

# Wandel der baustatischen Prüfung durch neue Planungsmethoden

Markus Hennecke

ZM-I Gruppe, München und Bundesvereinigung der Prüflingenieure, Berlin

**Zusammenfassung:** Der Nachweis der Standsicherheit ist eine herausgehobene Aufgabe für Bauingenieurinnen und Bauingenieure auf Grundlage baustatischer Berechnungen. Die Bauordnungen der Länder stellen für den Hochbau Anforderungen an das Verfahren. Für einen Teil der Gebäude ist im Rahmen der Baugenehmigung eine baustatische Prüfung im Sinne eines Vier-Augen-Prinzips gefordert. Für den Bereich der Infrastruktur gibt es vergleichbare Regelungen seitens der einschlägigen Genehmigungsbehörden. Die Entwicklung computerorientierter Verfahren verändern die Form der Standsicherheitsnachweise. Im klassischen Vorgehen wurden Tragwerke in einfach zu berechnende Teilsysteme zerlegt. Inzwischen setzen sich Gesamtmodelle durch, die die Arbeit in der baustatischen Prüfung verändern. Der vorliegende Beitrag beschäftigt sich mit der Entwicklung aus Sicht eines Prüflingenieurs.

## 1 Der Standsicherheitsnachweis

Die bauliche Sicherheit ist eine staatliche Aufgabe. Bauliche Anlagen sind ein wesentliches Element der menschlichen Kultur. Die Standsicherheit der baulichen Anlagen steht nicht nur für die Unversehrtheit des individuellen Lebens, sondern auch für die der Gesellschaft. Wenn einzelne Bauwerke der Infrastruktur versagen oder, noch gravierender, bei Zerstörung ganzer Regionen durch Naturkatastrophen oder Kriege, erleidet die Gesellschaft Schaden.

Die Bedeutung der Standsicherheit wird nicht erst im Versagensfall einer Struktur offensichtlich, sondern auch dann schon, wenn die Standsicherheit im Sinne der eingeführten technischen Baubestimmungen nicht mehr nachgewiesen werden kann. Prominente Beispiele sind die Rheinbrücke bei Leverkusen oder die Talbrücke Rahmede.

Die Standsicherheit baulicher Anlagen ist keine physikalisch messbare Größe. Der Nachweis geschieht durch dokumentierte Berechnungen auf Basis der allgemein anerkannten Methoden der Baustatik und der über die Bauordnungen der Bundesländer eingeführten

technischen Baubestimmungen. Aus der Summe der Einzelnachweise ergibt sich ein Gesamtbild. Eine wesentliche Qualität ist, dass diese Dokumente nachvollziehbar und prüfbar sind.

Auch wenn die Grundlagen der Baustatik seit nahezu 100 Jahren formuliert sind, gibt es eine fortwährende Entwicklung [1] [2]. Wesentliche Änderungen finden sich in den mathematischen Methoden.

Analytische Ansätze werden heute noch bei Detailnachweisen angewendet. Für die Ermittlung der Kraft- und Weggrößen von Tragstrukturen haben sich numerische Methoden durchgesetzt. Zusätzlich zu den bekannten numerischen Verfahren werden in Zukunft auch Ansätze mit Künstlicher Intelligenz Einzug in die baupraktische Statik gebräuchlich sein [3] [4].

Rechenmethoden und Bautechnologie beeinflussen sich gegenseitig. Gebaut werden kann nur das, was durch die Baustatik beschrieben werden kann. Fachwerkträger zum Beispiel wurden erst gebaut, als sie mit dem Verfahren nach *Culmann* berechenbar waren [2].

Im klassischen Ansatz eines Standsicherheitsnachweises wird die geplante Struktur des Bauwerks in ein Strukturmodell überführt, das in Subsystemen unterteilt wird, die mit analytischen Rechenansätzen behandelt werden. Die Subsysteme sind an ihren Rändern untereinander verbunden. An den Knoten werden in der Regel Kraftgrößen weitergeleitet. Die Lagerkraft oder das Einspannmoment des einen Systems sind Einwirkungen auf das folgende.

In historischen baustatischen Berechnungen definierten die Nachweisführenden statisch bestimmte Subsysteme, um den Rechenaufwand zu vereinfachen. Der Ansatz war bis zum Anfang des 20igsten Jahrhunderts mechanisch richtig, da Bauwerke entsprechend konstruiert waren.

Mit dem Stahlbetonbau setzten sich monolithische Tragstrukturen und plattenartige System durch. Für die Berechnung der statisch unbestimmten Systeme wurden Kraft- oder Weggrößenverfahren und Tabellenwerke genutzt.

Mit dem Einsatz von Computern wurden diese Verfahren automatisiert. Dafür gab es zahlreiche EDV-Programme, die auf verschiedene statische Systeme spezialisiert waren.

In der Anfangsphase der Finite – Elemente – Methode (FEM) wurde die Methode für Platten, Scheiben und Schalen angewendet [5] [6]. Inzwischen hat sich dieser numerische Ansatz in der Praxis für alle Systeme durchgesetzt und ermöglicht es den Nachführenden, nahezu jede Struktur zu berechnen. Die Möglichkeiten der Baustatik haben die Formfindung in der Architektur erweitert.

Die Aufteilung von Tragstrukturen in Subsysteme wird als Positionsstatik bezeichnet. Die Subsysteme erhalten Positionsnummern. Zur Übersicht werden Positionspläne gezeichnet, in denen die Substrukturen mit den Positionsnummern dargestellt sind. Dieses Vorgehen gilt heute noch als Standard und wird von Bauaufsichtsbehörden als Element der Genehmigungsstatik gefordert. Trotzdem werden immer häufiger Strukturmodelle gebräuchlich, mit denen die gesamte Tragstruktur oder größere Teile mit der FEM abgebildet werden. Die Motivation zu den Gesamtmodellen liegt zum einen in der Automatisierung, wenn Geometriemodelle in ihrer Gesamtheit über Programmprozesse in Strukturmodelle gewandelt werden und zum anderen in der Tatsache, dass komplexere Tragstrukturen nicht

in Subsysteme unterteilt werden können, ohne dass die Abweichungen vom tatsächlichen Tragverhalten zu groß werden.

Geläufig ist auch ein hybrides Herangehen, bei dem zum Beispiel Berechnungen zur Aussteifung oder die Bemessung der Aussteifungskerne am Gesamtmodell erfolgen und die Bemessung von Stützen, Balken und Platten an Subsysteme.

## **2 Die baustatische Prüfung**

Das Bauen unterliegt gesetzlichen Bestimmungen, mit denen gesellschaftliche Interessen, von städtebaulichen Anforderungen bis zur Standsicherheit, in individuellen Bauvorhaben durchgesetzt werden. Die Genehmigung von Gebäuden wird über Landesbauordnungen basierend auf der Musterbauordnung [7] geregelt, für die die Bauministerkonferenz verantwortlich ist. Bei der Umsetzung in den jeweiligen Bundesländern fließen Modifikationen und Ergänzungen ein. Die für die Liegenschaft zuständigen Bauaufsichtsbehörden überprüfen in jedem Einzelvorhaben die Einhaltung der Vorschriften.

Ein wichtiges Element der Bauordnung ist die Anforderung an die Standsicherheit. Bis zum Beginn des 20. Jahrhunderts führten Beamte der Baugenehmigungsbehörden auf der Grundlage allgemeiner Bauregeln die Überprüfungen durch. 1906 lehnte ein preußischer Kreisbaumeister diese Überprüfung ab, da er sich angesichts der immer fortschrittlicheren Bautechnologien nicht mehr qualifiziert sah für die Prüfung [8]. Das war das Initial für das Prüfenieurwesen in Deutschland, eine sehr erfolgreiche Öffentliche-Private-Partnerschaft, bei der besonders qualifizierte private Unternehmer mit hoheitlicher Aufgabe betraut werden [9]. Die prüfenden Personen sind unabhängig von Weisungen und stehen in keiner wirtschaftlichen Verbindung zu den übrigen am Bau Beteiligten. Je nach den Regeln des Bundeslandes werden sie als Prüfenieure/innen von der Bauaufsicht beauftragt oder als Prüfsachverständige/r von den Antragstellenden. In ihrer Tätigkeit testieren sie die Vollständigkeit und Richtigkeit der Standsicherheitsnachweise. Das Merkmal der Prüfung ist das Vier-Augen-Prinzip [10].

Das Prüfen von Standsicherheitsnachweisen mit analytischen Methoden erfolgt durch das Nachvollziehen der Berechnungen und der Korrektur der Zahlen. Bei computerorientierten Verfahren ist diese Art der Überprüfung nicht mehr möglich, weil sich das Zahlenwerk in weiten Teilen der dezidierten Betrachtung entzieht. In der Prüfung wird daher ein eigenständiges Strukturmodell aufgebaut und berechnet. Dieses als Vergleichsrechnung bezeichnetes Verfahren bestätigt nicht mehr die Richtigkeit der einzelnen Zahlen, sondern des Gesamtergebnisses.

In jedem Fall muss das vorgelegte Strukturmodell kritisch in Hinblick auf die Eignung zum Nachweis der Standsicherheit geprüft werden. Dazu gehören unter anderem die Eingangsdaten von der Geometrie über die Lagerungsbedingungen bis zu den Einwirkungen.

Auch wenn bei sogenannten Handrechnungen die Wahrscheinlichkeit von individuellen Rechenfehlern größer ist als bei maschinellen Verfahren, kann nicht ausgeschlossen werden, dass Computerprogramme Programmierfehler enthalten. Daraus erschließt sich, dass Vergleichsrechnungen mit dem Programm eines anderen Herstellers durchgeführt werden.

### 3 Bauzeichnungen als Teil der Standsicherheit

Der Nachweis der Standsicherheit erfolgt über rechnerische Nachweise. Für die Realisierung der Standsicherheit am realen Bauwerk sind jedoch Zeichnungen essenziell (Abbildung 1). Gebaut wird nach Zeichnungen und nicht nach der baustatischen Berechnung. In der Musterbauvorlagenverordnung [11] sind folgerichtig Zeichnungen als Bestandteil der Standsicherheitsnachweise benannt.

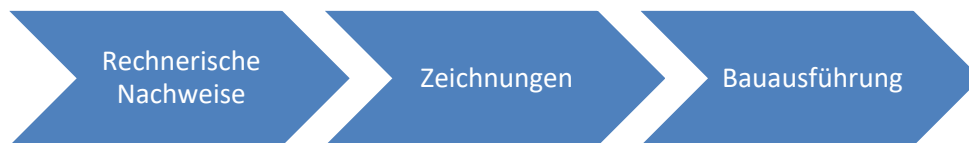


Abbildung 1: Die Stellung der Zeichnung im Planungs- und Bauprozess

Die Richtigkeit der Zeichnungen ist zwingend notwendig. Sie müssen daher genauso einer Prüfung unterzogen werden wie die rechnerischen Nachweise. Anders als bei diesen werden in der Prüfung keine eigenständigen Werke erstellt, sondern das Werk des Aufstellers mit so genannten Prüfeintragungen korrigiert. Die Zeichnungen müssen unter Beachtung der Hinweise und Anmerkungen der Prüfung richtiggestellt werden.

### 4 Modellbasierte Standsicherheitsnachweise

Gesamtmodelle bilden die Steifigkeit in Tragstrukturen in der Regel realistischer ab als Positionsstatiken. Die damit ermittelten Schnittgrößen können trotzdem von den sich tatsächlich einstellenden beträchtlich abweichen [12]. Ein wichtiger Aspekt ist der Bauablauf. Bauwerke werden immer Stück für Stück errichtet [13]. Verformungen aus Eigengewicht werden insbesondere im Ortbetonbau bei jeder weiteren Ergänzung, zum Beispiel ein Geschoss, automatisch ausgeglichen, da auf eine Sollhöhe gebaut wird. Die so berechneten Verformungen stellen sich in der Realität nicht ein. Der Effekt tritt deutlich bei Tragwerken auf, in denen die lastabtragenden Bauteile sehr unterschiedliche Steifigkeiten haben, weil Decken oder Unterzüge sowohl auf Wänden als auch auf Stützen lagern. Auch temporäre Einrüstungen wirken sich auf die Schnittgrößenverteilung aus. In mehrgeschossigen Gebäuden, in denen die Tragstruktur zwischen den Geschossen variiert, sind die inneren Kraftgrößen in Unterzügen davon abhängig, ob diese beim Betonieren oberer Bauteile unterstützt sind.

Im Hochbau wird der Bauablauf oft erst nach dem Verfassen der Genehmigungsstatik festgelegt. In der Sachbearbeitung der Standsicherheitsnachweise muss das bedacht werden. Für Ingenieurbauwerke ist die Berücksichtigung des Bauablaufs die Regel.

Des Weiteren hat die Modellierung mit finiten Elemente Einfluss auf die Ergebnisse. Das betrifft sowohl die Elementansätze als auch die Geometrie. Die richtige Wahl der Abmessungen der Elemente muss in Relation zu den Bauteilgeometrien oder der konkreten lokalen Bedingungen gewählt werden. Bei großen Strukturmodellen geschieht dies insbesondere bei automatischen Vernetzungen nicht immer richtig [14].

Gesamtmodelle haben wie jedes Strukturmodell Ränder an denen Randbedingungen angenommen werden, die die Realität vereinfacht abbilden. Dazu zählen Gründungsverhältnisse oder Einwirkungen.

Es ist nicht ungewöhnlich, dass sich Bemessungsergebnisse des Verfassers und des Prüfenden aufgrund der genannten Hinweise unterscheiden. Die prüfende Seite sollte nicht à priori annehmen, dass ihre Ergebnisse richtiger sind als die des Aufstellers. Prüfende und Aufstellende müssen in Dialog treten, um Differenzen zu klären und die beste Lösung zu finden. Die Forderung unterscheidet sich sehr von dem Weg bei analytischen Ansätzen, bei denen die Aussage, ob etwas richtig oder falsch ist, eindeutig ist.

Falls die Differenzen nicht aufgelöst werden, führt es oftmals dazu, dass die Bemessung anhand der jeweils ungünstigen Bemessungssituation vorgenommen wird. Dies ist aus Sicht der Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit negativ zu sehen. Aufstellen und Prüfen von Gesamtmodellen erfordern ein hohes Maß an Erfahrung und baustatischen Sachverstand. Weiterführende Hinweise finden sich in der Literatur [12] [13].

## **5 Building Information Modelling**

Building Information Modelling (BIM) ist ein Ansatz, bei dem Bauwerksinformationen in graphischen Modellen abgelegt werden [15]. Die graphischen Modelle bilden reale Bauteile als virtuelle Objekte mit technischen oder wirtschaftlichen Attributen.

In BIM Modellen werden unter anderem Informationen zur Standsicherheit hinterlegt. Die Inhalte können in der graphischen Darstellung selbst liegen, wenn im Holz- und Stahlbau die Geometrie der Profile modelliert und im Konstruktionsbeton die Bewehrung detailliert gezeichnet wird (Abbildung 2).

Im Holz- und Stahlbau übernehmen diese Modelle bereits die Funktion von Zeichnungen, sodass für die Fertigung keine zusätzlichen Pläne erstellt werden. Aus BIM-Modellen können grundsätzlich Pläne für Prüf- und Genehmigungsverfahren abgeleitet werden. Darin liegt jedoch die Gefahr, dass für das Prüfen ein Parallelprozess entsteht und die Prüfanmerkungen an dem Produktionsprozess vorbeigehen [16]. Daraus folgt die Notwendigkeit der modellbasierten Prüfung. In der Praxis liegen bereits Erfahrungen vor. Notwendig sind Verfahren zur eindeutigen Versionierung des geprüften Planungsstandes oder die Art des Testats des Prüfenden („Prüfstempel“) im Modell. Ein weiterer Aspekt ist das „Vererben“ des Prüfergebnisses vom Modell auf Pläne, die im Rahmen der Ausführung benötigt werden [17].

## **6 Die Aufgabe der Baustatik in Lehre und Wissenschaft**

Die Baustatik ist eine Wissenschaft, deren mechanische Grundlagen für einen großen Teil der Anwendungen geklärt sind. Trotzdem kann die Baustatik nicht als abgeschlossen gelten. Durch die Automatisierung, die in die baustatische Berechnung weiter Einzug halten wird, steigt der Bedarf, Methoden zu haben, mit denen Ergebnisse validiert werden können, so dass die Personen, die für die Standsicherheit Verantwortung übernehmen, sich diese auch zu eigen machen können [18]. Das betrifft sowohl Verfassende als auch Prüfende.

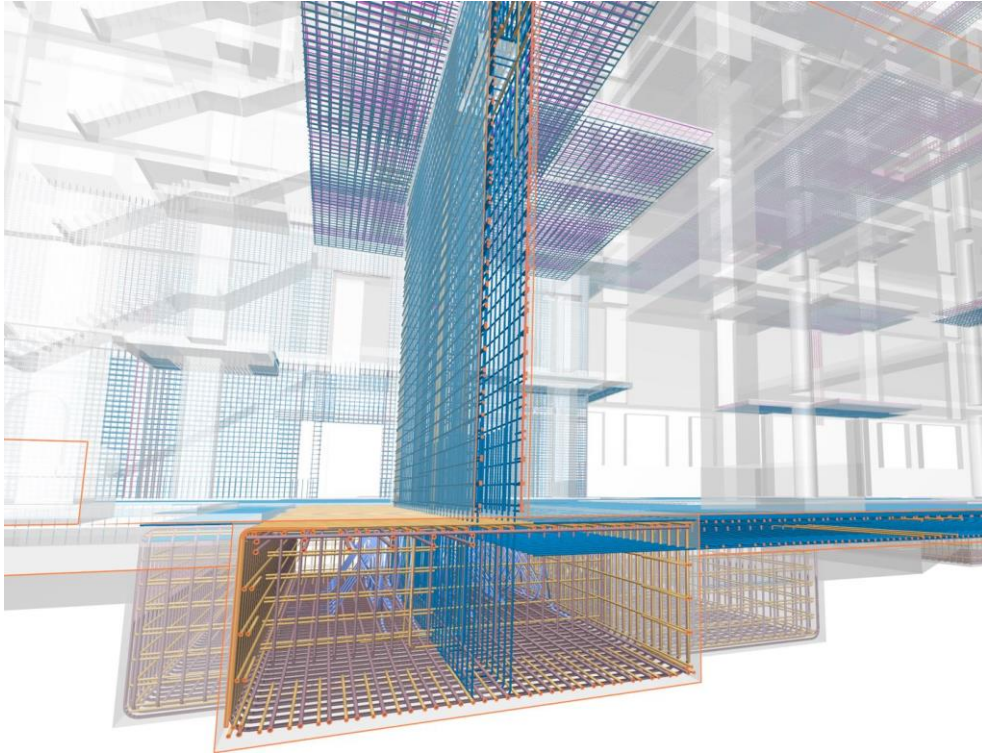


Abbildung 2: Bewehrungsmodell

Forschungen in den Feldern der Sensitivitätsanalysen [19] [20] oder der Anwendung der künstlichen Intelligenz können hier hilfreich sein [4].

In der Lehre ist es erforderlich den Studierenden Wissen und Erfahrungen im Tragverhalten von Systemen zu vermitteln. Diese Erfahrungen wurden früher im Berufsleben durch sehr intensives Arbeiten in analytischen Nachweisen erlangt. Auf dieser Weise Erfahrungen zu sammeln, ist bei computerorientierten Verfahren nicht möglich.

## **7 Zusammenfassung**

Seit dem Konrad Zuse den Computer erfunden hat, begleitet deren Entwicklung die Baustatik sehr intensiv. Nahezu alle heute praktisch tätigen Ingenieure haben in ihrem gesamten Berufsleben Computer für ihre Arbeit genutzt. Aus dieser Sicht ist ein sehr hoher Digitalisierungsgrad erreicht. Je leistungsfähiger die Computer werden, desto komplexere Strukturmodelle können bearbeitet werden. Nachweise am Gesamtmodell dürften in wenigen Jahren Stand der Technik sein. Sowohl auf der Seite des Aufstellens als auch des Prüfens sind Techniken zu entwickeln, um die Ergebnisse zu validieren und zu prüfen. Die Baustatik muss sich in Lehre und Forschung diesen Aufgaben annehmen.

## Literatur

- [1] M. Bischoff, „Ein Jahrhundert Baustatik in Wissenschaft und Praxis,“ *Bauingenieur*, Bd. 90, 2015.
- [2] K.-E. Kurrer, „The history of the theory of structures,“ 2008. [Online]. Available: <https://structurae.net/literature/book/history-of-the-theory-of-structures>. [Zugriff am 10.2.2023].
- [3] A. E. Charalampakis und V. K. Papanikolaou, „Machine learning design of R/C columns,“ *Engineering Structures*, Bd. 226, 2021.
- [4] R. Bischof und M. Kraus, Multi-Objective Loss Balancing for Physics - Informed Deep learning, 2021.
- [5] G. A. Rombach, Anwendung der Finite Elemente Methode im Betonbau, Berlin, 2006.
- [6] K. Knothe und W. Heribert, Finite Elemente, 5. Aufl. Hrsg., Heidelberg Berlin: Springer Verlag, 2017.
- [7] Argebau, „Musterbauordnung - MBO, Stand 25.09.2020,“ [Online]. Available: <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx>.
- [8] K. Saeland, „Die historische Entwicklung des Bauordnungsrechts und der Prüfingenieur im Bauwesen,“ *Der Prüfingenieur*, Bd. 57, 2020.
- [9] R. Hertle, E. Brehm und M. Wetzl, „Design Review - The Necessity to go International,“ *Der Prüfingenieur*, Bd. 75, 2020.
- [10] H. Dettmer und C. Klein, „Die Aufgaben und Stellung der Prüfingenieure für Standsicherheit und Brandschutz im Bauordnungsrecht,“ *Der Prüfingenieur*, Bd. 57, 2020.
- [11] Argebau, „Muster einer Verordnung über Bauvorlage und bauaufsichtliche Anzeigen (Musterbauvorlageverordnung) - MbauVorIV -Stand 25.09.2020,“ [Online]. Available: <https://www.is-argebau.de/verzeichnis.aspx>.
- [12] M. Bischoff, „Statik am Gesamtmodell: Modellierung, Berechnung und Kontrolle,“ *Der Prüfingenieur*, 2010.
- [13] G. A. Rombach, „Die Prüfung der Standsicherheit am ganzheitlichen Gebäudemodell,“ *Der Prüfingenieur*, Bd. 52, 2008.
- [14] G. A. Rombach, „Probleme bei der Berechnung von Stahlbetonkonstruktionen mittels dreidimensionalen Gesamtmodell,“ *Beton- und Stahlbetonbau*, Bd. 102, Nr. 4, pp. 207-214, 2007.
- [15] H. -. G. Oltmanns und H. D. A. Oltmanns, „BIM - Modelle und die Bearbeitung durch Prüfingenieure,“ *Bautechnik*, Bd. 96, Nr. 3, pp. 250 - 258, 2019.

- [16] M. Hennecke, „Prüffähige digitale 3D-Planung,“ in *Beton-Kalender 2024: Hochbau*, Ernst & Sohn GmbH, 2024.
- [17] M. Hennecke, „Die Digitalisierung wird die traditionellen Arbeitweisen und Planungsmethoden grundlegend ändern,“ *Der Prüfingenieur*, Bd. 58, 2021.
- [18] M. Bischoff, „Computerstatik und Tragwerksmodellierung - Vorschläge und Impulse für eine moderne universitäre Baustatiklehre,“ *Der Prüfingenieur*, 2021.
- [19] M. Fußeder, R. Wüchner und K.-U. Bletzinger, „Sensitivitätsanalyse mit verallgemeinerten Einflussfunktionen zur Tragwerksbewertung bei Modellparametervariationen,“ *Bauingenieur*, Bd. 96, pp. 191 - 200, 2021.
- [20] M. Fußeder, R. Wüchner und K.-U. Bletzinger, „Towards a computational engineering tool for structural sensitivity analysis based on the method of influence functions,“ *Engineering Structures*, 2022.