Fakultätsgrenzen hinweg.

2.3 Statik ist innovativ

Spätestens seit der Mitte des vergangenen Jahrhunderts ist die Baustatik ein Motor grundlagenwissenschaftlicher Innovationen, die weit über den Bereich des Bauens hinaus gehen. Ein prominentes Beispiel dafür ist die Entwicklung der Methode der finiten Elemente. Entscheidende Pioniere dieser Technologie, die disruptive Veränderungen in allen Ingenieurdisziplinen zur Folge hatte, waren Bauingenieure. Umso bemerkenswerter ist, dass die spezifischen Herausforderungen und Anwendungen, die die Finite-Elemente-Methode vorangetrieben haben, zunächst nicht aus dem Bauwesen kamen, sondern beispielsweise aus dem Flugzeugbau

und im Zusammenhang mit dem Wettlauf zum Mond. Ein frühes Beispiel aus dem Bauwesen für ein Projekt, das ohne Computermethoden nicht hätte realisiert werden können, ist das Dach des Münchener Olympiastadions.

Ein typisches Merkmal baustatischer Methoden und Modelle sind die Herausforderungen, die sich aus den extrem hohen Anforderungen an die Prognosesicherheit ergeben. Es ist eine Binsenweisheit, dass Tragwerke des Bauingenieurwesens nicht zunächst im Maßstab 1:1 prototypisch gebaut und experimentell untersucht werden können, wie das in fast allen anderen Ingenieurdisziplinen der Fall ist. Wir müssen uns, mehr als in jeder anderen Ingenieurdisziplin, auf unsere statischen Berechnungen verlassen können. Ein weiteres herausragendes Merkmal strukturmechanischer Systeme des Bauingenieurwesens ist die große Bandbreite der Größenskalen, die baustatische Modelle abbilden müssen – von Effekten im Millimeterbereich bis hin zu statischen Systemen mit Abmessungen von mehreren Kilometern.

Innovation im Bauwesen ist deshalb schicksalhaft mit Innovation im Bereich der Baustatik verbunden, weil die erstere ohne die letztere nicht in die Anwendung kommen kann.

Aktuelle und zukünftige Herausforderungen ergeben sich unter anderem im Bereich der Digitalisierung: effektive Modelle für Berechnungen an Gesamtmodellen, Modellierung des kompletten Bauablaufes und seiner Wechselwirkung mit dem Tragverhalten, die Integration von CAD und Simulation verbunden mit einer engeren Verzahnung von Entwurf und Tragwerksanalyse in frühen Phasen der Planung, die Verbindung von Simulation mit digitalen und automatisierten Fertigungsmethoden sowie die Wechselwirkung mit der baubegleitenden Modellierung mittels BIM. Im gesamten Feld der Digitalisierung besteht für die Baustatik und Baudynamik sowohl großer Handlungsbedarf und als auch entsprechender Spielraum. Sie kann hier entscheidende Beiträge zur Überwindung der seit Jahrzehnten beobachteten Stagnation der Produktivität in der Bauindustrie leisten.

2.4 Statik ist zukunftsfähig

Seit der Entwicklung programmierbarer Rechenmaschinen wurde immer wieder die Befürchtung – oder Hoffnung – formuliert, dass die damit einhergehende anhaltend rasante Entwicklung von Statik-Software die technische Disziplin der Baustatik eines Tages überflüssig machen würde. Dieses Szenario ist bis heute nicht eingetreten und auch die aktuell viel diskutierte rasante Entwicklung von Werkzeugen der künstlichen Intelligenz wird nach Ansicht der Autoren daran nichts ändern.

Zumindest bis heute kann die KI „Bedürfnisse“ als eine wesentliche Charakteristik menschlichen Denkens und Handelns weder erkennen noch modellieren und in der Folge konsequenterweise ersetzen. Selbst KI-Forscher haben Zweifel, dass dies jemals anders sein könnte. Solange wir uns selbst zu Kreativität und Innovation bekennen, werden wir KI als wertvolles Instrument nutzen. Problematisch würde es erst, wenn wir uns zum ausschließlichen „Berechner“ marginalisieren würden. Leider tun wir das bereits zu oft oder lassen es zu, dass andere das für uns tun.

Die Statik schafft sich nicht selbst ab, wenn sie, wie bisher, sich permanent selbst erneuert und nicht dem Irrtum verfällt, sie sei als theoretische Disziplin abgeschlossen. Die digitale Transformation ist – das Wort drückt es explizit aus – ein Prozess, der nicht in absehbarer Zeit abgeschlossen sein wird, sondern unsere Disziplin seit mehr als fünfzig Jahren ganz selbstverständlich begleitet, wenn auch nicht durchgehend unter diesem Label.

Für eine zukunftsfähige Baustatik-Lehre an Universitäten ist deshalb ebenfalls ein permanenter Transformationsprozess erforderlich. Die Statik hat sich von einer Kunst der Berechnung zu einer Kunst der Modellbildung hin entwickelt (Bischoff [1]). Und gerade wegen (und nicht trotz) der Verfügbarkeit leistungsfähiger Berechnungsprogramme sind theoretische Kenntnisse der zugrundeliegenden Modelle und Methoden für deren verantwortungsvolle Anwendung unverzichtbar. Bei der kritischen Bewertung von Berechnungsergebnissen leisten die klassischen Rechenverfahren nach wie vor wertvolle Dienste. Zu diesem Schluss kommen auch Roth et al. [9] in ihrem Aufsatz in diesem Band.

Eine Voraussetzung für Zukunftsfähigkeit ist Nachhaltigkeit.

Das Bauen ist traditionell und grundsätzlich an Nachhaltigkeit orientiert, die Bemessung zielt auf Materialersparnis ab und Bauwerke sollen dauerhaft sein. Beides leistet einen Beitrag zur Ressourcenschonung. Trotzdem ist das Bauwesen weltweit für einen Großteil des Müllaufkommens und der CO₂-Emissionen verantwortlich. Grundsätzliche methodische Fortschritte in der Baustatik und -dynamik sind Voraussetzungen für Fortschritte und Erfolge des nachhaltigen Bauens u. a. im Leichtbau und der Tragwerksoptimierung.

Nicht zuletzt unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit gewinnen das Bauen im Bestand und die Bauwerkserhaltung an Bedeutung. Daraus ergeben sich Herausforderungen bei der computerorientierten Tragwerksmodellierung zur Identifikation potentiell unsicherer Parameter und zum Monitoring des Bauwerkbestandes sowie zur Begleitung im Lebenszyklus (Grabke et al. [6]).

Auch der fortschreitende Klimawandel mit zunehmenden katastrophalen Beanspruchungsszenarien führt zu neuen Aufgaben und Herausforderungen. Dies betrifft die Simulation der dynamischen Wechselwirkungen der Tragwerke mit den umgebenden Medien wie Wind, Wasser und Baugrund. Ein Beispiel ist der numerische Windkanal als ein Handlungsfeld mit besonders großem Innovationsgehalt und Handlungsbedarf.

3 Schlussbemerkungen

Wie bereits eingangs erwähnt, sind die vorangegangenen Betrachtungen subjektiv, unvollständig und nicht systematisch wissenschaftlich. Das große Thema der Zukunft der Statik erfordert einen permanenten Diskurs, zu dem dieser Aufsatz einen Beitrag leisten will.

Die Botschaft der in den vier Unterkapiteln des zweiten Abschnitts angesprochenen Aspekte kann wie folgt zusammengefasst werden:

- **Statik ist kreativ:** Sie beschränkt sich nicht auf die Analyse, sondern befähigt zur Kreativität. Dieser Aspekt wird in Zukunft noch an Bedeutung gewinnen.
- **Statik ist interdisziplinär:** Sie ist keine rein utilitaristische Zwecke befriedigende Dienstleistung, sondern eine eigenständige, intrinsisch interdisziplinäre Wissenschaft.
- **Statik ist innovativ:** Statik ist ein Motor wissenschaftlichen Fortschritts und unverzichtbarer Bestandteil von Innovation im Bauen.
- **Statik ist zukunftsfähig:** Sie schafft sich nicht selbst ab, sondern trägt durch ihre permanente Fortentwicklung zur Nachhaltigkeit beim Bauen und darüber hinaus bei.

Literatur

- [1] BISCHOFF, M. Computerstatik. Von der Kunst der Berechnung zur Kunst der Modellbildung. Bautechnik (Sonderheft 90 Jahre Bautechnikgeschichte) 90 (2013), S. 91–106.
- [2] BISCHOFF, M. Nachrechnen oder Nachdenken? Baustatische Methoden als intellektuelles Werkzeug. In: Universität Stuttgart. Institut für Konstruktion und Entwurf (Hrsg.) Stahlbau, Holzbau und Verbundbau. Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulrike Kuhlmann, Ernst & Sohn, 2017.
- [3] BLETZINGER, K.-U. Skriptum „Statik 2“, Lehrstuhl für Statik, TU München, 2000-2023.
- [4] FUBEDER, M.; BLETZINGER, K.-U. Tragwerksplanung – Sensitivitätsanalysen unterstützen die Auslegung statischer Systeme und können Sicherheitsrisiken aufdecken. *Der Prüflingenieur* 59 (2021), S. 48–55.
- [5] FUBEDER, M.; WÜCHNER, R.; BLETZINGER, K.-U. Towards a computational engineering tool for structural sensitivity analysis based on the method of influence functions. In: *Engineering Structures* 265 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114402>.
- [6] GRABKE, S.; BLETZINGER, K.-U.; WÜCHNER, R. Development of a finite element-based damage localization technique for concrete by applying coda wave interferometry. *Engineering Structures* 269, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114585>
- [7] HERTLE, R. Über konstruktive Fehler spricht man nicht – oder doch? Forensic Engineering: eine (noch) verkannte Disziplin. *Der Prüflingenieur* 63 (2023).
- [8] MAXWELL, J. C. On reciprocal figures, frames and diagrams of forces. *Philosophical Magazine* 27 (1864), S. 250-261.
- [9] ROTH, S.; MATZEN, M.; REEG, J.; WENTE, E. Ist das angewandte Baustatik oder kann das weg? In: Oesterle, B., Bögle, A., Weber, W. (Hrsg.) *Baustatik – Baupraxis* 15, Technische Universität Hamburg (2024).