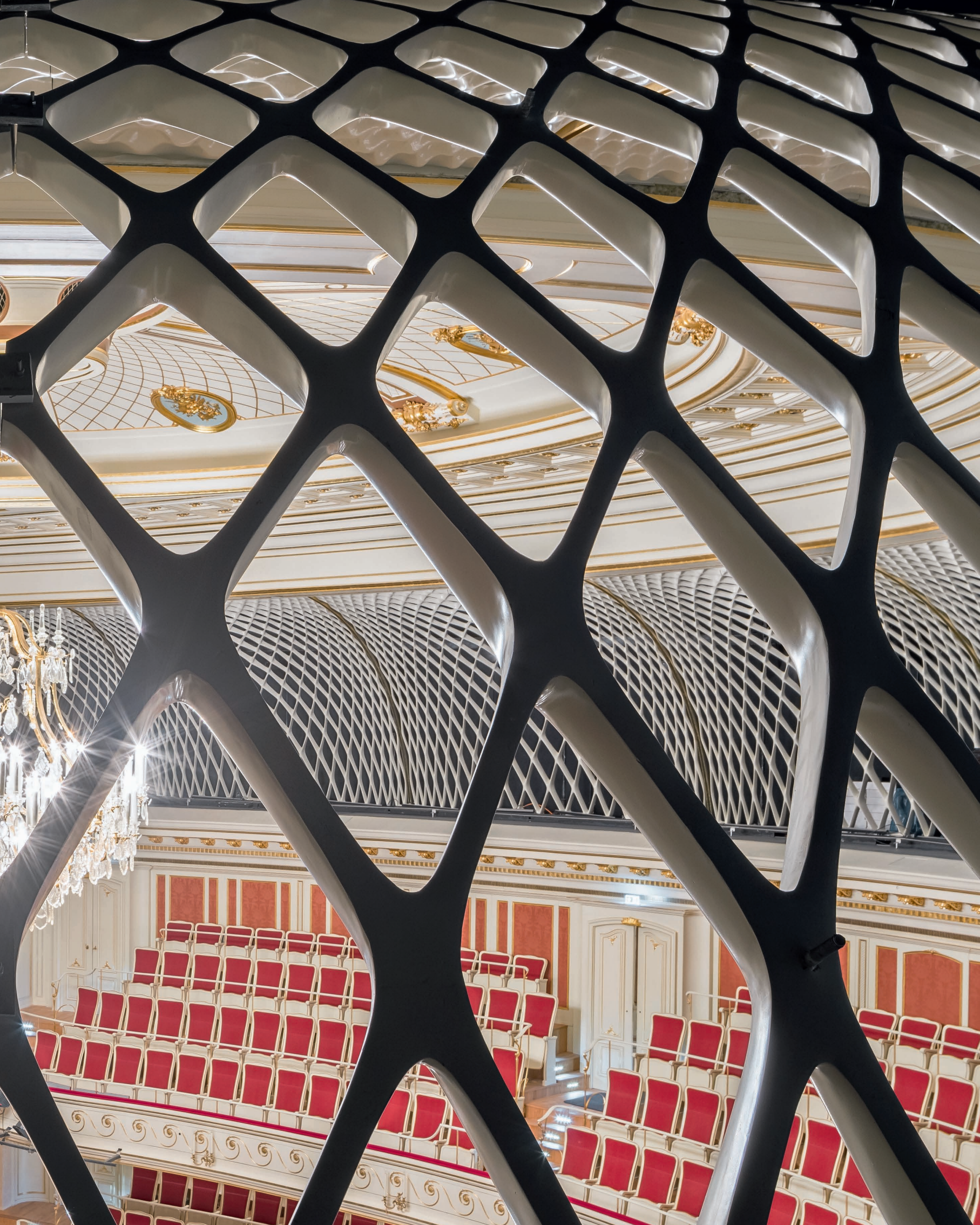


HIGHTECH IM DENKMAL –
ELEMENTE AUS TECHNISCHER
KALTKERAMIK FÜR DIE STAATSOPER
UNTER DEN LINDEN IN BERLIN







1

1 Denkmalgerechter Umbau der Staatsoper Unter den Linden

Seite 11:
2 Vergleich des Opernhaussaals vor (linker Bildteil) und nach dem Umbau (rechter Bildteil)

Die Staatsoper Unter den Linden in Berlin ist von Beginn ihrer Entstehung an bis heute ein Spiegelbild des technischen Fortschritts der jeweiligen Epoche. Mit der Nachhallgalerie hat sie nun ein innovatives, neues Bauteil erhalten, das den Besuchern den großen Entwicklungssprung auch all der sonst eher verborgenen großen technischen Neuerungen der jüngsten Instandsetzung eindrücklich sichtbar macht. Dabei steht die Verwendung glasfaserverstärkter Phosphat-Keramik in Verbindung mit dem Einsatz modernster Fabrikationstechniken in faszinierendem Kontrast zur historischen Rekonstruktion des Zuschauersaales im Rahmen der Generalsanierung. Hinsichtlich der Fabrikationstechnologie sowie der technischen Eigenschaften des eingesetzten Materials wurde Neuland beschritten.

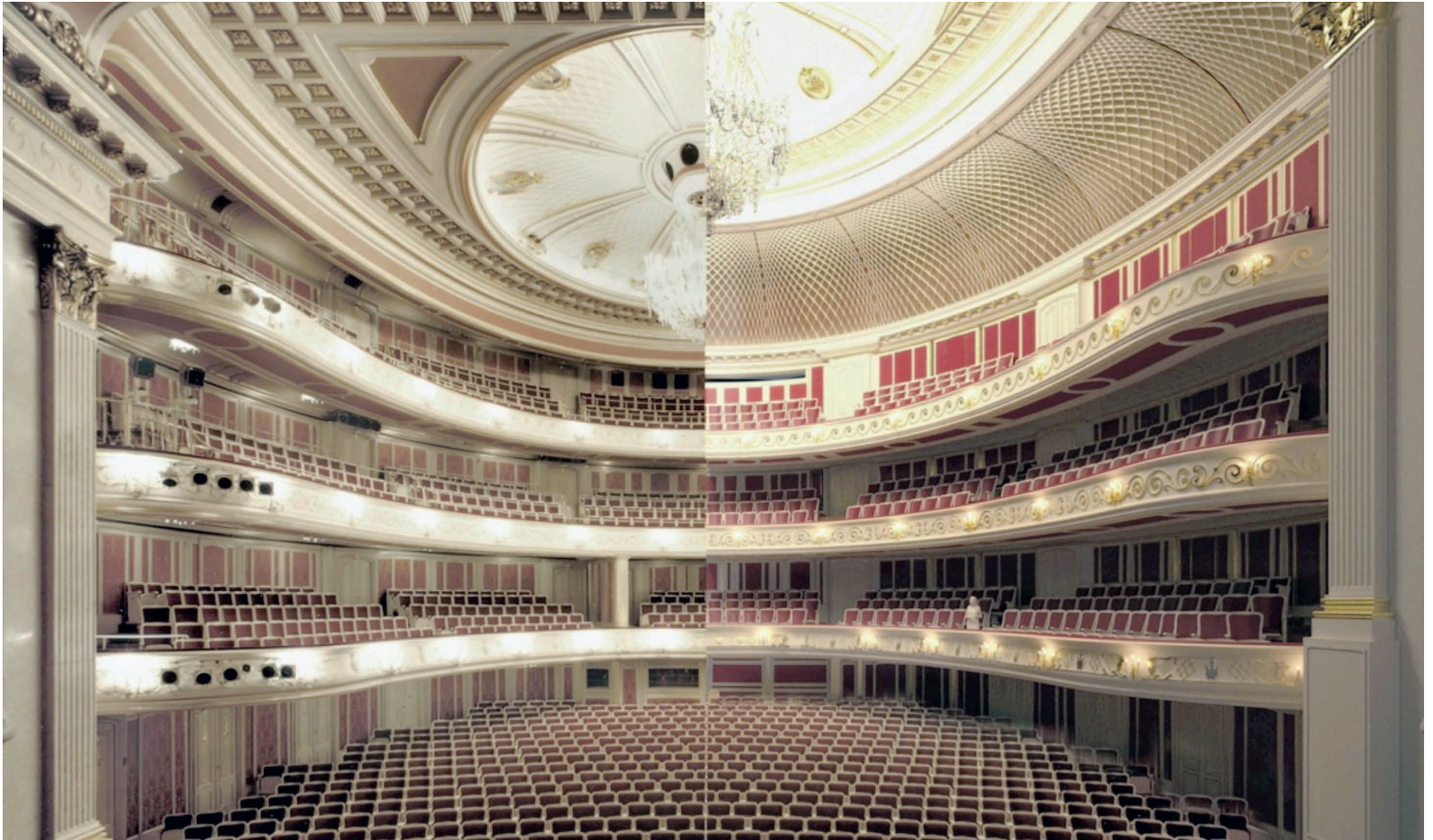
Eine Besprechung im Frühjahr 2008 gab den Ausschlag: Alles drehte sich um die Frage, wie die Lücke geschlossen werden könnte, die sich zwischen dem oberen Rang und der Saaldecke auftate, wenn die Saaldecke planarisch um 5 Meter angehoben würde, um die Nachhallzeit zu verlängern. Welche Gestalt und welches Material wären wohl adäquat für das größte, auf den ersten Blick sichtbare neue gestalterische Bauteil, welches nicht historischer Teil der umfangreichen Sanierung und Rekonstruktion der Staatsoper Unter den Linden (Bild 1) sein sollte?

Das Opernhaus wurde von Kronprinz Friedrich II. und Georg Wenzeslaus von Knobelsdorff als Teil des Fridericianums konzipiert und 1742 eröffnet. Durch Brand, Zerstörungen und steigende Anforderungen an den Opernbetrieb und schließlich den Wiederaufbau nach 1951 durch den Architekten Richard Paulick ist das Gebäude einem steten Wandel unterworfen gewesen. Nun folgte also die Implementierung einer Nachhallgalerie im Rahmen der Generalinstandsetzung von 2009 bis 2017 unter der Leitung von Prof. Merz.

Der bestehende Saal wies im besetzten Zustand eine vergleichsweise kurze Nachhallzeit von 1,1 Sekunden auf. Als wesentliche Ursache wurde das im Verhältnis zur Anzahl der Zuschauer geringe Raumvolumen identifiziert.

Entwurf

Durch das von Akustikern und Architekten entwickelte Konzept der Anhebung der Saaldecke ergab sich im Innenraum eben jene horizontale Fuge, vor die nun ein Rautenmuster (Bild 2) gelegt werden sollte, das mit modernster Fabrikation und Materialität Neuland beschreibt und damit einen Kontrapunkt zur ansonsten historischen Wiederherstellung darstellt. Die Struktur greift das friederizianische Rautenmuster und die Teilung der Saaldecke auf und gliedert sich in 13 sphärisch gekrümmte Elemente, die ein organisches Erscheinungs-



2

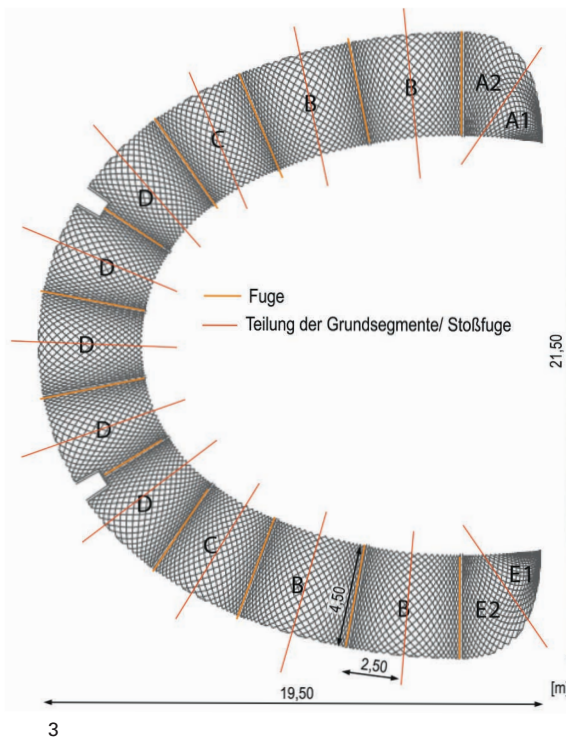
bild erzeugen. Für die Umsetzung der komplexen Geometrie eignete sich nur ein gießfähiges Material. Damit war klar, dass nicht nur akustische Anforderungen, sondern auch Aspekte der Fertigung, Materialtechnologie und -chemie Kernelemente des technischen und ingenieurmäßigen Entwicklungsprozesses sein würden.

In einem ersten Schritt wurde die Geometrie zunächst so rationalisiert, dass für die Erstellung von 13 Abzügen nur noch fünf verschiedene Formen erforderlich waren (Bild 3). Um Fertigung, Transport und Einbau zu vereinfachen, wurde jedes Grundsegment zusätzlich in der Mittelachse durch eine Stoßfuge geteilt. Die Flankenwinkel der einzelnen Stabzüge mussten angepasst werden, um die Elemente nach dem Aushärten zwängungsfrei aus einer Negativform ausformen zu können. Maschineneinsatz- und Standzeiten der zum Zuge kommenden Fräsroboter konnten durch eine Optimierung der Ausrundungsgeometrien für spezifische Fräskopfdurchmesser minimiert werden. Die Herstellung wurde vorab im Labor an Kleinproben getestet (Bild 4).

Neben der Gießfähigkeit des Materials war zu berücksichtigen, dass die Struktur neben ihrem eigenen Gewicht auch außerplanmäßigen Lasten wie Anprall standhalten muss und daher auch eine gewisse Schlagzähigkeit aufzuweisen hat. Des Weiteren sollten sich Oberflächentextur und Materiallogik nahtlos in den Innenraum des Zuschauersaals einfügen.

3 Grundsegmentierung der Rautenstruktur und Teilung durch Stoßfugen

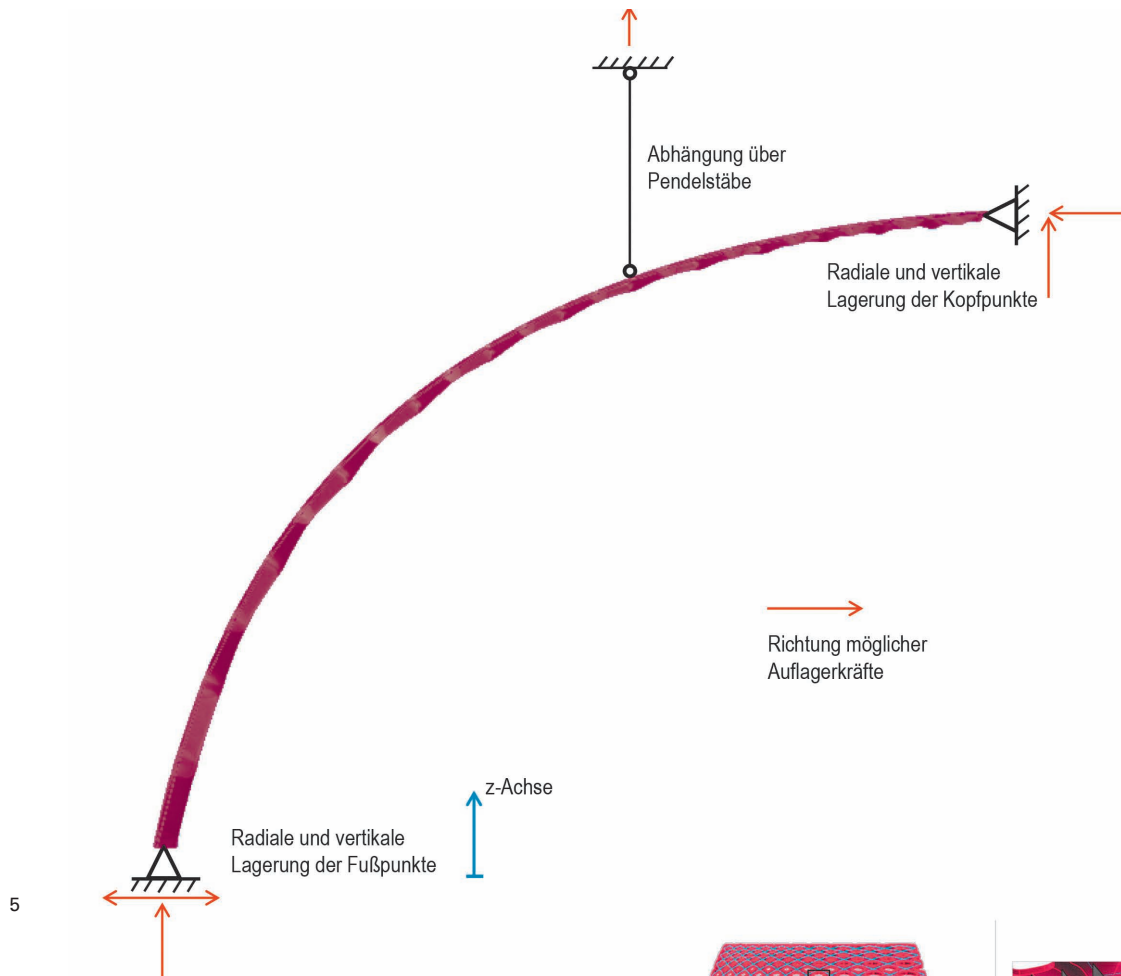
4 Fräsen der Form am ITKE Stuttgart



3

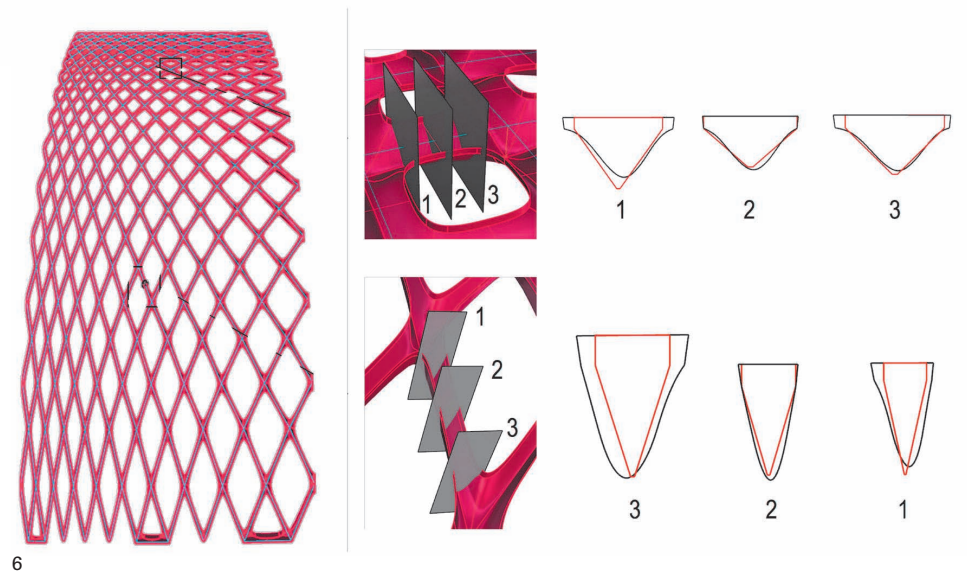


4



5 Statisches System, beispielhaft für Teilsegment B
 6 Vergleich der Querschnitte an zwei Stäben für Teilmodell B. (rot: Idealisierung, schwarz: tatsächlicher Querschnitt)

Nach Untersuchung zahlreicher Materialalternativen fiel die Wahl schließlich auf eine Lösung aus glasfaserverstärkter Phosphat-Keramik (CBPC). Dieser Verbundwerkstoff bietet herausragende Möglichkeiten, die mechanischen Eigenschaften den Erfordernissen anzupassen, um beispielsweise ein hohes Verhältnis von Festigkeit zu Eigengewicht zu erreichen. Dabei ist die Zugfestigkeit der Keramik ähnlich wie bei Beton gering. Die eingelegten Fasern aus alkaliresistentem (AR-)Glas erhöhen die Steifigkeit und helfen Rissbildungen an der Oberfläche zu vermeiden. Hinzu kommt, dass die Keramik absolut hitzebeständig ist und damit die strengen Brandschutzanforderungen (Klassifizierung A1) erfüllt.



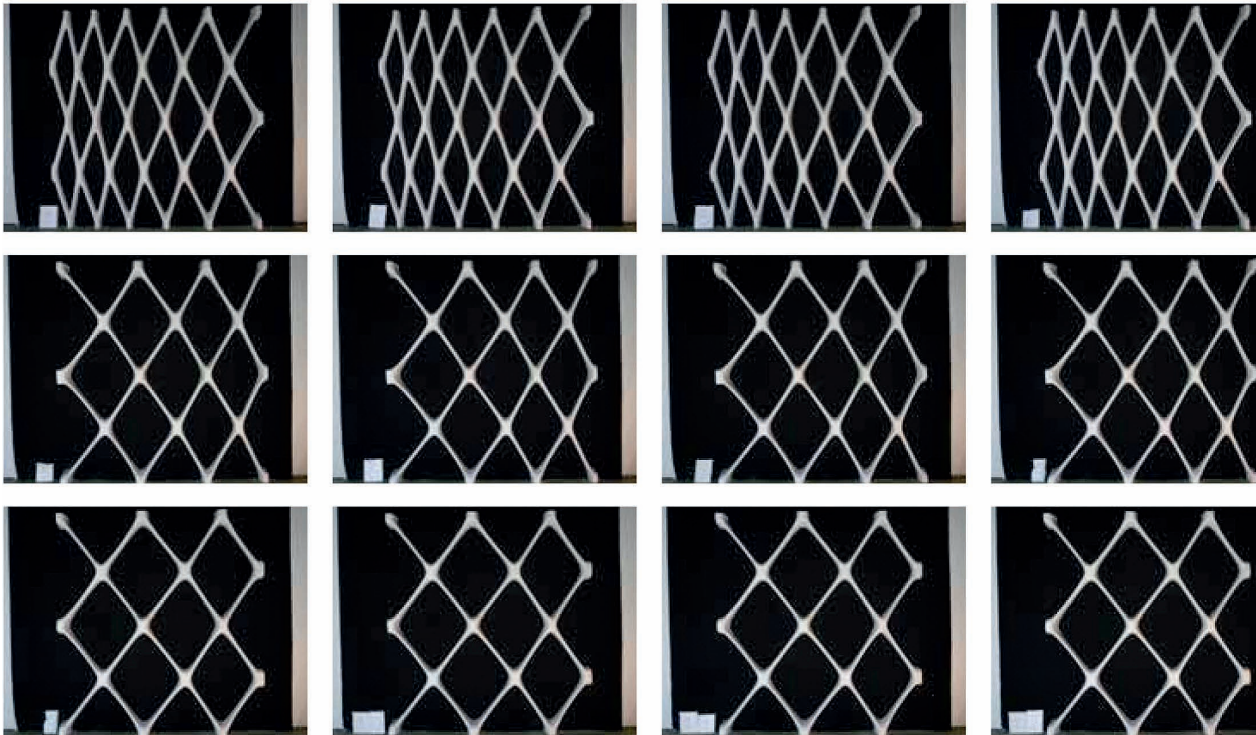
Tragkonzept und Dimensionierung

Das statische System ist prinzipiell für alle Teilsegmente der gesamten Rautenstruktur identisch. Bild 5 zeigt einen beispielhaften Schnitt durch Teilsegment B. Die Schalentragswirkung ist gering und die Bauteile werden im Wesentlichen auf einachsige Biegung und Druck beansprucht.

Der Einsatz von faserverstärkten Verbundwerkstoffen ist im Bauwesen in den letzten Jahren aufgrund überzeugender Vorteile bei speziellen Anforderungen erheblich gewachsen. Es handelt sich aber weiterhin um nicht geregelte Baustoffe, für deren Entwurf und die Tragwerksplanung national und international häufig nur unvoll-

ständige oder unwirtschaftliche Bemessungskonzepte verfügbar sind, auf die im Rahmen der Bemessung der Bauteile zurückgegriffen werden konnte.

Alle Lasten und Lastfallkombinationen werden gemäß der relevanten Eurocode-Teile angesetzt. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen, welche die Grundlage für die Erteilung der erforderlichen Zustimmung im Einzelfall (ZiE) bilden, wurden die charakteristischen Materialkennwerte $f_{k0,05}$ für alle wesentlichen Festigkeiten ermittelt. Abminderungsbeiwerte zur Erfassung von Temperatur- und Medieneinflüssen sowie der Lasteinwirkungsdauer wurden dann im Rahmen der



7 Zwölf Ein-Quadratmeter-Mustertafeln für akustische Untersuchungen

7

statischen Berechnung gemäß BÜV-Richtlinie „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ berücksichtigt.

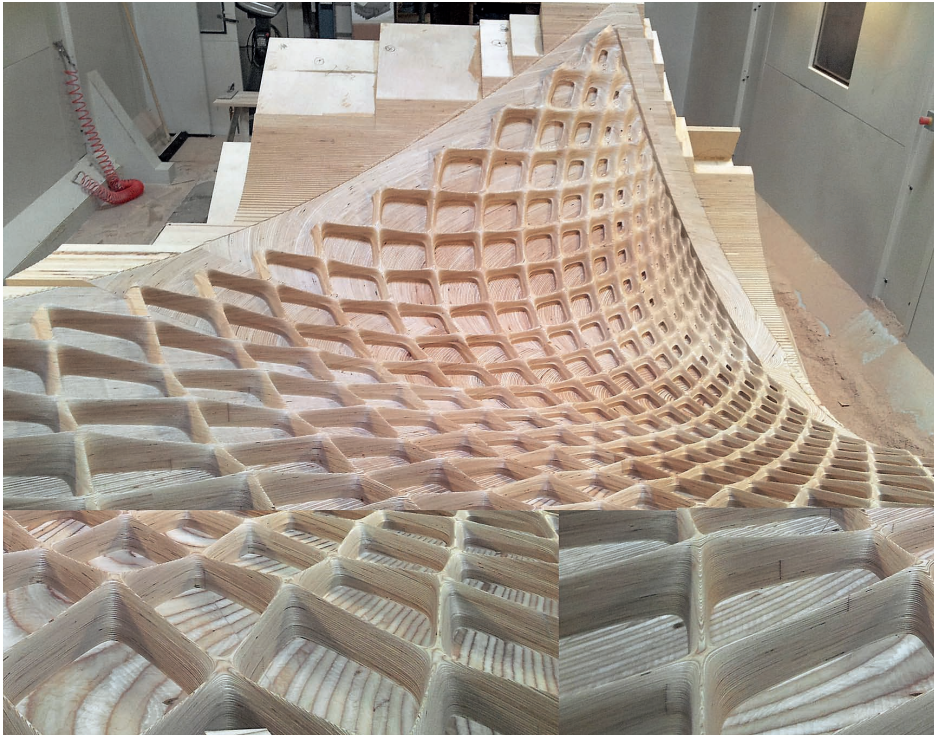
Zur Generierung der Finite-Elemente-Modelle wurde eine Schnittstelle zur CAD-Software entwickelt, um die komplexe 3D-Geometrie des Bauteils präzise und mit geringem Aufwand in die Berechnungssoftware einzulesen. Somit war die Optimierung der Geometrie nach tragwerkstechnischen Gesichtspunkten einfach möglich. Aufgrund der Wiederholung und Symmetrie der Segmente erfolgte die Bemessung der gesamten Rautenstruktur schließlich anhand von vier repräsentativen Teilsegmenten.

Die als offene Flächenverbände zur Verfügung gestellten Liniengeometrien der Architekten dienten als Systemlinien für die Generierung der FE-Modelle. Um die freigeformte Volumengeometrie mit Stabelementen möglichst exakt abbilden zu können, mussten die komplexen und über die Stablängen veränderlichen Querschnitte entsprechend definiert werden. Durch eine Überlagerung der originalen Geometrie (3D-Flächenverband) und des Stabmodells mit idealisierten Querschnitten (Bild 6) konnte gezeigt werden, dass die Flächen sowie Trägheitsmomente der idealisierten Querschnitte generell kleiner sind als die der tatsächlichen Querschnitte. Die Modellierung liefert somit konservative Ergebnisse.

Vorversuche und Genehmigungsprozess

Die eingesetzte Phosphat-Keramik Vubonite wurde erstmalig für ein architektonisches Bauteil dieser Größe verwendet. Da keine belastbaren Kenntnisse zu den technischen Eigenschaften vorlagen, wurde die Entwurfsplanung vom Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart und der Vrije Universiteit Brussel, Belgien, begleitet. Zunächst wurden die Verarbeitbarkeit des Materials hinsichtlich der Fließfähigkeit und die Vorgehensweise zum Tränken und Einlegen der Faserstränge untersucht. Dabei erkannte man, dass die Matrix mit Thixotropie-Mittel zu versetzen ist, um sie dickflüssiger zu machen und so auch in den gekrümmten Bereichen besser verwenden zu können.

Die Herstellung von zwölf Mustertafeln (Bild 7) diente in erster Linie schalltechnischen Untersuchungen, jedoch wurden die Elemente auch genutzt, um weitere Erkenntnisse über Fertigungsabläufe zu erlangen. Sie lieferten Informationen zur Porigkeit der Oberflächen, zur Farbstabilität und Lunkerbildung sowie zu Schwindeigenschaften des Materials. Für den Einsatz des bauaufsichtlich nicht zugelassen bzw. nicht geregelten Materials CBPC musste eine ZiE beantragt werden. Mit der Durchführung der erforderlichen experimentellen Untersuchungen, der Erstellung einer gutachterlichen Stellungnahme auf Grundlage der durchgeführten Bauteil-



8

prüfungen zur Unterstützung der Erteilung der ZiE sowie fertigungsbegleitender Untersuchungen wurde die Materialprüfanstalt (MPA) Stuttgart betraut.

Ziel des Zustimmungsverfahrens waren die versuchsgestützte Ermittlung von charakteristischen Materialkennwerten sowie die Festlegung von Bemessungswerten für die statischen Nachweise der Raumschalenstrukturen und deren Befestigungselementen. Unter Berücksichtigung des Tragverhaltens bzw. der in den Bauteilen auftretenden Beanspruchungen wurden Biege-, Druck- und Schubversuche an idealisierten Querschnitten sowie Auszugversuche der Befestigungselemente am tatsächlichen Querschnitt durchgeführt. Nach Erteilung der ZiE durch die oberste Bauaufsichtsbehörde konnte mit der Fertigung begonnen werden.

Fertigung und Montage

Zunächst hat die Firma FIBER-TECH Construction GmbH mit einem fünfachsigem Portalfräsroboter Positivformen aus Brettschichtholz gefräst (Bild 8). Grundlage hierfür waren die Daten der parametrisch generierten 3D-Modelle. Nach dem maschinellen Fräsvorgang wurde die Oberfläche händisch geglättet. Von der Positivform wurde anschließend ein Silikonabdruck (Bild 9) genommen und auf eine tragende Holz-Unterkonstruktion aufgelegt. Nach dem Aufbringen eines Trennmittels wurde im nächsten Arbeitsschritt der sogenannte Gel-Coat aufge-



9



10



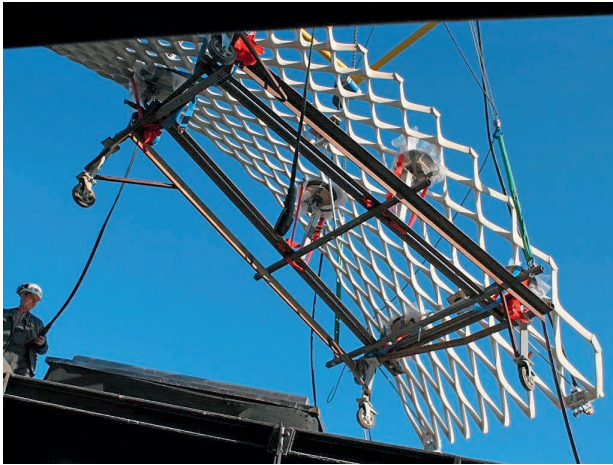
11

8 Positivform aus Brettschichtholz

9 Negativform aus Silikon

10 Einbringen der Rovings

11 Entformen eines Bauteils



12



13

tragen und die Form dann mit der Matrix aus Phosphat-Keramik, in welche Kurzfasern integriert sind, um eine rissfreie Optik zu gewährleisten, ausgestrichen. Die Glasfasern wurden anschließend in Form von kontinuierlichen Strängen, sogenannten texturierten Rovings mit der Keramikmasse vorgetränkt und als gestreckte Bündel in mehreren Lagen entlang der Stabzüge in die Keramikmasse einlaminiert (Bild 10).

Direkt nach der Fertigstellung wurde das Bauteil mit Kunststofffolie luftdicht verschlossen und härtete zunächst bei Zimmertemperatur 24 Stunden aus. Nach dem Entformen (Bild 11) härtete der Abzug weitere 24 Stunden bei 60°C nach.

Vor Ort wurden die auf Transportgestellen befestigten Elemente mit dem Turmdrehkran durch eine Dachöffnung eingehoben (Bild 12) und auf einem Raumgerüst, welches für die Restaurierung der Saaldecke vorgesehen war, verschoben. Die ausführende Firma nutzte hierfür ein eigens entwickeltes Transportgerät, den sogenannten Hoover, welcher mithilfe von großflächig angeordneten Luftkissen die Lasten gleichmäßig auf das Raumgerüst verteilte (Bild 13). Die Segmente wurden schließlich auf ihren Fußpunkten aufgesetzt, aufgerichtet und fixiert.

*Thorsten Helbig, Boris Peter, Florian Scheible,
Matthias Oppe*

12 Einhub mit Turmdrehkran und Transportgestell
13 Manipulation auf dem Raumgerüst mittels Hoover

OBJEKT
Nachhallgalerie – Staatsoper
Unter den Linden
STANDORT
Berlin
BAUZEIT
2009–2017
BAUHERR
Senatsverwaltung für
Stadtentwicklung Berlin
INGENIEURE + ARCHITEKTEN
Architekt: HG Merz Archi-
tekten, Stuttgart, Berlin
Tragwerksplaner: Knippers
Helbig GmbH, Stuttgart
Team: Thorsten Helbig, Jan
Knippers, Florian Scheible,
Matthias Oppe, Laurent
Giampellegrini, Markus Gabler

BAUAUSFÜHRUNG
FIBER-TECH Construction
GmbH, Chemnitz, Dr.-Ing.
Matthias Pfalz
Gutachter ZIE: Materialprüf-
anstalt Universität Stuttgart –
Team: S. Keller, D. Lotze
Mitwirkende im Rahmen
der Eigen- und Fremdüber-
wachung: Technische Uni-
versität Chemnitz, Fakultät
für Maschinenbau, Professur
Strukturleichtbau und Kunst-
stoffverarbeitung,
Fachgruppe: Leichtbau im
Bauwesen – Team: Sandra
Gelbrich, Andreas Ehrlich
AUSZEICHNUNGEN
materialPREIS 2017
(Kategorie Material)
Ingenieurbaupreis 2018
(Anerkennung)