

# 1 Einleitung: Beurteilung historischer Tragwerke

In der Ausbildung des Bauingenieurs nimmt der Entwurf von Tragwerken breiten Raum ein. Konstruktion und Standsicherheitsnachweis sind eng verzahnt. Das Tragwerk wird so entworfen, dass es ein klares Tragverhalten aufweist und eindeutig berechnet werden kann. Klare Tragsysteme ermöglichen die Wahl wirtschaftlicher Querschnitts- und Anschlussdimensionen. Auf Grundlage der gewählten Konstruktion und Abmessungen wird der Standsicherheitsnachweis geführt. Er hat das Ziel, Belastung und Beanspruchung des Tragwerks für die gesamte geplante Lebensdauer vorherzusagen und die durchgängige Einhaltung eines vorgegebenen Sicherheitsniveaus zu erreichen. Normen und Vorschriften fixieren den Stand der Technik und bieten in der Regel Handlungssicherheit. Gebaut wird im Idealfall genau das, was zuvor berechnet worden ist, Modell und Wirklichkeit stimmen also mindestens theoretisch so gut wie möglich überein.

Eine von der Aufgabenstellung des Neubaus grundsätzlich verschiedene Aufgabe ist diejenige, eine bereits vorhandene Konstruktion zu untersuchen und gegebenenfalls zu reparieren oder zu verstärken. Das historische Tragwerk ist oftmals redundant, der Lastabtrag unklar und durch Schäden beeinträchtigt. Zu ein und demselben Tragwerk können unterschiedliche Lastabtragsmodelle entwickelt werden. Ziel ist es, das vorhandene Tragverhalten, das sich gewissermaßen von selbst eingestellt hat, möglichst realistisch abzubilden. Die Qualität der Modellierung kann sofort durch einen Abgleich der Beobachtungen am Bauwerk selbst mit den Berechnungsergebnissen überprüft werden.

Bevor man ans Rechnen geht, ist es erforderlich, sich Klarheit über das konzeptionelle Vorgehen zu verschaffen. Bei der Beurteilung eines historischen Tragwerks steht natürlich das gesamte Methodenarsenal des modernen Bauingenieurwesens zur Verfügung, von einfachen Handrechnungen oder linear elastischen Stabwerksberechnungen bis hin zu nichtlinearen, dreidimensionalen Finite-Elemente-Modellen. Die kompliziertere Rechnung ist jedoch keineswegs notwendigerweise auch die bessere. Die beste Analyse ist vielmehr diejenige, die den vorhandenen Tragwerkszustand möglichst einfach, jedoch schlüssig und vollständig erklären kann. Der beste Planer am Denkmal ist derjenige, der aufgrund einer gewissenhaften Untersuchung und Analyse ein schlüssiges Bild vom Tragwerk gewonnen hat. Für ein Gesamtbild ist zuallererst eine genaue Kenntnis des Objektes, seiner Geschichte und seines Zustands unabdingbar. Bedauerlicherweise werden Ertüchtigungen sehr oft voreilig anhand grob vereinfachter Bauaufnahmen und lückenhaft erhobener Befunde geplant und die Bauwerksuntersuchung selbst erfolgt dann schon gezielt im Hinblick auf die schon von vornherein feststehende Maßnahme. Dies stellt eine Umkehrung der logischen Abfolge der Beurteilung eines historischen Tragwerks dar, die leider durch die finanziellen Randbedingungen gefördert wird: Geld gibt es für eine konkrete Maßnahme, nicht für eine Voruntersuchung, die möglicherweise eine derartige Maßnahme komplett erspart. Auch der Tragwerksplaner selbst nimmt sich mit einer derartigen Voruntersuchung möglicherweise den eigenen lukrativen Auftrag weg, weil

er nach der Höhe der Bausumme entlohnt wird. Hier ist im Denkmal-Kontext ein Umdenken angesagt.

Leider wird die Untersuchung historischer Tragwerke, die durchaus auch mit dem Kriechen und Klettern im Staub der Jahrhunderte verbunden ist, gern delegiert. Weder der Denkmalpfleger noch der Bauherr noch der Tragwerksplaner haben ausgeprägte Lust zu dieser mühsamen, manchmal sogar gesundheitsgefährdenden Arbeit. Man lässt sich einen Plan zeichnen und Befunde kartieren. Das unangenehme und zeitraubende Arbeiten vor Ort wird so vermieden. Im schlimmsten Fall findet sodann die Diskussion über vorzunehmende Ertüchtigungen am grünen Tisch unter lauter Planungsbeteiligten statt, von denen kein einziger eine persönliche, genaue Kenntnis des Objektes hat. Bei einem historischen Tragwerk, das auch noch denkmalpflegerischen Randbedingungen unterliegt, muss ein solches Vorgehen als verantwortungslos bezeichnet werden, und es führt auch in aller Regel zu unangemessenen Maßnahmen. Nur der eigene Augenschein vermittelt ein zuverlässiges Gesamtbild des historischen Tragwerks. Allein auf Grundlage einer intensiven Kenntnis des realen Objektes können verantwortungsvolle Entscheidungen getroffen werden. Besprechungen bei der Gelegenheit eines Ortstermins sind deshalb unendlich wertvoller als Diskussionen im Besprechungszimmer, weitab vom Objekt. Tragwerksplaner und ggf. Prüfstatiker müssen das Objekt auf jeden Fall aus erster Hand kennen. Man mag dies für eine Binsenweisheit halten – die Praxis sieht leider oft anders aus! Der Zeitaufwand zum Kennenlernen eines Objektes mittlerer Größenordnung ist auf jeden Fall mit mindestens einem halben Tag zu veranschlagen. Viele Kleinigkeiten sieht man erst nach längerem Aufenthalt im Objekt oder gar beim wiederholten Besuch. Gerade beim Denkmal ist auch eine gewisse Liebe zum historischen Objekt und Detail nötig.

Manchmal hört man das Argument, ein Tragwerk, das schon Jahrhunderte überdauert hat, habe allein durch diese lange Standzeit seine Sicherheit bereits experimentell nachgewiesen. Auf der anderen Seite weiß jeder, der sich schon einmal mit einem historischen Tragwerk beschäftigt hat, dass es meist sehr einfach ist, das historische Tragwerk „totzurechnen“: Anhand eines willkürlich gewählten statischen Berechnungsmodells lassen sich meist ganz schnell lokale Überschreitungen der nach Norm zulässigen Spannungen feststellen, so dass die Standsicherheit des historischen Tragwerks fragwürdig erscheint.

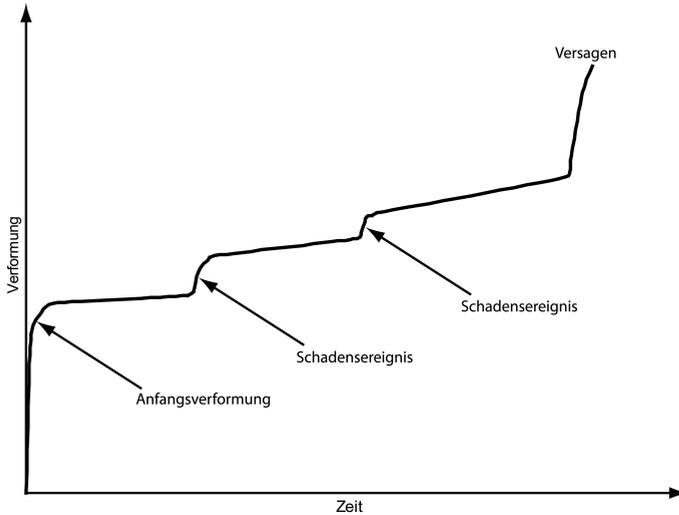
Beide Herangehensweisen werden dem historischen Tragwerk in keiner Weise gerecht. Zum einen zeigt die Tatsache, dass das historische Tragwerk noch steht, dass es einen Lastabtragungsmechanismus geben muss, der wenigstens noch einigermaßen funktioniert. Wenn der Tragwerksplaner auftritt und anhand einer kleinen Rechnung behauptet, das Tragwerk „müsste eigentlich längst eingestürzt sein“ – eine Aussage, die man gar nicht so selten hört! –, so disqualifiziert er sich selbst. Es mag sein, dass das historische Tragwerk nur noch einen minimalen Sicherheitsabstand zum Einsturz aufweist, aber eine Rechnung, die ergibt, dass das Tragwerk schon versagt haben müsste, beruht offenkundig auf übermäßigen Vereinfachungen oder fehlerhaften Annahmen und ist daher als Diskussionsgrundlage ungeeignet. In vielen Fällen ist es wesentlich einfacher, das vermeintliche Versagen der Struktur zu

berechnen, als einen Lastabtragungspfad aufzuzeigen, der wenigstens „gerade noch“ funktioniert. Dieses „gerade noch“ stellt aber dennoch die Messlatte dar, an der sich jede Strukturanalyse eines historischen Tragwerks messen lassen muss. Andererseits ist der Umstand, dass das Tragwerk noch steht, keineswegs ein Beweis für dessen Standsicherheit. Schon morgen könnte das historische Tragwerk eingestürzt sein. Spektakuläre Spontaneinstürze wie jener der achthundert Jahre alten Torre Civica von Pavia im Jahre 1989 kommen vor, sind aber glücklicherweise sehr selten.

Typischerweise verhalten sich historische Tragwerke duktil, d. h. ein bevorstehendes Versagen kündigt sich durch große Verformungen an. Die Duktilität des Tragwerks ist dabei nicht der Duktilität der Materialien zuzuschreiben (Holz und Mauerwerk versagen je nach Beanspruchung eher spröde), sondern den redundanten Tragsystemen. Selbst stark geschädigte historische Tragwerke bleiben daher oft noch lange stehen, während ein nach den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit konzipiertes modernes, ingenieurmäßiges optimiertes Tragsystem sofort in Gefahr gerät, wenn es Schäden aufweist. Bei einem statisch bestimmten System bewirkt ein Schaden eines einzigen Elementes ein Tragwerksversagen. Ein statisch unbestimmtes System kann auch mit erheblichen Schäden noch die Jahrhunderte überdauern. In ihrer vermeintlichen „Überdimensionierung“ oder Redundanz sind historische Tragwerke Musterbeispiele der heute so gern bemühten „Nachhaltigkeit“, und jede Maßnahme zur Verlängerung der Lebensdauer eines historischen Tragwerks ist auch ein Beitrag zur „Nachhaltigkeit“.

Auslöser für die Beurteilung eines historischen Tragwerks sind entweder akute Ereignisse – typischerweise der von der Decke fallende Putz – oder geplante Neu- oder Umnutzungen. Hinzu kommt insbesondere seit 2008 die „regelmäßige Überwachung baulicher Anlagen“ nach Maßgabe der „Richtlinie für die Überwachung der Verkehrssicherheit von baulichen Anlagen des Bundes“ [RÜV 2008, S. 3]. Dort heißt es: „Werden bei der Untersuchung Schäden festgestellt, die die Stand- oder Verkehrssicherheit beeinträchtigen können, ist im Zweifel ein Sachverständiger hinzuzuziehen.“ [RÜV 2008, S. 5]. Dieser Sachverständige ist in der Regel Tragwerksplaner. Für die Aufgabe der Analyse eines historischen Tragwerks ist er jedoch in seinem Bauingenieurstudium nur wenig vorbereitet worden, und einschlägige Lehrbücher fehlen. Weder kann vorausgesetzt werden, dass ein Bauingenieur von heute die typischen historischen Konstruktionsarten kennt, noch, dass er deren Tragverhalten durchschaut. Diese Lücke möchte das vorliegende Werk schließen.

Jedes historische Tragwerk hat eine lange Geschichte des Lastabtrags hinter sich. Abweichungen vom erwarteten Regelzustand, die wir heute beobachten, können unterschiedlichste Ursachen und Entstehungszeiten aufweisen. Die zeitliche Evolution der Verformungen eines historischen Tragwerks (Bild 1.1) beginnt mit einer in der Regel erheblichen Anfangsverformung. Historische Traggerüste waren weniger steif als moderne, historische Werkstoffe ebenfalls. Kalkmörtel erhärtet langsam, Zementmörtel vergleichsweise nahezu sofort. Im weiteren Verlauf der Standzeit eines historischen Tragwerks haben sich meist einzelne Schadensereignisse eingestellt, die eine ruckartige Vergrößerung der Verformungen ausgelöst haben – zeitweise ist Wasser eingedrungen, Anbauten, Aufstockungen oder Wegnahme von stützenden Bauteilen haben plötzliche Lasterhöhungen mit sich gebracht, Umnutzungen haben

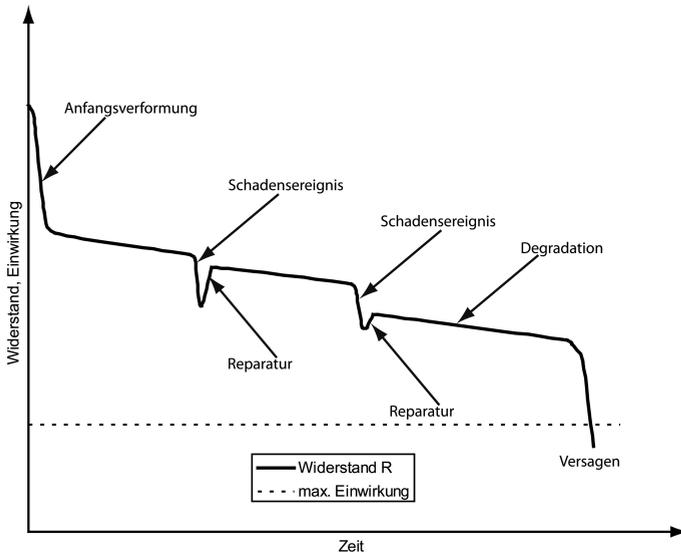


**Bild 1.1** Schematische Darstellung der Verformungsgeschichte eines historischen Tragwerks.

die Beanspruchungen erhöht. Solche punktuellen Ereignisse haben sich auf das historische Tragwerk meist stärker ausgewirkt als die allgemeine zeitabhängige Materialdegradation. Historische Tragwerke weisen oft reichlich bemessene Dimensionen auf, so dass die Spannungen in weiten Teilen des Bauwerks gering bleiben, Ermüdung also keine dominante Rolle spielt. Auch der chemische und biologische Angriff auf Konstruktionsteile aus Holz oder Mauerwerk bleibt dank kompakter Bauteilproportionen oft an der Oberfläche. Häufig sind Schäden, die wir heute sehen, schon lange vorhanden, vielfach schon kurz nach Erbauung aufgetreten. Es gibt sogar Abweichungen vom erwarteten Zustand, die überhaupt nicht als Schäden anzusprechen sind, sondern einfach Spuren der Baugeschichte oder eines bestimmten historischen Bauverfahrens sind (z. B. Risse, die sich als unverzahnte Fugen zwischen Bauteilen unterschiedlicher Entstehungszeit herausstellen). Manchmal ist es möglich, vorhandene Verformungen im Rahmen einer Ertüchtigung vorsichtig etwas zurückzuführen (z. B. Sicherung eines Gewölbes mit vorgespannten Ankern). Dies ist jedoch nicht vorrangiger Zweck einer Maßnahme.

Die Ertüchtigung hat das Ziel, falls notwendig die Standsicherheit des bestehenden Tragwerks zu erhöhen. In der Regel geht die Ertüchtigung von einem akuten Schadensereignis aus (Bild 1.2). Ziel der Maßnahme ist es nicht, ein perfektes Tragwerk herzustellen. Ziel ist es auch nicht, ein historisches Tragwerk mit unklarem Lastabtrag in ein modernes, vermeintlich folgerichtiges Tragwerk zu verwandeln.

Die Planung einer Reparatur oder Ertüchtigung setzt zunächst voraus, dass der Zustand des Tragwerks umfassend untersucht worden ist und die Ursachen der Schäden eindeutig identifiziert sind. Noch aktive Schadensursachen müssen natürlich sofort abgestellt werden, und bei Verdacht auf mangelnde Standsicherheit müssen sofortige Betretungsverbote und Notsicherungen veranlasst werden. Nach der dann durchgeführten Zustandsaufnahme kann eine Bewertung der Schäden erfolgen.



**Bild 1.2** Schematische Darstellung der zeitlichen Evolution des Tragwerkswiderstands einer historischen Struktur.

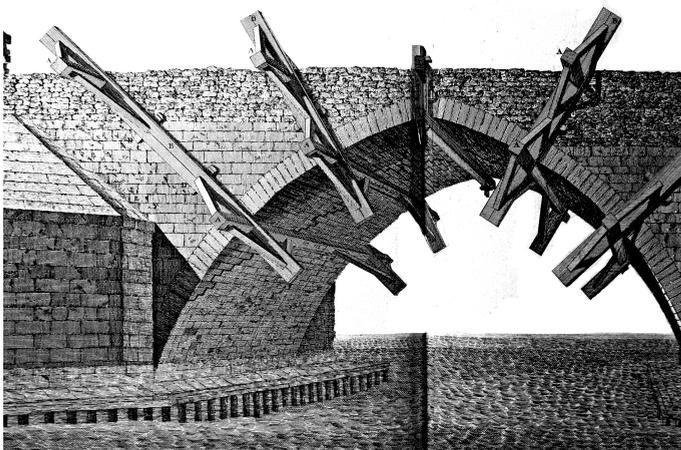
Schäden, die die Standsicherheit beeinträchtigen, sollten repariert werden. Es ist aber keineswegs immer notwendig und sinnvoll, alle Abweichungen von einem angenommenen Idealzustand zu reparieren. Manche Schäden liegen schon seit Jahrhunderten vor und das Bauwerk hat auch mit ihnen überlebt. Eine Korrektur solcher Schäden (z. B. statisch unbedenkliche Risse in Gewölben oder Wänden) führt notwendigerweise zu einer Umlagerung des Lastabtrags und kann zu unerwarteten neuen Schäden andernorts führen. Zwar ist es erfahrungsgemäß schwierig, einem Bauherrn zu vermitteln, dass das Gebäude nach der „Sanierung“ immer noch dieselben, offen zutage tretenden Risse aufweisen wird wie vorher. Einem Baudenkmal wird mit einer solchen Maßnahme aber eher ein Dienst erwiesen als mit einem eingreifenden Umbau. Für die Bewertung eines Schadens ist dessen zeitliche Evolution wichtig. Ein Schaden, der sich nicht tendenziell verschlimmert, ist weniger bedenklich als ein kontinuierlich zunehmender. Aufschluss über die Schadensevolution bieten weniger die beliebten Gipsplomben als vielmehr eine Analyse der Bau- und Reparaturgeschichte des Tragwerks, ggf. ein Langzeit-Monitoring mit geodätischen Methoden.

Zu den Standardsätzen in Festschriften zur Wiedereröffnung historischer Baudenkmäler gehören Aussagen, man habe nun endlich – nach einer Reihe nutzloser oder gar schädlicher älterer Reparaturen – eine wirksame und nachhaltige Sanierung durchgeführt. Die Beobachtung, dass wenige Jahrzehnte zurückliegende Maßnahmen heute im Rückblick oft schon wieder als schädlich betrachtet werden (z. B. „High-Tech“-Sanierungen der 1970er Jahre), sollte zu Bescheidenheit mahnen und niemand sollte derartige Sätze von sich geben: In wenigen Jahrzehnten wird unweigerlich auch das, was heute vielleicht eine gepriesene Sanierungslösung ist, seine Schatten-

seiten zeigen. Im Rückblick wird dann bedauert werden, wie viel historische Substanz durch den Sanierungseingriff verlorengegangen ist. Die optimale Maßnahme ist diejenige, die am wenigsten in die historische Substanz eines Baudenkmals eingreift. Ein Eingriff, der über das zur Herstellung der Standsicherheit Erforderliche hinausgeht, ist im Kontext eines historischen Baudenkmals unangemessen. Ein nicht ganz dringender Eingriff kann künftigen, besser informierten Generationen überlassen werden.

Jeder ältere Eingriff in ein Baudenkmal ist ebenfalls Teil von dessen Geschichte; Reparaturen legen ebenso wie Neukonstruktionen Zeugnis ab von dem zeitgenössischen Stand von Bautechnik und Bauwissenschaft. Daher sind auch ältere Reparaturen als Teil des Tragwerks unbedingt zu respektieren und in situ zu belassen, soweit sie nicht nachgewiesenermaßen schädigende Wirkung haben. In vielen Fällen sind historische Reparaturen zwar nicht voll wirksam, können aber dennoch ihren Beitrag zu einem sicheren Gesamtsystem leisten. Im schlimmsten Fall kann eine definitiv schädliche historische Konstruktion außer Funktion gesetzt werden, jedoch materiell im Bauwerk verbleiben (z. B. Unterbrechung des kraftschlüssigen Anschlusses).

Das Arbeiten am historischen Tragwerk stellt für den Ingenieur eine unkonventionelle, zur Neuplanung nicht konforme und manchmal auch schwierige Aufgabe dar. Sie ist aber auch besonders reizvoll, weil sie individuelle und lokale Lösungen fordert und keine Anwendung billiger Rezepte und „Regeldetails“ zulässt. Sie fordert vom Tragwerksplaner historisches Bewusstsein, Verantwortung und Respekt. Die Analyse und Sicherung historischer Tragwerke ist so alt ist wie das Bauwesen selbst. Aus dem 18. Jh. sind die ersten Diskussionen derartiger Maßnahmen in der Literatur überliefert. Bild 1.3 zeigt als Beispiel die Notsicherung eines Gewölbes der mittelalterlichen Brücke über die Loire bei Orléans. Diese Sicherung mutet durchaus modern an und zeugt von einem guten Verständnis der Mechanik des Brückenge-



**Bild 1.3** Sicherung der mittelalterlichen Loire-Brücke von Orléans im 18. Jh. [Pitrou 1756].

wölbes. Im Gegensatz zu modernen denkmalpflegerischen Sicherungen war diese Maßnahme allerdings nur zu Erhaltung der Brücke bis zur Fertigstellung eines daneben entstehenden Neubaus bestimmt. Bekannt sind auch die im 18. Jh. durchgeführten, auf Dauer bestimmten Ertüchtigungen an den Kuppeln des Petersdoms in Rom und des Panthéons in Paris.

Für bedeutende, ingenieurtechnisch anspruchsvolle Sicherungsarbeiten an denkmalgeschützten, historischen Bauwerken im frühen 20. Jh. steht der Name Georg Rüth (1880–1945). Rüth machte sich insbesondere mit der Unterfangung der Fundamente und mit der Sicherung der Vierungskuppeln des Mainzer Domes einen Namen. In einem zusammenfassenden Aufsatz zu diesen Arbeiten formulierte Rüth Leitsätze, die noch heute unverändert Gültigkeit haben: „Interessant ist die Verschiedenartigkeit der Ursachen, die bei alten Bauwerken zu Schäden und Zerstörungen führen. [...] Es ist deshalb in erster Linie wichtig und notwendig, sämtliche Schadensursachen aufzuklären. Die Feststellungen in dieser Art können erst dann als vollkommen bezeichnet werden, wenn sämtliche Erscheinungen und Beobachtungen an den gefährdeten Bauwerken sich restlos erklären lassen.“ [Rüth 1929, S. 249].

Nach dem Zweiten Weltkrieg erwarb sich Klaus Pieper große Verdienste bei der Notsicherung und dem Wiederaufbau kriegszerstörter historischer Tragwerke. Pieper fasste seine Erkenntnisse und Erfahrungen 1983 in seinem Buch über die „Sicherung historischer Bauten“ zusammen [Pieper 1983]. Piepers Buch wird auch heute noch gern zitiert und ist zu einem Referenzwerk geworden, obwohl sein Autor selbst es nicht als solches konzipiert hatte. Gegenüber Piepers Zeit hat sich freilich die Bauaufgabe am historischen Tragwerk heute wieder deutlich verändert: Nicht der Wiederaufbau, die Rekonstruktion des äußeren Erscheinungsbildes, gegebenenfalls auch mit modernen Techniken, sondern die möglichst wenig in die Substanz eingreifende Bestandssicherung und Ertüchtigung steht im Vordergrund. Manche denkmalpflegerischen Grundsätze, die damals beim Wiederaufbau eines kriegszerstörten Monumentes nur eine zweitrangige Bedeutung haben konnten, sind heute prominent: Sicherungen sollen möglichst wenig originale Substanz wegnehmen, sollen das vorgefundene, historische Tragwerk wieder in seine ursprünglich intendierte Wirkung zurückversetzen und sollen möglichst reversibel sein. In manchen Fällen führt die letztgenannte Forderung zur Herstellung von additiven Tragwerken, die die historische Struktur entlasten („Subsidiärtragwerke“).

Das vorliegende Buch versteht sich als Anleitung zur Analyse historischer Tragwerke. Um historische Tragwerke überhaupt vernünftig aufnehmen und beurteilen zu können, muss man zunächst die üblichen Konstruktionen kennen. Im diesem Werk werden daher typische historische Tragwerksformen vorgestellt. Oftmals hat die historische Entwicklung von einfach auszuführenden Entwürfen zu komplexeren Systemen geführt. Auch das Tragverhalten zeigt häufig eine entsprechende Entwicklung vom einfach zu durchschauenden System zum unübersichtlichen statisch unbestimmten System. Mauerwerks- und Holzkonstruktionen (in Band 2) werden in aufsteigender Komplexität präsentiert, was meist einer Besprechung in historischer Entwicklungsreihenfolge gleichkommt. Bei der Besprechung der Tragwerksformen wird auf typische Schwachpunkte hingewiesen, denen bei der Inspektion des Tragwerkes be-

sondere Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte. Historische Bauvorgänge werden erläutert, soweit sie für das Tragverhalten der Konstruktion von Bedeutung sein können. Es schließen sich Vorschläge zur statischen Modellbildung an. Dabei wurde Wert darauf gelegt, konkrete, direkt in der Praxis anwendbare Hinweise zu geben, aber auch deren theoretische Begründung mitzuteilen. Auf die vollständige Darlegung unübersichtlicher, komplett durchgerechneter Praxisbeispiele wurde zugunsten der exemplarischen Analyse typischer Einzelpunkte und Einzelfragen verzichtet, weil jedes historische Tragwerk als Ganzes ohnehin ein Spezialfall ist, der eine individuelle Betrachtung erfordert, während sich Einzelelemente historischer Tragwerke oft wiederholen und in einem Lehrbuch wie dem vorliegenden nachgeschlagen werden können. Die Praxis zeigt, dass recht einfache Tragwerksmodelle historischer Strukturen oft schon durch wenige, leicht umzusetzende Modifikationen wesentlich besser an die Realität angepasst werden können. Was solche Modellanpassungen in der Praxis oft verhindert, ist das Fehlen nachschlagbarer Zahlenwerte. Diese werden im diesem Buch geliefert.

Das vorliegende Werk ist keine Anleitung zum Nachweis einer Ertüchtigung nach geltenden Normen. Eine Ertüchtigung ist eine moderne Konstruktion und wird nach den üblichen Regeln für Neubauten geplant und nachgewiesen. Ergänzende Hinweise zur Anwendung der jeweils aktuellen Normen auf Bestandsbauten findet man in [ARGEBAU 2008]. Die wenigsten Tragwerksplaner werden damit Schwierigkeiten haben. Schwierigkeiten bereitet es vielmehr, sich in ein existierendes Tragwerk und dessen Tragverhalten hineinzudenken und die Spuren korrekt zu lesen. Dieses Buch will diese Schwierigkeiten ansprechen und somit primär eine Anleitung zum Sehen, Denken und Verstehen sein.