

Karl Krauß: Vom Materialwissen und den Bautechniken der alten Baumeister

Als Leiter der Landesstelle für Baustatik Baden-Württemberg (in Tübingen) kommt Herr Krauß in statisch problematischen Denkmalpflegefällen öfters eine ebenso verantwortungs- wie verdienstvolle Aufgabe zu: Er hat die Kompetenz, die mit den jeweiligen Patienten beschäftigten Statiker- und Prüfstatikerkollegen und die amtlich befaßten Stellen – wenn diese an die Grenzen geltender Normvorschriften gestoßen sind – von hinderlichen, im konkreten Fall nicht sinnvollen Vorschriften zu befreien.

Aus dem Fundus seiner über Jahrzehnte hin gesammelten Erfahrungen (vgl. auch Denkmalpflege Baden-Württemberg, Heft 3, 1981, 118–121) hat Herr Krauß bei einem Vortrag an der Universität Stuttgart im Dezember 1984 einige interessante und beherzigenswerte Erkenntnisse mitgeteilt. Aus der Sicht der Redaktion sind es vor allem die auf die Praxis der Denkmalpflege bezogenen Schlußfolgerungen, die den Vortrag von Herrn Krauß allen mit ähnlichen Problemen beschäftigten Gesprächspartnern zur Lektüre empfehlen.

Sieht man von Entwicklungen in neuerer Zeit ab, gibt es nur wenige Epochen, in denen sich die konstruktive Bautradition so weitgehend wandelte, wie beim Übergang von der Romanik zur Gotik. H. Straub (vgl. Literatur) faßt die wesentlichsten Neuerungen in folgenden Punkten zusammen:

1. Trennung der Mauern in tragende Pfeiler und raumabschließende Füllflächen.
2. Durchgehende Verwendung des anpassungsfähigen Spitzbogens.
3. Auflösung der Gewölbe in stützende Rippen und zwischen diese gespannte leichte Gewölbekappen.
4. Aufnahme des Gewölbeschubes durch ein klar ausgebildetes System von Strebepfeilern und Strebebögen.

Die dadurch entstandene Skelettbauweise aus nur druckbeanspruchten Baugliedern zeugt von einem so großen Einfühlungsvermögen in statische Zusammenhänge, daß sich aus heutiger Sicht die Frage geradezu aufdrängt, welche Kenntnisse gotische Baumeister besaßen.

Die antike Überlieferung und ihre Rezeption

Der Versuch, den damaligen Wissensstand anhand schriftlicher Überlieferungen zu ergründen, stößt auf eine große Lücke. Die Meister der Bauhütten gaben ihre theoretischen Kenntnisse und Erfahrungen im Zuge der anfallenden Arbeiten mündlich weiter. Vor dem Aufkommen der Drucktechnik war es im Mittelalter nicht üblich, Lehrbücher zu verfassen. Handschriftliche Aufzeichnungen einzelner Bauleute beschränkten sich auf Teilaspekte. Sicherlich gingen auch viele Schriften im Laufe der Zeit verloren. So schränkt sich die verfügbare Literatur im wesentlichen auf drei Werke ein, von denen zwei als umfassendere Abhandlungen über die zu ihrer Entstehungszeit üblichen Bauverfahren anzusehen sind.

Die älteste Niederschrift stammt von Vitruv. Er hat sei-

ne hauptsächlich in Diensten Cäsars gesammelten Bauerfahrungen seinen „Zehn Bücher über die Architektur“ zur Überlieferung an die Nachwelt anvertraut. Vitruv lebte in einer Zeit, in der das römische Bauschaffen noch weitgehend im Schatten griechischer Bautradition stand. Erst nach Veröffentlichung von Vitruvs Büchern entwickelten römische Ingenieure die Gußbetontechnik zur führenden Bauweise der Kaiserzeit. Die Baumeister Roms nutzten die dadurch eröffneten Möglichkeiten zu gewaltigen Wölbungen. Stellvertretend sei nur auf das Pantheon in Rom verwiesen, dessen ca. 42 m weit gespannte Kuppel aus Ziegelrippen und drei unterschiedlichen Betonsorten besteht. Diese Bauten kannte Vitruv nicht, weshalb in seinen Büchern nur spärliche Angaben über Gewölbe zu finden sind.

Das Jahrtausend, das zwischen Vitruv und dem Aufkommen des gotischen Konstruktionsprinzips liegt, verwehrt eine unmittelbare Bezugnahme auf sein Werk. Gegen einen Rückgriff auf seine Angaben spricht auch, daß sie erst zu Ende des 15. Jahrhunderts in gedruckter Form vorlagen. Dennoch können die handschriftlich überlieferten antiken Bauregeln nicht unbeachtet bleiben, weil von ihnen Anstöße für die Bautätigkeit der karolingischen Renaissance ausgegangen sind. Durch Briefe Alkuins an Karl den Großen und Einhardts an einen seiner Schüler ist jedenfalls belegt, daß die „Zehn Bücher über die Architektur“ damals in Hofkreisen bekannt waren. Der wiederaufkommende Massivbau verlangte Kenntnisse, die weithin verlorengegangen waren. Deshalb herrschte ein brennendes Interesse daran, das notwendige Wissen aus den spärlich überlieferten Schriften zusammenzusuchen.

Sich mit Vitruv auseinanderzusetzen, verlangt auch die zweite umfassende Schrift. Die Wiederentdeckung einer vollständigen Abschrift der zehn Bücher im Kloster St. Gallen regte Leon Battista Alberti zu Beginn des 15. Jahrhunderts an, zehn Bücher über die Baukunst zu verfassen. Seine Zeit leitete mit dem Aufsuchen alter Texte und dem Studium der überkommenen Bauwerke

die Stilepoche der Renaissance ein. Die von mir zu betrachtende Bauperiode liegt demnach zwischen diesen beiden Abhandlungen.

Direkte Hinweise auf die Grundlagen gotischen Bau-schaffens finden sich dagegen in dem Bauhüttenbuch des Villard de Honnecourt. In ihm sind Pergamente zusammengefaßt, auf denen Villard und seine Nachfolger um 1225 und danach ihnen bemerkenswerte Details skizzierten und diese Zeichnungen mit wenigen Worten erläuterten. Dieses Werk läßt erahnen, welche Fragen die führenden Köpfe der damaligen Bauhütten bewegten.

Auffallend in diesem Dokument sind die vielen geometrischen Figuren, die zur Lösung der unterschiedlichsten Aufgaben herangezogen wurden. Der behandelte Stoff reicht von rein theoretischen Problemen bis zu baupraktischen Anweisungen. So findet sich darin z. B. die Lösung der Aufgabe, die Seitenlänge eines in seiner Fläche verdoppelten Quadrates zu bestimmen, wie Angaben über die steinmetzmäßige Übertragung der Kantenneigungen von Schlußsteinen auf die rohen Steinblöcke.

Kunstgeschichtler haben schon wiederholt auf die Vorliebe gotischer Baumeister hingewiesen, die Grundrisse ihrer Bauwerke mittels einfacher geometrischer Figuren festzulegen. In zahlreichen Abhandlungen wurden entsprechende Rekonstruktionsversuche der Entwurfsprinzipien vorgestellt. Eine besondere Bedeutung nimmt dabei das gleichseitige Dreieck ein, das dem mittelalterlichen Menschen als Symbol für die Dreieinigkeit galt.

Entsprechende Untersuchungen an Einwölbungen sind weniger zahlreich. Der Grund dafür dürfte dem Umstand zuzuschreiben sein, daß Aufmaße nur noch an verformten Systemen möglich sind. Die teilweise recht beachtlichen Verschiebungen, auf die ich noch zu sprechen komme, haben die ursprünglich vorgegebene Geometrie verzerrt, so daß die Ausgangsformen nur noch verschwommen durchschimmern.

Glücklicherweise befindet sich unter den Zeichnungen des Villard eine kleine Skizze mit dem schriftlichen Kommentar: „Auf diese Weise macht man drei Arten von Bögen, indem man den Zirkel nur einmal öffnet.“ An anderer Stelle hat er festgehalten, wie die Fugenneigungen von Schlußsteinen mit dem Winkeleisen zu konstruieren sind. Die von ihm überlieferten Regeln habe ich bereits in Heft 2/1977 dieser Zeitschrift erläutert.

Diese sporadischen Überlieferungen untermauern die systematischeren Ausführungen Albertis. Er stellt drei Bogenformen vor. Neben dem Halbkreisbogen, den er als ganzen Bogen bezeichnet, nennt er den verkürzten Bogen und den zusammengesetzten Bogen. Diese drei Arten beschreibt er wie folgt:

„Ganz ist jener Bogen, welcher den halben Teil eines Kreises bildet, das heißt, dessen Sehne ein ganzer Durchmesser ist, verkürzt jener, dessen Sehne kleiner als der Durchmesser ist; dieser Bogen ist also der verkürzte Teil eines Halbkreises. Der zusammengesetzte Bogen besteht aus zwei verkürzten. Er bildet daher oben einen Winkel, da sich dort die Bögen gegenseitig schneiden, was weder bei einem ganzen noch bei einem verkürzten vorkommt.“

Die letzte Form ist demnach identisch mit dem gotischen Spitzbogen, dessen Konstruktion Villard de Honnecourt aufgezeigt hat. Der Abstand der Kreismittel-

punkte von der Symmetrieachse war je nach der Tradition der einzelnen Bauhütten unterschiedlich. H. R. Hahnloser berichtete von einem Streit, der über die vorgeschlagene Kuppelform des Domes in Florenz in der dortigen Fachwelt entbrannt war. Dem Entwurf von Brunelleschi lasteten Vertreter der örtlichen Hütte an, sein Verfasser habe sich nicht an die üblichen Konstruktionsregeln gehalten.

Diese Überlieferungen erhellen, daß Bögen und Gewölbe mit dem Zirkel entworfen wurden. Die so gewonnenen Kurven waren mit der Schnur leicht aufs Bauwerk und seine Teile zu übertragen. Der gotische Baumeister hat seine Bauwerke demnach nicht nach den Ergebnissen statischer Untersuchungen geformt, sondern anhand geometrischer Vorgaben entsprechend den gesammelten Erfahrungen entworfen.

Zwar war ihm prinzipiell bekannt, daß die Widerlager von Bögen außer den Vertikallasten auch Schübe zu übernehmen hatten, doch besaß er nur vage Vorstellungen über deren Größenordnung. Alberti bemerkte, der Schub eines verminderten Bogens sei größer als der eines Halbkreisbogens. Eine Erklärung für diese Erkenntnis oder gar ein rechnerischer Beleg war seiner Zeit verwehrt. Dies zeigen die einschlägigen Untersuchungen Leonardos da Vinci, die er dem erst 1965 entdeckten Codex Madrid anvertraut hat.

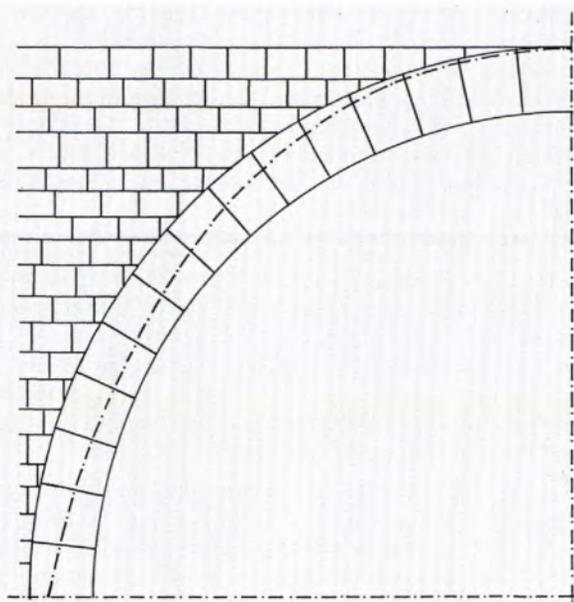
Mit einer derartigen Entwurfspraxis entsprachen die mittelalterlichen Bauhütten voll und ganz den Vorstellungen Vitruvs, der die Beherrschung der Geometrie als unverzichtbare Voraussetzung für die Tätigkeit eines Architekten hielt. Kenntnisse auf dem Gebiet der Arithmetik erschienen ihm nützlich für die Ermittlung der Baukosten. Naturwissenschaftliche Erfahrungen, wie etwa die Entdeckungen des Archimedes, waren bei ihm in der Philosophie angesiedelt.

Auch Alberti verstand die Geometrie als Grundlage der Planung und stellt im 7. Kapitel seines ersten Buches die Elemente der Begrenzungslinien vor, darunter die bereits vorgestellten Bogenformen. Der gotische Baumeister dürfte im Zenit seiner Epoche etwa über das geometrische Rüstzeug verfügt haben, das Albrecht Dürer in seinem 1525 gedruckten Buch „Unterweisung der Messung mit Zirkel und Richtscheit“ in hervorragender Weise dargestellt hat.

Bögen und Gewölbe

Untersucht man Bögen und Gewölbe des vorindustriellen Zeitalters mit den uns heute verfügbaren Methoden, erhält man meist wenig befriedigende Ergebnisse. Die statische Berechnung eines an seinen Kämpfern starr eingespannten Halbkreisbogens führt für den Lastfall Eigengewicht zu der in Abbildung 1 dargestellten Stütze-linie. Sie verläuft im Scheitel so knapp unterhalb der Oberkante, daß dieser Bereich mit klaffenden Fugen überzogen sein müßte.

Dieses Rechenergebnis steht im Widerspruch zur Wirklichkeit. Die nach einem Halbkreis geformten mittleren Bögen der Engelsbrücke in Rom haben ihre Funktion über nahezu zwei Jahrtausende hinweg erfüllt, ohne daß konstruktionsbedingte Schäden aufgetreten sind. Für den Erfolg der mittelalterlichen Entwurfsregeln stehen viele andere Bauwerke als Zeugen. Beispielhaft seien nur die steinerne Brücke zu Regensburg und die nicht abgebrochenen Bögen der Pliensaubrücke in Esslingen erwähnt.



1 STÜTZLINIE eines am Kämpfer starr eingespannten Halbkreisbogens unter Eigengewicht.

Statische Untersuchungen, die ich in den letzten beiden Jahren an der rd. 400 Jahre alten Fleischbrücke in Nürnberg anstellte, erbrachten ähnliche Ungereimtheiten. Die Berechnungen erfolgten auf Veranlassung von Herrn Prof. Dr. W. von Stromer, der eine Veröffentlichung über die Rialtobrücke in Venedig und die Fleischbrücke in Nürnberg vorbereitet. Ein erster Rechengang, den ich unter der Annahme elastostatischen Verhaltens der ungerissenen Querschnitte vollzog, führte zu einem unglaublichen Ergebnis. Nach Änderung der Steifigkeitsverhältnisse entsprechend den theoretisch zu erwartenden Rissen erhielt ich die auf Abbildung 2 oben dargestellte Näherungslösung. Nach diesem Bild, in dem die Höhen gegenüber den Längen im Verhältnis 2:1 verzerrt gezeichnet sind, müßten sowohl am Kämpfer als auch im Scheitel der Brücke einige Risse vorhanden sein. Trotz mehrfacher gezielter Untersuchungen am Mauerwerk fand ich weder derartige Risse noch Flickstellen.

Bei der Sichtung des Archivmaterials über diese Brücke stieß ich schließlich auf eine Angabe über die Bauzeit ihres Bogenmauerwerks. Danach senkte man im September 1598 das im Juli desselben Jahres fertiggestellte Lehrgerüst ab. Der rd. 27 m weit gespannte Brückenbogen muß folglich in etwa 2 Monaten gemauert worden sein.

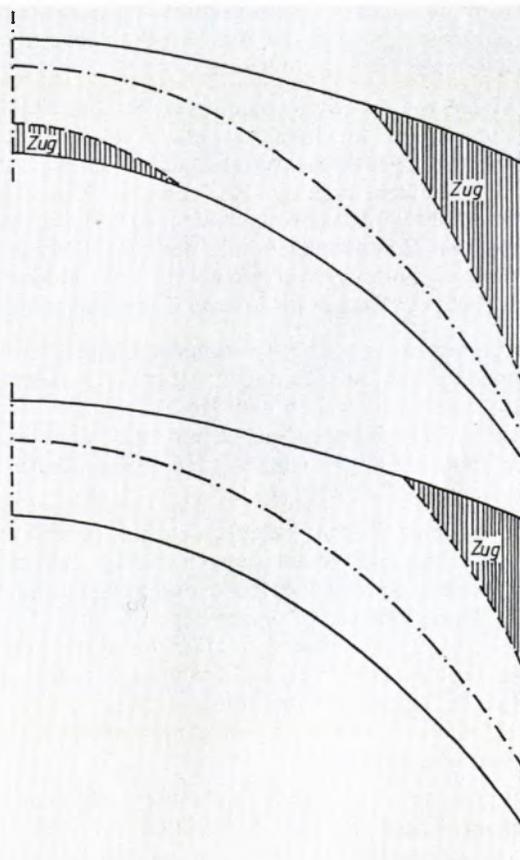
Dieses überraschende Arbeitstempo legte es mir nahe, mich dem Verhalten des nach einer so kurzen Bauzeit noch kaum karbonatisierten (abgebundenen, noch weichen) Kalkmörtels zuzuwenden. Leider fand ich zu diesem Problem bis heute noch keine wertbaren Angaben. Weitere statische Nachrechnungen mußte ich deshalb auf hypothetische Annahmen aufbauen. Die Unterstellung von plastischen Verformungen in dem noch jungen Fugenmörtel führte zu der auf Abbildung 2 unten dargestellten Stützzinie. Wie ersichtlich ist die vorher errechnete Zone im Scheitel des Brückenbogens, in der eine deutliche Zugspannung zu Rissen hätte führen müssen, verschwunden.

Durch dieses Abtasten des Mörtelinflusses sensibilisiert las ich mich erneut in Albertis Werk ein und fand

im 14. Kapitel seines dritten Buches folgende, in ihrer Bedeutung früher nicht erkannte Ausführung über das Ausrüsten von Gewölben:

„... Und außerdem ist es gut, bei eingerüsteten Gewölben dort, wo (= sobald) sie durch die obersten Keilsteine geschlossen sind, die Unterlage ein wenig nachzulassen, sozusagen durch welche das Gerüst getragen wird, und zwar deshalb, damit nicht die frisch vermauerten Keilsteine zwischen ihrem Bett und dem Kalkmörtel schwimmen, sondern daß sie untereinander ausgeglichenen ruhigen Sitz bei vollständigem Gleichgewicht einnehmen. Geschieht dies aber während des Trocknens, so würde sich das Mauerwerk nicht, wie es erforderlich ist, zusammengedrängt zusammenhalten, sondern beim Setzen Sprünge hinterlassen. Deshalb geschehe es so: das Gerüst soll nicht geradezu weggenommen, sondern von Tag zu Tag allmählich gelockert werden, damit nicht das noch frische Mauerwerk nachfolge, wenn Du es vorzeitig entfernst. Nach einigen Tagen aber, je nach der Größe der Wölbung, lockere es immer noch ein bißchen. Und fahre dann fort, bis sich die Keilsteine an dem Gewölbe zueinander passen und das Mauerwerk erhärtet. Die Art des Lockerns ist folgende: Wenn Du das Gerüst für die Wölbung auf Pfählen, oder worauf es gerade paßt, aufgestellt hast, dann treibe zuerst dort an den Enden des Gerüstes Holzkeile ein, welche wie eine Doppelaxt zugespitzt sind. Will man nun das Gerüst nachlassen, so kannst Du mit einem Hammer diese Keile allmählich ohne Gefahr auseinanderreiben, soviel Du willst. Dennoch bestimme

2 FLEISCHBRÜCKE in Nürnberg (Längsschnitt durch die halbe Brücke, Maßstabsverzerrung: Länge/Höhe = 1/2). Änderung der Stützzinie für Eigengewicht bei Annahme plastischer Verformungen in den Mörtelfugen.



ich, daß man nicht früher, als bis der Winter vollständig vorüber ist, die Gerüste wegnehmen darf...“.

Mag dieser Text in der vorliegenden Übersetzung auch unpräzise sein, so meine ich doch, einige Angaben herauslesen zu können, die in Richtung meiner Vermutungen deuten. Alberti wußte jedenfalls, daß die sofortige Totalausrüstung ebenso zu Schäden am Mauerwerk führen kann wie die plötzliche Freisetzung des bereits getrockneten Gewölbes. Deshalb empfiehlt er eine sofortige Lockerung des Lehrgerüsts, die über längere Zeit fortgesetzt werden soll, damit sich der noch frische Luftkalkmörtel plastisch verformen kann. Damit zeigt er die Möglichkeit auf, durch Steuerung des Arbeitsablaufes das statische Verhalten des Mauerwerkes zu beeinflussen.

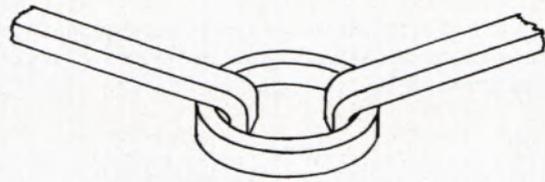
Sicherlich sind damit nicht sämtliche Rätsel gelöst, die uns alte Bauwerke aufgeben. Der zitierte Text warnt indes davor, sie ausschließlich aus unserem Zeitgeist heraus lösen zu wollen. Offenbar waren den gotischen Baumeistern Regeln bekannt, die uns verlorengegangen sind.

Die im Mittelalter selbstverständliche Verknüpfung von Architektur und Ingenieurkunst hat G. Dehio zu der Aussage veranlaßt: „Struktur und Dekoration sind eins geworden“. Diese Feststellung muß erweitert werden. Auch Planung und Ausführung gingen Hand in Hand. Dieses universelle Baugeschehen ist unserer Zeit fremd geworden, die einer immer mehr auseinanderstrebenden Spezialisierung huldigt. Eine Rückbesinnung würde uns nicht nur die Augen für die Belange unserer Baudenkmale öffnen; sie könnte auch lehren, die Mittel zum Zweck als solche zu begreifen und ihnen nicht zuviel Eigenwert beizumessen. Wird man als statisch versierter Bauingenieur zur Beurteilung von gotischen Bauwerken zugezogen, können die verformungsreichen Bauweisen ihrer Entstehungszeit nicht außer Betracht bleiben. Hier sei nur auf die Verschiebung der Obergadenwände in Basiliken verwiesen, die sie bereits zur Bauzeit beim Absenken der Gewölbeeinrüstung erfahren haben. Da Steinmetzen und Maurer beim Hochziehen eines Joches die Verformungen des vorher festgestellten beachten mußten, traten Aufsummierungen der Horizontalabweichungen ein, die einem Mann, der in seiner alltäglichen Arbeit bedacht ist, möglichst vertikal stehende Stützen und Wände zu errichten, das Fürchten lehren können. Deshalb halte ich einfühlsame Sanierungsmaßnahmen für angebracht.

Zur Verwendung von Zugankern

Wie eingangs gesagt, stellen Strebebögen und Strebe Pfeiler ein Skelett dar, das Druckkräfte ableitet. Abgesehen vom Dachgebälk fehlen Zugglieder in der Regel. Der Verzicht auf derartige Bauglieder hat zu der Meinung geführt, die Wirkung von Zugankern sei in der Gotik unbekannt gewesen.

Alberti vermittelt indes einen anderen Eindruck, wenn er im zwölften Kapitel seines ersten Buches sogenannte Schließen erwähnt, die Bögen in Spannung halten würden. Die Bedeutung des von ihm gebrauchten Wortes wird durch die im nächsten Abschnitt folgende Erläuterung klar. Dort stellt er nämlich fest, daß für einen Bogen, der bis zum Baugrund herabreiche, das Erdreich seine natürliche Schließe sei. An anderer Stelle berichtet er, bei einem verminderten Bogen könne eine eiserne Kette nützlich sein, falls man keine zu großen Wi-



3 FREIBURGER MÜNSTER, Hahnentürme. Verbindung der eisernen Zuganker.

derlager bauen wolle. Er kannte demnach die Wirkungsweise eines Zugbandes. Auch Leonardo da Vinci hatte klare Vorstellungen über die Aufgabe einer den Bogen schließenden Kette.

Die Baumeister Karls des Großen legten um die Kuppel der Pfalzkapelle in Aachen einen achteckigen Zuggurt aus Eichenholz, der einige Jahrhunderte später durch eine schmiedeeiserne Konstruktion ersetzt wurde. Noch Brunelleschi nutzte die Zugfestigkeit von Holz zur Umschließung der Domkuppel in Florenz. Am Freiburger Münster sind die Hahnentürme, die mit zu den ältesten Bauteilen des Gotteshauses gehören, von schmiedeeisernen Ankerbarren gefaßt, die in der Erbauungszeit eingemauert wurden. Wie in Abbildung 3 dargestellt, greifen sie mit Haken in handgeschmiedete Ringe ein und sind dort durch Bleiverguß gehalten.

Auch die aufgelöste Pyramide des Westturmes steht auf einem umlaufenden eisernen Ankerbarren von beachtlichem Querschnitt. Ihre Grate münden in aufgeschmiedeten Schuhen. Allein diese Konstruktion läßt erahnen, welche Schwierigkeiten Schmiede der gotischen Stil- epoche bei der Metallverarbeitung zu bewältigen vermochten. Diese Meisterleistung ist zwar nicht einsehbar, wer sich jedoch die Mühe macht, den Turm zu besteigen, kann im Oktogon unter dem Turmhelm mehrere eiserne Anker bewundern, die frei durch die offenen Maßwerkfenster verlaufen und die Ecken des stark durchbrochenen Mauerwerkes miteinander verbinden.

Zu den Baumaterialien

Mit der Erwähnung dieser Eisenanker bin ich bereits zu den Werkstoffen gelangt. In erster Linie sind hier behauene Werksteine und gebrannte Ziegel nebst dem sie verbindenden Mörtel zu nennen.

Gotische Plastik und Steinverzierungen offenbarten die hohe Blüte der Steinverarbeitung und das Können der Steinmetze. Mit Zweispitz, Meißel und Fläche formten sie Steinrohlinge zu maßgenauen und formschönen Werkstücken. Dabei schreckten sie nicht vor hartem und schwer zu bearbeitendem Material zurück, vielmehr schieden sie weichere und stichbehaftete, d. h. von Fehlstellen durchzogene Steine aus. Erst einer späteren Zeit blieb es vorbehalten, das als ungeeignet ausgesonderte Material zu verarbeiten.

Der Fugenverlauf läßt häufig erkennen, daß das tragende Gerippe und die raumabschließenden Wände von unterschiedlichen Arbeitsgruppen gemauert wurden. Die Maurer befestigten die einzelnen Steinblöcke mit den Hebewerkzeugen „Wolf“ oder „Zange“ am Kranseil, das um die Welle eines Tretrades lief und sich durch Aufspulen bei dessen Bewegung verkürzte. Die maschinell hochgezogenen Werksteine verlegten die

Arbeiter in ein saftiges Mörtelbett, in das sie kleine Steinplättchen (Schiefer, Kieselsteine, bisweilen auch Keramikscherben oder Hölzchen) eingelegt hatten, um ein Ausquetschen des Mörtels unter dem Gewicht der Auflast zu verhindern.

Mörtel

Regeln, die bei der Auswahl von Tonerden für Backsteine und ihrer Aufbereitung zu beachten waren, hat bereits Vitruv festgeschrieben. Alberti griff diese Überlieferungen auf und warnte davor, kalkhaltige oder zu sandige Erden zu verwenden. Er geht auf die Maßnahme ein, die ihm bei der Herstellung der Ziegel und ihrer Lufttrocknung zweckmäßig erschienen. Im Hinblick auf einen ausreichenden Brand riet er zur Wahl eines dünnen Steinformates.

Als Mischungsverhältnis für Mörtel gab Vitruv an, daß einem Teil gelöschten Kalk drei Teile Grubensand oder zwei Teile Flußsand zugemischt werden sollten. Bei letzterem Mischungsverhältnis schlug er vor, einen dritten Teil gestoßenes und gesiebtes Ziegelmehl zuzugeben. Im Brennofen seiner Zeit dürften kaum Temperaturen über 700 °C entstanden sein, weshalb dieser Zuschlag hydraulische Eigenschaften besaß und mit dem Kalk zementartige Verbindungen einging. Zu Albertis Zeiten war die mit Ziegelmehl erzielbare Festigkeitssteigerung noch bekannt, denn er schrieb im 4. Kapitel seines dritten Buches: „Mischt man ein Drittel gestoßener Tonscherben hinein, so versichern alle, daß der Mörtel viel haltbarer sein werde“.

Die Betoneigenschaft, die Kalkmörtel durch die Zugabe von Puzzolanerde erhält, war Vitruv wohl bekannt, erlebte er doch noch den Beginn des Masseneinsatzes von Gußbeton. Über ihre Verwendung teilte er mit: „Mit Kalk und Bruchstein gemischt gibt sie nicht nur den übrigen Bauwerken Festigkeit, sondern auch Dämme werden, wenn sie damit im Meere gebaut werden, im Wasser fest.“

Bis zu Alberti ist diese Überlieferung durchgedrungen. Er berichtet, daß bei Pozzuoli ein Pulver in großer Menge vorkomme, das im Meerwasser erhärtet und zu Stein wird. Von ihm stammt auch die Nachricht, Nero habe dort einen Berg durch viele tausende Menschen abgraben lassen; eine Mitteilung, die den Bedarf an hydraulischen Bindemitteln verrät, der im kaiserlichen Rom herrschte.

Das Wissen um die Gußbetontechnik ging in der Völkerwanderungszeit zwar weithin verloren, doch scheinen gewisse Kenntnisse über Zuschläge mit hydraulischen Eigenschaften weitergereicht worden zu sein. Anders sind die teilweise hervorragenden Mörtelqualitäten nicht zu erklären, auf die man bei Bauten des Mittelalters stößt.

Häufig wird behauptet, damals sei nur in der Grube gelöschter und ausgereifter Kalk verwendet worden. Dieses Bindemittel mag zwar vorherrschend gewesen sein, doch kamen daneben Mörtel zum Einsatz, denen frisch gebrannter Kalkstein zugesetzt war. Um den Unterschied deutlich zu machen, muß ich auf die Kalkherstellung eingehen. Der Kalkbrenner zerschlug geeignet erscheinende Steine in kleine Stücke und schichtete diese im Schachtofen abwechselnd mit Holz. Nach Füllung des Ofens entzündete er das Brennmaterial und sorgte für eine mindestens 60stündige Brenndauer. Da

ihm der dabei einsetzende chemische Umwandlungsprozeß unbekannt war, überprüfte er die Qualität des gebrannten Kalkes durch die Waage. Schon Vitruv zeigte auf, daß gut gebrannter Kalk um ein Drittel weniger wiegen dürfte als das Ausgangsmaterial.

Die gebrannten Gesteinsbrocken übergießte man mit Wasser und lagerte die dabei entstehende Breimasse über Jahre in einer gut abgedeckten Lehmgrube. Nicht voll durchgebrannte und somit schwerere Steinteile sanken auf den Boden. Auch alle hydraulisch wirkenden Bestandteile banden unter Wasser ab und trennten sich auf gleiche Weise von dem Kalkbrei. Der sich über Jahre hinziehende Trennungsprozeß führte zu folgender Regel: Das obere Drittel des ausgereiften Kalkes eigne sich für Verputz und Anstrich und das mittlere Drittel für Mörtel. Das mit sogenannten Grieben durchsetzte untere Drittel sei dagegen für das Bauhandwerk unbrauchbar.

Bei dem Grubenkalk handelt es sich demnach um einen reinen Luftkalk, der zwar durch Austrocknen steif wird, seine eigentliche Festigkeit jedoch erst durch die Einwirkung von Kohlendioxyd erreicht. Wie gezeigt, wußten gotische Baumeister den allmählich ablaufenden Prozeß sinnvoll zu nutzen.

Wird der gebrannte Kalk jedoch nicht in der Grube gelagert, sondern unmittelbar nach dem Löschen zu Mörtel verarbeitet, können darin enthaltene hydraulische Bestandteile wirksam werden. Ein frisch zubereiteter Mörtel aus gebrannten Kalksteinen mit Mergelanteilen erhärtete wesentlich früher und erreichte die einem Mörtel mit Naturzement eigene höhere Festigkeit.

Auf die zwei Mörtelarten wies der Chemieprofessor J. F. John bereits in seinem Buch über Kalk und Mörtel hin, das die Buchhandlung Duncker und Humblot 1819 in Berlin mit einer Widmung an Alexander von Humboldt druckte.

In Verfolgung der von der Holländischen Gesellschaft der Wissenschaften aufgeworfenen Frage, ob aus Muschelschalen ein brauchbares Bindemittel hergestellt werden könnte, untersuchte John viele alte Mörtelproben u. a. aus den Fundamenten der ehemaligen St. Petrikirche zu Berlin.

Zu seiner nicht geringen Überraschung konnte er bei einigen der untersuchten Mörtelproben wesentlich weniger Kohlensäure abspalten als bei anderen. Bei weiteren Analysen stieß er auf Kiesel- und Tonerde. Die bei den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse faßte John in 9 Hauptsätze zusammen, von denen der erste lautet:

„Es gibt zwei Arten Mörtels; der eine ist ein inniges Gemenge von kohlenurem Kalk und steinigem Gemengeteilen, welche mit jenem stark adhären; der andere enthält außerdem eine tafelspatartige Masse, welche ich das Cäment im Mörtel genannt habe. In vielen Arten der gemeinen Kalksteine sind die zur Bildung desselben nötigen Elemente schon enthalten, und es entsteht in demselben durch das Brennen in Folge der Wirkung ätzender Alkalien auf unauflösliche Oxyde analoger Art und Weise.“

Bei Sanierungsarbeiten am Ulmer Münster entnahm man um 1925 dem Fundamentmauerwerk Mörtelproben, die eine Festigkeit bis zu 12 N/mm² auswiesen. Eine derartige Qualität wäre mit reinem Luftkalkmörtel, noch dazu in einem Bereich mit geringerem Kohlensäure-

reangebot, nicht erreicht worden. Bei vielen anderen Bauwerken, wie z. B. der staufischen Stadtmauer in Waiblingen und der Zehntscheuer in Bad Waldsee, bin ich auf ähnlich festen Mörtel gestoßen.

Die Meinung, die Maurermeister des Mittelalters hätten als Bindemittel nur den grubengereiften Luftkalk gekannt, ist nicht haltbar. An Bauhöfen ist in unseren Tagen noch bekannt, es sei auch warmer Mörtel verwendet worden, der eine besondere Festigkeit erreicht habe. Beim Löschen des gebrannten Kalkes wird Wärme freigesetzt; mit frisch gelöschtem Kalk angemachter Speiß, den auch Alberti nebenbei erwähnt, ist demnach von Natur aus warm.

Bleifugen

Bis in unsere Tage werden metallische Steinverbindungen hergestellt, indem der Steinmetz aufeinander abgestimmte Öffnungen aufmeißelt und diese mit flüssigem Blei vergießt. Alberti warnt vor dem Zerspringen der Steine, das einträte, wenn man zuviel flüssiges und noch heißes Blei in die Zapfenlöcher gieße. Auch metallene Dübel- und Klammerverbindungen aus Buntmetallen waren üblich. So werden auch heute z. B. die Einzelteile von Fialen in der Querschnittsmitte durch eingeleitete oder eingemörtelte Metalldübel (aus Bronze oder rostfreiem Stahl) miteinander verbunden. Sie sind so elastisch, daß sie mit bloßer Hand spielend um mehrere cm bewegt werden können. Hier sei mir die Frage erlaubt: Wie groß sind bei Fialen die Kräfte infolge Windbelastung rechnerisch anzusetzen, wenn sie unter Windböen hin und her pendeln können?

Bauholz

Schließlich muß ich noch auf Bauholz eingehen, aus dem nicht nur die Masse der Profanbauten bestand, sondern das auch für die Dächer und Fundamente von Massivbauten benötigt wurde. Am Rande sei nur bemerkt, daß Holz der wesentlichste Rohstoff des Mittelalters war.

Die gotischen Baumeister setzten insbesondere die Pfeiler und Widerlager gemauerter Brücken auf Pfahlroste, die sie Bürsten nannten. Dieser Begriff ist kennzeichnend für die Ausführung dieser Fundierung. Nach Aushub der Baugrube bis zum Grundwasserspiegel rammten sie angespitzte Baumstämme in sich kreuzenden Reihen in den Baugrund ein. Anschließend schlugen sie die verbliebenen Zwischenräume mit dicht an dicht stehenden kürzeren Pfählen aus. Die so erzielten schwimmenden Gründungen, haben sich – wie das Alter und der Zustand daraufstehender Bauwerke lehrt – durchaus bewährt. Nur dort, wo der Grundwasserspiegel gesenkt wurde, traten Schäden auf.

Den Rammvorgang selbst beschrieb Alberti so:

„Die Maschinen zum Schlagen der Pfähle müssen, wie immer sie sind, einen nicht sehr schweren, aber in häufigem Stoß auffallenden Schlägel haben. Denn wenn sie zu schwer sind, zersplittern sie das Holz vollständig, da ihre Last ungeheuer und ihr Anprall unerträglich ist. Die Häufigkeit aber lockert durch ihre Unablässigkeit alle Hartnäckigkeit und Starrheit des Bodens.“

Im Rahmen dieses Vortrages noch auf die Holzkonstruktionen der gotischen Zimmerleute eingehen zu wollen, würde den gesetzten Rahmen sprengen. Deshalb möchte ich nur noch einen Aspekt streifen, der immer wieder Sorgen bereitet. Ich meine die Beurteilung alter Holzkonstruktionen anhand heutiger Normen.

DIN 1052 basiert auf Versuchsergebnissen mit heute üblichem Schnittholz, das von den Sägewerken vorsortiert geliefert wird. An der Güteauswahl ist der Zimmermeister selbst nicht mehr beteiligt. Im Mittelalter pflegte er in der Regel das im kommenden Jahr benötigte Holz im Herbst selbst einzuschlagen. Indem er dann mit dem Breitbeil aus den Stämmen Balken zuschlug, erspürte er bei jedem Beilhieb mit der Hand, welche Qualität das Holz besaß. Entsprechend dieser Erfahrung legte er die Verwendung der Balken fest.

Beim Beilen gleitet die Schneide den Fasern entlang, stört diese also weniger als die Gattersäge, die auch aus krummen Stämmen gerade Balken und Bretter mit entsprechenden Faserneigungen schneidet. Außerdem wird mit dem Beil das um die Äste liegende Hartholz weniger geschädigt.

Stellt man sich zudem die hohe Streuung der Holzfestigkeiten vor Auge und bedenkt, daß aus dem Stamm gesägte Viertelhölzer bei gleicher Holzgüte etwa 20% weniger tragen als das sogenannte Vollholz, ist leicht einzusehen, warum gotische Zimmermeister den von ihnen ausgewählten Hölzern mehr zumuten konnten, als uns die Norm erlaubt. Deshalb erscheint es mir wenig sinnvoll, Sanierungen von Baudenkmälern auf der Basis heutiger Regelwerke durchführen zu wollen. Notwendig ist vielmehr eine individuelle Beurteilung jedes einzelnen Objektes.

Meine Ausführungen können sicherlich nicht den Anspruch erheben, das Thema erschöpfend behandelt zu haben. Ich würde mich jedoch freuen, wenn sie bei einem oder dem anderen Leser den Wunsch geweckt hätten, selbst weiter in die technische Baugeschichte einzudringen und verlorengegangenes Wissen wieder aufzufinden.

Literatur:

- H. Straub: Die Geschichte der Bauingenieurkunst, Basel und Stuttgart 1964.
- C. Fensterbusch: Vitruv – Zehn Bücher über Architektur, Darmstadt 1964.
- M. Theurer: Leon Battista Alberti – Zehn Bücher über die Baukunst, Darmstadt 1975.
- H. R. Hahnloser: Villard de Honnecourt, Graz 1972.
- C. Zammattio, A. Marinoni und A. M. Brizio: Leonardo der Forscher, Stuttgart und Zürich 1981.
- John Fitchen: The construction of gothic cathedrals, a study of medieval vault-erection, Oxford 1961.

*Ltd. RBD Karl Krauß
Landesstelle für Baustatik Baden-Württemberg
Nauklerstraße 47
7400 Tübingen*