



# forschung + technologie

Tragwerksanalyse bei Gewölbedecken  
ein mobiles Messsystem



Guericke  
Ingenieurgesellschaft



{1} Titelseite: Gewölbestrukturen der Kirchen Hohen Viecheln, Russow, Hohenkirchen

{2} Abbildung des Versuchsgewölbes, das zu Forschungszwecken errichtet und zerstört wurde im Rahmen eines Forschungsvorhabens der Hochschule Wismar unter Federführung von Prof. Dr. Guericke.

## 01. Aufgabenstellung

### Ergebnisse

Die Schadenserfassung und -bewertung sowie Sanierungsdurchführung ist von erheblicher technischer und wirtschaftlicher Bedeutung für Eigentümer, Stiftungen und andere Rechtsträger, die verantwortlich sind für die Sicherheit, Unterhaltung und Nutzung historischer Bauwerke.

- » Ein erheblicher Teil der betreffenden Bauwerke, geschätzt 20%, benötigen eine Aussage zur Tragsicherheit, um vorsorgliche Nutzungssperren oder Gefahr für die Benutzer abzuwenden. Die Kirche Pässe, um nur ein Beispiel aus der Region zu nennen, wurde auf Grund von Schäden an den Gewölben vorsorglich gesperrt. Als Ergebnis der Verformungsmessung sind wir in der Lage, Aussagen zum Resttragverhalten geschädigter Gewölbekonstruktionen zu treffen.
- » Die Messdaten, die mit dem mobilen Prüfsystem gewonnen werden, lassen präzise Aussagen zum Sanierungsumfang und dem zeitlichen Ablauf von Sanierungsmaßnahmen zu. Je nach dem Grad der Schädigung können zunächst Notmaßnahmen geplant, eine Sanierung in Bauabschnitten umgesetzt oder eine Grundsanierung angestrebt werden.
- » Die zur Sanierung notwendigen Mittel öffentlicher Haushalte und die finanziellen Ressourcen von Stiftungen und Förderern können besser geplant und zielgerichteter eingesetzt werden.

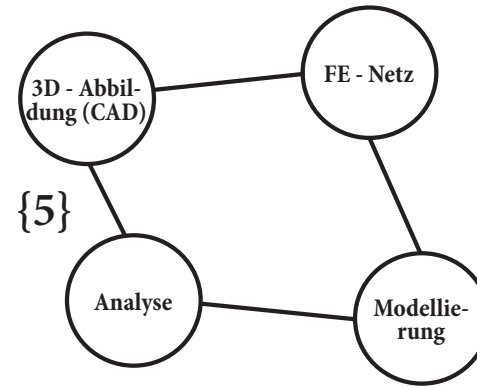
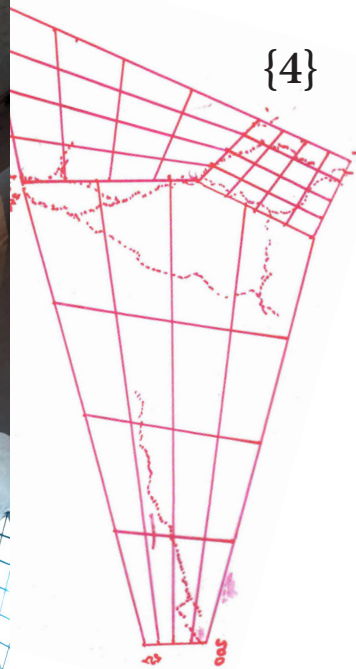
- » Durch den erheblich kostensparenderen Einsatz unseres Messsystem werden wir langfristig in der Lage sein, flächendeckende Untersuchungen auch in dem noch nicht gefährdeten Bestand durchführen zu können.

### Einsatz

Auf Webseiten finden sich Bauwerke mit Gewölbe-konstruktionen unter den Rubriken „Kirchen und Klöster“, „Schlösser-/Herrenhäuser“, Rats-/Bürgerhäuser“, „Arkaden- und Kreuzgänge“, „historische Brückenkonstruktionen“ und „Tore/Türme“. Ausgehend von der dargestellten Katalogisierung kann eine Zahl von 1000 historischen Bauwerken allein in Mecklenburg-Vorpommern angenommen werden, die für das beschriebene mobile Messsystem relevante Gewölbedeckenstrukturen aufweisen.

### Bedarf

Aus den Erfahrungen als Ingenieurbüro mit Tätigkeit in der Tragwerksplanung wie auch bei der Erstellung von Sanierungsgutachten und der Sanierungsdurchführung, kann bei einer geschätzten 20%-igen Schadensquote mit einem potentiellen Auftragsvolumen von 200 Bauwerken nur für die Region Mecklenburg-Vorpommern gerechnet werden. In den anderen Bundesländern ist die Situation vergleichbar.



- {3} Teilansicht einer Gewölbekappe mit den Scanlinien für das Lasermessgerät
- {4} Projektionsmaske für ein Kappensegment mit Rißschädigungen
- {5} Schematische Darstellung des Arbeitsablaufes für eine Gewölbeuntersuchung

## 02. mobiles Messsystem

Ingenieure entwerfen, planen und konstruieren heute am Computer, indem Modelle virtuell nachgebaut werden. Mit variierenden Vorgaben und Annahmen können neue Situationen berechnet, analysiert und visualisiert werden. Die Ergebnisse der Berechnungen lassen Rückschlüsse zu, ob das Gewölbe tragfähig oder einsturzgefährdet ist: mobil, schnell und effektiv.

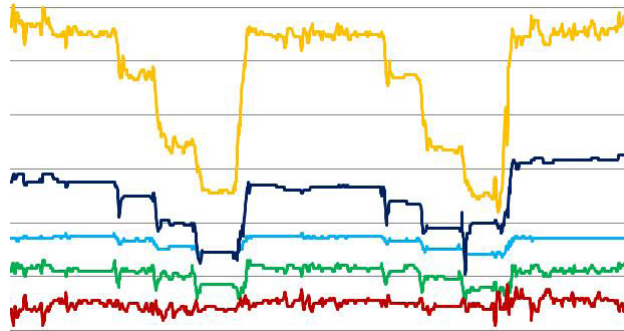
Was einfach klingt ist in der Realität und bei der Abbildung im Modell ein komplexes Wechselspiel verschiedener Faktoren. Kleinste Veränderungen haben Einfluß auf das Ergebnis im Gesamtsystem. Zwei Faktoren sind dabei von erheblicher Bedeutung:

- » Sind die gemessenen Werte im System korrekt wiedergegeben und nicht verfälscht durch andere Einflussfaktoren, wie Wind, Temperatur, Vibration.
- » Interpretieren wir die angezeigten Werte bei der Analyse zutreffend beziehungsweise sind die Berechnungen überprüfbar, bewiesen.

Am Beispiel der Kirche St. Georg in Ratzeburg wird die Vorgehens- und Arbeitsweise des mobilen Messgerätes erläutert.



{6}



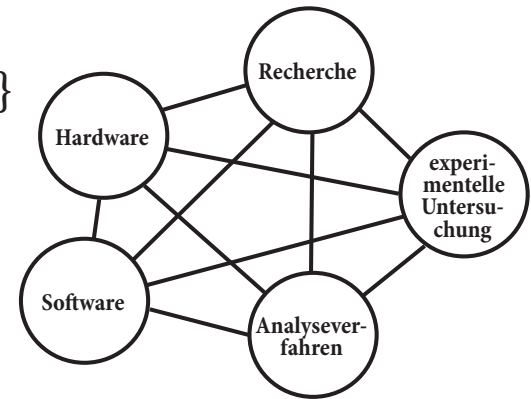
Mittelwerte

Beschreibung	Zeitraum		Belastungsort				Lasten				
	von:	bis:	Schleife 2-1	Schleife 2-2	Schleife 2-3	Schleife 2-4	Schlussstein	f	x	a	Summe [kg]
Nullmessung	00:00:01	00:01:38									0
1. Laststufe	00:01:48	00:02:49	x							x	91,8
2. Laststufe	00:03:07	00:04:10	x							x x	166,7
3. Laststufe	00:04:23	00:05:27	x							x x x	249,2
Nullmessung	00:06:34	00:10:50									0
1. Laststufe	00:12:23	00:13:25	x							x	91,8
2. Laststufe	00:13:43	00:14:44	x							x x	166,7
3. Laststufe	00:14:58	00:16:02	x							x x x	249,2
Nullmessung	00:16:31	00:21:23									0
1. Laststufe	00:22:12	00:23:13	x							x	91,8
2. Laststufe	00:23:27	00:24:29	x							x x	166,7
3. Laststufe	00:24:44	00:25:45	x							x x x	249,2

{8}

- {6} Diagramm der Verformung bei vier Satteln plus Schlussstein unter Belastung
- {7} schematische Darstellung des Optimierungsprozesses beim mobilen Messsystem
- {8} tabellarische Erfassung der Messwerte der Wegaufnahme

{7}



### 03. Schematische Darstellung

#### Aufmass

In den wenigsten Fällen existieren bei historischen Gewölbedecken Bauzeichnungen oder statische Berechnungen. Um in einem Computermodell das Gewölbe 3-dimensional abbilden zu können, wird ein Aufmass benötigt.

#### FE-Netz

Ein 3-D-Modell ist für eine statische Berechnung viel zu komplex. Für eine Tragwerksuntersuchung werden Detailbetrachtungen von bestimmten Elementen, z.B. das Auflager, notwendig und zu komplexe Darstellungen verlangsamen unnötig die Rechen- und Darstellungsmöglichkeiten der Software. In einem FE-Modell werden jetzt bestimmte Zustände „idealisiert“: Formen werden vereinfacht und geglättet, bestimmte Teilflächen werden höher aufgelöst (gerastert) dargestellt und nur die für die Berechnung massgebenden Elemente dargestellt, es wird segmentiert.

#### Modellierung

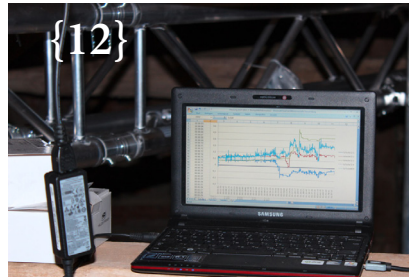
Unter diesem Begriff versteht man die Verbindung von Annahmen und Zuständen mit dem 3-D-Modell (FE-Modell). So, wie bei einer virtuell konstruierten Figur diese Haare, Kleidung und

Hautfarbe erhält, bekommt unser Gewölbemodel die physikalischen Gegebenheiten der Baustoffe und Herstellungsverfahren zugeordnet, die Schäden werden genauestens dargestellt und um Eigenlasten, Auflagerverschiebungen oder auch Einflüsse von Wind auf das Dach oder den Glockenstuhl ergänzt.

#### Analyse

Das Ergebnis müsste sich jetzt eigentlich schon aus dem Programm heraus ergeben. Tatsächlich ist dem aber nicht so und es werden nach wie vor Wissen und Erfahrung der Ingenieure zur Auswertung benötigt. Risse sind nicht gleich Risse und auch die Baustoffe und Bauverfahren haben sich über Jahrhunderte verändert.

Und genau hier setzen unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an. Die Erkenntnisse aus wissenschaftlichen Forschungsarbeiten und aus der 15-jährigen Berufstätigkeit bei der Sanierung von Kirchengewölben wurden verdichtet und so verschlankt, daß ein Messsystem entstand, das nicht nur mobil ist, sondern auch zerstörungsfrei Daten über den Umfang von offensichtlichen und versteckten Schäden liefert.



- {9} Lasermessgerät
- {10} Nullpunkteinstellung
- {11} Traverse zur erstütterungsfreien Montage der Messgeräte
- {12} Computer zur Anwendungssteuerung
- {13} USB-Hub für den Datentransfer
- {14} Wegaufnehmer

## 04. Prozessoptimierung

Eine Prozessoptimierung besteht in der Kunst der Vereinfachung, dem bewussten Weglassen von Details. Eine Vereinfachung ist aber nur dann zulässig, wenn die dem Modell zugrundeliegenden Daten im Programm korrekt dargestellt werden und Annahmen (Lasteintrag, Resttragfähigkeit, Bausubstanz) bewiesen, überprüfbar sind.

### Hardware

Aus einer Vielzahl auf dem Markt angebotener Messverfahren war dasjenige herauszufiltern, das mit hinreichender Genauigkeit einfach zu bedienen und flexibel einzusetzen ist. Das Scannen eines Risses erfordert nun nicht das Aufmass einer gesamten Kirche. Andererseits kann sich im Rahmen der Untersuchung heraus kristallisieren, daß weitere Gewölbeselemente oder Bauteile zu erfassen sind. Das Setzen eines Nullpunkt, die Möglichkeiten zur verzerrungsfreien Kaskadierung und der Koordinatenfindung im Modell war eine wesentliche Aufgabenstellung.

### Software/FE-Netz

Neben dem Aufmass konnten durch Projektionsflächen im Gewölbe die Scannvorgänge automatisiert werden. Ein Zuviel oder auch ein Zuwenig an Messdaten hat eine erhebliche Auswirkung auf die Verarbeitungszeit sowohl beim Aufmass als auch bei der Erstellung des FE-Netzes.

Ein Schnittstellenprogramm zur Übernahme der Aufmasskoordinaten beschleunigt den Erfassungsvorgang und erleichtert die nachträgliche Erfassung oder Bearbeitung von Werten.

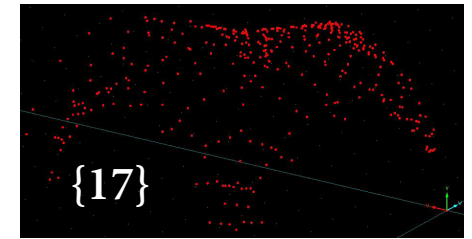
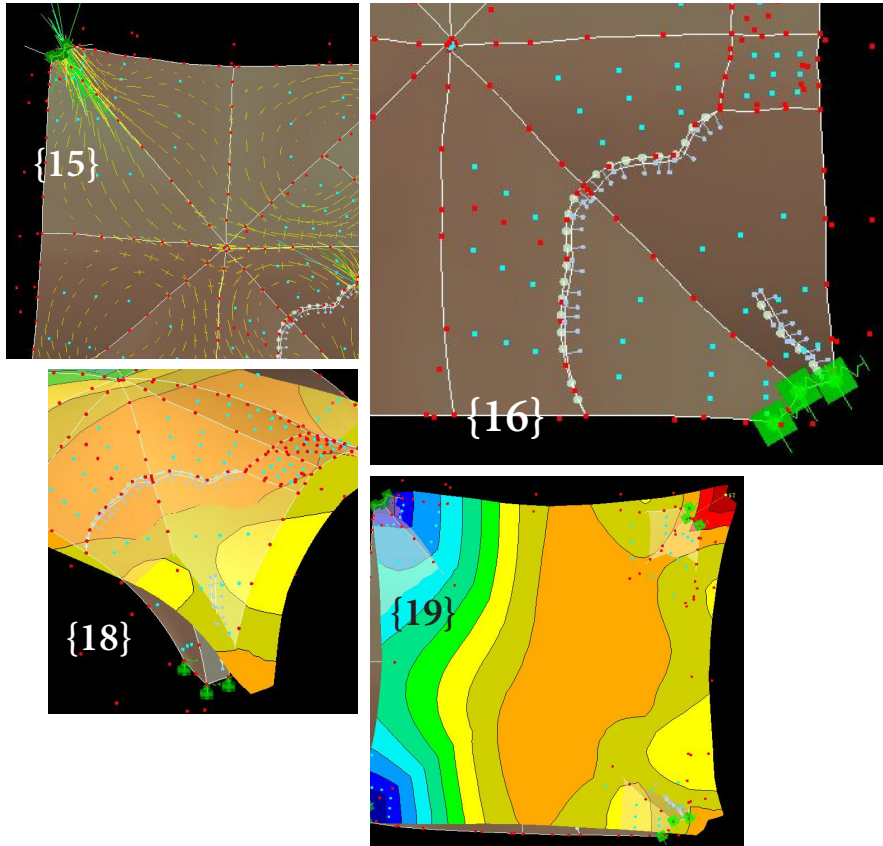
### experimentelle Überprüfung/Beweisführung

Ein besonderes Augenmerk galt der „Rekonstruktion“ von Verformungen. Ein vollkommen neu errichtetes Gewölbe wurde zu Versuchszwecken zerstört. Konsequenterweise galt es nunmehr zur Komplementierung der Stoffmodelle unter verschiedensten physikalischen Einflüssen Verformungen der Gewölbe zu messen. Benötigt wurden zwei Einheiten, die es zu entwickeln und zu testen galt: die Belastungseinheit und die Verformungsmessung.

Mit diesen als Prototypen existierenden Messeinrichtungen sind wir nun in der Lage, die nicht-linearen Stoffmodelle weiter fortzuschreiben, als auch Aussagen über die Art der Verformung zu treffen.

### Recherche

Die begleitende wissenschaftliche Forschung nach alten Baurichtlinien, -bestimmungen und Verfahren ermöglichen den Aufbau einer Datenbank, die das Analyseverfahren nicht nur optimiert, sondern erstmalig auch die Grundlagen für die Kalibrierung und Evaluierung des Modells im REFM-Programm liefert.



- {15} Kraftverlauf am unbeschädigten Segment
- {16} Darstellung der Gelenkausbildung bei den Rissen
- {17} Punktwolke im FE-Netz
- {18} grafische Darstellung der Verformung in der Draufsicht
- {19} Verformungsdarstellung mit Lastabtrag zum Auflager

## 05. Analysen

Am Beispiel der Gewölbeuntersuchung der Kirche St. Georg in Ratzburg werden einige Auswertungen und Erkenntnisse dargestellt:

Die abgebildete Gitterwolke zeugt hinreichend davon, dass ein Zuviel an Werten vorliegt. Bereits bei den Aufmassarbeiten wird festgelegt, wieviele Punkte auszuwerten und damit zu erfassen sind. Offensichtlich ungeschädigte Flächen vielleicht nur mit 3x3 Punkten, geschädigte (Haarnadelrisse) mit mehr Punkten und dem Verlauf eines Risses wird natürlich mehr Aufmerksamkeit geschenkt.

Die Software ermöglicht die Anzeige, wie die Lasten von den Auflagern aufgenommen werden. In den unbeschädigten Teilen sieht man deutlich, dass der Lasteintrag gleichförmig geschieht. Da die Kappe im Bild 2-dimensional dargestellt ist, verlaufen die Kraftlinien leicht geschwungen.

Die vollflächig farbigen Bilder veranschaulichen, dass die mit Rissen durchzogene Kappe die Lasten „durchreicht“, die Kräfte der zerstörten Kappe also vom gegenüberliegenden Auflager getragen werden müssen. An dieser Stelle besteht die Gefahr eines lokalen Tragwerkversagens.

Nicht dargestellt sind die Ergebnisse bei der Aufbringung definierter Belastungen. Sie ermöglichen es, Verformungen in der Bewegung darzustellen und Aussagen zur Resttragfähigkeit geschädigter Gewölbe zu treffen.

## 06. Unternehmen

Die Arbeiten werden innerhalb der Organisation der Guericke Ingenieurgesellschaft mbH umgesetzt.

### Rechtsform, Geschäftsführung

Herr Prof. Dr.-Ing Bernd Guericke gründete im Jahre 2004 als alleiniger Gesellschafter Geschäftsführer die Guericke Ingenieurgesellschaft mbH mit Sitz in Wismar.

### Personal

Die Gesellschaft hat eine Stammebelegschaft von acht Angestellten und arbeitet auftragsbezogen mit freiberuflichen Mitarbeitern.

### Geschäftszweige

Ein Tätigkeitsfeld des Unternehmens ist die Tragwerksplanung. Dabei werden Hochbauten (Pflegeheime, Krankenhäuser, Wohnungsbau) aber auch Ingenieurbauwerke wie Brücken bearbeitet.

Ein weiteres Geschäftsfeld ist die Sanierungsplanung und -durchführung für historische Gebäude (Denkmalschutzobjekte, Kirchen) einschließlich der Tragwerksplanung.

Darüber hinaus werden die Felder der Bauphysik (Wärme- und Schallschutz, Brandschutzplanung) bearbeitet.

### Referenzen

Die Guericke Ingenieurgesellschaft mbH ist aus dem freiberuflichen Ingenieurbüro Bernd Guericke hervorgegangen. Insgesamt lässt sich so auf 15 Jahre Erfahrung in den Tätigkeitsfeldern zurückblicken.

Insbesondere in der Denkmalpflege sind herausgehobene Referenzen vorhanden, unter anderem der Gewinn des Landesbaupreises Mecklenburg-Vorpommern 2008 für den Wiederaufbau der Kirche Barkow sowie den Ingenieurpreis MV 2011 für die Tragfähigkeitsversuche an historischen Kreuzgewölben.



Guericke  
Ingenieurgesellschaft mbH  
Poeler Str. 43 - 45  
23970 Wismar