

Die Ausführung des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden

Es zählt sicher zu den fachlichen Höhepunkten der Tätigkeit unserer in der historischen Rekonstruktion erfahrenen Ingenieure, Maurer und Zimmerer, an diesem außergewöhnlichen und einmaligen Projekt der Wiederherstellung des Schlingrippengewölbes von 1556 in der Schlosskapelle des Residenzschlosses Dresden mitzuwirken.

Die besondere Herausforderung dieser Rekonstruktion lag für uns Handwerker darin, dass es weder Erfahrungswerte zur Fertigung und dem Versatz von Schlingrippen gab, noch spezifische Erkenntnisse über die handwerklichen Besonderheiten bei Schlingrippen mit ihrem Steinschnitt, den Fertigungs- und Versatzprinzipien bekannt waren. Ausführungen in der Fachliteratur formulierten vielfach eigene Denkansätze¹, die sich aber bei einem näheren Auseinandersetzen nicht als zielführend erwiesen. Beispielgebend sei hier auf die Rippenlehrgerüste für sphärisch gekrümmte Rippen verwiesen, die als Holzkonstruktion dem dreidimensional gekrümmten Rippenkörperverlauf als Versetzvorgabe folgen sollten², oder auch das Rippenwerk über hölzerne Zylinder versetzt oder gar Konstruktionen teilweise am Dachstuhl abgehängt werden sollten³. Auch die These, dass alle Schlingrippen eines Gewölbes hinsichtlich der sphärischen Körperkrümmung identisch seien und untereinander austauschbar sind, was dem folgend ein konfektionelles Vorfertigen der Rippen als sozusagen „Meterware“ bedeuten sollte, hinterließ Fragen. Dieser Denkansatz ließ sich bei einem näheren Auseinandersetzen mit dem Rippenwerk am 3D-Modell (volumenkörpermodelliertes Rippenwerk) relativ schnell und sicher als unzutreffend ausschließen, da eine Rippe aus der Randfiguration und eine Rippe aus der Scheitelfiguration – trotz jeweils identischem Grundrisradius und identischem Prinzipalbogen eben als Körper in Folge der sich fortlaufend ändernden Krümmung von Rippenkurve und Rippenkörper⁴ voneinander abweichen. Der Entschluss lautete daher, dass wir auf der Grundlage des dreidimensionalen Linienmodelles (*Kurven der unteren Rippenmittellinien, die Ergebnis der Rekonstruktion der Figuration durch das Architekturbüro Jens-Uwe Anwand und dem wissenschaftlichen Berater PD Dr. Stefan Bürger sind*) beginnen und eigene Konstruktionsansätze zum Lehrgerüst und zur Fertigungstechnologie der Rippen erarbeiten und diese über Modellversuche zur Ausführungsreife bringen. Mit unseren nachfolgenden Ausführungen wollen wir den Prozess, der zum Erkenntnisgewinn führte, darlegen, da unseres Erachtens dies der geeignete Weg ist, die bei der Werkplanung und Ausführung des Rippenwerkes in der Schlosskapelle Dresden zu Grunde liegenden Technologieansätze darstellen zu können. Oberster Grundsatz ist uns gewesen, dass das Rippenwerk äußerlich als Körper exakt den historischen Vorgaben entsprechen muss, aber mittels Technologie durchaus zeitgemäße Errungenschaften zur wirtschaftlicheren Herstellung nutzt und so insbesondere eine 3D-CATIA gestützte Werkpla-

nung mit dreidimensionaler Volumenkörpermodellierung beim Büro IPRO Dresden, Stahlkonstruktionen beim Lehrgerüst zur Optimierung, hydraulisch unterstützte Meißel- und Schleifwerkzeuge in der Steinmetzarbeit sowie auch ein eigens konstruierter Stahlportalkran in der Baustellenlogistik. Dass bei einer Rekonstruktion eines historischen Gewölbes auch die Bautechnologie und die Baustellenlogistik „historisch“ ausgeführt werden soll, würde unseres Erachtens den Anspruch an die Authentizität der eigentlichen Rekonstruktion durchaus überdehnen. Interessanter ist vielmehr der Vergleich nach der Ausführung, inwieweit man an einzelnen Punkten der Technologie vielleicht zu identischen Ergebnissen gelangt ist. Am Anfang jeder Überlegung stand aber auch bei der Technologie die Auswertung von Befunden und wissenschaftlichen Vorgaben bezüglich heutiger konstruktiver Umsetzung, wie z. B. bei dem Einsatz von unbesäumten Baumstämmen. Diese sind, worauf Stefan Bürger bei seiner wissenschaftlich begleitenden Unterstützung zu Anfang hinwies, auch in historischen Gewölbebauten anzunehmen⁵. Umso erstaunlicher ist, dass wir bei unserer heutigen Entwicklung eines Lehrgerüsts aus rein wirtschaftlichen Gründen (wie auch schon bei der Rekonstruktion des Neuen Museums in Berlin zur Betonfertigteilverstärkung) zur Knotenunterstützung ebenfalls zur Lösung unbesäumter Baumstämmen gelangt sind. Während der 3-jährigen Arbeit am Schlingrippengewölbe haben sich sowohl in der Auseinandersetzung mit werkplanerischen Fragen als auch in der handwerklichen Ausführung einige umgangssprachliche Eigenheiten herausgebildet, die von wissenschaftlichen Beschreibungen hier und da abweichen. So sprachen wir im handwerklichen Bereich von Knoten statt Kreuzungspunkten, das dreidimensionale Linienmodell (untere Rippenmittellinie) wurde in der Werkplanung Drahtmodell genannt und in der Figuration sprachen wir nur vom Blütenblatt (spiegelsymmetrische Kreisbögen zwischen zwei Knoten) und der Raute (Rautenfläche zwischen 4 Blütenblättern). Diese handwerkliche Umgangssprache ist geprägt von dem Erfordernis nach kurzen und für alle beteiligten Handwerker verständlichen Bezeichnungen.

1.1 Lehrgerüstkonzzept

Modellversuch 1

Das erste von fünf Lehrgerüstmodellen war Gegenstand des Angebotes der Dreßler Bau GmbH zur Rekonstruktion des Schlingrippenwerkes der Schlosskapelle Dresden und folgte dem in der Fachliteratur nachzulesenden Grundsatz, dass das Lehrgerüst für das Rippenwerk dem Verlauf der Rippenkurven (untere Rippenmittellinie) in direkter Weise und formgebend folgt. Hier ist an Hand eines als Volumenkörper grob ausmodellierten Rippenverlaufes das Lehrgerüst so konzipiert, dass

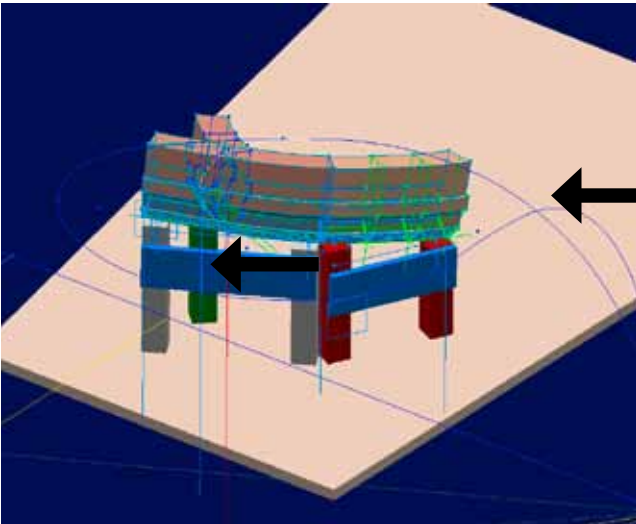


Abb. 1: Entwurf eines Lehrgerüsts zum Rippenversatz aus dem Angebot Dreßler Bau GmbH vom Herbst 2009 mit dem Ansatz einer dem Rippenverlauf folgenden Holzkonstruktion über Anfang- und Endstempel aus Holz zur Lagebestimmung der einzelnen Rippenwerkstücke

jedes einzelne Rippenwerkstück am Anfangs- und Endpunkt durch einen eigenen Holzstempel zum Versatz die Lagevorgabe bekommt. Auf den Holzstempeln sollten dann zur Feinnivellierung noch Justiermöglichkeiten – die zu diesem Zeitpunkt noch nicht detailliert konstruiert waren – ergänzt werden. Der Vorteil in den Holzstempeln je Rippenwerkstück lag zudem in einer gleichzeitigen Möglichkeit der Horizontalaussteifung des Lehrgerüsts über Holzbohlen zum bautemporären Lastabtrag der Bauzustände während des späteren Wölbens. Maßgebender Denkansatz war, dass man mit Holzkonstruktionen als Lehrgerüst für Schlingrippengewölbe – im Unterscheid zu scheitrecten Wölbungen nicht in direkter Linie dem dreidimensional gewundenen Kurvenverlauf der Rippen folgen, sondern diese nur

punktuell – durch Ermittlung einzelner Höhenpunkte aus dem Rippenkurvenverlauf – unterstützen kann. Die Ausrichtung und Lagesicherung der einzelnen Rippen wurde bei diesem Modell über Holzkeile und Formbretter – die auf den horizontalen Holzbohlen angebracht wurden – gewährleistet.

Modellversuch 2

Nach Auftragserteilung folgte ein Prozess des Gedankenaustausches mit dem Architekturbüro Anwand und dem wissenschaftlichen Berater Stefan Bürger zu ihrem Entwurf bzw. der Rekonstruktion der Figuration des Dresdner Schlosskapellengewölbes. In Folge der Auseinandersetzung mit den dabei erfahrenen Erkenntnissen zur Rippenfiguration haben wir unsere Aufgabenstellung bei der Umsetzung insbesondere bei der Konstruktion des Lehrgerüsts – neu orientiert. Anfang 2010 lag dem Entwurf der Figuration noch das Prinzip der Orthogonalprojektion des Prinzipalbogenverlaufes zu Grunde (es ist bis heute unseres Erachtens das für die handwerkliche Rippenfertigung einfachere und exaktere Verfahren für die Steinmetzfertigung⁶, wenn man auch darauf hinweisen muss, dass die wissenschaftliche Forschung diese Auffassung nicht teilt) und führte direkt zu einem anderen Ansatz hinsichtlich des Lehrgerüsts, welches im zweiten Modell und den nachfolgenden Versuchen mündete. Bei diesem 2. Modellversuch bestand die Aufgabe für den Rippenversatz die Exaktheit mittels einfacher geometrischer Herleitungen über das Lehrgerüst zu finden und zu erproben.

Dem Prinzip der Orthogonalprojektion folgend, besteht dieses Lehrgerüst – Modell 2 – aus zwei Baumstämmen an den Knotenpunkten und einer dem Prinzipalbogen (Orthogonalprojektion) folgenden Biege zwischen diesen zwei Punkten. Die Schiebelehren können dabei mit ihren Auskragungen – die der



Abb. 2 und 3: Modell 2 – Biege zwischen Knotenpunkten mit Verlauf Prinzipalbogen für Orthogonalprojektion und Schiebelehren sowie Abgreifen des Grundrissradius des Kurvenverlaufes über Falllot



Abb. 4: Modell 2 - Anreißen des über Falllot abgegriffenen Schnittpunktes Grundrissradius und Bogenaustragung der Biege auf den Schiebelehren und Versatz Rippe

direkten Höhenlinie der Bogenaustragung folgen – die Möglichkeit geben, den Schnittpunkt zwischen Grundrissradius und Prinzipalbogen der Bogenaustragung über das Falllot anreißen zu lassen. Die Schiebelehren können dabei als konstruktiver Vorteil über die Biege mit ihrem Radius des Prinzipalbogens

ohne weiteres und detailliertes Einmessen an die Lage der jeweiligen Anfangs- und Endpunkte der Rippenwerkstücke geschoben und fixiert werden. Nach dem Anreißen auf den lageseitig eingerichteten Schiebelehren wird das Rippenwerkstück auf die Markierungen der Schiebelehren ausgerichtet und fixiert.



Einem solchen Lehrgerüst steht natürlich nicht nur zur Aufgabe, den Rippenversatz zu gewährleisten sondern auch die späteren – eigentlichen – Aufgaben der Mauerwerkswölbung sicherzustellen. Dazu ist es erforderlich, auch an die Baustellenlogistik zu denken und den nötigen Raum für die Maurerarbeiten bereit zu stellen. Dem folgend ist dieses Lehrgerüstmodell so konzipiert, dass jeweils innerhalb der Blütenblattform der Rippen die lastabtragende Lehrgerüstkonstruktion steht und in den Rauten der Figuration Platz ist für die Standfläche des Maurers für das Wölben sowie den Materialtransport.

Allerdings zeigten in der weiteren Ausarbeitung unsere statischen Untersuchungen zum Lehrgerüst, die wir zusammen



Abb. 6 und 7 Modell 2 - Versatz der Rippen über Schiebelehren

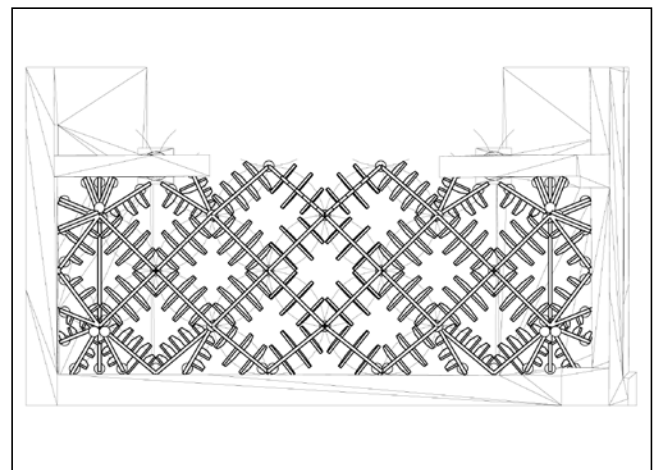


Abb. 8: Modell 2 - Werkpläne Lehrgerüst

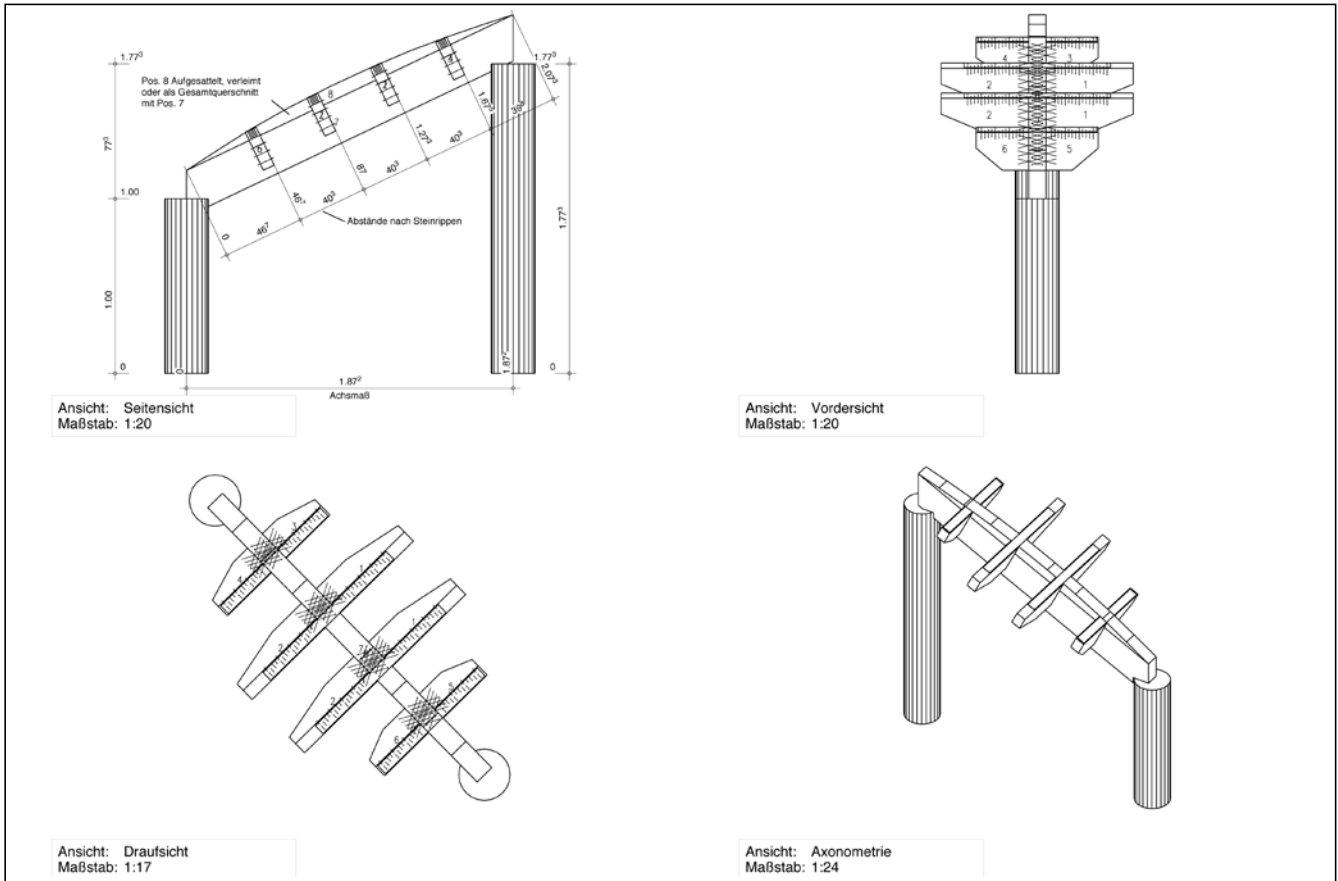


Abb. 9: Modell 2 - Werkpläne Lehrgerüst

mit Christian Willich aus Berlin als erfahrem Konstrukteur des Holzbaues durchführten, dass die lastabtragende Beanspruchung der Biege so groß wäre, das diese aus heutiger Sicht nur mit Hartholz in enormen Dimensionen anfertigbar wäre und dem folgend nicht wirtschaftlich ist. Inwieweit dieses Modell 2 vielleicht in der Spätgotik und ihrer abweichenden Kostenstruktur doch eine Variante darstellt, möchten wir dabei offenlassen. Wir sehen es nach heutigen Maßstäben als das exakteste und konstruktiv einfachste Modell an.

Modellversuch 3

Aus der Überlegung, dass die Biege der Orthogonalprojektion in der Bogenausragung folgt, aber zum Lastabtrag aus heutiger Sicht wirtschaftlich nicht sinnvoll erscheint, ergab sich das Modell 3 als Kombination aus formgebender Funktion (Biege mit Abgriff der Bogenausragung) und punktuell unterstützter Stempel der Rippen zum Lastabtrag (Rippenkurve). Dieses Modell 3 haben wir dem Grundriss der Rippenfigur eines Blütenblattes folgend (rot markierte Bogenrisse auf dem Boden) mit Holzstempeln erstellt und den Rippenversatz hinsichtlich Genauigkeit und Lagesicherung in Bezug zur Rippenkurve geübt.

Denkansatz ist, dass in der direkten Grundrisslinie des Rippenverlaufes Holzstempel gestellt werden, deren Höhenausragung sich nach der Orthogonalprojektion aus der Biege zwischen den Baumstämmen an den Rippenkreuzungen (Unterstützung zum Lastabtrag des Knotens) herleitet. Die Erfahrung mit die-

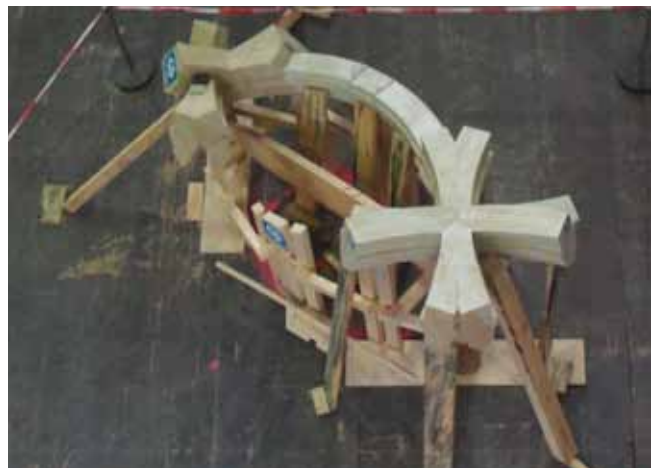


Abb. 10 und 11: Modell 3 - Modellversuch mit Rippenversatz

sem Modell 3 ergab, dass eine relativ sichere Lastabtragung und exakte Methode der Formgebung gefunden war, um das Rippenwerk werkgerecht versetzen zu können und eine Formkontrolle - zumindest über den Höhenverlauf - vornehmen zu können (über die Orthogonalprojektion der Biege und dem Falllot über den Grundrissradius).

Modellversuch 4

Bei aller Zufriedenheit über das Modell 3 reifte trotzdem der Gedanke: wie kann man mit dem Einsatz heutigen Wissens der Statik, der Materialeigenschaften und vor allem in neueren Technologien verwendeten Hilfskonstruktionen bei Bauzuständen bezüglich dem temporären Lastabtrag vielleicht eine noch einfachere - d.h. wirtschaftlichere - Form des Lehrgerüsts zum Rippenversatz finden? Dazu war der Denkansatz, zwischen den Baumstämmen, die die Knoten lastseitig abtragen und höhenseitig formulieren, den Rippenverlauf nicht mit einer Unmenge an Holz zu unterstützen, sondern einen verfahrbaren Stahlrahmen zu konstruieren, der je Rippenfigur den Versatz gewährleistet und dann weiter an die nächste Figur gefahren wird.

Basis ist bei dem Modell 4 ein im Grundriss der Rippengrundrissfigur folgender Stahlrahmen, auf dem verschiebbar Stahlstempel stehen, die höhenmäßig im geringen Raster (3 cm) Stellstufen haben für den Stempelkopf, der dreidimensional über 4 angeordnete Stellschrauben den Rippenauflagerkelch



Abb. 12 und 13: Modell 4 - Modell verfahrbares Stahlrahmenlehrgerüst

einrichten kann. Allerdings überholten die Erkenntnisse aus dem Probejoch, bei dem sich der Versatz noch einfacher gestaltete, dieses Modell 4, so dass es nicht weiter verfolgt wurde.

Modellversuch 5

An den Versuchen des Probejoches ergab sich aus den Untersuchungen zum Vermessungskonzept beim Probieren im Rippenversatz die Erkenntnis, dass eine formgebende Unterstützung des Lehrgerüsts für den Rippenversatz nicht notwendig, ja sogar eher verkehrt ist. Um die Rippenwerkstücke hinsichtlich Toleranzaustragung des Gesamtrippenwerkes zu versetzen benötigt man Spielraum, damit die Rippen zwischen den Knoten frei justiert und bestmöglich nach augenscheinlichen Gesichtspunkten ausgerichtet werden können. So ist es möglich, in den Fugenräumen die Versetz- und Fertigungstoleranzen der Werkstücke aufzunehmen. Nachdem die Knoten versetzt und ausgerichtet sind, ist durch die damit fest definierte Fugenebene (und seiner drei maßgebenden Koordinaten - dem unteren Rippenmittelpunkt sowie den beiden oberen Wangenpunkten) an allen Rippenausläufen des Knotens das räumliche Rippenwerk geometrisch definiert. Die Rippen - zwischen den jeweiligen Knoten in den Blütenblattfiguren sind somit nicht mehr nach den theoretischen Kurven der Rippen auszurichten, sondern „bestmöglich“ nach Augenmaß zwischen den Knoten mit ihren 6 oder 8 Rippenausläufen zu versetzen und damit auch die Toleranzen innerhalb dieser Rippenbögen im Versatz mit auszutragen. Dem folgend entstand das letztendlich zum Einsatz gelangte Modell 5, welches diesem Technologieansatz mit den im Knotenversatz unkorrigierbar vorgegebenen räumlichen Fugenansätzen für die Rippen folgte.

Das Modell 5 des Lehrgerüsts gliedert sich dabei in 2 Stufen. Stufe 1 ist ausgerichtet für den Versatz der Rippen mit einem zu gewährleistenden Lastabtrag der Sandsteinrippen und einer Handwerklich vor Ort angepassten (Keile, Sprießen und Knagen) Unterstützung zur Feinnivellierung des Versatzes. Danach wird das Lehrgerüst dahingehend umgebaut, dass in der Stufe 2 für den weitaus höheren Lastabtrag der Mauerwerkswölbung (Eigenlastberechnungen des Probejoches ergaben ungefähr ein Rippenwerk-Mauerwerkswölbungs-Verhältnis von 1 : 4) eine Horizontalaussteifung für den Gewölbeschub angebracht wird und andererseits die für die Baustellenlogistik notwendigen Freiräume zum Wölben und für den Stein- und Mörteltransport gewährleistet werden. Zudem dienen die horizontalen Schubaussteifungen gleichzeitig als Auflage für die zum Mauern erforderlichen Gerüstbohlen als Standfläche in der jeweilig nötigen Arbeitshöhe zum Wölben.

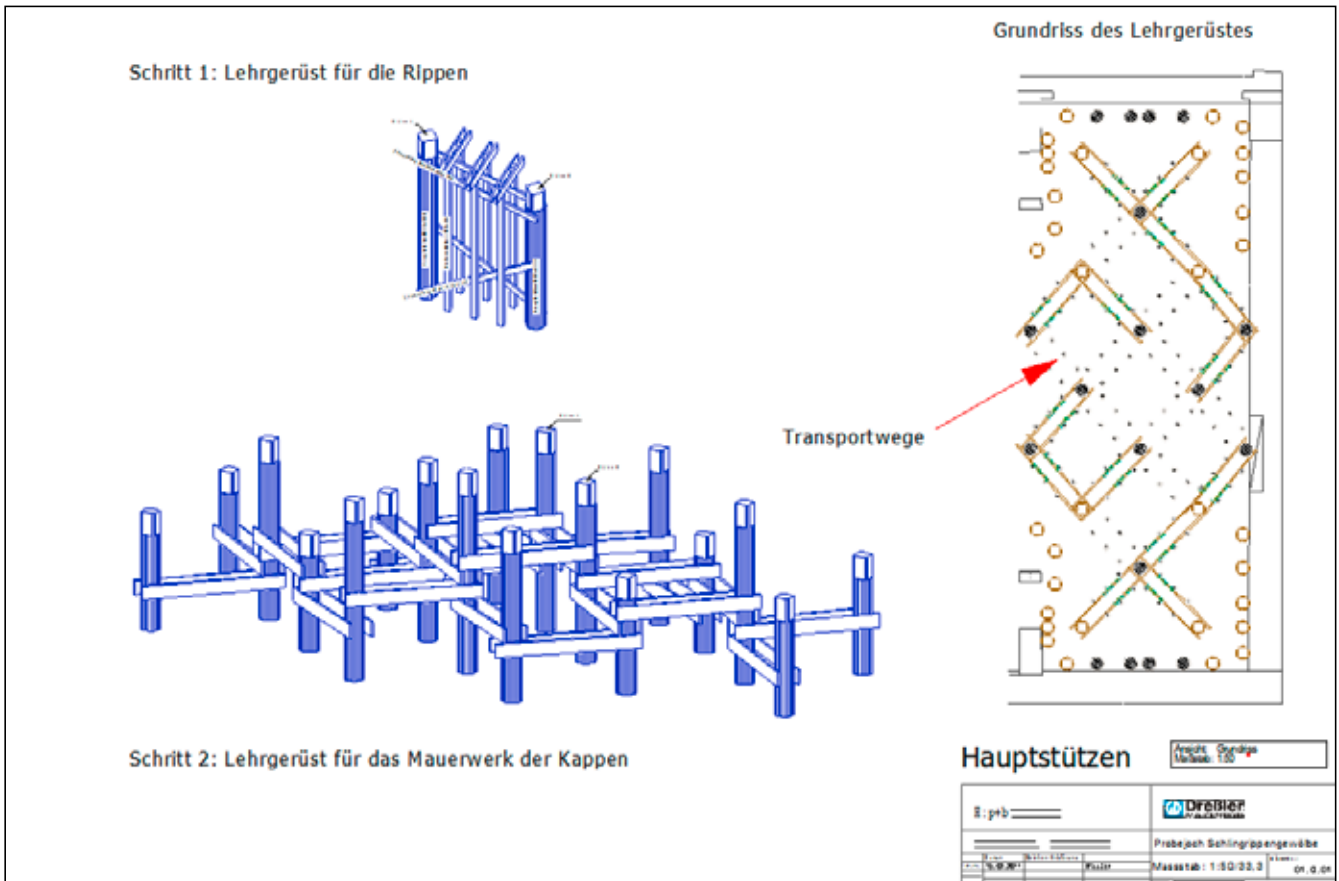


Abb. 14: Modell 5 Lehrgerüst mit 2 Stufen für Rippenversatz und Mauerwerkswölbung

1.2 Vermessungskonzept

1.2.1 Vermessungskonzept Herleitung

Zunächst bestand die Annahme, dass in der untrennbaren Einheit von Werksteinfertigung und dem Versatz des Rippenwerkes die Vermessung das zentrale Bindeglied ist. Basierend auf den beiden Einzelkurven der Grundrissfigur und der Bogenaustragung müsste dem folgend die Vermessung die daraus resultierende dreidimensional gekrümmte Rippenkurve (untere Rippenmittellinie) sowie die geometrisch einzuhaltenden oberen Wangenkurven messtechnisch vorgeben können und eine Formprüfung des Versatzes gewährleisten. Dies ist aber

nur durch ein Abgreifen von einzelnen 3 D Koordinaten von den Rippenkurven möglich und würde selbst mit heutiger 3D-Computertechnik einen enormen Aufwand bedeuten. Darüber hinaus ist es nur schwer vorstellbar, dass man in der Spätgotik mit dem damaligen Verfahren des Abgreifens von Längen vom Reißboden auf die Werksteinblöcke und den Arbeitsboden eine derartige Vorgehensweise zu Grunde legte. Die Auswertung von historischen Befunden zeigte im Wappensaal der Albrechtsburg Meißen⁷, dass dort im spiegelsymmetrischen Scheitelbereich auf den oberseitigen Werksteinebenen (im Scheitel sind Werksteinoberseiten durch den Steinschnitt bedingt eben ausgebildet) Risslinien erkennbar sind, die dem Rippenverlauf im Grundriss



Abb. 15: St. Marien Pirna - Wölbung oberseitig



Abb. 16: St. Barbara Kuttenberg - Wölbung oberseitig

folgen, d.h. die im Grundriss gekrümmten Rippenausläufe sind auch auf der Knotenoberseite gekrümmt gerissen und die gerade auslaufenden Rippen haben gerade Risslinien. Inwieweit diese Befunde Risse zum Ausrichten beim Versatz oder nur zur Orientierung sind, ist uns insoweit erklärbar, dass die gekrümmten Risslinien nur zur Orientierung (d.h. welche Knotenseite gehört zu welcher Seite des benachbarten Knotens) dienen können, da eine gekrümmte Risslinie, die sich zudem an der unteren Rippenmittellinie als 3-fach und fortlaufend gekrümmte Kurve orientiert, am Lehrgerüst als Versatzvorgabe nicht konstruierbar ist. Interessant sind aber vor allem auch die Befunde von Knotenoberseiten, die nicht im Scheitel liegen und statt den geneigten Werksteinoberseiten (geneigt durch Steinschnittfolge) auch ebene Steinoberseiten haben. Diese haben wir u. a. bei der gemeinsamen Begehung mit dem Statikbüro Kröning Ulbricht Schröter auf der Wölbung von St.Barbara in Kuttenberg sehen können, ebenso bei der Auswertung der Wölboberseite von St. Marien in Pirna.

Aber auch die während der Wiederherstellung des Domes zu Xanten nach 1945 dokumentierten Befunde zeigen⁸, dass man nicht nur die Rippenlinien gerissen hat, sondern auch Hilfslinien, die unabhängig des Rippenverlaufes gezogene Achsen darstellen. Daher lag der Schluss nahe, dass es einen einfacheren Zusammenhang zwischen den Kurven der Rippenfertigung und dem Rippenwerk im Versatz geben muss und dabei ebene Werksteinoberseiten bei allen Knoten eine Rolle spielen. Dieser Gedanke führte uns zu dem Ansatz, dem Versatz ein Achsraster - welches als Diagonalen die benachbarten Knotenpunkte verbindet zu Grunde zu legen. Diese Diagonalen werden dann sowohl auf den Rippenknoten im Stein gerissen als auch identisch auf dem Arbeitsboden, so dass eine geometrische Verbindung zwischen dem Werkstein und dem Riss der Figuration auf dem Boden gegeben ist. Wir folgen mit dem Vermessungskonzept für den Rippenversatz nicht mehr direkt dem Kurvenverlauf sondern beziehen uns auf die Kurvenkreuzungen als Punkte und deren diagonaler Verbindungen untereinander. Die Diagonalen sind dabei vom Rippenverlauf unabhängige Hilfsachsen und können auch in einer 45° abweichenden Ausrichtung vorgenommen werden. Im Grundriss werden zudem die horizontalen und vertikalen Achsen der Kreuzungspunkte gerissen um die Figuration auszurichten; sie gehören daher ebenso zum Vermessungskonzept (siehe Bild 18). Dieses Vermessungskonzept hat vor allem den Vorteil, dass man es auch mit einfacher Messtechnik (Wasserwaage, Winkel, Richtscheit und Schnüre) reißen kann.

1.2.2. Vermessungskonzept beim Probejoch incl. Verformungsmessungen

Einzig beim Probejoch haben wir allerdings die Vermessung auch zusätzlich auf Basis moderner lasergestützter Messtechnik vorgenommen, da uns hier neben dem Versatz der Rippen vor allem auch die Verformungen im Bauzustand sowie die seitliche Verwindung der Rippen interessieren. Das Lagenetz

aus diagonalen Achsen sowie den horizontal und vertikal (im Grundriss) ausgerichteten Achsen der Knotenschnittpunkte wurde dabei beim Probejoch mit einer schweren Vermarkung, bestehend aus an die Umfassungswände geschraubten Stahlkonsolen mit nivellierter Schraubbefestigung für die lasergestützte Messtechnik, eingerichtet. Es wurden insgesamt beim Probejoch 5 schwere Wandkonsolen eingerichtet, um hinsichtlich des später relativ dichten „Waldes“ der Lehrgerüststempel und Schubaussteifungen von einem dieser Punkte jeweils jeden erforderlichen Messpunkt auf dem Arbeitsboden und am Rippenwerk (siehe Formkontrolle und Verformungsmessungen) erreichen zu können, was auch weitgehend gelang. Eine Vermessung vom Arbeitsboden des Probejoches aus kam von vornherein nicht in Betracht, da diese bezüglich der wenn gleich nur geringen Verformungen des Arbeitsbodens unter Lastzuständen, aber auch den Toleranzen des Arbeitsbodens selbst, keine exakte Vermessung der Verformungen im Bauzustand erwarten ließ. Das Vermessungskonzept des Probejoches hatte aber neben der Gewährleistung des formgerechten Rippenversatzes auch die Aufgabe einer Formkontrolle des Rippenwerkes für die Eigenkontrolle der ausführenden Handwerker - bezogen auf die Kurve der unteren Rippenmittellinie und die oberen Wangenlinien -, da am Probejoch auch die Genauigkeit des Versatzes geübt wurde. Dazu wurden beim Probejoch 90 Einzelmessstellen des Rippenwerkes mit jeweils 3 Messpunkten (untere Rippenmittellinie, sowie Innenwan-



Abb. 17: Vermessung Probejoch Lagenetz und Verformung

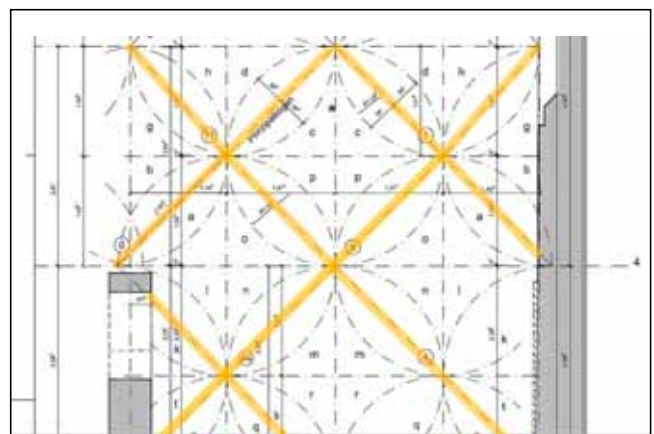


Abb. 18: Auszug aus Vermessungsplan

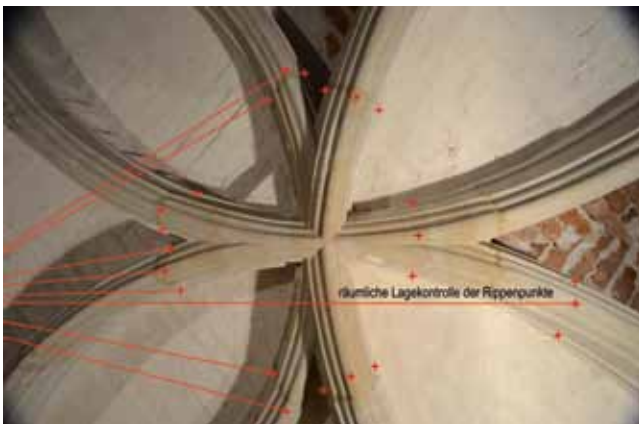


Abb. 19: Messkonzept Formkontrolle und Verformung über 3 Punkt

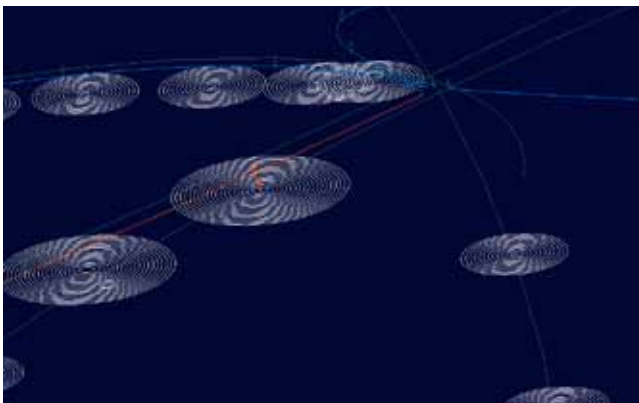


Abb. 20: Auswertung 3D-Messpunkte über Tellerraster in CATIA

genlinie und Außenwangenlinie) festgelegt. Diese insgesamt 270 Messpunkte wurden an den versetzten Rippen markiert und eingemessen.

Modellhaft wurden dabei einzelne Punkte des versetzten Rippenwerkes gemessen und als Koordinaten ins 3D-CATIA Modell der Volumenkörpermodellierung übertragen. Die Formkontrolle erfolgte über den Vergleich der gemessenen Koordinaten und der volumenkörpermodellierten Werkplanung mittels Tellerraster im 3D-CATIA Modell. Die Auswertung von Differenzen erfolgte dabei jeweils in Orthogonalprojektion auf die Grundebene oder Aufrissebene. Messtoleranzen konnten dabei über die empirische Betrachtung aller Messpunktwerte in einem Bereich mit i. M. 1 mm bewertet werden. Dies ist möglich, da sich bei 3D-Punktmessungen über markierte Punkte am Rippenprofil der Abstand zwischen dem unteren Rippenmittellinienpunkt und den beiden - zum jeweiligen Profilquerschnitt gehörigen - oberen zwei Wangenpunkten am Stein ja nicht ändert und so Messtoleranzen bei Folgemessungen (siehe Verformungsmessungen) dahingehend über eine Gesamtbetrachtung bewertet werden können.

Die 270 Messpunkte haben wir nicht nur bezogen auf eine Ebene sondern auch auf die räumliche Ausrichtung hin vermessen, um neben der Grundrissanordnung auch bei den folgend beschriebenen Verformungsmessungen seitliche Formänderungen ermitteln zu können. Die vertikalen Abweichungen

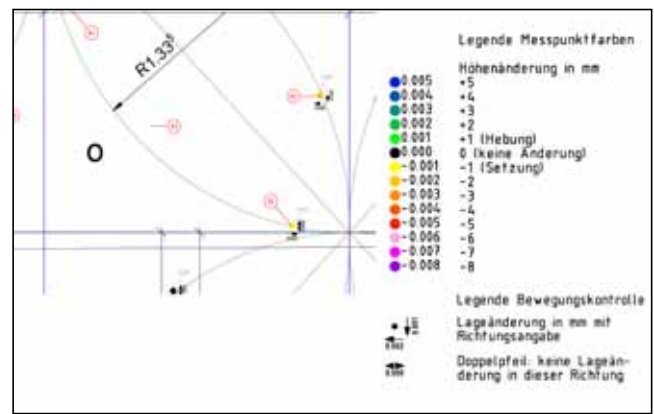
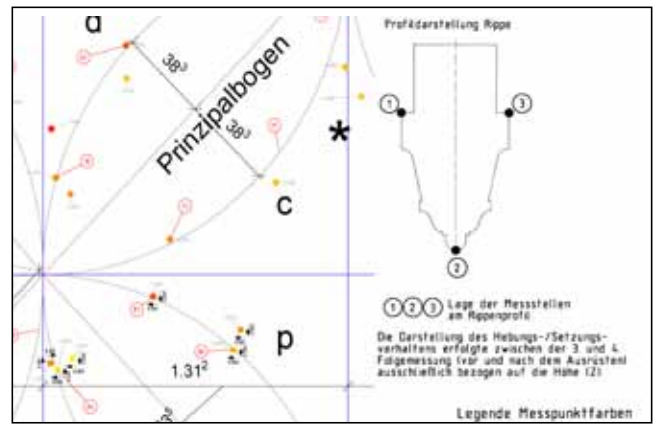


Abb. 21 und 22: Prinzip des Messkonzeptes zur Verformung der Rippenlage vertikal und horizontal

sind in den Messplänen mit Farbskalen markiert, die seitlichen Abweichungen beim Versatz und den nachfolgenden Verformungen mit schwarzen Pfeilen und Messwertangaben. Die Verformungsmessungen hatten das Ziel, während der Ausführung des Rippenwerkes und der folgenden Mauerwerkswölbung die unter den Lastzuständen eventuell auftretenden Verformungen des Rippenwerkes festzustellen, um die Tauglichkeit des Lehrgerüsts zur Formsicherung nachzuweisen. Unter Berücksichtigung von einer Messtoleranz mit i. M. 1 mm hat die Messserie mit einer Grundeinmessung und 3 Folgemessungen während der Wölbung ergeben, dass eine messbare Verformung von 1 mm - in Einzelbereichen 2 mm - in einem zulässigen Bereich erfolgten die unseres Erachtens das Lehrgerüst mit seinem Konzept als geeignet ansehen lässt. Die vierte Messung wurde einen Tag nach dem Ausrüsten des Lehrgerüsts vorgenommen und zeigte in der Abweichung zur dritten Messung (nach vollständiger Mauerwerkswölbung - vor dem Ausrüsten), dass im Scheitelbereich am Rippenwerk vertikale Setzungen von 3-4 mm feststellbar waren, die zum Kämpferbereich hin abfallend auf 2-0 mm abnahmen. Interessant sind dabei aber die seitlich gemessenen Verformungen, die in empirischer Auswertung eine seitliche Verschiebung vom Scheitelbereich zum Kämpferbereich abnehmend von 2 auf 0 mm messbar waren und damit eine unter ingenieurtechnischer Betrachtung logische Verformung beim Übergang in den Eigenlastzustand der Wölbung zeigten.

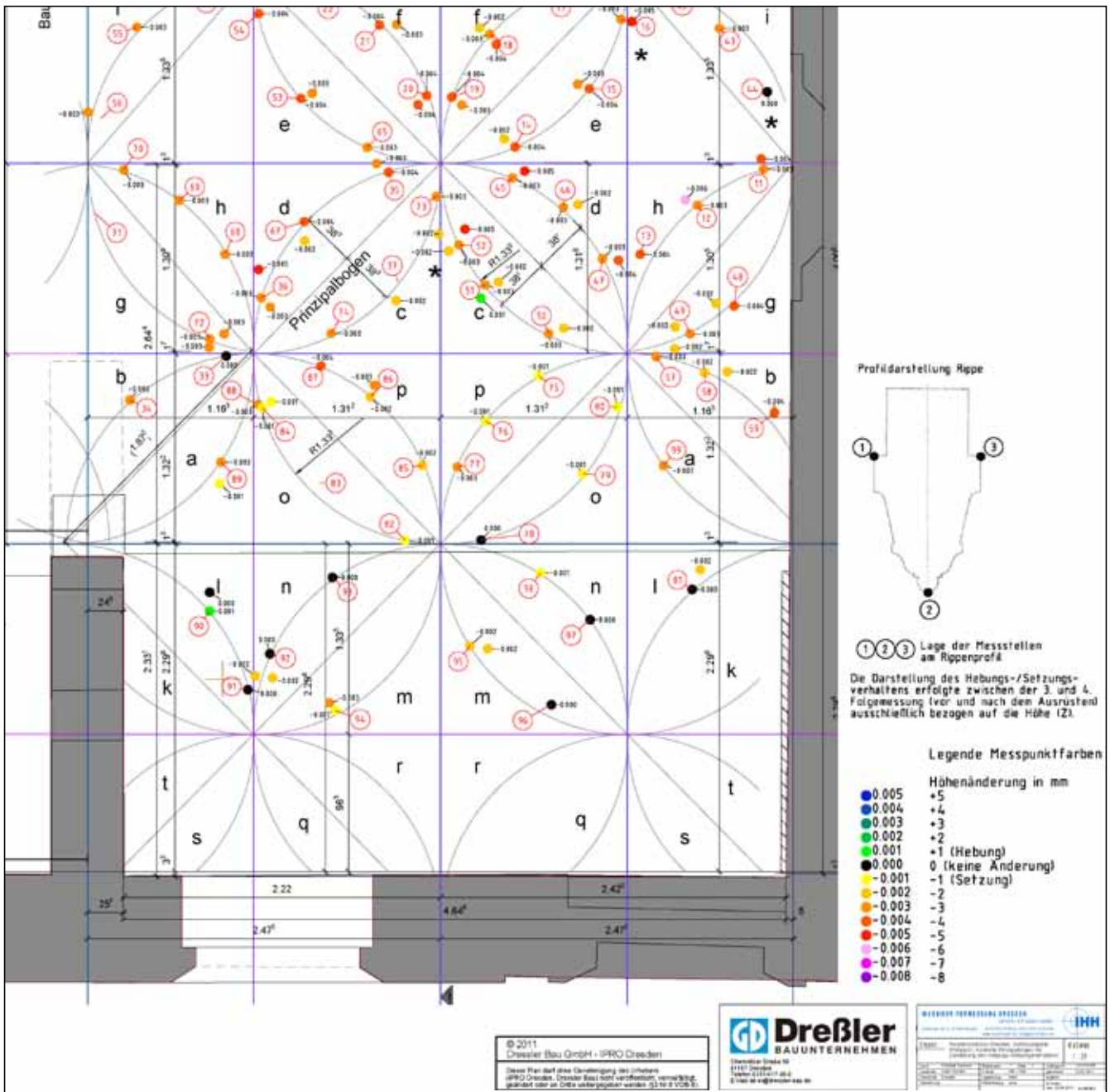


Abb. 23: 4. Messung nach dem Ausrüsten des Lehrgerüsts als Differenz zur 3. Messung

1.3 Versetzen des Rippenwerkes

1.3.1 Versetzen der Knoten

Die letztendlich bei den Jochen 1 bis 6 umgesetzte Technologie von Lehrgerüst und Rippenversatz ist als Ergebnis aus den Untersuchungen der vorgenannten 5 Lehrgerüstmodelle und den Versuchen zum Vermessungskonzept entwickelt worden. Nachfolgende Arbeitsschritte wurden dabei jochweise ausgeführt:

1. Riss der Figuration incl. Achssystemen auf dem Arbeitsboden
2. Aufrichten und Ausrichten der unbesäumten Baumstämme auf den Knotenpunkten
3. Setzen der Rippenknoten über die Zwickelstempel und Ausrichten über obere Knotenebene
4. Formkontrolle und Untermörtelung der Rippenknoten für den Lastabtrag in den Baumstamm

5. damit ist das Koordinatennetz des Rippenwerkes unkorrigierbar gesetzt, da nunmehr die an den Knoten auslaufenden Rippenansätze die zwischen den Knoten zu setzenden Rippen in Ihrer Lage und Ausrichtung im Detail definieren

Um den Versatz wie vor beschrieben vornehmen zu können, bedingt die Knotenmodellierung, dass oberseitig eine Ebene steinmetzseitig vorgesehen wird (siehe vorgenannte Ausführungen zu historischen Befunden Ziff. 1.2.1, Seite 9), die die Möglichkeit folgender Risse sichert:

- Diagonalachsen auf dem Knoten gerissen in Bezug zu Diagonalachsen auf dem Arbeitsboden
- Absolute Höhe des Knotens im Versatz über definierte Höhe der Knotenoberseite im Aufriss



Abb. 24 und 25: Knotenversatz auf Baumstämmen über Zwickelstempel, danach Vermörtelung (Knoten-Stamm) zum Lastabtrag (historisch wahrscheinlich über Kirschkernkissen oder Sandsäcke)

- Ebenheit der Knotenoberseite über Wasserwaage (früher Pendelwaage) kreuzweise prüfbar
- Kurven der Rippenverläufe (Grundrissfigur) sind keine Versatzvorgabe mehr (nur zur Kontrolle)
- In den Zwickeln der Rippenausläufe werden unterseitig

ebene Auflagerflächen steinmetzseitig ausgebildet, die ein Aufsetzen der Zwickelstempel (Kanthölzer) am Baumstamm ermöglichen sowie den unterseitigen Auflagerebenen in den Zwickelbereichen der auslaufenden Rippen (gelbe Flächen-Bild 26)

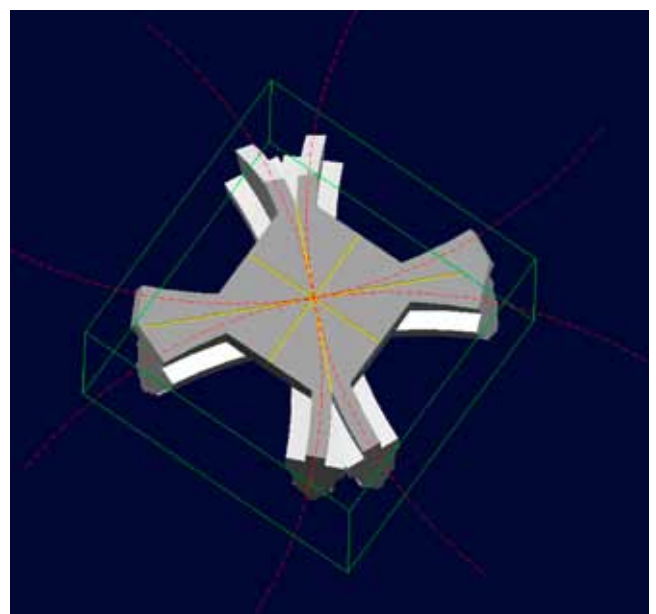
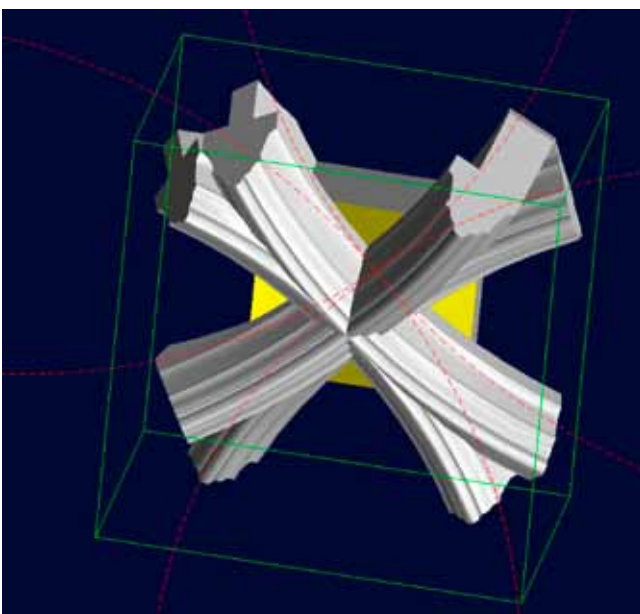


Abb. 26 und 27: Volumenkörpermodellierter (CATIA) Knoten mit oberseitiger Ebene und gerissenen Diagonalachsen (gelbe Achsen-Bild 27)



Abb. 28 und 29: Versatz Knoten von oben über Portalkran

Das Reißen der Diagonalkreuze auf der oberen Knotenebene als auch das Setzen der Knoten mit seinen unteren ebenen Zwickelflächen auf die Stempel am Baumstamm ermöglichen ein sehr exaktes und zeitlich effektives Versetzen der Knoten. Exakt, da ebene untere Zwickelflächen eine von den geneigten Rippenausläufen unabhängige, vorab definierte horizontale Auflage besitzen. Und zeitlich effektiv, da das Einmessen von mindestens 3 Höhenpunkten an Rippenunterseiten zur Lagebestimmung des Knoten, nicht nötig ist, sondern nur noch die vorab definierten Auflager der unteren Zwickelflächen bestimmt werden müssen. Hingegen brachten vorherige Versuche über 3 definierte Punkte an der unteren Rippenmittellinie von jeweils auslaufenden Rippen gerade bei Knoten mit unterschiedlichen Rippenausläufen, d.h. sowohl nach oben als auch nach unten auslaufend, enorme Schwierigkeiten bei dem Ausrichten der Knoten.

Der Knotenversatz erfolgt dabei grundsätzlich von oben über einen Portalkran (siehe Baustellenlogistik), da bei Einzelgewichten von ca. 150 kg (4-teilig) bis 400 kg (8-teilig) der Knoten nicht mehr per Hand – auch nicht mit 3 oder 4 Versetzern – bewegt werden kann. Erst recht nicht ist es noch möglich, bei solch hohen Einzellasten ein Ausrichten des Knotens vorzunehmen, wenn er nicht im Seil hängt.

1.3.2 Versetzen der Rippen

Anders als bei den Knoten können die Rippenwerkstücke per Hand und von unten angedient versetzt werden, da Rippen mit

Werkstücklängen von i. M. 50–60 cm Einzelgewichte von 20 bis 30 kg aufweisen und damit handhabbar sind. Dies ist unseres Erachtens auch der Grund für die an historischen Schlingrippengewölben erkennbaren Fugenaufteilungen, die weniger eine gestalterische Funktion haben, sondern eine technologische Folge der händischen Versetzbarkeit sind. Zwischen den auslaufenden Rippenansätzen der Knoten, die jeweils da enden, wo sich der erste freie und vollständige Rippenprofilquerschnitt zeigt, werden dann folgend die 2 oder 3 Rippenwerkstücke je Blütenblattfigur zwischen den Knoten über Hilfslehrgerüste (siehe Stufe 1 am Modell 5) versetzt, ausgerichtet und mittels Keilen und Knacken lageseitig fixiert.

Nach der Formkontrolle, die nicht mehr die theoretische Rippenkurve zum Bezug nimmt, sondern über Augenschein mit der bestmöglichen Passung der Rippen zwischen die Knoten erfolgt (Falllot in Bezug zur Grundrissfigur auf dem Arbeitsboden wird nur bei Passproblemen verwendet), wird die nachfolgend beschriebene Rippenbefestigung mit Ziehstiften und Fugenverguss vorgenommen. Erforderlich für die Technologie der Rippenbefestigung ist, dass beim Versatz der Rippen bereits als Fugenabstandshalter Wickelblei eingesetzt wird, damit der Fugenabstand auch nach Ausrichten der Rippen in ausreichendem Maße gewährleistet ist. Die Verbindung der Rippen untereinander erfolgt über Ziehstifte als Ankerdorn zwischen benachbarten Rippen sowie zwischen Rippen und Knoten. Diese Technologievorgabe vom Statikbüro Kröning-Ulbricht-Schröter



Abb. 30: Setzen der ersten Rippe zwischen zwei Knoten



Abb. 31: Setzen der zweiten Rippe zwischen zwei Knoten



Abb. 32: Verguss der Rippenfuge über Gusskanäle im Werkstein

folgt dabei den historischen Befunden an einer Vielzahl von Schlingrippen, wo viereckige Eisenstifte oder Holzdübel nachgewiesen sind. Einzig im Material wurde hier zeitgemäß ein Edelstahlanker eingesetzt, um den heutigen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Verbindung gerecht zu werden. Die Ankerbohrungen für die Ziehstifte werden dabei bereits bei der Rippenfertigung vorgenommen, was bezüglich der tangentialen Ausrichtung der geraden Stiftachse in die gekrümmten Rippen nur über ein Aneinanderpassen benachbarter Rippen und dem dabei vorzunehmenden Reißen möglich ist. Eine der beiden aneinander liegenden Rippen bekommt dabei eine Bohrtiefe mit einer Länge von einer halben Ankerlänge und die andere, jeweils oberhalb der Fuge liegende Rippe eine Ankerlochtiefe von einer gesamten Ankerlänge. Dies ist notwendig, da der Ziehstift zunächst in die oberhalb der Fuge liegende Rippe vollständig eingeschoben (und mittels einem am Anker befestigten Strick und zusätzlichem Klebeband gegen ein vorzeitiges Herausrutschen gesichert) wird, damit das jeweils zweite Rippenwerkstück zwischen die Rippenfugen von oben eingesetzt werden kann. Ein Ziehen der Stifte von unten nach oben hat sich in den Versuchen als nachteilig erwiesen, da hier eher die Gefahr des Zurückrutschens während des Fugenvergusses besteht, was uns auch einmal passiert ist. Nach dem Rippenversatz wird der Ankerstift mittels dem Strick in die benachbarte Rippe gezogen und der Strick oberhalb der Fuge zur Lagesicherung fixiert. Auch der Einsatz von Ziehstiften ist historisch nachweisbar, so sind u. a. in der Marienkirche Pirna bei Rekonstruktionsarbeiten noch die abgeschnittenen Stricke von Stiften gefunden wurden⁹. Anschließend wird über Vergusskanäle im Werkstein zuerst das Ankerloch und danach die Fuge mit einem Mörtel vergossen. Damit dieser nicht aus der Fuge fließen kann, wird diese zuvor mittels Hanf verdämmt. Die Verdämmung der Fuge erfolgt in der Tiefe ungefähr so weit, wie die später auszufugende Rippenfuge breit ist. Es sind auch historische Verdämmungen mittels Lehm überliefert¹⁰, was wohl aber eher bei einem Verbleien von Fugen in Betracht käme. Ein Verbleien der Fugen war laut Aufgabenstellung nicht vorgesehen und ist in Bezug zu dem bereits für die Frauenkirche Dresden von der TUBAG modifizierten Vergussmörtel, den wir auch hier eingesetzt haben, qualitativ auch eher nachteilig. Die Druckübertragung



Abb. 33: Verdämmung der Rippenfuge mit Hanf

in Längsrichtung der Rippen erfolgte aber **im Bauzustand** unverändert über die Wickelbleiabstandhalter, d. h. in historischem Material. Nach dem Anker- und Fugenverguss bleibt das Lehrgerüst Stufe 1 (Modell 5) im Regelfall noch vier Wochen zur Rippenunterstützung stehen, bevor es in die Stufe 2 zur nachfolgenden Mauerwerkswölbung umgebaut wird.

1.4 Ausrüsten des Lehrgerüsts

Die mit spannendste Frage beim Lehrgerüst war von Anfang an die Überlegung: wie kann nach fertiger Wölbung das Lehrgerüst so zurückgebaut werden, dass das Rippenwerk und die Mauerwerkswölbung mit der zu erwartenden Verformung beim Übergang in den Zustand des eigenen Tragverhaltens (jedes Gewölbe wird sich beim Ausschalen/Ausrüsten setzen) keinen Schaden nehmen oder in Folge falscher Ausbaufolge der Baumstämme gar einstürzten.

Für den Wladislawsaal in der Prager Burg ist belegt¹¹, dass das erste Joch zunächst eingestürzt war, was neben statischen Ursachen durchaus auch ein Hinweis darauf sein muss, dass das Gewölbe beim Ausschalen „eingegangen“ war. Gab es historisch beim Ausrüsten die Technologie, dies über Sandtöpfe, in denen die Baumstämme standen, vorzunehmen oder gar über Keile unter den Stämmen (unsere Versuche dazu zeigten, dass dies wegen Lagesicherung der Stämme nicht möglich ist) oder sind die Gurtbögen in mehrjochigen Gewölben (wenn auch nur oberseitig ausgebildet) die konstruktive Vorlage, jochweise ausrüsten zu können? Wir wissen es nicht und haben daher mit umso mehr Respekt vor diesem Detail zunächst im Arbeitsboden eine schraubbare Absenkmöglichkeit des gesamten Bodens konstruiert und eingebaut („Notausgang“). Die Versuche am Probejoch der zu rekonstruierenden Wölbung der Dresdner Schlosskapelle brachten die Erkenntnis, dass nach einem geringfügigen Absenken des Bodens (5 mm) ein Ausrüsten über zuerst Schrägschnitte am Stammkopf, denn das Ausschlagen der Mörtelunterfütterung und schliesslich das Ausschlagen der Baumstämme am Stammfuß schadfrei Ausrüsten ermöglicht ist. Wichtig dabei ist die Folge der auszubauenden Knotenunterstützungen und Schubaussteifungen, die uns seitens der Statik



Abb. 34: Holzbrett unter Rippe zur Kontrolle der Verformung



Abb. 36: Rückbau der Schubaussteifungen



Abb. 35: Schrägschnitte am Stammkopf zur Lockerung



Abb. 37: Ausschlagen der Baumstämme am Fuß

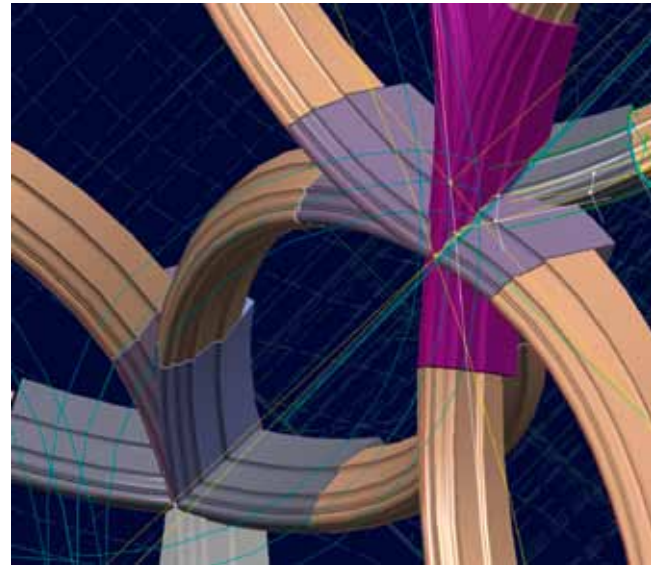
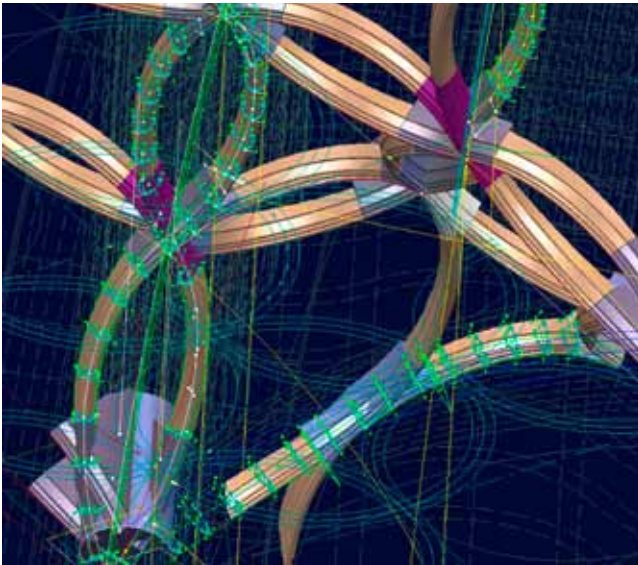


Abb. 38 und 39: Volumenkörpermodelliertes Rippenmodell (CATIA) mit bereits integrierter Rippenkörperverwindung (3-Punkt-These)

(Büro Kröning-Ulbrich-Schröter) aus der Betrachtung der zu erwartenden Verformung vorgegeben wurde und auch so funktionierte. Beim Ausrüsten der Joche 1 bis 6 zeigte sich dann Dank der gewonnenen Erfahrung beim Probejoch, dass die geübte Technologie mit Schrägschnitten am Stammkopf und Ausschlagen der Baumstämme am Stammfuß auch ohne vorheriges Absenken des Arbeitsbodens schadensfrei möglich ist.

1.5 Fertigung der Rippen und Knoten

Die steinmetzmäßige Fertigung von Rippen und Knoten haben wir bei der Rekonstruktion der Wölbung der Dresdner

Schlosskapelle nicht in traditioneller handwerklicher Weise vorgenommen. Jedoch haben wir die historische Steinschnittfolge in traditioneller Steinmetzarbeit bei der Erarbeitung von 2 Modellrippen für das Schlingrippengewölbe der Erasmuskapelle des Berliner Schlosses geübt und nachgewiesen¹² und wir haben aus rein wirtschaftlichen Gründen bei der Dresdner Rekonstruktion ein Verfahren entwickelt, das es ermöglicht, den Rippenwerkstein über eine volumenkörpermodellerte 3D-CATIA-Rippenwerkplanung im Datensatz zu schaffen. Dieser gewährleistet zudem den geringstmöglichen Materialeinsatz beim Sandsteinrohblock. Bei einer handwerklich historischen Rippenfertigung benötigte man einen 6-seitig planebenen Rohblock, der jeweils ein Reißen der Grundrissfigur und der Aufrissfigur sicherstellte,

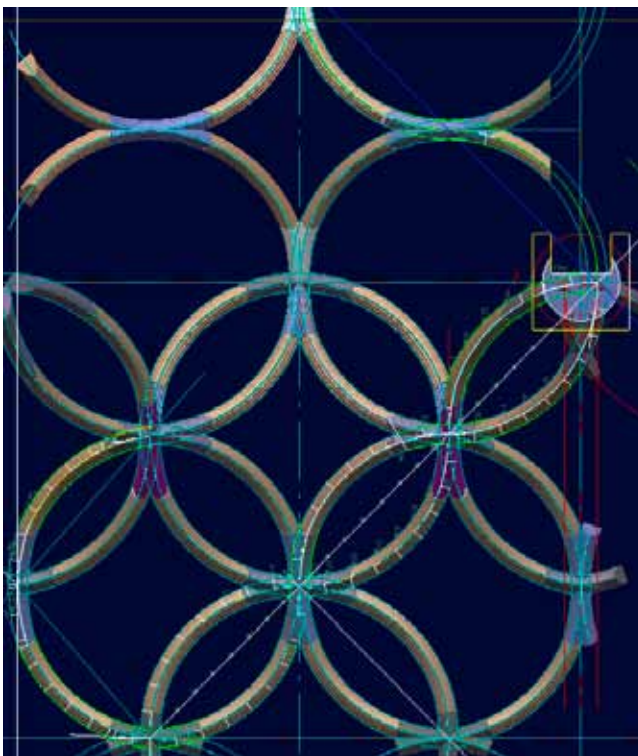


Abb. 40: Rippenkörpermodell-3D-Untersicht

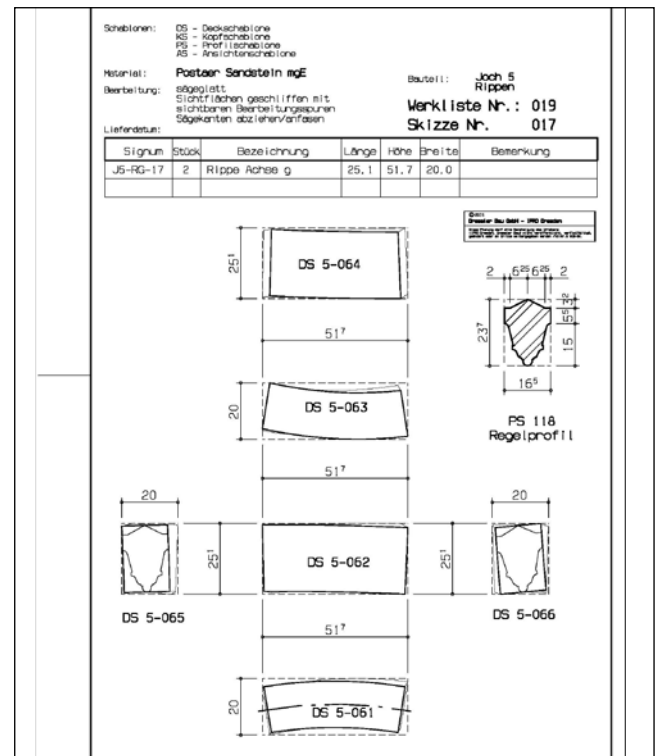


Abb. 41: Werkplan 6-seitiger Rippenschablonen



Abb. 42: Steinschnittfolge Knoten über 6-seitige Schablonen

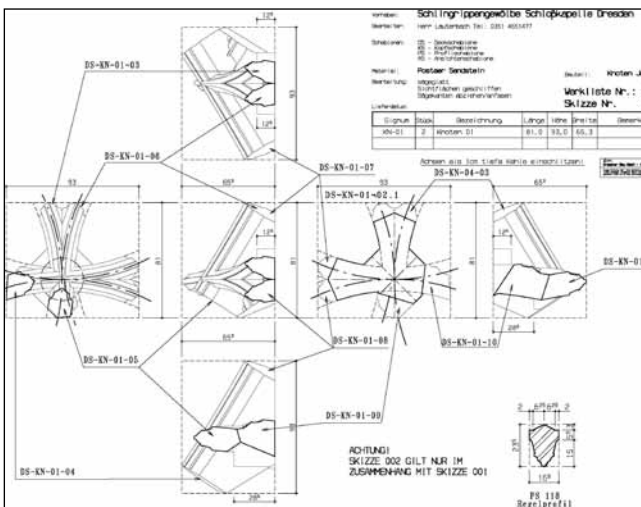


Abb. 43: Werkplan 6-seitiger Schablonen-Erstschnitt

d. h. egal wie stark die Neigung der Rippe ist, so ist die Rohblockhöhe von Tiefst- zu Höchstpunkt der Rippen erforderlich und Gleiches im Grundriss. Unser heutiges - 3D-gestütztes - Modellverfahren sichert aber die Möglichkeit, den Rohblock als geringste Rohblockbreite/Rohblockhöhe in geneigter und

schrägstehender Lage aus dem zuvor modellierten 3D-CATIA-Rippenwerk virtuell herauszugreifen.

Eigene Berechnungen zur Kalkulation ergaben dazu, dass wir durch unser neuzeitliches Verfahren einen drei- bis vierfach geringeren Rohmaterialeinsatz haben als bei einer Rippenfertigung nach handwerklich traditioneller Steinschnittfolge. Unser verwendetes Verfahren sieht dabei ein Setzen von 6-seitigen Blockschablonen - bezüglich Orthogonalprojektion perspektivisch ausmodelliert - im 3D-CATIA-Rippenkörpermodell vor sowie insbesondere bei Knoten dann weitere Orthogonalschablonen für definierte Ebenen im Steininneren. Dies ermöglicht vor allem auch, dass nicht wie bei der traditionellen Steinschnittfolge bis zum Schluss der Steinmetz den Ausgangsriß als Bezug auf einer Rohblockseite haben muss.

Mit dem unsererseits entwickelten technologischen Verfahren der Rippen- und Knotenfertigung gewährleisten wir über virtuelle Hilfsebenen und Hilfsschablonen im 3D-Raum Bezüge, die von den historischen Geometriebezügen in der Fertigung teilweise abweichen, um aber im Ergebnis den gleichen, volumen-definierten Rippenkörper zu erreichen. Der Unterschied liegt insbesondere auch in dem Vorteil, dass bei unserem Verfahren ein Steinmetz, der zuvor noch nie etwas von Schlingrippen gehört hat, diese nach unseren Schablonen fertigen kann, da die „Werkmeisterarbeit des Risses“ bei uns nicht mehr am Stein sondern am Computer und seinem 3D-Modell erfolgt.

Nach dem Reißen der 6-seitigen Schablonen auf dem Rohblock und bei Knoten folgender Schablonen auf Hilfsebenen, welches über perforierte oder vorgezeichnete 1:1-Schablonen vorgenommen wird, wird über Reißziehlehren der Profilbezug mit seiner sich fortlaufend ändernden Krümmung auf den Stein angezeichnet und durch die inzwischen erworbene Erfahrung völlig freihändig das Rippenprofil am Stein steinmetzseitig ausgearbeitet. Ein Erfordernis von Profilschablonen für die Rippenkörperfertigung - die zudem wegen der sich fortlaufend ändernden Krümmung der Körperkurven sowieso untauglich wären - ist



Abb. 44 und 45: Völlig freihändige Ausarbeitung der Rippenprofilkörper am Knoten nach vorherigem Steinschnitt nach 3D-Schablone, hier zu sehen ist die Knotenfertigung mit den Steinmetzen Jens Schrot und Jens Wildenhayn von Fuchs & Girke in Ottendorf-Okrilla

daher unseres Erachtens nicht gegeben. Die historischen Überlieferungen von Profilschablonen haben einzig die Notwendigkeit, die 3-Punkt-Lage¹³ je Profil zwischen unterer Mittellinie und den differentiellen oberen Wangenkurven an der Rippenfuge anreißen zu können. Unsere Verfahrensentwicklung und werkplanungsseitigen bzw. steinmetzseitigen Ansätze sind sicher ein eigenes Herangehen an eine Rippenrekonstruktion, bestätigen aber mit der im Endeffekt sichergestellten Formübereinstimmung der Rippen und Knoten die im Rippenwerk geforderten Körpervorgaben, wenn auch nicht in traditioneller Fertigung. 13)

Höchst interessant ist letztendlich bei der neuzeitlichen Fertigung die Erkenntnis, dass es möglich ist, dies mit einer sehr aufwendigen Körpermodellierung am 3D-CATIA-Modell auch vorzunehmen, aber – bis auf den Rohmaterialeinsatz – das historische Verfahren nach wie vor das einfachere ist.

1.6 Baustellenlogistik für Versatz und Wölbung

Die Baustellenlogistik hat einen maßgebenden Einfluss auf die technologische Gestaltung und die Ausführungsfolge des Lehrgerüsts. Ist es möglich, jochweise von einem Ende zum anderen zu wölben, so bedarf es neben der Sicherstellung des Vertikaltransportes (Hübe aller Materialien auf den Arbeitsboden) vor allem der jochübergreifenden Andienung „von oben“. Dem folgend haben wir einen händisch verfahrbaren Portalkran aus Stahl konstruiert und zum Versatz der schweren Knoten eingesetzt, aber auch für jochübergreifende Transporte ins „Innere des



Abb. 47: Arbeitsboden (Untersicht) auf Stahlrahmengerüst



Abb. 48: Portalkran, auf Schienen per Hand verfahrbar

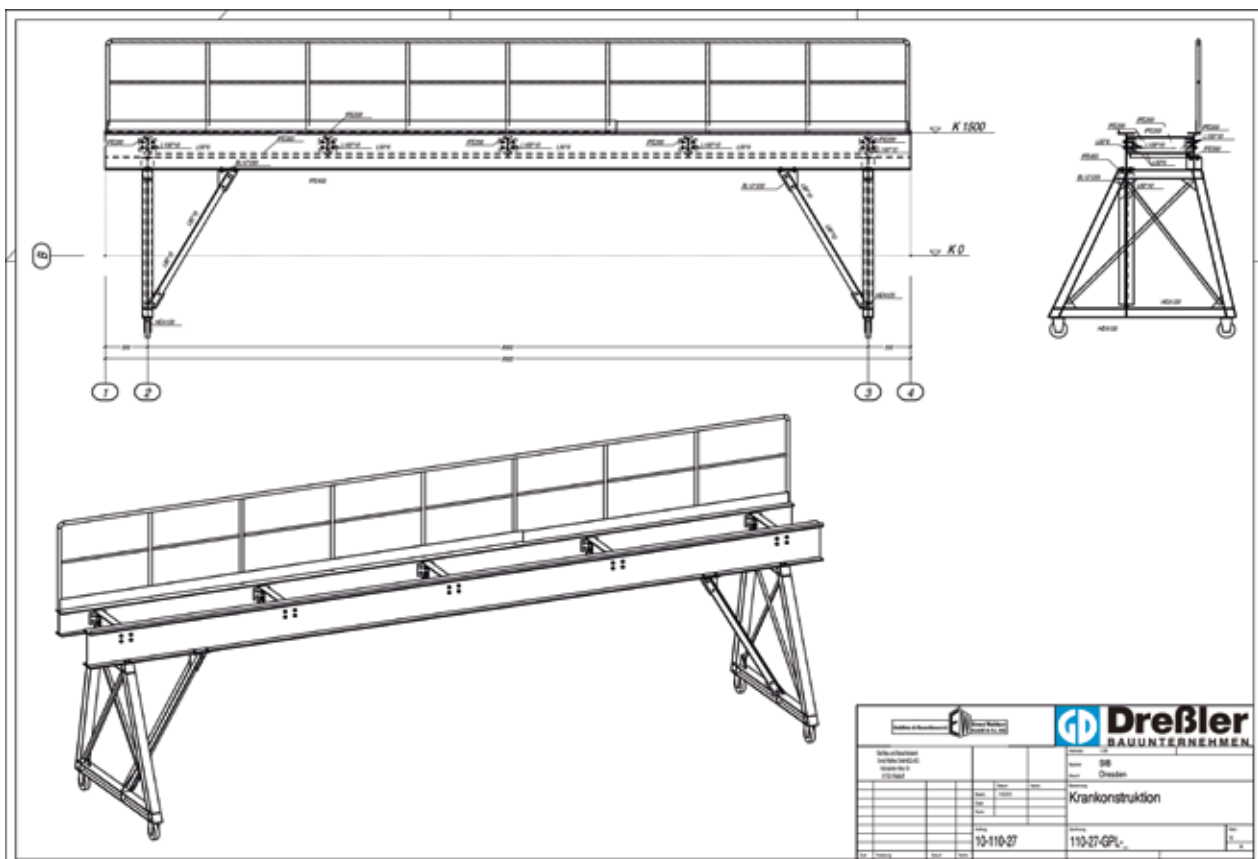


Abb. 46: Werkplan Portalkran zum Rippenversatz



Abb. 50: Fertigung des Handstrichziegels



Abb. 49: Trockenlöschen des Kalkspatzmörtels in Stahlwanne

Lehrgerüstwaldes“, wo Horizontaltransporte partiell in Folge der Schubaussteifungen nicht mehr möglich waren. Diese Baustellenlogistik mit Bauaufzug auf die Arbeitsebene (Vertikaltransport) und Portalkran (Horizontaltransport und vertikale Andienung beim Knotenversatz) folgt dabei den Prinzipien des historischen Baubetriebes, wo statt Bauaufzug z. B. Treträder zum Hub eingesetzt wurden und statt dem Portalkran aus Stahl historisch Auslegerkräne/Galgen aus Holz¹⁴. Die Andienung der einzelnen Baustoffe an das Lehrgerüst erfolgte heute ähnlich wie historisch in Mulden (heute Mörtelbutten) und Körben (heute Ziegelpaletten). Das heißt an den Prinzipien der Baustellenlogistik ein Gewölbe zu bauen hat sich im Vergleich zwischen historisch überlieferter Bauweise und neuzeitlicher kaum etwas geändert.

1.7 Materialfertigung zum Freien Wölben

Obwohl die Maurer und Ingenieure der Dreßler Bau GmbH im Freien Wölben durchaus erfahren sind (siehe u. a. Neues Museum Berlin – Kuppel Südosttrialisit, Frauenkirche Dresden),

stellte das Wölben über den Schlingrippen handwerklich einige neue Herausforderungen an uns, die zunächst im Bereich der Materialien gelöst werden mussten. Das Steinformat der Handstrichziegel wurde durch die Denkmalpflege mit den Maßen 6,5*13*28 (cm) vorgegeben, was für das Wölben natürlich sehr hohe Einzelgewichte bewirkt. Dem folgend haben wir nach Materialstudien an den Mauerwerkswölbungen von St. Annen in Annaberg-Buchholz und St. Barbara in Kuttenberg gemeinsam mit dem Ziegelwerk Huber unzählige Versuche zur Ziegelrezeptur gefahren, die in über 3-monatiger Dauer mit dem Partner Kai Neuling am Verbund zwischen selbst hergestellten Kalkspatzenmörtel und offenporigen Backstein letztendlich dahingehend zum Erfolg führte, dass der Stein mit seiner Rohdichte nicht zu schwer und aber auch nicht zu leicht ist (da er dann zu viel Wasser als Gewichtsaufnahme zieht) und andererseits der Mörtel eine Klebewirkung zum Stein hat, die den Stein ohne Unterstützung ansetzen lässt, aber noch so elastisch bleibt, dass er die Verformungen aus den Bauzuständen der Wölbung ohne nennenswerte Risse aufnehmen kann. Eines der erstaunlichsten Erkenntnisse war, dass beim Mörtelmischen



Abb. 51: Freies Wölben (re.+li. Juteabdeckung zum Feuchthalten)



Abb. 52: Freies Wölben über Rippenwerk; Standfläche Maurer

von ein und derselben Rezeptur ein wesentlicher Unterschied besteht, ob dieser per Hand (doppelt so gute Klebewirkung) oder mit dem mechanischen Rührwerk erfolgt.

Die zum freien Wölben vorgesehenen Mauerwerksverbände, die wir in Bezug zu historischen Vorbildern (Landhauskapelle Wien, Erasmuskapelle Berlin, Eleemosynariuskapelle Neusohl) durchaus kritisch sehen, wurden durch David Wendland vorgegeben und bestanden den Belastungsversuch der TU Dresden am Probejoch. Daher kann man davon ausgehen, dass auch die im Versuch unsererseits wieder gefundenen Rezepturen zum Kalkspatzenmörtel und Handstrichziegel ihre Berechtigung in der Rekonstruktion der Wölbung haben.

1.8. Zusammenfassung

Im Ergebnis der Rekonstruktion des Rippenwerkes ist festzustellen, dass uns nach dem Probejoch mit seinen gesammelten Erfahrungen bei der danach folgenden Wölbung der Joche 1 bis 6 eine deutlich kürzere Ausführungszeit der Wölbung gelang. Wir benötigten für den Versatz eines Joches (von Beginn Lehrgerüst bis Verguss Rippenfuge) i. M. 6-7 Wochen sowie für das reine Wölben 5-6 Wochen. Der Arbeitskräfteeinsatz war bei diesen Ausführungszeiten mit einem Zimmerer (Jan Freitag) und drei Maurern bzw. Steinversetzern (Steffen Rauh, Matthias Fleischer, Carsten Kramer) sowie einem Mörtelmischer und Logistiker (Immanuel Schäfer), also gesamt 5 Arbeitskräften eher gering.



Abb. 53: Das Versetzen des letzten Rippenwerkstückes am 27.03.2013; Immanuel Schäfer, Mathias Fleischer, Carsten Kramer (hi.), Jan Freitag, Steffen Rauh (hi.), Jörg Lauterbach und Thomas Bauer (v.r.n.l.)

Bei einem Einsatz von doppelt so vielen Arbeitskräften wären sicher auch die historischen Ausführungszeiten zu erreichen gewesen. Allerdings haben wir auf die heutige baubegleitende Planung Rücksicht nehmen müssen, und so war eine vollständige Vorfertigung der Werksteine vor dem Beginn der Ausführung des Versatzes vor Ort nicht immer gegeben. Und die Fertigung der Sandsteinrippen und Sandsteinknoten prägt nun einmal als die aufwendigste Teilleistung bei der Wölbung die maßgebliche Bauablaufgeschwindigkeit.

Die steintechnische Werkplanung (Jörg Lauterbach und Thomas Bauer) sowie die Bauvorbereitung, Technologie und Bauleitung (Thomas Bauer) wurde mit dem Einsatz von 2 Ingenieuren/Architekten bei der Ausführung des Gewölbes ausgeführt. Für die Fertigung von Sandsteinrippen benötigten die Steinmetzen, nach ausreichender Erfahrung und Übung am Probejoch, i.M. 12-14 Stunden pro Rippe (Rippenlänge 50-60 cm) sowie für die Fertigung von Rippenknoten zwischen 10 und 15 Arbeitstagen pro Knoten (je nachdem ob mit 4, 6 oder 8 Rippenausläufen). Verwendet wurde ein Pirnaischer Sandstein, so wie es auch schon historisch überliefert ist¹⁵. Die heute dazu ausgesuchten Brüche in Mühlleite bei Lohmen liegen dabei etwas oberhalb gegenüber den im 15. und 16. Jahrhundert betriebenen Postaer Sandsteinbrüchen (an der Elbe) sowie den Brüchen im Liebtahaler Grund (zwischen Postaer Brüchen und Mühlleite liegend). Als Steinvarietät wurde ein Postaer mgE (mit geringen Einschlüssen) eingesetzt. Die Bauaufgabe löste von Beginn an bei allen Handwerkern und Ingenieuren eine enorme Begeisterung aus, so dass man manchmal keinen Feierabend wahrgenommen hat, bevor nicht die in Arbeit befindliche Rippenfigur fertig versetzt war, oder am liebsten auch am Wochenende durchgearbeitet hätte, wenn man kurz vor dem Schließen der Wölbung im Joch stand und es nicht erwarten konnte versetzen diesen immer wieder großartigen Moment des Schlusssteins zu erleben. Dem folgend möchten wir stellvertretend für die gesamte Handwerkerschaft dem Bauherren, SIB NL DD 1 unter Leitung von Ludwig Coulin sowie der Abteilung Schlossbau unter Leitung von Holger Krause unseren Dank und Respekt aussprechen, eine derartig begeisternde Baumaßnahme zur Durchführung gebracht zu haben. Der Erkenntnisgewinn zum mittelalterlichen Bauen eines Schlingrippengewölbes hat für die Handwerkerschaft dabei einen enormen Stellenwert erreicht, der dank der stetigen Förderung durch die Bauherrschaft und aller beteiligten Planer und Wissenschaftler ermöglicht wurde.

- 1 Meckel 1933, S. 112: „... Die Konstruktion der gewundenen Rippen geschah in der auf Tafel 23, Abb. 21 dargestellten Art und Weise ...“. Fehr 1961, S. 28: „... war einmal ein entsprechendes Lehrgerüst entwickelt, konnten Rippen relativ anschaulich berechnet und durch wiederholtes Aufpassen auf die Lehrgerüstform überprüft werden ...“. Baumüller 1989: „... diese Rippen haben nahezu gleiche Krümmung ...“; Muk 1990: „... die Rippen stellen mathematisch Kurven dritter Ordnung dar, nämlich eine Spirale ...“. Müller/Quien 2005: „... die Verwendung von schon im Steinbruch in großer Anzahl mit einheitlichem Krümmungsradius hergestellten ...“.
- 2 Fehr 1961, S. 28: „... gerader Lehrbogen seitlich angefütert entsprechend Grundrißkrümmung ...“. Müller/Quien 2005, S. 8: „... Lehrbögen für räumlich gekrümmte Rippen waren wahrscheinlich aus kurzen, geraden Brettern zusammengesetzt ...“.
- 3 Muk 1990, S. 200: „... Möglich ist, daß über Kreisen im Grundriß hölzerne Zylinder errichtet wurden, an denen die Rippen befestigt wurden. Möglich ist auch, daß die Konstruktion teilweise am Dachstuhl abgehängt wurde.“
- 4 Bauer/Lauterbach 2012, Kapitel 3.4 „Sich fortlaufend ändernde Krümmung der Rippen“, S. 114-122.
- 5 Bürger 2007a, S. 325: „... Das Errichten der Unterkonstruktion erfolgte mit Rüststangen und unbehauenen dünnen Baumstämmen. Die roh belassenen Hölzer ersparten den immensen Aufwand des Sägens und Beilens. Außerdem behielten sie mit ihrem Gesamtdurchmesser ihre volle Belastbarkeit ...“.
- 6 Bauer/Lauterbach 2012, Kapitel 4 „Fertigung – Steinschnitt von Modellrippen für die Erasmuskapelle Berlin“, S. 161-201.
- 7 Bürger/Donath 2010.
- 8 Grassnick 1963, Abb. 20: Aufsicht auf Rippenknotenstein mit eingritzten Hilfslinien des Steinmetzen
- 9 Sturm 2005, S. 41, „Kunst der Fuge“: „... Die später abgeschnittenen Stricke ließen sich in den Fugen öfter nachweisen ...“.
- 10 Ebenda, S. 41: „... Damit das Blei, das über einen Vergusskanal leicht den Kern erreicht, seitlich nicht wegfließt, ummantelte man die Fuge mit einer Lehmwulst ...“.
- 11 Brief zur Fertigstellung der Wölbung der Landrechtsstuben von Bonifaz Wohlmuth vom 05.11.1563 an Kaiser Ferdinand I.: „... dem saal daneben vergleichen, umb welcher arbeit willen dem meister Benedigt säligen vom künig Vladislaus ein hoher eerntitl gegeben worden, unangesehen das im dasselbig gewelb das erst mal eingegangen aber zum andern mal gemacht, wie dann vor augen ...“. Zit. n. Fehr 1961, S. 78.
- 12 Bauer/Lauterbach 2012, Kapitel 4.2 „Steinschnitt und Fertigungsfolge – Fertigung der Modellrippen für die Erasmuskapelle Berlin“, S. 176-201.
- 13 Ebenda, Kapitel 3.5.2 „Drei-Punkt-These“, S. 124-133.
- 14 Binding/Nussbaum 1978, Kapitel VII b) „Materialtransport – Lastenaufzug“, S. 69-79.
- 15 Albinus 1590, Kapitel „Von den Werkstücken und andern Felsen“, S. 167: „... Von dem Pirnischen ist das herrliche Schlos zu Dresden gebawet ...“. Zit. n. Ausgabe 1590 im Archiv Thurn und Taxische Museen Regensburg.