Bundesingenieurkammer (Hrsg.)

Ingenieurbaukunst 2024

Made in Germany

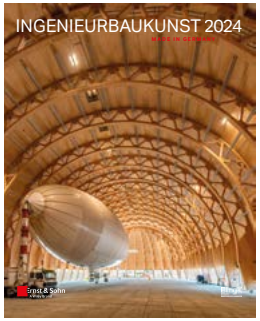
- **Die besten aktuellen Projekte von Bauingenieur:innen aus Deutschland**
- **Neue Entwicklungen bei Konstruktionen und Baustoffen für einen geringen Klimafußabdruck**
- **Inspiriert vom Symposium Ingenieurbaukunst – Design for Construction #IngD4C**

Das Buch diskutiert Konstruktionen und Material mit geringem Klimafußabdruck und zeigt wichtige aktuelle Bauwerke von Ingenieur:innen aus Deutschland. Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer werden hier die Leistungen des deutschen Bauingenieurwesens dokumentiert.

BESTELLEN
+49 (0)30 470 31–236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3417

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland. Inkl. MwSt.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand



11 / 2023 · ca. 208 Seiten · ca. 130 Abbildungen

Softcover
ISBN 978-3-433-03417-0 ca. **€ 49,90***

eBundle (Print + ePDF)
ISBN 978-3-433-03418-7 ca. **€ 64,90***

Bereits vorbestellbar.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

ÜBER DAS BUCH

Die neue Ausgabe des Jahrbuchs Ingenieurbaukunst zeigt wieder eine Auswahl der wichtigsten aktuellen Bauwerke – Made in Germany und diskutiert die Zukunft des Planens und Bauens. Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer werden damit die Leistungen des deutschen Bauingenieurwesens dokumentiert. Aktuelle Bauwerke und Diskussionsthemen werden vom unabhängigen Beirat ausgewählt. Die beteiligten Ingenieur:innen beschreiben die bautechnischen Herausforderungen und erläutern die konkreten Lösungen bei Planung und Ausführung. Das Jahrbuch Ingenieurbaukunst 2024 ist eine Schaubühne der Spitzenleistungen des Bauingenieurwesens und ein Forum für aktuelle Debatten rund um das Planen und Bauen diesmal insbesondere zu Konstruktionen und Materialien für einen geringen Klimafußabdruck.

BESTELLUNG

Anzahl	ISBN /	Titel	Preis
	978-3-433-03417-0	Ingenieurbaukunst 2024	ca. € 49,90*
	978-3-433-03418-7	Ingenieurbaukunst 2024 eBundle (Print + ePDF)	ca. € 64,90*

☐ Privat ◯ Geschäftlich

Bitte richten Sie Ihre Bestellung an:
Tel. +49 (0)30 47031-236
Fax +49 (0)30 47031-240
marketing@ernst-und-sohn.de

Firma Abteilung _____ UST-ID Nr. _____

Name Vorname _____ Telefon _____ Fax _____

Straße Nr. _____

PLZ / Ort / Land _____ E-Mail _____

Datum / Unterschrift _____

www.ernst-und-sohn.de/3417

Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: 10/2023

INGENIEURBAUKUNST 2024

MADE IN GERMANY

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

Herausgegeben von der Bundesingenieurkammer

INHALT

Vorwort

8 Für mehr Menschen mit weniger Material emissionsfrei bauen
Werner Sobek

Projekte

10 Reallabor für transformatives Bauen – U-Halle auf der BUGA 2023 in Mannheim
Matthias Ernst, Franziska Heidecker

18 Vom Industriedenkmal zu neuem Wohnraum – Die Wiederbelebung einer ehemaligen Wäscherei in Berlin-Spindlersfeld
Gerd Dochan

26 Ein ganzes Plus-Energie-Quartier in Holzmodulbauweise – P18 in Stuttgart
Max Mannschreck, Roland Bechmann

32 Zirkuläres Bauen – Das CRCLR Haus in Berlin
Johanna Baier, Julian Tiemeier, Uwe Seiler

40 Historische Bauweise neu gedacht – Stampfbetonfassaden in Neuenburg am Rhein
Martin Stumpf, Jan Evers

48 Vom Würfel zum Meisterwerk – Der CUBE als weltweit erstes Gebäude aus Carbonbeton
Manfred Curbach, Sandra Kranich, Matthias Tietze

54 Ein Prototyp für kreislaufgerechtes Bauen – Das neue Studierendenhaus in Braunschweig
Gustav Düsing, Thorsten Helbig, Matthias Oppe

62 Filigrane Nachhaltigkeit – Die Erweiterung und Modernisierung des Hôtel de Ville von Chartres
Lucio Blandini

66 Schwebendes Dach auf einer einzigen Endlosstütze – Der Schnellladepark in Leipzig
Philipp Eisenbach, Moritz Heimrath, Jon Prengel

70 Schlanke Struktur, große Wirkung – Das neue Fahrradparkhaus in Nürnberg
Martin Kotissek, Gesine Soltau

74 Nachhaltige Spiele – Das olympische Wassersportzentrum in Paris
Michael Zimmermann, Andreas Pfadler

82 Ein Dorf aus Holz – Das neue Gymnasium in Langenhagen
Karsten Held, Max Daub, Kilian Madeja

88 Durch und durch eine runde Sache – Der neue Luftschiffhangar der WDL in Mülheim an der Ruhr
Falk Hoffmann-Berling, Tobias Wiesenkämper

96 Mit Hochgeschwindigkeit über die Schwäbische Alb – Neubau der Eisenbahnbrücken über das Filstal
Andreas Baumhauer, Marc Schumm, Igor Zaidman

102 Schwebende Lasten – Das neue Schiffshebewerk in Niederfinow
Hans-Georg Reinke

108 Eine Eisenbahn über den Wolken – Die neue Chenab-Brücke am Rande des Himalaya
Kilian Karius

116 Eine Brücke zwischen Vergangenheit und Zukunft – Instandsetzung der Marienbrücke Neuschwanstein
Maximilian Horky, Markus Bauer, Rainer Böhme

122 Integrale Eleganz – Der Lady-Herkomer-Steg in Landsberg am Lech
Hubert Busler, Falko Schmitt, Dirk Krolikowski

126 Zwischen Industriekultur und zurück zur Natur –
Der Sprung über die Emscher
Jan Berwing, Simone Kern, Peter Sprinke

130 Steinerne Querung –
Der neue Herzogsteg in Eichstätt
Josef Taferner, Christoph Mayr, Rudi Moroder

134 Neuer Bogen über altem Bogen –
Die Erneuerung der Echelsbacher Brücke
über das Ammertal
Gerhard Pahl

138 Innovative Bauprodukte bei der
Brückenverstärkung –
Isarbrücke Bad Tölz
Hermann Weiher, Florian Keil

142 Carbonbeton zur Rettung vor dem Abriss –
Die Instandsetzung der historischen Thainburg-
brücke in Naumburg (Saale)
Sebastian May, Alexander Schumann,
Jakob Bochmann, Harald Michler, Jan Geißler,
Felix Kniebel, Frank Thorwirth

Zukunft des Planens und Bauens

146 Ökobilanzierung –
Maßstab für Klimaschutz und Nachhaltigkeit
Bernhard Hauke, Helen Luisa Hein

151 Wollen wir die Welt retten oder unsere Standards?
Michael Halstenberg

156 CO_2-effiziente Konstruktionen –
Wie wir es gemeinsam schaffen
Angela Feldmann, Hendrik Behrens, Till Walter

160 Leichtbau oder ökologisch *leichter* bauen –
Was kann das heute bedeuten?
Lucio Blandini, Annette Bögle, Jan Knippers,
Klaas De Rycke

166 Bewehrtes neu gedacht –
Effiziente Betonkonstruktionen
Manfred Curbach, Patrick Forman,
Lukas Gebhard, Walter Kaufmann

172 Moderner tragender Lehmbau –
Traditionelle Handarbeit und neue Technologien
Johanna Baier, Christof Ziegert,
Matthias Oppe, Stefanie Grün,
Ute Reeh, Max Dombrowski

180 Brückenbau schneller, einfacher und
umweltfreundlicher –
Der Konstruktive Ingenieur und Unternehmer
Victor Schmitt
Bernhard Hauke, Markus Feldmann

Anhang

186 Weitere Projekte

192 Autor:innen

198 Bauen mit und im Bestand
4. Symposium Ingenieurbaukunst –
Design for Construction
Alex Seiter, Bernhard Hauke

Die U-Halle in Mannheim ist eine Megastruktur mit hohem transformativem Potenzial. Im Rahmen der Umnutzung von ehemaligen Militärflächen in Mannheim wurde sie als Prototyp entwickelt, an dem beispielgebend aufgezeigt wird, wie ein Gebäude in seiner Veränderung begriffen und bespielt werden kann. Der Umbau und die Ertüchtigung der Halle wurden unter Berücksichtigung von Bestandserhaltung, Ressourcenschonung und zirkulärem Bauen durchgeführt.

Die Betrachtung von Nutzungszyklen: Bundesgartenschau 2023

Die U-Halle ist das erste Beispiel eines zirkulären Gebäudes in öffentlicher Hand. Als Megastruktur bildet sie in ihrem zweiten Nutzungszyklus das Herzstück auf der Ausstellungsfläche Spinelli-Areal der Bundesgartenschau 2023.

Als ehemals militärisch genutzte Lagerhalle umfasst sie eine Grundfläche von circa 21.000 Quadratmetern, aufgeteilt auf zwei parallel verlaufende Gebäudekörper mit einer Gesamtlänge von jeweils etwa 350 Metern. Während der Bundesgartenschau bietet sie Raum für über 5.000 temporär geplante Veranstaltungen und Wechselausstellungen, TV-Studios, Seminarflächen sowie auch Gastronomiebetriebe.

Gemäß dem Leitmotiv „Nachhaltigkeit“ der BUGA 23 ist die U-Halle von April bis Oktober 2023 selbst Ausstellungsstück auf dem Gelände und steht Pate für die Erhaltung, Sanierung, das Um- und Weiterbauen von städtischen Bestandsbauten. Statt Abriss und Neubau wird mittels Wiederverwendung und Recycling mit dem Bestand gearbeitet – bei gleichzeitiger Integration neuer Nutzungen. Das nach dem Abzug der US-Streitkräfte leer stehende Gebäude kann so auch in den folgenden Jahren weitergenutzt und aufgewertet werden.

Durch das abschnittweise Entfernen von Seitenwänden und Dachdeckung wurden sechs Freiflächen mit circa 8.000 Quadratmetern und neun Hallen mit insgesamt 13.000 Quadratmetern gewonnen. Der einst monotone und langgestreckte Baukörper wird dadurch in unterschiedlich große Bereiche gegliedert und mit neuen Öffnungen und Durchgängen versehen. Die einst dunkle Lagerhalle präsentiert sich als filigran, luft- und lichtdurchlässig. Mit diesen Eingriffen wurde die Grundlage geschaffen, dass sich die U-Halle in weiteren Nutzungszyklen an noch nicht bekannte Bedarfe der Mannheimerinnen und Mannheimer anpassen kann.

Aufgrund unvollständiger Bestandsunterlagen wurde in einem ersten Schritt auf einem Teilstück von 2.000 Quadratmetern die Mechanik des Rückbaus initial ge-

Seiten 10/11
U-Halle BUGA 2023

1 Prototyp mit repetitiver Stahlbetonrahmenkonstruktion

©EFG

1

© D. Lukac

2

2 Neu geschaffener Außenbereich mit freigelegter Giebelwand und sichtbarer Dachkonstruktion

testet: Innenräume wurden entkernt, Dachpaneele zurückgebaut und Seitenwände kontrolliert abgebrochen. Mit diesem schrittweisen Vorgehen bei der Freilegung der skelettartigen Tragkonstruktion wurden Wandaufbauten und Tragwerk einschließlich der Gründung überprüft. Außerdem sollten Fügungen und Eigenschaften von eingesetzten Materialien sowie deren Fähigkeit zur schadlosen Rückbaubarkeit und Wiederverwendung untersucht werden. Das hierbei gewonnene Wissen konnte in der Folge auf die Gesamtmaßnahme übertragen werden.

Zirkularität als Entwurfsstrategie

Die Faszination der U-Halle liegt in den Möglichkeiten, die in ihrem neutralen, sich schier endlos wiederholenden System aus Stützen und Trägern denkbar sind. Diese robuste Primärstruktur vermag Abläufe von baulichen Veränderungen paradigmatisch aufzuzeigen und stellt gleichzeitig Ankerpunkte für zukünftige Nutzungen zur Verfügung. Hierbei bilden architektonische Prinzipien und Regeln das Rüstzeug für Anpassungen in weiteren Planungs- und Nutzungszyklen.

Durch die Öffnung der Halle wird die Ausbildung neuer Giebelwände notwendig. Dazu wurden einerseits bestehende innere Brandwände als raumbildende Wände freigelegt und in die jeweilige Nutzungseinheit integriert. Die Giebelwände wurden zugunsten der Belichtung und Erschließung geöffnet und mit vorhandenen Materialen aus dem Rückbau – Glasbausteine, Profilgläser oder Dachpaneele – ertüchtigt. Weitere Wände wurden als einfache, reversibel gezapfte Holzrahmenbauwände ausgebildet und mit recycelten Polycarbonat-Stegplatten von umliegenden Baustellen beplankt. Auch Baugerüste wurden als raumbildende Fassaden eingesetzt – diese werden nach der Bundesgartenschau rückgebaut und ihrer ursprünglichen Verwendung zugeführt. Bestandsfenster aus abgebrochenen Hallenteilen wurden als temporäre Rauchwärmeabzüge verbaut, auch Türen oder Sanitärgegenstände wurden an vielen Stellen wiederverwendet.

Nach diesen zirkulären Gesichtspunkten wurde die U-Halle in zwei Phasen (temporär und dauerhaft) gestaltet – der Entwurf sieht vor, so ressourcenschonend und minimalinvasiv wie möglich zu arbeiten. Bauliche Eingriffe wurden so konzipiert, dass sie im Rahmen von weiteren Nutzungszyklen sortenrein zurückgebaut und wiederverwendet werden können.

Die Linearität der U-Halle wurde durch die Unterteilung der Halle in Einzelsegmente aufgelöst und damit eine wichtige klimaökologische Frischluftschneise für Mannheims Innenstadt geöffnet. Durch diese Fragmentierung werden ebenso Nutzungssynergien und Überlagerungen zwischen Innen- und Außenräumen erzeugt und erlebbar gemacht. Die verbleibenden Hallenab-

Der Neubau des Studierendenhauses an der Technischen Universität Braunschweig wird als multifunktionaler Raum verstanden. Er bietet auf über 1.000 Quadratmetern Platz für 200 Arbeitsplätze. Das zweigeschossige Gebäude ist ohne massive Wände ausgebildet und erlaubt eine flexible Nutzung. Das Primärtragwerk ist reversibel: Alle Bauteile sind leicht entfügbar und können nach der Lebenszeit des Gebäudes in gleicher oder variierter Kombination wieder- bzw. weitergenutzt werden. Auch kann das modular entwickelte Tragsystem leicht erweitert, reduziert oder ergänzt werden.

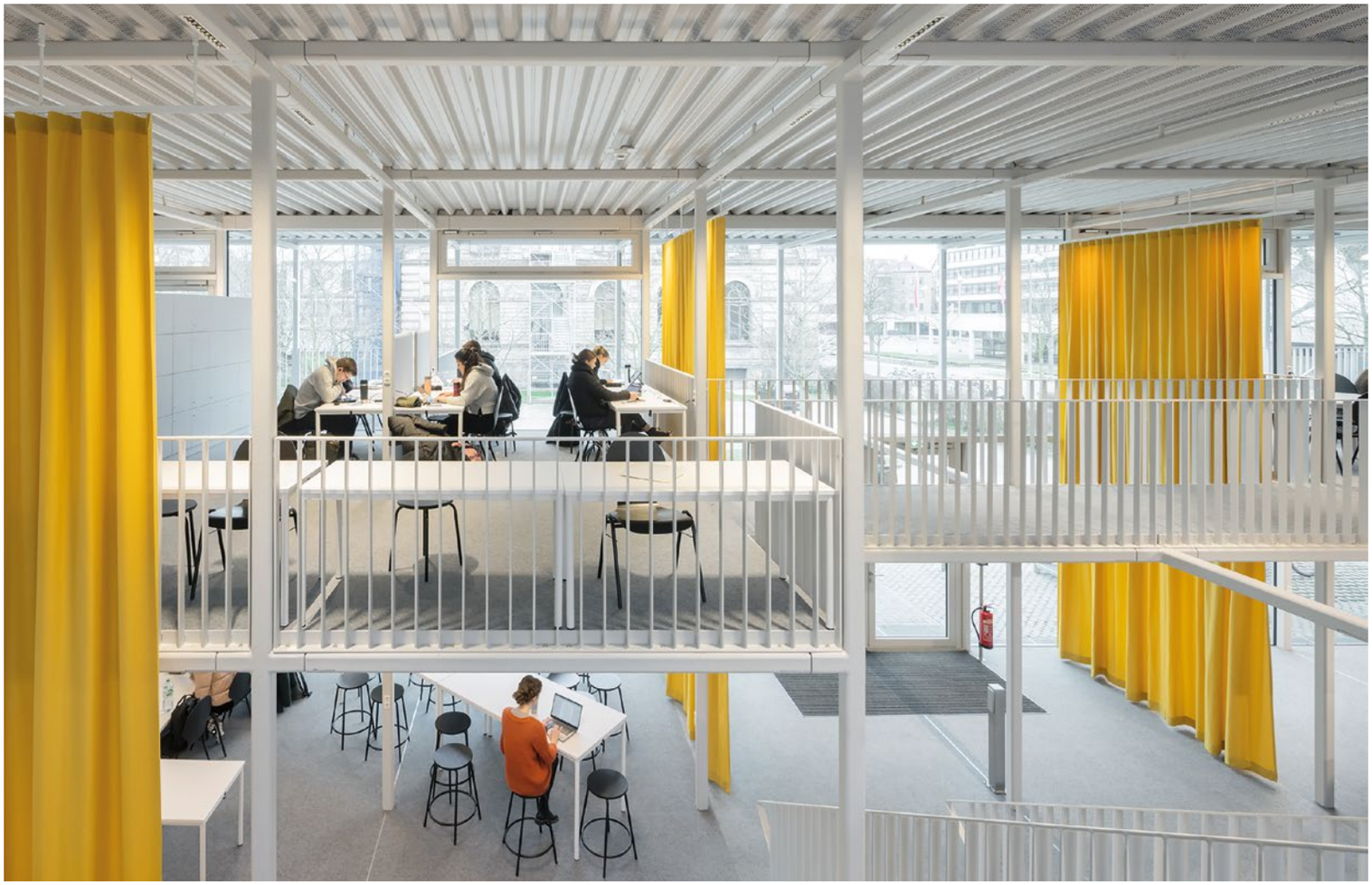
Konzept: zeitgemäßes Lernen

Ausgangspunkt der Konzeption des neuen zentralen Studierendenhauses ist die berühmte *Braunschweiger Zeichensaalkultur* der Architektur-Studierenden. Die selbstverwalteten Strukturen ermöglichen eine chaotisch-kreative Atmosphäre. Diese bildet den Nährboden für das gemeinschaftliche Arbeiten und den fruchtbaren Austausch, was zur Entwicklung neuer Ideen und Konzepte unabdingbar ist, und gilt seit Jahrzehnten als integraler Bestandteil des innovativen Lehrkonzepts als ein Aushängeschild der TU Braunschweig.

Doch wie lässt sich das in zeitgemäße räumliche Strukturen fassen, welche für die heutigen und zukünftigen Studierendengenerationen aller Fachbereiche nutzbar sind? Mit der Covidpandemie hat sich auch das Studieren verändert: Der Campus wurde vom digitalen Raum als Ort des Lehrens und Lernens abgelöst. Was muss der Campus leisten, um sich als physikalische Mitte universitären Lernens behaupten zu können?

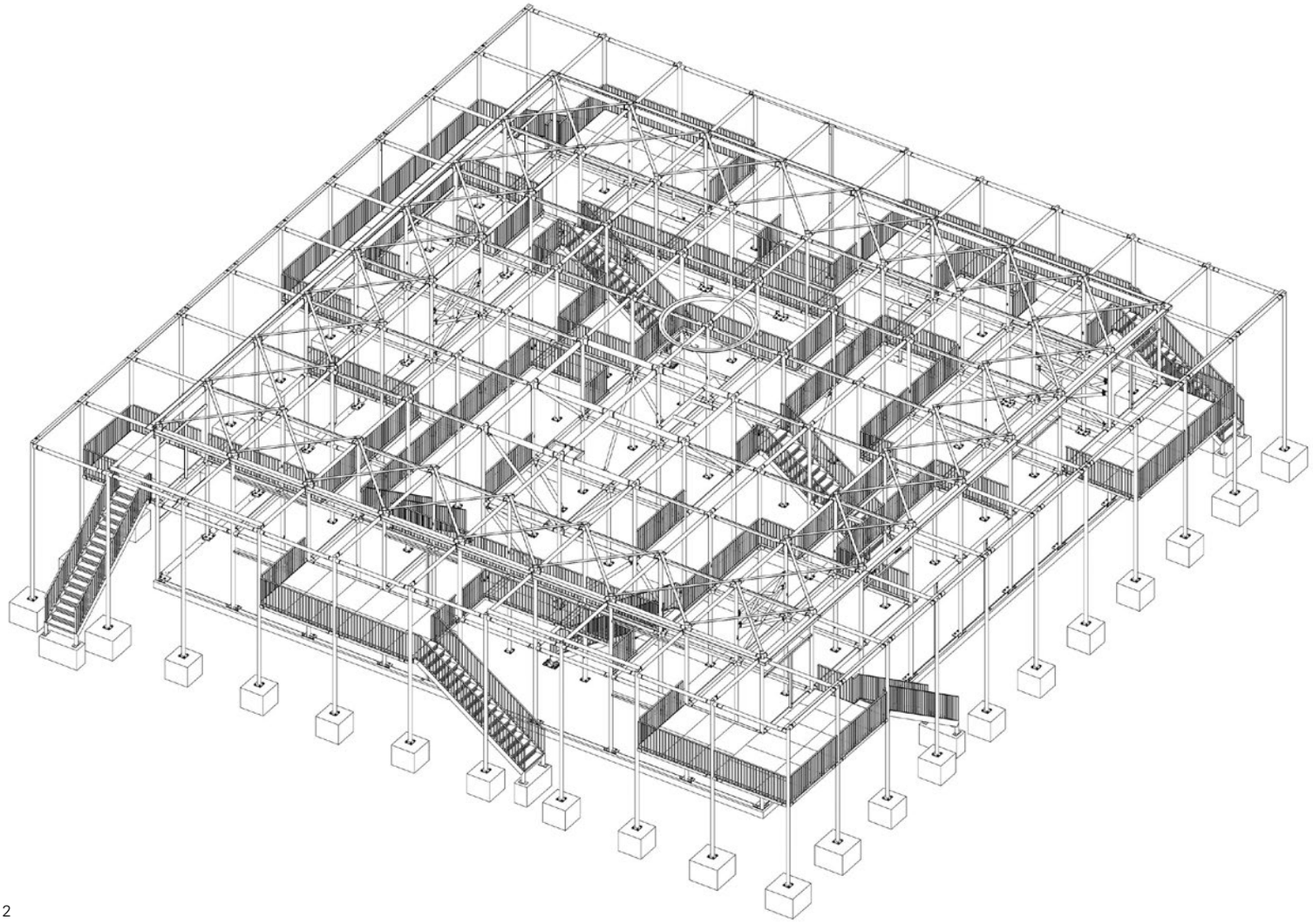
Kollaborative und interdisziplinäre Lernmethoden fordern traditionelle Methoden der Wissensvermittlung heraus und verlangen auch nach neuen Räumen, die

1 Vorhänge bieten Flexibilität in einem offenen Raumkonzept.



© Foto: Iwan Baan

1



2

© Gustav Düsing

2 Axonometrie

dies zulassen und begünstigen. Soziale Kontakte und fachlicher Austausch zwischen den Studierenden treten gleichwertig neben Vorlesungen und Seminare. Lernlandschaften unterliegen einem steten Wandel. Wie kann eine gebaute Struktur auf sich ständig ändernde Anforderungen flexibel reagieren?

Architektonischer Entwurf und Raumkonzept

Bei dem ausschließlich unter wissenschaftlichen Mitarbeiter:innen der TU ausgelobten Realisierungswettbewerb konnte sich die hier vorgestellte Idee einer hochflexiblen Struktur, die sich leicht an örtlich und zeitlich variierende Anforderungen anpassen lässt, durchsetzen.

Das Konzept basiert auf einer puristischen Architektur, die sich auf das Wesentlichste beschränkt: die Umrisslinien. Das Haus bleibt wandlos, offen, transparent, flexibel. Es bietet zahlreiche Raum-Variationen und wird zur wandelbaren Basis für Ideen und Konzepte, denn längst arbeiten Studierende nicht mehr nur am Schreib- oder Zeichentisch, sondern sind digital und global vernetzt und können so ortsunabhängig studieren.

Das neue Studierendenhaus bietet den zeitgemäßen Raum für gegenseitigen Austausch, zum Präsentieren der erarbeiteten Ergebnisse oder auch einfach zur Entspannung und Pflege sozialer Kontakte. Es ist so eine Miniatur einer idealen Welt, die das Globale ebenso beherbergt wie das Lokale – ohne feste Wände als permanente Beschränkung. Jeder kann selbst entscheiden, ob und wie Räume durch Vorhänge abgetrennt werden, kann sich so eine offene, transparente oder geschlossene, isolierte Atmosphäre schaffen. Beides ist möglich und notwendig und kann von den Studierenden in vielen Abstufungen getestet, erlebt und variiert werden.

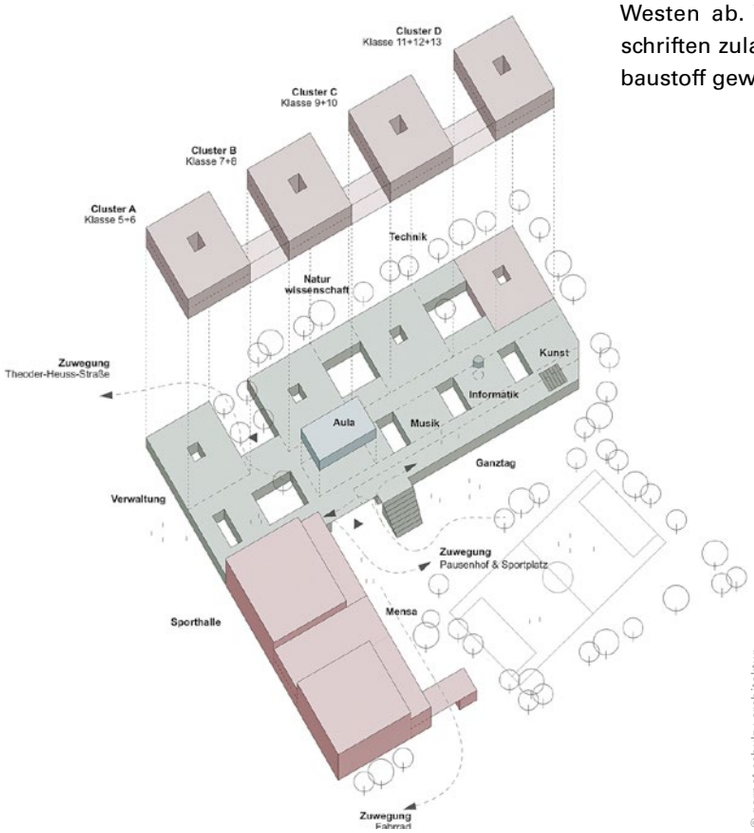
Zeitgemäßes Lernen heißt miteinander Lernen: Hierarchien werden aufgebrochen, eine Atmosphäre des gleichberechtigten Erlebens geschaffen. Dies ist die Idee des demokratischen Raums als ein Ort, der sich überall gleichwertig darstellt, ohne dunkle Ecken oder besonders privilegierte Bereiche, ohne anonyme Treppenhäuser oder laute Flure.

Folgerichtig gewährleistet eine umlaufende Glasfassade den Zugang zu Tageslicht in allen Bereichen. Um auch innerhalb des Hauses keine reinen Verkehrsflä-

Aus der Wettbewerbsidee „Die Schule als Dorfgemeinschaft“ ist ein Gebäudekomplex entstanden, der für die Schülerinnen und Schüler ein Ort des Lernens und Lebens sein soll. Wie in einem echten Dorf vereint der Neubau alle Anforderungen des Schulalltags an einem Ort. Jeder dieser Räume wurde durch das interdisziplinäre Projektteam mit der Zielsetzung entworfen, wo möglich, den Baustoff Holz einzusetzen und zu zeigen. Daraus sind unterschiedliche, anspruchsvolle Holztragwerke für die einzelnen Gebäude entstanden.

Der Neubau des Gymnasiums Langenhagen ersetzt das bestehende Gebäude aus den späten 60er-Jahren, das wegen Mängeln im Brandschutz nicht weiter betrieben werden konnte und nach nicht ganz 50 Jahren somit seine Nutzungsdauer erreicht hatte.

Auf einem bestehenden Parkplatz und Wiesengrundstück am Stadtrand sollte der Neubau entstehen und neben der Erschließung auch einen Bezug zur Grünfläche herstellen. Neben den Klassenräumen sollte die neue Schule genügend Platz für Fach- und Gruppenräume bieten sowie eine zentrale Aula als Begegnungsort erhalten. Großzügige Sporthallen, eine Mensa und auch die Schulverwaltung mussten im Dorf platziert werden.



© gernot schulz : architektur

1

Entwurf und Gestaltung

„Der räumlichen Komplexität einer Schule für 1.700 Schülerinnen und Schüler sowie 200 Lehrerinnen und Lehrer wird mit einer möglichst einfachen Grundstruktur für die neue Schule begegnet. Das einfache Auffinden aller Orte auf möglichst kurzen Wegen und der Kontakt mit der Offenheit, Luftigkeit und Vielfalt des umgebenden Landschaftsraums soll das Schulleben im neuen Haus prägen. Das Dach des erdgeschossigen Volumens ist als erweiterter Teil des Schulhofes angelegt. Die in ‚Stufenhäusern’ als Cluster organisierten Jahrgänge haben so über Laubengänge direkten Zugang zu den Außenbereichen. Ein ringförmiger Schulboulevard bindet alle erdgeschossigen Funktionen zusammen und bildet gemeinsam mit dem Foyer und der Aula das Herz der Schule. Dieser Boulevard ist als „Wegraum“ angelegt, indem er vielfältige Nutzungen ermöglicht: Arbeitsnischen, Gruppentische, Präsentationsflächen auf Wänden und in Vitrinen, Treffpunkte und Rückzugsbereiche. In den ringförmigen Boulevard eingeschoben liegt der Eingang über einen großen Eingangshof, um dem allmorgendlichen Ankommen der Schulgemeinschaft Raum und Atmosphäre zu geben. Sporthallen und Mensa sind in einem dieser großen Raumvolumina zelebrierenden Baukörper zusammengefasst und schotten das Schulgelände von der lauten Straße im Westen ab. Wo immer es Bau- und Brandschutzvorschriften zulassen, wurde Holz als Primär- und Ausbaubaustoff gewählt.“ (Gernot Schulz)

Seiten 82/83
Außenansicht

1 Projektübersicht

2 Baustelle

© Kallage Bauunternehmen Vechta

2

© HGEsch

3

© HGEsch

4

Schulcluster und Laubengänge

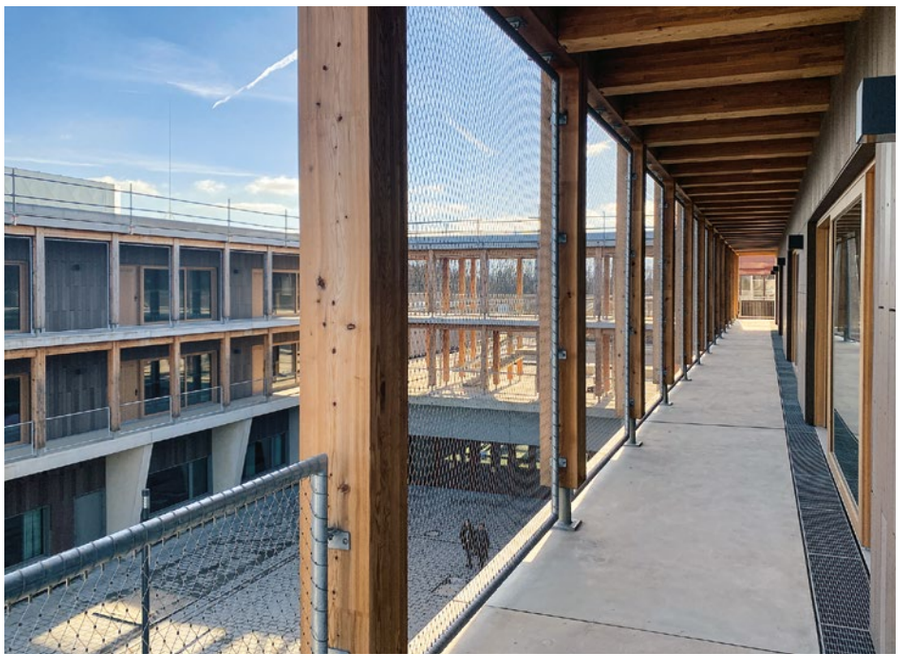
Aus dem massiven Sockelgeschoss in Stahlbetonbauweise erheben sich vier einzelne Klassenhäuser in Holz-Hybridbauweise mit einer Grundfläche von je ~33 x 39 Meter. Die primäre Tragkonstruktion wurde als Holzskelettbau bestehend aus Brettschichtholz-Stützen und -Trägern geplant. Um die Spannweite von 8,10 Meter wirtschaftlich zu überbrücken, wurden die Decken als Holz-Betonverbundkonstruktionen ausgeführt. Dadurch konnten sowohl die bauphysikalischen Anforderungen an den Schall- und Wärmeschutz und die Brandschutzanforderungen als auch die statischen Anforderungen an die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit erfüllt werden. Die Kombination aus dem großen Vorfertigungsgrad der Holzbauelemente und der in Ortbetonbauweise gegossenen Decke ermöglichte eine schnelle Bauzeit sowie die Aufnahme von Toleranzen im Übergang zu den Massivbauteilen. Die Integration der Installationen in das Deckensystem war nur durch eine enge Abstimmung zwischen allen Beteiligten möglich und erforderte die bewusste Auseinandersetzung mit der Konstruktion.

Charakteristisch für die Schulcluster sind der umlaufende Verbindungsgang sowie die dazwischen liegenden Verbindungsbrücken. Als Teil des Schulhofes und direkte Verbindung zwischen den einzelnen Häusern sind dies die Abkürzungen und Schleichwege, die das Dorf verbinden. Das Erscheinungsbild wird geprägt von umlaufenden Stahlbetonplatten, die zum einen die Holzkonstruktion vor Witterungseinflüssen schützen und zum anderen eine Brandausbreitung von unten nach oben behindern. Die außenliegende überdachte Holzkonstruktion wurde als Lärchen-Brettschichtholz ausgeführt, das eine gute Dauerhaftigkeit im Außenbereich gewährleistet. Durch vielfältigen Einsatz von Holzbaustoffen in der Konstruktion konnte der Betonanteil minimiert werden und somit neben der Speicherung von CO_2 im Holz auch dessen Emission durch vermiedene Zementherstellung reduziert werden.

3 Clustermitte
4 Verbindungsgang
5 Skelettbau
6 Laubengang

© gernot schulz : architektur

5



© wh-p Ingenieure

6

Die aufstrebende Region Jammu und Kaschmir erhält eine 272 Kilometer lange Eisenbahnlinie, die durch bergiges Terrain führt. Herzstück ist die Überquerung der Schlucht des Flusses Chenab in 359 Metern Höhe über dessen Wasserspiegel. Es entstand eine Bogenbrücke aus über 30.000 Tonnen Stahl, gefertigt vor Ort mit modernsten Methoden. Wir blicken zurück auf 20 Jahre Planung und Bau.

Jammu und Kaschmir am Rande des Himalaya ist bisher nur durch ein lückenhaftes Verkehrsnetz erschlossen. Um der Region ein zuverlässiges Transportsystem zu bieten, hat die indische Regierung das *Udhampur-Srinagar-Baramulla Rail Link Project* ins Leben gerufen – eine neue Eisenbahnlinie, die das Kaschmirtal mit dem indischen Schienennetz verbinden soll. Es ist das ehrgeizigste Projekt der indischen Eisenbahn seit 1947 und ein *National Project* mit höchster Priorität.

Die Strecke überwindet einen Höhenunterschied von etwa 1.500 Metern und bedingt den Bau einer Vielzahl von Tunnel und Brücken in sehr zerklüftetem Gebirge mit äußerst schwieriger und komplexer Geologie. Im Bezirk Reasi wird die wichtigste dieser Brücken realisiert: die Chenab-Brücke. Der Brückenstandort liegt etwa 111 Straßenkilometer von der Stadt Jammu entfernt auf dem Projektabschnitt Katra–Banihal.

Karte: © LAP

1

Planung und Bau der 1315 Meter langen Chenab-Brücke wurden im Jahr 2004 als *Design & Build Project* ausgeschrieben. Seitdem haben sich zahlreiche Randbedingungen geändert und die technischen Fertigkeiten extrem weiterentwickelt.

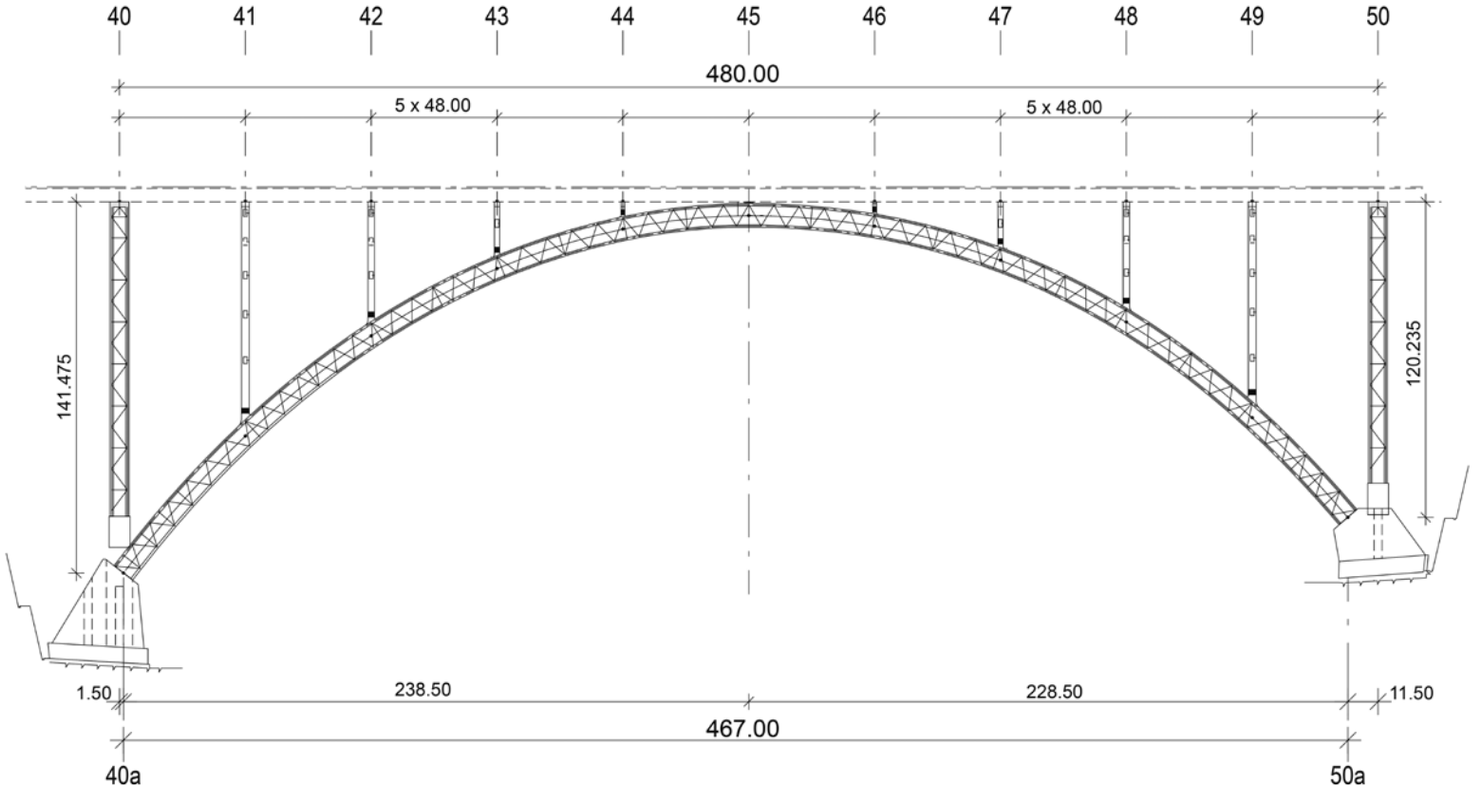
Ausschreibungsentwurf

Die Überquerung des Flusses Chenab zwischen Bakkal und Kauri ist der schwierigste Teil des Großprojekts. An dieser schwer zugänglichen Stelle führt die Trasse in

Seiten 108/109
Chenab-Brücke über den Wolken

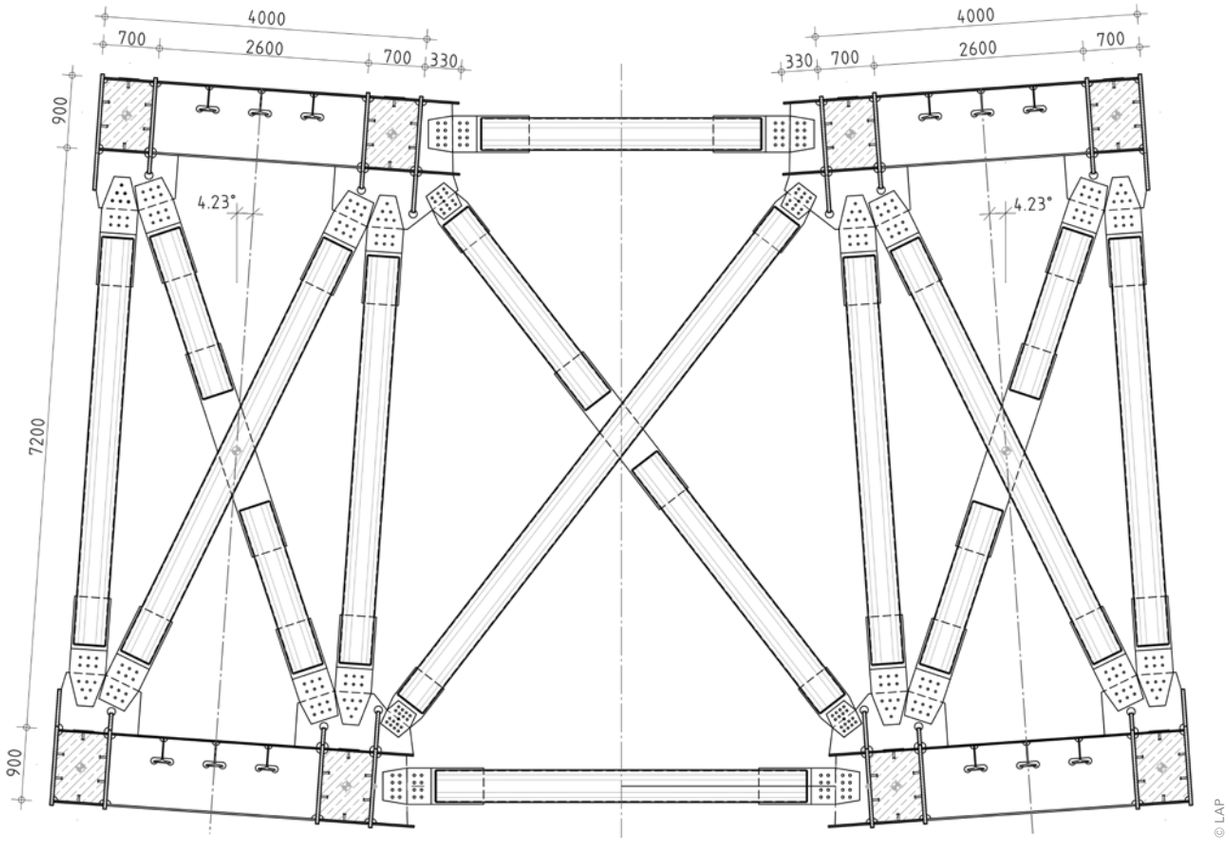
1 Linienverlauf des Gesamtprojekts

2a Ansicht Bogenbrücke



© LAP

2a



2b

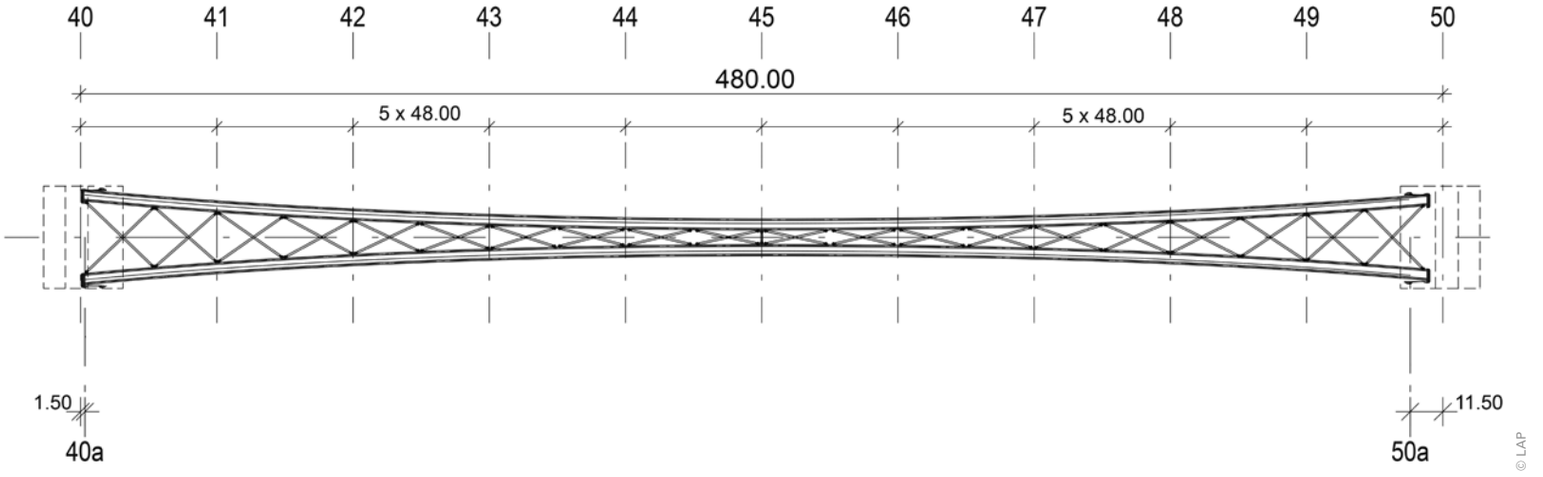
großer Höhe über eine tiefe und steile Schlucht. In einer Vorphase wurden verschiedene Brückenalternativen untersucht, darunter auch eine Schrägseilbrücke, die es ermöglicht hätte, die Brücke im Freivorbau zu errichten, ohne in den Steilhang einzugreifen. Die erforderliche Spannweite lag jedoch mit über 700 Metern weit über dem damaligen Erfahrungshorizont für seilgestützte Eisenbahnbrücken. Aus diesem Grund wurde in den endgültigen Ausschreibungsunterlagen eine Bogenlösung vorgeschrieben, die sich auch aufgrund der Topografie anbot.

Das Planungsteam erarbeitete mehrere Bogenvarianten, um das effizienteste Konzept mit einer sinnvollen Stützweitenanordnung zu finden. Schließlich wurde eine als Fachwerk ausgebildete Stahlbogenbrücke mit einer Hauptspannweite von 460 Metern für das Angebot ausgewählt. Der Brückenbogen besteht aus zwei geneigten Einzelbögen, die sich über einen zwängungsfreien Windverband gegeneinander abstützen. Das Gesamtbauwerk gliedert sich in eine 785 Meter lange Hauptbrücke und eine 530 Meter lange Vorlandbrücke.

Im Rahmen der Angebotsverhandlungen mit dem Bauherrn ergaben sich wesentliche zusätzliche Anforderungen. So waren die Bogengurte ursprünglich als miteinander verschweißte, betongefüllte Rohrprofile vorgesehen. Das Baustellenschweißen tragender Teile

2b Bogenquerschnitt der Brücke

2c Draufsicht Brückenbogen



2c

BEWEHRTES NEU GEDACHT
Effiziente Betonkonstruktionen

Bauen mit Beton blickt auf eine über zweitausendjährige Erfolgsgeschichte zurück. Der massive Gebrauch von Beton führt jedoch zu enormen Umweltauswirkungen. Dieser Beitrag zeigt Optimierungsstrategien auf den Ebenen des Tragwerks, des Materials und der (digitalen) Fertigung auf, mit denen diese nachhaltig reduziert werden können.

Im Laufe der vergangenen hundert Jahre entwickelte sich der Betonbau zur weitaus bedeutendsten Bauweise, ohne die unsere moderne Zivilisation kaum denkbar ist. Die hohe Beständigkeit von Beton gegen Feuchte, Brand und andere Einwirkungen sowie seine praktisch uneingeschränkte Formbarkeit, vor allem aber die weltweite Verfügbarkeit der Rohstoffe zu einem im Verhältnis zu den mechanischen und bauphysikalischen Eigenschaften ausgesprochen günstigen Preis waren wichtige Gründe dafür. Entscheidend war jedoch die Kombination von Beton mit einer Bewehrung zur Aufnahme von Zugbeanspruchungen.

Heute werden weltweit jährlich rund 14 Milliarden Kubikmeter Beton verbaut. Dafür sind rund 8 Milliarden Tonnen Zement nötig, bei dessen Herstellung enorm viel Energie verbraucht wird. Gleichzeitig werden die im Ausgangsmaterial gespeicherten Treibhausgase freigesetzt. Aufgrund der unfassbar großen Menge an verbautem Beton summieren sich diese zu rund 8 % der globalen CO_2-Emissionen, verbunden mit einem entsprechend hohen Ressourcenverbrauch. Die Betonbauweise ist also gewissermaßen Opfer des eigenen Erfolgs. Vor dem Hintergrund der Klimakrise müssen diese Emissionen und der Materialverbrauch dringend massiv reduziert werden. Dazu benötigen wir Baustoffe mit geringeren spezifischen Emissionen, es müssen aber auch der Materialverbrauch pro Nutzungsfläche reduziert, die für eine bestimmte Nutzung erforderliche Fläche optimiert und die Lebensdauer maximiert werden.

Ob eine Reduktion des Komfortanspruchs realistisch ist, ist höchst fraglich. Die naheliegende Lösung zur Reduktion der Emissionen scheint somit darin zu liegen, den Beton durch emissionsärmere Baustoffe wie beispielsweise Holz zu ersetzen. Solche Ansätze finden aktuell tatsächlich großen Anklang in Gesellschaft und Politik,

$$\text{Emissionen (pro Jahr und Nutzung)} = \frac{\overbrace{\frac{\text{Emissionen}}{\text{Masse}}}^{\text{emissionsarme Baustoffe + Fertigung}} \cdot \overbrace{\frac{\text{Masse}}{\text{Nutzfläche}}}^{\text{effiziente Tragwerke}} \cdot \overbrace{\frac{\text{Nutzfläche}}{\text{Nutzung}}}^{\text{reduzierter Komfortanspruch}}}{\text{Lebensdauer}}$$

© Lukas Gebhard (adaptiert von Flatt und Wangler 2022)

1

1 Zusammensetzung der Emissionen eines Bauelements pro Jahr und Nutzung

© MAXXI Museo nazionale delle arti del XXI secolo, Rome. MAXXI Architettura Collection F5506

2

© Lukas Heußner

3

2 Effiziente Stahlbetonrippendecke: Lanificio Gatti (Pier Luigi Nervi, 1951)

3 Für eine dominante Einzellast in Feldmitte formoptimierter Einfeldträger

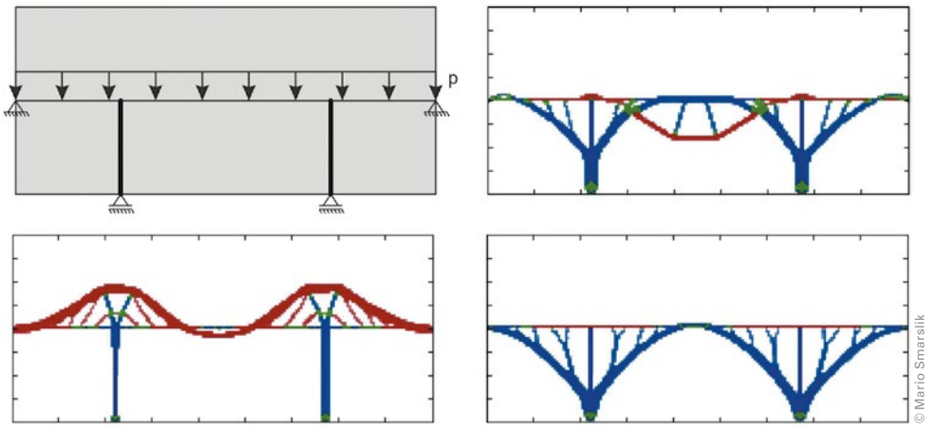
© Aljona Riefert

4

4 Ergebnis einer Topologieoptimierung mit Interpretation einer Bogenbrücke

verbunden mit Lenkungsabgaben und Fördermaßnahmen zur Kompensation der höheren Kosten alternativer Bauweisen. Dabei wird jedoch vergessen, dass emissionsarme Baustoffe nicht annähernd in den Mengen verfügbar sind, die für eine substanzielle Ablösung der Betonbauweise notwendig wären. Zudem sind sie für viele Anwendungen zu wenig beständig, und der größte Teil der Bautätigkeit findet in Entwicklungs- und Schwellenländern statt, die sich höhere Kosten beim Aufbau ihrer Infrastruktur schlicht nicht leisten können. Die Betonbauweise muss somit Teil der Lösung werden, indem einerseits die Treibhausgasemissionen des Betons reduziert und andererseits die Betonkonstruktionen selbst materialeffizienter werden.

Während sich dieser Beitrag auf neue Technologien fokussiert, deren großflächige Umsetzung nicht von heute auf morgen erfolgen kann, soll aber mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, dass die Bauingenieurinnen und Bauingenieure in der Praxis bereits heute mit konventionellen Betonbauten einen großen Beitrag leisten können. Jede:r Bauingenieur:in ist jährlich für rund 1000 Tonnen CO2-Emissionen verantwortlich und kann bereits durch geringe Reduktionen entsprechend viel einsparen. Dazu ist jedoch ein Umdenken gefragt – oder vielmehr eine Rückbesinnung auf die ureigene Ingenieurstugend der Tragwerkseffizienz.



© Mario Smarsilk

5

5 Materialgerechte Topologieoptimierung eines Dreifeldträgers, von oben links nach unten rechts: statisches System sowie neutrale, zugdominante und druckdominante Steuerung

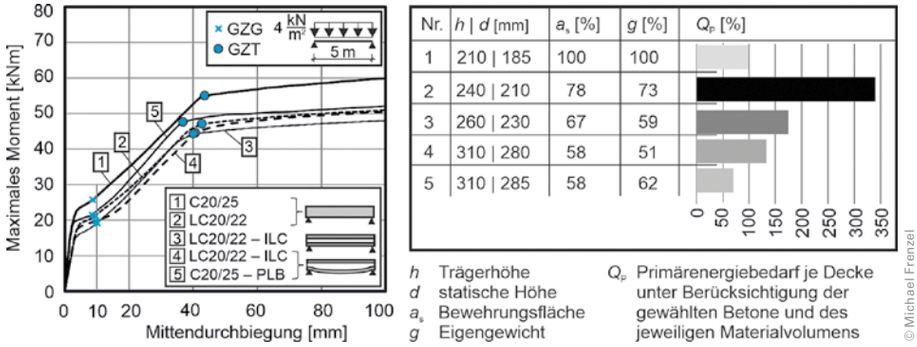
Der vorliegende Beitrag zeigt Lösungen auf, um diese Ziele zu erreichen.

Effiziente Tragwerke

Tragwerksentwürfe aus Beton sind trotz freier Formbarkeit des Materials meist geprägt durch einfache, voluminöse Grundformen. Treibender Faktor ist dabei nicht primär der Lastabtrag, sondern eine möglichst einfache, fehlerunempfindliche und wirtschaftliche Bemessung und Herstellung. Ein effizient entworfenes Tragwerk

sollte hingegen eine minimale Materialmenge für eine dauerhafte Tragfähigkeit aufweisen (*fully stressed design*). Grundsätzlich sind dabei einfache Grundformen nicht per se auszuschließen, da ein ganzheitlich nachhaltiger Entwurf eben auch die Herstellung berücksichtigt. Eine materialgerechte Beanspruchung im Tragwerk ist dabei jedoch essenziell. Gedrückte Stützen lassen sich so als Vollquerschnitte aus (bewehrtem) Beton herstellen, gezogene Bauteile als Stahlprofile. Bei Biegebeanspruchung sind Vollquerschnitte dagegen nicht mehr effizient. Platten in Stahlbetonbauweise, in denen ein großer Teil des Betons lediglich als tote Masse der Erfüllung bauphysikalischer Anforderungen dient, tragen zu ca. 70 % ihr Eigengewicht. Dabei werden nur circa 10 % des Betonquerschnitts als gedrückter Bereich benötigt; ein äußerst unzufriedenstellendes Verhältnis. Wenig überraschend schneiden solche Decken im Nachhaltigkeitsvergleich schlecht ab – effiziente Rippendecken können hingegen ohne Weiteres ein Drittel des Betonvolumens oder mehr einsparen.

Sinnvoll ist es, die Vollquerschnitte in Druck- und Zuggurte aufzulösen, da so wesentliche Anteile an Material im gering beanspruchten Bereich der neutralen Achse eingespart werden können. Steifigkeit und Biegetragfähigkeit bleiben weitestgehend erhalten. Ein Stegbereich zur Schubübertragung ist jedoch weiterhin erforderlich. Neben dieser Querschnittsadaption kann auch das Längssystem an die Beanspruchungen angepasst werden. Bild 3 zeigt dies für einen Stahlbetonbalken



6

6 Variation von Deckenplatten

mit I-Profil, der infolge einer dominanten Einzellast in Feldmitte einen linearen Momenten- und somit auch Höhenverlauf besitzt. Im Vergleich zum Vollbalken konnte das Gewicht so – einzig durch ingenieurtechnisch sinnvolle Anpassungen der Geometrie – um circa 60 % reduziert werden.

Weiteres Material lässt sich mit Strukturoptimierungsmethoden, wie der Topologieoptimierung, einsparen. Ziel der Topologieoptimierung ist die Steifigkeitsmaximierung mit einem begrenzten Anteil an Material im vorgegebenen Entwurfsraum. Die als Materialverteilung generierten Entwürfe folgen dabei dem Kraftfluss. Für eine Talüberführung unter Gleichstreckenlast resultiert so beispielsweise eine fast klassische Bogenbrücke (Bild 4). Für einen materialgerechten Entwurf können zudem Druck- oder Zugspannungen bevorzugt werden.

7a

7b

7c

© a: Ulrich van Stipriaan, b: Egbert Müller, c: Stefan Gröschel

7 Wandelement (a) und (b) und Treppe (c) aus Carbonbeton mit Wandstärken zwischen 20 und 35 mm und jeweils einer oder zwei Lagen Carbontextil