

Das Freie Wölben über den Schlingrippen der Schlosskapelle Dresden

„... Die Kunst der Wölbung war der erste Sieg der Konstruktion über die Schwerkraft, ... im Umgang mit dem Stein als Werkmaterial lernte der menschliche Geist, die Kräfte und Gesetze der Materie zu ergründen und sie planend für seine Zwecke nutzbar zu machen ...“ [1].

So wie es Götz Fehr 1961 für die spätgotischen Werkleute um *Benedikt Ried* beschrieb, stand in den Jahren 2009 bis 2013 für die Autoren die gleiche Aufgabe bei der Rekonstruktion des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden von 1556¹, wo für die Ausführung der sphärisch gekrümmten Wölbsegel kaum mehr Überlieferungen sowohl zur Technologie des Freien Wölbens bei Schlingrippengewölben als auch zu den Materialien bekannt waren.

In einem mehrmonatigen Prozess wurden die Mörtel- und Ziegelrezepturen anhand von Befunden an noch bestehenden Wölbungen durch die Autoren studiert² und durch Versuchsmodelle³, bei denen die Materialeigenschaften im Zusammenhang mit einem Freien Wölben erprobt wurden, letztendlich zum erfolgreichen Einsatz bei der Rekonstruktion der Dresdner Kapelle geführt.

The freely formed vaults over the winding ribs of the Chapel in Dresden's Castle.

„... The art of vaulting was the first win that construction had against gravity ... Man's spirit learned by dealing with stone as the building material how to determine the forces and laws of materials and how to plan to make them usable for his purposes ...“ [1].

The same task as that which Götz Fehr described in 1961 for the Late Gothic craftsmen in *Benedikt Ried* presented itself to the authors for reconstructing the winding ribbed vault of the Chapel in Dresden's Castle, dating from 1556¹, where hardly any traditional knowledge had been handed down through the generations about how to build the spherically curved, vault springing: not only concerning the technology of freely formed vaulting but also regarding the materials.

The authors studied² the formulas for mortars and bricks in a process lasting several months on the basis of findings from surviving vaults and by means of the test models³ which they used to test the materials' properties in connection with a freely formed vault before finally discovering how to use them successfully for reconstructing Dresden's Chapel.

1 Einführung

Das Freie Wölben – als Technologie, ohne Schalung über die Schlingrippen hinweg die Wölbsegel zu mauern – ist nicht erst in der Spätgotik entwickelt worden. Schon in der Antike waren frei gemauerte Gewölbe weit verbreitet und sind u. a. mit den nubischen Gewölben aus altägyptischer Zeit teilweise bis heute überliefert. Das Motiv, für die im ausgehenden 15. Jahrhundert so zahlreich neu zu überwölbende Kirchenräume, aber auch große Säle von Profanbauten ohne Schalungen ausführen zu wollen, war sicher ökonomischen Gründen geschuldet. Allein für den Wiener Dombau von St. Stephan ist in den drei Jahrhunderten seines Baues (1230–1523) ein so enormer Holzbedarf aus Kirchenamtsrechnungen überliefert, der neben massiven Eingriffen in das Ökosystem das fast vollständige Roden des Waldes in der Wiener Umgebung zur Folge hatte, dass das Holz für Lehrgerüste und Schalungen aus immer weiteren Entfernungen über die Donau oder Isar angeschwemmt werden musste [2] und damit deutlich höhere Kosten be-

1 Bauherr: SIB-NL Dresden, Architekt: J. U. Anwand, Statik: Kröning Ulbrich Schröter, wissenschaftliche Beratung Figuration: Prof. Stefan Bürger, wissenschaftliche Beratung Mauerwerksverbände/Wölbform: Dr. David Wendland, Ausführung: Dreßler Bau, Bauleitung, Werkplanung und Technologie: Thomas Bauer und Jörg Lauterbach für Dreßler Bau.

Client: SIB NL Dresden. Architect: J. U. Anwand. Structural engineer: Kröning Ulbrich Schröter. Scientific consultant for the figuration: Prof. Stefan Bürger. Scientific consultant for the bonding masonry and the shape of the vault: David Wendland, Ph. D. Builder: Dressler Bau. Site manager, work-planner and technologist: Thomas Bauer and Jörg Lauterbach for Dressler Bau.

2 Dazu wurden die Oberseiten der Wölbungen von St. Annen in Annaberg/Sachsen, Mariä Himmelfahrt in Brüx-Most/Böhmen und St. Barbara in Kutna Hora-Kuttenberg/Böhmen begangen, und dabei Beprobungen an gelösten und frei auf der Wölboberfläche liegenden Materialresten durchgeführt. The top sides of the vaults in the churches of St. Annen in Annaberg, Saxony, Mariä Himmelfahrt in Brüx-Most, Böhmen and St. Barbara in Kutna Hora-Kuttenberg, Böhmen were inspected for this purpose and samples were taken while doing so of the residual materials that lay loosely and freely on the vault's upper surface.

3 Auf dem Bauplatz der Fa. Dreßler Bau am Hauptbahnhof Dresden wurden Versuchsmodelle aufgebaut, wo die für die Gewölberekonstruktion beauftragte Fa. Dreßler Bau mit den beteiligten Partnern Ziegelei Huber und Restaurator Kay Neuling vor Beginn des Probejoches eigene Versuche zu Material und Technologie ausführte, bei denen die Autoren die Federführung hatten und die Versuchsserien entwickelten, auswerteten und die Materialtechnologie kreierten. Test models were built on the Dressler Bau's building site at Dresden's main railway station, where Dressler Bau – which had been commissioned for constructing the vaults – carried out its own tests concerning the materials and technology together with the brick-maker Huber and the restorer Kay Neuling as the participating partners before beginning to build a test bay of the vault. The authors were in charge of this work: they developed and evaluated the series of tests, as well as designed the technological properties of the materials.

wirkte. Auch wurden die Kirchenschiffe immer höher und geräumiger, so dass sich bei einem Schalungsbau für Wölbungen der Holzbedarf pro Bauwerk schon enorm vervielfachte. Um dem zu begegnen, war – wie häufig in der Architekturgeschichte – der Werkmeister (heute Ingenieur) gefragt, mit technischen Innovationen die wirtschaftlichen Probleme zu lösen, die in der Folge dann von den Architekten gestalterisch in die Formgebung einbezogen wurden. *Norbert Nußbaum* ist da hinsichtlich der Sichtweise auf das Arbeiten des spätgotischen Werkmeisters *Hans von Burghausen* durchaus zu folgen, wenn er sagt „... Gleichwohl möchte man meinen, dass die deutschen Architekten ihre größten Erfindungen machten, wenn sie gezwungen waren, für wenig Geld anspruchsvoll zu bauen ...“ [3].

Dem folgend haben die Autoren vor Beginn der eigentlichen Arbeiten am Probejoch in der Schlosskapelle ein eigenes Versuchsprogramm erarbeitet, mit dem Ziel, am Probejoch mit bereits funktionierenden Mörtel- und Ziegelrezepturen sowie Materialeigenschaften, die das Freie Wölben ermöglichen, beginnen zu können. Auf die Mauerwerksverbände, die vorgegeben wurden und die die Autoren aufgrund historischer Vorbilder identischer Rippenfigurationen kritisch sehen, wird in diesem Aufsatz nicht weiter eingegangen⁴.

Aus den Erfahrungen bereits in der Vergangenheit ausgeführter Freier Wölbungen ist den Autoren als wichtigster Grundsatz bewusst, einerseits eine „fette“ (klebrige) Mischung des Mörtels zu erreichen, die ein Ansetzen eines ca. 4 bis 5 kg schweren Backsteines ohne Untersteifung ermöglicht und andererseits eine Elastizität des Mörtels bewahrt, der alle folgenden Bauzustände sichert, bei denen sich die Wölbsegel im Zuge des fortschreitenden Vervollständigens der Mauerwerksbögen jeder Wölbsschicht und



Bild 1. Rekonstruktion des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden – hier noch mit Unterstützungen des Rippenwerkes mittels unbesäumten Baumstämmen (Foto: Gert Schubert)

Fig. 1. Reconstruction of the winding ribbed vault of the Chapel in Dresden's Castle: still with undressed tree trunks used as posts to support the ribbed framework in this case (photo: Gert Schubert)

der späteren Entnahme der die Schlingrippen unterstützenden Baumstämmen (Bild 1) verformen werden, ohne Rissbildungen und Abrisse in den Mörtelfugen zu bewirken. Bei dem Ziegel/Backstein besteht die Aufgabe bei der Rezepturfindung, die Porosität so einzustellen, dass eine Griffigkeit des Mörtels in die Poren gewährleistet wird, aber andererseits auch der Porengehalt nicht zu groß wird, so dass dann zu viel Wasser und damit Gewicht aufgenommen würde sowie die Poren mit dem aufgenommenen Wasser verschlossen und somit der Griff des Mörtels minimiert würden.

2 Prozess der Rezepturfindung einer historischen Luftkalkmörtelherstellung

Bevor über die Erfahrungen bei der Rezepturfindung für die Dresdner Schlosskapelle berichtet wird, soll auf einige Grundlagen zur historischen Luftkalkmörtelherstellung eingegangen werden. Als Luftkalkmörtel werden Mörtelarten bezeichnet, welche überwiegend durch Carbonatisierung erhärten. Das heißt, nach der Applikation der Mörtel ist eine anfängliche Trocknungsphase zur Öffnung der Poren in der Mörtelmatrix, in der Überschusswasser verdunstet, notwendig. Über die teilweise geöffneten Poren kann Luft von der äußeren Ma-

terialoberfläche beginnend in die Mörtelstruktur eindringen. Das in der Luft enthaltene Kohlendioxid wird durch das Restwasser im Mörtelporenraum gelöst und reagiert mit dem Kalziumhydroxid des Bindemittels zu Kalkstein. Luftkalkmörtel setzen sich demzufolge aus dem Bindemittel Kalk, dem Zuschlag Sand und Wasser zusammen. Auch die Verwendung von Zusätzen ist möglich. Als Kalke werden je nach regionalen Vorkommen Kalke mit unterschiedlichem Reinheitsgrad und Zusammensetzung verwendet. Die Art der Bindemittelherstellung hat wesentlichen Einfluss auf die weiteren technologischen Schritte und variiert zum Teil regional und geschichtlich erheblich. Im Bereich des Zuschlages werden meist regional vorkommende Sande verwendet. Aufgrund von Erfahrungswerten wurden für unterschiedliche Anwendungen die einen oder anderen Vorkommen bevorzugt. Seltener wurden verschiedene Sande für spezielle Anwendungen auch gemischt. Bedingt durch die lange Verwendung von regional vorkommenden Grundstoffen und durch die Weitergabe entsprechender Erfahrungswerte haben sich ausgereifte Herstellungs- und Verarbeitungstechnologien entwickelt und gefestigt. Aufgrund der unterschiedlichen Zusammensetzungen und Herstellungstechnologien entste-

⁴ Die Mauerwerksverbände wurden von Dr. *David Wendland* (TU Dresden) vorgegeben. Bedenken seitens der Ausführenden wurden dabei nicht aufgegriffen. Beispielsweise zeigen die Landhauskapelle Wien und die Eleemosynariuskapelle Banska Bystrica/Neusohl bei identischen Anfängerfigurationen eine völlig andere Wölbform. Fotodokumente der Erasmuskapelle im ehemaligen Berliner Schloss zeigen ebenfalls Wölbformen wie Wien und Neusohl und weisen andere Mauerwerksverbände auf als die Dresdner Rekonstruktionsansätze.

hen zum Teil starke Streuungen der Mörtel Eigenschaften in den unterschiedlichen Regionen und Epochen.

Für die Rekonstruktion der Schlingrippenwölbung der Schlosskapelle Dresden wurde durch die Statik als Art des Mörtels ein Kalkspatzenmörtel vorgegeben. Anders als Löschkalkmörtel oder Sumpfkalkmörtel sind Kalkknotenmörtel (im heutigen Sprachgebrauch auch Kalkspatzenmörtel) sehr bindemittelreiche Mörtel. Zur Herstellung von Löschkalkmörtel wird Wasser in eine Löschpfanne gegeben und im Anschluss unter ständigem Rühren Branntkalk (historisch meist Stückkalk) hinzugegeben. Nach Abschluss des Löschvorganges wird der Löschkalkmörtel durch Verrühren mit Sand hergestellt. Da der Wasserüberschuss im Kalkbrei sehr hoch ist, können hier nur Kalkmörtel mit geringen Feststoffgehalten hergestellt werden. Der Mörtel unterliegt in der Trocknungsphase auch einer relativ starken Schwindung. Bei der Herstellung von Sumpfkalkmörtel wird ein zum Teil sehr lange abgelagerter Löschkalk verwendet. Dies hat den Vorteil, dass sich der Kalkgehalt infolge der langen Lagerungszeit durch Sedimentation im Kalkbrei wesentlich erhöht hat. Sumpfkalk werden vorrangig für die Herstellung von hochwertigen dünnlagigen Oberputzen und zur Herstellung von Anstrichen verwendet.

Bei Kalkknotenmörtel liegt ein großer Teil des Kalkes in Form von weichen verformbaren Kalkknoten vor. Hierdurch entsteht ein sehr geschmeidiger und elastischer Mörtel mit relativ kleinen Schwindungsraten in der Trocknungsphase. Die Herstellung von Kalkknotenmörtel ist im Vergleich zu der Löschkalk- und Sumpfkalkherstellung sehr wirtschaftlich. So lässt sich erklären, dass an historischen Gebäuden Kalkknotenmörtel in sehr großen Mengen für Mauer- und Putzmörtel zu finden sind.

Bei der Herstellung von Kalkknotenmörtel werden im Wesentlichen Sand- und Kalkpacklagen (Stückkalk) wechsellagig aufgeschichtet. Die Rezeptur entspricht dem des herzustellenden Mörtels. Wesentlich ist, die erste und letzte Schicht als Sandpackung auszuführen. Der Kalk wird durch am Sand anhaftendes bzw. zusätzlich dem Haufwerk zugeführtes Wasser gelöscht. Nach einer Reifezeit wird das entstandene Haufwerk senkrecht abgestochen

und das Mischgut trocken vorgemischt. Im Anschluss wird entsprechend der gewünschten Verarbeitungskonsistenz Wasser dazugegeben und erneut gemischt. Durch die Art und Intensität des Mischvorganges kann die Bindefähigkeit des Mörtels eingestellt werden. Eine hohe Intensität des Mischvorganges führt zum Abarbeiten der Kalkknoten, was Feinstbestandteile freisetzt, welche die Bindekraft des Mörtels, aber auch die zu erwartende Mörtelschwindung erhöhen.

Im Laufe der Versuche zur Mörtelmatrix für die Freie Wölbung über der Dresdner Schlingrippenfiguration reifte die Erkenntnis, einen *Kalkknotenmörtel ohne Zusatzwasser* einzusetzen.

Bei der *Kalkknotenmörtelherstellung mit Zusatzwasser* wird zusätzlich zu der am Sand anhaftenden Feuchtigkeit Wasser über das fertige Haufwerk gegeben. Dies ermöglicht die Verwendung von wenigen, größeren Packlagen aus größerem Stückkalk. Das Wasser muss dem Haufwerk gezielt in der Löschphase zugegeben werden. Diese Mörtel werden vorrangig bei der Herstellung von Putzen eingesetzt.

Die Verwendung von *Kalkknotenmörtel ohne Zusatzwasser* ermöglicht es, den Kalkanteil im Mörtel weiter zu erhöhen und die Mörtelschwindung in der Ansteifphase weiter zu optimieren. Hierzu wird der Sand vor dem Einbau in das Haufwerk bis zur Sättigung gewässert. Beim Aufschichten des Haufwerkes ist auch auf die Verwendung von möglichst vielen dünnen Stückkalkschichten zu achten. Dies ist notwendig, um genügend Kontaktfläche zwischen nassem Sand und Stückkalk herzustellen. Um dem Stückkalk genügend Zeit zum Löschen zu geben, sollte eine Mörtelliegezeit von 10 Tagen eingehalten werden. Dies ist zur Vermeidung von Kalktreibern wichtig.

Wird der Kalkknotenmörtel wie bei der Rekonstruktion der Dresdner Schlosskapellenwölbung als Mauer- oder Putzmörtel verwendet, können kürzere Mörtelliegezeiten verwendet werden. Die hierbei entstehenden Kalktreiber führen zu einer weiteren Verdichtung des Mörtelgefüges. Zum Teil kann das Material auch in einem noch warmen Zustand nach Abschluss der Hauptlöschphase verarbeitet werden. Hier wird durch das Ablöschen von letzten Branntkalkrückständen in der Appli-

kationsphase Überschusswasser des Mörtels, welches zur Verarbeitung gebraucht wird, chemisch gebunden, was zur Reduzierung der Mörtelschwindung und somit zur Festigkeitssteigerung beiträgt. Wesentlich ist bei dieser Technik, dass der Löschprozess nicht unterbrochen wird. Es darf zu keiner Zeit zum Einkapseln von nur teilweise gelöschtem Stückkalk kommen. Um den Verarbeitungsbeginn bestimmen zu können, sollten im Vorfeld jedoch Probeflächen angelegt werden.

Diese Mörtel werden auch als „trocken gelöschter Kalkknotenmörtel“ bezeichnet. Es ist hierbei wesentlich, in der Herstellungstechnologie auf Zusatzwasser nach dem Aufschichten des Haufwerkes zu verzichten und so den Wassergehalt in der Löschphase auf ein praktisch umsetzbares Minimum zu begrenzen. Dies bedeutet nicht, dass es kein Überschusswasser nach der Löschphase in der Mörtelmatrix gibt. Um unkontrolliertes Nachlöschen während der Verarbeitung zu verhindern, wird im Allgemeinen die Rezeptur so eingestellt, dass mindestens die doppelte Wassermenge am Sand anhaftet als für den Löschprozess chemisch notwendig ist. Dies ist im Besonderen der Tatsache geschuldet, dass der vollständige Kontakt zwischen dem nassen Sand und dem Stückkalk praktisch nicht hergestellt werden kann.

Zur Abstimmung der Wölbtechnologie hinsichtlich der zu verwendenden Materialien wurden im Vorfeld durch die Autoren umfangreiche Vorversuche durchgeführt. Hierzu diente ein Versuchsmodell, mit dem unterschiedliche Bereiche im Kappemauerwerk simuliert (am Versuchsmodell der Fa. Dreßler Bau wurden zwei Anfängerrippen mittels Holzspannten annähernd nachgeformt und über diese als simulierte Rippenzüge die Freie Wölbung geübt) und die Eignung der entsprechenden Materialien getestet werden konnte. Anfänglich wurden diverse industriell hergestellte Werk trockenmörtel für die Wölbversuche eingesetzt. Durch den zum Teil geringen Bindemittelanteil reichte die Klebkraft der eingesetzten Mörtel nicht aus, um auch bei größeren Wölb-schichten diese zu schließen, ohne dass es zu nennenswerten Setzungen und Rissbildungen kam. Ein weiteres Problem zeigte sich im Hinblick auf die Wasserrückhaltung des Mörtels.

Einige Mörtel zeigten zu geringe Wasserrückhalteeigenschaften, was zum Verbrennen des Mörtels beim Setzen der Steine führte. Die Folge war der Abriss zwischen Fugen und Steinflanke. Mörtel mit zu hoher Wasserrückhaltung führten zu hohen Setzungen beim Wölben. Im Weiteren zeigte sich, dass bei größeren Schichten diese nicht geschlossen werden konnten, da das Anziehen des Mörtels zu lange dauerte. Beim Wölben von mehreren Schichten in einem Kappenfeld hintereinander zeigte sich ein Gleiten in den Fugen, die zu Beginn erstellt wurden. Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Porigkeiten und Feuchtigkeitsgehalten der vermauerten Ziegel brachten keine wesentliche Verbesserung der Ergebnisse

Nach mehreren Modifikationsversuchen stand fest, dass ein wirtschaftlich und konstruktiv funktionierendes Wölben mit den beprobten industriell hergestellten Werk trockenmörteln hinsichtlich der Ansprüche an die Materialeigenschaften für ein Freies Wölben von spätgotisch sphärisch gekrümmten Wölbsiegeln nicht möglich ist.

Insofern folgte die Erkenntnis, es für die Dresdner Rekonstruktion mit eigenen Rezepturen von händisch hergestelltem Kalkspatzenmörtel mit einem klassischen Kalkknotenmörtel zu versuchen, welcher mit Wasserüberschuss gelöscht wurde. Hiermit war es möglich, auch große Wölbschichten in enger zeitlicher Folge einzuwölben. Durch die hohe Klebekraft des Mörtels konnte wesentlich schneller gearbeitet werden, daher erwies sich dieser Weg als besonders geeignet für die Wölbung.

Mauermörtel für die Herstellung von frei gemauerten Gewölbekappen müssen wie eingangs beschrieben besonderen Anforderungen im Bereich der Festmörtel-, aber auch der Frischmörtel-eigenschaften genügen.

Trocken gelöschte Kalkknotenmörtel eignen sich aus mehreren Gründen besonders für diese Zwecke. Durch den extrem hohen Bindemittelgehalt besitzen diese Mörtel eine ausreichende Bindekraft, um das Steingewicht während des Wölbens der einzelnen Schichten nur durch die Klebekraft des Mörtels zu halten. Die Wasserrückhaltung im Mörtel ist durch das Einlagern von Wasser in den Kalkknoten optimal. Das beim Aufrühren des Mörtels benötigte Wasser wird beim Versetzen des Steins durch die

Poren des Steins aufgenommen, was ein schnelles Anziehen des Mörtels ermöglicht. Ein Verbrennen des Mörtels findet nicht statt, da das weiter in den Kalkknoten gebundene Wasser nicht für Kapillartransporte in den Stein zur Verfügung steht. Es stellt sich ein Feuchtgleichgewicht zwischen Stein und Fuge ein. Der Kapillarfluss wird unterbrochen. Die Restfeuchte im Mörtel reicht aus, um ein Verbrennen des Mörtels zu verhindern.

Der Mörtel muss, um die volle Klebefläche zwischen Stein und Fuge nutzen zu können⁵, über den gesamten Querschnitt annähernd gleichmäßig verdichtet sein und nach dem Anziehen eine ähnliche Steifigkeit ausweisen.

Homogene Mörtel können diese Bandbreite in der Schichtdicke nur bedingt realisieren. Die Kalkknoten decken in ihrer Körnung ein breites Spektrum ab: Zum einen gibt es Feinstbestandteile, die die Klebekraft des Mörtels realisieren, und Grobbestandteile, die bis an die Korngröße des Stückkalkes heranreichen. Diese sind als Stützkorn für die größeren Fugenbereiche bedeutend. Da die Kalkknoten aus reinem Bindemittel bestehen, können sie auch direkt in die Mörtelmatrix eingebunden werden. Ein Füttern der Grobzuschläge wie bei homogenen Mörteln (Mörteldicke mindestens 3-mal wie das Größtkorn des Zuschlages) entfällt hier. Praktisch könnte ein Kalkknoten auch die gesamte Fugenbreite im entsprechenden Teilbereich einnehmen, wobei wir bei der Ausführung der Dresdner Gewölbrekonstruktion darauf geachtet haben, größere Kalkknoten auszusondern. Dass Kalkknoten im zu verarbeitenden Zustand weich und verformbar sind, kann in der Fugenform beim Andrücken angepasst werden, aber man sollte es vermeiden. Schwindungen im einzelnen Kalkknoten nach Beendigung der Ansteifphase können durch die umliegende (jetzt stabilisierte) Mörtelmatrix überbrückt werden.

Durch das Aufrühren des Mörtels im Handrührverfahren werden

die Kalkknoten kontrolliert abgearbeitet. Hierdurch entstehen zusätzliche Feinstbestandteile, die die Klebekraft des Mörtels weiter erhöhen. Gleichzeitig werden die Kalkknoten nur so lange abgearbeitet, bis die Fehlstellen in der Sandsieblinie durch diese gefüllt sind. Es entsteht durch das Verühren ein sehr geschmeidiger und angenehm zu verarbeitender Mörtel ohne nennenswerte Absetzerscheinungen während des Vermauerns. Erfahrungen beim Mörtelmischen/-anmachen während der Dresdner Rekonstruktion zeigten deutliche Unterschiede, ob die Mischung per Hand gerührt oder mit langsam drehendem Rührwerk vorgenommen wurde. Der handgerührte Mörtel klebte – grob gesagt – doppelt so gut bei gleicher Rezeptur⁶. Durch das maschinelle Rühren werden die Kalkknoten bei derart bindemittelreichen Mörteln zu schnell und zu intensiv abgearbeitet, was zu erheblich mehr Feinstbestandteilen im Mörtel und so zum erhöhten Schwinden des Mörtels führt.

Durch die sich ständig verändernde Belastungssituation des Mörtels während des Mauerns des Kappenmauerwerkes kommt es im Mörtelfuge zu sich ändernden Beanspruchungen. Da der Mörtel durch Carbonatisierung von den luftzugewandten Oberflächen her sehr langsam erhärtet, bleibt der Mörtel – und speziell die Kalkknoten – lange Zeit verformbar. Somit können durch Setzungen bedingte Verformungen ohne Schädigung der Mörtelmatrix und des Stein-Fuge-Verbundes aufgenommen werden (Bild 2).

Viele der bis heute historisch überdauernden Kalkmörtel zeichnen sich durch ihren hohen Kalkgehalt und durch die inhomogene Verteilung des Bindemittels aus. Dies ist charakteristisch für die Verwendung von stückgeteiltem Branntkalk, der ohne wesentlichen Wasserüberschuss im Zuschlagstoff abgelöscht wurde. Ein Großteil des Bindemittelanteils ist in unterschiedlich großen Kalkknoten gebunden, welche in der Mörtelmatrix

5 Auch hier sehen die Autoren die Mauerwerksvorgaben zum Verband von Dr. David Wendland kritisch, die in den Rippenaufmauerungen einiger Rippenzüge senkrecht gestellten Ziegel in Rippenlängsachse gegeneinander zu verdrehen, d. h. gefächert anzuordnen und so nur noch einen Teil der Kontaktfläche Ziegel – Mörtel zu ermöglichen.

6 Es ist auch vom Anrühren eines Kartoffelbreis her bekannt, dass dieser am besten bei handgerührter Herstellung „pappt“. Das Prinzip, das Wasser hier nicht durch drehendes Rührwerk „herauszudrücken“, ist durchaus ähnlich.

verteilt und zum Teil mit bloßem Auge zu sehen sind. Derartige Mörtel finden sich in vielen historischen Beständen als Mauermörtel (siehe dazu die Untersuchungen u. a. in Kutna Hora, Annaberg, Brüx und Neusohl).

Im Ergebnis der Vorversuche der Autoren für die Materialrezepturen und handwerklichen Technologien der Freien Wölbung für die Dresdner Rekonstruktion des Schlingrippengewölbes erfolgte die Entwicklung der Mörtelrezeptur aus technologischer Sicht in folgenden Schritten. Dabei sollte neben der Sicherung der erforderlichen Klebkraft die Schwindung eingeschränkt werden, außerdem waren regional vorkommende Sande zu verwenden.

Durch die Abwandlung der Herstellungstechnologie zu einem Kalkknotenmörtel ohne Zusatzwasser konnte der Einsatz von Wasser in der Lösphase erheblich reduziert werden. Der Sand wurde bis zur Sättigung gewässert. Die Schichthöhen wurden sehr stark reduziert. Als Kalk kam ein Stückkalk in der Sieblinie 8–40 mm zum Einsatz. Die Kalkschichthöhe wurde auf die Größtkorngröße des Stückkalkes begrenzt. Die Sandschichthöhe ergab sich aus der Rezeptur.

In der Folge bildeten sich bedeutend stabilere Kalkknoten, welche sich in der Anmachphase des Mörtels im Handrührverfahren nicht wesentlich abarbeiteten. Dies ließ eine weitere Steigerung des Kalkanteils im Mörtel zu. Es wurden zunächst Proberezeptie-



Bild 2. Probekörper Mauerwerk mit Phenolphthaleintest zur Carbonatisierung nach 2 Jahren (Standzeit unter Wetterschutzdach im Freien) zeigt vollständig durchcarbonatisierte Mörtelfuge Fig. 2. Sample of masonry tested with the phenolphthalein test for carbonization after 2 years (standing time in the open air under a weatherproofing roof) shows that the mortar joint had been completely carbonized throughout

rungen mit zwei verschiedenen regional vorkommenden Sanden erstellt. Zum einen wurde ein ungewaschener Sand der Sieblinie 0–4 mm mit runder Kornform eingesetzt. Schon *Vitruv* führte zu gewaschenen Sanden aus: „... nimmt man ihn von den Flüssen ... auch von der Meeresküste ... gestattet die Wand keine Belastung und er trägt auch keine Gewölbe ...“ [4].

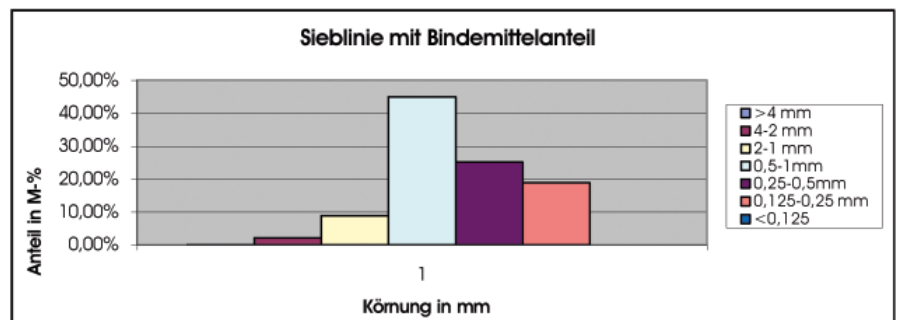
Das Material wies einen erheblichen Anteil an abschlämmbaren Bestandteilen auf. Die Wasseraufnahme

des Sandes war für die Rezeptur ausreichend. Im Rahmen der weiteren Wölbvorversuche stellte sich heraus, dass ausgehend vom hohen Lehmanteil die Wasserrückhaltung im Mörtel zu groß ist. In der Folge zeigte sich, dass der Mörtel zu langsam anzog und so das Mauern der einzelnen Wölbschichten verlangsamt werden musste. Daher wurden im Weiteren Probemischungen mit einem gewaschenen Sand der Sieblinie 0–4 mm verwendet. Die Kornform wies leicht

Tabelle 1. Rezeptierung Nr. 100805 Kalkknotenmörtel Schlosskapelle Dresden (RT ... Raumteile) (© 2013 Kay Neuling, Thomas Bauer – Dressler Bau)
Table 1. Formula no. 100805 Lime knotting mortar in the Chapel of Dresden's Castle (PR parts of the room) (© 2013 Kay Neuling and Thomas Bauer of Dressler Bau)

Rezeptierung Kalkknotenmörtel 100805

Sandlieferant	Semper Beton, An der Prießnitztaue 18, 01328 Dresden, Magdeburger Str. 58, Dresden Hafen, Tel. 035204/39230		
	Probenummer	100805	
	Entnahmeort	Dresden	
	Bezeichnung	98901001	
Untersuchung der Sieblinie			
	M in g	Anteil in %	
Ausgangssprobe tr.	1353,00	100,00%	800 ml verdichtet
>4mm	0,30	0,02%	>0,5 Wert 756,50
4-2mm	28,10	2,08%	in M% 55,91
1-2mm	119,80	8,85%	
0,5-1mm	608,30	44,96%	
0,25-0,5mm	340,70	25,18%	<0,5 Wert 596,50
<0,25mm	255,80	18,91%	in M% 44,09
Summe	1353,00	100,00%	



Schüttdichte 1,69 kg/l Sandprobe wassergesättigt
Max. Feuchte 0,241 kg/l Wasseranteil im Sand bei Wassersättigung der Probe

Kalklieferant	Rheinkalk GmbH, Am Kalkstein 1, 42489 Wülfrath, Werk Flandersbach		
---------------	---	--	--

CL 90G, Weichbrand 8-40mm							
Rezeptur in Liter	CaO in l	Sand in l	H2O Bedarf in l	H2O- Sand in l	H2O- Übersch. in l	Sicherheitsfaktor **	
1:1	1	1,0	0,320	0,241	-0,079	0,75	
1:1,5	1	1,5	0,320	0,362	0,042	1,13	
1:2	1	2,0	0,320	0,482	0,162	1,51	
1:2,5	1	2,5	0,320	0,603	0,283	1,88	
1:3 *	1	3,0	0,320	0,723	0,403	2,26	
1:3,5	1	3,5	0,320	0,844	0,524	2,64	
1:4	1	4,0	0,320	0,964	0,644	3,01	
1:4,5	1	4,5	0,320	1,085	0,765	3,39	
1:5	1	5,0	0,320	1,205	0,885	3,77	
Wasserzusatz	0 l/cbm						

Tabelle 1. Fortsetzung
Table 1. continuation

Rezeptur in Liter	Umrechnungsfaktor						
	CaO in kg	Sand in kg	in M-% Bezug Sand	Ca(OH) ₂ in kg	in M-% Bezug Sand	CaCO ₃ in kg	in M-% Bezug Sand
1:1	1	1,69	59,13	1,32	78,05	1,79	105,59
1:1,5	1	2,54	39,42	1,32	52,03	1,79	70,39
1:2	1	3,38	29,56	1,32	39,02	1,79	52,79
1:2,5	1	4,23	23,65	1,32	31,22	1,79	42,23
1:3 *	1	5,07	19,71	1,32	26,02	1,79	35,20
1:3,5	1	5,92	16,89	1,32	22,30	1,79	30,17
1:4	1	6,77	14,78	1,32	19,51	1,79	26,40
1:4,5	1	7,61	13,14	1,32	17,34	1,79	23,46
1:5	1	8,46	11,83	1,32	15,61	1,79	21,12

* ausgeführte Rezeptur

** Faktor der den Wasserüberschuss im Lösprozess symbolisiert

Herstellungsart	1. Schicht	2 RT	Sand	Menge in l	
				ungedämmtes Gefäß	gedämmtes Gefäß
	2. Schicht	1 RT	Kalk		20
	3. Schicht	2 RT	Sand	Reifezeit in Tag.	10
	4. Schicht	1 RT	Kalk		
	5. Schicht	2 RT	Sand		

Rückstellproben		
Datum	Anz.	Form
08.09.2010	3	d=62x 25
15.05.2011	3	d=62x 25

Herstellungstermine		
Datum	Menge in l	Ort
29.8.10	20	Jübar
10.4.11	1000	Dresden

kantige Formen auf. Zur Einstellung des Kalkgehaltes wurden zwei verschiedene Rezepturen aufgebaut.

Die Rezeptur Nr.100805 (Tabelle 1) mit dem höheren Kalkgehalt erwies sich als praktikabel. Im Zusammenspiel mit dem Handstrichziegel zeigte sich hier eine optimale Wasser-

rückhaltung im Mörtel, was einerseits zum schnellen Anziehen des Mörtels beim Mauern führte und zum anderen einen Abriss zwischen Fugen und Steinflanken infolge des zu starken Entwässerns des Mörtels verhinderte.

Zur Herstellung des Mauermörtels entwickelten die Autoren eine

Stahlwanne. Diese ermöglichte ein gleichmäßiges Einschichten der Materialien auch im Randbereich. Bei Haufwerken ohne entsprechende seitliche Begrenzung kommt es in den Randbereichen regelmäßig zur Veränderung der Rezeptur durch das Nachrutschen von Materialien. Außerdem ist das Abdecken des Stückkalkes mit nassem Sand im Randbereich problematisch. Der Sand wurde bis zur Sättigung gewässert. Das Einschichten der Materialien erfolgte gemäß Rezepturliste. Die maximale Kalkschichtdicke richtete sich nach dem Größtkorn des Stückkalkes. Um ein unkontrolliertes Ablösen während des Aufschichtens möglichst zu verhindern, mussten die Kalkschichten schnell mit nassem Sand abgedeckt werden. Die Wanne wurde nur zu etwa 80% gefüllt. Dies ist notwendig, um die Volumenzunahme des Kalkes in der Lösphase zu berücksichtigen. Das Haufwerk ruhte so für eine Dauer von mindestens 10 Tagen.

Das Haufwerk wurde nach den 10 Tagen zur Erstellung der Mörtelmischung senkrecht abgestochen und das gewonnene Schüttgut mit einer Schaufel mehrfach umgeworfen. Der so gut vorgemischte Trockenmörtel wurde mit Wasser versetzt und dann von den Maurern der beauftragten Baufirma Dreßler Bau GmbH, NL Dresden, mittels Rührspaten händisch aufgerührt. Ein Aufrühren mit einem Zwangs- oder Freifallmischer führt bei derartig bindemittelreichen Mörteln zum schnellen und unkontrollierten Abarbeiten der Kalkknoten und somit zur Erhöhung des Anteils an Feinstbestandteilen. So konnte die Klebkraft, wie eingangs beschrieben, entsprechend der Anwendung eingestellt werden.

Praktische Erfahrungen beim Einsatz von trocken gelöschtem Kalkknotenmörtel; Modifikationsmöglichkeiten

Da es beim Aufmauern des Kappenmauerwerkes (Ausführung: erfahrene Maurer der Fa. Dreßler Bau Steffen Rau, Mathias Fleischer und Karsten Kramer) in unterschiedlichen Bereichen zu unterschiedlichen Neigungen der Lagerfuge kam, war es notwendig, die Klebkraft des Mörtels in Teilbereichen zu erhöhen. Dies wurde durch verstärktes Aufrühren des Mörtels gesichert. Durch das längere Rühren werden die Kalkknoten von der Ober-



Bild 3. Tageswerke gemauerter Wölbeinzelflächen mit Datumsangabe. Quelle: tagtäglicher Farbeintrag der gemauerten Einzelflächen der Wölbe – auf der Baustelle eingetragen von Thomas Bauer und Steffen Rau in einen Ausführungsplan des AB Anwand

Fig. 3. Individual brick-built areas of the vault, constructed as day work with information about the date. Source: the authors. Paint was applied onto the individual brick-built areas every day: it was applied by Thomas Bauer and Steffen Rau on the building site according to a construction plan from AB Anwand

fläche her abgearbeitet. Der Anteil an Feinstbestandteilen im Mörtel nimmt zu, was die Klebekraft des Mörtels erhöht. Da sich durch die Erhöhung der Feinstbestandteile auch die Schwindneigung während der Ansteifphase erhöht, wurde dies nur mit Augenmaß und von Hand („Mörtelmischer“ der Fa. Dreßler Bau *Immanuel Schäfer*, unter zeitweiser Hilfe vom „Zimmermann der Lehrgerüste der Wölbung“ *Jan Freitag*) durchgeführt.

Der fertig angemachte Mörtel konnte – vor Austrocknung und Frosteinwirkung geschützt (da die Rekonstruktion incl. Stahlwanne zum Mörtelanmachen im Inneren lag, gab es Frost hier zum Glück nicht) –, mehrere Wochen im verarbeitungsfähigen Zustand gelagert werden. Das Haufwerk ist ebenfalls über mehrere Monate frostfrei lagerfähig. Hier empfiehlt es sich, das Haufwerk nach dem Anstechen mit einer Folie abzudecken, um eine Carbonatisierung der Kalkknoten zu unterbinden. Die Erfahrung der Dresdner Rekonstruktion zeigte auch, dass nach dem großem Zeitfenster von mehreren Monaten zwischen der Herstellung des Probejochs und Wölbung der Kapellenjoche der in Resten noch vorhandene Mörtel vom Probejoch dann zwar noch etwas „fett“ war, aber nicht mehr die besten Eigenschaften zeigte und deshalb nicht mehr eingesetzt wurde.

Da sich der Branntkalk durch Aufnahme von Luftfeuchtigkeit bereits ablöscht, sollte dieser unbedingt trocken gelagert und möglichst schnell im Haufwerk verarbeitet werden. Längere Lagerungszeiten können nur durch eine luftdichte Verpackung realisiert werden.

3 Prozess der Rezepturfindung einer historischen Ziegelherstellung

Ziegel waren in der Gotik/Spätgotik Kunststeine aus Lehm, gebrannt bei Temperaturen zwischen 900 und >1050 °C, somit witterungsbeständig und sehr langlebig. Sie wurden energieintensiv und mit großer körperlicher Anstrengung hergestellt. Ziegel waren etwas Besonderes und wurden nur für besondere, herausragende und langlebige Bauten eingesetzt. Waren es früher Kirchen und Klöster, wurden sie im späten Mittelalter zunehmend von den regional Mächtigen bestellt, gekauft und verarbeitet.

Die Ziegel wurden als Saisongeschäft zwischen Ostern (Beginn der frostfreien Zeit) und den ersten Herbstnächtfrosten (bis Mitte Oktober) in der Nähe von Flüssen bzw. nahe dem Verarbeitungsort aus regional verfügbaren Oberflächenlehmen hergestellt.

Interessant ist, dass nahezu alle Ziegel der Frühzeit „rotscherbig“ sind. Deutlich andersfarbige Ziegel (gelb, leder, ocker etc.) finden wir erst an Bauwerken des 19. Jahrhunderts. Hier wurden Tiefenrohstoffe, z. B. gefunden in Bergbaugebieten als Deckschicht über der Kohle, mithilfe des sich entwickelnden Maschinenbaus zu Ziegeln verarbeitet. Ton als unter dem Oberflächenlehm liegender keramischer Rohstoff konnte von Hand nur in geringen Mengen verarbeitet werden. Unter Tage wurde in Sachsen Ton – und Kaolin, als Hauptabbaugesamtand – bergmännisch nur für die Porzellanindustrie gesucht und abgebaut.

Der händisch gewonnene Lehm wurde für den Massenbaustoff „Ziegel“ oft mithilfe von Ochsen „aufbereitet“: Das zur Verarbeitung erforderliche „Anmach“-Wasser wurde durch das Stampfen der Tierhufe in den auf der Fläche/in einer Mulde liegenden Lehm eingebracht.

Es gibt historische Überlieferungen, dass Kinder und Frauen den Lehm für feingliedrigere Schmuckelemente mit ihren Füßen aufbereiteten. Dabei mussten sie die gefühlten groben Steine unter ihren Füßen herausuchen. Aus diesem so aufwendig vorbereiteten Rohstoff sollen Maßwerkteile oder ähnlich feingliedrige Schmuckteile gefertigt worden sein.

Die in einer Holzform gefertigten Formlinge wurden auf der Fläche liegend getrocknet. Brennzeit war in der Regel ab August, „wenn das Stroh von den Feldern kam.“ Gebrannt wurde in Mailer-Öfen. Das heißt, die inzwischen getrockneten Formlinge (Rohlinge) wurden auf-, hinter- und übereinander gestapelt, anteilig wurde Holzkohle zwischen die Rohlingsreihen geschüttet. Letztlich wurden die halb in die Erde gebauten Rohlingsreihen mit einer Sand-Lehmschüttung abgedeckt, zum Schluss mit einem Lehm-Sand-Strohmörtel verstrichen und von außen angebrannt.

Hier gibt es verschiedene Brennvarianten aus Überlieferungen. Entweder wird der Mailer „nur“ mit der

innenliegenden Holzkohle gebrannt, oder es gab auch die Möglichkeit, von außen ein Holzfeuer als „Zuheizung“ zu bedienen. Unabhängig von der Brennvariante ist diese Art des Ziegelbrennens extrem aufwendig und bringt Qualitäten in einer großen Streubreite von extrem hart (Schmolz Feuernähe) bis „heiß getrocknet“ (Rand- und Außenbereiche des Mailers) hervor.

Nach dem Brand wurden die Ziegel nach Klang in „verwendbar“ und „Abfall“ sortiert. Letzterer war jedoch so gering gebrannt, dass er in der Regel von Wind und Wetter wieder aufgelöst wurde und zerfiel. Der verwendungsfähige „Rest“ wurde entsprechend verbaut und zum Wetterschutz mit einer Mörtelschicht verputzt.

Entsprechend den historischen Befunden (siehe Fußnote 2) sollte in der Schlosskapelle für das neu zu errichtende Gewölbe ein für die Erbauungszeit typisches spätgotisches Ziegelformat verwendet werden. Es wurde letztlich ein handgefertigter Vollziegel mit dem Grundmaß 285 × 135 × 65 mm, einer Druckfestigkeit von 12 N/mm² und einer Scherbenrohichte deutlich kleiner 1,6 kg/dm³ als Gewölbeziegel gefordert (Vorgaben des Statikbüros Kröning Ulbrich Schröter). Des Weiteren durfte kein saugarmer Scherben entstehen, welcher beim Verarbeiten ein zu geringes Ansaugverhalten aufweist und damit die Verarbeitung mit dem vorgesehenen historischen Kalkspatzenmörtel verhindert.

Um einerseits die Leichtigkeit (geringe Rohdichte) und andererseits die Festigkeit zu erreichen, bedurfte es einer intensiven keramischen Entwicklung und umfangreicher Erprobung. Eine einfache Rohstoffporosierung führte nicht zum Ergebnis, da somit entweder nicht die notwendige Leichtigkeit oder nicht die notwendige Festigkeit erreicht werden konnte. Der entstandene Porenraum war derart groß und grob, dass der Ziegel für die Freie Wölbung der Dresdner Kapellenwölbung nicht verwendbar war.

Letztlich gelang es den Autoren, mithilfe einer rohstoffbedingten Mikroporosierung einen Handformziegel mit den gewünschten technischen Parametern herzustellen. Bei der Ziegelprüfung wurde festgestellt, dass herkömmliche Druckprüfmaschinen bei einem derart porosierten Probekörper unrealistisch niedrige Werte feststellten.

Die so ermittelten Werte eines gebrannten Ziegels lagen teilweise nur geringfügig über den Werten getrockneter, ungebrannter Lehmziegel. Das war formal und technisch unmöglich. Mithilfe der TU Bergakademie Freiberg gelang es, eine umfangreiche Prüfreihe aufzustellen, welche die tatsächlichen Werte erbrachte [5]. Die Autoren verwendeten einen Druckprüfungsautomaten, welcher zur Prüfung von Hartschäumen eingesetzt werden kann. Entscheidend bei der Prüfung war die Möglichkeit einer Reduzierung der Anfahrgeschwindigkeit des Pressdruckes auf den Prüfkörper und die Reduzierung der Bruchempfindlichkeit beim Eintreten der Prüfkörperzerstörung.

Hartschaum reagiert unter Druck/Last ähnlich wie unsere mikroporisierten Ziegel. Bevor ein wirklicher Schaden entsteht, brechen nur die äußeren Ziegelporen, bevor das Gesamtgefüge zerstört wird. Ein porosierter Ziegel nimmt noch deutlich mehr Kräfte ohne Gefügezerstörung auf, auch wenn die ersten, äußeren Poren unter der Druckbelastung brechen. Das damit erreichte Festigkeitsbild entsprach den tatsächlichen, den realen und gesuchten Ziegelwerten.

Anhand eines Versuchsmodells (siehe Fußnote 3) wurden die ersten Ziegel mit verschiedenen Kalkmörtelrezepturen verarbeitet. Dabei erprobten die Autoren den Kalkmörtel an verschiedenen Handformziegelqualitäten und in abgestimmten Varianten zwischen Ziegel- und Mörtelrezeptur.

Einerseits wurden zunächst klassische Handformziegel mit einer Rohdichte von 1,9 bis 2,0 kg/dm³ testweise verarbeitet, andererseits porosierte Handformkloster, welche deutlich über 1100 °C gebrannt wurden und somit eine leichte Sinteroberfläche aufwiesen, und die letztlich zum Erfolg geführte mikroporosierte Grundmischung, gebrannt bei ca. 1080 °C.

Ebenso wurden diverse Formate und ihre Verwendungsfähigkeit überprüft. Ursprünglich war der Einsatz eines 85 mm dicken HF-Klosters vorgesehen. Der schmalere, 65 mm breite Ziegel ließ sich deutlich besser verarbeiten und bestätigte somit auch die durch Materialfunde vorliegenden Ziegelmaße (siehe Fußnote 2).

Außerdem wurden Wasseraufnahmemproben am Ziegel durchgeführt, indem ein Versuchsstein testweise 5 s,

10 s, 30 s und 60 s in ein Wasserbad gelegt und die zeitabhängige Gewichtsaufnahme überprüft wurde. Im Ergebnis reifte die Erkenntnis, dass ein leichter Stein < 1,4 kg/dm³ Rohdichte einen so hohen Porengehalt hatte, dass dieser eine überproportionale Wasseraufnahme und damit eine zu hohe Gewichtsaufnahme und Porenverschluss – den wir aber zur Griffigkeit des Mörtels brauchen – zur Folge hatte.

Die Rezeptur der Steine, die bei den Versuchen der Autoren als geeignet optimiert wurden und letztendlich in der Schlosskapelle zum Einsatz kamen, beinhaltet folgende Bestandteile:

Ziegelrezeptur Nr. 2908 – Handstrichziegel Schlosskapelle Dresden. © 2013 Ziegelwerk Huber-Ralf Huber, Thomas Bauer – Dreßler Bau (RT ... Raumteile):

- 5 RT braunkohlehaltiger Ton (zur Mikroporosierung)
- 2 RT Löß-Lehm (sedimentierte Lagerstätte mit hohem Feinsand-/Rundkornanteil)
- 4 RT Geschiebelehm (Gemengelage mit hohem Splitterkornanteil – Grobstützkorn)
- 0,5 RT feine Holz-Sägespäne (Groporosierung)
- 0,5 RT Braunkohle Brikettabrieb-Staub (Porosierung)

Alle Löß- und Lehmvorkommen stammen dabei aus den ziegeleigenen Gruben des Ziegelwerkes Huber in Lommatzsch und sind in den eigenen Materialvarietäten regionaltypisch ein Unikat.

4 Das Freie Wölben

4.1 Erfahrungen beim Freien Wölben

Auch wenn das Freie Wölben heute nicht mehr alltäglich ist, so beherrschen doch in Sachsen noch eine Reihe von Fachkollegen und Handwerkern, die in der Denkmalpflege, Rekonstruktion und Konservierung historischer Bausubstanz tätig sind, diese Technologie, wenn auch mit teilweise unterschiedlichen Erfahrungen und Ansätzen. Daher sind die folgenden Beschreibungen von der Rekonstruktion der Dresdner Schlosskapellenwölbung auch nur als individuelle Erfahrung mit den von den Autoren entwickelten Rezepturen zu sehen.

- Die Ziegel sollten in keinem Fall vorgewässert werden, sondern es

ist lediglich der Mauerwerksbogen, an dem der Ziegel angesetzt werden soll, mit feuchter Bürste zu bespritzen, da ansonsten ein Porenverschluss durch das Wässern eintritt, der den Mörtelgriff minimiert.

- Der Ziegel sollte immer etwas höher angesetzt werden als in der Endlage im Bogen, da er durch sein Eigengewicht im Mörtelbett etwas tiefer rutscht, aber nicht mehr in die Gegenrichtung (d.h. dann nach oben) korrigiert werden kann, da dies den Mörtelgriff sofort lösen wird (Bild 4).
- Es kann entgegen anderslautenden Meinungen bei diesen Materialrezepturen auch ein Wölbbogen an den zuvor frisch gemauerten Wölbbogen angesetzt werden, da die Rezepturen über das Klebeverhalten dies gewährleisten. Sie müssen dies auch sicherstellen, da der Scheitelpunktbereich als zuletzt zu schließender Wölbbereich nur von oben gemauert werden kann und der Maurer da auf den Tagen zuvor gemauerten Wölbbereich stehen muss. Die Rezepturen der Autoren überstanden bei der Dresdner Wölbung diese Belastung schadensfrei.
- Das Ausschalen der Rippenunterstützung (Lehrgerüst Rippenwerk) sollte so früh wie möglich nach der gemauerten Wölbung erfolgen, da die Frischmörtelfestigkeit ausreichend ist, um die Eigenlast der Wölbsegele zu tragen und ein frischerer Mörtel die aus Bauzuständen bewirkten Verformungen frei von Rissen aufnehmen kann.



Bild 4. Ansetzen eines Wölbziegels an den zuvor gemauerten Wölbsegelebogen in Freier Wölbung

Fig. 4. Placing a vaulting stone on the previously brick-built arch of the vault springing in the freely formed vaulting

4.2 Nachbehandlung der Mauerwerkswölbung

Für die Herstellung von frei gewölbten Kappenmauerwerken ist die Festigkeitsentwicklung des Mörtels ein wichtiger Aspekt. Durch die sich während des Mauerns lange verändernden Belastungssituationen kommt es im Kappenmauerwerk zu Setzungen und Verformungen. Diese müssen vom Mörtel aufgenommen werden können. Daher ist es ratsam, die Festigkeitsentwicklung nicht künstlich zu beschleunigen. Die Festigkeitsentwicklung kann bei dicken Mauerwerkschalen mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Wichtig für die Carbonatisierung des Mörtels sind wechselnde Mörtelfeuchten. Ist der Porenraum im Mörtel mit Wasser gefüllt, kann kein CO₂ aus der Luft aufgenommen werden. Eine Carbonatisierung ist nicht möglich. Der Mörtel verbleibt im angesteiften Zustand und könnte durch erneutes Aufrühren wieder verarbeitungsfähig werden. Ein übermäßiges Wässern behindert daher die Festigkeitsentwicklung durch Carbonatisierung. Eine zu starke und zu schnelle Austrocknung behindert ebenfalls die Carbonatisierung. Neben möglichen Gefügesprengungen infolge von auftretenden Dampfdrücken bei zu schneller Verdunstung des überschüssigen Anmachwassers wird das Lösen des aus der Luft aufgenommenen CO₂ verhindert. Es kann ebenfalls keine Carbonatisierung stattfinden.

Als vorteilhaft haben die Autoren das von der Fa. Dreßler Bau eigenständige Aufbringen eines dünnen Schlämmputzes auf dem Gewölberücken festgestellt (Bild 5). Auf dem Gewölberücken findet erfahrungsgemäß die stärkste Trocknung statt. Am Probejoch wurde z. B. während der gesamten Ausführungszeit oberhalb der Wölbung regelmäßig ca. 10 % mehr Raumluftfeuchte gemessen als unterhalb der Wölbung, was auf einen Dampfpartialdruck von unten nach oben und in dessen Folge auf einen Feuchtetransport nach oben hindeutet und so die trockeneren Oberseiten erklärt.

Die Poren sind oberhalb weitestgehend geöffnet. Der Schlämmputz vergrößert die für die Verdunstung zur Verfügung stehende Oberfläche. Überschusswasser kann über Kapillarkräfte uneingeschränkt zur Verdunstungs-



Bild 5. Oberseite eines Gewölbejoches mit dünnem Kalkschlämmputz im Bereich Scheitelfiguration zur Ziegelschlusssteinsetzung (hier unter Jutebahn zur direkten Nachbefeuchtung) (Foto: Gert Schubert)

Fig. 5. The upper side of a vault bay with a thin skim coat of lime plaster in the area of the parting configuration for setting the brick keystone (under the layer of jute for remoistening directly in this case (photo: Gert Schubert)

zone transportiert werden. Im Weiteren wird die Trocknungsphase durch den Schlämmputz, der wie eine Art Kompressen wirkt, wesentlich gleichmäßiger. Sollten die Mörtelfeuchten länger anhaltend unter 2 M-% absinken, sollte das Mauerwerk mittels eines Sprühnebels leicht befeuchtet werden. Diese Maßnahme sollte aber nicht zum dauerhaften Anstieg der Gleichgewichtsfeuchte führen.

5 Zusammenfassung

Die Erfahrungen bei der Rekonstruktion des Dresdner Schlingrippengewölbes zeigen bezüglich der Technologie zum Freien Wölben und den dazu erforderlichen Rezepturen von Luftkalkmörtel und Handstrichziegel, dass zunächst nicht die Festmörtelfestigkeit (Endfestigkeit), sondern – für die Bauzustände der Wölbung – die Frischmörtel Eigenschaften von größter Bedeutung sind. Nur eine „fette“ Mischung, die mit dem Poren-

gehalt der Ziegelrezeptur einwandfrei korrespondiert, sichert die Bauzustände bis hin zur Lastaufnahme des Maurers auf den Tagen zuvor gemauerten Bereichen zur Umsetzung der Technologie des Freien Wölbens. Dem folgend könnte das Eingangszitat von Götz Fehr [1] auch so adaptiert werden: „Die Kunst der freien Wölbung war der erste Sieg der Mörtel-Ziegel-Haftung über die Schwerkraft“.

Literatur

- [1] Fehr, G.: Benedikt Ried. Ein deutscher Baumeister zwischen Gotik und Renaissance in Böhmen. München: Verlag Georg D. W. Callwey 1961, S. 8.
- [2] Sonnlechner, Ch.: Kirchenbau und Umwelt – Eine ökologische Kontextualisierung. In: Der Dombau von St. Stephan – Die Originalpläne aus dem Mittelalter, S. 96–99. Hrsg. Michaela Kronberger u. Barbara Schedl. Band 370 Sonderausstellung des Wien-Museums. Wien: Metro-Verlag 2011.
- [3] Nußbaum, N.: Die Raumentwürfe des Hans von Burghausen und die Ökonomisierung des Bauens. In: Werkmeister der Spätgotik. Position und Rolle der Architekten im Bauwesen des 14. bis 16. Jahrhunderts. Hrsg. Stefan Bürger u. Bruno Klein. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 2009.
- [4] Vitruv: Zweites Buch, Viertes Kapitel „De Arena/Der Sand“. In: Vitruv – Zehn Bücher über Architektur.
- [5] Prüfbericht – Bestimmung der Kaltdruckfestigkeit nach DIN EN ISO 8895 vom 19. 12. 2012. TU Bergakademie Freiberg – Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik, Michael Hampel, erarbeitet i. A. der Ziegelei Huber und Dreßler Bau.
- [6] Eis, A.: Rekonstruktion des Schlingrippengewölbes der Schlosskapelle Dresden – Eine technische Meisterleistung des sächsischen Handwerkes. Mauerwerk 17 (2013), H. 4, S. 249–251.

Autoren dieses Beitrages:

Bau-Ing. Thomas Bauer
bauer lauterbach GmbH
Beratende Architekten und Ingenieure für Historische Rekonstruktionen
01219 Dresden, Tiergartenstraße 72
www.schlingrippe.de

Kay Neuling
Freiber. Restaurator im Handwerk
Hofstraße 37, 26844 Jemgum

Ralf Huber
Werkstoffingenieur und Geschäftsführer
Ziegelwerk Klaus Huber GmbH & Co. KG
Graupzig Nr. 45, 01623 Leuben-Schleinitz
www.ziegelhuber.de