

# INGENIEURBAU WERKE AUS NATURSTEIN MAUERWERK



Fraunhofer IRB ■ Verlag

# INGENIEURBAU WERKE AUS NATURSTEIN MAUERWERK

Schriftenreihe zur Denkmalpflege  
Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e.V.  
Band 4

Erhalten historischer Bauwerke e.V.  
Alter Brauhof 11  
76137 Karlsruhe  
[www.erhalten-historischer-bauwerke.de](http://www.erhalten-historischer-bauwerke.de)

Redaktion: Claudia Neuwald-Burg, Gabriele Patitz, Karlsruhe  
Gestaltung: Manuela Gantner, Karlsruhe  
Herstellung: Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart  
Titelfoto:  
»Blick in den Turmhelm des Westturms, Freiburger Münster«, Münsterbauverein

1. Auflage 2012  
© Erhalten historischer Bauwerke e.V. und Fraunhofer IRB Verlag

ISBN (Print): 978-3-8167-8803-4  
ISBN (E-Book): 978-3-8167-8804-1

## **VORWORT**

Kirchen, Burgen, Festungen, Schlösser, Stadtvillen, Brücken und Stützmauern wurden in der Vergangenheit aus Natursteinmauerwerk errichtet. Betrachtet man die heute übliche Nutzungs- und Lebensdauer von Gebäuden, so ist diese bei solchen historischen Ingenieurbauwerken längst überschritten.

Dank der Leistung der alten Baumeister sind aber noch zahlreiche Natursteinbauwerke vorhanden. Unsere Aufgabe heute ist es, mit Sachverstand und möglichst wenigen Veränderungen deren Einmaligkeit und Originalität zu erhalten und zu bewahren. Dazu sind fundierte Voruntersuchungen als Planungsgrundlage und sorgfältiges Ausführen geeigneter Baumaßnahmen notwendig.

Der vorliegende vierte Band unserer Schriftenreihe zur Denkmalpflege fasst die Beiträge der im Rahmen der Ingenieurbautage vom Verein Erhalten historischer Bauwerke durchgeführten Tagung zum Thema »Ingenieurbauwerke aus Natursteinmauerwerk – Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen« zusammen.

**Dr.-Ing. Gabriele Patitz**  
Verein Erhaltung historischer Bauwerke



## INHALT

Georg Skalecki

### **Denkmalpflegerische Grundsätze für die Sanierung des Bremer Doms**

7

Andreas Bruschke

### **Architektur verstehen und vermitteln – Verfahren der Bauaufnahme und Anwendung in der Praxis**

19

Gabriele Patitz

### **Zerstörungsfreie Untersuchungen an Bauteilen aus altem Mauerwerk – Beispiele aus der Praxis**

33

Harald Garrecht

### **Klima- und Feuchtemonitoring – Zustandsbewertung und Beitrag zur Erhaltung von historischer Bausubstanz**

47

Erwin Schwing

### **Sanierung und Sicherung von Naturstein- bauwerken am Beispiel einer Stützmauer**

63

Andreas Bewer

### **Statische Analyse von gemauerten Bogentragwerken**

77

Sylvia Stürmer

### **Konsolidierung von Natursteinmauerwerk durch Verfügung und Injektion**

95

Gerhard Buchenau

### **Bremer Dom St. Petri – Natursteinrestaurierung an Türmen, Westwerk und Strebebögen der Südfassade**

107

Yvonne Faller

### **Das Freiburger Münster**

121



Georg Skalecki

## **DENKMALPFLEGERISCHE GRUNDSÄTZE FÜR DIE SANIERUNG DES BREMER DOMS**

### **1 Einleitung**

Ziel von Denkmalpflege ist es grundsätzlich, Denkmäler zu erhalten in der uns überlieferten Form, als Zeugnis vergangener Zeiten inklusive aller Spuren, auch der jüngeren Geschichte. Um dies zu erreichen, müssen Denkmäler so gepflegt werden, dass sie keinen Schaden nehmen und deshalb sind prophylaktische Maßnahmen wichtig, um frühzeitig dafür zu sorgen, dass nicht mangels Bauunterhalt spätere schlimmere Schäden entstehen können. Der Erhalt von Originalsubstanz ist oberster Grundsatz.

Am St. Petri Dom in Bremen sind in der vergangenen Zeit die Beobachtungen gemacht worden, dass sich im Sandstein Risse gebildet haben, die sogar in Einzelfällen dafür gesorgt haben, dass kleinere Steinteile herunterfielen. Daraufhin wurde von der Domgemeinde und der Bauabteilung der Bremischen Evangelischen Kirche beschlossen, eine umfangreiche Zustandskontrolle und in der Folge eine Sanierung durchzuführen.

Diese Sanierung, zu deren denkmalpflegerischen Grundsätzen in der Folge einiges ausgeführt werden soll, wurde in den zurückliegenden Jahren bauabschnittsweise durchgeführt. Die Maßnahmen wurden im Wesentlichen aus Mitteln der Bremischen Evangelischen Kirche finanziert, unterstützt von Zuschüssen des Landes Bremen, der Deutschen Stiftung Denkmalschutz und des Beauftragten für Kultur und Medien der Bundesregierung (BKM) sowie von anderen Spendern. Die denkmalpflegerische Begleitung lag beim Landesamt für Denkmalpflege Bremen, namentlich dem Autor. Die bauherrenseitige Überwachung leistete die Bauabteilung der Bremischen Evangelischen Kirche, Herr Axel Krause, Planung und Ausschreibung lagen beim Architekturbüro Angelis und Partner, Herr Onno

Folkerts, die steinrestauratorischen Maßnahmen wurden von der Firma Ellenberger durchgeführt, verantwortlich geleitet von Herrn Gerhard Buchenau und Frau Inga Thiele-Wittig, materialkundliche Untersuchungen, vor und während der Bauphase, führte die Materialprüfungsanstalt Bremen, Herr Herbert Juling und Herr Frank Schlüter, durch. Viele weitere Fachplaner, Handwerker und Restauratoren waren an der Maßnahme beteiligt.

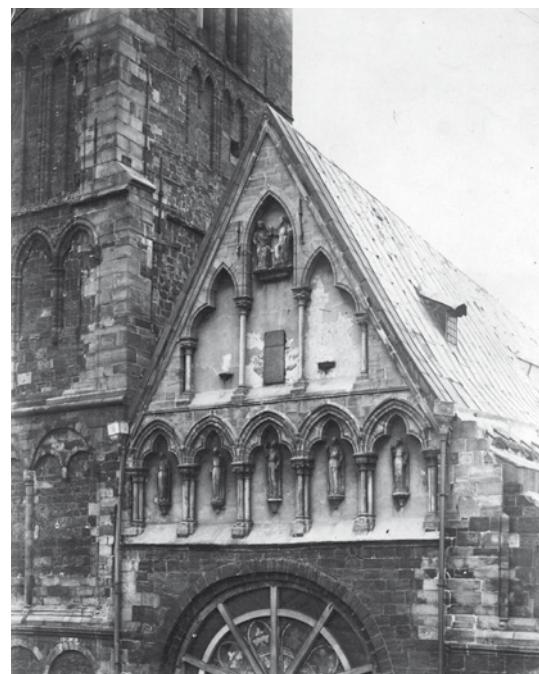
## 2 Kurze Baugeschichte

Vor Beginn jeder Sanierungsmaßnahme an einem historischen Bauwerk muss man sich zunächst der Geschichte und des überlieferten Bestandes vergewissern, um das Denkmal in seiner eigentlichen Aussage zu verstehen und bei den anstehenden Eingriffen die Originalsubstanz entsprechend ihrer Wertigkeit angemessen behandeln zu können. Dieser denkmalpflegerische Grundsatz ist sehr wichtig, denn nur aus der genauen Kenntnis der Geschichte heraus, wissen wir, welchen Stellenwert, einzelne Teile haben. Die Spuren der Geschichte sind zu bewerten, handelt es sich um bedeutende Veränderungen, die selbst einen Denkmalwert besitzen oder nur um Störungen. Aus der Bedeutung heraus folgt der denkmalpflegerische Umgang.

Deshalb steht auch hier die Baugeschichte am Anfang. Die Baugeschichte des bestehenden Bremer Doms lässt sich in zwei Hauptphasen unterteilen. Der Dom besitzt noch in ganz wesentlichen Teilen Substanz des 11. Jahrhunderts und wird trotz der umfangreichen Sanierungen des späten 19. Jahrhunderts von dieser mittelalterlichen Bauphase geprägt. Die Gründung des Doms erfolgte im 8. Jahrhundert, als auf Weisung Karls des Großen 789 eine erste Bischofskirche an dieser Stelle geweiht wurde. Im Sachsenaufstand wurde diese wohl zunächst in Holz errichtete Kirche zerstört. 805 begann man mit dem ersten Steinbau, der dann bis zu einem Brand im Jahre 1041 mehrfach vergrößert und umgebaut wurde. Die Reste dieser Vorgängerkirche wurden bei archäologischen Untersuchungen im Mittelschiff des heutigen Doms nachgewiesen. Im Jahre 1041 wurde die inzwischen mehrfach vergrößerte Kirche Opfer einer Feuersbrunst. Unter Erzbischof Bezelin begann man daraufhin einen umfassenden und deutlich größeren Neubau, der schließlich bis zur Mitte des 12. Jahrhunderts besonders unter Bischof Liemar (1072–1101) zu Ende gebracht wurde. Dieser Bau ist bis heute der Kern des bestehenden Bremer Doms. Der mächtige Neubau des 11. Jahrhunderts war Zeugnis für das bis dahin zu größter Bedeutung angewachsene Erzbistum, das Ausgangspunkt für die Missionierung des europäischen Nordens war und verantwortlich für zahlreiche Suffraganbistümer in Skandinavien und im Baltikum wurde. Quellen der Zeit benennen Bremen als das »Rom des Nordens«, da von hier der gesamte europäische Norden erschlossen wurde, was unter anderem auch in bedeutenden Zeugnissen der Historiographie Niederschlag gefunden hat, wo sich die ersten Aufzeichnungen und Beschreibungen von Skandinavien, dem Baltikum sowie von Island, Grönland und der nordamerikanischen Küste

finden. Aufgrund dieser besonderen Bedeutung wundert es auch nicht, dass ein Bauwerk entstand, das sich mit den großen romanischen Domen Deutschlands messen lässt. Kontakte ins Reich, besonders in die Rheinlande sowie bis hin nach Italien, sind belegt und haben den Domneubau beeinflusst bzw. geprägt. Die Ausmaße des Bremer Doms entsprechen exakt den Maßen des bedeutenden karolingischen Kölner Doms, der im 11. Jahrhundert noch bestand, also dem Vorgänger des heutigen Kölner Doms.

Dieser große Domneubau des 11. Jahrhunderts in Bremen mit zwei Krypten, einem Querhaus und im gebundenen System war zunächst ungewölbt. Er besaß nur eine Flachdecke als oberer Abschluss. Entscheidende Veränderungen erfuhr dieser Bau unter Erzbischof Gerhard II. (1219–1258), als die Kirche ihr heutiges Gewölbe erhielt. Gleichzeitig wurden vor die bisher wohl als Giebelfassade ausgestaltete Front zwei mehrgeschossige Westtürme gesetzt. Neueste kunsthistorische Forschungen an den Resten der erhaltenen mittelalterlichen Bauskulptur zeigen, dass auch hier hochbedeutende Künstler am Werk waren und zum Beispiel die erhaltenen Törichten Jungfrauen mit zu den frühesten und bedeutendsten Werken frühgotischer Skulptur gehören und wohl in die 1220er Jahre zu datieren sind. Diese Doppelturmfront des frühen 13. Jahrhunderts wurde im 14. Jahrhundert erhöht, und an das südliche Seitenschiff wurden Kapellen angebaut. Ein Brand im Jahr 1483 zerstörte den Nordturm und Teile des nördlichen Seitenschiffs, so dass man in der Folge bis 1502 das gesamte Nordseitenschiff durch eine breite hohe spätgotische Nordschiffshalle ersetzte. Einen tiefen Einschnitt bedeutete die Sperrung des Doms im Jahr 1532, als der Rat der Stadt, der dem reformierten Glaubensbekenntnis angehörte, der inzwischen lutherisch gewordenen Domgemeinde die Nutzung untersagte. Diese Zeit der Nichtnutzung



**Abb. 1**  
Bremen Dom – Zustand 1888

des Doms brachte eine bauliche Verwahrlosung, die 1638 im Einsturz des Südturms gipfelte. In der späteren Zeit wurde der Dom Hannoverisch bis er schließlich 1803 an Bremen fiel und mit der Anerkennung der Domgemeinde Grundlagen für Überlegungen zur Erneuerung des Doms geschaffen wurden (Abb. 1). Der Reichsdeputationshauptschluss 1803 war einschneidend für viele Veränderungen in Deutschland. Während in Bremen schon immer eine bewahrende und traditionsbewusste Grundhaltung vorhanden war, die letztlich dazu führte, dass engagierte Bürger sich für den Erhalt des Doms einsetzen, entschied man sich im gleichen Jahr in Hamburg für den Totalabriß des ebenfalls lutherischen Doms, der an die Stadt Hamburg gefallen war.

Nach dem Grundsatzbeschluss des Erhalts des Doms und ersten kleineren sanierten Maßnahmen dauerte es noch einige Jahrzehnte bis engagierte Bremer Bürger eine umfangreiche Instandsetzung des Doms initiierten. Dem Bauherrenkollegium stand seit 1881 Franz Ernst Schütte vor, eine der führenden Unternehmerspersönlichkeiten Deutschlands, der durch den Erdölhandel zu beträchtlichem Reichtum gekommen war. Ganz dem bremerischen Bürgersinn verpflichtet, engagierte sich Schütte mit privatem Vermögen unter anderem auch für die Restaurierung des Bremer Doms. So kam es 1887 zur Auslobung eines Architektenwettbewerbs, bei dem zunächst für die damalige Zeit recht bemerkenswerte Vorgaben gemacht wurden, die den Respekt vor dem überlieferten historischen Baubestand einforderten. So sollte der eingestürzte Südturm wieder aufgebaut und die Fassade sowie die Nordseite restauriert werden. Maßvolles Handeln und weitgehender Erhalt des historischen Bestandes waren ausdrücklich gewünscht (Abb. 2). Unter den 21 Wettbewerbern erhielt der noch eher unbekannte Berliner Max Salzmann



Abb. 2  
Bremen Dom – Zustand vor dem Wettbewerb 1888

den ersten Preis. Nach seinem Entwurf wurde 1888 bis 1901 eine umfangreiche Restaurierung durchgeführt. Das gesamte äußere Erscheinungsbild des heutigen Doms wird von dieser Restaurierung geprägt. Die heutige Doppelturmfront ist ebenso ein Werk dieses Umbaus wie die äußere Erscheinung der Nordseite. Die unteren Geschosse des Nordturmes zeigen noch den ursprünglichen mittelalterlichen Befund, nach dem die neuerrichteten unteren Geschosse des Südturms ausgerichtet sind. Ab dem fünften Geschoss sind vollkommen neue Formen von Salzmann entworfen worden, die sich offenkundig sehr stark am Dom von Limburg an der Lahn orientieren. Salzmanns Konzeption für die Nordseite bleibt sehr stark im Dekorativen. Besonders auffallend ist die große zentrale Brautportalachse, die durch einen Giebel betont wird. Bestimmend für die Ostteile ist der von Salzmann vollkommen frei erfundene Vierungsturm. Zu keinem Zeitpunkt in seiner Geschichte hat der Bremer Dom bis dahin einen Vierungsturm besessen. Wohl als Gegengewicht zur mächtigen Westfassade entwickelte Salzmann diese Idee, die sicherlich auch durch die allgemeine Orientierung an rheinischen Großbauten hervorgerufen wurde. Auffallend an der gesamten Restaurierung des 19. Jahrhunderts ist die freie und beliebige Erfindung neuer Formen, die dazu geführt hat, dass die Westteile eine stark romanische Wirkung erhalten, während die Nordseite stärker auf spätgotisches Formenrepertoire aufbaut (Abb. 3). Dies sind grob zusammengefasst die wichtigsten Stationen der baulichen Entwicklung des Doms.

Grundlage für die denkmalpflegerische Betreuung ist natürlich die Kenntnis dieser Baugeschichte. Der im Kern im Wesentlichen auf das 11. Jahrhundert zurückgehende Dom wird in seinem äußeren Erscheinungsbild und in den äuße-



**Abb. 3**  
Bremen Dom – Umbau-  
entwurf Salzmann 1888

ren Oberflächen im Wesentlichen von der Restaurierung des späten 19. Jahrhunderts geprägt. Und genau diese Stellen waren es, die Schädigungen zeigten und die zu einer Beschäftigung mit dem Bauwerk Anlass gaben.

### 3 Vorbereitende Maßnahmen

Zu den wichtigsten Arbeitsgrundlagen für solch eine umfangreiche Restaurierung an einem historischen Bauwerk gehört eine detailreiche Plangrundlage. Hierfür wurde vor Maßnahmenbeginn eine Vermessung auf der Grundlage einer Stereophotogrammetrie beauftragt. Hierzu wurden von hohen Arbeitsbühnen alle Seiten des Doms photogrammetrisch mit parallelen Messbildern erfasst und danach mit interpretierender Auswertung abstrahiert und in eine zeichnerische Bestandaufnahme umgesetzt. Die Messbildstelle Dresden lieferte diese Plangrundlagen, die unverzichtbare Grundlage für die weiteren Arbeiten werden sollte. Von der Schadenskartierung über die ausführliche Dokumentation der durchgeföhrten Maßnahmen bis hin zur Abrechnung waren die Pläne wichtiges Arbeitsmaterial (Abb. 4).

Weitere Entscheidungsgrundlagen lieferten die materialkundlichen Voruntersuchungen. Die Materialprüfungsanstalt Bremen (MPA) profiliert sich seit vielen Jahren in der Denkmalpflegeberatung und ist durch einen Kooperationsvertrag

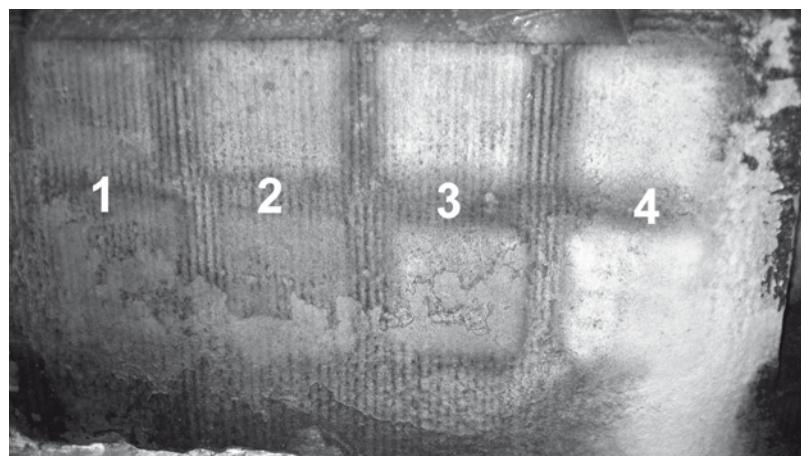


Abb. 4 Bremen Dom – Zustand vor der Restaurierung



Abb. 5 Bremen Dom – während der Restaurierung

der Berater der bremischen Denkmalpflege. Zur Entscheidungsvorbereitung der Sanierungsmethoden lieferte die MPA wichtige Erkenntnisse, in dem zunächst einmal die genauen Materialkenndaten der historischen Baumaterialien festgestellt wurden, wie Festigkeit, Elastizität und Wasseraufnahme, woraufhin Vorgaben für die zu verwendenden Restaurierungsmaterialien gemacht werden konnten (Abb. 5). Der Einsatz falscher Restaurierungsmaterialien führte in der Vergangenheit häufig zu dramatischen Fehlrestaurierungen, mit denen sich die aktuelle Denkmalpflege schmerzlich auseinanderzusetzen hat. Obwohl die Charta von Venedig von 1964 schon eindeutig vorschreibt, dass zur Sicherung eines Denkmals zwar moderne Konservierungs- und Konstruktionstechniken herangezogen werden können, aber nur dann, wenn deren Wirksamkeit wissenschaftlich nachgewiesen und durch praktische Erfahrungen erprobt ist, hat man nach dem Krieg sehr häufig den Produktanpreisungen der Hersteller Glauben geschenkt, ohne unabhängige Prüfung der Verträglichkeit. Nach den vielen Fehlern der Vergangenheit ist es für die Denkmalpflege heute selbstverständlich, unabhängige Materialprüfungseinrichtungen zur Beratung hinzuzuziehen. Die MPA Bremen hat wichtige Aussagen zur chemischen Verträglichkeit als auch zu den physikalischen Eigenschaften zwischen historischen und neuen Baustoffen gemacht. Untersucht wurden auch in Testreihen die geschwärzten Sandsteinoberflächen, um festzustellen, ob aus bauphysikalischer Sicht eine Reinigung sinnvoll ist. Es handelt sich dabei um eine Gipsschicht in den obersten Kornlagen, durch die die Wasseraufnahme und Wasserabgabe behindert wird. Um eine ausreichende Diffusionsfähigkeit zu erreichen, wäre eine Abstrahlung und Bearbeitung der Oberflächen in diesen obersten Kornlagen notwendig, was natürlich zu einem enormen Materialverlust führt und im Grunde genommen nur eine Vorwegnahme des natürlichen Abplatzprozesses wäre. Alle weniger tief eingreifenden Reinigungsversuche führen zu keiner Verbesserung der Diffusionsfähigkeit des Steins. Deshalb wurde festgelegt, keine substanzschädigenden Strahl-Reinigungsverfahren einzusetzen und die Patina zu belassen (Abb. 6). Untersucht wurden weiter alle Salzgehalte im Stein, worauf an stark betroffenen Stellen Salzreduzierung durch verdunstungsaktive Kompressen erfolgte. Das Hauptproblem der Riss-



**Abb. 6**  
Bremen Dom  
– Testflächen MPA

bildungen und Abplatzungen am Dom entstand durch Korrosion von verbauten Eisenankern, deren Lage im Mauerwerk von außen nicht erkennbar war. Durch schadhafte Fugen und Risse gelangte in der Vergangenheit Wasser in den Stein und führte zu Korrosion der verbauten Anker. Dadurch kam es zu Volumenvergrößerungen dieser Eisen und Platzungen und Rissbildungen. Die MPA Bremen untersuchte mit einem zerstörungsfreien Prüfverfahren die Lage der Klammern, die querschnittsartig daraufhin exemplarisch überprüft wurden. Nach dieser Begutachtung konnte von Fall zu Fall entschieden werden, ob Klammern ausgetauscht oder im Stein belassen werden. Nach diesen materialkundlichen Voruntersuchungen konnte das Architekturbüro Angelis und Partner eine Schadenskartierung durchführen und ein ausführliches Leistungsverzeichnis für eine beschränkte Ausschreibung vorbereiten. Aufgefordert wurden Fachfirmen mit besonderen denkmalpflegerischen Referenzen, denen aufgrund der Voruntersuchungen konkrete Vorgaben für die verwendeten Materialien und die gewünschten Arbeitsschritte gemacht werden konnten. Die Gesamtmaßnahme wurde von Herrn Krause, Leiter der Bauabteilung der Bremischen Evangelischen Kirche, koordiniert. Seine Aufgabe war es, die Fachplaner, einschließlich der Denkmalpflege einzubinden und letztlich natürlich auch die Finanzierung zu gewährleisten. Die Bremische Evangelische Kirche, unterstützt vom Landesamt für Denkmalpflege, stellte entsprechende Förderanträge an die weiter oben schon genannten Geldgeber, so dass die Sanierungskosten, die sich allein für die Westfassade auf 1,4 Millionen Euro beliefen, sichergestellt werden konnte. Nach Schaffung der Planungsgrundlagen, den materialkundlichen Voruntersuchungen, der exemplarischen Schadenskartierung konnte dann zwischen Bauleitung und Denkmalpflege die denkmalpflegerische Zielstellung abgestimmt werden.

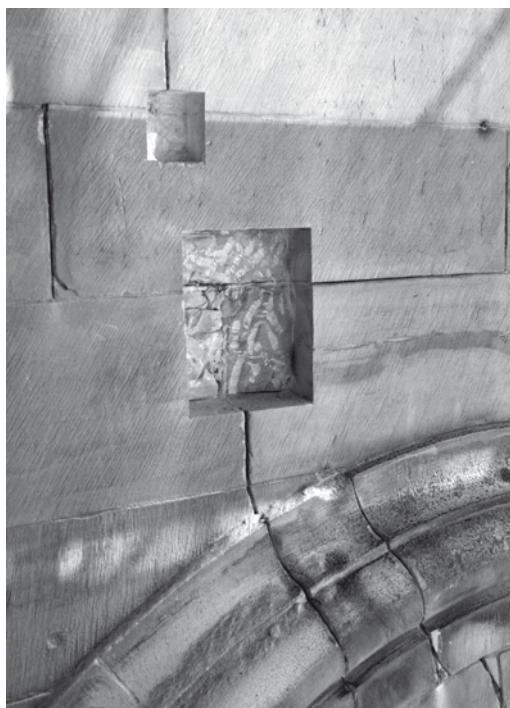


Abb. 7  
Bremen Dom – geschädigte Stelle

Erhalt der originalen historischen Substanz, auch wenn es sich hier an diesen im Kern mittelalterlichen Bau bei dieser Maßnahme weitestgehend um Substanz des 19. Jahrhundert handelte, war oberster Grundsatz. Die Witterungseinflüsse, Wind und Regen sowie Umwelteinflüsse haben die Fassaden des 19. Jahrhunderts, jetzt nach knapp 100 Jahren, stark angegriffen. Die Sandsteine, die hier verbaut wurden, sind eisenhaltiger Portasandstein und sehr harter Obernkirchener Sandstein. Sie zeigen in den Oberflächen Absandungen und Schichtenablösungen. Die Mörtelfugen zwischen den Steinen sind partiell ausgewaschen, wodurch Feuchtigkeit innerhalb des Mauerwerks eindringt. Auch viele Restaurierungen jüngerer Zeiten waren feststellbar. Der Einsatz falscher Reparaturmaterialien, wie zum Beispiel zementäre Mörtelplombe, führte zu teilweise dramatischen Verfallserscheinungen (Abb. 7). Damit solche Fehler nicht wieder passieren, war es wichtiges Ziel nur wirklich ausreichend erprobte Maßnahmen zur Reparatur einzusetzen, um eine hohe Nachhaltigkeit zu erreichen. Die Durchfeuchtungen des Mauerwerks – bedingt durch die Risse in den Fugen oder im Mauerwerk selbst – waren als Schadensursache ausgemacht, wodurch die Korrosion der Eisenanker im Inneren des Mauerwerks ausgelöst wurde. Die Eisenanker haben keinerlei statische Bedeutung, sondern wurden seinerzeit nur zum schnelleren Verarbeiten eingesetzt, um die Steine im noch nicht ausgehärteten Mörtelbett sicher zu halten. Es hätte aber einen ungeheuren und schädigenden Aufwand bedeutet, alle erkannten Eisenanker zu entfernen. Insofern wurde entschieden, nur die Anker auszubauen, die höchstwahrscheinlich durch Feuchteeindring Schädigungen erhalten haben können oder wo tatsächlich bereits Haarrisse oder größere Risse erkennbar waren. So wurden die korrodierten Eisenteile ausgebaut, um weitere Sprengungen und Abplatzungen im Mauerwerk zu verhindern. Bereits lose Sandsteinteile wurden verdübelt mit rostfreien Stahldübeln oder verklebt. Die geschädigten Partien des Sandsteins wurden ab einer bestimmten Größe durch Vierungen ersetzt (Abb. 8), wobei glücklicherweise das Landesamt für Denkmalpflege geeigneten Ersatzsandstein aus dem eigenen Lager zur Verfügung stellen



**Abb. 8**  
Bremen Dom – Steinersatz

konnte (Abb. 9). Alle defekten Fugen wurden freigelegt und mit speziellem Mörtel nach historischer Rezeptur wieder verfugt. Äußerste Zurückhaltung bei allen Reparaturmaßnahmen, weitestgehender Substanzerhalt und nur Verwendung von angepassten Materialien war der diese Sanierung leitende Grundsatz. Das historische Erscheinungsbild, einschließlich aller Alterungsspuren und einschließlich der Patina, sollte gewahrt bleiben.

## 4 Durchführung

Die Vorgaben, die Bauherr und Denkmalpflege entwickelten, wurden bei der praktischen Umsetzung vollständig eingehalten. Nach der Ausschreibung erhielt die Firma Claus Ellenberger den Zuschlag und führte zuverlässig die genannten Sanierungsmaßnahmen durch. Hinzugezogen wurden für weitere Maßnahmen, wie Mosaikreparaturen, Fensterreparaturen, Taubenschutz und Ähnliches weitere Fachfirmen. Da Herr Gerhard Buchenau, der für die Firma Claus Ellenberger die Maßnahme leitete, selbst über die Maßnahme berichtet, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. Angemerkt werden soll lediglich, dass vor allem an den gestalteten Architekturelementen bei Rostsprengungen es eine große Herausforderung war, Säulen und Kapitelle zerstörungsfrei auszubauen, die korrodierten Eisenteile zu entfernen und durch Edelsteinklammern zu ersetzen und die entsprechend reparierten Teile wieder einzusetzen (Abb. 10). Die Steinreparaturen wurden bei größeren Schädigungen durch Vierungen durchgeführt, bei kleineren Schäden durch Steinergänzungsmörtel, so dass die Ziele der Sanierung auch in der Umsetzung vollständig eingehalten werden konnten, nämlich möglich viel an Originalsubstanz zu erhalten.



**Abb. 9**  
Bremen Dom  
– Ersatzsandsteine aus dem Depot des LfD

## Literatur

- [1] Skalecki, Georg: Der Dom zu Bremen als Zentrum der Missionierung des europäischen Nordens. In: Welterbe und Europäisches Kulturerbe-Siegel in Deutschland. Potentiale und Nominierungsvorschläge. ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees 51. Berlin 2011, S. 90–91.
- [2] Krause, Axel: St. Petri Dom, Bremen. Vorstellung der Maßnahmen aus Bauherrensicht. In: Patitz, Gabriele (Hg.): Natursteinsanierung: Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele: Tagung am 25. März 2011 in Stuttgart. Stuttgart 2011, S. 55–67.
- [3] Buchenau, Gerhard: Natursteinrestaurierung an Türmen, Westwerk und Strebbögen der Südfront. In: Patitz, Gabriele (Hg.): Natursteinsanierung: Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele: Tagung am 25. März 2011 in Stuttgart. Stuttgart 2011, S. 69–77.
- [3] Skalecki, Georg: Baugeschichte Teil 1: Die Mittelalterliche Baugeschichte; Baugeschichte Teil 2: Die Restaurierung des Bremer Doms im 19. Jahrhundert; Denkmalpflegerische Zielstellung der Instandsetzungsarbeiten 2009/2010. In: Dombaustelle 2010. Kalender hg. von der Bremischen Evangelischen Kirche.
- [4] Skalecki, Georg: Die Restaurierung des Bremer Doms von 1888. Die Wettbewerbsentwürfe als Spiegel des »kreativen« Umgangs mit mittelalterlicher Architektur im 19. Jahrhundert. In: Dittmann, Lorenz; Wagner, Christoph; Winterfeld, Dethard von (Hg.): Sprachen der Kunst. Festschrift für Klaus Güthlein. Worms 2007, S. 227–234.
- [5] Hoffmann, Hans-Christoph: Die Erhaltung des St. Petri Doms zu Bremen im 19. Jahrhundert. Bremen 2007.
- [6] Skalecki, Georg; Haberecht, Margarethe: Zeitschichten: Die Restaurierung des Bremer Doms 1888–1901. Eine Ausstellung. In: Denkmalpflege in Bremen. Schriftenreihe des Landesamtes für Denkmalpflege Bremen. Heft 3. Bremen 2006, S. 8–19.
- [7] Skalecki, Georg: »Es gilt, ... aus dem Geiste des Alten heraus ganz neue Theile zu schaffen ...« Die »Restaurierung« des Bremer Doms von 1888–1901. In: Zeitschichten. Erkennen und Erhalten – Denkmalpflege in Deutschland. Ausstellungskatalog Dresden. Berlin 2005, S. 102–107. Wiederabdruck: In: Denkmalpflege in Bremen. Schriftenreihe des Landesamtes für Denkmalpflege Bremen. Heft 3. Bremen 2006, S. 20–28.



**Abb. 10**  
Bremen Dom  
– reparierte Architekturteile

## **Abbildungsnachweis**

Alle Abbildungen: Archiv Landesamt für Denkmalpflege Bremen

Andreas Bruschke

## **ARCHITEKTUR VERSTEHEN UND VERMITTELN Verfahren der Bauaufnahme und Anwendung in der Praxis**

### **1 Einleitung**

Die rasante Entwicklung der Vermessungstechnologien hat sowohl zu attraktiven Ergebnissen als auch zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit von Bauaufnahmen geführt. Es wird eingeschätzt, dass dadurch die Akzeptanz und die Nachfrage nach Vermessungen von Denkmalen, Gebäuden und Ingenieurbauwerken gestiegen sind. Der Bedarf kommt hauptsächlich aus dem Bereich der Sanierungsplanung und Restaurierung.

Unter den Bedingungen des Marktes nimmt der Preis dieser Dienstleistungen eine entscheidende Rolle ein. Regelmäßig fehlt jedoch eine ausreichende Definition der für die Sanierungs- und Restaurierungsplanungen notwendigen Anforderungen und Inhalte an die Bauaufnahme. Die Wirtschaftlichkeit einer Bauaufnahme wird letztlich durch den Nutzen bestimmt, der in der Planung und Bauausführung der Sanierungsvorhaben entsteht. Mängel führen zu Kostensteigerungen und zeitlichen Verzögerungen. Für die Sicherung der Qualität einer Bauaufnahme sind deshalb neben klaren inhaltlichen Vorgaben auch die objekt- und aufgabenbezogenen technologischen Rahmenbedingungen entscheidend.

In diesem Beitrag werden verschiedenste, jedoch für die Natursteinsanierung typische, Projekte präsentiert. Anhand dieser Projekte wird der Zusammenhang zwischen unterschiedlichen inhaltlichen Anforderungen und den jeweiligen Vermessungskonzepten diskutiert, die für diese Anwendungen besonders geeignet und praxisrelevant sind. Außerdem gibt es auch neueste und noch weitgehend unbekannte Entwicklungen vorzustellen.

## 2 Anforderungen an die Bauaufnahme von Natursteinfassaden

Eine vollständige und zuverlässige Untersuchung und Analyse der Baukonstruktion, von Material, Zustand und Schäden sowie der Baugeschichte ist unverzichtbar für die Planung von Restaurierungs- und Sanierungsmaßnahmen an historischen Natursteinfassaden. Einerseits dient sie als Grundlage für die Erhaltung wertvoller denkmalgeschützter Substanz, andererseits sichert diese Vorarbeit die Einhaltung des Kostenrahmens. Die Ursachen für fehlerhafte Konzepte, überzogene Kosten oder eintretende Schäden liegen häufig in nicht vorhandenen oder mangelhaften Voruntersuchungen und Bestandsunterlagen.

### 2.1 Arbeiten im CAD

Für die Natursteinsanierung der Fassaden der Bremer Domtürme wurde eine klassische photogrammetrische Vermessung ausgeführt. Sie liefert detail- und maßgenaue Zeichnungen mit Darstellungen der Werksteinverbände und der Architektureile mit Profilen und Ornamenten. Damit wird die Grundlage geschaffen, die notwendigen Befunde in räumlichen Zusammenhängen zu erfassen sowie vollständig, plausibel und anschaulich zu vermitteln. Anschließend werden für jeden Stein konkrete Sanierungsmaßnahmen geplant und mit genauen Mengenangaben für Leistungsverzeichnisse zusammengefasst (Abb. 1).

Die zeichnerische Auswertung durch die Photogrammetrie ist bereits selbst Interpretation und Erkenntnisgewinn, jede Linie ist eindeutig und einem Merkmal/ Layer zugeordnet. Das bedeutet eine Arbeitsverlagerung mit allen Risiken und Nebenwirkungen. Es erfordert gerade deshalb eine wohl überlegte Aufnahmeplanung, also hochwertige Messbilder als Voraussetzung für eine hohe Detailerkennbarkeit und Aussagekraft der Ergebnisse.

### 2.2 Kartierung und Informationsverarbeitung

Bei der Einführung hochgenauer photogrammetrischer Bestandspläne und der durchgängigen CAD-Bearbeitung in allen Arbeitsschritten hat übrigens die Freiburger Münsterbauhütte eine führende Rolle gespielt. Die Auswertung von Steinumrissen, verwitterten Architekturformen, Ornamenten, Maßwerken, erkennbaren Schäden etc. mit einer dichten Punktfolge ist die Grundlage für die Kartierung verschiedener Merkmale und Befunde. Die Genauigkeit der photogrammetrischen Auswertung schafft gleichzeitig die Voraussetzung für das Zeichnen von Schablonen für die Nachfertigung zu ersetzender Werkstücke (Abb. 2).

Das Auftragen der vor Ort gewonnenen Informationen mit punktförmigen, linienhaften oder flächenmäßigem Bezug und die maßstäbliche Darstellung in einem räumlichen Zusammenhang (Kartierung) erschließt diese durch entsprechende visuelle Mittel (Abb. 3).

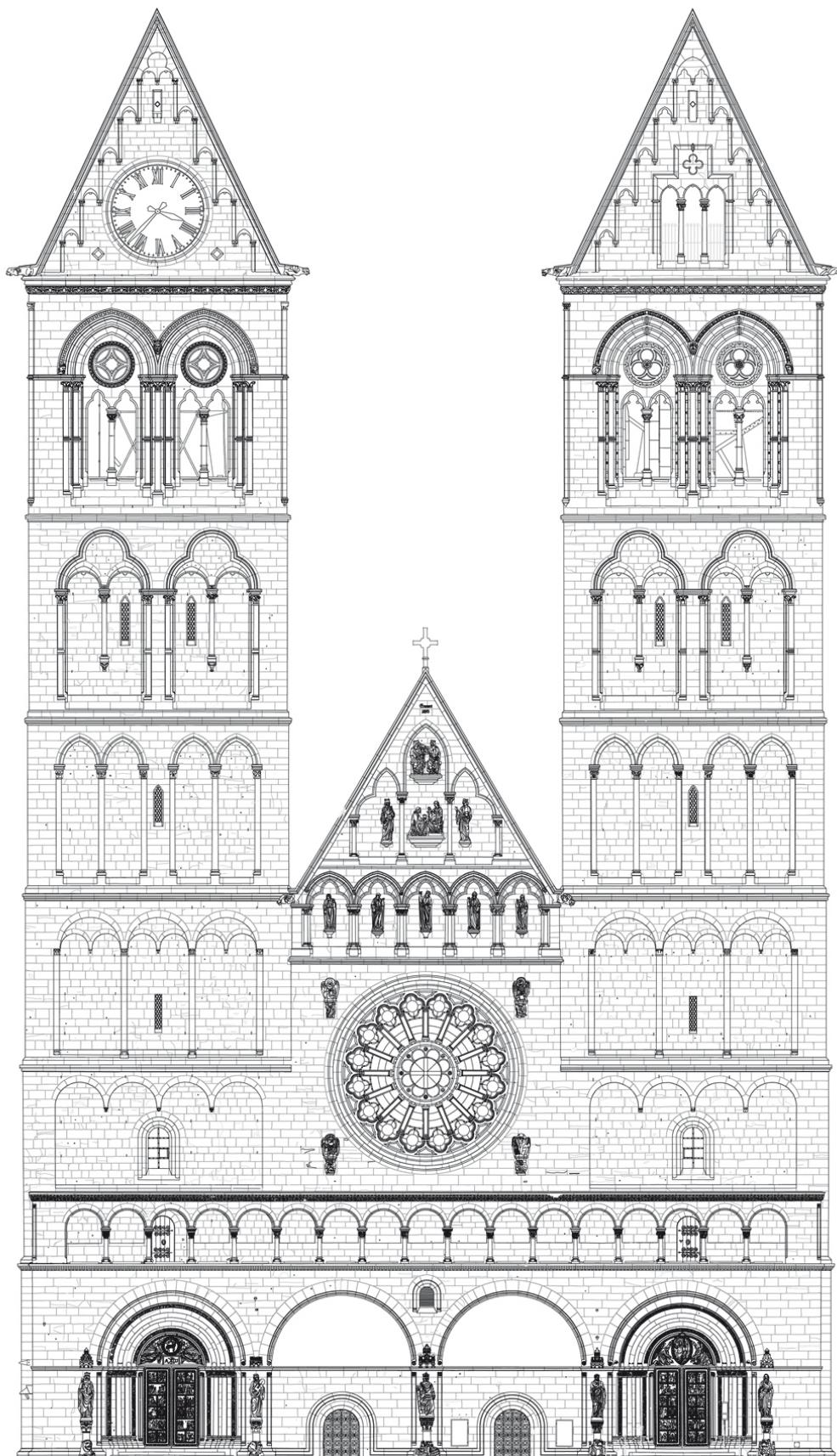


Abb. 1 Photogrammetrische Auswertung der Westfassade des Bremer Doms – Gesamtansicht

Entsprechend den Möglichkeiten von CAD ist diese einmal erfolgte selektive Erfassung der Informationen in sinnvoller Weise auch für die weitere Verarbeitung in Datenbanken zu nutzen:

- Zusammenführen mehrerer Zeichnungen (z.B. als Tabelle mit allen Schäden eines Projektes usw. – nur dadurch sind übergreifende Auswertungen möglich),
- standardisierte Berichte wie Stücklisten und Kostenaufstellungen,
- spezielle Abfragen (SQL: z.B. Gib alle Steine vom Typ x, mit Maßnahme y).

Die Kartierung erfolgt also in vorhandenen CAD-Zeichnungen. Die entsprechenden Informationen/Sachdaten werden mit den CAD-Elementen Punkt, Linie und Fläche verknüpft – einfach durch Anklicken des CAD-Elementes und des entsprechenden Merkmals in der Legende. In der Regel wird der Stein (definiert als Fläche durch seine Umrisslinie) als kleinstes Objekt mit entsprechenden Merkmalen/Attributen belegt. Diese werden durch vorab festgelegte Farben oder Schraffuren visualisiert.



Abb. 2 Ausschnitt am südlichen Hahnenturm

KARTIERUNGSLEGENDE BEARBEITUNG, SCHÄDEN, STEINMATERIAL													
GEBEILT	ZAHNGEBEILT	SCHARRIERT	GESTELZT	GEKRÖNLT	GESTOCKT	FEIN IM HIEB							
136 ABBRÜCKELN	131 ABSÄNDEN	252 ANTRAGUNG	140 AUFBLÄTTERN	90 AUFWUCHS	254 AUSBLÜHUNG	49 FEHLSTELLE	253 MÖRTEL	216 RÜCKWITTERUNG	160 SCHALE	250 KRUSTE	131 ABSÄNDEN FLÄCHE	216 RÜCKW FLÄCHE	M RISSE
11 ALMENDRÖCKER	230 FREUDENSTÄTER	20 HEIMBACHER	22 KENZINGER	242 LAHRER	222 LORETOBERG	220 MAINTÄLER	50 PFÄLZER	40 POSTÄER	234 SEEDORFER	30 TENNENBÄCHER	240 WÖLBINSBERG	232 SCHLIERBERG	200 FISCHBACHER

09/2005 LEUSCHNER

Abb. 3 Kartierungslegende mit Oberflächenbearbeitung, Schäden und Material (Leuschner 2005)

### 2.3 Bildpläne

Fassaden aus Werksteinmauerwerk sind natürlich auf Grund der verhältnismäßig klaren Definition der Kanten und Fugen besonders geeignet für die zeichnerische Auswertung. Trotzdem gibt es Gründe, Fassaden und Wandflächen mit Bildplänen zu dokumentieren. Eine hohe Bildqualität vorausgesetzt, geben die Bilder mehr Informationen als die auf Linien reduzierten Zeichnungen. Für die Kartierung bedeutet das allerdings, dass dann die Zeichenarbeit – Kanten, Architekturformen, Fugen bzw. Steinumrisse – auf der Basis dieser Bildpläne stattfindet, ergo eine Verlagerung der immer noch manuell auszuführenden Zeichenarbeit. Inwieweit Bildpläne geometrisch genau sind, soll später im Punkt Photogrammetrie diskutiert werden.

Ein anderer wesentlicher Vorteil von Bildplänen ist die Anwendung für Darstellungen von Flächen ohne klar definierte Struktur, also Putz oder durch Schäden stark überformte Werksteine. Selbstverständlich können CAD-Zeichnungen und Bildpläne kombiniert werden, um die jeweiligen Vorteile gleichzeitig zu nutzen (Abb. 4).

Durch die hohe fotografische Qualität und Detailerkennbarkeit verlagert sich ein Großteil der Schadenskartierung vom Ort des Geschehens ins Büro.

## 3 Verfahren der Bauaufnahme von Natursteinfassaden – Möglichkeiten und Grenzen

Vorrangig werden im Folgenden Laserscanning und Photogrammetrie diskutiert. Der Vollständigkeit halber soll aber noch kurz eingeflochten werden, welche Alternativen zur Verfügung stehen. Denkbar ist immer noch das händische Aufmaß, welches aus didaktischen Gründen hier und da in der Ausbildung gelehrt



**Abb. 4**  
Straßenbrücke über die Jagst in Mulfingen:  
Hier wurden alle Bogenuntersichten als Bildplan abgewickelt dargestellt.

wird. Dabei müssen an der Fassade horizontale und vertikale Schnüre gespannt werden, um ein paralleles und rechtwinkliges Bezugssystem zu bekommen. Von diesem wird dann mit Zollstock und Wasserwaage Punkt für Punkt aufgemessen, abgelesen und auf dem Zeichentisch aufgetragen. Natürlich ist diese Vorgehensweise an großen Fassaden nicht konkurrenzfähig, möglicherweise aber für die Aufnahme oder Ergänzung kleiner Flächen. Offen bleibt dann immer noch, wie die Zeichnung in ein CAD-System kommt. Entweder einscannen und als Bild hinterlegen oder manuell nachzeichnen. Die Schnelligkeit und Ausdrucksstärke des Bleistifts – natürlich erst nach langer Übung – steht den digitalen Methoden als unbestreitbarer Vorteil gegenüber, ebenso wie die intensive Beobachtung und die damit verbundene Bewertung der Befunde. Trotzdem: bezahlt wird i. d. R. nur das niedrigste Angebot. Diesem Thema soll aber noch am Schluss etwas Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Eine weitere Alternative stellt das – sicher allgemein bekannte – tachymetrische Verfahren dar. Heute ist die Messgeschwindigkeit mit einem Punkt pro Sekunde kein Gegenstand der Diskussion mehr und damit ist die Tachymetrie für ein steingerechtes Aufmaß mit hoher Messpunktdichte absolut praktikabel. Da heute üblicherweise die Punkte gleich in den »Zeichentisch« Notebook übertragen werden, ist die Aufmaßzeichnung eigentlich fertig, kann auf der Baustelle eventuell noch ergänzt und korrigiert werden. Leider ist die Messung mit dem Tachymeter auf ein festes Stativ angewiesen. Damit sind höhere Fassadenteile nicht einsehbar oder es kommt zu sehr schrägen Anzielungen. Der zur Messung verwendete Laserpunkt ist als Zielpunkt schlecht sichtbar und als Messpunkt verwandelt er sich zu einem großen Fleck in Form einer Ellipse. Für dieses Verfahren bleibt also auch nur die Beschränkung auf gut einsehbare und direkt messbare Flächen. Und dafür wird es auch eingesetzt (Abb. 5).



Abb. 5

Tachymetervermessung in der Porta Nigra in Trier

### 3.1 Laserscanner

Wegen verschiedener Scan-Technologien sollte das Thema besser mit 3D-Scanning überschrieben werden. Scannen mit Laserentfernungsmessung ist nur eine von mehreren Technologien. Allen Scannern ist aber gemein, dass das Ergebnis eine Punktwolke ist. Diese faszinierende Technologie hat sich rasant entwickelt, wobei insbesondere die Geschwindigkeit (Scanzeiten), Reichweiten und Genauigkeiten im Mittelpunkt stehen. Nachteil des schnellen technologischen Fortschritts ist jedoch, dass die jeweils neuen Geräte schnell veralten und innerhalb kurzer Abstände ersetzt werden müssen. Die versprochene Revolution durch eine automatisierte Auswertung der Punktwolken hat nicht stattgefunden. Zwar werden in der Formenkontrolle im Automobilbau und ähnlichen Anwendungen in Echtzeit Ergebnisse geliefert, aber in der Bauaufnahme können diese Hoffnungen bisher nicht erfüllt werden.

Die Punktwolke selbst ist soweit auswertbar, dass darin Maße abgegriffen werden können. Hauptsächlich aber werden dreidimensionale Oberflächen abgebildet und dazu sind mehrere Arbeitsschritte notwendig: die Verknüpfung benachbarter Scans und Angleichung der Punktwolken, die Berechnung von Oberflächen aus den Punkten durch Vermischung und die Texturierung mit Bildinformationen. Das sind auch heute noch manuell zu steuernde Prozesse, die den eigentlichen Teil der Arbeit ausmachen. Der Abstand der Punkte ist immer gleich (er hängt von der Auflösung des Gerätes und dem Messabstand ab) und soll im Interesse einer notwendigen Datenreduktion sinnvoll angepasst werden. Insofern ist die beworbene Effizienz dieser Technologie eigentlich nur in der raschen Aufnahme der Scans zu sehen, wenn nicht in gleicher Zeit auch die notwendigen Messbilder für die konkurrierende Photogrammetrie aufzunehmen sind.

Da sich mit jeder Verdopplung der Punktauflösung die Datenmenge vervierfacht, vergrößern sich die Datenmengen in Größenordnungen von Terrabyte: Aber auch dann bleiben immer noch Architekturkanten und -profile rund, eine Folge der durch Punktabstand und Vermischung bewirkten Glättung.

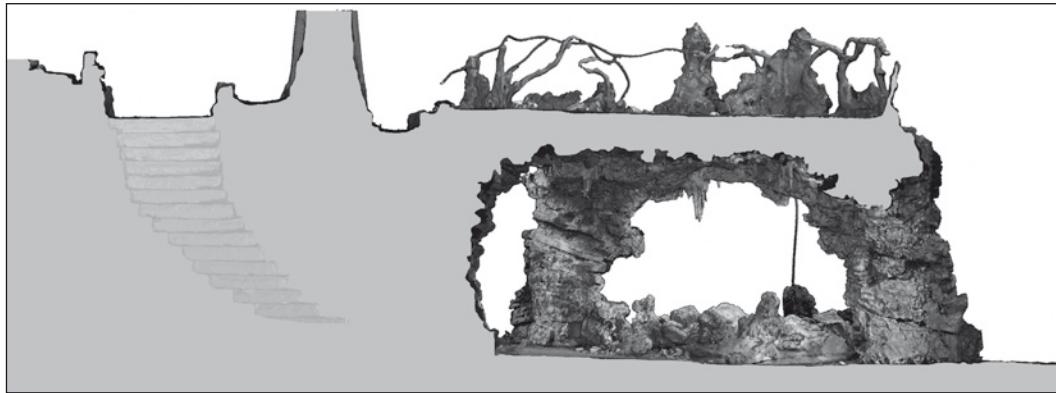
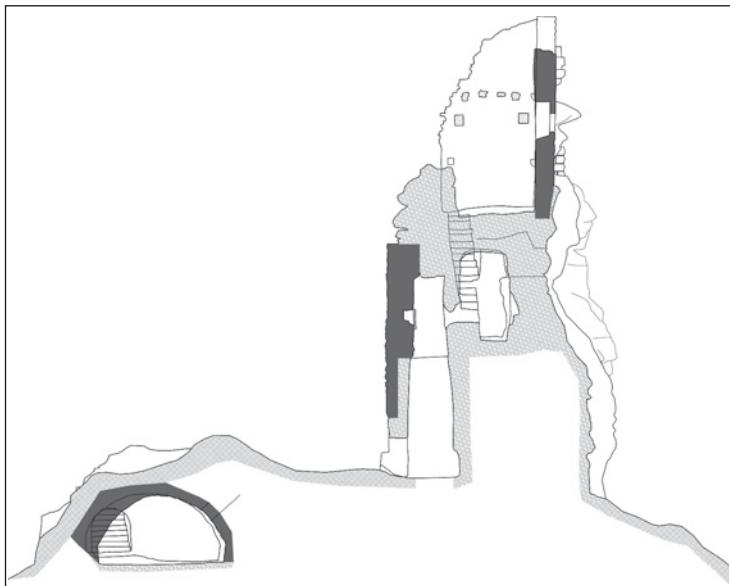


Abb. 6 Grotte in Marienberg, Vertikalschnitt

Aber gerade damit werden auch Vorteile für die Darstellung von bestimmten Objekten bzw. Oberflächen deutlich. Allgemeine dreidimensionale Oberflächen – in der Regel ohne definierbare Kanten und Konturen – sind in der Archäologie gegeben und müssen erfasst und maßstabsgerecht dargestellt werden. Ähnlich auch bei besonderen Bauwerken wie der künstlichen Grotte in Marienberg. Diese völlig unregelmäßige (durch Bruch- und Kunststeine verkleidete) Konstruktion lässt sich eigentlich nur durch Scans außen und innen erfassen, um schließlich daraus maßstabsgerechte Grundrisse, Schnitte und Ansichten als Orthofotos zu berechnen, mit denen der räumliche Zusammenhang und die Lage der Bauteile und Steine beschrieben wird (Abb. 6).

Ein weiteres geeignetes Anwendungsbeispiel ist die auf einem hohen Felsrücken stehende Burgruine Meistersel. Insbesondere für die Ableitung der Schnittprofile in der Enge der Brunnenstube, dem Schacht sowie in den Felsformationen erweist sich die Scanaufnahme vorteilhaft (Abb. 7, 8).



**Abb. 7**  
Burgruine Meistersel, Vertikalschnitt durch die Oberburg mit Gewölbekeller, Brunnen und Palas



**Abb. 8**  
Laserscanner

Gleichzeitig werden aber auch die Grenzen sichtbar. Die Geländeprofile in den Trümmern der abgestürzten Mauern am Hang und im Bewuchs sind nur örtlich zu erkunden und mit dem Tachymeterstab aufzumessen. Und auch hier: der Scanner scannt nur vom Stativ und damit sind Verschattungen unvermeidlich – was zum Glück in diesem Fall von den Gerüsten aus nur eine geringe Rolle spielte.

### 3.2 Photogrammetrie

Auf Grund der heftig beworbenen Scantechologie ist die Photogrammetrie scheinbar in Vergessenheit geraten. Zu Unrecht, denn auch hier ist die Entwicklung der automatischen Bildverarbeitung in den Bereichen Aerophotogrammetrie und Fernerkundung sowie Computer Vision (maschinelle Wahrnehmung von Bildinhalten) – also in zwei scheinbar fremden Fachgebieten – nicht stehen geblieben.

#### 3.2.1 Aufnahme von Messbildern

Zunächst der entscheidende Unterschied zu allen oben vorgestellten Alternativen: Bei diesem Verfahren findet die eigentliche Vermessung in Bildern statt, in der Regel sind mehrere sich überlappende Aufnahmen notwendig. Die Vermessung ist an kein Gerät auf einem Stativ gebunden. Das ermöglicht überhaupt erst die Erfassung hoher Bauwerke, von Kirchtürmen bzw. allen sonst nicht erreichbaren Fassaden. Die frontale Sicht auf die Bauteile, Maßwerke, Schäden etc. und daraus resultierende sichere Auswertung der Formen und Befunde ohne Verdeckungen ist der entscheidende Vorteil. Dazu gibt es die verschiedensten Möglichkeiten, wie die Nutzung aller möglichen Arbeitsbühnen bis hin zu Helikoptern (Abb. 9, 10).



**Abb. 9** Einsatz einer 88-m-Arbeitsbühne am Nikolaikirchturm in Hamburg



**Abb. 10** Für den oberen Teil der 147 Meter hohen Turmspitze wurde ein Helikopter eingesetzt.

In speziellen Fällen bieten sich ferngesteuerte Fluggeräte als Kameraträger an. In Anbetracht der Reichweite, Windanfälligkeit und Akku-Kapazität ist es aber unwahrscheinlich, damit wirklich große Bauwerke zu befliegen (Abb. 11).

### 3.2.2 Klassische Auswerteverfahren

Weitverbreitet (da einfach) sind entzerrte Messbilder. Für viele stellt das bereits die Photogrammetrie an sich dar. Die Entzerrung schräg aufgenommener Fotos (und deshalb mit sichtbar stürzenden Linien) verändert jedoch nicht deren zentralperspektivische Abbildung. Diese wird durch Umlappungen zum Beispiel des vorstehenden Traufsimes sichtbar. Damit ist das Ergebnis nur eingeschränkt als maßstabsgetreue Abbildung nutzbar. Das macht dann die Montage benachbarter Bilder zu Bildplänen zu einem aufwendigen Vorgang. Eine orthogonale fotografische Projektion (True-Orthofoto) und damit wirklich in allen Teilen maßstabsgetreue Abbildung würde eine exakte 3D-Oberfläche als Ergebnis einer Vermessung voraussetzen. Dazu mehr im nächsten Abschnitt.

Weniger bekannt, aber seit Jahrzehnten Praxis, ist die Stereophotogrammetrie. Als Beispiel die oben gezeigten Ergebnisse vom Bremer Dom und Freiburger Münster. Es verwundert schon, dass jetzt die 3D-Vermessung mittels Laser-scanner entdeckt wird. Handelt es sich doch bei der Stereophotogrammetrie um eine dreidimensionale Vermessung (photogrammetrisch natürlich in Bildern) und dazu mit den gerade geschilderten Vorteilen: der Erreichbarkeit von Plattformen aus. Die Vermessung geschieht in einem (virtuellen) 3D-Modell, das sich dem Betrachter einer Stereoaufnahme ergibt. Dazu sind zwei annähernd parallele Aufnahmen erforderlich und ein Betrachtungssystem, das diese Bildtrennung ermöglicht. Das 3D-Modell ist da – einfach und ohne Umwege durch die Aufnahme von zwei Bildern – und kann sofort ausgemessen werden. Punkte, Punktraster, 3D-Linien mit einem sehr dichten Punktabstand, speziell auch horizontale oder vertikale Profillinien, werden mit einer außerordentlich hohen Geschwindigkeit »abgefahren«.



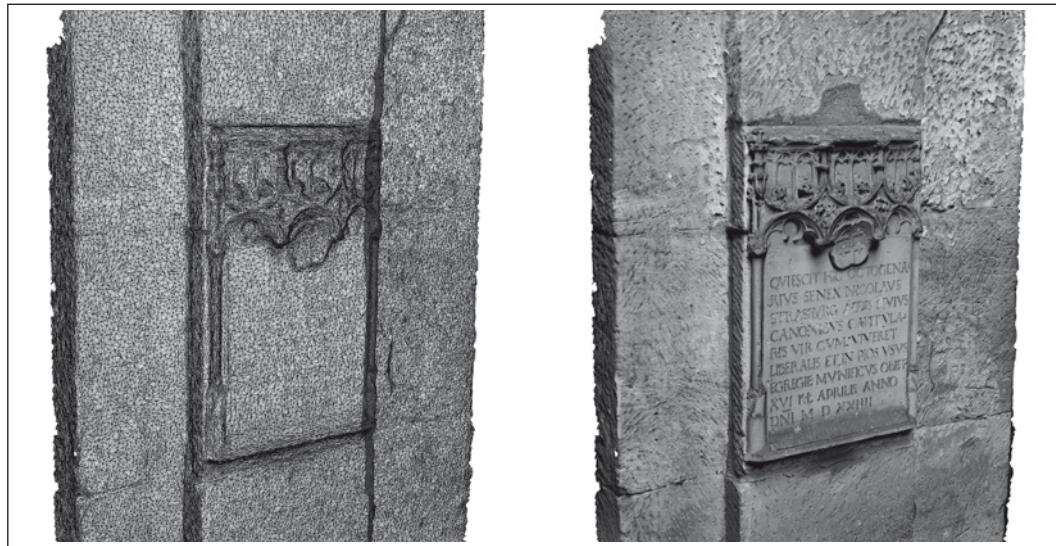
**Abb. 11**  
Drohne als Kameraträger am  
Drususstein in Mainz

Wie jede Umsetzung von Vermessungen in Zeichnungen, ist auch hier die Bauaufnahme schon selbst eine Interpretation der wesentlichen Formen und Befunde und stellt in gewissem Sinne bereits einen Erkenntnisgewinn durch die Verwendung entsprechender Zeichenschlüssel und Selektierungen dar.

### 3.2.3 Structure-from-Motion (SfM)

Als bereits angekündigte Neuigkeit soll hier noch ein spezielles Verfahren vorgestellt werden, das mit dem Begriff Structure-from-motion bezeichnet wird. Vielleicht bürgert sich noch eine besser verständliche Bezeichnung ein. Als Alternative zu 3D-Scannern könnte diese neue Technologie zum Einsatz kommen, bei der aus digitalen Bildern das fotografierte Objekt dreidimensional rekonstruiert werden kann. Das einzige Aufnahmegerät ist die Digitalkamera – preiswert im Vergleich zu den 3D-Scannern – und verwendbar ohne Stativ, eben von den genannten Aufnahmeplattformen aus. Dieses Verfahren ist erst durch die Leistungsfähigkeit der heutigen Computertechnik möglich geworden. Parallelentwicklungen in der Photogrammetrie (Bildmessung) und im Bereich Computer Vision (maschinelle Wahrnehmung von Bildinhalten) haben diese Technik möglich und anwenderrelevant gemacht.

Das Prinzip ist in der Theorie relativ simpel. Aus verschiedenen Bildern werden Merkmale extrahiert, also Bildpunkte beziehungsweise Punktpaare, die in den jeweils anderen Bildern ebenfalls vorkommen. Eine große Überlappung der einzelnen Aufnahmen sollte daher gewährleistet sein, aber auch eine gleichbleibende Belichtungseinstellung und Beleuchtung. Daraus werden Position und Ausrichtung der einzelnen Aufnahmen zueinander berechnet. Es entsteht eine Punktewolke in der Dichte der Auflösung der Originalaufnahmen (Pixelgröße). Damit ist das Ergebnis ausschließlich von der Aufnahmedisposition und den verwendeten



**Abb. 12** 3D-Bild eines Epitaphs in hoher Auflösung, links das vermaschte 3D-Oberflächenmodell, rechts das texturierte 3D-Modell, verwendet wurden 9 Digitalaufnahmen.

Objektiven abhängig. Dieses Verfahren ist also äußerst flexibel auf die verschiedensten Bedingungen anwendbar. Die Berechnung der 3D-Oberfläche aus der Punktwolke und der Textur erfolgt automatisch. Die ersten Ergebnisse sind sehr vielversprechend. Die Darstellungsgenauigkeit (Schärfe von Architekturkanten) ist die der Pixelauflösung der Kamera (Abb. 12).

Die Anwendungen gehen in zwei Richtungen. Einerseits kann die so ermittelte 3D-Oberfläche für zeichnerische Auswertungen wie Kartierungen verwendet werden wie eine mit dem 3D-Scannerverfahren erzeugte Oberfläche, andererseits können daraus, aus der texturierten Oberfläche, Orthofotos berechnet werden. Diese weisen im Vergleich zu üblichen Bildplänen hinsichtlich Genauigkeit und Vollständigkeit eine weitaus höhere Qualität auf. Es handelt sich um True-Orthofotos ohne Umklappungen. Vielleicht bürgert sich in Gegenüberstellung zu den 3D-Scannern für diese Technologie der Begriff Foto-Scanner ein. Die wirtschaftlichen Vorteile liegen auf der Hand. Die Investitionen liegen hier nur in den notwendigen Hochleistungsrechnern und der automatisierten Bildverarbeitung und Berechnung der 3D-Oberflächen und Orthofotos. Trotzdem muss auch hier angemerkt werden: Es handelt sich nicht um »Photogrammetrie für jedermann«.

## 4 Qualitätssicherung

In jedem konkreten Projekt muss neu entschieden werden, welche Technologie zum Einsatz kommt. Einiges wird sich auf Grund der örtlichen Bedingungen ausschließen, ansonsten spielen wirtschaftliche Überlegungen eine Rolle. Nicht selten ist eine Kombination verschiedener Verfahren die beste Lösung. Mit der bisherigen Diskussion wurde vielleicht deutlich, dass ein bestimmtes Ergebnis für ein konkretes Objekt nicht einfach dem Zufall überlassen werden kann. Die Frage »Was kostet die Vermessung dieser Kirche?« ist leider Alltag. Damit werden zwar billige Angebote provoziert. Ob die angebotene Leistung aber den erwarteten Nutzen bringt, darf sehr bezweifelt werden. Auch kleine Projekte kosten Geld und das muss sinnvoll ausgegeben werden.

Werden Dienstleistungsfirmen mit Bauaufnahmen beauftragt, sollte unbedingt ein konkretes, auf die spezielle Aufgabe bezogenes Vermessungskonzept bzw. Pflichtenheft erstellt werden. Dafür gibt es auch sehr gute Beispiele wie zuletzt für den Dom in Fulda und die Porta Nigra in Trier. Neben der Auswahl der richtigen Partner anhand der personellen und technischen Voraussetzungen ist ein schriftlich festgelegtes Vermessungskonzept für die Sicherung der Qualität unabdingbar. Es vermeidet Nacharbeiten, Zeitverzug, Mehraufwand und Streit. Zum Abschluss dazu einige Anregungen:

1. Verwendungszweck: klar definieren, mit welchen Ziel die Vermessung erfolgt, z. B. für bauhistorische Forschungen, als Kartierungsgrundlage, für Werk- und Sanierungsplanung oder statische Gutachten

2. Inhaltliche Anforderungen: Detaillierte inhaltliche Anforderungen beschreiben die Qualität der benötigten Informationen: z. B. Erfassen aller sichtbaren Teile/Freilegungen, Baukanten und Öffnungen, Architekturformen, Skulpturen und Ornamente, Werksteine mit Fugen, Ausstattungselemente, Oberflächen, Materialangaben, Zustand, Schäden, Verformungen, Detailierungsgrad/Tiefe der Darstellung = Detailauflösung
3. Technische Produkteigenschaften: Zeichnungen, Bildpläne, analog/digital, 2D/3D, CAD-Struktur, Ausgabemedium und -maßstab, Archivierung
4. Objektbedingungen: Sicherheitskonzept, Einsatz von Gerüsten, Arbeitsbühnen, Ausleuchtung, Bewuchs
5. Technologische Rahmenbedingungen: Grundlagenmessung und dauerhafte Vermarkung von Festpunkten, Notwendigkeit für den Einsatz einer speziellen Messmethode, Dichte der Messpunkte, Aufnahmedisposition für Messbilder/Scans, Bild- bzw. Scanauflösung, Auflösung [dpi] im Ausgabemaßstab, Messgenauigkeit, sollen die Messung und das Auftragen/Zeichnen zwecks genauerer Beobachtung am Objekt erfolgen?

Es ist möglich und sinnvoll, das Leistungsverzeichnis in diesem Sinn entsprechend der konkreten Aufgabe genau zu definieren. Auf jeden Fall sind diese Kriterien im Einzelnen kontrollierbar, entsprechende Nachweise müssen zur Abnahme vorgelegt werden. Nur auf dieser Basis sind reale Kostenvergleiche möglich und es kann die wirtschaftlichste Vorgehensweise gesichert werden. Das und der weitere Ablauf wäre schon das nächste Thema, »Projektsteuerung in der Denkmalpflege«.

## **Abbildungsnachweis**

Abb. 1, 2, 4–13: MESSBILDSTELLE Dresden

Abb. 3: Freiburger Münsterbauhütte, Christian Leuschner, 2005



Gabriele Patitz

## **ZERSTÖRUNGSFREIE UNTERSUCHUNGEN AN BAUTEILEN AUS ALTEM MAUERWERK – BEISPIELE AUS DER PRAXIS**

### **1 Einleitung**

Der Umgang mit alter Bausubstanz, denkmalgeschützt oder nicht, erfordert eine durchdachte und interdisziplinäre Herangehensweise erfahrener Fachleute. Je mehr Informationen über den Bestand erfasst werden, desto effizienter und kostengünstiger können Erhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen geplant und ausgeführt werden. Veränderungen und Eingriffe lassen sich auf das wirklich nur Notwendige beschränken und zielgerichtet planen. Besonders bei denkmalgeschützten Objekten ist es wichtig, durch möglichst geringe Eingriffe in den Bestand Substanz und Erscheinungsbild als Geschichtszeugnis weitgehend unverändert zu erhalten.

Dazu sind gründliche und ausreichende Voruntersuchungen erforderlich. Üblicherweise erfolgen zunächst ein Aktenstudium, eine Bauaufnahme bzw. die Erstellung von Planunterlagen, visuelle Begutachtungen und Schadenserfassungen am Bauwerk. Die so gewonnenen Erkenntnisse bleiben meistens auf die Oberflächen bezogen. Rückschlüsse auf den Zustand im Bauteilinneren und die dort vorhandenen Materialien oder Gefüge lassen sich nur schwer herleiten. Abhilfe können Bauteilöffnungen in Form von Kernbohrungen, Schürfen oder Entnahme ganzer Mauersteine schaffen. Diese Eingriffe sind stets nur lokal möglich, sind zerstörend und die Erkenntnisse können nicht einfach auf andere Bereiche übertragen werden.

Seit etwa 15 Jahren kann jedoch mit sowohl großflächig als auch punktuell einsetzbaren indirekten Erkundungsverfahren aus der Geophysik Abhilfe geschaffen werden. In der Praxis haben sich die Verfahren Radar und Ultraschall

bzw. Mikroseismik für Untersuchungen an Mauerwerk, Natursteinen, Beton und Mischkonstruktionen etabliert. Damit werden zunächst physikalische Größen wie beispielsweise Wellengeschwindigkeiten, Reflexionsverhalten und Absorption in einem Bauteil erfasst. Diese Informationen müssen dann für die bauspezifischen Anforderungen interpretiert und bewertet werden. Dazu ist unbedingt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von erfahrenen Spezialisten aus dem Bauwesen und der Geophysik erforderlich. Langjährige Erfahrungen an verschiedenen Bauwerken und Baumaterialien sind die Basis für den erfolgreichen Einsatz dieser Technik. Anhand von aktuellen Beispielen soll im Folgenden deren Anwendung vorgestellt werden.

## **2 Aspekte zum erfolgreichen Einsatz zerstörungsfreier Untersuchungsverfahren**

Es kann keine Standardlösungen für den Einsatz zerstörungsfreier Erkundungsverfahren im Bauwesen geben. Bei jedem Bauwerk oder Bauteil müssen immer wieder die speziellen Randbedingungen und örtlichen Gegebenheiten analysiert und bewertet werden. Vor jedem Einsatz dieser Technik muss ein objektbezogenes Untersuchungskonzept erarbeitet werden. Dabei sind in Absprache mit dem Auftraggeber oder Planer die Erkundungsziele bzw. die offenen Fragen, die örtlichen Gegebenheiten und die Erfolgschancen realistisch abzuklären. Der zu erwartende Kostenrahmen ist ebenfalls unbedingt mit zu berücksichtigen. Bereits vorliegende Erkenntnisse, Bauaufnahmen, Gutachten und andere aussagekräftige Unterlagen sollten zur Verfügung gestellt werden, um den Untersuchungsaufwand, die zu erwartende Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse bereits im Planungsstadium solide abschätzen zu können.

Nicht alle Fragestellungen können zuverlässig mit zerstörungsfreien Verfahren bearbeitet werden. Hier liegt es in der Verantwortung der Spezialisten, die diese Technik einsetzen, die Erfolgschancen und Grenzen realistisch zu beurteilen.

Die Größe der Untersuchungsflächen und das zu wählende Messraster richten sich nach der Fragestellung, spiegeln sich aber direkt im Untersuchungsaufwand und den Kosten wieder. Hier ist es besonders wichtig, dass der in der Regel mit diesen Methoden unerfahrene Bauherr oder Architekt und Planer eine gute Beratung durch die ausführenden Firmen erhält. Beim Messkonzept müssen der Untersuchungsaufwand und die Untersuchungskosten in einem vertretbaren Verhältnis stehen. So kann es durchaus vertretbar sein, dass schadhafte Bauenteile nicht vollflächig, sondern nur wichtige aber typische Bereiche exemplarisch bearbeitet werden.

Eine erste Plausibilitäts- und Erfolgskontrolle der Messdaten sollte immer bereits vor Ort erfolgen. Die wirklich vorhandenen Messbedingungen zeichnen sich erst am Objekt ab und es sollte dann immer die Möglichkeit bestehen, die Geräte oder das Messkonzept ggf. noch zu verändern oder anzupassen. Auch ein

Abbruch nicht Erfolg versprechender Untersuchungen muss in Betracht gezogen werden können.

Vorhandene Planunterlagen oder technische Gutachten sollten nicht nur für die Vorbereitung der Messungen, sondern auch für die Auswertung, Interpretation und Dokumentation der Messdaten heran gezogen werden. Die Untersuchungsergebnisse sind in Ansichtspläne oder Schnitte übersichtlich einzutragen und zu bewerten. Die gefundenen Strukturen müssen anschaulich in Position, Größe und Ausbreitung bildlich dargestellt und in Bezug zu bereits vorhandenen Informationen gesetzt werden. Des Weiteren muss angegeben werden, wie zuverlässig und genau die Interpretation ist. Unsicherheiten und die Grenzen der Genauigkeiten müssen immer erwähnt und bewertet werden, ebenso mögliche Fehlerquellen und deren Ursachen sowie Beeinträchtigungen der Messdatenqualität.

Als Endergebnis sollte ein Gutachten vorliegen, das für andere Fachingenieure und Spezialisten verständliche und sofort weiter nutzbare Informationen enthält [1, 2].

### 3 Das Radarverfahren

In den meisten Fällen wird für zerstörungsfreie Erkundungen im Bauwesen das Radarverfahren eingesetzt. Zur gängigsten Messanordnung gehört die Reflexionsanordnung, da hier die Bauteile nur von einer Seite zugänglich sein müssen. Prinzipiell bestimmt die Zugänglichkeit den Messfortschritt. Eine sehr schnelle Datenaufnahme erfolgt dann, wenn mittels eines Hubsteigers an der Bauwerksoberfläche entlang gefahren werden kann. Üblicherweise erfolgen die Untersuchungen über unterschiedliche Gerüste oder auch mit Hilfe von Abseilkonstruktionen (Abb. 1, 2) [1, 2].

Mit unterschiedlich leistungsfähigen Sensoren werden elektromagnetische Wellen in ein Bauteil eingebracht.



Abb. 1 Sensor an einem Brückenbogen



Abb. 2 Sensor wird an einer Stützwand abgesetzt

Die elektromagnetischen Wellen breiten sich im Baustoff und Bauteil nach den Gesetzen der Optik aus. Beim Übergang von einem Material in ein anderes mit abweichenden elektrischen Eigenschaften wird ein Teil der einfallenden Wellen gebrochen, während der verbleibende Anteil an der Grenzfläche reflektiert wird. Der Kontrast der Dielektrizitätszahlen sowie die Leitfähigkeit benachbarter Materialien bestimmen im Wesentlichen das Reflexionsvermögen der Trennflächen. An metallischen Stoffen kommt es zur Totalreflexion. Diese Reflexionen werden an der Bauteiloberfläche aufgenommen, registriert und später interpretiert. Entscheidend für die Reichweite und Eindringtiefe ist die Leitfähigkeit der Baumaterialien. Eine hohe Leitfähigkeit wird von gelösten Salzen verursacht, was eine hohe Absorption bewirkt und somit zu einer starken Reduzierung der Eindringtiefe führt. Untersuchungen zum konstruktiven Aufbau sind in stark versalzten Abschnitten nicht möglich.

## 4 Anwendungsbeispiele aus der Praxis

In den folgenden Abschnitten werden einige kommerzielle Anwendungsbeispiele an Mauerwerk vorgestellt. Die hier beschriebenen Untersuchungen an den Objekten sind nicht vollständig. Im Mittelpunkt steht die Vorstellung des Verfahrens zur Beantwortung typischer Fragestellungen.

Diese Projekte wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen der Autorin als spezialisierter Bauingenieurin und den Geophysikern der GGU Gesellschaft für Geophysikalische Untersuchungen mbH Karlsruhe durchgeführt. Beide können auf jahrelange Erfahrungen aus der Forschung und Praxis zurückgreifen.

### 4.1 Untersuchungen zum Mauerwerksaufbau mit Radar

An der Westfassade des Turmmauerwerkes waren Risse und zahlreiche gerissene und ausgebrochene Fugen vorhanden. Weiterhin lagen Hinweise auf Hohlräume im Mauergefüge vor.



**Abb. 3**  
Süd-West Ansicht des Kirchturmes

Anhand einer visuellen Bestandserfassung und einiger weniger Bohrungen wurde festgestellt, dass es sich vermutlich um ein mehrschaliges Mauerwerk handelt. Die äußere Wandschale besteht aus einem unverputzten, sehr ebenen, in unregelmäßigen und regelmäßigen Verband hergestellten Natursteinquadermauerwerk. Oberhalb der beiden Schallfenster ist ein Mauerwerk aus unbearbeiteten oder wenig bearbeiteten und ungleichförmigen Bruchsteinen vorhanden. Die Fugen sind hier deutlich dicker und ungleichmäßiger (Abb. 3). Die Steine sind sehr vielfältig und es wurden Sandsteine, Muschelschalen führende löchrige Kalksteine sowie grauer, dichter Muschelkalk verwendet. Die Gesamtwanddicken sind geschossweise unterschiedlich. Sie betragen im Erdgeschoss ca. 1,90–1,70 m, im 4. Obergeschoss nur noch ca. 0,90 m.

Es wurde vermutet, dass sich die äußere Wandschale an der Westfassade vom Mauerkern gelöst hat. Zunächst war geplant, mittels vollflächiger Vernadelung und Verpressungen wieder ein kompaktes Mauerwerk zu erzielen. Das hätte bedeutet, dass Kernbohrungen mit Durchmesser 50 mm in einem Raster von 50 cm x 50 cm eingebracht werden müssen. Diese vollflächige Vernadelung hätte für das Bauwerk einen enormen Eingriff einhergehend mit großen baustofflichen Veränderungen bedeutet.

Der Bauherr entschied sich deshalb für weitere Voruntersuchungen mit zerstörungsfreien Verfahren. Mit dieser Technik war zu erkunden, ob sich diese Außenschale tatsächlich und vollflächig vom Kern abgelöst hat. Weiterhin musste nach Gefügestörungen und Hohlräumen in der Innenfüllung gesucht werden. Anhand dieser Erkenntnisse sollte dann die Anzahl der notwendigen Nadeln und deren Position optimiert und an den Bestand angepasst werden.

#### Die Radaruntersuchungen

Mit einem 900 MHz Sensor konnte die gewünschte Eindringtiefe von ca. 1,0 m mit ausreichendem Auflösungsvermögen erzielt werden. Mit Hilfe eines sehr



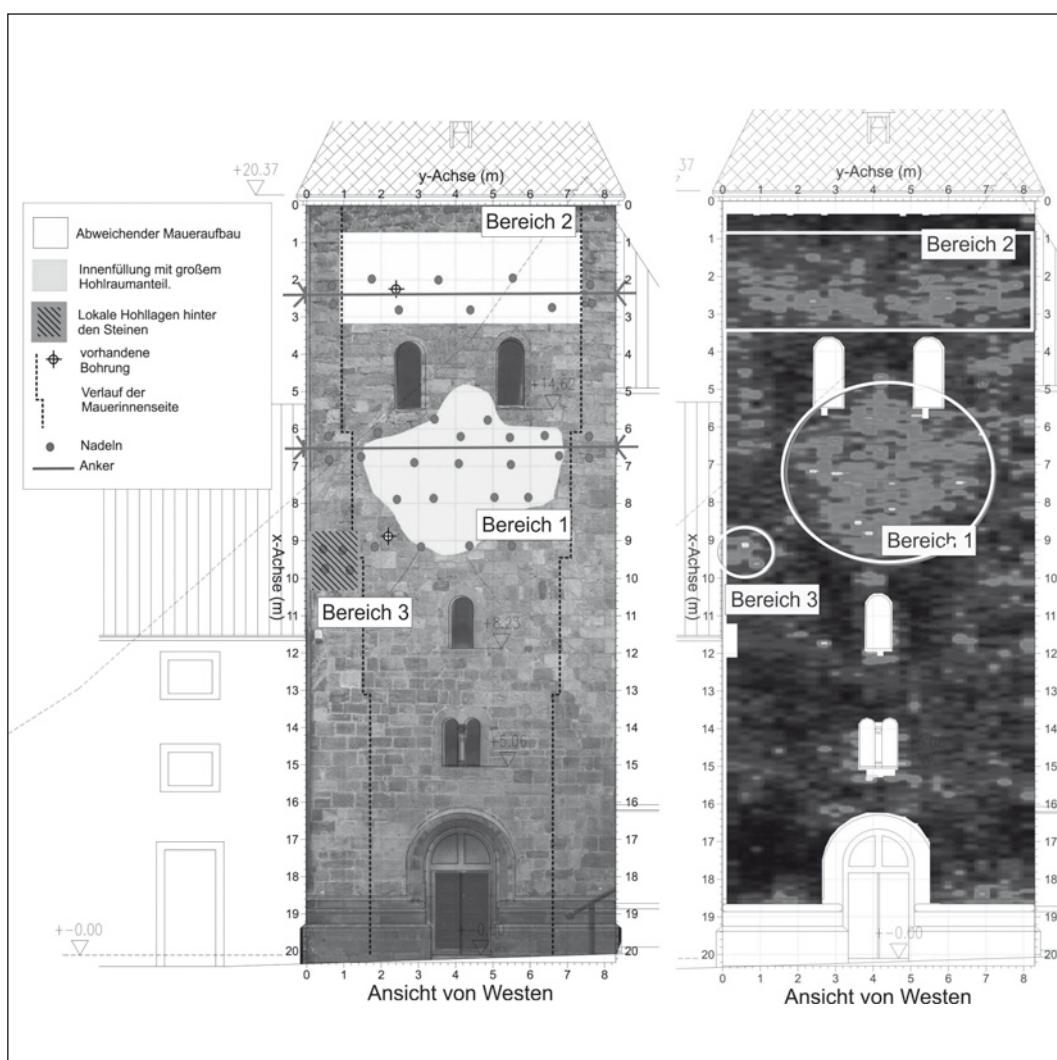
**Abb. 4**  
900 MHz Sensor für die  
Untersuchungen zum Wandaufbau

leistungsfähigen Hubsteigern wurde die Westwand in ca. 4 Stunden vollflächig vertikal abgefahren (Abb. 4).

### Ergebnis- und Datenbeispiele

Abbildung 5 zeigt die Reflexionen aus dem Wandinneren in einer Tiefe von ca. 20 bis 70 cm, was der Fuge zwischen Außenwand und Innenfüllung entspricht. Starke Reflexionen, verursacht durch den Kontrast zwischen Luft und Naturstein/Mörtel, zeichnen sich durch eine helle Farbgebung ab. Die dunklen Bereiche können als homogen und kompakt bewertet werden.

An der Fassadenseite West sind neben zahlreichen kleinen Stellen zwei Bereiche größerer Ausdehnung auffallend (Abb. 5, rechte Abbildung). Diese werden wie folgt interpretiert und bewertet:



**Abb. 5** Radarergebnisse an der Westfassade in einer Tiefe von ca. 20 bis 70 cm (Bereich der Innenfüllung). Die hellen und umrissenen Bereiche weisen auf ein hohlräumreiches Gefüge der Innenfüllung hin. Anhand dieses Befundes erfolgte die Anordnung von Ankern und Spaltzugnadeln.

Bereich 1 unterhalb der beiden Schallfenster:

Ursache für die sehr starken und streuenden Reflexionen können zum Einen bauliche Veränderungen wie Wechsel im Material, in der Zusammensetzung und in der Konstruktion sein. Zum Anderen kann die Ursache in einem vergleichsweise inhomogenen und hohlraumreichen Gefüge der Innenfüllung liegen.

Da keine ausreichenden Hinweise auf bauliche Veränderungen vorliegen, muss in diesem Bereich von einer Innenfüllung sehr schlechter Qualität mit zahlreichen kleinen Hohlstellen, kleinen Steinen und größeren Mörtelbatzen ausgegangen werden.

Hinweise auf eine großflächige Schalenablösung bzw. einen Spalt im Mauerwerk zeigten sich in den Radardaten nicht.

Bereich 2 zwischen Unterkante Dach und Oberkante der beiden Schallfenster:  
Auch hier sind im Tiefenbereich von ca. 20 bis 70 cm starke Reflexionen vorhanden. Dies muss im Zusammenhang und im Vergleich mit den Radardaten und der baulichen Situation an der Südfront in gleicher Höhe bewertet werden.  
Die Ausführung des Mauerwerkes an der Westseite unterscheidet sich qualitativ deutlich von allen anderen Mauerwerksbereichen. Das Mauerwerk zwischen den Randquadern besteht aus Bruchsteinen. Der Mörtelanteil ist sehr hoch, die Lager- und Stoßfugen sind ungleichmäßig und sehr breit. Vermutlich wird dieses Mauerwerk im Inneren zahlreiche größere vermörtelte Zwickel und/oder kleine Hohlräume aufweisen. Diese verursachen die starken Reflexionen in den Radardaten. Aufgrund der hohen Transparenz des Mauerwerks (weitgehend trocken und ohne Salzbelastung) werden die elektromagnetischen Wellen an den sehr zahlreichen Materialgrenzen gebrochen und reflektiert. Es zeichnen sich die Einbindetiefen der äußeren Steine von ca. 25 bis 35 cm gut ab. Ein schalenartiger Wandaufbau ist aufgrund der starken diffusen Reflexionen nicht mehr zu erkennen. Ob dieser Bereich handwerklich mehrschichtig gebaut wurde, muss bei Betrachtung der verwendeten Steine, der Ausführungsqualität und den Radardaten in Frage gestellt werden.

An der Westfront sind zahlreiche kleinere Stellen mit starken Reflexionen vorhanden, welche aber als unbedenklich beurteilt werden können. Sie treten nur lokal auf, besonders an den nord- und südseitigen Rändern der Fassade und bei den Fenstereinfassungen. Ursächlich sind Reflexionen an den Steinrückseiten und ggf. lokale Hohlstellen in der rückwärtigen Stoßfuge der tiefer einbindenden Randeinfassungssteine. Das ist bautypisch, dem Alter geschuldet und für die Standsicherheit der Fassade unbedenklich. Nur im Bereich 3 zwischen 9 m und 10 m Höhe an der Nordkante wurden 4 zusätzliche Nadeln gesetzt (Abb. 5).

Das zunächst geplante Instandsetzungskonzept wurde aufgrund der vorliegenden Radarergebnisse geändert. Die Eingriffe in das Bauwerk wurden reduziert und der Bauherr konnte Kosten im Rahmen von ca. 20 % einsparen [2].

## 4.2 Untersuchungen zur Bestimmung von Steineinbindetiefen

Zur Bestimmung von Steineinbindetiefen bei unverputztem Mauerwerk wird mit einem hochauflösenden Sensor mittig entlang der Steinreihen gefahren. Bei verputztem Mauerwerk muss in einem engen horizontalen Messraster untersucht werden. Die Rückseiten der Steine können bei ausreichendem Materialkontrast aufgrund typischer Reflexionen anhand des Materialwechsels Stein – Innenfüllung zuverlässig erkannt und angegeben werden. Ein Datenbeispiel ist in Abbildung 6 links zu sehen. Hier sollte bei einem Wehrpfeiler erkundet werden, ob sich Hohllagen zwischen der Vorsatzschale aus Naturstein und dem Kernbeton ausgebildet haben (Abb. 7). Anhand der Stärke der Reflexionen an der Grenzschicht Naturstein – Beton können Rückschlüsse über Hohllagen gezogen werden. In Abbildung 6 rechts sind je Stein die Einbindetiefen eingetragen. Nur bei den grau markierten Steinen besteht der Verdacht auf Hohllagen.

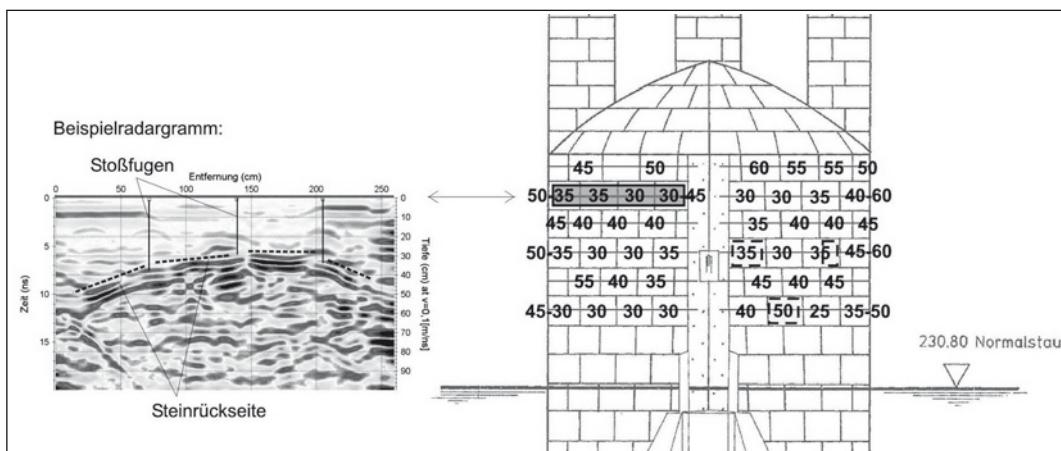


Abb. 6 Im Radargramm können die Einbindetiefen der einzelnen Steine anhand typischer Reflexionen zuverlässig erfasst und in Ansichtspläne übernommen werden.



Abb. 7  
Beispiel eines mit Naturstein verkleideten Wehrpfeilers

### 4.3 Untersuchungen an einer Stützwand

Diese ca. 70 m lange Stützwand besteht größtenteils aus unverputzten Natursteinen und weist teilweise starken Bewuchs auf (Abb. 8). Die Wanddicke beträgt am Kopf ca. 50 cm und ist am Wandfuss nicht bekannt. Die Höhe variiert zwischen 1,70 m bis 3,90 m.

Bei genauerem Betrachten fallen Unterschiede im Mauerverband, im verwendeten Material und im Schadensbild auf. In großen Bereichen sind die Natursteine als Mauersteine formgerecht in handlicher Größe bearbeitet und größtenteils in einem Verband angeordnet. Die Fugen sind bereits mit verschiedenen Mörteln überarbeitet worden. An anderen Stellen ist ein sehr inhomogenes Mauerwerk vorhanden. Es wurden verschiedene Sandsteine, Kalksteine und Ziegelreste vermauert. Die Steine sind kaum bearbeitet, ein Mauerverband lässt sich nicht erkennen. Der Mörtelanteil ist sehr hoch und die Qualität sehr unterschiedlich. Die Natursteine und die Ziegel weisen Frostschäden auf. Weiterhin sind lokal starke Ausbauchungen, Steinverschiebungen und Risse erkennbar. Die Risse sind teilweise offen und scharfkantig, was auf eine eher in jüngerer Vergangenheit erfolgte Verschiebung schließen lässt.

Ziel der zerstörungsfreien Untersuchungen war es, Aussagen zum Zustand der Wand zu treffen. Es sollte untersucht werden, ob im Inneren Hohlräume vorhanden sind. Insbesondere in den Bereichen mit bereits vorhandenen Ausbauchungen sollte nach evtl. vorhandenen Ablösungen und Hohlstellen gesucht werden. Zudem sollten Fragen nach einer Mehrschaligkeit, der Schalendicke und dem Zustand der Innenfüllung beantwortet werden. Des Weiteren sollten an einigen Stellen für den Standsicherheitsnachweis die Wanddicken ermittelt werden.



**Abb. 8**  
Teilansicht der denkmalgeschützten Stützwand

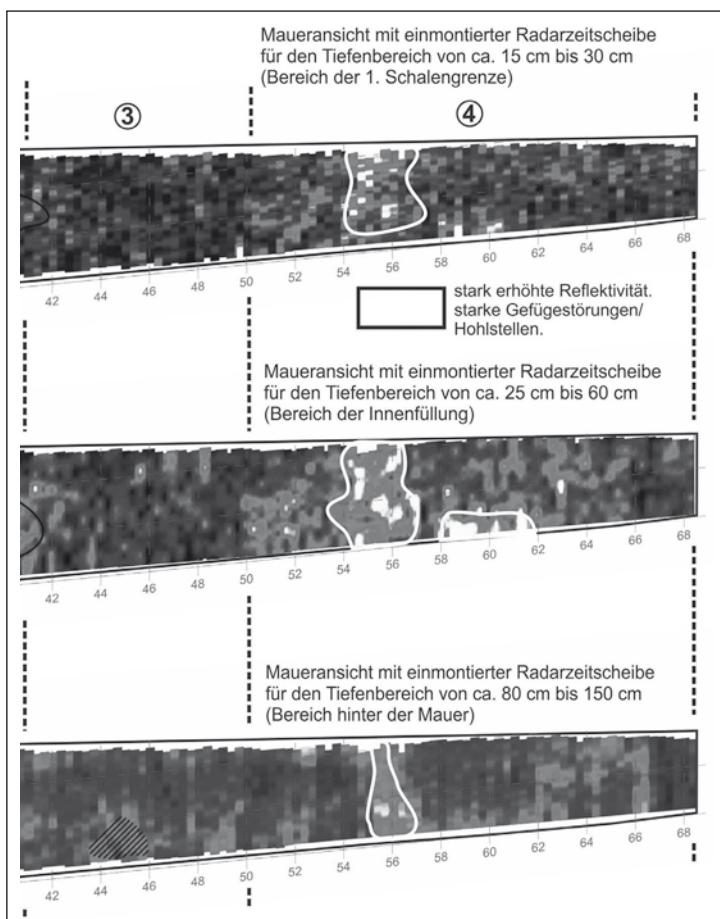
Die Ergebnisse sollten als Entscheidungsgrundlage dienen, ob diese Stützwand weiterhin standfest ist, abgerissen und neu aufgebaut werden muss, oder eine Generalsanierung erforderlich ist.

### Die Radaruntersuchungen

Zunächst wurde die Wand mit einem 900 MHz Sensor weitgehend vollflächig abgefahrene. Ergänzend wurde dann der tiefer frequente 400 MHz Sensor eingesetzt, um größere Bauteiltiefen zu erreichen und die Wanddicken zu bestimmen. Aufgrund der geringen Bauteilhöhe waren keine Hilfsmittel erforderlich.

### Beispielhafte Radarergebnisse

In Abbildung 9 sind für verschiedene Tiefenbereiche der Wand die Radarergebnisse dargestellt. Es handelt sich hier nur um zwei beispielhafte Wandabschnitte. Anhand der hellen Grautöne, verursacht durch Reflexionen, kann gut erkannt werden, dass im Bereich 4 im Umfeld der Ausbauchung von Hohlräumen und Schalenablösungen im Mauerverband ausgegangen werden muss. Der daneben liegende Bereich 3 ist dagegen fast völlig unauffällig. Hier kann ein weitgehend kompakter und ungeschädigter Wandquerschnitt angenommen werden. Bei allen übrigen Mauerabschnitten verhielt es sich ebenso.



**Abb. 9**  
Radarergebnisse in den Wandbereichen 3 und 4 hinter der ersten Mauerschale, im Bereich der Innenfüllung und an der Wandrückseite. Bei den umrissenen Abschnitten handelt es sich um Hohlstellen und Gefügestörungen im Bereich der Innenfüllung und dem anstehenden Erdreich [2].

Den Radardaten konnte entnommen werden, dass der Wandaufbau prinzipiell mehrschalig ist. In einer Tiefe von ca. 20–30 cm befindet sich die Schalengrenze zu einer Innenfüllung. Es gibt bis auf die Ausbauchungsstellen keine Hinweise auf größere Hohlräume o. ä. in der Innenfüllung. Die Wanddickenbestimmung erfolgte anhand einzelner Radargramme. Ist ein deutlicher Materialwechsel von Mauerwerk zu anstehendem Erdreich vorhanden, stellt sich dieser in den Radargrammen als ein guter Reflektor dar und daraus kann die Wanddicke ermittelt werden.

Aufgrund der visuellen Begutachtung und der Radardaten stand ein Abriss der kompletten Wand oder eine Generalsanierung und das Verpressen des Mauerwerks im Zusammenhang mit einer Erdvernagelung nicht mehr zur Diskussion. Die 70 m lange Wand wurde nicht nach einem einheitlichen Instandsetzungskonzept bearbeitet, sondern jeweils angepasst an den vorhandenen Zustand. So wurden nur einige Abschnitte ab- und wiederaufgebaut und in den restlichen Bereichen schadhafte Steine ausgetauscht und das Mauerwerk neu verfugt. Der Bauherr konnte durch diese Herangehensweise nicht nur diese denkmalgeschützte Wand erhalten, sondern auch im Vergleich zu einer Generalsanierung erhebliche Kosten einsparen.

#### 4.4 Untersuchungen zur Salzverteilung im Mauerwerk

Prinzipiell erschwert eine hohe Feuchte- und Salzbelastung Strukturuntersuchungen in den betroffenen Mauerwerksbereichen. Aufgrund gelöster Salze werden die Radarsignale so stark absorbiert, dass keine Aussagen zum Mauerwerksaufbau getroffen werden können. Jedoch zeigen die absorptiven Bereiche wiederum die Stellen mit dem sehr hohen Versalzungsgrad auf.



Abb. 10

Aufnahme der Radardaten an der Bogenunterseite [1]

Abbildung 10 zeigt eine Messwertaufnahme entlang der Untersicht von Bogensteinen. Erwartungsgemäß treten an der Grenzfläche Naturstein – Mauerwerk typische Reflexionen auf, anhand derer die Einbindetiefe der Bogensteine ermittelt werden kann. Wegen der salzbedingten starken Signalabsorptionen ab Oberkante Boden bis in eine Höhe von ca. 2m können bis dahin keine Steineinbindetiefen erfasst werden. Im darüber liegenden Bereich liegt keine Salzbelastung vor und das Mauerwerk ist für das Radar wieder transparenter. Es zeichnen sich Strukturen wie Steinrückseiten als Reflektoren gut ab. So kann zuverlässig erkannt werden, dass die Bogenrandsteine unterschiedlich lang in das angrenzende Mauerwerk einbinden. Die Einbindetiefe beträgt im Wechsel ca. 30 cm und ca. 50 cm, wodurch sich eine Verzahnung zum angrenzenden Mauerwerk ergibt (Abb. 11) [3].

## 5 Zusammenfassung

Der Einsatz des zerstörungsfreien Verfahrens Radar bringt im Rahmen von Voruntersuchungen Klarheit über die vorhandene Bausubstanz. Es können beim Mauerwerk zuverlässig Fragen u. a. nach dem Wandaufbau, nach Bauteilabmessungen, nach verborgenen Hohlräumen, Gewölbeaufbau, Schalenablösungen und Schächten, metallischen Verbindungsmitteln wie Ankern, Dübel, Steinlängen sowie der Verteilung von Feuchte- und Salzhorizonten beantwortet werden.

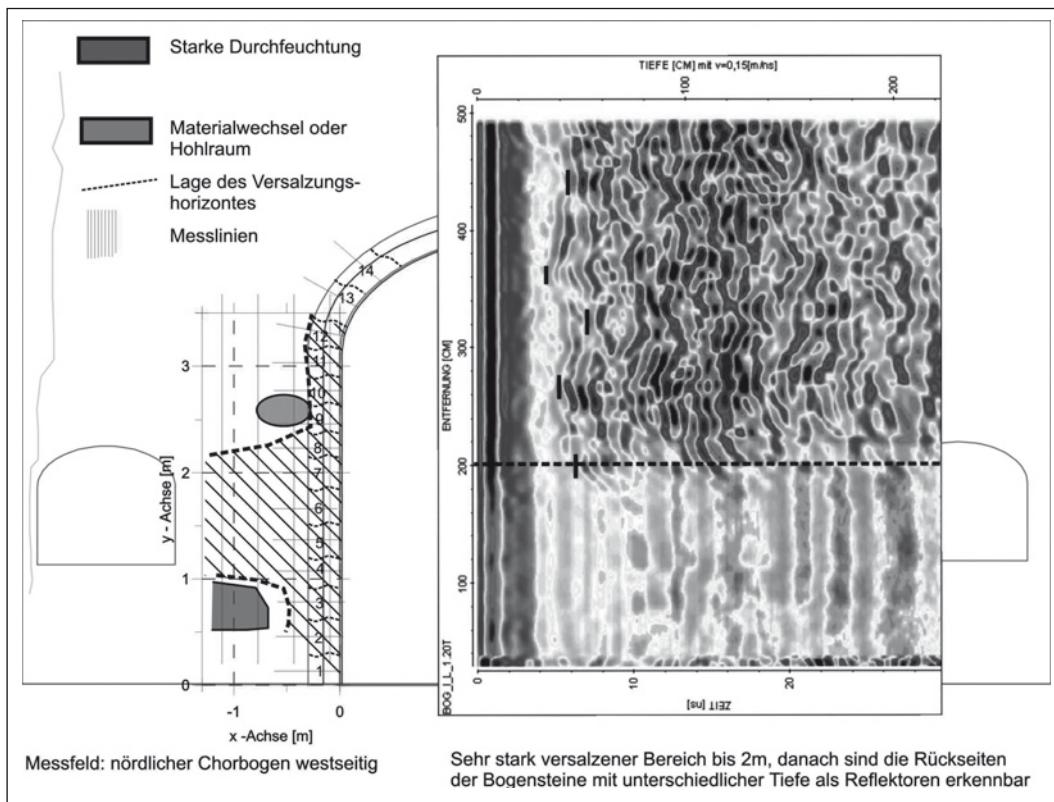


Abb. 11 Radardaten werden aufgrund von Salzen bis in ca. 2 m Bauteihöhe stark absorbiert [1]. Es können keine Aussagen zum Wandaufbau getroffen werden. Darüber ist die Steineinbindetiefe erkennbar.

Bei Betonbauwerken stehen meistens Fragen nach der vorhandenen Bewehrung im Mittelpunkt. Es muss erkundet werden, ob in dem entsprechenden Bauteil Bewehrung ist oder nicht, in welcher Tiefenlage diese liegt und wie der Bewehrungsabstand ist. Weitere wichtige Fragestellungen sind die Bewertung des Betonzustandes, die Suche nach Kiesnestern bzw. Verdichtungsmängeln und die Ortung von Hohllagen bei Vorsatzschalen. Das betrifft die Erfassung des Bestandes im Altbau aber auch die Qualitätskontrolle beim Neubau.

Im Baugrund oder zum Beispiel unter alten Betonplatten in Industriebauten können mit dieser Technik alte Fundamentreste, Hohlräume, Kanäle und Leitungen geortet werden. Insbesondere bei Stützwänden ist für den Standsicherheitsnachweis die Kenntnis der Wanddicken in verschiedenen Höhen wichtig. Weiterhin muss bekannt sein, ob hinter solchen Wänden Ausspülungen, Hohllagen oder ähnliche Inhomogenitäten im anstehenden Erdreich vorhanden sind.

Bei Geschossdecken werden bei Bestandsbauten zerstörungsfrei deren konstruktiver Aufbau und die Lage der Tragelemente erfasst.

Die heute einsetzbaren Verfahren und Techniken sind sehr leistungsfähig und es können große Flächen mit einem vertretbaren Kosten- und Zeitaufwand untersucht werden. Wichtig ist aber dabei der sachkundige Einsatz und eine realistische Abschätzung der Erfolgsaussichten. Ideal ist dafür die interdisziplinäre Zusammenarbeit erfahrener Spezialisten beider Fachgebiete, die Zusammenarbeit von Bauingenieur und Geophysiker [4].

## Literatur

- [1] Patitz, Gabriele: Zerstörungsfreie Untersuchungen an altem Mauerwerk. Berlin, 2010, S. 1–155.
- [2] Patitz, Gabriele: Altes Mauerwerk zerstörungssarm mit Radar und Ultraschall erkunden und bewerten. In: Fouad, Nabil A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2012, Berlin, Jahr, S. 203–245.
- [3] Patitz, Gabriele; Schulz-Lorch, Jürgen., Grassegger, Gabriele; Messmer, Rolf; Walz, Robert; Mayer, Erich: Interdisziplinäre Voruntersuchungen als Basis für die Sanierung der Fronhofer Kirche in Wehingen. In: Venzmer, Helmuth (Hrsg.): Sanierungs-kalender 2008, 3. Jahrgang, Berlin, 2008, S. 149–161.
- [4] Patitz, Gabriele: Mauerwerk und Beton mit Radar und Ultraschall zerstörungsfrei erkunden. In: Geburtig, Gerd; Gänßmantel, Jürgen (Hrsg.): Messtechnik – der Weisheit letzter Schluss?, Stuttgart 2012, S. 83–97.

## Abbildungsnachweis

Abb. 1–4, 7, 8, 10: Gabriele Patitz

Abb. 6: GGU mbH, Karlsruhe

Abb. 5, 9, 11: GGU und Gabriele Patitz



Harald Garrecht

## **KLIMA- UND FEUCHTEMONITORING – ZUSTANDSBEWERTUNG UND BEITRAG ZUR ERHALTUNG VON HISTORISCHER BAUSUBSTANZ**

### **1 Einleitung**

Wertvolle Oberflächen in historischen Bauwerken sind vielfältigen Einwirkungen ausgesetzt, wobei insbesondere raumklimatische Beanspruchungen zu erheblichen Schädigungen führen können [1]. Ursache sind vielfach die sich im Tages- und Jahresverlauf im Nahfeld der Oberfläche einstellenden Klimaschwankungen, die in der Randzone eine Veränderung des Temperatur- und Materialfeuchteefeldes bewirken. Mit einer Änderung der Materialfeuchte verbunden sind Formänderungen infolge von Schwinden oder Quellen, deren wechselnde Abfolge eine allmähliche Materialermüdung bewirkt. Absandungen, Ablösungen, Schalenbildung etc. sind damit einhergehende Folgen. Finden sich gar bauschädliche Salze, kann mit einer Veränderung des Raumklimas auch ein Phasenwechsel der Salze zwischen dem festen und gelösten Zustand einhergehen. Einige Salze können zudem abhängig von den Nahfeldbedingungen unterschiedliche Hydratationsstufen einnehmen. Neben optischen Beeinträchtigungen infolge von Salzausblühungen sind mit der Kristallisation oder mit der Hydratwasseraufnahme auch Volumenvergrößerungen verbunden, die Drücke im Mineralgefüge bewirken können und so eine Schädigung zur Folge haben [2]. Hohe Feuchtelasten verursachen nicht selten auch den Befall durch Organismen, die gleichermaßen Schäden an hölzernen Bauteilen und textilen Bespannungen wie auch an verputzten und bemalten Oberflächen hervorrufen können.

Um die historische Substanz vor weiterer klimabedingter Beanspruchung zu bewahren, müssen folglich all jene Möglichkeiten gesucht werden, mit denen auf denkmalgerechte Weise die Raumluftverhältnisse verbessert werden können. Zu

berücksichtigen ist ferner, dass historische Räume in zunehmendem Maße einer intensiveren Nutzung zugeführt werden sollen. Abhängig von Art und Intensität der angedachten oder praktizierten Raumnutzung stellen sich gerade während der kalten Witterungsperioden und in den darauf folgenden Übergangsperioden größere Beanspruchungen ein, die bei ungünstigen Verhältnissen bis zur Tauwasserbildung auf den wertvollen Oberflächen oder im Gegensatz hierzu zur Austrocknung der Wandmalereien und oberflächennahen Schichten infolge einer zu intensiven Beheizung der historischen Räume führen können.

Gleich welche Ursache der raumluftbedingten Beanspruchung zugrunde liegt sind Untersuchungen erforderlich, um zu prüfen, inwieweit die Raumluftzustände im historischen Gebäude durch denkmalgerechte anlagentechnische Maßnahmen verbessert werden können. Dies setzt aber eine zuverlässige Bewertung der raumklimatischen Verhältnisse und der hieraus resultierenden Beanspruchung der oberflächennahen Wandbereiche voraus. Die Arbeitsgruppe des Verfassers hat in den zurückliegenden Jahren zahlreiche Raumklimaprobleme in nicht, temporär oder intensiv genutzten Denkmalbauten untersucht, um die klimabedingten Lasten an der wertvollen Substanz zu erfassen und zu bewerten. Ziel war es dabei auch, denkmalgerechte Maßnahmen herausarbeiten zu können, mit denen eine Verbesserung der Raumluftsituation kontrolliert realisiert werden kann.

Am Beispiel zweier langjähriger Untersuchungsobjekte, dem Dormentbau der Klosteranlage Maulbronn und dem Kaiser- und Mariendom zu Speyer, werden heutige technische Möglichkeiten aufgezeigt, mit denen die raumklimatischen Verhältnisse messtechnisch erfasst und die Beanspruchung der Bausubstanz sicher bewertet werden können.

In beiden Objekten kam ein für den Einsatz in Denkmalbauten entwickeltes kabel- und funkbasierter Klimamesskonzept zum Einsatz. Die beiden Beispiele sollen zeigen, dass sich raumklimatische Beanspruchungen messtechnisch sicher bewerten lassen und im Falle einer Gefährdung der historischen Substanz durch eine kontrollierte Einflussnahme das Raumklima in denkmalgerechter und kostengünstiger Weise verbessern lässt. So kann mit einem kontrollierten Regelbetrieb von Geräten zur Beheizung oder Kühlung, zur Be- oder Entfeuchtung, zur Belüftung oder durch das geregelte Öffnen und Schließen von Fenstern und Türen die Raumluftsituation optimiert werden. Nicht zuletzt kann so auch die Nutzbarkeit von Räumen verbessert werden, wobei die bedarfsabhängige kontrollierte Ansteuerung der im Raum befindlichen Anlagentechnik als positiver Nebeneffekt auch zu einer erheblichen Reduzierung des Energieaufwandes führt.

## 2 Klimaproblematik im Erdgeschoss des Dormentbaus der Klosteranlage Maulbronn

Die Frateria im Erdgeschoss des Dormentbaus der Klosteranlage Maulbronn weist einen reichhaltigen Befund originaler Malfassungen aus dem 15. Jahrhundert aus. Hier ist es vor allem die Tauwasserproblematik, die in dem unbeheizten Raum über die Jahrhunderte zu einer immer deutlicheren Schädigung der noch erhaltenen Malfassungen führte. Bereits im Zuge der Restaurierungsarbeiten, die Mitte des 20. Jahrhunderts durchgeführt wurden, erkannte man die besondere Problematik der Raumbelüftung. Entsprechend wurde am Mauerfuß der östlichen Außenwand zum davor gelegenen Garten hin an drei Stellen eine Öffnung mit einem Durchmesser von 80 mm gebohrt. Diese sollten einen steten Luftwechsel sichern und so ein hinreichendes Raumklima sicherstellen. Trotzdem konnte der Substanzverlust auch in den darauf folgenden Jahrzehnten nicht gestoppt werden, da sich der gewünschte Luftwechsel nicht einstellte.

Im Zuge umfassender wissenschaftlicher Untersuchungen im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereiches 315 der Universität Karlsruhe »Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke« und umfangreicher restauratorischer Maßnahmen wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit das Ausmaß der Schäden und deren Ursachen erarbeitet, um Konzepte zur Sicherung und Erhaltung der originalen Fassungen zu entwickeln [3].

Gerade in nicht oder nur gering beheizten Räumen kommt der Belüftung während der Winter-, Frühlings- und Frühsommerperioden eine große Bedeutung zu. So wirkt sich ein rascher Luftwechsel über Fenster und Türen in kleineren unbeheizten Räumen hinsichtlich des Tauwasserausfalls stärker aus als in großen. Ob kleiner oder großer Raum, häufige Praxis ist es z. B. in Kirchen, die in der kalten Winterperiode ausgekühlten Räume während der wärmeren Frühlingstage durch das Öffnen von Türen und Fenstern zu erwärmen, indem die Raumtemperatur durch Einlass warmer Außenluftmassen angehoben wird. Dabei verursachen die eintretenden feuchtwarmen Luftmassen auf den noch kalten Bauteiloberflächen zwangsläufig große Tauwasserausfälle, die zu den verschiedenartigsten Schäden an den Putz- und Malfassungen führen können [4].

Da die Erdgeschossräume des Dormentbaus nicht aktiv durch das Öffnen von Fenstern und Türen belüftet werden, stellt sich das Raumklima hier abhängig von den Luftbewegungen über die Undichtheiten der Fenster und Türen des Raumes wie auch über die im Mauersockel zum Garten befindlichen Bohrungen und die über der Tür zum Kreuzgang befindliche Fensterrosette ein. Biogener Bewuchs der Sandsteinbodenplatten wie auch der feuchten Mauersockel belegten aber gleichermaßen wie die muffige Raumluft beim Betreten des Raumes, dass ein ausreichender Luftwechsel hier nicht gegeben ist.

Ziel der mit den Arbeiten des SFB 315 von 1987 betriebenen Untersuchungen war es daher auch, dem fortschreitenden Verlust originaler Putz- und Malfassun-

gen entgegenzutreten. Entsprechend wurden von der Arbeitsgruppe des Verfassers Analysen zum Raumklima und dessen Folgen für die originalen Oberflächen vorgenommen.

In [3] ist ein umfassender Überblick über die damaligen Arbeiten gegeben, die sich vor allem den Problemen der aufsteigenden Feuchte im Gründungsmauerwerk des Dormentbaus widmeten. Als Ergebnis der mehrjährigen Untersuchungen konnten die Wechselwirkung von aufsteigender Feuchte und Raumklima aufgezeigt werden und auch Aussagen zur notwendigen Raumluftkonditionierung getroffen werden, damit dem weiteren Schadensfortschritt entgegnet werden kann. Als konservierende Maßnahme wurde das Sockelmauerwerk mit einem Opferputz versehen, um den weiteren Verlust von originaler Substanz zu vermeiden. Zur Optimierung des Raumklimas wurde in den Folgejahren ein Konzept entwickelt und erprobt, das eine kontrollierte Belüftung sicherstellt, um einerseits die Raumluftverhältnisse in einem akzeptablen Klimakorridor zu stabilisieren und andererseits den mit aufsteigender Feuchte belasteten Wänden eine gewisse Trocknungsmöglichkeit in den oberflächennahen Wandbereichen zu ermöglichen. Doch auch für die Sicherung der in den höher gelegenen Wandabschnitten und Gewölben befindlichen Malfassungen bedarf es einer Verbesserung der Raumluft, da auch hier die erheblichen Schadensbilder auf das ungünstige Raumklima zurückgeführt werden konnten.

Den wichtigsten Bestandteil des entwickelten Konzepts zur Raumluftoptimierung bildet ein rechnergestütztes Klimamonitoring, mit dem nicht nur im Erdgeschoss, im Kreuzgang, im benachbarten Großen Keller und in der Außenluft die vorherrschenden Klimate erfasst werden, sondern zudem auch im Nahfeld der interessierenden Malfassungen, Fenster, Gewände etc. die klimatisch bedingten Beanspruchungen zuverlässig beurteilt werden können, um Fragen der Tauwasserbildung, Salzphasenwechsel, Schwind- und Quellformänderungen in der Oberfläche stetig mittels einer automatisierten Messwerterfassung bewerten zu können, und dann gezielt mittels konditionierter Belüftung einer steten Wechselbeanspruchung, die zur allmählichen Materialermüdung führt, entgegenzuwirken. Erlauben günstige Außenklimaverhältnisse den Raum zur Verbesserung der Raumluftverhältnisse zu belüften, können elektrisch betriebene Lüfter aktiviert werden, solange, wie die minütliche Erfassung und Bewertung der Sensordaten ein erneutes Abschalten erforderlich erachtet. Mit der kontrollierten Raumbelüftung kann auch die oberflächennahe Abtrocknung des Sockelmauerwerks sicher gestellt werden. Bei ungünstiger Witterung hingegen, sobald die Gefahr einer Tauwasserbildung etc. gegeben ist, werden die Lüfter abgeschaltet.

Nach Umsetzung dieser Maßnahme zeigte bereits die Probephase, dass die sich zuvor während der Winter- und Frühlingsmonate optisch auf den feuchten Mauerwerksoberflächen und Sandsteinplatten stets einstellenden feuchten Oberflächen abgesehen einiger weniger, besonders kritischer Tage kaum mehr zu beobachten waren. Auch die Bildung von Algen und die damit einhergehende Vergrünung der feuchten Bodenplatten konnte unterbunden werden. Ferner konnten begleitende

restauratorische Untersuchungen belegen, dass eine Stabilisierung der Raumluftverhältnisse auf Werte um 80 bis 85 % r.F. den weiteren Schadensfortschritt an den Malfassungen unterbinden.

Die zu Erprobungszwecken entwickelte Demonstrationsbelüftungseinrichtung konnte nach Abschluss der erfolgreichen Vorversuche in ein für den Dauerbetrieb geeignetes, neueres Belüftungssystem überführt werden, das in Abbildung 1 aufgezeigt ist. Um die für die Erfassung der Raumluftverhältnisse und Nahfeldbeanspruchungen erforderlichen Sensoren in das Monitoringkonzept zu integrierten wurde in der ersten Erprobungsphase zunächst ein funk- und später ein kabelbasiertes Messsystem eingesetzt, wobei das für den langfristigen Betrieb ausgelegte Monitoringkonzept auf eine störende Kabelführung in der Frateria verzichtet [6]. Zentrales Herz der Messeinrichtung ist ein Leitrechner, von dem die Kommunikationsdatenleitungen zu allen Messwerterfassungseinheiten, die in der Frateria und Geißelkammer im benachbarten Keller und im Kreuzgang aufgestellt sind, führen. Die Messbaugruppen selbst nehmen die Informationen der zahlreichen Raumluft-, Nahfeld- und Oberflächensensoren auf, um diese dann dem zentralen Rechner zur Aufbereitung, Archivierung und Bewertung zu übergeben. Dabei wurden die Messbaugruppen in die in Abbildung 1 aufgezeigten Lüftoboxen integriert, deren Gestalt vom Vermögen und Bau Amt Pforzheim in Anlehnung an das Design der im Kloster aufgestellten Schautafeln, Beleuchtungseinrichtungen etc. angepasst wurde.



**Abb. 1**  
Lüftereinrichtung für den Einsatz im  
Dormentbau des Maulbronner Klosters

Hinsichtlich der Messtechnik können die eingesetzten elektronischen Messbaugruppen bis zu 12 digitale und/oder analoge Signale aufnehmen oder auch Schaltvorgänge für die Inbetriebnahme der Lüfter auslösen. Die Signale aller Sensoren werden über eine entsprechende Software minütlich vom Leitrechner abgefragt, aufbereitet, archiviert und zur Bewertung der Raumluftverhältnisse herangezogen, um abhängig von der jeweiligen Raumluftzustände eine differenziertere Inbetriebnahme der drei installierten Lüftereinheiten vorzunehmen. Insgesamt umfasst das Messnetz im Raumbereich der Frateria und Geißelkammer mehr als 50 Sensoren, anhand derer raumklimatische Messungen vorgenommen werden können. Die im Sommer 2002 in Betrieb genommene Mess- und Regeleinrichtung läuft abgesehen einzelner Anfangsschwierigkeiten (Kabelbruch durch Baumaßnahmen und Stromabschaltungen) ohne Unterbrechung. Die dialoggeführte Nutzeroberfläche zeigt Abbildung 2.

Ziel ist es, die Raumluftfeuchte im Jahresgang möglichst gleichförmig zwischen 80 und 85 % r. F. zu halten, da dieses Klimafenster ohne ergänzende Wärme-konditionierung über weite Bereiche des Jahres alleine durch eine Belüftungsstrategie gehalten werden kann. Zudem ist es Ziel, große Feuchteänderungen insbesondere im Umfeld der wertvollen Malfassungen zu vermeiden. Entsprechend wurden vom Restaurator auf den Fassungen sorgfältig Oberflächen- und Nahfeldklimasensoren befestigt, um die mit einer Klimaänderung verbundenen

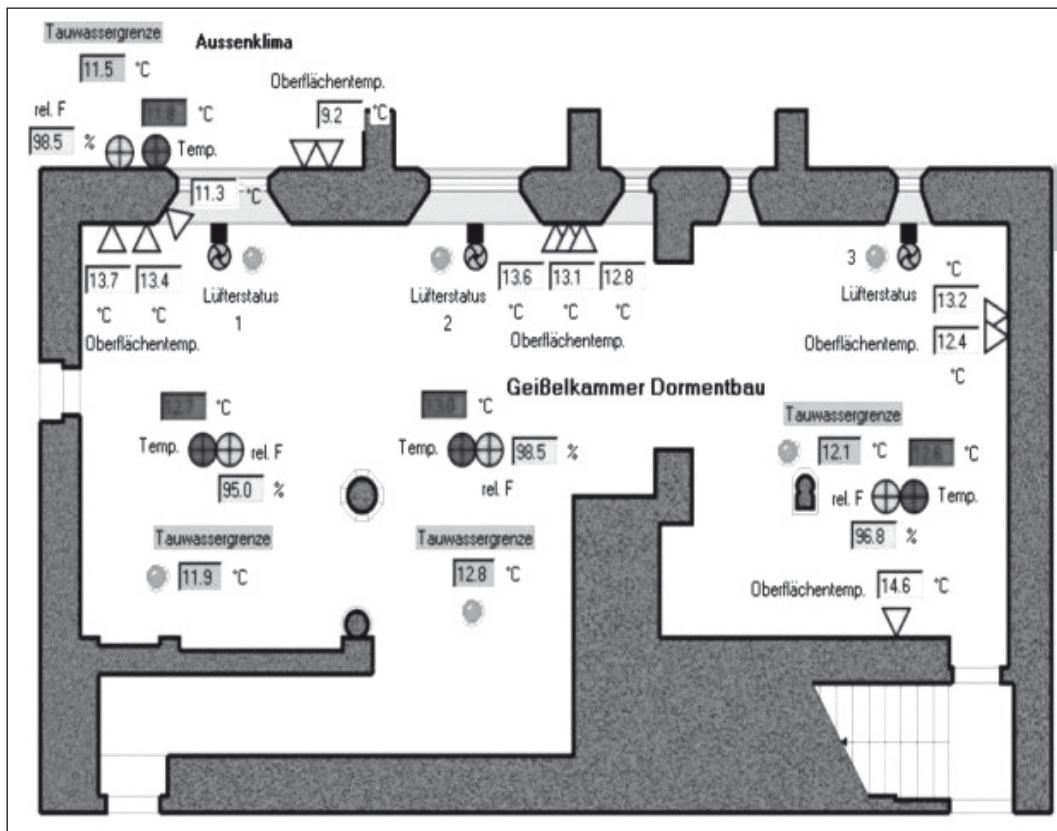


Abb. 2 Benutzeroberfläche des laufenden Mess- und Regelsystems

Formänderungen durch Schwind- und Quellprozesse oder infolge von Mineralumbildungen bewerten zu können.

Mit der realisierten kontrollierten Raumbelüftung können seither über weite Bereiche des Jahres hinweg günstige Raumluftbedingungen sichergestellt werden, indem während der Winter-, Frühlings- und Herbsttage bei ungünstigen Witterungsverhältnissen mittels sofortigem Abschalten der drei Lüftereinrichtungen dem ausgekühlten Raum keine feuchtwarmen Außenluftmassen zugeführt werden, die zwangsläufig zur Tauwasserbildung führen würden. Andererseits wird während günstigerer Witterungsverhältnisse eine stete Belüftung sichergestellt, die einerseits eine Abtrocknung der oberflächennahen Boden- und Sockelbereiche bewirkt und andererseits auch das früher auf den Malfassungen beobachtete Pilzwachstum, Phasenwechsel von im Mauerwerk befindlichen Salzen wie auch stete Formänderungen unterbindet.

### **3 Raumklimatische Beanspruchungen der Gewölbeputze im Kaiserdom zu Speyer**

Bereits in verschiedenen Publikationen wurden die umfassenden Untersuchungen zur raumklimatischen Beanspruchung der Gewölbeputze im Speyerer Dom erörtert. Diese Beanspruchung wie auch der oftmals unzureichende Verbund zwischen Gewölbemauerwerk und Gewölbeputz machte eine umfassende Restaurierung der Gewölbeputze erforderlich [4]. Zur Analyse der Schadensursachen wurde von Beginn der restauratorischen Untersuchungen an auch das Raumklima mittels eines umfassenden Monitorings analysiert. Schon nach kurzer Messdauer konnte nachgewiesen werden, dass im Anschluss an die kalten Jahreszeiten als Folge einer Erwärmung der Außenluft auf den Gewölbeputzen eine hohe relative Feuchte der Raumluft vorherrschte und so eine erhebliche Tauwasserbeanspruchung abhängig von Nutzung und Heizbetrieb gegeben war.

Insbesondere das komplexe Materialgemenge im Umfeld der Gewölbeputze des Vierungsturmes, der neben den bauzeitlichen Gewölbematerialien im Zuge der 1960 durchgeföhrten Instandsetzungen auch mit neuzeitlichen Materialien wie Zementmörteln und Betonen versehen wurde, erforderte eine sorgfältige Bewertung der raumklimatischen Beanspruchung dieser Problembereiche.

Folglich wurde in einem ersten Schritt im Zuge der Restaurierung der Gewölbeputze im nördlichen Querhaus ein Klimamonitoring realisiert, das erste Erkenntnisse zu den sich während der kalten Jahreszeit in den Gewölben tages- und jahreszeitlich einstellende Nahfeldklimaten lieferte. Hieraus wurde abgeleitet, dass ähnlich der beschriebenen Vorgehensweise im Erdgeschoss des Dормentbaus der Klosteranlage Maulbronn auch im Kaiser- und Mariendom zu Speyer eine kontrollierte Belüftung eine deutliche Verbesserung der Nahfeldklima im Umfeld der Gewölbeputze bewirken kann. Entsprechend wurde im Zuge der Planungen zur Gewölbeputzrestaurierung im Vierungsturm entschieden, vier der

acht im Vierungsturm befindlichen Fenster mit elektrischen Stellantrieben zum automatischen Öffnen und Schließen zu bestücken, um bei Bedarf die Fenster zur Entspannung der Raumluftsituation kontrolliert betreiben zu können.

Um einen geeigneten Regelbetrieb der Fenster vornehmen zu können, wurde wiederum ein rechnergestütztes Messkonzept realisiert. Hierzu wurden im Bereich des Vierungsturms mehr als 40 Sensoren installiert. Weitere Sensoren wurden im Zuge der Restaurierungsarbeiten auch im nördlichen Querhaus, wie auch in den Gewölbeputzen des Langhauses in den Jochen 3 und 5 installiert, um in Verbindung mit vom Dach auf unterschiedliche Höhen abgehängten Sensoren zur Erfassung der Raumluftverhältnisse in der Kirche eine zuverlässige Bewertung der Nahfeldklimbeanspruchung sowohl der noch originalen romanischen als auch der im Westteil jüngeren Gewölbeputze vornehmen zu können.

Erste Klimaanalysen im Nordquerhaus und Vierungsturm verdeutlichten die ausgeprägte raumklimatische Beanspruchung der Gewölbeputze. Entsprechend wurden Regelszenarien entwickelt, um mit dem geeigneten Öffnen und Schließen der Fenster günstigere Raumluftverhältnisse zu schaffen und abhängig von Witterung, Nutzung und Heizbetrieb die beobachteten Tauwasserereignisse zu vermeiden. Erste Abschätzungen zeigten, dass mit dem Aufstellen von vier Galeriefenstern im Vierungsturm ein ausreichender Luftwechsel realisiert werden kann, um bei hohen Feuchtelasten einen hinreichenden Luftaustausch sicherzustellen, der zur Entlastung des Nahfeldproblems an den Gewölbeputzen auch zu einer gewissen Entspannung des Klimas in der Kirche beitragen kann.

Mit der 1998 im Dachraum des Domes installierten rechnergestützten Klimamonitoringseinheit werden seither minütlich alle Messdaten der mehr als 120 im Zuge der Restaurierungsarbeiten installierten Sensoren abgerufen, aufbereitet, archiviert und bewertet. Die softwaretechnisch auf die spezifischen Belange der Putzsicherung abgestimmte Bewertung überprüft hierbei nach jedem Messdatenabruf die jeweiligen Nahfeldbeanspruchungen im Hinblick auf Tauwasserproblematik, Klimastabilität etc. Unter Berücksichtigung aller Bewertungsergebnisse wird in Form einer Entscheidungsmatrix dann die geeignete Fensterstellung, auf oder zu, festgelegt. Da die 50.000 m<sup>3</sup> Raumvolumen umfassende Domkirche aber auch einer intensiven Nutzung unterliegt und während der kalten Wintermonate eine Temperierung vorgenommen wird, werden auch die nutzungsspezifischen und betriebstechnischen Vorgaben bei der Entscheidungsfindung berücksichtigt.

Die Messanordnung ist am Beispiel der im Vierungsturm angeordneten Sensoren aufgezeigt, wie sie auf dem Display des Zentralrechners zur Darstellung der aktuellen Klimadaten visualisiert werden (vgl. Abb. 3). Neben den Raumklimaverhältnissen, die in 4 Höhenlagen des Turmes erfasst werden, gehen auch die Werte von mehr als 12 Oberflächentemperaturen der Gewölbeputze in die Bewertung ein. Ferner werden hier die Klimaverhältnisse im Dach des Turmes und im Freien aufgezeigt. Auf den Wetterseiten wurden zudem Regensensoren neben den zu öffnenden Fenstern installiert, um im Falle eines Schlagregenereignisses die

Fenster unverzüglich schließen zu können. So wird verhindert, dass Schlagregen über die offenen Fenster in den Vierungsturm gelangen und auf den frisch restaurierten Putzflächen abfließen.

Mit Hilfe der grafischen Benutzeroberflächen lassen sich auch die einzelnen Anlagenteile konfigurieren sowie die Bewertungsstrategien optimieren. Tauwasser- ausfälle werden auf der Visualisierungsoberfläche durch eine LED am jeweiligen Ort kenntlich gemacht. Zudem teilt die Oberfläche mit, ob unter Berücksichtigung verschiedenster Kriterien ein Öffnen der Fenster die Raumklimasituation verbessern kann. Insgesamt sind acht Kriterien zu erfüllen, bevor die Fenster im Turm geöffnet werden. So wird die Kirche mit einer elektrischen Fußbodenheizung, die vorzugsweise nachts in Betrieb genommen wird, beheizt. Um die Raumwärme nicht ungenutzt durch das Öffnen der Fenster nach außen abzuführen, werden die Fenster nur bei Bedarf kurzzeitig, bzw. so lange wie nötig, geöffnet. Ferner müssen die Entspannungspotenziale zwischen absolutem Feuchtegehalt der Raum- und Außenluft überprüft werden, um entscheiden zu können, ob überhaupt eine Verbesserung des Raumklimas erreicht werden kann. Zudem gehen einige weitere Vorgaben in die Regelkreisfindung ein, die das feuchteabhängige Materialverhalten der (in den oberflächennahen Bereichen) vorgefundenen Putze und Restaurierungsmaterialien, das Phasenzustandsverhalten der vorgefundenen Salze wie auch den Materialverbund von Putz und Gewölbemauerwerk berücksichtigen.

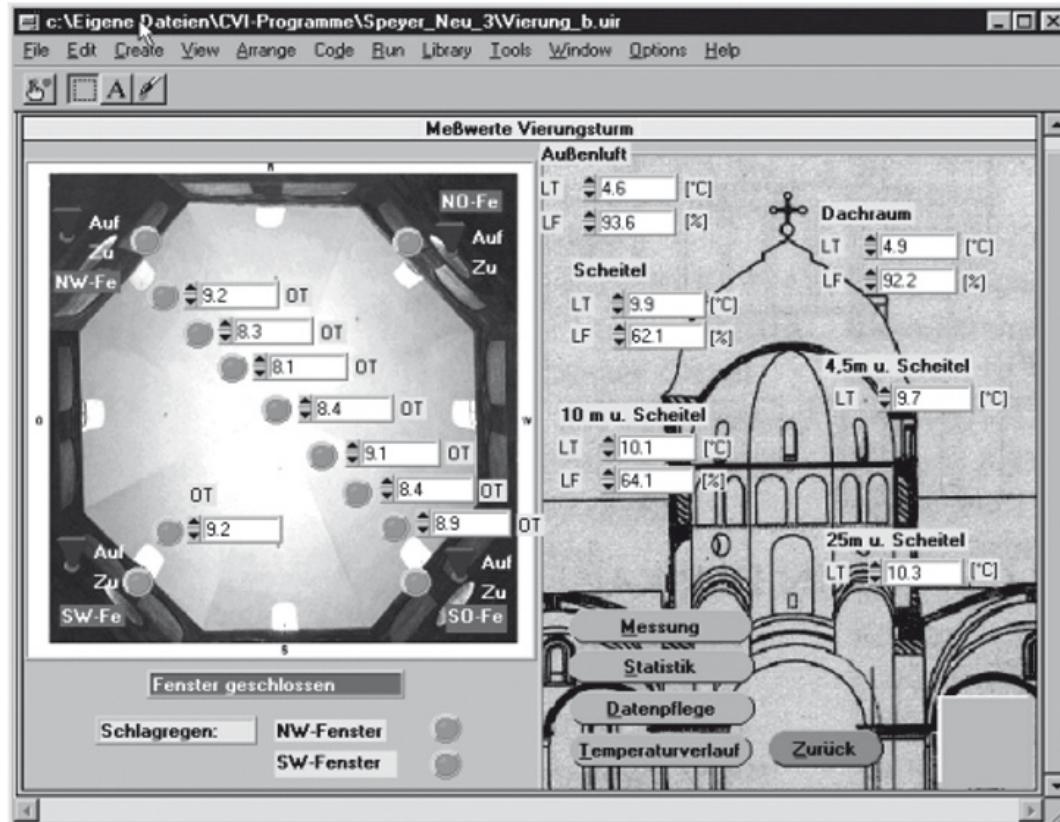


Abb. 3 Visualisierung der im Vierungsturm gemessenen Klima- und Oberflächentemperaturdaten

Mit dem Betrieb der Fenster kann seither weitestgehend sichergestellt werden, dass vor allem während der Wintermonate die Raumluftfeuchte im Bereich der Vierung in einer für die Bausubstanz unkritischen Größenordnung gehalten werden kann. Allerdings beschränkt sich die realisierte Einflussnahme nur auf das Raumklima im Umfeld der Vierung. Eine Entlastung der Raumklimaverhältnisse im Langhaus kann mit den Fenstern der Vierung alleine aber nur bedingt erreicht werden.

Insbesondere während der heißen Schönwetterperioden im Sommer erwärmt sich der Dom allmählich. Wie eine Batterie nimmt die Wärmeeinspeicherung im massigen Baukörper langsam, aber stetig zu. Wird das Raumklima im kühlen Dom zunächst als sehr angenehm empfunden, steigt mit höheren Außentemperaturen und langanhaltender Dauer der Schönwetterperiode die Raumtemperatur im Dom stetig und kann nach einigen Tagen durchaus Werte über 30 °C erreichen. In Verbindung mit den schwülwarmen Luftmassen der Rheinebene nimmt die Raumluft dann ein sehr unbehagliches Klima an, das mit einer kontrollierten Belüftung der Kirche erheblich verbessert werden könnte. So werden derzeit in den Sommermonaten die Fenster der Galerie soweit als möglich geöffnet, um eine Querbelüftung im Langhaus sicherzustellen, die zumindest eine leichte Verbesserung bewirkt.

Stete Querbelüftung kann jedoch gerade an heißen und schwülen Sommertagen sommerlich Tauwasserprobleme bedingen, da feuchtheiße Außenluftmassen, wie sie in der Rheinebene in diesen Witterungsperioden vielfach gegeben sind, zu einer Tauwasserbildung auf den doch deutlich kühleren Wand- und Gewölbeoberflächen führen können. Entsprechend ist angedacht, das bereits vorhandene Rechnersystem zukünftig auch zu nutzen, um, nach einer entsprechenden Nachrüstung der Galeriefenster im Langhaus mit elektrischen Stellantrieben, während der Sommermonate bessere Raumluftverhältnisse und damit eine Zustandsicherung der Gewölbeputze und Wandflächen vornehmen zu können. Damit würden die Fenster kontrolliert abhängig von den raumklimatischen Verhältnissen und Beanspruchungen betrieben werden. An heißen Sommertagen blieben sie dann über den Tag hinweg weitestgehend verschlossen, um die feuchtheißen Außenluftmassen nicht in den Raum eintreten zu lassen. Erst in den Nachtstunden würde die rechnergestützte Monitoring- und Regeleinrichtung die Fenster zur Querlüftung der Kirche öffnen, um das im Tagesverlauf thermisch aufgeladene Mauerwerk wieder energetisch zu entladen. Der Kirchenraum ließe sich so in einem behaglichen Temperaturbereich halten und Tauwasserbildungen auf den Gewölbeputzen würden vermieden.

In der Winterperiode kommt der Temperierung der Domkirche eine große Bedeutung zu. So wurde die Kirche 1970 mit einer elektrischen Fußbodenheizung ausgestattet. Abhängig von kirchlichen Veranstaltungen wird die Raumtemperatur mit der Fußbodenheizung auf ein Raumtemperaturniveau von 12 bis 16 °C geführt. Doch belegen die langjährigen Klimamessungen, dass die Raumluft in den verschiedenen Raumbereichen der Kirche sehr unterschiedliche Temperaturen und

relative Feuchten der Raumluft annimmt. Außerdem klagen die Kirchenbesucher beim Aufenthalt in der Kirche insbesondere während kalter Wintertage über eine große Unbehaglichkeit. Ursache hierfür ist ein nutzungsabhängiger Betrieb der Fußbodenheizung. So wird z. B. während der Weihnachtsfeiertage ein intensiver Heizbetrieb realisiert, an dem die am Boden erwärmten Luftmassen aufsteigen, sich an den kalten Wand- und Fensteroberflächen des Langhauses wieder abkühlen, um dann als kalte Luftmassen in den Raum herabzufallen. Die mit dem intensiven Heizbetrieb einhergehende Luftbewegung in der Domkirche fördert zudem die erneute Verschmutzung der frisch restaurierten Gewölbeputzoberflächen, die vermieden werden sollte.

Um Hinweise über die Gründe der ungleichförmigen Temperatursituation in der Kirche während der Winterperioden zu erhalten, wurde Anfang 2002 mit Hilfe einer IR-Wärmebildkamera die Funktionsfähigkeit der Fußbodenheizung im Dom analysiert.

Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein IR-Wärmebild. Insgesamt wurden 154 IR-Wärmebilder vom Boden der Domkirche aufgenommen, anhand derer die Funktionsfähigkeit des gesamten Heizsystems bewertet werden konnte.



Abb. 4 Beispiel einer IR-Wärmebildaufnahme im südlichen Seitenschiff

Die Aufnahmen wurden im Volllastbetrieb der Fußbodenheizung gemacht, so dass die Verknüpfung aller Aufnahmen die Bereiche aufzeigt, in denen die Heizung funktioniert bzw. defekt ist. So hat die Heizung im nördlichen Querhaus ihre Funktionsfähigkeit verloren. Auch sind die Heizkreise im mittleren Bereich des südlichen Seitenschiffes ausgefallen. Erstaunlicherweise sind im westlichen Bereich der Kirche die Heizkreise der Fußbodenheizung noch größtenteils intakt. Die funktionierenden Heizkreise erklären die in parallel durchgeföhrten Luftströmungsmessungen beobachteten Verhältnisse: Die Raumluftmassen erwärmen sich während des Heizbetriebs in den westlichen Kirchenbereichen und bewegen sich entsprechend der Dichteunterschiede von warmer und kalter Luft nach oben. Als Folge der großen Temperaturdifferenz zwischen der westlichen und östlichen Kirche bewegt sich die Raumluft in Richtung Vierung bzw. nördliches Querhaus, wobei die sich an den kalten Wand- und Fensteroberflächen abkühlenden Luftmassen vorzeitig abfallen. Insgesamt kommt es aber zu erheblichen Luftbewegungen von Süd-West nach Nord-Ost, die das Unwohlsein der Kirchenbesucher erklären und die zudem auch die erneut zu beobachtenden Staubablagerungen auf den Wand- und Gewölbeoberflächen verstärken.

Da die Raumluftströmungsverhältnisse in der Domkirche wesentlich von der Funktionsfähigkeit und Betriebsweise der Fußbodenheizung abhängen, wurden numerische Studien zum Strömungsverhalten der Kirche abhängig von Witterung, Nutzung und Heizbetrieb durchgeführt. Ziel der Untersuchungen war es

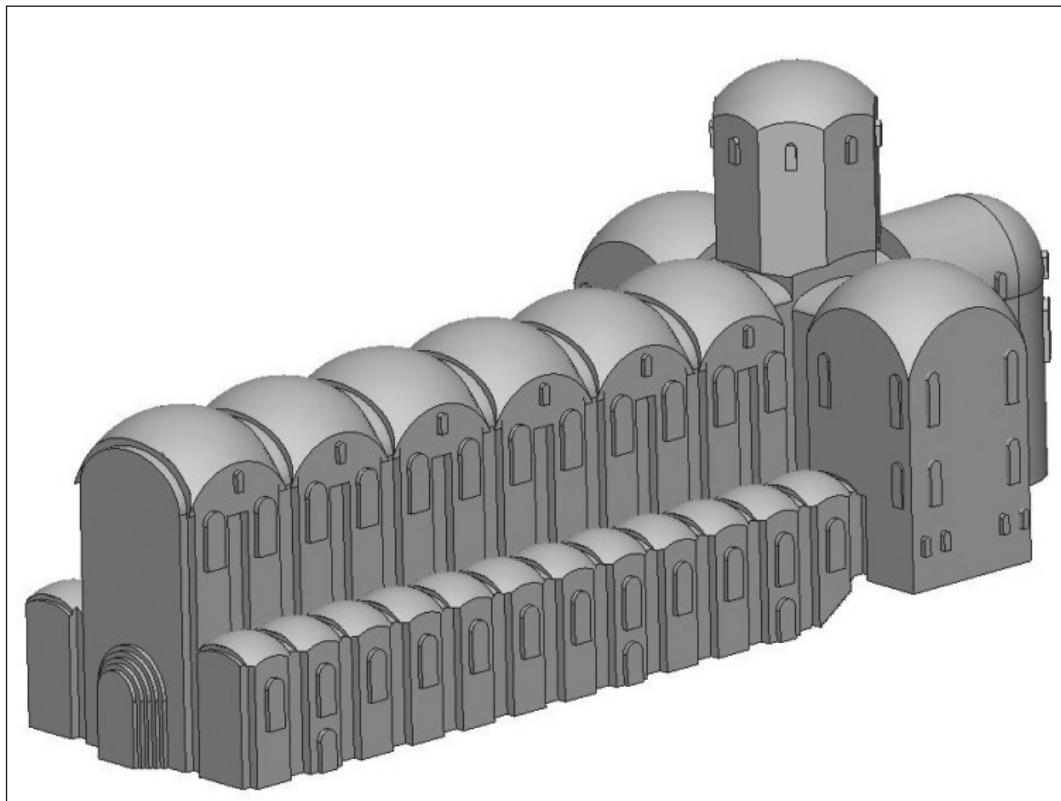


Abb. 5 CAD-Aufbereitung der Raumumschließungsflächen für die Volumennetzgenerierung

dabei auch, alternative Heizkonzepte rechnerisch in ihrer Wirkung einander gegenüberzustellen. Zur Strömungssimulation wurde das CFD-Softwarepaket der CD-Adapco Group CD-Star angewendet. Hierzu wurde das innere Raumvolumen des Domes mit einem Volumenelementnetz aus mehr als 1,2 Mio. Elementen abgebildet. Im Rahmen zahlreicher Parameterstudien konnte durch den steten Abgleich mit den über viele Jahre gemessenen Raumklimadaten das Raumluftverhalten des Doms nachgezeichnet werden. Nach dieser Validierung der vielfältigen Modellparameter konnten dann die Auswirkungen verschiedener anlagentechnischer Konzepte zur Temperierung des Kirchenraumes berechnet und einander gegenübergestellt werden. Ziel war dabei die Suche eines sowohl für den Erhalt der historischen Bausubstanz als auch für das Behaglichkeitsempfinden der Kirchenbesucher am besten geeigneten Konzepts der Wärmeübergabe an den Raum, auf Basis der heute in Kirchen zum Einsatz kommenden Heizsysteme.

In Abbildung 5 ist die im finiten Volumenelementnetz modellierte Domkirche wiedergegeben. Als Ergebnis der CFD-Analyse zeigt Abbildung 6 eine beispielhafte Temperaturverteilung in der Kirche an einem kälteren Wintertag.

Die dabei im Raum vorherrschenden Raumluftströmungen gibt Abbildung 7 wieder. Hier ist ein Schnitt durch das Haupt- und die beiden Seitenschiffe dargestellt. Für jeden Knotenpunkt des Raumnetzes werden die berechneten Raumluftgeschwindigkeiten durch einen Vektor grafisch visualisiert. Die Größenordnung der Geschwindigkeit lässt sich anhand des Farbwerts der Pfeiles ablesen. Die Richtung der Luftströmung wird durch die Orientierung der Pfeile aufgezeigt.

Im Zuge weiterer Berechnungen wurde die Wirkung der möglichen Heizkonzepte auf das Raumklima einander gegenüber gestellt. Hierbei wurden die Auswirkungen der verschiedenen Ansätze auf das Raumklima und deren Folgen für die



Abb. 6 Temperaturverteilung im Raum, Ist-Zustand

Konservierung der Bausubstanz und hinsichtlich der Behaglichkeit für die Nutzer analysiert. Nicht zuletzt ermöglichen die Berechnungs- und Bewertungsergebnisse auch, eine Kosten-Nutzenanalyse vorzunehmen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Potenziale des Klimamonitorings und der Optimierung von Raumluftverhältnissen wurden am Beispiel der Arbeiten an zwei bekannten Welterbestätten aufgezeigt. Die Erfassung und sofortige Bewertung der sich im Tages- und Jahresgang stets verändernden Beanspruchungen im Nahfeld der zu schützenden Oberflächen nimmt dabei die entscheidende Stelle ein, um geeignete Maßnahmen auswählen und kontrolliert einleiten zu können. Hierbei lassen sich abhängig von der Problemstellung vielfach bereits einfache Maßnahmen finden, mit denen bedarfsgerecht der klimabedingten Beanspruchung von Fassungsoberflächen entgegnet werden kann. Das kontrollierte Öffnen und Schließen von Fenstern wie auch die kontrollierte Betriebsweise von elektrischen Lüftern können gerade im Baudenkmal eine wirksame und kostengünstige Möglichkeit zur Verbesserung der Raumluft leisten. Werden historische Räume nutzungsbedingt beheizt, kommen Fragen zur Wechselwirkung der erwärmten Raumluft mit der Raumschale und Ausstattung sowie Fragen zur Behaglichkeit und Energiekosten hinzu. Auch hier können moderne Ingenieurmethoden der numerischen Simulation in Verbindung mit dem Klimamonitoring die Suche denkmalgerechter Lösungen unterstützen [6]. Werden entsprechende Konzepte realisiert, kann der kontrollierte Betrieb von Ventilen, Lüftungsklappen etc. einen wesentlichen Beitrag dazu leisten,

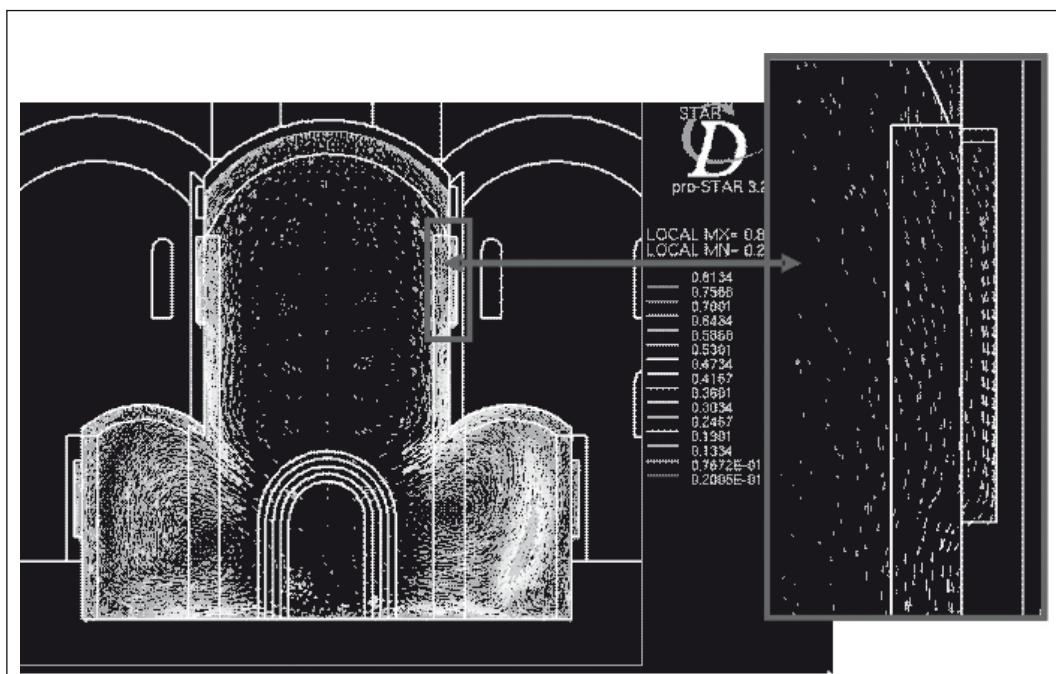


Abb. 7 Raumluftströmungsverhältnisse im Hauptschiff und den Seitenschiffen, Ist-Zustand

geeignete Raumluftverhältnisse zu schaffen, die zur Sicherung des Bestands und zur bestmöglichen Nutzung der historischen Räume beitragen [7].

## Literatur

- [1] WTA-Merkblatt 6-12: Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken. Ausgabe 07-2011/D, [www.wta.de](http://www.wta.de).
- [2] Camuffo, D.: Microclimate for Cultural Heritage. Developments in Atmospheric Science 23, Elsevier, Amsterdam, 1998.
- [3] Garrecht, H.: Reduzierung der raumklimatischen Beanspruchung der Raumschalen im Dornentbau des Klosters Maulbronn. In: Wenzel, F. (Hrsg.): Jahrbuch 1997/1998 des SFB 315 – Universität Karlsruhe, Verlag Ernst und Sohn, 2000, S. 223–235.
- [4] Heimsch, R.: Energiesparendes Beheizen und Temperieren von historischen Gebäuden. In: Wittmann, F. H. (Hrsg.): Restoration of Buildings and Monuments 8, Freiburg, 2002, S. 379–394.
- [5] Garrecht, H.; Müller H. S.: Raumklimatische Beanspruchung von Raumschalen historischer Bauwerke – Maßnahmen am Beispiel des Speyerer Doms. In: Häupl, P.; Roloff, J. (Hrsg.): 10. Bauklimatisches Symposium, Technische Universität Dresden, 27./29.9.1999, Dresden, 1999, S. 833–845.
- [6] Garrecht, H.; Reeb, S.: CFD-Simulation und Klimamonitoring – sich ergänzende Methoden zur Ausarbeitung von Maßnahmen zur Stabilisierung des Klimas in historischen Räumen. In: Tagungsband BauSIM 2008 – Nachhaltiges Bauen, Universität Kassel, 2008.
- [7] Garrecht, H; Reeb, S.; Ullmann, D.: Mess- und Regelkonzepte zur Raumluftkonditionierung museal genutzter Räume im Denkmalbau am Beispiel der Kunstsammlung Würth >Alte Meister< in der Johanniterhalle Schwäbisch Hall. In: Marx, S.; Opitz, H.; Curbach, M. (Hrsg.): 5. Symposium Experimentelle Untersuchungen von Baukonstruktionen, Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, Heft 18, TU Dresden, 2009, S. 113–126.

## Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen stammen vom Autor.



Erwin Schwing

## **SANIERUNG UND SICHERUNG VON NATURSTEINBAUWERKEN AM BEISPIEL EINER STÜTZMAUER**

### **1 Um was geht es im Allgemeinen?**

Historische Bauwerke im Allgemeinen sind lebendige Zeugnisse der vergangenen Zeiten. Sie sind architektonische, bauliche und konstruktive Leistungen der Vergangenheit und widerspiegeln kulturelle, soziale und religiöse Einrichtungen der jeweiligen Zeiten. Alte Bauwerke verfallen aber mit der Zeit mehr oder minder, in differenzierter Form und aus unterschiedlichsten Ursachen. Oft ist dabei selbst die Standsicherheit der Bauwerke in Frage gestellt. Dies gilt auch und insbesondere bei alten und historischen Ingenieurbauwerken aus Naturstein wie Burgmauern, Gewölben, Brücken und Stützmauern, deren Tragverhalten nicht unterschiedlicher sein kann.

In enger Zusammenarbeit mit Hochschulen, wissenschaftlichen Forschungseinrichtungen und der Praxis wurden in den letzten dreißig Jahren viele Verfahren zur Erkundung, Beurteilung, Instandsetzung, Instandhaltung, Ertüchtigung und Stabilisierung derartiger Konstruktionen entwickelt und praxisnah umgesetzt. Im Weiteren sollen unter dem Begriff Instandsetzen auch die Leistungen und Arbeiten inbegriffen und verstanden sein, die der Instandhaltung und Rekonstruktion eines Bauwerks dienen.

Beim Bauen im Bestand sind die Strukturen und die Materialien nicht frei wählbar, da sie ja bereits vorhanden sind. Dieses Vorhandensein sagt aber noch nichts über die tatsächliche Kenntnis aus, d. h. daraus ergibt sich zusätzlich die Notwendigkeit einer Analyse der vorhandenen Situation. Die besondere Schwierigkeit besteht somit darin, dass nicht nur die geometrischen Abmessungen zu erkunden sind, sondern auch die physikalischen Kennwerte. Es sind z. B. auch Aussagen zur Festigkeit erforderlich. Es wird Aufgabe des Tragwerksplaners sein, Model-

le von seinen Tragsystemen zu entwickeln, die die Realität ausreichend genau widerspiegeln. Diesen Modellen sind Beanspruchungen zuzuordnen, denen die Tragwerke unter Berücksichtigung aller relevanten Randbedingungen widerstehen sollen. Dies angemessen dauerhaft, was für den Neubau bedeutet: Während der vorgesehenen Nutzungsdauer erfüllt das Bauwerk seine Funktion hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit ohne wesentlichen Verlust der Nutzungseigenschaften bei einem angemessenen Instandhaltungsaufwand.

Bestehende Bauwerke haben ›ihre‹ Geschichte der Nutzung, sie zeigen sichtbare und leider häufig auch unsichtbare Verschleißerscheinungen und Schäden, die es einzuschätzen und zu beurteilen gilt. Daraus können und müssen Schlussfolgerungen zur weiteren Verwendbarkeit der Konstruktion oder zur Vorgehensweise bei der Sanierung abgeleitet werden.

Eine vollständige Analyse des Bauzustands gibt es nicht. Es bleiben Informationsdefizite, da die Erkundungs- bzw. Analysemöglichkeiten in der Regel aus Kosten-Nutzen-Überlegungen auf einen kleinen Stichprobenumfang begrenzt bleiben. Daraus ergibt sich, dass beim Bauen im Bestand immer ein mehr oder weniger großes Restrisiko verbleibt. Bauen im Bestand bedeutet damit, die Mittel und Methoden der Planung und der Bauüberwachung den tatsächlichen Anforderungen des jeweiligen Bauwerks anzupassen, um das Risiko vertretbar zu gestalten. Unter Risiko ist dabei nicht nur das der Standsicherheit, sondern auch das finanzielle Risiko zu verstehen, wenn etwa teure Änderungen am Umbau erforderlich werden. Im Merkblatt 4-5-99 der Wissenschaftlich-Technischen Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege (WTA) ist ein Ablaufschema zur Mauerwerksdiagnostik dargestellt. Es zeigt den Weg auf, der zur Zustandsanalyse erforderlich wird. Ein Hinweis in eigener Sache sei an die-

Schema zur Organisation von Bestandserkundungen und Zustandsanalysen		ARBEITSSCHRITTE
ARBEITSGRUPPE	AUFGABEN	
Bauingenieur Architekt Denkmalpfleger Bauforscher Restaurator und weitere Fachleute	Koordination Kontrolle Auswertung Schlußfolgerungen Dokumentation	<b>Anamnese</b> Quellenstudium Bau- und Bestandsaufnahme
<b>BESTANDSERKUNDUNG</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Bauhistorische Untersuchung</li><li>• Bauaufnahme</li><li>• Kartierungen und Verformungsaufnahmen</li><li>• Strukturerkundung</li><li>• Bestimmung der Materialkennwerte</li><li>• Untersuchung von Baugrund und Gründung</li></ul>	<b>Diagnose</b> Untersuchungen am Bauwerk Nachprüfung des Tragverhaltens
<b>ZUSTANDSANALYSEN</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Denkmalwert</li><li>• Schadensursachen</li><li>• Gebrauchsfähigkeit</li><li>• Tragfähigkeit</li></ul>	<b>Therapie</b> Vorplanung  <b>Planung</b> Statistische Berechnung Ausführungspläne Ingenieurtechnische Absicherung  <b>Ausführung</b> Anpassung der Planung an die örtlichen Verhältnisse Ingenieurtechnische Überwachung  <b>Prognose</b> Nachuntersuchungen und Kontrollen Erzielter Erfolg und voraussichtliche Dauerhaftigkeit

ser Stelle erlaubt: Es hat sich bei der Arbeit mit bestehenden Bauwerken immer wieder gezeigt, dass die meisten Mängel und Fehler bei der Sanierung durch mangelhafte Kommunikation zwischen den Beteiligten verursacht sind. Daher sollten die nachfolgend dargestellten Zusammenhänge und Aufgabenverteilungen ohne weiteren Kommentar beachtet werden. Die Vernetzungen innerhalb der Arbeitsgruppen und der Aufgaben sind beliebig.

## 2 Wie ist das bei Stützmauern?

Viele alte Stützmauern aus Naturstein, die mit ihrem schweren Gewicht einen Geländesprung sichern (so genannte Gewichtsmauern), sind offenbar nicht ausreichend standsicher: Sie weisen Risse auf, beulen aus und neigen sich vornüber; der Mörtel zerfällt und erodiert (manchmal sind davon sogar die Steine betroffen); vereinzelt kommt es zu Abplatzungen und Ausbrüchen. Eine Stützmauer in derart schlechtem Zustand gibt erste Hinweise auf ein mögliches Versagen. Dass es wirklich soweit kommen kann, bestätigen Meldungen von mehr oder minder spektakulären Einstürzen (Abb. 1) alter Stützmauern aus Naturstein.

Zum Glück ist meist »nur« Sachschaden zu verzeichnen. Passiert so ein Unglück in der Nachbargemeinde, offenbart dies bei den Verantwortlichen in der Bauverwaltung häufig lange gehegte Zweifel an der Standsicherheit eigener Stützmauern. Erst mit dem Schaden anderer wird auf einmal Handlungsbedarf erkannt, Fachleute treten auf den Plan, und erste Untersuchungen nehmen ihren Lauf. Die erforderlichen Kennwerte ergeben sich aus der örtlichen Erfahrung und bilden die Grundlage für die statische Berechnung nach den geltenden Normen. Dies gibt dem anfälligen Bauwerk meist den Rest, das heißt, es wird tot gerechnet. Die Standsicherheit ist offenbar nicht nachzuweisen, es besteht also dringender Handlungsbedarf. Als erste »Sicherungsmaßnahme« warnen die Behörden



**Abb. 1**  
Unvorhergesehenes  
Teilversagen einer Mauer

die Öffentlichkeit, bei höherem Gefährdungsgrad lassen sie die betroffenen Bereiche sperren. Aus technischen, wirtschaftlichen und denkmalpflegerischen Gründen findet sich oft kein geeignetes Sanierungskonzept, das alle Anforderungen erfüllt. Hilfsabstützungen, die über viele Jahre bestehen, belegen dies (Abb. 2).

Sofern die Denkmalpflege nicht auf dem Erhalt der Mauer besteht, erscheint der Abriss des gefährdeten Bauwerks als sicherste Lösung. Dem Totalabriss folgt der Neubau, heute meist in Form einer konventionellen Winkelstützwand aus Stahlbeton. Neue, mit der Säge bearbeitete Mauersteine werden als Tapete vorgeblendet; altes, grob behauenes Bruchsteinmaterial endet bestenfalls im Bauschuttrecycling. So oder ähnlich verlaufen wohl die meisten Sanierungen alter Stützmauern aus Naturstein.

Schwieriger wird es, wenn denkmalpflegerische Gründe gegen einen Abriss der alten Bausubstanz sprechen. In diesem Fall bieten sich moderne, bewährte Bauverfahren als Lösung an: Beispielsweise verankerte und unverankerte Bohrpfahl- oder Schlitzwände, die hinter der Mauer eingebracht werden und die Stützfunktion für den Geländesprung übernehmen.

Dass es auch schonender und kostengünstiger geht, zeigt das nachfolgend vorgestellte Konzept. Hier verstärkt ein zugelassenes Bauverfahren das alte Stützbaudenkmal. Eingriffe in die Bausubstanz bleiben dabei auf ein Minimum beschränkt, was den Forderungen und Auflagen des Denkmalschutzes entgegen kommt. Das



**Abb. 2**  
Temporäre Sicherung (auf lange Zeit)

Sicherheitsniveau der alten Stützkonstruktion ist nach der Sanierung dem von Neubauten angeglichen. In einem ersten Schritt muss aber zunächst die momentane Standsicherheit richtig beurteilt werden. Wie in der Medizin bedarf es also einer Anamnese und Untersuchungen, die zu einer sicheren Diagnose führen. Dann erst kann daraus eine richtige, dem Bauwerk angepasste Therapie, abgeleitet werden.

### 3 Schadensbilder

Einen unübersehbaren Hinweis auf bereits fehlgeschlagene Sanierungsversuche geben Ausblühungen. Sie sind die Folge falsch eingesetzter Materialien, die sich mit der alten Bausubstanz chemisch/mineralogisch nicht vertragen. Die unverträglichen Mischungen lösen mittragende Steine aus dem Mauerwerksverband und beschleunigen den Zerfall.

Einen ähnlichen Effekt bewirken ständige Durchfeuchtungen durch Niederschlagswasser: Im Laufe der Jahrzehnte verändert sich hierdurch die Struktur sowie die Zusammensetzung des Mauerwerksverbandes. Der Mauermörtel wird brüchig und stückelig, da das Bindemittel (früher meistens Kalk) ausgelaugt beziehungsweise über die eingedrungene Feuchtigkeit ausgewaschen wird. Die ehemals kompakte mineralische Verbindung der Steine mit dem Füllmörtel im Innern der Wand löst sich stellenweise; die Festigkeit des Mauerwerksverbandes nimmt somit ab.

Die Verwitterung an der Maueransichtsfläche setzt die Steindruckfestigkeit herab. Der Zahn der Zeit zerstört ebenfalls den Mörtel und löst ihn aus den Stoß- und Lagerfugen. Dieser so geschwächte Bereich kann dann keine Kräfte mehr aufnehmen beziehungsweise übertragen; die Lasten lagern sich in weiter hinten liegende, festere Mauerbereiche um. Hierdurch verringert sich der statisch wirkende Querschnitt der Mauer. Frostschäden im Kernbereich können den Zerfall



Abb. 3  
Lokales Versagen des Mauergerütes

noch beschleunigen: Das eingeschlossene Wasser gefriert und vergrößert sein Volumen, Steine werden gesprengt oder herausgetrieben.

Alle diese Prozesse überlagern sich und führen dann allmählich zu Ausbauchungen und schließlich zum Abplatzen von Mauerwerksteilen (Abb. 3). Dieses Schadensbild beschreibt den so genannten »Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit«, da die Stützfunktion für den Geländesprung offensichtlich noch erhalten ist.

Die meisten alten Mauern zeigen einen Überhang zur Talseite. Selbst ursprünglich leicht zum Erdreich hin geneigte Wände neigen sich im Lauf der Jahre teils stark über die Vertikale nach vorne.

Aufgrund der räumlichen Tragwirkung gleicht der Verlauf dieser Kopfauslenkungen bei langgestreckten Mauern im Grundriss der Form einer Parabel. Oftmals beginnt der Überhang in der Nähe einer steifen Wandecke, wächst mit zunehmendem Abstand an, erreicht sein Maximum und geht dann wieder zurück.

Bei kürzeren Wandabschnitten verläuft der Wandüberhang dagegen über die ganze Länge gleichmäßig. Über die Mauerhöhe gesehen beginnt auch hier der Verlauf am Fußpunkt und neigt sich linear nach vorne. Sind in den einzelnen Lagerfugen keine horizontalen Verschiebungen von Steinen erkennbar, kann man unter statischen Gesichtspunkten davon ausgehen, dass sich die Mauer als Gesamtes oder als Block verhält. Hand in Hand mit den Verformungen treten Risse in den Wänden auf. Wie stark diese ausgeprägt sind, hängt wesentlich von der Festigkeit des Mauerwerksverbandes ab. Je schwächer diese ist, umso gutmüti-



**Abb. 4**

Blockverschiebung mit starker Rissbildung durch Überschreiten der Steinfestigkeit

ger oder duktiler verhält sich die Mauer. Bis sich erste Risse bilden, hat sich die Wand bereits merklich verformt.

Ist der Verband des Mauerwerks fester, verhält sich auch die Mauer insgesamt spröder. Selbst bei geringen Verschiebungen treten plötzlich durchgehende Risse in der Wand auf, die sogar durch die Steine verlaufen können (Abb. 4). Dieses Verhalten ist viel gefährlicher, weil sich ein Kollaps ohne merkliche äußere Zeichen einstellen kann. Hinterfragt man die Sicherheit alter Stützmauern, kommt oft der Einwand, dass sie schon lange bestehen und eigentlich noch recht ordentlich aussehen. Daraus wird abgeleitet, dass tiefgreifende Sanierungen überflüssig sowie reine Geldverschwendungen seien und somit geringe kosmetische Eingriffe an der Oberfläche vollkommen genügen würden.

Eine große Aussagekraft hat auch die Lage der Risse. Der Grundriss einer Mauer verläuft in den seltensten Fällen geradlinig; es gibt Rundungen und Ecken. Zudem unterbrechen oftmals Aufgänge die Wand. In diesen Abschnitten ist die Mauer durch Querwände ausgesteift, weshalb sich hier die Lasten konzentrieren. Die Spannungen im Mauerwerk wachsen an, bis schließlich erste Risse in den Quermauern entstehen, da deren Zugfestigkeiten mit der Zeit abgenommen haben. Die Risse bewirken wiederum eine Lastumlagerung von den steiferen in die seitlich anschließenden, schwächeren Abschnitte. Die Mauer verhält sich über die gesamte Länge gleich und wieder als ganzer Block.

Bei sehr großen Verformungen entstehen häufig an der Oberfläche der Hinterfüllung ebenfalls Abrisskanten. Solche Risse sind ein eindeutiges Anzeichen dafür,

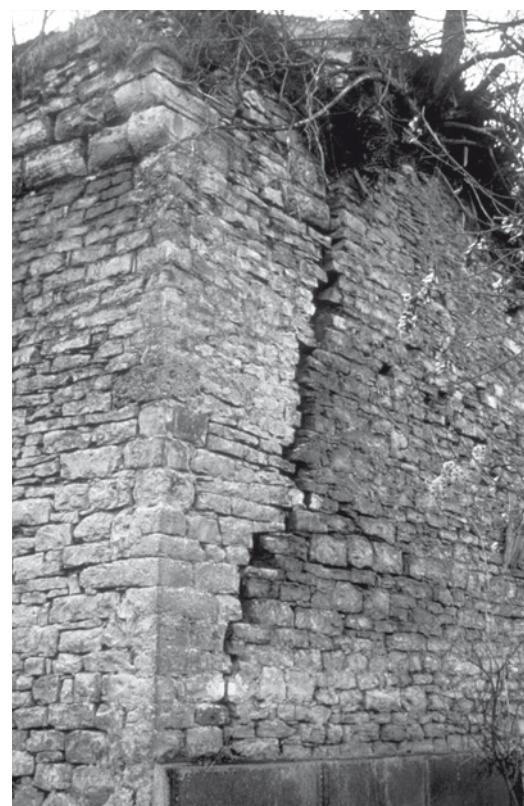


Abb. 5  
Erhöhte Verschiebungen durch Wurzeldruck

dass die Mauer gerade noch hält, die Sicherheit also in der Nähe von »1« liegt. Der »Grenzzustand der Tragfähigkeit« wird erreicht beziehungsweise das System ist bereits dabei, zu versagen. Die Stützfunktion für den Geländesprung ist gerade noch oder eben gerade nicht mehr gegeben.

In der Regel gibt es keine oder nur wenige Angaben darüber, wie sich die Form einer Mauer im Lauf der Zeit verändert hat oder ob sie vielleicht schon einmal saniert wurde. Deshalb lässt sich nur das heutige Aussehen beurteilen. Wann sich das Schadensbild eingestellt hat, ist zeitlich demnach nur in Ausnahmefällen zu bestimmen. Aufgrund des äußeren Bildes kann also nicht ohne weiteres gesagt werden, wie hoch die Sicherheit oder wie groß der Abstand zum Grenzzustand des Versagens ist. Weiterführende Untersuchungen sind daher unumgänglich.

Als weitere Schadensursache kommt auch intensiver Wurzeldruck in Frage: Mit dem zuvor beschriebenen Feuchtetransport und dem Auswaschen des Mörtels gelangt Erde in den Mauerkern. Sie bildet den Nährboden für Pflanzen. Mit zunehmendem Wachstum dringen die Wurzeln tiefer in die Mauer ein und schädigen durch den Wurzeldruck den Mauerwerksverband (Abb. 5) – dies kann sogar zum Einsturz der Mauer führen. Vorsicht ist vor allem bei Efeu geboten. Künstliche Anpflanzungen hinter der Stützmauer können ebenfalls gefährliche Folgen haben: Bäume werden mit der Zeit immer schwerer und erhöhen den Druck auf die Mauer aus ihrem Eigengewicht. Der Wurzeldruck kommt noch hinzu und vergrößert die Verformungen zusätzlich.

Selbst im Zuge von Sanierungsarbeiten an einer Mauer sind Schäden möglich: So kann beispielsweise bei einer Injektion – eventuell in Kombination mit einer Vernadelung – loses Mauerwerk allein durch die Erschütterungen beim Bohren zerbröseln. Eine Gefahr stellen auch die hohen hydraulischen Kräfte beim Spülen und Einpressen dar, die ebenfalls zum Bruch führen können.

Ein allmähliches Versagen des Bodens ist zwar denkbar, bei alten Stützmauern aber eigentlich auszuschließen. Der Boden wurde ja schon so lange beansprucht, dass er sich kaum weiter verschlechtern kann.

## 4 Bruchmodell von Gewichtsmauern

Seit Coulomb im Jahr 1773 mit seiner Erddrucktheorie die Bodenmechanik begründet hat, sind die auftretenden Kräfte in Gewichtsmauern bestimmbar. Für die statische Berechnung und die Sicherheitsnachweise wird im Allgemeinen ein Bruch- oder Rechenmodell zugrunde gelegt. Wenn eine Gewichtsmauer in sich ganz bleibt, kann sie als Monolith versinken, abgleiten oder kippen. Bei rauher Rückseite und Sohle ist üblicherweise ein kombinierter Bruch zu erwarten (Abb. 6a), bei dem gekrümmte Gleitflächen im Boden auftreten. Auf solchen Gleitflächen rutscht ein Erdkeil zur Rückseite der Mauer, übt dort Druck aus und verhakt sich (Erddruck). Die Sohle unter der Mauer schiebt einen zweiten Gleitkörper schräg nach unten, und dieser wiederum einen dritten schräg nach oben

(Abb. 6 a) – es bildet sich ein zusammengesetzter Bruchmechanismus. Dieses Modell lässt sich aus dem Gleichgewicht aller Kräfte, die an der Mauer wirken, formulieren. Im Bruchzustand (oder im Grenzzustand der Tragfähigkeit) stehen das Mauergewicht  $W$ , der aktive Erddruck  $E$  und der Sohlwiderstand  $S$ , der auch Grundbruchlast genannt wird, unter dem Fundament im Kräftegleichgewicht. Alle drei Kräfte schneiden sich in einem Punkt (Abb. 6 b, 6 c); auf diese Weise ist auch das Momentengleichgewicht eingehalten.

Durch ein Aufmass lassen sich nur die Höhe der Hinterfüllung, die Böschungsneigungen sowie die Ausformung der Wand an ihrer Vorderseite zuverlässig ermitteln. Andere geometrische Größen, die wichtige Informationen zur Beurteilung liefern (zum Beispiel Mauerstärke, Ausbildung an der Rückseite, Gründungstiefe), erfordern geringfügige Eingriffe in die Bausubstanz (Stichproben).

## 5 Mögliche Sicherungen

Die Untersuchung der Standsicherheit einer alten Stützmauer muss eindeutig klären, ob und wie die Mauer zu sichern ist, damit die Wand über eine absehbare Zeit mit hinreichender Wahrscheinlichkeit nicht versagt. Falls die Mauer gerade noch hält, die Sicherheit also etwa »Eins« beträgt, wird das Versagen verhindert, indem man zum Beispiel die Scherparameter erhöht beziehungsweise die Mauer verbreitert oder vertieft. Die Erhöhung der Scherfestigkeit bedeutet nichts anderes als eine Verfestigung des Bodens. Dazu eignet sich eine Injektion, die aber oft zu teuer ist. Man kann auch Teile des Bodens hinter der Mauer (als Verbreiterung des Querschnitts) oder darunter (als Unterfangung) mit hohem Druck ausspülen und mit Mörtel füllen. Diese so genannte Hochdruck- oder Düsenstrahl-injektion ist aber ebenfalls teuer und für die meisten Stützmauern wegen der hohen Druckbelastung auch gefährlich.

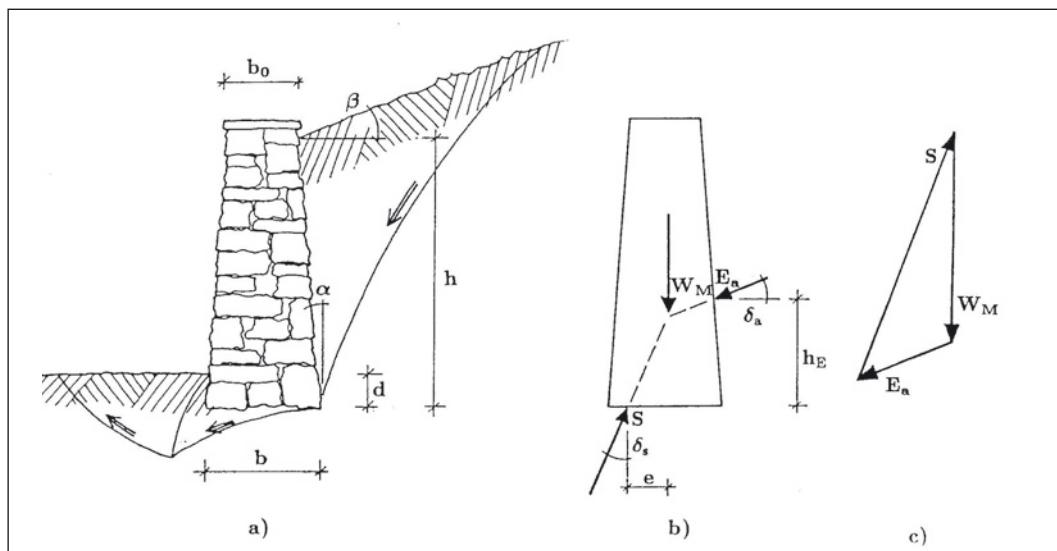


Abb. 6 Bruch- und Rechenmodell einer Gewichtsmauer

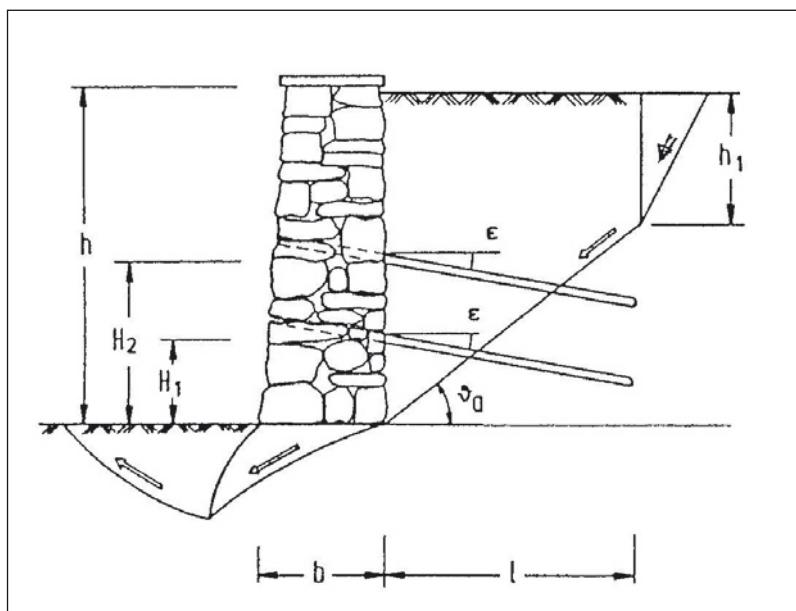
## 6 Sicherung mit Bodennägeln

Einfacher, schonender und zudem weniger gefährlich ist eine Vernagelung der vorhanden Mauer mit dem dahinter liegenden Erdreich über Bodennägel (Abb. 7). Diese bewehren den Boden und erhöhen damit dessen Festigkeit – die Wirkungsweise gleicht den Stahleinlagen beim Stahlbetonbau. Das System der Bodenvernagelung wurde vor ungefähr dreißig Jahren zur Sicherung von Baugruben entwickelt und hat sich seither vielfach bewährt.

Im Gegensatz zu Verankerungen im Grundbau werden die Erd- beziehungsweise Bodennägel nicht vorgespannt, sondern schlaff eingebaut und über die gesamte Länge mit dem umgebenden Erdreich vermortelt. Mittels Verpressen erreicht man einen besseren und gleichmäßigeren Verbund zwischen Nagel und Boden.

Mit Bodennägeln bleibt das Bruchmodell gemäß Abbildung 6 weitgehend erhalten, es kommen aber Widerstände der Nägel  $\Sigma T$  hinzu (Abb. 7). In der zum Rechenmodell von Abbildung 7 gehörenden Gleichung tritt ein zusätzlicher Widerstand durch das Herausziehen der Nägel aus dem Boden auf. Die statisch erforderlichen Nagelabstände und die Nagellängen lassen sich über ein Rechenprogramm einfach festlegen. Man erhält einen verringerten Erddruck, der wieder als Belastung auf die Mauer anzusetzen ist und der ein Versagen der Mauer mit den erforderlichen Sicherheiten ausschließt. Wenn die Mauer ganz vom Erddruck entlastet wird, muss sie sich nur noch selbst tragen.

Die Nägel sind durch die Mauer hindurchzubohren (Abb. 8). Um Erschütterungen und sichtbare Löcher in den Mauersteinen zu vermeiden, werden die Bohrungen in den Stoß- und Lagerfugen angesetzt.



**Abb. 7**  
Bruchmodell einer mit Bodennägeln verstärkten Gewichtsmauer

Das Hauptproblem bei der Vernagelung einer alten Stützmauer stellt der Anschluss der Nägel an die Wand dar. Damit die Sanierung erfolgreich verläuft, sind alle Kräfte, die sich im Boden aufbauen, am Nagelkopf sicher einzuleiten – der Anschluss lässt sich dabei unterschiedlich ausbilden. Optische Vorbehalte oder denkmalpflegerische Bedenken sprechen meist gegen Befestigungselemente an der Vorderseite der Stützmauer. Um keine sichtbaren Spuren zu hinterlassen, können die Nägel somit nur in oder hinter der Wand befestigt werden.

Schonender sind Nagelköpfe, die sich zwischen Stützmauer und Hinterfüllboden befinden. Um die Stützmauer von dem Erddruck des dahinter anstehenden Bodens zu entlasten, werden an der Mauerrückseite nach statischer Vorgabe mehrere dauerhaft korrosionsschützte Nägel eingebaut. Hierzu ist zunächst für jeden Nagel eine Spülbohrung durch die Stützmauer durchzuführen. Anschließend lassen sich mittels Höchstdruck-Wasserstrahlen an der Mauerrückseite lastverteilende Hohlräume ausspülen. In die Bohrlöcher, die sich in das Erdreich erstrecken, wird ein zugelassener Bodennagel eingelegt und der gesamte freie Bereich mit Zementmörtel verfüllt. Mit einer geeigneten Verfahrenstechnik erfährt die Mauer keinerlei Druckbelastung. Die Abmessungen des neuen Bauteils ergeben sich statisch nach den bestehenden Vorschriften und sind vollkommen unabhängig vom Zustand des Mauerwerkverbandes. Sie bestimmen sich allein aus der Tragfähigkeit des Hinterfüllbodens und der neu eingebrachten Materialien.

Die Vernagelung mittels Vermörtelung und Köpfen hinter der Mauer hat sich in vielen Fällen als kostengünstig und schonend erwiesen. Dieses patentierte System ist vom Eisenbahn-Bundesamt zugelassen und gilt auch für dynamische Belastungen aus Eisenbahnverkehr.

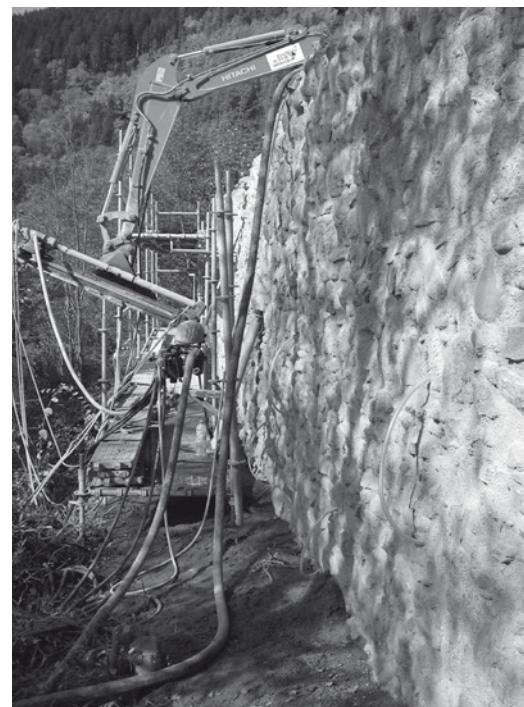


Abb. 8  
Bohrarbeiten für Bodenvernagelung

## 7 Sanierungsablauf

Wenn das Mauerwerk bereits auffällig verformt, gerissen oder erodiert ist, muss man es zunächst vermorteln. Vor diesem Arbeitsgang ist der alte, losgelöste Fugenmörtel beziehungsweise der Bewuchs von der Oberfläche zu entfernen. Die lose Fugenfüllung sollte man dann vorsichtig ausspülen und die Fugenflanken porentief säubern. Dieser Vorgang kann zwar aus denkmalpflegerischer Sicht Bedenken hervorrufen, er ist aber kaum zu umgehen, wenn das Tragwerk ausreichend sicher sein soll. Danach wird der neue Fugenmörtel maschinell vollflächig aufgebracht (Abb. 9). Nach kurzer Abbindezeit entfernt man das überschüssige Material mit Besen und Wasserstrahl von den Steinflächen. Die Erfahrung zeigt, dass der Zustand des Mauerwerkverbandes bei den meisten alten Wänden mehr als schlecht ist.

Um den Verband des Mauerwerks zu stärken, werden daher die Hohlräume im Mauerkern unter geringem und kontrolliertem Druck mit schwindarmem Mörtel verfüllt. Als Verpressgut haben sich einige Trasskalke bewährt, die mit den vorhandenen Materialien mineralisch verträglich sind. Man sollte mittels Endoskop wenigstens an einigen Stellen die Verfüllung überprüfen und notfalls nachfüllen – der Sicherheitsgewinn lässt sich zwar nicht quantifizieren, er ist aber nicht zu unterschätzen. Ausblühungen können bei eindringender Feuchtigkeit jedoch nicht ausgeschlossen werden, denn die verwitterten Zuschlagstoffe des Altmörtels setzen Komponenten frei, die Salze aufbauen können.

Zum Schluss sind noch die statisch erforderlichen Verstärkungen durchzuführen. Länge und Lage der Nägel sollten so gering wie möglich ausfallen, um die



Abb. 9  
Maschinelle Neuverfugung

Eingriffe zu minimieren. Dazu müssen stets mehrere Varianten berechnet und verglichen werden, eine einzelne Berechnung genügt nicht. Der dabei zugrunde gelegte Ausziehwiderstand der Nägel ist durch Probebelastungen zu bestätigen. Zudem müssen in den Berechnungen angesetzte, nicht nachweisbare beziehungsweise belegbare Rechenannahmen durch Versuche am Bauwerk verifiziert werden.

Abbildung 10 zeigt den auf diese Weise sanierten nicht eingestürzten Bereich der Mauer, deren Teileinsturz in Abbildung 1 dargestellt ist. Der anschließende eingestürzte Bereich wurde dabei von oben nach unten im Schutze des Schuttkegels mit Hilfe einer verankerten Wandhaut aus Spritzbeton gesichert. Die Mauer aus Naturstein ist in guter handwerklicher Qualität davor gesetzt. Ein Unterschied zwischen den unterschiedlichen Bereichen ist wegen der hervorragenden handwerklichen Qualität bei der Ausführung der Arbeiten nicht festzustellen.

### Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen stammen vom Autor.



**Abb. 10**  
Beispiel einer ausgeführten Sicherungs- und Sanierungsmaßnahme



Andreas Bewer

## STATISCHE ANALYSE VON GEMAUERTEN BOGENTRAGWERKEN

### 1 Vorbemerkung

Durch die unübertroffene Dauerhaftigkeit von Stein, Mörtel und Opus Caementitium waren gemauerte Bogentragwerke über Jahrtausende ein Tragwerk ohne Konkurrenz. Durch die neuen Materialien des Stahls und des Betons wurde ab dem 19. Jahrhundert das Mauerwerksgewölbe fast vollständig verdrängt. Da die Wahrscheinlichkeit, ein neues Gewölbe zu bauen, sehr gering ist, gehört die statische Analyse von gemauerten Bogentragwerken nicht mehr zum selbstverständlichen ingenieurtechnischen Wissenskanon der Gegenwart. Beim Bauen im Bestand ist es jedoch sehr oft erforderlich, vorhandene gemauerte Bogentragwerke zu beurteilen und eine statische Analyse vorzunehmen.



Abb. 1 Feldwegbrücke im Triglav Nationalpark, Kroatien

Die fehlende Erfahrung muss in dieser Situation dann ausgeglichen werden durch eine systematische und strukturierte Auseinandersetzung mit gemauerten Bogentragwerken.

»Ein stabiles Gewölbe ist im Gebrauchszustand ein vertracktes Tragwerk.  
Nur um den Preis des Versagens entäußert es die in ihm wirkenden Kräfte«

Dr.- Ing. Karl-Eugen Kurrer in [1]

## 2 Bautechnische Merkmale von gemauerten Bogentragwerken und deren Bezeichnung

Wie bei allen Tragwerken wird die Spannweite mit »L« bezeichnet, wobei es durchaus üblich ist, diesen Begriff für die lichte Weite zu verwenden. Die Höhe des Bogens ist der Bogenstich »f«, und das Verhältnis vom Stich zur Spannweite wird als Bogenproportion bezeichnet. Je größer die Bogenproportion, umso steiler ist ein Bogen, und je kleiner, umso flacher ist der Bogen. Bei kreisförmigen Bogen ergibt sich aus beiden Werten dann zwangsläufig der Radius »r«.

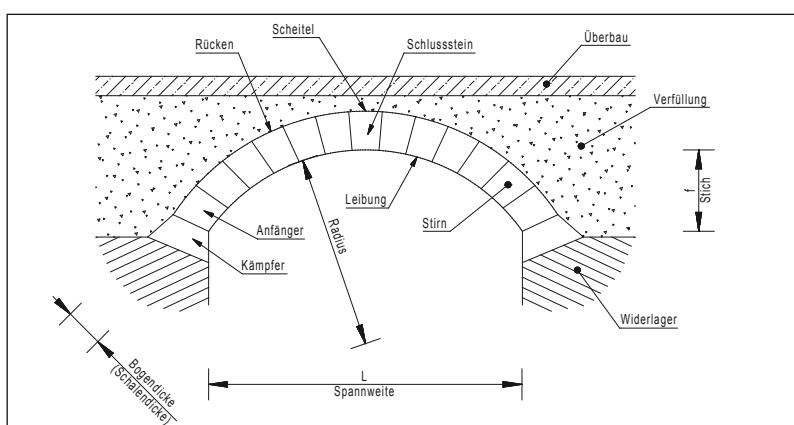
Der unterste Stein eines Bogens ist der Anfänger – und der oberste Stein der Schlussstein.

Die Oberseite des Bogens ist der Rücken, die Unterseite die Leibung.

Die vertikale Ansichtsfläche ist die Stirn, dementsprechend heißen die Wände am Anfang und am Ende eines Tonnengewölbes auch Stirnwände.

Den Übergang aus der gekrümmten Konstruktion in die Vertikale bildet der Kämpfer.

Am Kämpfer werden die Bogenlasten, bestehend aus der Vertikallast und dem Horizontalschub in die Widerlager eingeleitet. Die ständige Auflast eines Bogens wird durch die Verfüllung und gegebenenfalls auch über einen biegesteifen Überbau erzeugt.



**Abb. 2**  
Bautechnische Merkmale von gemauerten Bogentragwerken und deren Bezeichnung

### 3 Potentielle Kinematik von gemauerten Bogentragwerken

Die mögliche Beweglichkeit (potentielle Kinematik oder Labilität) des gemauerten Gewölbes ist der wesentliche Unterschied zu allen modernen Konstruktionen, die auch als deterministische (festgelegte) Bauweisen bezeichnet werden können. Die modernen Bauweisen, die auch alle gängigen Berechnungsprogramme zugrunde liegen, kennen keine potentielle Kinematik. Entweder ist ein System tauglich – also nicht beweglich, oder untauglich – also beweglich.

Das kann den Blick auf den gemauerten Bogen verstellen, denn dort ist die potentielle Kinematik das bestimmende Element. Bei allen Maßnahmen an einem Gewölbe muss sichergestellt sein, dass sich keine Beweglichkeit einstellen kann.

Sobald die Stützlinie aus der Kontur des Bogentragwerks auswandert, entsteht ein instabiles System und es wird die Grenztragfähigkeit überschritten. Bei bestehenden Tragwerken darf man zunächst davon ausgehen, dass die Stützlinie unter der vorhandenen ständigen Last sich innerhalb dieser Kontur befindet. Instabilität entsteht dann oft durch Einzellasten oder einseitige Flächenlasten.

Das Auswandern der Stützlinie aus der Mittellinie ist gleichbedeutend mit einer Normalkraft in der Mittellinie zuzüglich einer Biegebeanspruchung. Sobald die Vorspannung des Bogens durch die ständigen Lasten nicht mehr ausreicht, um die Zugspannungen aus der Biegung zu überdrücken, stellt sich eine Klaffung in den Mauerwerksfugen ein. Wenn der gesamte Bogenquerschnitt klafft, kommt es aufgrund eines örtlichen Querschnittsversagens zum Systemversagen.

Dieses Verhalten kann an einem ruhenden Bogentragwerk nicht abgelesen werden, daher vermitteln Gewölbe oft ein Übermaß an Sicherheit. Da jedoch der Übergang vom stabilen zum labilen System schlagartig und mit einer großen zerstörerischen Kraft erfolgen kann, ist es erforderlich, diese Grenztragfähigkeit durch geeignete Modelle näherungsweise, aber in einer ausreichenden Genauigkeit zu ermitteln.

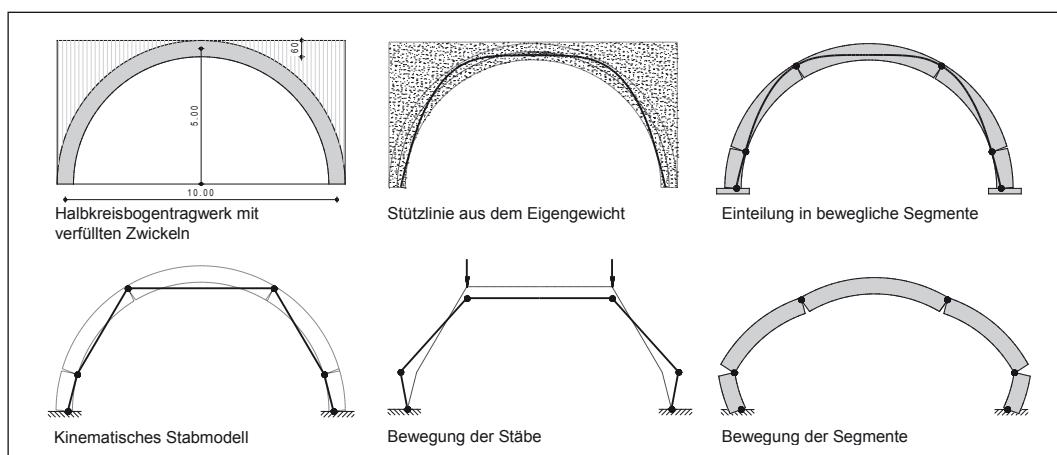


Abb. 3 Potentielle Kinematik von gemauerten Bogentragwerken

## 4 Handberechnungsverfahren (numerische und graphische Methoden)

Die Aufgabe der statischen Analyse ist die Ermittlung des Kraftflusses im Bogen. Dazu wird die sogenannte Stützlinie ermittelt. Die Stützlinie verbindet gedanklich alle Schwerpunkte der inneren Normalspannungsverteilung im Bogenquerschnitt. Sobald die Stützlinie aus dem Tragwerk auswandert, ist kein Gleichgewicht mehr möglich, und der Bogen kollabiert. Bei allen Überlegungen zur Ermittlung der Stützlinie wird davon ausgegangen, dass die Widerlager starr, also unendlich steif und damit unverrückbar sind.

### 4.1 Gleichmäßig verteilte Last

Die Geometrie der Stützlinie für eine gleichmäßig verteilte Last ist eine quadratische Funktion, deren Parameter die Spannweite »L« und der Stich »f« sind. Diese beiden Größen müssen im mathematischen Sinne bekannt sein, um die Stützlinie konstruieren zu können.

Zusammen mit der Gleichlast »p« kann dann auch der Horizontalschub »H« und die vertikale Lagerkraft »V« ermittelt werden. Mit dem Satz des Pythagoras ergibt sich aus beiden Werten die resultierende Lagerkraft »N«. Aus Gleichgewichtsgründen entspricht die Bogenkraft im Scheitel dem Horizontalschub. So ergibt sich als Normalkraftverlauf eine symmetrische Parabel mit den Stützpunkten »N« (am Bogenanfang und -ende) und »H« (in der Bogenmitte).

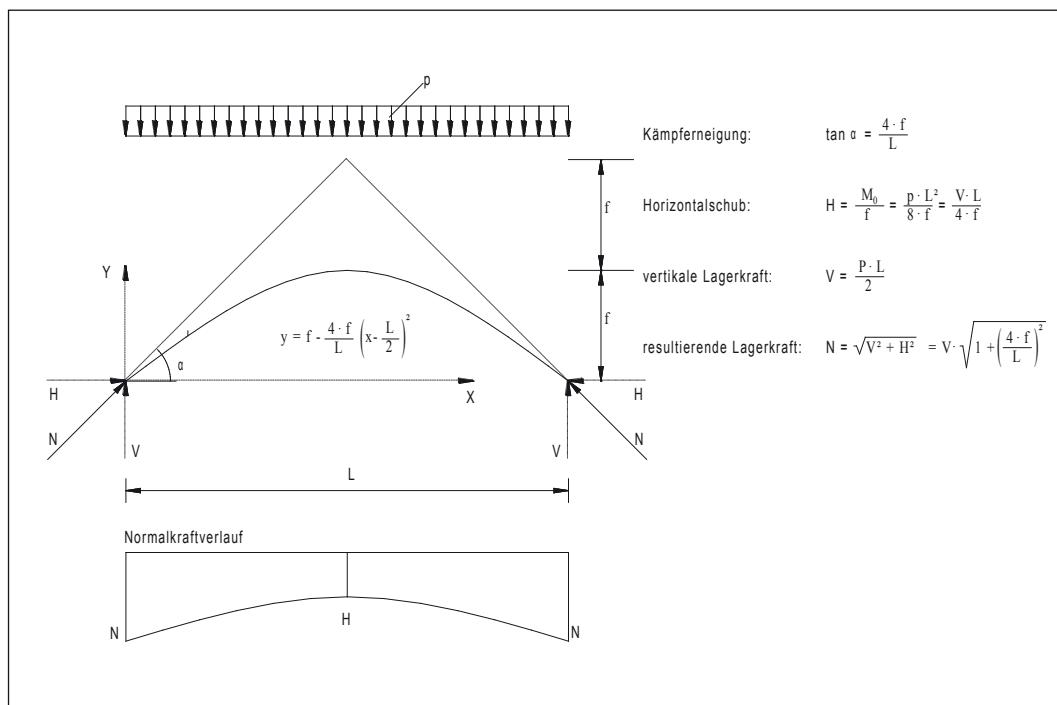


Abb. 4 Stützlinie, Auflagerreaktionen und Bogenkräfte für eine gleichmäßige Last

## 4.2 Beliebig angeordnete Einzellasten

Die Berechnung der Stützlinie für beliebige Einzellasten ist wesentlich aufwändiger, als für eine gleichmäßig verteilte Last. Hier bedient man sich elektronischer Tabellenkalkulationen (z. B. Excel) für die Gleichgewichtsberechnungen (oder eines Dreigelenkbogens in einem Stabwerkprogramms) und des CAD für die Graphostatik. Großbuchstaben werden im Folgenden zur Bezeichnung von Kräften, Punkten und der Bogenspannweite verwendet, Kleinbuchstaben sind Strecken oder auch Indizes, Zahlen sind Nummern oder auch Kraftgrößen.

### Schritt 0 – Festlegung eines Dreigelenkbogens

Eine Stützlinie kann nur konstruiert werden, wenn vorher die Koordinaten von drei Punkten der Stützlinie festgelegt werden. Es bietet sich an, einen Punkt im linken Kämpfer (Auflager A), einen Punkt im rechten Kämpfer (Auflager B) und einen Punkt im Scheitel (Gelenk G) zu wählen. Es hat sich bewährt, als erste Annahme die Punkte auf die Mittelachse des Bogentragwerks zu legen. Wenn mit dieser Annahme kein stabiles System möglich ist, muss diese Annahme in einem nächsten Durchlauf korrigiert werden.

### Schritt 1 – Diskretisierung der Lasten

Alle Einzellasten »P« werden in Größe und Lage erfasst und im CAD maßstäblich als Lastpfeil eingezeichnet, sowohl in der Lage als auch in der Größe. Alle Lasten werden konsequent durchnummiert (Index »i«) und von jeder Last werden tabellarisch die Kennwerte erfasst: den Abstand »a« zum linken Auflager »A«, den Abstand »b« zum rechten Auflager »B« und den Abstand »g« zum Gelenk »G«. Als geometrische Größen werden dazu noch die Abstände der Auflagerpunkte zum Gelenk benötigt, sowohl horizontal »gAh«, »gBh« als auch vertikal »gAv«, »gBv«. Wenn beide Kämpfer die gleiche Höhenlage haben, ist der vertikale Abstand zum Gelenk für beide Lager gleich groß und wird als Gelenkstich »fG« bezeichnet. (Bei einer unterschiedlichen Höhe der Kämpfer muss etwas anders vorgegangen werden: Die Lagerreaktionen werden dann nicht in eine vertikale und horizontale Komponente aufgeteilt, sondern in eine vertikale Komponente und eine Komponente in Richtung der Verbindungsgeraden beider Kämpferpunkte. Der Abstand zum Gelenk „fG“ wird dann senkrecht zu dieser Linie gemessen.)

### Schritt 2 – Ermittlung der Lagerreaktionen in der Tabellenkalkulation

In einer Tabellenkalkulation werden die Lagerreaktionen numerisch ermittelt, um mit diesen dann in der Graphostatik fortfahren zu können. Dazu werden zunächst für jede lastangreifende Kraft drei Momente ausgerechnet, das Moment um den linken Kämpferpunkt »M<sup>A</sup>«, das Moment um den rechten Kämpferpunkt »M<sup>B</sup>« und

das Moment um das Gelenk » $M^G$ «. Bei dem Moment um das Gelenk wird unterschieden in eine Spalte für alle Kräfte links vom Gelenk » $M^{Gl}$ « und in eine Spalte für alle Kräfte rechts vom Gelenk » $M^{Gr}$ «. Dann werden die Werte aufsummiert:

Momentensumme um den linken Kämpfer:

$$(1) \quad \sum M^A = \sum P^i * a^i$$

Momentensumme um den rechten Kämpfer:

$$(2) \quad \sum M^B = \sum P^i * b^i$$

Bei den Momenten um die Gelenke können zunächst nur Teilmomentensummen gebildet werden, denn es fehlt noch der Anteil aus den noch nicht ermittelten vertikalen Lagerreaktionen:

Linke Teilmomentensumme um das Gelenk:

$$(3) \quad t \sum M^{Gl} = \sum P^i * g^i \quad (\text{für alle Kräfte links vom Gelenk})$$

Rechte Teilmomentensumme um das Gelenk:

$$(4) \quad t \sum M^{Gr} = \sum P^i * g^i \quad (\text{für alle Kräfte rechts vom Gelenk})$$

Aus den Momentensummen um die Kämpfer lassen sich nun durch Division mit der Spannweite » $L$ « die vertikalen Lagerreaktionen » $A_v$ « am linken Kämpfer und » $B_v$ « an dem rechten Kämpfer ermitteln: Die Lagerreaktion des linken Kämpfers ist das Moment um den rechten Kämpfer dividiert durch die Spannweite. Die Reaktion des rechten Kämpfers ist dann das Moment um den linken Kämpfer dividiert durch die Spannweite:

$$(5) \quad A_v = \sum M^B / L \quad \text{aus (2)}$$

$$(6) \quad B_v = \sum M^A / L \quad \text{aus (1)}$$

Für den nächsten Schritt zur Berechnung der horizontalen Lagerreaktionen wird zunächst der Momentanteil der vertikalen Lagerreaktionen in Bezug auf das Gelenke benötigt, das sich aus dem Produkt der vertikalen Lagerreaktion » $A_v$ «, » $B_v$ « mit dem horizontalen Abstand » $ghA$ «, » $ghB$ « zum Gelenk ergibt.

linkes Moment um das Gelenk aus der vertikalen Lagerreaktion  $A_v$ :

$$(7) \quad M^{Gl \text{ aus } A_v} = A_v * ghA \quad \text{aus (5)}$$

rechtes Moment um das Gelenk aus der vertikalen Lagerreaktion  $B_v$ :

$$(8) \quad M^{Gr \text{ aus } B_v} = B_v * ghB \quad \text{aus (6)}$$

Nun können die endgültigen Momentensummen  $\sum M^G$  um das Gelenk berechnet werden:

Linke Momentensumme um das Gelenk:

$$(9) \quad \sum M^{Gl} = t \sum M^{Gl} - M^{Gl} \text{ aus Av} \quad \text{aus (3) und (7)}$$

Rechte Momentensumme um das Gelenk:

$$(10) \quad \sum M^{Gr} = t \sum M^{Gr} - M^{Gr} \text{ aus Av} \quad \text{aus (4) und (8)}$$

Durch Division der Momentensummen um das Gelenk mit dem Abstand der Kämpfer zum Gelenk, den Gelenkstich » $f^G$ «, wird dann der linke und der rechte Horizontalschub ermittelt, die beide den gleichen Wert aufweisen müssen:

$$A_h = B_h = \sum M^{Gl} / f^G = \sum M^{Gr} / f^G \quad \text{aus (9) und (10)}$$

Damit sind die Lagerreaktionen für die nun folgende Graphostatik ermittelt.

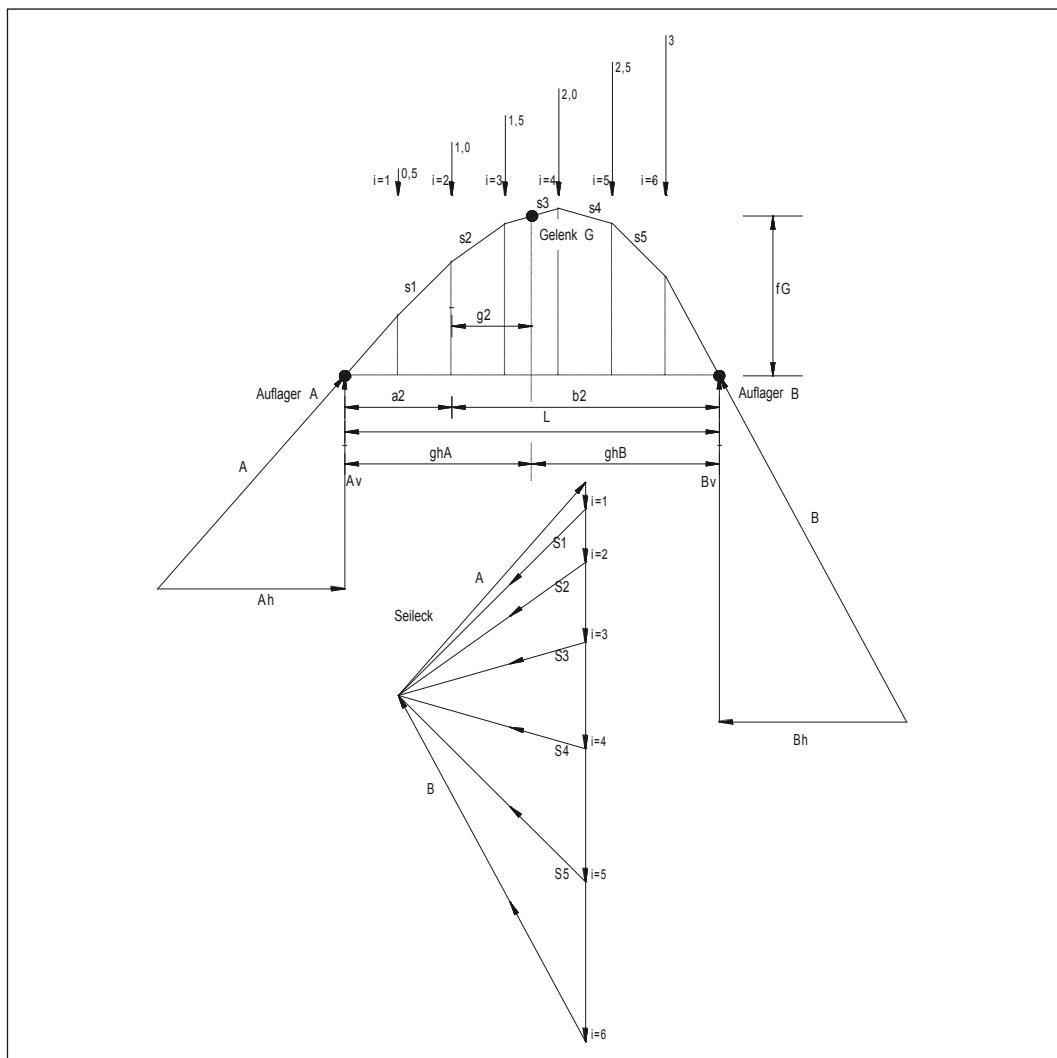


Abb. 5 Graphostatik einer Stützlinienkonstruktion für beliebige Einzellasten nach [2]

### Schritt 3 – Graphostatik

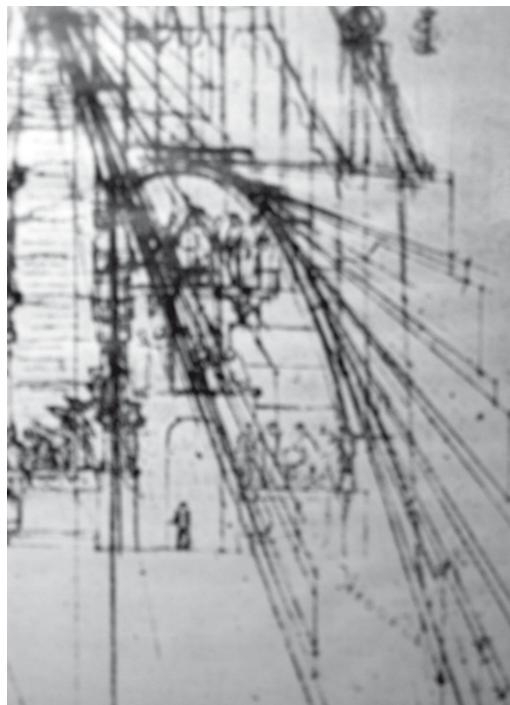
Die rechnerisch ermittelten Lagerreaktionen Av, Ah, Bv, Bh werden im CAD maßstäblich als Lastpfeil eingezeichnet, sowohl in der Lage als auch in der Größe, und die resultierenden Lagerkräfte A und B werden zeichnerisch konstruiert.

Dann wird das sogenannte Seileck gezeichnet, aus dem sich die Richtung und die Größe der Normalkräfte »Si« zwischen zwei Lastangriffspunkten ergeben: Als erstes wird die Auflagerkraft »B« angetragen, dann die Lagerkraft »A« mit Kraftanfang am Ende von »B«, dann die erste angreifende Kraft »P1« mit Kraftanfang am Ende von »A«, dann die zweite angreifende Kraft »P2« mit Anfang am Ende von »P1« usw.

Die Verbindung des Endes von »P1« mit dem Schnittpunkt von »A« und »B« ist die Kraft »S1« im Bogen zwischen dem Lastangriff von »P1« und »P2«.

Die Verbindung des Endes von »P2« mit dem Schnittpunkt von »A« und »B« ist die Kraft »S2« im Bogen zwischen dem Lastangriff von »P2« und »P3« usw.

Durch Parallelverschiebung der Richtungslinien »si« aus dem Seileck in den Dreigelenkbogen, beginnend bei einem der Kämpferpunkte, ergibt sich die Stützlinie, die bei einem richtigen Ergebnis sowohl durch den Gelenkpunkt als auch den zweiten Kämpferpunkt geht.



**Abb. 6**  
Graphische Ermittlung einer Stützlinie von Gaudí. Exponat  
Museum Antoni Gaudí. Sagrada Família. Barcelona.  
Foto A. Bewer, 2008.

## Schritt 4 – Auswertung

Wenn die Stützlinie nicht aus der Bogenkonstruktion auswandert, liegt ein stabiles System vor. Wenn die Außermittigkeit der Stützlinie nicht größer ist als 1/6 der Bogendicke, dann ist eine klaffende Fuge ausgeschlossen, sobald sie größer ist, muss mit Rissen in den Mörtelfugen gerechnet werden. Wenn die Außermittigkeit bis auf 1/3 der Bogendicke anwächst, dann beträgt die örtliche Sicherheit gegenüber Systemversagen 1,5. Die Sicherheit des Gesamtsystems gegenüber Systemversagen kann jedoch nur über die Analyse kritischer Lastbilder, die stufenweise gesteigert werden, ermittelt werden. Aus der Lage der Stützlinie zur Mittellinie, der Neigung der Stützlinie gegenüber der Lagerfuge und der Normalkraft können die Schub- und Normalspannungen ermittelt und somit die erforderlichen Festigkeitsnachweise geführt werden.

### 4.3 Einseitig gleichmäßig verteilte Last

Die Beanspruchung im Bogen aus einer einseitig gleichmäßig verteilten Last kann durch die Aufteilung der Belastung in einen symmetrischen und einen antimetrischen Lastanteil ermittelt werden.

Der symmetrische Lastanteil wird im Bogen über reine Druckkräfte entlang einer Stützlinie abgetragen. Der unsymmetrische Lastanteil wird über Biegung im Bogen abgetragen. Der Biegemomentenverlauf hat am Scheitel einen Nulldurchgang und wechselt dort sein Vorzeichen. Unter der einseitigen Last ist das Biegemoment positiv, im lastfreien Bereich hingegen negativ. Das maximale Biegemoment ist am Viertelpunkt des Bogens und entspricht dem Biegemoment eines Einfeldträgers mit der halben Spannweite des Bogens, auf den die halbe einseitige Last gesetzt wurde. Über die Ermittlung der Außermittigkeit der Normalkraft an dieser Stelle kann so schnell festgestellt werden, ob der Bogen unter dieser Last noch stabil ist, oder ob schon ein labiler Zustand vorliegt.

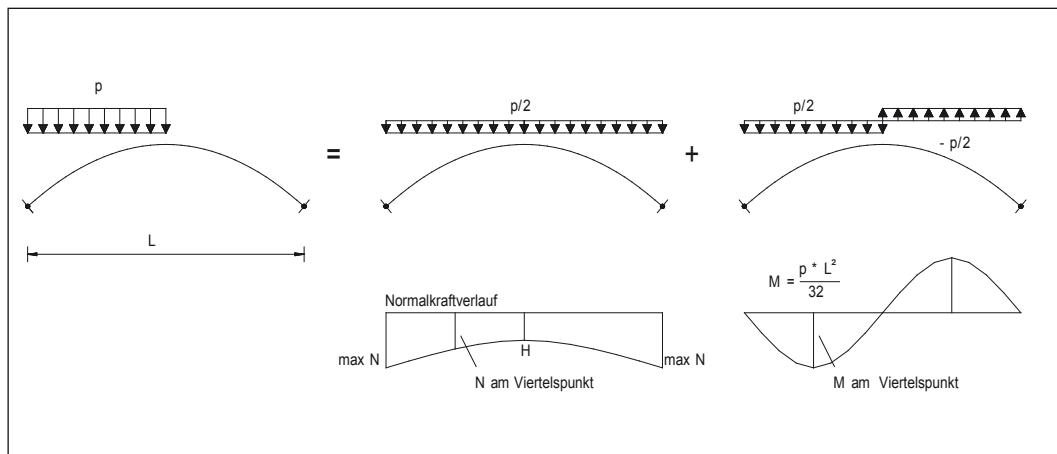


Abb. 7 Normalkraftverlauf und Momentenverlauf im Bogen unter einer einseitig gleichmäßig verteilten Last

## 5 Elektronische Berechnungsverfahren (Finite-Element-Programme)

Eine elektronische Berechnung von gemauerten Bogentragwerken ist nur mit solchen FE-Programmen möglich, in denen der Effekt der potentiellen Kinematik des Bogens mit geeigneten Modellen abgebildet werden kann.

In der Berechnung muss das Gleichgewicht immer iterativ (nicht linear) am verformten System ermittelt werden. Für die Ergebnisse darf daher das Superpositionsprinzip, das sonst in der linearen Baustatik üblich ist, nicht angewendet werden. Die Berechnungsergebnisse von unterschiedlichen Lastfällen dürfen beim gemauerten Bogen nicht aufsummiert, also nicht superponiert werden.

In einem verformten System ist nur dann ein Gleichgewichtszustand möglich, wenn die Verformungsänderungen von einem zum nächsten Berechnungsdurchlauf abnehmen und im Iterationsprozess gegen Null konvergieren. Je näher die Geometrie des Ausgangsmodells an dem endgültig verformten System ist, umso schneller konvergiert die Berechnung und umso besser sind die Berechnungsergebnisse.

Mit der numerisch gestützten Graphostatik können Modellgeometrien ermittelt werden, die diese Bedingung erfüllen. Eine Voruntersuchung mit Handberechnungsverfahren ist also unerlässlich. Daher können die elektronischen Berechnungen bei der Berechnung von gemauerten Bogentragwerken die klassischen Methoden der Baustatik nicht ersetzen, sondern nur ergänzen. Wer diesen Grundsatz nicht beherzigt, wird Unsinn für Wahrheit halten.

### 5.1 Schalenelemente

Da Bogentragwerke oft flächenhaft sind, oder zumindest flächenhaft wirken, scheint es naheliegend zu sein, die Berechnungen mit Schalenmodellen durchzuführen. Mit Schalenmodellen kann jedoch die potentielle Kinematik nicht abgebildet werden. Es entstehen rechnerische Zugspannungen und damit stabilisierende Kräfte, die in Wirklichkeit durch Rissbildung und klaffende Fugen nicht vorhanden sein können. Vor Berechnungen mit Schalenmodell muss daher gewarnt werden, die Ergebnisse können jedoch eine Orientierung sein, solange die Zugspannungen im Verhältnis zu den Druckspannungen klein sind und die Anzahl der Stellen mit Zugspannungen überschaubar bleiben.

### 5.2 Stabwerke nach der Theorie der kleinen Verformungen

Die Beweglichkeit zwischen zwei Bauteilen wird bei Stabwerken sehr einfach durch Gelenke abgebildet. Damit das Gesamtsystem jedoch nicht kinematisch wird, müssen die Stäbe Dreiecke bilden. Bei einem Stabzug in Bogenform können diese Dreiecke jedoch nicht gebildet werden, ein solches System ist also von Anfang an kinematisch. Diese Kinematik muss nun behoben werden, ohne dabei den Kraftfluss im Bogen allzu sehr zu verfälschen. Durch die Koppelung

mit einem biegesteifen Überbau mit einer sehr geringen Biegesteifigkeit kann das erreicht werden. Wenn die Geometrie des Stabzuges im verformten Zustand nicht wesentlich von der Ausgangsgeometrie abweicht, sind mit dieser Methode brauchbare Ergebnisse zu erwarten.

### 5.3 Seilnetze nach der Theorie der großen Verformungen

Mit Seilelementen können in Finite Elemente Programmen beliebige Seilstrukturen nach der Theorie der großen Verformungen berechnet werden.

Bei der Berechnung von gemauerten Bogentragwerken mit Seilnetzen wird die Kettenlinienanalogie angewendet, wie sie Robert Hooke 1697 formuliert hat:

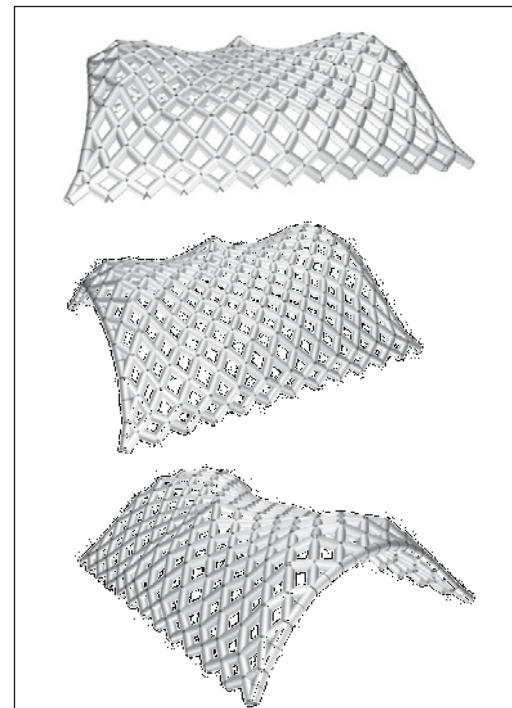
»Wie die biegeschlaffe Linie hängt, so wird umgekehrt das stabile Gewölbe stehen«.

Die Kettenlinienanalogie wurde in der Geschichte der Bautechnik wiederholt in Versuchen angewendet. Am bekanntesten sind die Hängemodelle aus Schnüren und Gewichten von Gaudí (Abb. 8) und die Hängemodele aus mit Flüssigkeit getränkten Gewebe von Heinz Isler [3]. Solche Versuche können nun rechnergestützt simuliert werden.

Von großem Nutzen sind solche Modelle, wenn die Auswirkungen von sehr großen Einzellasten untersucht werden sollen. Die sich hierbei einstellenden Verformungsfiguren (Abb. 9) geben dem Betrachter eine Vorstellung von dem räumlichen Kraftfluss, der sich im Gleichgewichtszustand einstellen muss.



**Abb. 8** Hängemodell Sagrada Familia von Gaudí. Exponat Museum Antoni Gaudí. Sagrada Familia. Barcelona. Foto A. Bewer, 2008.



**Abb. 9** Seilnetzsimulation des Kraftflusses in einem Kellergewölbe unter einer hoher Einzellast (Durchgeführt von A. Bewer mit dem Programmsystem Infograph)

Um zu brauchbaren Ergebnissen zu kommen, muss die Ausgangsform des Seilnetzes für die stabilisierenden ständigen Lasten sehr nahe an der sich einstellenden Hängeform sein. Dieser Sachverhalt war auch schon Gaudí bekannt. Daher hat er vor dem Bau seiner Hängemodelle zuerst eine graphostatische Untersuchung gemacht (Abb 6).

#### 5.4 Volumenelemente mit KontaktElementen

Die aufwändigste Methode ist die Verwendung von KontaktElementen in FE-Programmen, mit denen das Tragverhalten der Fugen simuliert wird und so das nichtlineare Verhalten des Bogens abgebildet werden kann. Veröffentlichungen liegen hierzu im Mauerwerkskalender 2009 von Dirk Proske [5] sowie im Mauerwerkskalender 2011 von Frank Purtak und Uwe Hirsch vor [6]. Die Verwendung von KontaktElementen ist jedoch nur dann erforderlich, wenn mit den wesentlich einfacher zu handhabbaren Werkzeugen der Stabwerke und Seilnetze der Sachverhalt nicht erklärt und beurteilt werden kann oder wenn ein übergeordnetes Interesse an einem Erkenntnisgewinn besteht.

### 6 Einfluss der Form auf das Tragverhalten des Bogens

Die Form des Bogens wird erfasst durch das Verhältnis des Stiches »f« zur Spannweite »L«, der Bogenproportion »κ« (kappa).

Die Bogenproportion ist als Variable für verschiedene Kurven geeignet, die Auskunft über das Tragverhalten geben:

- bezogener Aufwand »w«
- bezogener Horizontalschub »h«
- bezogene Normalkraft »n«

Über eine Interpretation dieser Kurven können Bögen in unterschiedliche Bogenkategorien eingeteilt werden, die ein vergleichbares Tragverhalten erwarten lassen:

- schubkritischer Bogen       $\kappa < 0,125$
- biegekritischer Bogen       $\kappa > 0,50$
- flacher Bogen                 $0,125 < \kappa < 0,25$
- steiler Bogen                 $0,25 < \kappa < 0,50$
- zweckmäßigster Bogen     $\kappa = 0,25$

Es ist nicht zweckmäßig, schubkritische oder biegekritische Bögen zu bauen.

Die Kurve des bezogenen Aufwands wurde dabei über eine numerische Auswertung des Integrals der inneren Arbeit ermittelt:

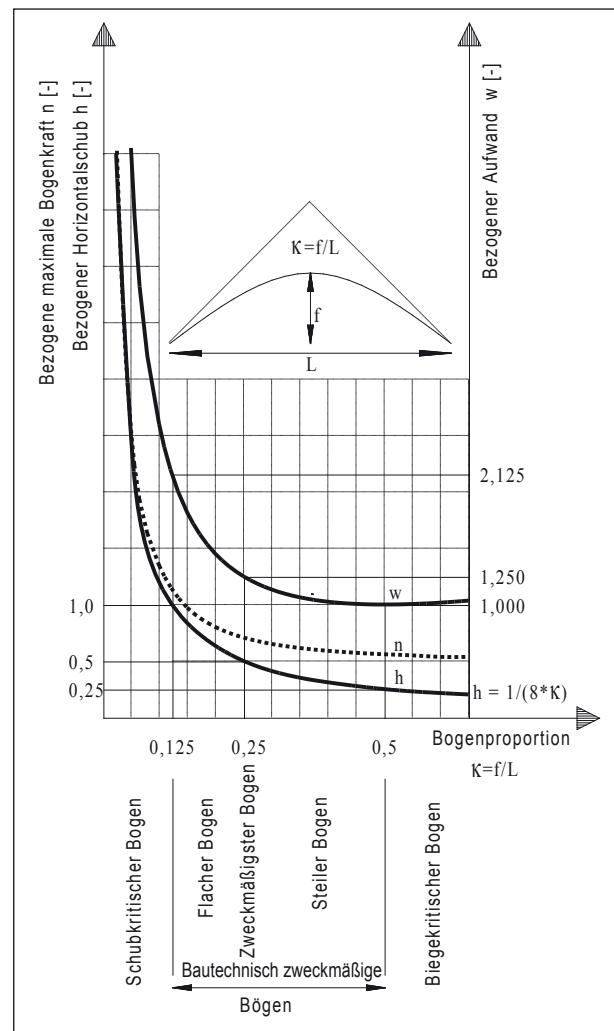
$$W_i = \frac{\beta}{2E} \int_s N ds$$

Das Integral gibt den erforderlichen Aufwand »w« wieder, der bei einer vollständigen Ausnutzung der Materialfestigkeit gebraucht würde, um einen Bogen mit einem ausreichenden Widerstand gegenüber einer gleichförmigen Belastung herzustellen.

Wird der Materialverbrauch normiert auf den im Minimum erforderlichen Aufwand, ergibt sich der bezogene Aufwand. Näherungsweise ergibt sich der bezogene Aufwand zu:

$$w = \kappa + \frac{1}{4 \cdot \kappa} \quad (\text{Näherungslösung mit sehr geringer Abweichung für flache Bögen})$$

Der bezogene Aufwand nimmt bei einer Bogenproportion von 0,5 den niedrigsten Wert an. Daher stellt sich in allen Bögen, die flacher sind, eine Stützlinie ein, die steiler ist, als die der gebauten Konstruktion. Die Begründung liegt im Prinzip vom »Minimum der Formänderungsarbeit« (Menabrea 1858, Castiglano 1875). Das Prinzip ist die logische Schlussfolgerung aus dem Energieerhaltungssatz



**Abb. 10**  
Horizontalschub »h«, maximale Bogenkraft »n« und Aufwand »w« in Abhängigkeit von der Bogenproportion »κ«

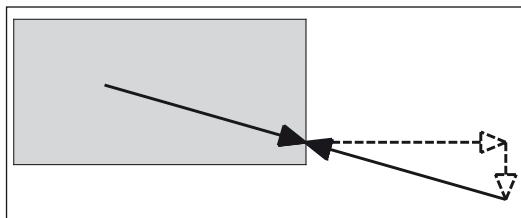
(Helmholtz 1847) und besagt Folgendes: Wenn es unterschiedliche Verformungen geben kann, die alle die Randbedingung des Gleichgewichts erfüllen, stellt sich jene Verformung ein, unter der die in dem Tragwerk gespeicherte Energie, die innere Arbeit, den niedrigsten Wert, das Minimum annimmt.

## 7 Lastübertragung in der Mauerwerksfuge

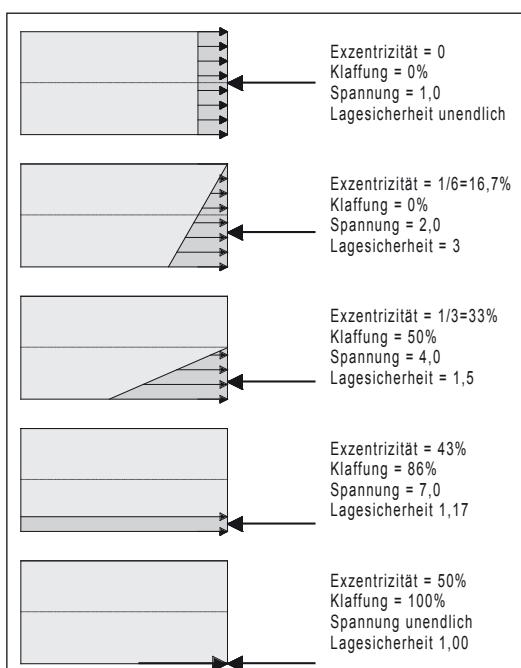
Die Stützlinie verläuft meist nicht senkrecht zu den Fugen und auch nur an wenigen Punkten entlang der Mittellinie. Daraus entsteht in der Fuge eine Biegung durch die exzentrische Normalkraft verbunden mit einer Reibungskraft (Querkraft).

Im Stein selbst bewirkt die Lasteinleitung eine diskontinuierliche Zug- und Druckbeanspruchung. Dabei kann der Lastkontakt genau an den Steinecken erfolgen.

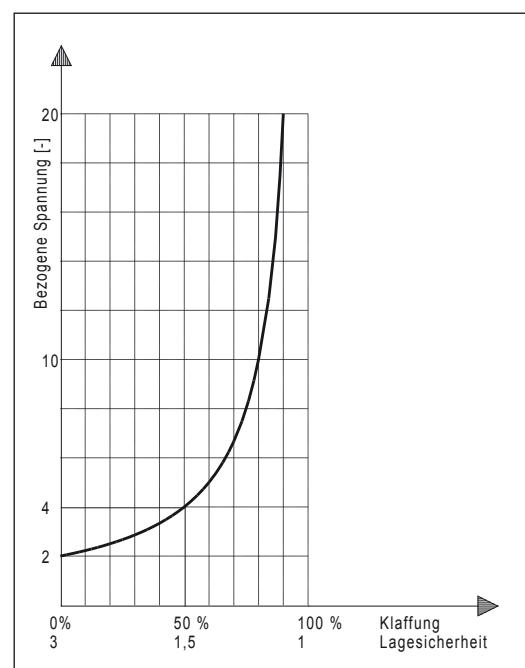
Die Lagesicherheit der beiden Steine zueinander beträgt dann 1,0, die Spannung ist jedoch unendlich groß, und daher ist eine Materialzerstörung unvermeidbar. Wenn dieser Effekt auf die Ecke begrenzt bleibt, kann sich in der Fuge eine



**Abb. 11**  
Querkraft in der Fuge und Lastübertragung durch Reibung



**Abb. 12** Biegung im Mauerwerksgewölbe durch exzentrische Normalkraft



**Abb. 13** Fugenspannung in Abhängigkeit von der Klaffung

neue Kontaktfläche ausbilden, sodass sehr hohe Exzentrizitäten aufgenommen werden können. Der Widerstand eines Bogens gegenüber seinen Einwirkungen hängt also nicht nur von der Lage der Stützlinie, sondern auch von den Materialeigenschaften der Steine und des Mörtels ab. Hilfreich ist eine weiche Fuge, die eine Kantenbeanspruchung verhindert und ein nicht zu steifer Stein mit einer geringen Neigung zum Sprödbruch und einer hohen Zugfestigkeit.

## 8 Gemauerte Bogentragwerke mit einem biegesteifen Überbau

Mit einem Überbau in Form einer biegesteifen Konstruktion aus Stahlbeton oder auch aus Stahlträgern kann eine sehr effektive und vor allem zerstörungsfreie Stabilisierung bestehender Bogentragwerke erreicht werden.

Diese Verstärkung muss keinen direkten Kontakt mit dem Bogen aufweisen, sondern wird insbesondere dann, wenn eine Verfüllung gegeben ist, auf dieser aufgelegt. Der Überbau ist gewissermaßen elastisch über die Verfüllung auf dem Bogen gebettet.

Wie bei allen elastischen Bettungen können auch hier keine Zugkräfte übertragen werden, und die Platte kann bei bestimmten Laststellungen im unbelasteten Bereich abheben. Da das die Effektivität der Stabilisierung mindert, müssen diese Überbauten immer an ihren Enden gegen Abheben gesichert werden. Das kann durch Auflast, durch Zuganker oder im Straßenbau durch eine Verlängerung der Platte weit über den Kämpfer hinaus erfolgen.

Die außerordentliche Effektivität dieser Maßnahme lässt sich durch eine einfache numerische Betrachtung darlegen. Wird ein Bogen mit biegesteifem Überbau und 10 m Spannweite mit einer einseitigen Last von  $2\text{ t/m}^2$  ( $20\text{ kN/m}^2$ ) auf einer Länge von 5 m beansprucht, so wird die eine Hälfte dieser Last als symmetrischer Lastanteil über eine Stützlinie im Bogen abgetragen, und nur die andere Hälfte von  $1\text{ t/m}^2$  ( $10\text{ kN/m}^2$ ) muss von dem biegesteifen Überbau als antimetrischer Lastanteil abgetragen werden. Unter der antimetrischen Last hat der biegesteife Überbau als Einfeldträger jedoch nur die Strecke bis zum Scheitel als Spannweite, denn dort kehrt sich das Vorzeichen des Biegemomentes um. Das aufzunehmende Biegemoment beträgt lediglich  $\pm 31,25\text{ kNm}$ .

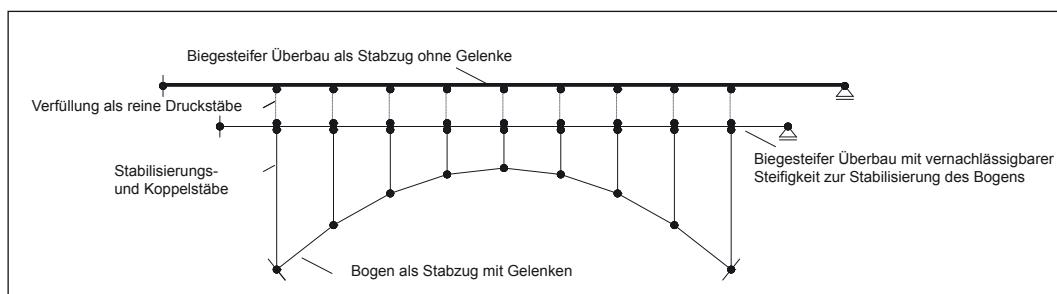


Abb. 14 Stabwerksmodell zur Berechnung eines Bogens mit biegesteifem Überbau auf der Verfüllung

Als elektronische Berechnungsverfahren bieten sich hier Stabwerksprogramme an, bei denen über Iterationen alle Zugstäbe ausgeschaltet werden können. Dadurch kann die Kraftkoppelung zwischen Überbau und Bogen über die Auffüllung wirklichkeitsnah simuliert werden, da hier keine Zugkräfte übertragen werden können. Im Stabwerksmodell muss jedoch bedacht werden, dass zwischen Bogen und dem tatsächlich versteifenden Überbau ein zweiter biegesteifer Überbau mit einer vernachlässigbaren geringen Steifigkeit eingeschoben werden muss, da das System sonst kinematisch ist und das Stabwerksprogramm die Berechnung abbricht.

## 9 Zusammenfassung und Schlussbemerkung

Auch in einem Zeitalter der Dominanz elektronischer Berechnungsverfahren muss bei der statischen Analyse von Bogentragwerken auf die im 19. Jahrhundert entwickelten grafischen Verfahren zurückgegriffen werden. Die Ergebnisse dieser Handberechnung dienen dann sowohl als Eingangsgröße für elektronisch gestützte Modelle als auch als Plausibilitätskontrolle für deren Berechnungsergebnisse.

Mit dem Parameter der Bogenproportion kann eine schnelle Einschätzung des Tragverhaltens erfolgen und mit den Formeln für den Kraftfluss unter gleichmäßiger und einseitiger Last können die Bogenbeanspruchungen überschlägig ermittelt werden, sodass mit einem geringen Aufwand eine erste Beurteilung eines bestehenden Bogentragwerks vorgenommen werden kann.

Verfüllungen von Bögen haben immer drei Auswirkungen. Sie beanspruchen den Bogen, sie stabilisieren den Bogen und sie können das Auswandern der Stützlinie aus der Bogenschale erlauben. Sie sind also zugleich eine Widerstands- als auch eine Beanspruchungsgröße. Vor dem Ausräumen von Füllung muss daher gewarnt werden.

Bei allen Maßnahmen an einem Bogentragwerk muss man sich immer der potentiellen Kinematik bewusst sein. Das betrifft insbesondere die Bauzustände. So müssen die Abstützungen von Bögen genauso sorgfältig geplant und statisch analysiert werden, wie das Bogentragwerk selbst. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf die Einhaltung der Gleichgewichtsbedingungen zu richten, eigentlich eine Selbstverständlichkeit, aber in diesem speziellen Fall wird hier sehr oft irrtümlich vorgegangen. Bogenabstützungen müssen immer flächig unter den Bögen angeordnet werden, da einzelne Stützungen nicht stabilisierend, sondern, wie eine Einzellast von unten nach oben drückend, destabilisierend wirken.

Ist eine Stabilisierung eines gemauerten Bogentragwerks unumgänglich, so sollte man immer die Option eines biegesteifen Überbaus in Betracht ziehen, da hier mit geringem Aufwand viel erreicht werden kann. Die Verstärkung von Bögen mit einer aufbetonierten Schale sollte vermieden werden.

Die Tragfähigkeit von gemauerten Bogentragwerken kann immer nur nichtlinear ermittelt werden. Es ist keine Superposition der Berechnungsergebnisse von unterschiedlichen Lastfällen möglich. Die Auswirkung des Eigengewichts ist dabei sowohl in seiner günstigen Wirkung, als auch in seiner ungünstigen Wirkung unter Verwendung plausibler Teilsicherheitsbeiwerte (entsprechend der aktuellen Normung von 0,9 bis 1,5; auch mit Zwischengrößen) zu ermitteln.

### Literatur

- [1] Kurrer, Karl Eugen: Geschichte der Baustatik. Ernst & Sohn, Berlin, 2002.
- [2] Müller-Bresslau, Heinrich: Graphische Statik der Baukonstruktion. Baumgärtner, Leipzig, 1901.
- [3] Ramm, Ekkehard; Schunk, Eberhard (Hrsg.): Heinz Isler. Schalen, Katalog zur Ausstellung, Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1986.
- [4] Mark Burry (Hrsg.): Gaudí Unseen. Die Vollendung der Sagrada Família. Ausstellung im Deutschen Architekturmuseum 2007/2008. Jovis Verlag, Berlin, 2007.
- [5] Proske, Dirk: Sicherheitsbeurteilung historischer Mauerwerksbrücken. In: Jäger, Wolfram (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2009, 34. Jg. Ernst und Sohn, Berlin, 2009, S. 537–572.
- [6] Purtak, Frank; Hirsch, Uwe: Nachweisverfahren für Brücken aus Natursteinmauerwerk. In: Jäger, Wolfram (Hrsg.): Mauerwerk-Kalender 2011, 36. Jg. Ernst und Sohn, Berlin, 2011, S. 377–415.

### Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen (Zeichnungen, Diagramme, Lichtbilder): Andreas Bewer



Sylvia Stürmer

## **KONSOLIDIERUNG VON NATURSTEINMAUERWERK DURCH VERFUGUNG UND INJEKTION**

### **1 Einleitung**

Natursteinmauerwerk ist ein Verbund aus Natursteinen, Fugen und Mörteln. Arten, Bearbeitungsstufen, Verbände und Anteile der verwendeten Natursteine und Mörtel können je nach Bauwerk (Sakral-/Profanbauten), Alter und Baustil, Lage und regionaler Verfügbarkeit der Materialien sowie früherer und heutiger Nutzung stark variieren (Abb. 1).

Obwohl der Mörtelanteil im Verhältnis zum Natursteinvolumen geringer ist, spielen die Mörtel und deren technische und stoffliche Verträglichkeit mit den Natursteinen und ggf. vorhandenen Salzen für die Stabilität und Witterungsbeständigkeit der Mauerwerke und damit für deren Dauerhaftigkeit eine große Rolle.



**Abb. 1**  
Mischmauerwerk mit unterschiedlichen Steinformaten und Mörtelanteilen

Grundlage jeder erfolgreichen Sanierungsmaßnahme sind aussagekräftige Bestands- und Zustandserfassungen. Diese liefern wesentliche Informationen über den Aufbau der Natursteinmauerwerke, den Feuchte- und Versalzungszustand und ggf. deren Schwankungen (Monitoring), das Verwitterungsverhalten der jeweiligen Natursteinvaritäten und der vorhandenen Mörtel sowie Kenntnisse zu früheren Reparaturen. Darauf wird in den Beiträgen von Frau Dr. Patitz und Prof. Dr. Garrecht in diesem Band eingegangen.

Der folgende Artikel befasst sich mit mineralischen Mörteln und deren Verarbeitungstechniken zur Konsolidierung historischer Natursteinmauerwerke durch Verfugung und Injektion.

## 2 Nachträgliche Verfugung

Die Fugen sind die Bindeglieder zwischen den Mauersteinen. Sie können offen sein wie bei Trockenmauern oder mit Fugenmörtel gefüllt. Entsprechend dem Verlauf im Mauerwerk werden horizontale Lagerfugen und vertikale Stoßfugen unterschieden, deren Ausbildung und Breite je nach Steinformat und Steinbearbeitungsstufe von wenigen Millimetern bei Quadermauerwerken (Abb. 2) bis zu Handbreite in den Zwickeln von Bruch- oder Feldsteinmauerwerken schwanken können (Abb. 3).

Fugenmörtel tragen maßgeblich zur Lastabtragung und Stabilität der Mauerwerke bei und prägen deren optisches Erscheinungsbild. Ein intaktes Fugennetz mit wirksamem Feuchteschutz erhöht die Dauerhaftigkeit des Natursteinmauerwerkes – u. a. durch Reduzierung der hygrischen Verformungen sowie Vermeidung von Frostschäden bei geringem Porenfüllgrad von Mörteln und Natursteinen. Bei beheizten Bauten aus Natursteinmauerwerk (Abb. 2) wird auch der Wärmeschutz durch die Fugen beeinflusst. Feuchteinträge können zur Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit und damit zur Reduzierung der Dämmwirkung und bei Innendäm-



**Abb. 2**  
Quadermauerwerk mit schmalen Fugen

mungen an Gebäuden mit Sichtmauerwerk zur Gefährdung derer Wirksamkeit führen.

Die Notwendigkeit zur Fugensanierung kann u. a. gegeben sein, wenn

- der Fugenmörtel verwittert oder andersweitig geschädigt ist,
- falsche Fugenmörtel verwendet wurden (stofflich oder technisch nicht angepasst),
- diese z. B. zu verstärkter Verwitterung der Steine geführt haben und
- die Fugenform und/oder die Gestaltung der Übergänge zum Naturstein zu verstärkter Beanspruchung der Natursteine führen.

Wichtige Hinweise zur Fugensanierung liefert das WTA-Merkblatt 3-12-99/D »Natursteinrestaurierung nach WTA IV: Fugen«, das zur Zeit aktualisiert wird.

Bei Instandsetzungen kommt der Fuge eine besondere Bedeutung zu. Bei der Beurteilung und Bewertung der bestehenden Fugen sind denkmalpflegerische, bautechnische und chemisch-physikalische Gegebenheiten zu berücksichtigen und in das Maßnahmenkonzept aufzunehmen [1].

## 2.1 Ausräumen und Reinigen

Wesentlich für den Erfolg der Fugensanierung sind die vorbereitenden Arbeiten vor der eigentlichen Verfugung: das Ausräumen des geschädigten Mörtels und die anschließende Reinigung. Vor der Neuverfugung ist die Fuge nach Möglichkeit in ca. doppelter Tiefe der Fugenbreite auszuräumen, um eine ausreichende Verbundfläche des neuen Mörtels zu den Steinflanken und dem Bestandsmörtel zu schaffen. Dabei dürfen die Fugenflanken nicht beschädigt werden. Die Techniken dafür richten sich u. a. nach dem Fugenverlauf, dem Zustand des alten Fugenmörtels und der Festigkeit des Natursteins. Neben dem schonenden Ausstemmen von Hand bei eher weichen und stark verwitterten Gesteinen kommen pressluftgetriebene Werkzeuge und bei gleichmäßigem Fugenverlauf und festen Gesteinen auch Fingerfräsen bzw. Trennschneidgeräte zum Einsatz. Die Fugen



**Abb. 3**

Bruchsteinmauerwerk mit hohem Mörtelanteil

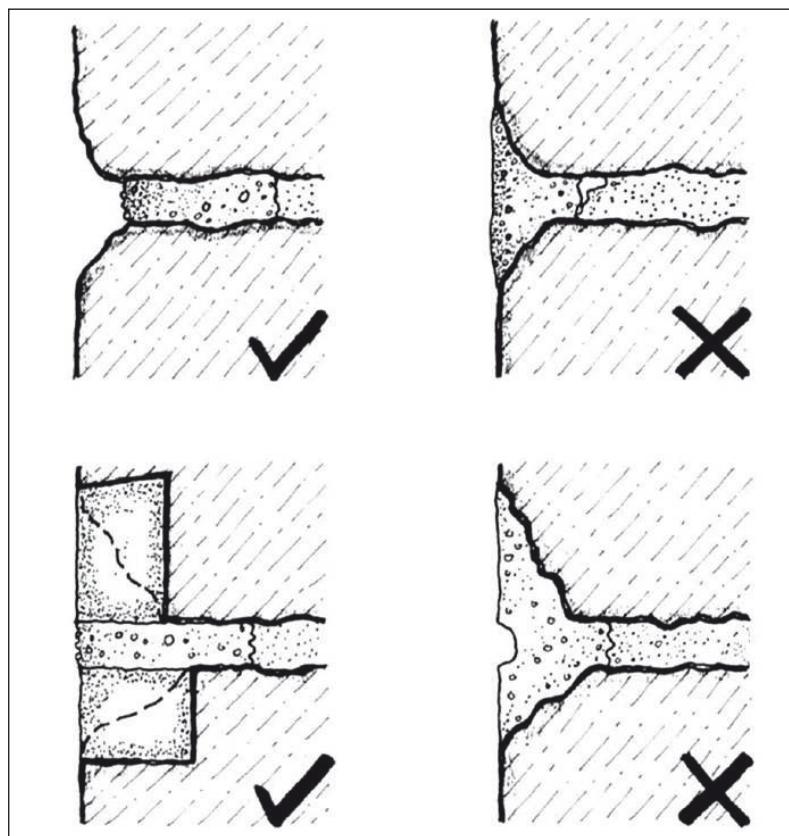
sind danach von Staub und losen Teilen zu säubern, da diese haftungsmindernd wirken können. Vor oder nach dem Ausräumen kann eine Festigung der angrenzenden Steine notwendig sein, zum Beispiel mit Kieselsäureester. Rückgewitterte Fugenflanken sind in ihrem Zustand zu konservieren oder können durch Antragung mit Steinrestauriermörtel wiederhergestellt werden (Abb. 4).

## 2.2 Wahl geeigneter Fugenmörtel

Fugenmörtel können auf der Baustelle aus Bindemittel, geeigneten Bausanden und Wasser selbst angemischt werden oder man verwendet Werk trockenmörtel, die von zahlreichen Herstellern mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und Eigenschaften angeboten werden. Als Bindemittel dominieren die hydraulischen Kalke, als natürliche hydraulische Kalke oder Gemische aus Luftkalk und Zementen, zum Teil mit puzzolanischen Zusätzen.

Mag die Baustellenmischung auch auf den ersten Blick einfach und preisgünstig erscheinen, ist sie im Bereich der Natursteinsanierung keinesfalls für Nichtfachleute geeignet und mit Schwankungen der einzelnen Chargen verbunden. Diese Schwankungen in der Mörtelzusammensetzung führen zu deutlichen Unterschieden der Optik (z. B. Farbtonunterschieden) und der mörteltechnischen Eigenschaften, die sich nachteilig auf den Naturstein auswirken können.

Die Anforderungen an Mauer- und Fugenmörtel im Neubaubereich werden durch die Mauerwerksnorm DIN 1053 geregelt. Darin werden die Bindemittel- und



**Abb. 4**  
Verfugung bei rückgewitterten und angetragenen Flanken nach Ashurst [2]  
Links: richtige Verfugung  
Rechts: nicht dauerhafte Verfugung, fehlerhafte Verfugung

Zuschlaganteile und einige wesentliche Festmörteleigenschaften der »Rezeptmörtel« der Mörtelgruppen I bis IIIa beschrieben. Für die Auswahl der Mörtelgruppe und damit der Festigkeitsklasse sind vor allem die statischen Anforderungen und die Steinfestigkeit sowie dessen Verwitterungszustand maßgebend. Das Größtkorn sollte kleiner als 1/3, besser noch kleiner als 1/5 der Fugenbreite sein. Die Fugenmörtel müssen fest am Mauerstein und am Mauermörtel haften. Die Festigkeiten und der Elastizitätsmodul sollten kleiner sein als die Werte des Gesteins. Möglichst geringe Schwind- und Quellmaße und angepasste thermische Ausdehnungskoeffizienten sorgen auch unter permanenter Freibewitterung für geringe Rissanfälligkeit. Bezuglich der Feuchteaufnahme und -abgabe ist ein geringerer, maximal der gleiche Wasseraufnahmekoeffizient anzustreben. Die wesentlichen technischen Anforderungen für die Fugenmörtel bei Natursteinmauerwerk werden im »Leitfaden Steinkonservierung« von Prof. Snethlage in Tabellenform zusammengefasst (Tab. 1) [3].

Neben den physikalischen Anforderungen ist die stoffliche (= chemische) Verträglichkeit mit der vorhandenen Bausubstanz von wesentlicher Bedeutung. Ausblühungen auf der Mauerwerksoberfläche und schädigende Reaktionen, wie zum Beispiel zwischen Gips und reaktionsfähigen Bestandteilen aus hydraulischen Kalken und Zementen zu dem Treibmineral Ettringit, müssen durch die Auswahl des geeigneten Bindemittels bzw. der Zusatzstoffe für den Fugenmörtel vermieden werden.

Aus denkmalpflegerischer Sicht wird zum Teil eine Nachstellung des Fugenmörtels nach historischen Befunden angestrebt. Es ist nicht sinnvoll, historische Mörtel nachzustellen, wenn sie sich nach heutigem Kenntnisstand eindeutig als ungeeignet erwiesen haben. Die Nachstellung kann jedoch eingeschränkt sein, z. B. wenn die ursprünglich verwendeten Materialien nicht mehr verfügbar sind oder veränderte Beanspruchungen des Mauerwerkes, z. B. durch Umnutzung oder Salzbelastungen, Mörtelzusammensetzungen erfordern, die vom Originalbefund abweichen.

**Tab. 1** Anforderungen an die Festmörteleigenschaften von Reparurmörteln bezogen auf die Eigenschaften der Mauersteine aus [3]

Qualitätsprüfung für Fugenmörtel		
Eigenschaft	Symbol	Anforderung
Dynamischer E-Modul	$E_{dyn}$	20–60 %
Druckfestigkeit	$\beta_D$	20–60 %
Feuchtedehnung	$\alpha_{Hy}$	50–100 %
Wärmedehnkoeffizient	$\alpha_T$	50–150 %
Wasseraufnahmekoeffizient	w	50–100 %
Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl	$\mu$	50–150 %
Haftzugfestigkeit	$\beta_{HZ}$	0,5–1,0 $\beta_{HZ\text{ Gestein}}$

### 2.3 Applikationstechnik: Von Hand oder doch maschinell?

Die Verfugung kann traditionell von Hand (Abb. 6) und mit Kartuschen (Abb. 5) oder maschinell mit Verfugpistole erfolgen, je nach Verlauf, Dimension und Zugängigkeit der Fugen sowie Art und Größe des zu sanierenden Natursteinmauerwerks.

Wesentlich für die Dauerhaftigkeit der Neuverfugung ist die Flankenhaftung des Mörtels am Stein. Dabei sind vor allem die Rauigkeit und das Saugverhalten des Steins zu beachten und eine optimale Konsistenz des Mörtels einzustellen: steifplastisch bei der Handverfugung und etwas weicher, zum Teil mit einem kleinen Anteil an Fließmittel, bei maschineller Verfugung. Bei schmalen und gleichmäßigen Fugen in regelmäßigen Mauerwerken dominieren die Verfugung mit Hand oder Kartusche, bei der die Spritzdüse je nach Fugengeometrie angepasst werden kann. Die Kartuschentechnik mit Fließmittel vergütetem Mörtel eignet sich besonders bei Überkopfarbeiten (Gewölbe, Untersichten z. B. bei Gewölben oder Brücken) und keilförmigen Fugen, die sich nach hinten aufweiten. Zum Teil kann es dabei auch notwendig sein, die Spritzdüse mit einem Schlauchabschnitt zu verlängern (Abb. 5) und/oder in mehreren Arbeitsgängen zu verfugen. Abbildung 5 zeigt die Vorverfüllung eines tief ausgewaschenen Fugenbereichs mit spritzfähigem Fugenmörtel, dessen Oberfläche nach einer gewissen Standzeit mit einem steif plastischen Fugenmörtel per Hand verfugt wurde (Abb. 6), um in den außen liegenden, breiteren Zwickeln ein »Absacken« und ggf. Risse im Fugenmörtel zu vermeiden.

Für einen langfristigen Witterungsschutz sollte die Fugenoberfläche bündig mit der Steinflanke (Abb. 7) oder leicht »zurückgesetzt« gestaltet werden. Bei stark hervor stehenden Fugen werden die Fugenmörtel, bei tief zurückgesetzten Fugen die Steinflanken durch Schlagregen, Frost und Erosion übermäßig beansprucht.

Die Oberflächenbearbeitung kann durch Glätten (mit Fugenkelle oder Schlauchabschnitt), Abziehen (z. B. mit der Schmalseite der Kelle oder Fugenholz), Waschen oder Bürsten erfolgen.



Abb. 5 Verfugung mit Kartusche mit spritzfähigem Fugenmörtel



Abb. 6 Handverfugung mit steif plastischem Mörtel

Bei Fugensanierungen, bei denen sich der bestehende, falsche Fugenmörtel nicht mehr vollständig ohne Zerstörungen an den Natursteinen entfernen lässt oder bei vorstehenden Steinquadern kann es notwendig werden, den Fugenmörtel an den Bestand anzuböschen (Abb. 8). Zur Erzielung eines optimalen Haftverbunds sind Haftvermittler (= systemverträgliche Kunststoffzusätze) zu den mineralischen Mörteln zu empfehlen.

### Verfügung durch Trockenspritzen

Bei der Fugensanierung großer Flächen aus Bruchstein- und Schichtmauerwerk mit tief ausgewitterten Fugen hat sich das Trockenspritzen bewährt. Dieses Verfahren der Betontechnik wird seit den 20er Jahren des 20. Jahrhunderts auch für Verfugungen eingesetzt. Beim Trockenspritzen wird der Mörtel durch Druckluft (pneumatisch) trocken bis zur Spritzdüse gefördert, wo das Wasser über einen Wasserring mit mehreren Öffnungen unter Druck zudosiert wird. Die Benetzung bzw. das Vermischen von Trockenmörtel und Wasser erfolgen bei diesem Verfahren erst einige Zentimeter vor dem Düsenausgang. Aufgrund der geringen Wasserzugabe zum Trockenmörtel wird das Schwindmaß reduziert, die Gefahr der Rissbildung minimiert und das Mauerwerk nicht unnötig durchfeuchtet. Durch den Anpressdruck wird eine sehr gute Flankenhaftung erzielt.

Das Trockenspritzverfahren eignet sich für die steinsichtige Verfugung für Fugenbreiten ab ca. 2 cm bis 15 cm und Tiefen ab 3 cm bis ca. 20 cm ebenso wie für steinfühligen und steindeckenden Verputz von Mauerwerk. Kennzeichnend für das Trockenspritzverfahren sind:

- sehr gute Flankenhaftung an den Mauersteinen,
- sehr gute Haftung des neuen Fugenmörtels am Originalmörtel,
- gleichmäßiger Fugenschluss auch bei tiefen Fugen und wechselnder Fugenbreite,
- geringer Anmachwasserbedarf, dadurch geringe Schwindneigung und Ausblühgefahr,



Abb. 7 Fugenmörtel bündig mit den Steinoberflächen



Abb. 8 Anböschken des neuen Fugenmörtels an den Bestandsfugenmörtel

- ansprechende, bestandsgerechte Ästhetik durch die sichtbare Körnung nach der Reinigung,
- Arbeitszeiteinsparung gegenüber Handverfugung bei großen Flächen,
- Verfugung und Verputz sind in einem Arbeitsgang möglich.

Für regelmäßige Verbände mit kleinformatigen Mauersteinen und/oder schmalen Fugen, wie Quadermauerwerken, ist diese Art der Verfugung aufgrund des großen Rückpralles und der »Siebwirkung« weniger geeignet – wegen möglicher Anreicherungen des Bindemittels und der Feinanteile mit der Gefahr der Überfestigung und Rissbildung. Beim Trockenspritzen tritt eine Staubentwicklung ein – anders als beim Nassspritzen. Bei optimaler Geräteeinstellung (Druckluft, Wasserdruck etc.), geeignetem Spritzabstand, angepasster Düsenlänge und geschultem Personal lässt sich die Staubentwicklung jedoch auf ein vertretbares Maß beschränken.

Die Reinigung des überschüssigen Mörtelmaterials von den Steinoberflächen kann nass oder trocken mit geeignetem Strahlmittel erfolgen. Es verbleibt eine rauere Oberfläche als beim Glätten mit dem Fugeisen oder der Bürste nach der Handverfugung, bei der die Zuschläge sichtbar sind (Abb. 9).

### 3 Konsolidierung durch Injektion

Eine weitere Maßnahme zur Konsolidierung beeinträchtigter Mauerwerke, zur Erhaltung oder Wiederherstellung der Standsicherheit bzw. der Tragfähigkeit, ist das Verfüllen bzw. Injizieren von Hohlräumen, Fehlstellen und Rissen. Es erfolgt häufig in Verbindung mit Vernadelung und Verankerung und/oder mit dem handwerklichen Austausch von Steinen und Mörteln. Für diese Arten der Instandsetzung gibt es keine technischen Regeln im Sinne einer Norm. Wichtige Hinweise



**Abb. 9**  
Bruchstein-Mischmauerwerk nach der Verfugung im Trockenspritzverfahren

liefert das WTA-Merkblatt 4-3-98/D »Instandsetzung von Mauerwerk – Stand-sicherheit und Tragfähigkeit« [4].

Injektionen können auch in Verbindung mit nachträglichen Abdichtungsmaßnahmen notwendig werden, wenn Fehlstellen oder Hohlräume im abzudichten-den Mauerwerk vorhanden sind. Dabei wird angestrebt, dass das Injektionsmittel nicht unkontrolliert abfließt, ohne seine Wirkung in den Kapillarporen der be-treffenden Mauerwerksbaustoffe zu entfalten (siehe dazu auch WTA-Merkblatt 4-4-04 D »Mauerwerksinjektion gegen aufsteigende Feuchtigkeit« [5]).

Bei der Entscheidung für die Injektionsmaßnahme und bei der Auswahl des In-jektionsmaterials muss allen Beteiligten bewusst sein, dass es sich im Gegensatz zur Verfugung oder statischen Konsolidierung durch äußere Maßnahmen wie Zugstangen oder »Stahlbetonkorsagen« um einen irreversiblen Eingriff handelt. Die Mörtel oder erhärteten Suspensionen sind nach der Verpressung nicht mehr frei zugängig (wie Fugen- oder Putzmörtel) und weisen eine viel höhere Anzahl von Kontaktstellen zur Originalbausubstanz auf. In Verbindung mit der Feuchte im Mauerwerksinneren sind damit auch größere Reaktionsmöglichkeiten u. U. mit Treibmineralbildung gegeben.

Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an die Qualität der Vorunter-suchungen, Planung und Ausführung. Besonderes Augenmerk ist auf die stoff-lische Verträglichkeit des Injektionsmörtels mit den Bestandsmaterialien (Natur-steine, Mörtel, ggf. metallische Einbauten, nachträglich aufgenommene Salze) zur Vermeidung von schädigenden Reaktionen und die Anpassung an die tech-nischen Kennwerte der Mauerwerksbaustoffe wie Elastizitätsmodul, Druck- und Zugfestigkeit sowie Wasseraufnahme und hygrische Dehnung zu legen.

An dieser Stelle wird explizit auf die Besonderheiten von gipshaltigem oder gips-belastetem Mauerwerk hingewiesen, mit dem sich das WTA-Merkblatt 2-11-07 D »Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden« [6] beschäf-tigt. Das Merkblatt »informiert über die Verbreitung und Erkennung gipshaltigen Mauerwerks, über seine speziellen statisch-konstruktiven Eigenschaften sowie über die chemisch-mineralogischen Prozesse bei der Bildung von Treibminera-len.« Möglichkeiten für den fachgerechten Umgang mit derartigen Mauerwerken werden aufgezeigt.

Als mineralische Injektionsmaterialien kommen Baustellenmischungen (Ze-mentleime, -suspensionen), sehr feinkörnige Werkrockenmörtel und Injektions-schaummörtel zum Einsatz. Mineralische Injektionsschaummörtel werden aus Zementleim (alkaliarme Portland- oder Hochofenzemente) durch Untermischen eines Schaumes aus Luft mit max. 0,8 % organischen Anteilen aus den Zu-satzmitteln Schaumbildner und Stabilisierer hergestellt. Durch die Variation des Bindemittels und des Schaumanteiles lassen sich die Eigenschaften des Injek-tionsschaummörtels wie Druckfestigkeit und E-Modul über die Änderung der Rohdichte gezielt an das zu sanierende Mauerwerk anpassen. Vorteile gegen-über reinen Zementsuspensionen sind u. a. die geringere Anmachwassermenge

(insbesondere bei stark saugenden Natursteinen), das deutlich geringere Eigengewicht und die reduzierten Festigkeiten und E-Modulen, die besser dem historischen Mauerwerk angepasst sind (siehe dazu auch [7]).

Gemäß WTA-Merkblatt 4-3-98/D sollten die hydraulischen Bindemittelleime bzw. Mörtel folgende Eigenschaften aufweisen [4]:

- minimaler Gehalt an Trikalziumaluminat ( $C_3A$ )
- minimaler Gehalt an Alkalien
- keine ausschließliche Verwendung von Trasskalk als Bindemittel
- möglichst geringe Sedimentationsneigung
- gutes Wasserrückhaltevermögen
- gute Fließfähigkeit
- hohe Haftfestigkeit auf mineralischen Untergründen
- geringes Schwinden
- Sulfatbeständigkeit
- an das bestehende Mauerwerk angepasste baustofftechnologische Kennwerte (Festigkeit, E-Modul, Kapillarität)

Verbindliche Materialgrenzwerte lassen sich nicht festlegen, die Kennwerte müssen objekt-, klima- und steinspezifisch entsprechend der Ergebnisse der Voruntersuchungen unter Einbeziehung eines Statikers festgelegt werden.

Nicht einsetzbar sind reine Luftkalkmörtel, Kalkmörtel mit geringen hydraulischen Anteilen und primär trasskalkgebundene Mörtel, da der für die Kalkerhärtung notwendige Luftzutritt (als Lieferant des  $CO_2$  für die Karbonatisierung) nicht ausreichend gewährleistet ist und diese Mörtel im Mauerwerksinneren bei hohen Feuchten und niedrigen Temperaturen zu langsam und unzureichend erhärten. Die Überschussfeuchte (Teil des Anmachwassers, welches chemisch nicht gebunden wird) wird nur sehr langsam abgegeben. Trasshaltige Mörtel können zusätzlich reaktionsfähige Bestandteile (Alkalien) ins Mauerwerk eintragen.



**Abb. 10**  
Packer in einer Lagerfuge

Die Injektion erfolgt über Packer oder Lanzen über die Fugen der frei zugängigen Mauerwerksschale (Abb. 10) oder von oben über die Mauerwerkskrone. Offene Fugen oder Fehlstellen in der Außenschale sind vorher temporär oder – wenn es die Zeit und das Budget zulassen – dauerhaft zu schließen. Für die temporäre »Verdämmung« haben sich feuchte Lehmpackungen bewährt, die kostengünstig sind, dem niedrigen Injektionsdruck standhalten und im Anschluss rückstandsfrei entfernt werden können.

Das fließfähige Injektionsmaterial benötigt zum Überwinden der Fließgrenze einen bestimmten Injektionsdruck (ca. 2 ... 4 bar = Niederdruckverfahren). Die Injektion erfolgt i. d. R. von unten nach oben, d. h. vom Mauerfuß in Richtung der Mauerkrone. Die Verfüllung der Packerreihe in einer Ebene kann abgeschlossen werden, wenn an den geöffneten Packern der darüber liegenden Bereiche Injektionsgut austritt. Die einzelnen Injektionsabschnitte müssen unter Berücksichtigung des hydrostatischen Drucks des frischen Injektionsmaterials und der Belastbarkeit des zu sanierenden Mauerwerksabschnitts bis zum Erhärten objektspezifisch festgelegt werden. Unter Umständen können temporäre Stützkonstruktionen notwendig werden.

#### 4 Vorversuche und Musterflächen

Für die detaillierte Maßnahme- und Kostenplanung sowie Entscheidungsfindung aller Baubeteiligten sind Vorversuche im Labor (u. a. Verträglichkeitsuntersuchungen und Versuche zur Hohlraumausfüllung – Abb. 11) und Musterflächen



**Abb.11**  
Vorversuche zur Hohlraumausfüllung mit Injektionsmörtel in Bruchsteinmauerwerk

am Objekt mit den favorisierten Mörteln und angepassten Techniken zu empfehlen. Daran können wesentliche technische, wirtschaftliche und optische Aspekte erprobt und bewertet werden – von der optimalen Ausräum-, Reinigungs- und Applikationstechnik bis zur gewünschten Oberflächenbearbeitung und den Nachbehandlungsfristen. Darüber hinaus lassen sich der Material- und Zeitbedarf konkretisieren.

## 5 Fazit

Mit dem Bestand angepassten Fugen- und Injektionsmörteln, geeigneten Verfugungs- und Injektionsverfahren können beeinträchtigte Natursteinmauerwerke fachgerecht saniert und konsolidiert werden. Das trägt maßgeblich zur Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit dieser Bauteile oder Bauwerke bei.

## Literatur

- [1] WTA-Merkblatt 3-12-99/D »Natursteinrestaurierung nach WTA-IV: Fugen«.
- [2] Ashurst, John; Dimes, Francis G.: Conservation of decorative stone. Volume 2, Butterworth + Heineman, London 1990.
- [3] Snethlage, Rolf: Leitfaden Steinkonservierung, Fraunhofer IRB Verlag 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, S. 122.
- [4] WTA-Merkblatt 4-3-98/D »Instandsetzung von Mauerwerk – Standsicherheit und Tragfähigkeit.
- [5] WTA-Merkblatt 4-4-04 D »Mauerwerksinjektion gegen aufsteigende Feuchtigkeit«.
- [6] WTA-Merkblatt 2-11-07 D »Gipsmörtel im historischen Mauerwerksbau und an Fassaden«.
- [7] Stürmer, Sylvia: Injektionsschaummörtel für die Sanierung historischen Mauerwerks unter besonderer Berücksichtigung bauschädlicher Salze. Dissertation Bauhaus-Universität Weimar, Fak. Bauingenieurwesen, Weimar 1997.

## Abbildungsnachweis

Abb. 1–3, 5–9, 11: Sylvia Stürmer

Abb. 4: nach: Ashurst, John; Dimes, Francis G.: Conservation of building and decorative stone, Volume 2 – Butterworth + Heinemann, London 1. Ausgabe 1990.

Abb. 10: Rolf Büchner

Gerhard Buchenau

## **BREMER DOM ST. PETRI**

### **Natursteinrestaurierung an Türmen, Westwerk und Strebebögen der Südfassade**

Beim Neubau 1890 eingebaute Horizontal-Anker aus Eisen hatten durch Korrosion und die damit einhergehende Volumenvergrößerung beträchtliche Schäden an der Sandstein-Fassade verursacht. Die Eisenteile wurden ausgebaut, wenn notwendig durch Edelstahl ersetzt und die Fehlstellen mit Vierungen und Antragungen geschlossen, wobei der Ausbau der Säulen und Kapitelle sowie der Bauteile der verglasten Rosette am Westwerk eine besondere Herausforderung darstellte.

Zusätzlich wurden konstruktive Sicherungsmaßnahmen an den Strebebögen der Südfassade durchgeführt.

### **Vorstellung der Maßnahmen aus Bauherrensicht**

Auszug aus dem gleichnamigen Tagungsbeitrag von Axel Krause, Leiter der Bauabteilung der Bremischen Evangelischen Kirche, anlässlich der Fachtagung »Natursteinsanierung, Stuttgart 2011« [1]

Als Planungsgrundlage entschied man sich zunächst für eine photogrammetrische Bestandsaufnahme der Türme und der Westfassade, die von einer 83 m hohen Arbeitsbühne aus erstellt wurde. Die Messbilder dienten als präzise Arbeitsgrundlage für Planung, Aufmaß und Dokumentation der Baumaßnahmen.

In enger Abstimmung mit der Denkmalpflege und der Materialprüfungsanstalt Bremen wurden folgende Maßnahmen geplant:

- Entfernen von Taubenkot, Reinigung
- Maßnahmen zur Salzreduzierung
- Fugensanierung des Sandsteinmauerwerks

- Reparatur schadhafter Sandsteine durch Austausch, Einbau von Vierungen oder Antragungen, Ausbau von verrosteten Eisenankern
- Reparatur bzw. Erneuerung von Architekturelementen (z.B. Kapitelle), Ersetzen der verrosteten Verankerungen durch Edelstahlanker
- Reparatur bzw. Erneuerung der Bleiverglasungen
- Einbau neuer Schallluken
- Einbau von Taubenschutz

Wegen des großen Umfangs (5000 qm Fassadenfläche) wurde die Sanierung in zwei Bauabschnitten durchgeführt:

- 2009 1. Bauabschnitt Südturm
- 2010 2. Bauabschnitt Nordturm und Westwerk

Auf diese Weise konnten Planungen und Erfahrungen aus dem 1. Bauabschnitt in die Bauvorbereitung und Ausführung des 2. Bauabschnitts einfließen. Zusätzlich wurden 2009 dringende Arbeiten an der Südfassade (Bibelpark) notwendig, die in den geplanten Ablauf eingepasst werden mussten.

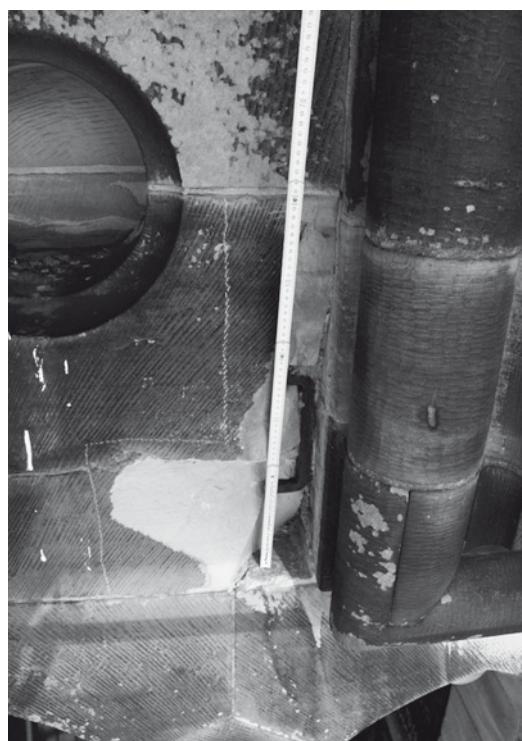
Für beide Bauabschnitte bestanden enge, zeitliche Begrenzungen:

Vom 20.–24. Mai 2009 fand der 32. Evangelische Kirchentag in Bremen statt, erst danach konnte mit dem Gerüstbau begonnen werden.

Der zweite Bauabschnitt musste bis Mitte September 2010 beendet sein, da am 3. Oktober der Eröffnungsgottesdienst zu den Feierlichkeiten zum Tag der deutschen Einheit im Dom gefeiert wurde.



**Abb. 1** Westfassade mit teilweise eingerüstetem Südturm



**Abb. 2** Schädigungen des Werksteins durch Volumenvergrößerung korrodiertener Eisenklammern

Bei Gesamtkosten der Maßnahme von ca. 1,4 Millionen Euro wurden 1,1 Millionen Euro als Eigenanteil von der Bremischen Evangelischen Kirche aufgebracht.

## 1 Bestand und Zustand

Zwei verschiedene Sandsteine finden sich an den Außenfassaden des Bremer St. Petri Doms: Der grau bis gelblichweiße Obernkirchener Sandstein wurde für Bögen, Säulen, Zwischengesimse und für die Ausschmückung mit Figuren und Ornamenten verwendet, der bräunliche Portasandstein füllt die Fassadenflächen aus. Dementsprechend waren die Schadensbilder an beiden Sandsteinen unterschiedlich: Obernkirchner Sandstein war durch Schmutzkrusten und Algenbelag teilweise stark angegriffen, Portasandstein war durch Salzeinwirkung stark geschädigt.

Ein weiteres Problem stellten beim Bau verwendete Eisenanker dar. Fast alle Sandsteinquader der Domtürme waren, vermutlich als Montagesicherung während der Bauzeit, mit U-förmigen, ca. 25 cm langen Eisenklammern miteinander verbunden. Dort, wo durch Vorschädigung am Mauerwerk Feuchtigkeit eindringen konnte, korrodierten diese und verursachten durch die damit einhergehende Volumenvergrößerung die Absprengung von Sandsteinteilen (Abb. 2). Besonders die Säulen und Kapitelle waren hiervon stark betroffen.

Zusätzliche Untersuchungen der Materialprüfungsanstalt Bremen (MPA) durch Öffnen unauffälliger Stellen ergaben, dass hier keine Korrosionsschäden zu verzeichnen sind.

Somit konnte die Sanierung auf die Bereiche mit äußerlich sichtbaren Schäden begrenzt werden.

## 2 Restauratorische Leistungen

### 2.1 Reinigung

Schwarze, dick aufblätternde Schmutzkrusten, Flechten- und Algenbewuchs sowie Taubenkot wurden mechanisch entfernt. Dabei wurde zunächst trocken, manuell mit Bürsten und Schabwerkzeugen gearbeitet, ohne die Oberflächenstruktur zu verletzen. Für harthäckig aufsitzende Flechten wurde auch eine maschinell betriebene Bürste eingesetzt. Danach wurde mit Wasser und Wurzelbürste oder mit dem Heißdampfreinigungsgerät nach gewaschen.

### 2.2 Schadsalzreduzierung

An den Blendarkaden der Südseite wurden Bohrmehlproben aus dem Portasandstein für quantitative chemische Salzanalysen entnommen, die in der Amtlichen Materialprüfanstalt Bremen (MPA) durchgeführt wurden. Zur Salzminde-

rung wurden Kompressen aus einem Bentonit-Zellulose-Gemisch aufgebracht. Anschließend wurde die Schadsalzeinlagerung in den Kompressen gemessen. Der Vorgang wurde, wo es nötig war, mehrmals wiederholt.

### 2.3 Festigung

Partiell wurde der Sandstein mit Kieselsäureethylester gefestigt.

## 3 Konstruktive Maßnahmen Ein- und Ausbau von Sonderbauteilen mit korrodierten Eisenteilen

### 3.1 Säulen und Kapitelle

Eine besondere Herausforderung stellte der Ausbau der Kapitelle und Säulen dar. Die Vermutung, dass auch hier die Volumenvergrößerung korrodiertes Eisen-Klammer für die Risse verantwortlich war, bestätigte sich nach Abnahme der Notsicherung (Abb. 3). Nach Vorgaben des beteiligten Tragwerkplaners wurde zunächst eine Abstützung eingebaut. Die Originalsubstanz sollte weitgehend erhalten bleiben, deshalb musste ein geeignetes Verfahren gefunden werden, die Fugen mit den zu erwartenden Eisendornen zu trennen. Nach reiflicher Überlegung wurden die Fugen mit einer Wandsäge aufgeschnitten (Abb. 4), was in der Ausführung nicht einfach war. Nach den Sägearbeiten konnten die nun getrennten Architekturelemente ausgebaut werden. Bei den folgenden Maßnahmen wurden zeitweise sechs Arbeitskräfte zeitgleich benötigt.

Nach dem Lösen der Abacusplatten konnten die Kapitelle gelöst und abgenommen werden (Abb. 5–7). Da sie durch eine Klammer verbunden waren, mussten immer beide Doppelkapitelle zusammen ausgebaut werden. Das Gewicht betrug ca. 135 kg. Nach Abnahme der Auflast mussten die ca. 190 kg schweren Säulen während des Ausbaus festgehalten werden.



Abb. 3 Korrodierte Eisenklammer im Kapitell



Abb. 4 Trennen der Fugen im Wandsägeverfahren zum zerstörungsfreien Ausbau der Kapitelle

Die nun sichtbaren Eisendorne, die das Potential für künftige Schäden aufwiesen, wurden ausgebaut und durch Edelstahl ersetzt.

Eine Säule am Ostfenster war bereits vor dem Ausbau gebrochen. Vermutlich war diese Säule bereits beim Bau in diesem beschädigten Zustand eingesetzt worden, denn die Bruchstelle war mit einem Eisendorn versehen und ausgebleit. Beim Neuaufbau wurde Edelstahl mit der Werkstoffnummer 1.4571 verwendet.

Nach der restauratorischen Instandsetzung der Einzelteile (Reinigung, Verklebung mit Epoxydharzkleber, Rissinjektion und -verschluss, Formergänzungen) konnte mit dem Wiedereinbau begonnen werden. Nachdem die Säulenbasen mit Edelstahldornen und Mörtel vorbereitet waren, wurden die Säulen eingelotet und aufgestellt. Dabei wurden diese durch Rohre eingespannt, damit sie beim Setzen



Abb. 5 und 6 Lösen der Abakusplatten und Ausbau der Kapitelle



Abb. 7 Die Kapitelle fielen nach dem Ausbau teilweise gleich auseinander.

der Kapitelle nicht verrutschen konnten. Durch das Aufstellen der Bauteile im Bestand konnte der letzte Dorn nur durch schräges Einbohren von außen eingesetzt werden.

### 3.2 Giebelspitze an der Ostfassade

Als weitere Problemzone erwies sich die Giebelspitze an der Ostfassade. Auch hier zeigte sich als Schadensursache, dass die Steine durch Rosttreiben der Klammern gesprengt worden waren. Die seitlich einbindenden Klammern mussten ausgebohrt werden, um den Eingriff in die Dachhaut zu vermeiden. (Abb. 8, 9)

### 3.3 Vorgelegte Säulen und Kapitelle an der Westfassade

An den vorgelegten Kapitellen und Säulen der Westfassade waren Risse zu erkennen, die genau wie bei den Bauteilen im Bereich der Besucherebene auf Rosttreiben hinwiesen. Zunächst wurden wieder im Wandsägeverfahren die Fugen aufgetrennt, um einen schadfreien Ausbau zu gewährleisten. Nach Freilegung des Kapitelleinbinders musste diese Vorgehensweise verworfen werden, da die Steine fast 40 cm einbinden (Abb. 10). Deshalb wurden hier zunächst die Säulen ausgebaut und gelagert. Die Kapitelle wurden durch Spannbänder gesichert. Als Möglichkeit des geringsten Eingriffs entschied man sich für das wand-



Abb. 8 und 9 Erkennbare Abplatzung im Giebelstein und dahinter liegende korrodierte Klammer



Abb. 10 Beim Bau des Domes wurde fast jeder Stein mit einer Klammer verankert.

Abb. 11 Ausgebaute Eisenteile

bündige Trennen des Kapitells. Nach Entfernung der Eisenklammer mussten die Teile unter erschwerten Bedingungen verklebt und vernadelt werden. Anschließend folgte die restauratorische Überarbeitung.

### 3.4 Ausbau von Eisenklammern in der Fläche

An den übrigen Säulen mit Rissen, die aufrostendes Eisen hinwiesen, wurden die Bereiche so substanzschonend wie möglich geöffnet, die Klammern durch Bohren freigelegt und ausgebaut. Nach dem Einbau der neuen Klammer wurden Vierungen eingesetzt. Genauso wurden nicht mehr benötigte Ösen ausgebohrt und die Fehlstellen mit Vierungen und ggf. Antragungen geschlossen (Abb. 11).

## 4 Steinaustausch

### 4.1 Porta-Sandstein aus Zweitverwendung

Der beim Bau verwendete Portasandstein ist seit vielen Jahren nicht mehr als Neumaterial zu beziehen, da der Steinbruch bereits vor Jahrzehnten den Betrieb einstellen musste. Im Gegensatz zu vielen anderen Natursteinen gibt es jedoch bisher keinen vergleichbaren Ersatzstein. Eine – jedoch unbefriedigende – Möglichkeit besteht in der Verwendung von Bockradener Sandstein, einer Varietät des Ibbenbürener.



Abb. 12 und 13 Steinmaterial aus Zweitverwendung: Lagerung, Transport und Verwendung auf der Baustelle

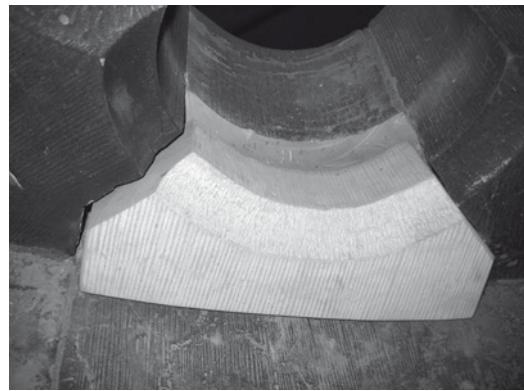
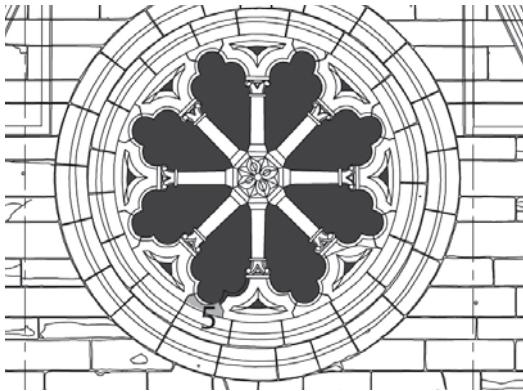


Abb. 14 und 14a Einsetzen einer Vierung und Kartierung in der Photogrammetrie

Aufgrund dieser Umstände ist es für die Restaurierung von Portasandsteinen sehr wertvoll, auf Altmaterial zurückgreifen zu können. Dieses auf der Blocklanddeponie gelagerte Material wurde uns vom Landesamt für Denkmalpflege zur Verfügung gestellt. Die Steine wurden in der Deponie ausgesucht, verladen und anschließend von einem Bohr- und Sägedienst in Delmenhorst zugeschnitten. Somit schreibt der Portasandstein bereits eine eigene kleine Geschichte, bevor er am Dom verarbeitet wurde.

Bei der Domrestaurierung wurde der Portasandstein größtenteils für unprofilierte Vierungen an der Fassadenfläche benötigt (Abb. 12, 13).

#### 4.2 Steinaustausch profiliert

In einzelnen Bereichen mussten Steine mit Profilierung ausgetauscht werden. Hierzu wurden zunächst am Objekt Schablonen hergestellt. Die Werkstücke wurden auf der Baustelle zugeschnitten und von Hand bearbeitet, dann eingesetzt und eingesetzt (Abb. 14, 14 a).

Auf farbliche Retuschen wurde bewusst verzichtet, damit die Reparaturarbeiten als Bestandteil des Baudenkmals sichtbar bleiben.

### 5 Verfugung

Die Verfugung musste bereichsweise erneuert werden. Zunächst mussten schadhafe Fugen manuell ausgearbeitet werden. Die Fugenflanken wurden mit Druckluft vorgereinigt und befeuchtet. Der verwendete Werk trockenmörtel wurde auf Empfehlung des Landesamts für Denkmalpflege und der MPA Bremen aufgrund langjähriger Erfahrung an ähnlichen Projekten vom Auftraggeber vorgegeben. Für die Farbgebung wurden vor der endgültigen Entscheidung jeweils Musterflächen angelegt.

### 6 Strebebögen Bibelgarten

Im Zuge der Untersuchungen der Strebebögen an der Süd fassade (Bibelgarten) wurden wir mit begleitenden Maßnahmen beauftragt. Zunächst wurden Eingriffe zur genauen Schadensfeststellung durchgeführt. Nachdem festgestellt worden war, welche Strebebögen durch rostende Anker oder sonstige Gefügestörungen geschädigt waren, wurde nach dem Maßnahmenplan des beteiligten Statikers ein Leistungskonzept erstellt und ausgeführt.

Im 1. und 4. Bogen konnte die MPA Bremen mittels magnetfeldgestützter Ortung Eisenteile finden, jedoch konnten keine Schäden an den Oberflächen festgestellt werden. Deshalb wurde hier nur eine Reinigung und Überarbeitung des Fugen netzes durchgeführt.

Anders am 2. Strebebogen. An den gebäudeseitigen Bogensteinen gab es starke Abplatzungen, deshalb waren Notsicherungsmaßnahmen und weitere Untersuchungen nötig (Abb. 15). Die Vermutung, dass hier in den 70er Jahren geplante Ankerbohrungen mit Eisenankern von innen in die Strebebögen eingebaut worden waren, bestätigte sich glücklicherweise nicht. Die gelbliche Masse, die zunächst für Epoxydharz gehalten wurde, erwies sich bei der Untersuchung der MPA Bremen als bauzeitliche Schwefelvergussmasse (Abb. 16).

Die Eisenteile wurden ausgebohrt und durch Edelstahldorne ersetzt. Danach mussten größere Fehlstellen mit Winkelementen ergänzt werden. Das benötigte Steinmaterial wurde auf der Deponie Blockland zusammengestellt und zum Transport grob zugearbeitet. Die steinmetzmäßige Endbearbeitung erfolgte auf der Baustelle. Beim dritten Strebebogen waren die Gefügestörungen zunächst nicht so offensichtlich, bei näherer Betrachtung wurde jedoch deutlich, dass das Fugennetz durch Spannungen und zu feste Mörtel erheblich gestört war. Durch eine Probeöffnung wurden große Hohlräume festgestellt. Die fehlende Anbindung wurde durch eine nachträgliche Verankerung an der Südwand hergestellt (Abb. 17, 18). Gefügestörungen der Bogensteine wurden durch Vertikahnadeln behoben, damit wieder ein druckfestes Gefüge entstand. Hiernach wurden die Mauerwerksbereiche mit Kalksuspension verfüllt.



Abb. 15 und 16 Schädigung von Steinen der Strebebögen durch Rosttreiben



Abb. 17 Vorbereitete Anker mit Verfüllschlauch und Abstandhalter

Abb. 18 Eingegebene Anker und eingesetzte Verfüllschläuche

## 7 Westwerk

Im Zuge der Arbeiten am Nordturm im Sommer 2010 sollte auch das Westwerk (Abb. 19) restauriert werden. Hierfür lagen, anders als bei den Türmen, keine Untersuchungsergebnisse vor, da der innere Bereich ohne Gerüst nicht zugänglich war. Direkt an der Innenseite des Westwerks befindet sich die große Sauer-Orgel, was die Arbeiten an der Rosette erheblich beeinflusste (Abb. 20). Der Orgelbauer baute einige Register (Holz-Pfeifen bis 11 m Höhe) aus. Das Gerüst musste durch Fensteröffnungen von außen nach innen gebaut werden (Abb. 21, 22). Da ein Einhausen der Orgel wegen ihrer beträchtlichen Größe nicht möglich war, wurde ein Staubschutz-Konzept mit doppelter Folienabdeckung und abso-

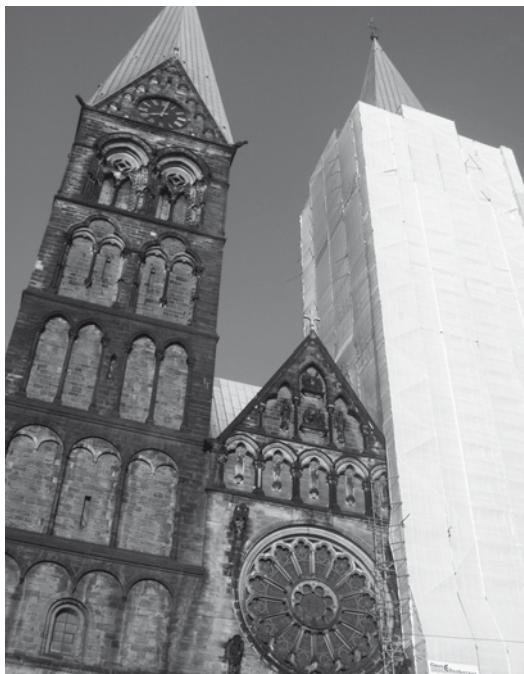


Abb. 19 Westansicht mit eingerüstetem Südturm. Am Nordturm ist die Gliederung der Fassade durch Obernkirchner- und Portasandstein erkennbar.



Abb. 20 Innenansicht der Westrosette mit vorgebauter Orgel

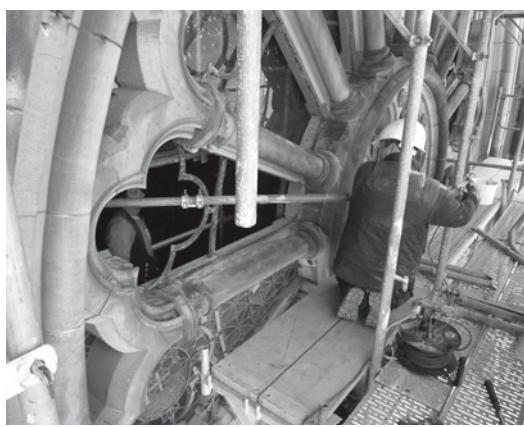


Abb. 21 und 22 Gerüstbau mittels Abhängung des Gerüstes durch ausgebaute Fenster



Iut dichtem Wandanschluss ausgeführt (Abb. 23, 24). Vom Gerüst aus konnte man jetzt die Schäden an der Innenseite erkennen. Das Glas am Rosettenfenster musste komplett neu eingebaut und teilweise ersetzt werden. An mehreren Säulen der Rosette waren Risse und Abplatzungen zu sehen. Es stellte sich heraus, dass der Stahlhalterung in der Mitte des Rosettenfensters innerhalb der Sandsteinsäulen stark korrodiert war. Die aus Temperaturdifferenz resultierende Längenänderung des Stahlrings hatte Spannung erzeugt, wodurch Risse in den Fugen entstanden waren. Die nun eindringende Feuchtigkeit ließ den Stahl im Inneren des Steins korrodieren, was zu größeren Schäden an den Sandsteinsäulen führte (Abb. 25, 26). Deshalb wurde entschieden, den Stahlring auszubauen.

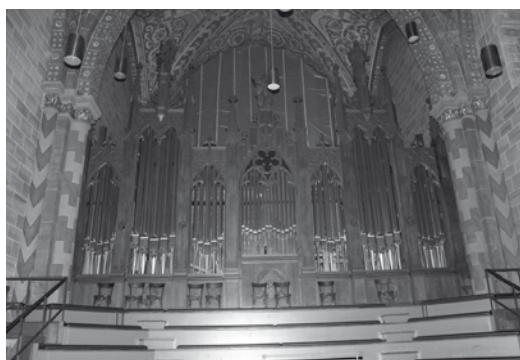


Abb. 23 Staubschutzwand hinter Orgelprospekt

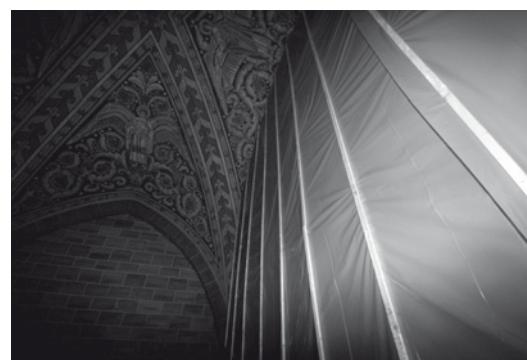


Abb. 24 Staubschutz Detail



Abb. 25 und 26 Absprengung am Sandstein durch Rost



Abb. 27 Zum Ausbau freigelegter Eisenring

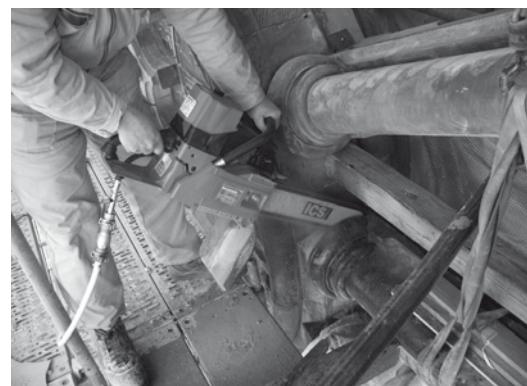


Abb. 28 Freischneiden einer gebrochenen Säule

Hierfür musste aus jeder Säule eine Vierung ausgeschnitten werden (Abb. 27). Eine der Säulen war gerissen und musste komplett ausgebaut werden (Abb. 28 und 29). Die Bruchstellen wurden für die bessere Haftung des Epoxyklebers aufgespitzt und mit Edelstahlnadeln versehen. Beim Wiedereinbau wurden die Anbindungen wieder mit Blei vergossen. Hierfür wurde ein Bleivergusskreuz in die Vierung eingearbeitet (Abb. 30). Die Fuge wurde mit Blei eingegossen, eine Trennschicht aus Bleiwolle verhinderte die Reaktion des heißen Materials mit dem feuchten Ton. Abschließend wurde die Fuge mit Bleiwolle nachgedengelt.

Der ca. 12 m lange Haltering aus geschmiedetem Rechteckstahl 40/15 mm wurde entrostet, grundiert und beschichtet. Um nicht den gleichen Fehler zu begehen wie bei der ursprünglichen Konstruktion, gab es einige Überlegungen. Schließlich wurde der Ring in vier Teile geteilt und die Schnittstellen jeweils mit einer Langlochplatte versehen, um künftig Spannungen bei temperaturbedingter Längenänderung des Stahls zu vermeiden. Nach Einbau des so bearbeiteten Halterings wurden die Fehlstellen an den Säulen durch Vierungen geschlossen. Die Stücke wurden auf der Baustelle zugeschnitten, steinmetzmäßig zugearbeitet und passgenau eingefügt (Abb. 31).

Danach wurde das Glas komplett neu eingebleit und zum Schluss wurden Edelstahlnetze zur Taubenabwehr angebracht.



Abb. 29 Schadensanalyse



Abb. 30 Vorbereitete Vierung mit Bleivergusskanal



Abb. 31 Eingebaute Stahlbauteile mit fertigen Vierungen



Abb. 32 Restaurierte Westrosette

Um einen reibungslosen Ablauf zu garantieren, war die Koordination der Arbeiten zwischen Orgelbauer, Gerüstbauer, Tischler, Steinmetz, Glaser und Maurer bei dieser Maßnahme besonders wichtig.

## Literatur

- [1] Krause, Axel: St. Petri Dom, Bremen. Vorstellung der Maßnahmen aus Bauherrensicht. In: Patitz, Gabriele; Grassegger, Gabriele; Wölbert, Otto (Hrsg.): Naturstein- sanierung: Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfas- sungen sowie Sanierungsbeispiele: Tagung am 25. März 2011 in Stuttgart. Stuttgart 2011, S. 55–67.

## Abbildungsnachweis

Alle Abbildungen stammen vom Autor.

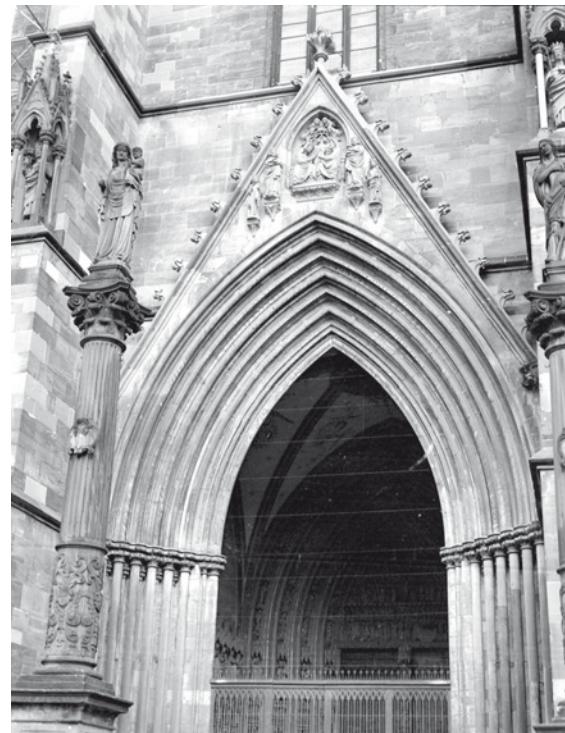


Yvonne Faller

## DAS FREIBURGER MÜNSTER

Das Freiburger Münster ist ein Kulturdenkmal von überregionaler Bedeutung. Bekannt wegen seines einzigartigen Turms (»Der schönste Turm auf Erden«), zählt es zu den wenigen bedeutenden gotischen Kirchenbauten, die noch im Mittelalter – einschließlich des Turms von 1330 – fertiggestellt wurden. Darüber hinaus birgt es in seinem Inneren eine große Fülle von wertvollen Kunstwerken, da das Bauwerk nahezu unversehrt die zahlreichen Kriege überstand.

Es wurde um 1200 im romanischen Stil begonnen. Stifter des Bauwerks war Herzog Berthold V., aus dem Geschlecht der Zähringer, der Stadtgründer Freiburgs.



**Abb. 1**  
Blick zum Hauptportal

Architektonisches Vorbild war das Basler Münster, die damals bedeutendste und modernste Bischofskirche am Oberrhein.

Aus dieser Bauperiode stammen heute noch das Querhaus mit der Vierung und der Vierungskuppel sowie der untere Teil der beiden angrenzenden Hahnentürme. Nach dem Tod des Herzogs und dem Aussterben des Zähringergeschlechts baute man das Freiburger Münster im gotischen Stil weiter. Zunächst entstanden die beiden Ostjoche, dann die Westjoche und der Turm mit der einzigartigen durchbrochenen Pyramide, eine der größtartigsten Leistungen, die die europäische Gotik hervorgebracht hat. Im spätgotischen Stil wurde der Chor wahrscheinlich nach dem Entwurf Johannes von Gmünd aus dem berühmten Bauherrengeschlecht der Parler errichtet. Die Weihe des Chors war 1513.

Nach dem Ausscheiden der Herrschergeschlechte der Zähringer und der Grafen von Freiburg als Bauherren, lag ab Ende des 13. Jahrhunderts der Kirchenbau ganz in den Händen der Stadt. Das Münster wurde damit Sache der Bürger, die mit großem Eifer den Ausbau förderten und das Bauwerk durch reiche Stiftungen ausstatteten. Sie schufen im Laufe von Jahrhunderten die großartige Kirche mit ihrer Überfülle von Altären, Glasfenstern und Skulpturen. 1821 wurde Freiburg zum Sitz des Erzbistums bestimmt. Das Freiburger Münster, die bisherige Pfarrkirche, wurde damit zum Bauwerk vom höchsten kirchlichen Rang, zur Bischofskirche. Bis heute ist das Münster im Eigentum des Münsterfabrikfonds, der mittelalterlichen Bürgerstiftung.

## **1 Freiburger Münsterbauverein e. V.**

Der Freiburger Münsterbauverein e. V. wurde 1890 gegründet. Er ist verantwortlich für den Erhalt des äußeren Steinwerks. Zur Bewältigung dieser Aufgabe betreibt er einen eigenen Steinmetzbetrieb, die Münsterbauhütte.

1889 hatte eine Gutachterkommission den bedrohlichen Bauzustand des Freiburger Münsters festgestellt. Da der Eigentümer des Freiburger Münsters, der Münsterfabrikfonds – eine mittelalterliche Stiftung – die finanziellen Mittel nicht aufbringen konnte, rief der damalige Oberbürgermeister Dr. Otto Winterer in einem dringenden Appell die Freiburger Bürger zu einer Vereinsgründung auf.

Dem Verein schlossen sich spontan ca. 4 000 Bürger an. Durch Mitgliedsbeiträge, Spenden, Vermächtnisse, vor allem aber durch das Ausspielen von Münsterbaulotterien konnten nach einigen Jahren die Restaurierungsarbeiten aus den Zinserträgen finanziert sowie auch die baugeschichtliche Forschung bestritten werden. Der Verein legte eine bedeutende Sammlung von ca. 3 000 Gipsabgüssen von Architekturteilen und Skulpturen des Freiburger Münsters an.

Die beiden Weltkriege führten zum wirtschaftlichen Niedergang des Vereins. Heute ist der Freiburger Münsterbauverein bei seiner Aufgabe, die Bauunterhaltung des Freiburger Münsters durchzuführen, auf öffentliche Zuwendungen

angewiesen. Zuwendungsträger sind das Erzbistum Freiburg, das Land Baden-Württemberg sowie die Stadt Freiburg. Einen beträchtlichen Teil trägt der Münsterbauverein durch Mitgliedsbeiträge, Spenden und Vermächtnisse bei.

## 2 Freiburger Münsterbauhütte

Die Freiburger Münsterbauhütte ist ein seit über 800 Jahren existierender Steinmetzbetrieb, der die Erhaltung und Sanierung des Steinbauwerks des Freiburger Münsters durchführt. Sie geht auf eine mittelalterliche Stiftung der Herzöge von Zähringen zurück. Im Mittelalter wurde von der Werkstattgemeinschaft der Bauhütte das Münster geplant und gebaut. Nach seiner Fertigstellung sorgte die Bauhütte für die Sicherstellung und Unterhaltung des Bauwerks.

Eine wichtige Aufgabe der Münsterbauhütte besteht heute darin, die gesamte Oberfläche des Münsters einmal jährlich abzufahren und auf neue Schäden zu überprüfen. Stein für Stein wird über fotogrammetrische Aufnahmen festgehalten und das Schadensbild in digitale Pläne umgewandelt; auch historisch relevante Spuren wie Steinmetzzeichen oder mittelalterliche Bearbeitungsreste werden dokumentiert. Nach der Bewertung der gesammelten Informationen durch Denkmalpfleger, Bauforscher, Steinmetze, Restauratoren und Kunsthistoriker werden die entsprechenden Sanierungsmaßnahmen geplant und festgehalten.

Da der Steinersatz stets die Ultima Ratio darstellt, nehmen die Konservierung und Erhaltung eine wichtige Rolle im Tätigkeitsbereich der Münsterbauhütte



Abb. 2 Beschädigte Königsskulptur, Langhaus Westseite



Abb. 3 Steinmetz beim Neuschlagen einer Apostelfigur

ein. Die Sanierungsarbeiten der Steinmetze und freischaffenden Restauratoren reichen von der Reinigung der Steinoberfläche durch Strahlen mit feinem Glas-pudermehl über die Konservierung mit Kieselsäureester und Restauriermörtel bis hin zur Überprüfung der Wirksamkeit und Nachhaltigkeit der Eingriffe.

Erst wenn die Steinsubstanz so stark geschädigt ist, dass eine Sanierung nicht mehr möglich ist, wird entweder ein Teilstück mit einer Vierung ersetzt oder das Werkstück bzw. die Skulptur neu geschlagen. Dank einer umfangreichen Sammlung von Gipsabgüssen aus der Zeit um 1900 ist es möglich, die zur Unkenntlichkeit verwitterten Formen originalgetreu wieder herzustellen.

Neben der Planung und Durchführung der Restaurierungsmaßnahmen sowie der Arbeit am Stein gehört auch der Auf- und Abbau der Gerüste sowie die Wahl der entsprechenden Gesteinsarten zum vielseitigen Aufgabengebiet der Münsterbauhütte.

Heute sind in der Münsterbauhütte insgesamt ca. 15 Steinmetze beschäftigt. Die Mitarbeiter der Bauhütte sind hochqualifizierte Spezialisten, die die traditionellen, seit Generationen überlieferten Steinmetztechniken beherrschen. Um den Charakter der alten Steinbearbeitung zu wahren, werden die Kopien noch heute mit den traditionellen Werkzeugen hergestellt und versetzt. Fialen, Kreuzblumen, Knäufe und Bauteile, die im Mittelalter verbleit wurden, werden auch heute so versetzt.



**Abb. 4**  
Sanierte Strebepfeileraufsätze auf der Südseite

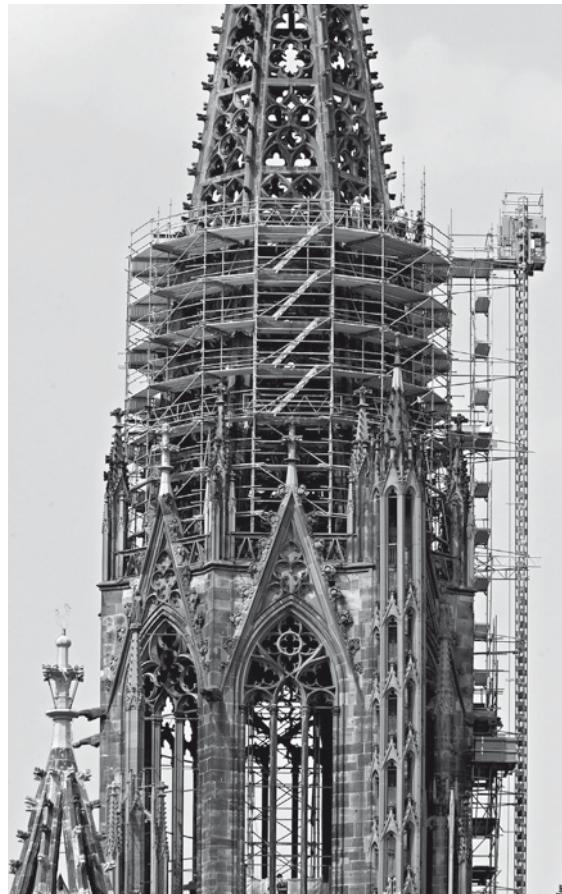
Gleichzeitig erweist sich die Bauhütte als ein moderner Arbeitsbetrieb, in dem wirtschaftlich und nach den neuesten technischen Erkenntnissen gearbeitet wird.

### 3 Turmsanierung

Eine große Herausforderung für die Münsterbauhütte stellt aktuell die Sanierung des mittelalterlichen Turmhelmes dar. Erstmals wurde in Freiburg diese filigrane und kühne Maßwerkkonstruktion errichtet und bereits um 1330 vollendet.

Der 45 Meter hohe Maßwerkhelm besteht im Wesentlichen aus den acht leicht geneigten Streben und den dazwischen gelegten sieben Maßwerkgeschossen. Die Verbindung zwischen vertikalen Streben und den Riegelsteinen der Maßwerkgeschosse besteht aus eisernen Ringankern. Diese noch original erhaltenen Ringanker setzen sich aus Ankerstangen und Ankerringen zusammen, die jeweils in Stein eingelegt wurden.

Nach 700 Jahren sind nun an den Knotenpunkten, dort wo die Ringanker in die Ecksteine eingeführt werden, Risse festzustellen. Es sind vor allem die Windkräfte, die dazu führten, dass der Stein an diesen Stellen nachgibt.



**Abb. 5**  
Der eingerüstete Westturm des Münsters

Um für dieses herausragende Bauwerk ein nachhaltiges und der Konstruktion entsprechendes statisches Sanierungskonzept zu entwickeln, wurde in einer interdisziplinären Arbeitsgruppe die Fachkompetenz von Spezialisten zusammengefasst. Die unterschiedlichsten Lösungsansätze wurden zunächst ausführlich diskutiert, überprüft und bestätigt oder verworfen [1].

Nach aufwändigen Untersuchungen wurde beschlossen, dass die gerissenen Ecksteine je nach Grad der Schädigung entweder mit Bandagen gestützt oder komplett ausgetauscht werden. Da auf die einzelnen Punkte Lasten von mehreren Tonnen einwirken, ist der Austausch nur mit Hilfe von Ersatzkonstruktionen möglich.

Nachdem die steinkonservierenden Arbeiten am Turmhelm nahezu abgeschlossen sind, kann nach weiteren Vorbereitungen im Frühjahr 2013 mit dem Austausch und der Bandagierung der Ecksteine begonnen werden.

## **Literatur**

- [1] Barthel, Rainer; Kayser, Christian; Jagfeld, Matthias; Tutsch, Joram: Baukonstruktive und statische Untersuchungen am Turmhelm des Freiburger Münsters. In: Patitz, Gabriele; Grassegger, Gabriele; Wölbert, Otto (Hrsg.): Natursteinsanierung: Neue Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele: Tagung am 16. März 2012 in Stuttgart. Stuttgart 2012, S. 137–157.

## **Abbildungsnachweis**

Abb. 1–4: Münsterbauverein

Abb. 5: Karl-Heinz Raach

## AUTOREN

### **Dipl.-Ing. Andreas Bewer**

Bewer Ingenieure, Neuhausen a. d. F. (Region Stuttgart)

### **Dr.-Ing. Andreas Bruschke**

MESSBILDSTELLE GmbH, Dresden

### **Gerhard Buchenau**

Claus Ellenberger Bau GmbH, Herleshausen  
Abteilung Restaurierung und Denkmalpflege

### **Dipl.-Ing. Yvonne Faller**

Freiburger Münsterbauverein e.V., Freiburg

### **Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht**

Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB)

### **Dr.-Ing. Gabriele Patitz**

IGP Ingenieurbüro für Bauwerksdiagnostik und Schadensgutachten, Karlsruhe

### **Prof. Dr.-Ing. Erwin Schwing**

Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft, Fakultät Architektur und Bauwesen

### **Prof. Dr. Georg Skalecki**

Landesamt für Denkmalpflege Bremen

### **Prof. Dr.-Ing. Sylvia Stürmer**

HTWG Konstanz, Fakultät Bauingenieurwesen

ISBN 978-3-8167-8803-4



9 783816 788034

Schriftenreihe zur Denkmalpflege  
Herausgegeben von Erhalten historischer Bauwerke e. V.  
Band 4

