

ENTWURFS- UND DETAILPLANUNG IN SPÄTGOTISCHEN GEWÖLBEN – ZWISCHEN SPÄTMITTELALTERLICHER WERKZEICHNUNG UND FRÜHNEUZEITLICHER STEREOTOMIE

Zusammenfassung

Auf der Grundlage von detaillierten Vermessungen und geometrischen Analysen spätgotischer Gewölbe wird die geometrische Konzeption des Rippenwerks sowie die Planung der einzelnen Bauteile in komplexen Steinkonstruktionen am Übergang vom späten Mittelalter zur Frühen Neuzeit rekonstruiert. Dabei werden die einzelnen Schritte der Steinplanung, insbesondere von räumlich gekrümmten Rippenbögen und deren Kreuzungen, in praktischen Experimenten untersucht sowie die Entwicklung der angewandten Geometrie und die Bezüge zu frühen Traktaten der Stereotomie diskutiert.

Abstract

On the basis of detailed surveys and geometrical analyses of late Gothic vaults, the geometric concept of the rib systems as well as the design of the single building elements in complex stone structures at the transition from the late Middle-Ages to Early Modern are reconstructed. The single phases of the stone planning are analyzed in full-scale elements, focusing in particular on ribs with spatial curvature and their intersections. Further, the historical development of applied geometry and the relation to early modern treatises of Stereotomy are discussed.

Das räumliche Kurvensystem und seine Einzelteile

Für den Bau der komplexen Werksteinkonstruktionen spätgotischer Gewölbe, deren Bögen räumliche Kurvensysteme mit zuweilen dreidimensionalen Krümmungen beschreiben, mussten Verfahren zur geometrischen Beschreibung entwickelt werden, die sich exakt darstellen und fehlerfrei reproduzieren ließen, um auf der Basis des Entwurfs die einzelnen Bauteile herstellen

und am Bau passgenau montieren zu können. Solche Verfahrensweisen sowie generell die in der Planungspraxis angewendeten geometrischen Konzepte sind immer in ihrem spezifischen historischen Kontext zu interpretieren – sie unterliegen einer historischen Entwicklung und können uns zugleich einen Einblick in die »Wissensgesellschaft« geben, in der die Bauten entstanden sind.

Bisher wurden diese Prozeduren nicht gänzlich verstanden, weil sie in den bekannten Quellen und Zeichnungen nicht detailliert dargestellt sind, und weil sie sich grundsätzlich von der modernen Planungspraxis unterscheiden.¹ Generell hat allerdings die Art und Weise, wie die geometrische Konzeption und ihre Vermittlung von der Planung zur Ausführung erfolgt, wesentliche Auswirkungen auf die Form des gebauten Artefaktes.²

Dies bringt nicht nur offene Fragen für das Verständnis der Bauten und ihrer Form mit sich, sondern auch ganz unmittelbare Probleme für den konservatorischen Umgang mit den Baudenkmalern. So konnte für die mitunter erforderliche Nachbildung von Werksteinbauteilen in geometrisch komplexen Konstruktionen bisher nicht auf historische Verfahrensweisen bei Planung und Anreißern zurückgegriffen werden, um die Form exakt und originalgetreu zu reproduzieren.³

Anhand von detaillierten Vermessungen und geometrischen Analysen der gebauten Objekte konnten wir in mehreren Bauten die geometrische Konzeption von komplizierten dreidimensionalen Rippensystemen spätgotischer Gewölbe klären.⁴ Vor diesem Hintergrund ergab sich

¹ Zur Charakterisierung des Entwurfsprozesses im spätgotischen Gewölbebau: Wendland, David: *Reverse Engineering und Experimentelle Archäologie – Forschungen zu Bau, Planungsprinzipien und Entwurfskriterien spätgotischer Zellengewölbe*. In: Schröck, Katja; Wendland, David (Hg.): *Traces of Making. Entwurfsprinzipien von spätgotischen Gewölben/Shape, Design and Construction of Late Gothic Vaults*. Petersberg 2014. In diesem Zusammenhang sei auch auf den von Werner Müller vorgeschlagenen Begriff des »technologischer Stilvergleichs« verwiesen.

² Müller, Werner: *Naturwerkstein in der Denkmalpflege: Die figurierten Rippengewölbe der deutschen Spätgotik*. In: Graefe, Rainer; Tomlow, Jos (Hg.): *Wölbkonstruktionen der Gotik I (Konzepte SFB 230, Bd. 33)*. Stuttgart/Tübingen 1990, S. 123–141.

³ Beispielsweise wurden bei der Rekonstruktion des Gewölbes in der Dresdner Schlosskapelle die Werksteine der Gewölberippe nicht mit historischen Verfahren angerissen, sondern basierend auf einer parametrischen Formbeschreibung nachgebildet: Anwand, Jens-Uwe: *Der Planungsprozess*. In: Das Schlingrippengewölbe der Schlosskapelle Dresden. Altenburg 2013, S. 70–95; Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg: *Die Ausführung des Schlingrippengewölbes in der Schlosskapelle Dresden*. In: ebd., S. 128–146; Wendland, David: *Wie haben die spätgotischen Architekten die Kurven der Bogenrippen konstruiert?* In: ebd., S. 34–38.

⁴ Die Forschungen zu den Entwurfsprinzipien spätgotischer Gewölbe erfolgten im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrats als ERC Starting Grant geförderten Projekts »Design Principles in Late-Gothic Vault Construction – A New Approach Based on Surveys, Reverse Geometric Engineering and Reinterpretation of the Sources« (N° 284373); die Bauuntersuchungen in Meißen wurden durchgeführt von D. Wendland (P.I.), M. Aranda Alonso, A. Kobe, C. Mai, K. Schröck und M. J. Ventas Sierra. Die experimentellen Untersuchungen zur Steinplanung fanden im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrats als ERC Proof of Concept Grant geförderten Projekts »Late Gothic vaults and their complex stone members: Recovering historical design procedures, implementing knowledge in restoration practice« (N° 693779) statt, durchgeführt von D. Wendland (P.I.), C. Mai, M. J. Ventas Sierra (TU Dresden), gemeinsam mit F. Degenève und N. Eberhardt (Fondation de l'Œuvre Notre-Dame, Strasbourg). Kooperationspartner für die praktischen Versuche waren die Münsterbauhütte und die Friedrich-Weinbrenner-Gewerbeschule Freiburg i. Br., die Staatliche Dombauhütte Passau sowie die Dombauhütte Köln.

auch die Möglichkeit einer Neuinterpretation der bekannten zeitgenössischen Quellen wie technischer Literatur und Zeichnungen. Unter anderem konnte dabei das besondere, von der modernen Auffassung abweichende Verhältnis zwischen Detail und Gesamtkonzept in spätgotischen Gewölben gezeigt sowie Aussagen zur Bedeutung von Proportionssystemen und der den Entwürfen zugrundeliegenden Vorstellungen der Mechanik getroffen werden.⁵

Auf dieser Grundlage war die Frage zu klären, wie die einzelnen Werksteinelemente, insbesondere die räumlich gekrümmten Rippensegmente und die komplexen mehrschichtigen Rippenkreuzungen geplant, angerissen und hergestellt worden sein könnten. Da sich aus den Quellen keine expliziten Aussagen zu den Verfahrensweisen gewinnen lassen, konnten diese nur anhand eng mit den Analysen der Bauten verknüpfter praktischer Experimente untersucht werden. Die Experimente zum Planungsprozess und Anreißen der Werkstücke wurden gemeinsam mit Frédéric Degenève und Nicolas Eberhardt von der Straßburger Münsterbauhütte durchgeführt, die ihre Expertise zur spätmittelalterlichen Steinbearbeitung und zur praktischen Stereotomie eingebracht haben. In einer zweiten Phase wurden einzelne Werkstücke auf Grundlage des rekonstruierten Planungsprozesses experimentell nachgebildet.

Im Ergebnis können wir ein umfassendes Bild über den Planungsprozess mit einem von der Gesamtkonzeption bis zum Anreißen der einzelnen Werksteine kohärenten Verfahren zur Diskussion stellen. Darüber hinaus sind wir in der Lage, allgemeine Schlussfolgerungen über spätmittelalterliche und frühmoderne Planungspraktiken für Steinkonstruktionen zu ziehen und eine neue Interpretation der frühen Traktate der Stereotomie zu skizzieren.

Die Experimente wurden anhand zweier emblematischer Gewölbe durchgeführt, deren geometrische Eigenschaften durch detaillierte Vermessungen und Analysen umfassend bekannt waren, und an denen durch vergleichende Studien zur historischen technischen Literatur mögliche Lösungswege für die hier gestellten Fragen aufgezeigt werden konnten. Zum Einen handelt es sich dabei um das von Jakob Heilmann 1519 in der Sakristei der St.-Annenkirche in Annaberg errichtete Gewölbe, das ein eng verschlungenes System aus räumlich gekrümmten Rippen und komplizierte Knoten mit einer starken Höhenstaffelung aufweist, auf das an dieser Stelle nur wegen bestimmter geometrischer Befunde an den Rippen Bezug genommen wird.⁶

Das andere Studienobjekt, welches Schritt für Schritt nachgebaut wurde, ist das ebenfalls von Jakob Heilmann 1521 errichtete Gewölbe im sogenannten Wappensaal der Albrechtsburg in Meißen (Abb. 1). Das Gewölbe überspannt einen Raum mit quadratischem Grundriss

⁵ Wendland 2014 (Anm. 1); ders.: *Load bearing matters: Considerations on geometrical and structural design in Late Gothic vaults*. In: Campbell, James W. P.; Bill, Nicholas; Driver, Michael u. a. (Hg.): *Further Studies in the History of Construction. The Proceedings of the Third Annual Conference of the Construction History Society*. Cambridge 2016, S. 165–178.

⁶ Hierzu bisher: Wendland, David; Aranda Alonso, María; Ventas Sierra, María José: *El corte de la piedra en bóvedas tardogóticas complejas a la luz de los primeros tratados modernos de estereotomía*. In: Huerta, Santiago (Hg.): *I Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, Bd. III. Madrid 2015, S. 1781–1791; Wendland, David: *Tragende Teile: Gedanken zur Konzeption von Rippenwerk und Schalenkonstruktion in einigen spätgotischen Gewölben*. In: Zumppe, Günter (Hg.), *George-Bähr-Forum* Jahrbuch 2014/2015. Radebeul 2015, S. 132–143.



Abb. 1 Gewölbe mit räumlich gekrümmten Rippenbögen im Wappensaal der Albrechtsburg Meissen, Jakob Heilmann, 1521

mit Eckpfeilern, die als diagonal stehende Wandflächen ausgebildet und ebenso wie die das Gewölbe begrenzenden Gurtbögen am Bau bereits vorhanden waren. Das Rippensystem des Gewölbes besteht, abgesehen von den Kreuzrippen, ausschließlich aus räumlich gekrümmten Rippenbögen – eine Gruppe in weitem Schwung seitlich von den Eckpfeilern ansteigend, die andere von den Scheiteln der Schildbögen absteigend. In einigen Kreuzungssteinen treffen die Rippen in unterschiedlichen Höhen aufeinander, was zu komplizierten Durchdringungen der Rippenprofile führt – etwa in den vier mächtigen dreifachen Kreuzungssteinen um den Gewölbescheitel –, an anderen Kreuzungssteinen laufen die Rippen in solcher Höhe übereinander hinweg, dass ihre Profile sich nicht einmal berühren.

Die lichten Abmessungen des überwölbten Raumes betragen jeweils ca. 9,40 Meter, die Höhe am Scheitel 6,72 Meter. Über der Steinkonstruktion, auf deren Planung im Folgenden eingegangen wird, befindet sich eine Backsteinkonstruktion, die die eigentliche tragende Struktur des Gewölbes darstellt – bestehend aus der 30 Zentimeter starken Schale des Gewölbes mit Verstärkungsrippen am Extradós sowie vier verborgenen kleineren Gewölben über den Zwickeln.⁷ Die Kreuzungssteine des Rippensystems sind, soweit erkennbar, in

⁷ Wendland, David; Aranda Alonso, María; Kobe, Alexander: *The Vault with Curvilinear Ribs in the »Hall of Arms« in the Albrechtsburg Meissen: Studies on the Concept, Design and Construction of a Complex Late Gothic Rib Vault*. In: Campbell, James W.P. u. a. (Hg.): *First Conference of the Construction History Society*. Cambridge 2014, S. 459–468.

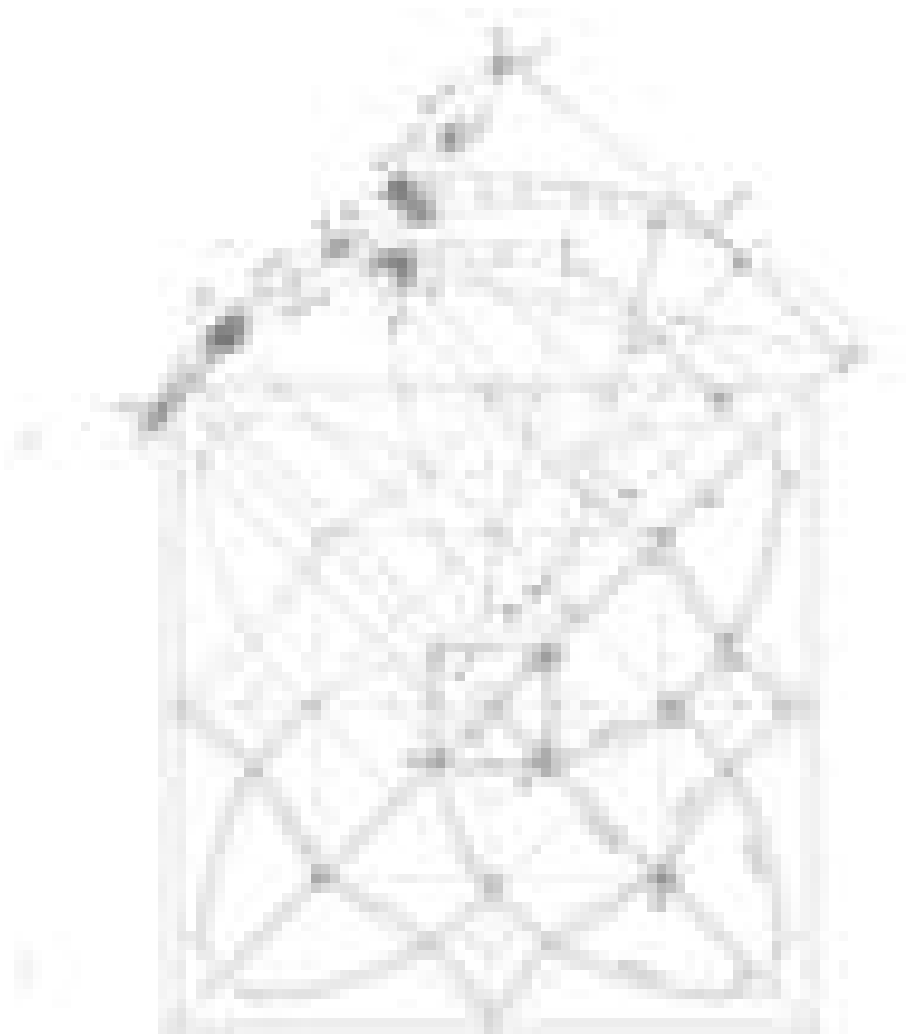


Abb. 2 Rekonstruktion der Risszeichnung des Gewölbes auf dem Reißboden, Grundriss und Bogenaustragung: Diese einzige Zeichnung enthält sämtliche Informationen zur Herstellung des Lehrgerüsts und aller Bauteile des Gewölbes

die Backsteinkonstruktion eingemauert, während die Rippenbögen selbst nur bis an die Gewölbefläche heranreichen. Dabei folgt die Gewölbefläche nicht überall dem Extrados der Rippenbögen, sondern liegt stellenweise oberhalb davon – insbesondere dort, wo sich Rippen in unterschiedlichen Höhen kreuzen. An diesen Stellen sind die unterhalb verlaufenden Rippenbögen durch vertikale Diaphragmen an die Gewölbefläche angeschlossen.

Die Kurven der räumlich gekrümmten Rippenbögen lassen sich im Kontext der im spätgotischen Gewölbebau üblichen geometrischen Konzeption beschreiben, die ausgehend von den Kurven der Rippen und Bögen entwickelt ist, die als autonome Kurven mit einfachen Begriffen (üblicherweise als Kreissegmente) beschrieben sind, und denen die Form der Gewölbefläche angepasst wird.⁸ In Gewölben mit räumlich gekrümmten Rippen sind die Kurven nach dem gleichen Prinzip entwickelt: Während üblicherweise die Kurven der Rippenbögen in vertikalen Ebenen einbeschrieben sind, beschreiben sie in diesem Fall zusätzlich auch im Grundriss Kreissegmente, indem die Kurve durch die entsprechende Krümmung des Aufrisses erzeugt wird. Man kann diese Kurven leicht darstellen, indem man den Aufriss eines Kreisbogens auf einen Karton zeichnet und diesen dann entsprechend dem Kreissegment des Grundrisses zu einer zylindrischen Fläche verbiegt.⁹

Ausgehend von der geometrischen Analyse des gebauten Gewölbes lässt sich hypothetisch der Entwurfsprozess als Abfolge von Entscheidungen rekonstruieren, die sowohl im Aufriss als auch im Grundriss getroffen werden (Abb. 2). Von zentraler Bedeutung für den Entwurfsprozess ist das grafische Verfahren der Bogenaustragung, bei dem im Aufriss die Bögen des Gewölbes in der unverkürzten Ansicht dargestellt werden.¹⁰ Die räumlich gekrümmten Rippenbögen erscheinen dabei in der Abwicklung und können somit, ihrer geometrischen Definition entsprechend,

⁸ Unter anderem: Müller 1990 (Anm. 2); vgl. Wendland, David: *Lassaulx und der Gewölbebau mit selbsttragenden Mauerschichten. Neumittelalterliche Architektur um 1825–1848*. Petersberg 2008.

⁹ Muk, Jan: *Die Gewölbe des Benedikt Ried*. In: Graefe/Tomlow 1990 (Anm. 2), S. 193–205. Inzwischen konnte dieses Prinzip an mehreren Beispielen anhand von Vermessungen und geometrischen Analysen aufgezeigt werden: Wendland, David: *Arches and Spirals: The Geometrical Concept of the Curvilinear Rib Vault in the Albrechtsburg at Meissen and Some Considerations on the Construction of Late-Gothic Vaults with Double-Curved Ribs*. In: Carvais, Robert u. a. (Hg.): *Nuts and Bolts of Construction History: Culture, Technology and Society*, Bd. 1. Paris 2012, S. 351–357; Wendland 2013 (Anm. 3), S. 34–38; Wendland/Aranda/Kobe 2014 (Anm. 7). Das Prinzip zeigt sich auch in der Analyse des Gewölbes in St. Jakob in Wasserburg von Clemens Voigts (Vortrag *Die Chorgewölbe der Jakobskirche in Wasserburg im Internationalen Kolloquium Stone Clockworks and Rampant Sprouts: The Design of Modern Vaults in Medieval and Early Modern Europe*. Dresden/Meißen, 27.–28. 01. 2017). Diese Definition der Kurven wurde bereits früher vermutet: Meckel, Carl Anton: *Die Konstruktion der figurierten Gewölbe in der deutschen Spätgotik*. In: *Architectura: Zeitschrift für Geschichte und Aesthetik der Baukunst* 1 (1933), H. 3, S. 107–114; Müller, Werner: *Über den Planriss eines Schlingrippengewölbes in der Akademie der bildenden Künste in Wien und verwandte Probleme aus der Geschichte des Steinschnitts*. In: *Österreichische Zeitschrift für Kunst und Denkmalpflege* 26 (1972), H. 1/2, S. 45–53.

¹⁰ Diese Darstellungsweise darf nicht mit der orthogonalen Projektion eines Querschnitts verwechselt werden. Vgl. hierzu unter anderem Müller 1990 (Anm. 2), der Verfasser hält – anders als W. Müller – den Begriff ›Aufriss‹ für angebracht, weil dieser ebenfalls nicht die Projektion meint. Ebenfalls zur Bogenaustragung unter anderem: Tomlow, Jos: *Neue Erkenntnisse zur Baugeschichte des Kreuzgangs: Entwurf und Ausführung eines mittelgroßen spätgotischen Gewölbes*. In: *Alpirsbach: zur Geschichte von Kloster und Stadt*. Stuttgart 2001, S. 427–448.

ebenfalls als Kreissegmente aufgerissen werden. Die Überlagerung von Grundriss und Aufriss, insbesondere der Aufrisse der verschiedenen Bögen, dient dazu, die Lagebeziehungen, Geometrie und Abmessungen in den Kreuzungssteinen zu entwickeln.

Die Konzeption geht offenbar von zwei Viertelkreisen aus, von denen der größere den Radius der aufsteigenden räumlich gekrümmten Rippenbögen beschreibt und der (vorgegebenen) Raumhöhe entspricht, und der kleinere den Radius der ebenen Kreuzbögen beschreibt. In Nachgang ist der Grundriss in ein System eingepasst, mit dem die Positionen der Knotenpunkte primär festgelegt wurden, und das auf geraden Linien und modularen Maßen (ganze und halbe Fuß) beruht.¹¹

Die Hinterschnidungen der Rippenbögen resultieren teilweise aus den autonomen Kurvenverläufen; teilweise wurden aber auch in der Austragung die einzelnen Bogenstücke an vorgegebene Knotenpunkte angesetzt. Die Lage des großen seitlichen Kreuzungssteins, an dem die unteren Enden der Liernen unterhalb des Kreuzbogens »angeheftet« erscheinen, ist durch die Stelle bestimmt, an dem die Fuge des Kreuzbogens im Winkel von 60 Grad geneigt ist, und soll offenbar die Gelenkstelle zwischen den »tragenden« und den »getragenen« Teilen des Gewölbes bilden – an dieser Stelle setzen auch die erwähnten »Entlastungsgewölbe« an, die die Flanken des Gewölbes zu den Wänden hin abspreizen.

Die geometrische Konzeption der Kreuzungssteine und Rippensegmente war auf der Grundlage der Bogenaustragung in Handlungsanweisungen für den Zuschnitt der Werksteine zu übersetzen. Hierbei ist die Frage zu klären, ob ein Verfahren möglich und praktikabel ist, das mit dem Entwurfsprozess, wie wir ihn bis zu diesem Punkt rekonstruieren können, kohärent ist – dies gilt insbesondere auch für die räumlich gekrümmten Rippensegmente entsprechend der charakteristischen Kurven des Entwurfs.

Mit den Anreißverfahren, die heute in der handwerklichen Ausbildung gelehrt werden, ist insbesondere die Bedingung der Kohärenz mit den spätgotischen Entwurfsprinzipien nicht erfüllt – was auch nicht überrascht, weil sie auf der Praxis des 19. Jahrhunderts beruhen, wesentlich durch die Theoriebildung zur Darstellenden Geometrie und die um 1800 entstandene technische Literatur beeinflusst sind, und keineswegs auf eine frühere Tradition zurückgeführt werden können.

Bei dieser Arbeitsweise werden mit projektiven Verfahren konstruierte orthogonale Ansichten des Werkstücks auf den sechs Seiten des zuvor zugerichteten Quaders angezeichnet. Im Falle der spätgotischen, räumlich gekrümmten Gewölberippen müsste hierfür zunächst die ebene Projektion der Kurve konstruiert werden, die eigentlich mit einer viel einfacheren geometrischen Prozedur definiert ist: Dies wäre in keiner Weise kohärent mit dem Entwurfsprozess, der dezidiert auf der Verwendung von wahren Längen und unverkürzt dargestellten Kreissegmenten beruht, und in dem, wie wir gesehen haben, projektive Verfahren grundsätzlich vermieden werden. Anschließend wäre das Werkstück dann entsprechend einer zweiten, in umgekehrter Richtung von der ebenen Fläche des Quaders nach innen erfolgenden Projektion herauszuarbeiten. Es

¹¹ Wendland/Aranda/Ventas 2015 (Anm. 6).

liegt auf der Hand, dass diese Prozedur anspruchsvoll in der geometrischen Konstruktion und zudem auch fehleranfällig ist.

Im Gegensatz dazu erscheint ein anderes Verfahren, das in den frühen Traktaten des Steinschnitts überliefert ist und dort als ›par panneaux‹ bezeichnet wird, prinzipiell gut geeignet, die aus der Biegung ebener Kreissegmente erzeugten räumlichen Kurven der Rippenbögen abzubilden.¹² Dieses Verfahren beruht auf der Verwendung biegsamer Schablonen. Die Vorgehensweise wird insbesondere in den Traktaten von Philibert de l'Orme und von Alonso de Vandelvira fassbar,¹³ und besteht prinzipiell darin, die Oberflächen des fertigen Werkstücks mit Schablonen darzustellen. Bei räumlich gekrümmten Werkstücken werden diese auf gekrümmte Flächen des unfertigen Werkstücks aufgelegt, um die Kanten für den weiteren Zuschnitt anreißen zu können. Dementsprechend beruht die geometrische Konstruktion zur Herstellung der Schablonen auch nicht auf Projektion, sondern auf der Abwicklung der Flächen des fertigen Werkstücks. Wie wir sehen werden, ist es auf dieser Grundlage möglich, auch für die Bogensteine in den räumlich gekrümmten Rippenbögen der untersuchten spätgotischen Gewölbe ein Verfahren zu entwickeln, das auf der Verwendung von Schablonen aus Metallblech basiert, und das konzeptionell mit der geometrischen Definition der Gewölbe in der spätgotischen Planungspraxis im Einklang steht.

Daneben ist zu untersuchen, inwieweit die Erzeugung des Rippenbogens mit einfachen parametrischen Verfahren dem Befund an den historischen Bauten entspricht. Auf diesem Weg ist eine Realisierung am Stein mit moderner Technologie realisierbar, und es ist auch zu diskutieren, ob dieses Modell mit geometrischen Konzepten der Spätgotik korrelieren könnte—die beliebten Verschneidungen von entlang geometrischer Orte entwickelten Profilformen, die auch in den Kreuzungssteinen des hier untersuchten Gewölbes zu sehen sind, weisen durchaus in diese Richtung.

Bei diesem Modell wird der Körper des Rippenbogens durch die Verschiebung des profilierten Querschnitts der Rippe entlang einer Leitkurve gebildet, die durch den Kurvenverlauf des Rippenintrados gegeben ist. Der Querschnitt liegt dabei immer orthogonal zur Leitkurve. Zudem ist erforderlich, dass das Profil immer vertikal steht—im ebenen Rippenbogen ist dies automatisch der Fall, während bei der räumlich gekrümmten Leitkurve die lokale Krümmung nicht mehr *a priori* in eine vertikale Ebene eingeschrieben ist, sodass das Rippenprofil im Verlauf

¹² Müller, Werner: *Steinnetzgeometrie zwischen Spätgotik und Barock*. Petersberg 2002. Unter anderem: Wendland 2012 (Anm. 9).

¹³ de l'Orme, Philibert: *Premier Tome de l'Architecture*. Paris 1561; Vandelvira, Alonso de: *Libro de trazas de cortes de piedra* (Facs. mit einleitendem Essay von J. C. Palacios). Madrid 2015. A. de Vandelvira's im späten 16. Jahrhundert entstandenes Traktat ist in zwei handschriftlichen Kopien überliefert.

des Bogens zur Seite kippen kann. Die vertikale Position des Rippenquerschnitts an jeder Stelle des Bogens muss somit als gesonderte Bedingung mit eingeführt werden.¹⁴

Bei näherer Betrachtung des so erzeugten Körpers zeigen sich allerdings kleine, aber signifikante Unterschiede zu den originalen Rippenbögen, die auch von konzeptioneller Tragweite sind: Anders als am Befund sind durch die radiale Position des erzeugenden Rippenquerschnitts die seitlichen Flanken der Rippe leicht aus der Vertikalen geneigt.¹⁵ In Wirklichkeit sind diese Flanken aber, sofern hierzu Befunde erhoben werden können, genau vertikal: Sie sind in konzentrische vertikale Zylinderflächen eingeschrieben. Wie an anderer Stelle ausführlicher dargelegt werden konnte, führt dies zu einer leichten Verzerrung des Rippenprofils an den ebenen Schnitten der Fugen, die auch am Befund erkennbar ist.¹⁶ In diesem Detail zeigt sich exemplarisch, wie die Form durch das Verfahren der Modellierung und die zugrundeliegenden geometrischen Konzepte determiniert ist, und wie sich durch die Anwendung eines Verfahrens, das von der historischen Arbeitsweise abweichend ist, auch die hergestellten Objekte von den historischen Originalen unterscheiden.

Ein zweites prinzipielles Problem dieses Modells betrifft den Prozess des Anreißens, sofern wir dieses Konzept auch dem historischen Arbeitsprozess zugrundelegen wollen: Bei der Definition des Werkstücks in Abhängigkeit von der räumlichen Kurve als Leitkurve ist unklar, wie dem Steinmetz die genaue Position dieses Körpers innerhalb des Rohblocks anzuzeigen ist. Die erforderlichen Anreißkurven lassen sich nur durch eine aufwändige geometrische Konstruktion herstellen, mit der in der orthogonalen Projektion die Lage der durch die radiale Neigung gegenüber dem Intrados verschobenen Oberkanten des Rippenprofils dargestellt werden muss – zumindest mit einfachen Mitteln ist es nicht möglich, am Stein Linien für die einzelnen Arbeitsschritte des Zuschneidens anzureißen.

Auf dem Reißboden: Von der ebenen Fläche zur räumlichen Krümmung

Generell beruht die mittelalterliche und frühmoderne Steinplanung auf grafischen Prozeduren, mittels derer die geometrische Information für die Herstellung der Bauteile generiert wurde. Eine zentrale Rolle spielt dabei der Reißboden, auf dem diese Prozeduren in voller Größe durchgeführt und in der Folge die Zeichnungen oder Schablonen für die Steinbearbeitung

¹⁴ Besprechungen hierzu im Rahmen des Planungsprozesses für die Gewölberekonstruktion in der Dresdner Schlosskapelle mit Jan Fleischer und Jens-Uwe Anwand (29.09.2010); zuvor waren Probestücke der nachgebildeten Gewölberippen mit seitlich kippendem Querschnitt präsentiert worden, vgl. Bauer/Lauterbach 2013 (Anm. 3), S. 113, Abb. 7. Zu María Arandas Lösungsvorschlag mit einer zweiten Leitkurve am Extradros: Wendland/Aranda/Kobe 2014 (Anm. 7).

¹⁵ Dieser Effekt wurde bei der Planung der Gewölberekonstruktion für die Dresdner Schlosskapelle beobachtet und diskutiert: Gespräch mit Jan Fleischer und Jens-Uwe Anwand am 12.01.2011. Hierzu im Detail: Wendland/Aranda/Ventas 2015 (Anm. 6).

¹⁶ Ebd.

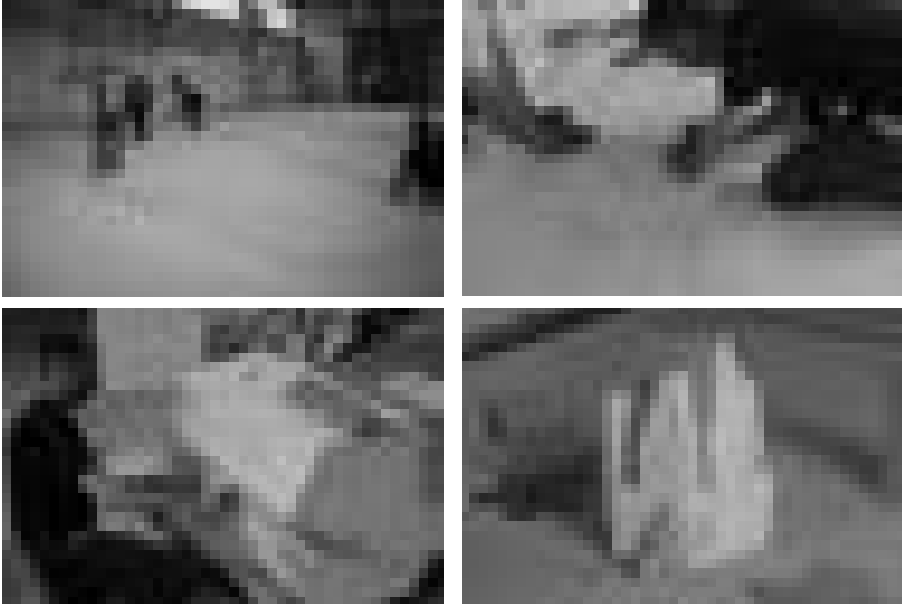


Abb. 3 Experimentelle Nachbildung des Reißbodens und der Arbeitsschritte beim Anreißen und Fertigen der Werkstücke

angefertigt werden konnten. In der Nachbildung eines solchen Reißbodens konnte der Informationsfluss von der Planung zur Ausführung mit seinen charakteristischen Auswirkungen auf die geometrischen Eigenschaften des Artefaktes experimentell untersucht werden (Abb. 3). Die Zeichenfläche ist groß genug, um auf ihr den Grundriss des untersuchten Gewölbes im Maßstab 1:1 zu zeichnen und darauf die Aufrisse sämtlicher Bögen in der Überlagerung zu konstruieren (Bogenaustragung, siehe oben), sodass die Relationen auch zwischen den einzelnen Rippenbögen an den Kreuzungspunkten entwickelt werden konnten. Nach dem Vorbild der erhaltenen Reißböden in York¹⁷ und Wells wurde hierfür eine Fläche aus Gips hergestellt, auf der mit der Reißnadel gezeichnet wurde.

Um die Prozeduren nachvollziehen zu können, mit denen durch geometrische Konstruktionen in der Ebene, die auf der Anwendung elementarer Begriffe beruhen, komplexe dreidimensionale Strukturen beschrieben werden können, war es wichtig, den besonderen Modus Operandi auf dem Reißboden zu verstehen. Gearbeitet wird mit Latte und Zirkel sowie mit Winkeln; die Zeichnung mit der Reißnadel ermöglicht eine erstaunliche Präzision und sie lässt sämtliche Hilfs- und Konstruktionslinien sichtbar, sodass jede neue Konstruktion auf möglichst frühe Festlegungen bezogen werden kann. Am Zirkel sind beide Schenkel mit Reißnadeln versehen

¹⁷ Harvey, John H: *The Tracing Floor in York Minster*. In: The Friends of York Minster. Fortieth Annual Report (1969), S. 9–13.



*Abb. 4
Anreißen des Werkstücks: Zunächst wird die Schablone des Rippengrundrisses auf der Ober- und Unterseite des Robblocks aufgelegt (links), um die zylindrischen Flanken auszuschneiden. Auf diesen werden dann mithilfe der Schablone, die den Aufriß des Rippenbogens darstellt (rechts), die Kurven von Intrados und Extrados angerissen*

und können daher sowohl als Drehpunkt am Mittelpunkt dienen als auch die Kreislinie ziehen, sodass beispielsweise bei der Konstruktion eines Kreuzstiches ein schneller Wechsel zwischen beiden Funktionen möglich ist: Bei dem hier verwendeten über 7 Meter langen Lattenzirkel, der nur durch mehrere Personen bedient werden konnte, nahmen die geometrischen Konstruktion zuweilen den Charakter eines Tanzes ein. Von zentraler Bedeutung ist, dass sämtliche Abmessungen geometrisch konstruiert und dann immer durch direktes Abgreifen übertragen werden: Wie im traditionellen Zimmerhandwerk beim Aufreißen oder auch auf der Zulage ist Messen verboten, weil die Übertragung von numerischen Längenangaben nicht nur ungenauer ist, sondern vor allem auch die Gefahr von Fehlern birgt.

Durch die Überlagerung sämtlicher Konstruktionslinien auf dem Reißboden können einzelne Konstruktionsschritte jederzeit wiederholt und dabei mit den vorhandenen Ergebnissen abgeglichen werden: Auf diese Weise lassen sich die Vorzeichnungen für die Schablonen bewerkstelligen und dann auch die Schablonen direkt anreißen und herstellen.

Die Übertragung der geometrischen Information vom Reißboden auf die Werkstücke erfolgt mittels Schablonen, Messlatten und dem »Baivek«. Bei Letzterem handelt es sich um einen Winkel, dessen einer Schenkel entsprechend dem Intrados des Bogens gekrümmt ist, sodass sowohl die Bogenlinie als auch die radiale, also orthogonal zu dieser verlaufende Richtung der Bogenfugen angerissen werden kann. Dieses in der modernen Praxis nicht mehr verwendete Werkzeug ist in einer Glasmalerei des 13. Jahrhunderts in der Kathedrale von Chartres dargestellt

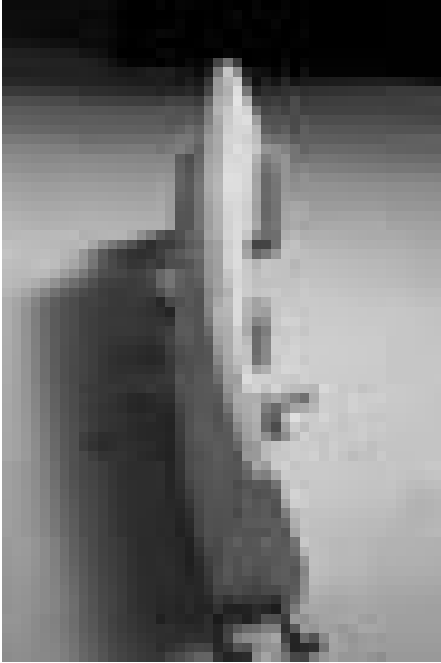


Abb. 5 Drei aufeinanderfolgende Rippensegmente in Modell zeigen den kontinuierlichen Kurvenverlauf, der mit dem beschriebenen Verfahren erreicht wird und der mit den Befunden am Original vergleichbar ist



Abb. 6 CAD-Modellierung der geometrischen Auswirkungen bei Verwendung der Schablonen (siehe oben Abb. 4) gegenüber dem ideellen Modell des Rippenkörpers. Der Fehler (Det. B in der Mitte des Rippensegments) liegt unterhalb der Toleranz für die Ausführung von Werksteinen

und wird noch in den frühneuzeitlichen Traktaten der Stereotomie beschrieben.¹⁸ Es hat sich als sehr nützlich beim Aufreißen der Rippenbögen und deren Fugen im Grundriss und in der abgewinkelten Ansicht erwiesen. Für die räumlich gekrümmten Rippenbögen sind zwei ›Baivels‹ erforderlich, da Grundriss und Aufriss unterschiedliche Radien aufweisen.

Zwei Schablonen werden benötigt, um den Körper des Rippensegments in Grund- und Aufriss zu bestimmen. Diese müssen nicht der exakten Länge des jeweiligen Bogensteins entsprechen, sondern lediglich die Kurven der Flanken im Grundriss sowie von Intrados und Extrados im Aufriss wiedergeben. Die Schablone für den Aufriss muss biegsam sein;

¹⁸ Die ausführlichste Beschreibung im Traktat von Vandelvira 2015 (Anm. 13). Der ›Baivel‹ wurde in die wissenschaftliche Diskussion eingeführt durch Palacios Gonzalo, José Carlos: *Trazas y cortes de cantería en el renacimiento español*. Madrid 1990.

in den Experimenten wurde hierfür Kupferblech verwendet.¹⁹ Darüber hinaus müssen die Endpunkte jedes Bogensteins in ihrer Höhe und abgewickelten Länge definiert werden. Diese Information lässt sich von dem auf dem Reißboden in der Abwicklung dargestellten Aufriss des Rippenbogens mittels biegsamer Messlatten übertragen, auf denen die Längen angerissen sind. Diese Messlatten sind das einzige individuelle Element, das für jeden Bogenstein vorgesehen werden muss; tatsächlich kann, bedingt durch die besonderen Eigenschaften der Kurve, jeder Bogenstein nur auf seiner spezifischen Position innerhalb des Kurvenverlaufs versetzt werden.

Für die Herstellung eines Rippensegments wird der Rohblock zunächst durch zwei konzentrische Zylindermäntel beschnitten, denen die vertikalen Flanken der Rippe einbeschrieben sind: Dies erfolgt anhand der Schablone, die den Grundriss der Rippe darstellt (Abb. 4). Dann werden die Endpunkte des Bogensteins auf den zylindrischen seitlichen Flächen markiert und an diesen die Schablone für den Aufriss des Bogens angelegt, um die Kurven von Intrados und Extrados anzureißen. Entlang dieser Linien können dann die Ober- und Unterseite des Rohkörpers für die Gewölberippe als Regelflächen ausgeschnitten werden. So entsteht der räumlich gekrümmte Rohkörper des Rippensegments, an dem dann das Profil gearbeitet werden kann, das durch eine hölzerne Schablone vorgegeben ist: Dies erfolgt schrittweise in ›Fasen‹, indem schräge Hilfsflächen gearbeitet werden. Diese Prozedur hat sich als leicht realisierbar und fehlertolerant erwiesen. Im Gegensatz zu projektiven Verfahren mussten nur wenige, wirklich vorhandene Punkte in Grund- und Aufriss konstruiert werden, nämlich die auf dem Reißboden definierten Ecken der Fugen der einzelnen Bogensteine.

Mit der beschriebenen Prozedur war es möglich, über mehrere Rippensegmente hinweg die gleiche Perfektion des Kurvenverlaufs zu erreichen wie im Original (Abb. 5). Die Entsprechung des Verfahrens zur idealen Geometrie des Rippenkörpers wurde ergänzend in einer rechnergestützten Modellierung untersucht (Abb. 6): Dabei war zu klären, welche Abweichungen sich dadurch ergeben, dass mit den Schablonen die Kurven für Intrados und Extrados aus der Mittelachse des Rippenbogens auf die Flanken übertragen und nicht auf diese projiziert werden, wie dies bei einer exakten Ausführung der Regelflächen auf Ober- und Unterseite des Rohkörpers der Fall sein müsste. Bei den Randbedingungen des untersuchten Gewölbes lagen diese Abweichungen allerdings weit unterhalb der Fertigungstoleranz (im gezeigten Beispiel 0,7 Millimeter an der Platte des Rippenintrados). Dabei ist es nicht relevant, dass die Flanken an der Innen- und Außenseite der gekrümmten Rippe unterschiedlich lang sind, weil eine Schablone mit ausreichender Länge jeweils an den konstruierten Endpunkten des Rippensegments angelegt wird.²⁰ Es kann also davon ausgegangen werden, dass mit dem

¹⁹ Die Verwendung von Kupferblech lässt sich anhand von zeitgenössischen Baurechnungen nachweisen (Christian Mai). Das in der modernen Praxis verwendete Zinkblech ist erst seit dem 17. Jahrhundert in größeren Mengen verfügbar.

²⁰ Die Beobachtung, dass Innen- und Außenflanke unterschiedlich lang sind, hat Anlass zu einer grundsätzlichen Kritik an der Hypothese biegsamer Schablonen gegeben: Bauer, Thomas; Lauterbach, Jörg; Nußbaum, Norbert: *Benedikt Rieds Schlingrippengewölbe auf der Prager Burg. Entwurf–Steintechnik–Kontext*. In: INSITU. Zeitschrift für Architekturgeschichte 7 (2015), H. 1, S. 68, Anm. 7.

*Abb. 7
Werkzeichnung für einen
räumlich gekrümmten Bogen im
Traktat des Alonso de Vandelvira,
16. Jahrhundert; die Konstruktion
der Abwicklungen der Bogensteine
dient der Herstellung der
Schablonen*



vorgeschlagenen Verfahren die spätgotischen Gewölberippen mit hinlänglicher Genauigkeit den Befunden entsprechend hergestellt werden können.

Die basierend auf Vermessungen und geometrischen Analysen, quellenkritischen Untersuchungen an Zeichnungen und der historischen technischen Literatur sowie intensiven experimentellen Studien entwickelte Hypothese reproduziert die signifikanten geometrischen Besonderheiten, die sich an den originalen Bauten beobachten lassen, ist mit in der Steinmetzpraxis üblichen Verfahrensweisen durchführbar und lässt sich in den Kontext der Wissensgeschichte und der historischen Entwicklung der angewandten Geometrie stellen. Damit kann ein umfassendes Bild des Entwurfs spätgotischer Gewölbe zur Diskussion gestellt werden, das von den Entscheidungskriterien für die Gesamtkonzeption bis zu den Anreißverfahren am Werkstein und den Vorgaben zur Herstellung der einzelnen Bauteile der geometrisch komplexen Konstruktionen reicht. Nach dem Abschluss der Experimente auf dem Reißboden erfolgt gegenwärtig bei den involvierten Projektpartnern die Herstellung von Probestücken aus Stein, an denen die handwerkliche Fertigung und auch der Informationsfluss vom Reißboden zum Werkstück demonstriert werden können.

Im gegenseitigen Wissenstransfer zwischen Grundlagenforschung und Praxis der Steinrestaurierung konnten somit nicht nur historische Praktiken wieder für die Konservierung der Baudenkmäler verfügbar und als immaterielles kulturelles Erbe wiedergewonnen werden – ein zentrales Anliegen dieses Projekts –, sondern zugleich auch zentrale Fragen für die Interpretation der komplexen Gewölbe im Übergang vom späten Mittelalter zur Frühen Neuzeit geklärt werden – etwa, dass die konzeptionellen Grundlagen für die Planung dieser Bauten ganz in der spätgotischen Tradition liegen. Tatsächlich eröffnet sich hiermit auch ein neuer Ansatz



Abb. 8 Informationstransfer vom Reißboden zur Steinbearbeitung: Für die Herstellung sämtlicher Bogensteine der spätgotischen gekrümmten Rippenbögen sind lediglich zwei Schablonen und zwei ›Baivels‹ erforderlich—jeweils Grundriss und Aufriss darstellend. Das einzige spezifische Element für jeden Bogenstein ist die Messlatte mit den Längen und Höhen

für die Interpretation der frühen Traktate der Stereotomie, die wir zur Lösung des Problems mit herangezogen haben.

Biessame Schablonen in der spätgotischen Steinplanung und in den Traktaten der Stereotomie

Die Möglichkeit, für ein Verfahren zur Steinplanung in spätgotischen Gewölberippen auf Arbeitsweisen zurückzugreifen, die in frühneuzeitlichen Traktaten der Stereotomie beschrieben werden, muss zu der Frage führen, welche Stellung die Traktate zu der bis dahin allgemein verbreiteten spätgotischen Planungspraxis einnehmen. Zeitlich liegen die hier untersuchten Bauten und die Traktate nicht weit auseinander; Philibert de l'Orme selbst verfügte offensichtlich noch über profunde Kenntnisse der gotischen Bautradition, und auch Alonso de Vandelviras Traktat ist in einem Umfeld entstanden, in dem die spätgotische Planungspraxis noch präsent war. Allerdings ist die Architektursprache in allen Traktaten der Stereotomie gegenüber der als ›modern‹ bezeichneten Gotik an antiken Vorbildern orientiert, was mit einem grundsätzlichen Wandel in der geometrischen Konzeption der Gewölbe verbunden ist: Anders als in der

Tradition der gotischen Planungspraxis sind hier die Kurven der Bögen aus definierten Flächen abgeleitet oder mit projektiven Verfahren erzeugt. Somit sind auch die räumlich gekrümmten Bögen, die in den Traktaten beschrieben sind, nicht als Spiralen oder »gebogene Segmentbögen« konzipiert, wie wir dies für die spätgotische Planungspraxis zeigen konnten, sondern aus der Verschneidung von Körpern erzeugt.

Die Planung der Bogensteine für eine rundbogige Öffnung in der gekrümmten Wand eines runden Turms – »tour ronde« – ist eine der kanonischen Aufgaben der Stereotomie, die von den frühen Traktaten des 16. Jahrhunderts bis ins späte 19. Jahrhundert gelehrt wurden, und die wir bis ins Mittelalter zurückverfolgen können. Die Vorgehensweise bei der Lösung dieser Aufgabe wandelt sich im Laufe der Zeit im Kontext der Entwicklung der angewandten Geometrie: In den frühen Traktaten kommen biegsame Schablonen zum Einsatz. In Alonso de Vandelvira Traktat – und in gleicher Weise auch bei Philibert de l'Orme – werden die Bogensteine anhand von Schablonen definiert, die die fertigen Flächen von Intrados, Extrados und Bogenfugen beschreiben.²¹ Die Grafik (Abb. 7) entspricht der Risszeichnung, in der hierfür die Abwicklungen der einzelnen Flächen konstruiert werden: Für jede Kante des Steins werden Anfangs- und Endpunkt konstruiert, und zusätzlich noch ein dritter Punkt auf der Mitte der Kante. Zwischen diesen drei Punkten werden dann die gekrümmten Kanten der Schablonen interpoliert: Ein praktisches Verfahren, um approximativ die räumlichen Schnittkurven der beiden Zylindermäntel (vertikal entsprechend der Wand, horizontal entsprechend dem Intrados des Bogens) zu konstruieren. So entsteht ein eigener Satz von Schablonen für jeden einzelnen Bogenstein: Die Schablonen für Intrados und Extrados sind auf die zuvor mithilfe des »Baivels« angerissenen und zugerichtete gekrümmte Flächen der Werksteine aufzulegen und müssen somit biegsam sein.

Wie beschrieben, besteht eine grundsätzliche Affinität mit der Konzeption der Kurven in spätgotischen Gewölberippen, und die Vorgehensweise lässt sich auch in ähnlicher Weise für das Anreißen der Rippensegmente adaptieren. Allerdings zeigen sich dabei auch einige wesentliche Unterschiede, die insbesondere aus quellenkritischer Sicht signifikant erscheinen.

Zum Einen müssen bei der Anwendung des Verfahrens auf die spätgotische Gewölberippe die Kurven nicht mehr eigens konstruiert werden, wie dies in der bei Philibert de l'Orme und Alonso de Vandelvira beschriebenen Bogenkonstruktion für jeden einzelnen Abschnitt der räumlichen Schnittkurve erfolgen muss: Im spätgotischen Rippenbogen kann einfach die Kurve aus dem Entwurf direkt übernommen werden, so wie sie auf dem Reißboden vorhanden ist – bei dieser handelt es sich zudem einfach um einen Kreisbogen.

Zum Anderen wird gegenüber der in den Traktaten gezeigten Bogenkonstruktion, bei der für jeden einzelnen Stein des Bogens ein eigener Schablonensatz erforderlich ist, in dem Verfahren, wie wir es für das Anreißen der spätgotischen Rippensegmente rekonstruieren, nur ein Schablonensatz für alle Bauteile benötigt: Der »Werkzeugkasten« Jakob Heilmanns für das

²¹ Vandelvira 2015 (Anm. 13), fol. 22r.; de l'Orme 1561 (Anm. 13), fol. 77r. Ausführlich hierzu Wendland/Aranda/Ventas 2015 (Anm. 6).

Anreißen sämtlicher Bogensteine in allen räumlich gekrümmten Rippen des Wappensaals besteht lediglich aus einer Schablone für den Rippengrundriss und einer für den gebogenen Rippenaufriß – dazu kommen noch die Schablone für den Querschnitt (bei allen Rippen einheitlich) sowie jeweils ein ›Baivel‹ für Grundriss und Aufriß. Das einzige individuelle Element für jeden Rippenstein ist die Messlatte mit den Längen in Grund- und Aufriß, die die Neigung der Aufrißschablone bestimmt (Abb. 8).

Das Verfahren ist also innerhalb der geometrischen Konzepte der spätgotischen Planungspraxis wesentlich einfacher umzusetzen als in der Formensprache, die in den Traktaten gelehrt wird. Wir können daher vermuten, dass es sich ursprünglich um ein Verfahren aus der spätgotischen Praxis handelt, das nach dem Stilwandel weiterhin zum Einsatz kam, somit auch in den Traktaten gelehrt wurde, in der Adaption für die andere geometrische Konzeption der Bögen und Gewölbe – hierfür sind dann viel mehr Schablonen erforderlich und das Verfahren deutlich komplizierter. In den folgenden Generationen wurde dieses Verfahren dann, wie die späteren Traktate zeigen, durch Vorgehensweisen verdrängt, die mit der geometrischen Konzeption dieser Architekturformen affin sind – die nämlich auf projektiven Verfahren beruhen, wie sie heute noch in der handwerklichen Ausbildung präsent sind.

Somit ist es nicht nur möglich, anhand der historischen technischen Literatur einen Einblick in frühere, heute nicht mehr bekannte Arbeitsweisen bei der Steinplanung zu gewinnen, sondern auch die Traktate selbst in den Kontext der historischen Entwicklung der Planungspraktiken und angewandten Geometrie im Bauwesen zu stellen – und sie als historische Quellenschriften der Architektur und Technikgeschichte kritisch zu erschließen.