

Fakultät Architektur und Gestaltung
Hochschule für Technik Stuttgart

**KAPPENDECKE 2.0 LEHM STATT ZIEGEL –
STAMPFLEHMBÖGEN FÜR GESCHOSSDECKEN**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt
gefördert unter dem AZ 37794/01 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Prof. Dipl.-Ing. Martin Stumpf

August 2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Einleitung	3
Ressourcenschonende Tragwerke	3
Besucherzentrum Schloss Charlottenburg	6
Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt	7
Bemessungstool	7
Herstellung der Bögen	9
Planung des Mock-Ups	11
Bau des Mock-Ups	13
Belastungsversuche	14
Belastungsversuche am Mock-Up oder Rückbau durch Zerstörung	15
Fazit und Ausblick	20
Abbildungen	21
Literatur	22
Autoren	22

Einleitung

In Rahmen eines Forschungsprojekts -gefördert von der DBU- wurden Stampflehnbögen mit 3,50m Spannweite hergestellt und in einem Mock-Up als Geschossdecke eingesetzt. Nach diesem Prinzip könnten Geschossdecken aus Lehm und Holz hergestellt werden mit der Besonderheit, dass die Lehmbögen als tragendes Bauteil eingesetzt werden.



1 Mock-Up der tragenden Lehmbögen

Ressourcenschonende Tragwerke

Bogentragwerke, aufgelöste Stabtragwerke sowie Schalentragwerke sind Beispiele für Tragwerke, die Tragfähigkeit durch ihre Geometrie erreichen und -wenn sinnvoll konstruiert- gleichzeitig minimalen Materialeinsatz erlauben. Dies ist unabhängig vom Material. Wenn die tragende Struktur in druck- und zugbeanspruchte Bauteile zerlegt wird, entstehen filigrane Tragwerke. Vor allem der Verzicht auf biegebeanspruchte Bauteile bzw. die Zerlegung von Biegung in ein Kräftepaar aus Druck- und Zug spart Material.

Aus diesem Grund sind viele Forschungspavillons an Hochschulen und Universitäten oft Schalentragwerke. Sie tragen über Normalkräfte und sind beeindruckend – egal ob aus Holz, Beton, Ziegeln, Steinen, 3D Druck, Seile oder Kunststoffen. In historischen Bauwerken

finden sich ebenfalls oft Bögen, Kuppeln oder Gewölbeträgerwerke, aus den beschriebenen Gründen.

Im mehrgeschossigen Wohnungs- oder Bürobau dominiert seit vielen Jahren die Stahlbetonflachdecke. Sie kann bis zu ca. 10m überspannen, bei geeigneten Mehrfeldsystemen oder in Kombination mit Vorspannung sogar noch mehr. Gleichzeitig erfüllt sie alle Anforderungen an die Bauphysik (Akustik zwischen den Geschossen) und den Brandschutz. Sie ist schnell und leicht zu bauen und jeder Unternehmer kann sie ausführen. Sie erlaubt flexible Führung von Leitungen unterhalb und oberhalb der Decke und Trennwandanschlüsse sind an jeder Stelle problemlos möglich. Nie ist ein statisches Element (z.B. ein Über- oder Unterzug) im Weg. Das sind die Argumente, die in den vergangenen Jahren oder Jahrzehnten oft zur Wahl der Flachdecke geführt haben. Wirtschaftlich ist sie zudem auch noch. Obwohl eine (Stahlbeton-)Rippendecke schnell bis zu 50% Beton einsparen kann, verglichen mit der Flachdecke, war sie oft in Projekten nicht erwünscht.

Bei aktuellen Projekten und Wettbewerben hat das dringend notwendige Umdenken stattgefunden und Planungsteams und Bauherren wollen Ressourcen sparen und Beton reduzieren.

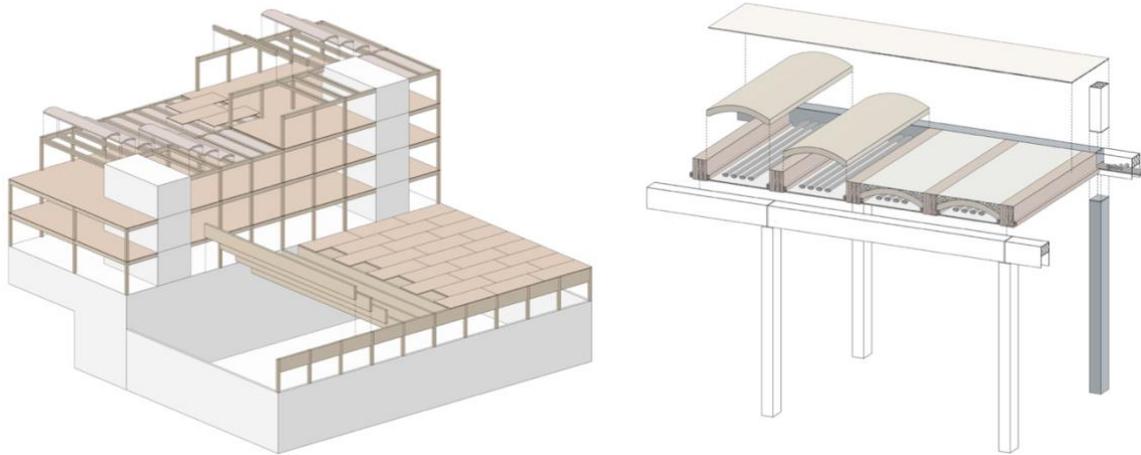
Insbesondere für Geschossdecken und Wände werden Alternativen gesucht zur Flachdecke. Ressourcenschonende Tragwerke finden sich -wie erwähnt- in den historischen Bautabellen und viele Strukturen, die aktuell wieder vorgeschlagen werden, waren im Bauen bereits präsent. Dazu gehören die Rippendecken, die klassischen Holzbalkendecken (mit Ballastierung durch Hochofenschlacke oder Bauschutt) aber auch Hourdisdecken, Koensche Voutendecken oder Kappendecken. Alle genannten Systeme sind aus Sicht der Autoren ressourcenschonend.

Reine Holzbalkendecken erfüllen oft die Mindestanforderungen an die Akustik nicht, oder schwingen. Sie sind -paradoxe-weise- zu leicht und müssen nachträglich beschwert werden. Es liegt also nahe, eine Holzbalkendecke mit ökologisch verträglichen Materialien zu ballastieren. Man denkt dann schnell an Lehm, der ein vollständiges Naturprodukt ist und genügend schwer. Stampflehm kann Druckbeanspruchungen in geringem Masse aufnehmen, Zug nicht.

Im Rahmen eines Schulhaus-Wettbewerbs im Herbst 2020 haben die Autoren nach diesen Überlegungen Decken aus Lehmbögen vorgeschlagen, getragen von einem tragenden Skelett in Holzbauweise.

Der Lehmboogen wurde so konzipiert (Stich, Spannweite, Dicke), dass sich stets eine Stützlinie innerhalb des Materials einstellen kann für alle Laststellungen. Die Druckspannungen in der Druckzone wurden nachgewiesen.

Das Prinzip der tragenden Lehmbögen wurde in verschiedenen Wettbewerbsbeiträgen vorgeschlagen und von der Jury jeweils besonders hervorgehoben. Die beiden Grafiken zeigen die Tragwerk-Konzepte der Wettbewerbe Schulhaus Walkeweg in Basel mit ds.architekten (Basel) und Volta Nord (Basel) mit Miller & Maranta Architekten ebenfalls aus Basel.



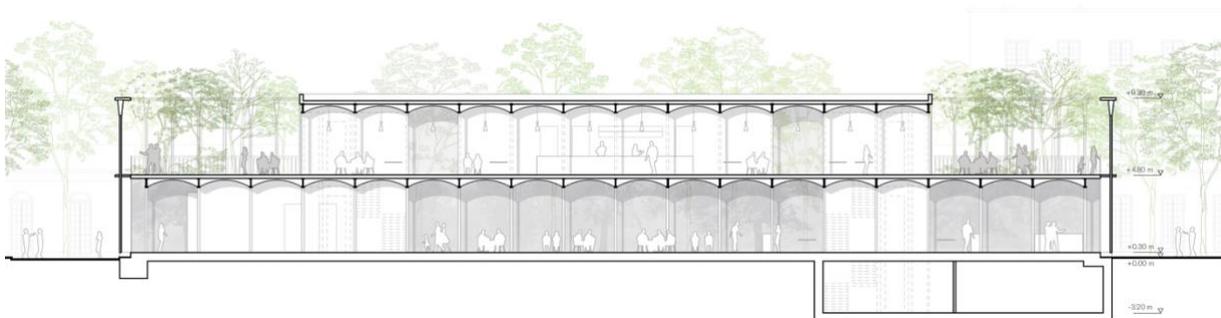
2 Wettbewerbsbeiträge wh-p Ingenieure mit tragenden Bögen aus Lehm

Besucherzentrum Schloss Charlottenburg

Im Sommer 2021 konnte gemeinsam mit den Architekten Bez + Kock der Wettbewerb für das Besucherzentrum am Schloss Charlottenburg gewonnen werden. Dieses Projekt befindet sich aktuell in der Planung und die tragenden Bögen aus Lehm sollen hier eingesetzt werden.



3 Besucherzentrum Schloss Charlottenburg, Wettbewerb 1. Preis
Bez + Kock Architekten mit wh-p Ingenieure



4 Besucherzentrum Schloss Charlottenburg, Gebäudeschnitt

Das Besucherzentrum in Charlottenburg ist ein zweigeschossiges Gebäude. Das Tragwerk wurde als filigraner Stahlskelettbau konzipiert, mit Bögen aus gestampftem Lehm zwischen den Stahlträgern. Die Bögen werden als tragendes Bauteil eingesetzt, die dünne Brettsperrholzplatte auf den Bögen dient zur Herstellung der Scheibensteifigkeit.

Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Die Idee der tragenden Lehmbögen wurde als Projektskizze bei der DBU eingereicht und mit einer Laufzeit von 18 Monaten gefördert. Gemeinsam mit den Tragwerksplanern von wh-p Ingenieure und der Hochschule für Technik in Stuttgart, wurde die Idee weiter entwickelt. Das Mock-Up wurde bei ERNE Holzbau in der Schweiz gebaut. Ein Bemessungstool auf Basis der Stützlinientheorie wurde entwickelt, verschiedene Herstellungs-verfahren der Bögen ausprobiert und optimiert, ein Belastungsversuch durchgeführt und zum Abschluss des Projekts wurde ein 1:1 Mock-Up mit zwei benachbarten Bogenfeldern gebaut.

Bemessungstool

Der statische Nachweis eines Bogentragwerks ist einfach und Inhalt der Vorlesungen im Grundstudium. Ein sinnvolles Verhältnis von Spannweite zu Stich und Dicke kann in wenigen Zeilen von Hand ermittelt werden – auch für einen Bogen aus gestampftem Lehm.

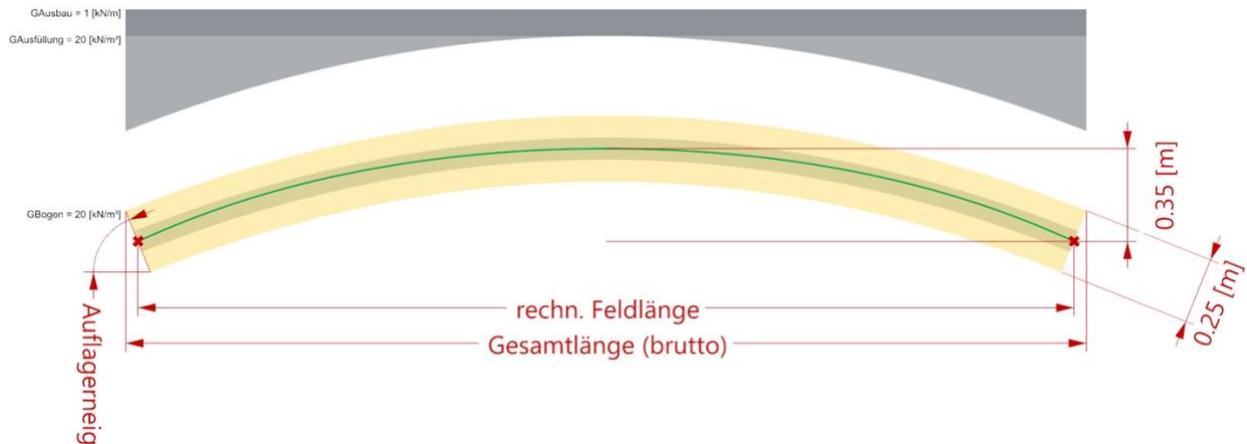
Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein leicht bedienbares Bemessungstool entwickelt mit dem auch Architekturbüros und Bauherren statisch nachweisbare Bögen ermitteln können.

Das Tool ermittelt mittels grafischer Verfahren eine Stützlinie infolge Eigengewichts, welche rein über Normalkraft abträgt. Die „grafische Statik“ wurde erstmals 1866 von Karl Culmann in seinem Werk „Die grafische Statik“ beschrieben. Das Verfahren, welches darauf basiert Kräftegleichgewichte an jedem Knotenpunkt herzustellen, wurde in historischen Bogenbauwerken vielfach als Grundlage für die Beurteilung der Tragfähigkeit eingesetzt.

Der in der visuellen Programmiersprache (Grasshopper) entwickelte Algorithmus orientiert sich sehr stark an historischen Vorbildern von Bogenbemessungen, jedoch kann aufgrund des EDV Einsatzes eine deutlich feinere Diskretisierung gewählt werden, als dies bei den historischen Methoden üblich war. Insbesondere für die Beurteilung von Teilflächenbelastungszuständen ist dies von großem Vorteil.

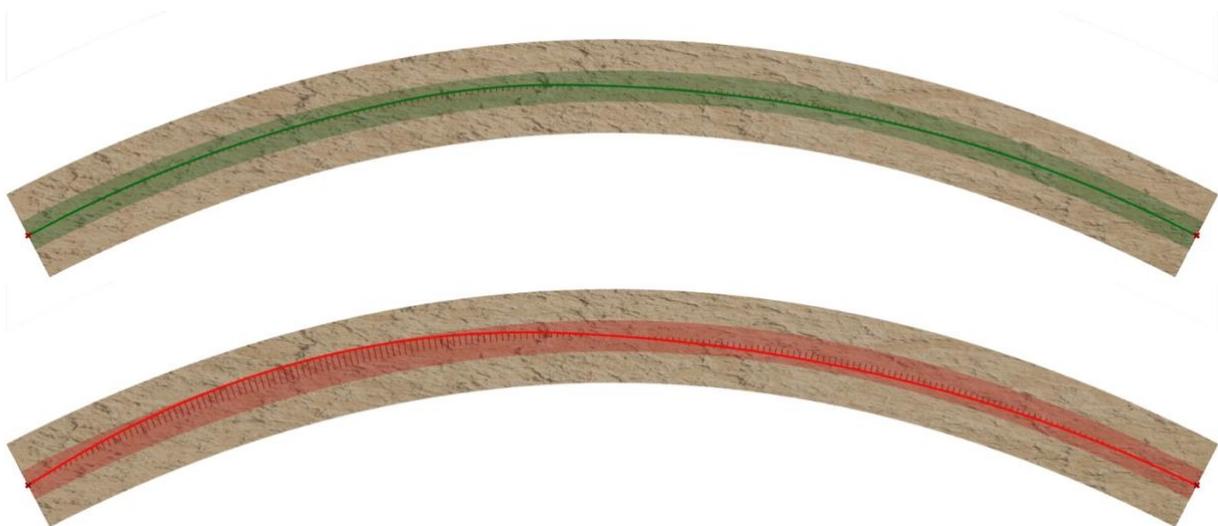
Für den Anwender ist das Tool so programmiert, dass parametrische Eingaben von Bogenlängen, Stichmaßen, Lastengrößen und Lastverteilungen möglich sind. Diese Variantenstudien und Veränderungen können dann in Echtzeit beispielsweise mit Architekten oder Bauherren durchgespielt und diskutiert werden. Trotz des für den Benutzer möglichst einfach gestalteten Interfaces, sind umfangreiche Erfahrungen in der Tragwerksplanung und die Kenntnis der theoretischen Hintergründe grafischer statischer Verfahren unabdingbar.

Detailliertere Erläuterungen zum Aufbau des Bemessungstools finden sich in der Masterarbeit „Entwicklung und Bemessung einer Lehmkappen-Deckenkonstruktion“, von Paul Weber betreut von den wh-p Ingenieuren, Berlin und der TU-Berlin.



5 Grafische Ausgabe mit Darstellung der rechnerischen Stützlinie

Wie bereits erwähnt ermöglicht die feine Diskretisierung, Abweichungen der idealen Stützliniengeometrie beispielsweise durch Verkehrslasten, die nicht gleichmäßig über die komplette Bogenspannweite verteilt sind, sehr exakt zu berücksichtigen. Außerdem nutzt das Tool einen in Grasshopper standardmäßig implementierten Optimierungsalgorithmus „Galapagos“ um verschiedene Laststellungen automatisiert zu analysieren und ein vorgegebenes Zielkriterium zu minimieren. Das Ergebnis dieser Optimierungsaufgabe stellt dann die jeweils ungünstigste Laststellung für ein gewähltes zu minimierendes Kriterium dar. Ein solches Kriterium kann z.B. die Abweichung der Stützliniengeometrie unter einer bestimmten Laststellung zur unter Eigengewicht gefundenen Stützlinie darstellen.



6 Grafische Rückmeldung zum Kriterium Stützlinie innerhalb oder außerhalb der Kernzone

Maßgebend für die Bemessung ist, dass die Abweichung der Stützlinie innerhalb der ersten Kernweite bleibt. Es werden also keine Zugspannungen im Querschnitt zugelassen. Für die Beurteilung der Tragfähigkeit ist dies eine sehr konservative Betrachtungsweise, da der Effekt einer klaffenden Fuge vernachlässigt wird. Inwiefern klaffende Fugen wie diese in anderen Bereichen in denen Materialien mit niedriger Zugfestigkeit (z.B. Mauerwerk, Gründungen) auch bei der hier vorgestellten Bauweise eingesetzt werden darf oder kann, stellt einen Diskussionspunkt sowie einen wesentlichen Optimierungsansatz des Bemessungsverfahrens dar.

Wie erwartet gelingt der statische Nachweis tragender Bögen aus reinem Lehm. Bei Stampflehm kann eine charakteristische Druckfestigkeit von ca. $2.0\text{-}3.5\text{N/mm}^2$ erreicht werden. Die zulässige Design-Festigkeit wird mit dem globalen Sicherheitsfaktor von 7 ermittelt.

Herstellung der Bögen

Am Anfang stand die Überlegung, wie die Bögen sinnvoll und wirtschaftlich hergestellt, also gestampft werden können. Um die maximale Verdichtung und damit Druckfestigkeit am Rand zu erreichen, müssten die Bögen in Richtung der Achse gestampft werden. Diese Herstellung wäre allerdings sehr aufwändig. Die Bögen wurden schließlich als stehende Elemente hergestellt, im Grund wie eine Wand, die im Grundriss gekrümmt ist. So konnten die Erfahrungen von Lehmwänden genutzt werden und auch eine semi-robotische Fertigung war möglich.

Die für den Bogen hergestellte Schalung besteht aus 3-Schichtplatten und wird von sechs Schalungsankern gehalten. Die Anforderungen an die Steifigkeit der Schalung sind hoch, da durch das Stampfen hohe seitliche Abtriebskräfte auf die Schalung wirken und sich diese nicht verformen darf. Eine Vorformung der Schalung insbesondere im oberen Bereich würde bei Aneinanderreihung der Bogensegmente im eingebauten Zustand zu einem Versatz zwischen benachbarten Bögen führen.

Die Herstellung der Bögen erfolgt also analog zur Herstellung einer konventionellen Stampflehmwand. So bleiben die Schichten später an der Unterseite der Bögen vollständig sichtbar. Die Schichten zeichnen sich parallel zur Bogenspannungsrichtung ab.

Ein Stampflehmboogen ist vom Tragverhalten vergleichbar mit einem Bogen aus Mauerwerk, der ebenfalls keine Zugkräfte aufnehmen kann. Stellt man sich also die Aufgabe, einen Bogen aus Mauerwerk um 90° zu drehen, so wird klar, dass der Bogen in diesem

Kippvorgang instabil ist. Auch während eines möglichen Transports zur Baustelle hätte der reine Bogen keinerlei Stabilität, da ihm die notwendigen horizontalen Auflager für den Bogenschub fehlen.

Um den Horizontalschub aufzunehmen und um Anschlagpunkte für den Kran zur Verfügung zu stellen, wurden ein Widerlager aus Stahl entwickelt, an dem demontierbare Zugstangen befestigt sind. Nach dem Kippen kann die Druckkraft infolge Eigengewichts über die beiden Zugstangen kurzgeschlossen werden und der Bogen mit den Zugstangen wird robust und transportierbar.

Die Drehung der Bögen wird mit einem Kipptisch realisiert.



7 Drehen eines Bogenelements mit dem Kipptisch

Dieser Kipptisch ist das Herzstück der Produktion. Denn der Lehm ist nicht nur porös und stoßempfindlich, er wird auch auf eine Rohdichte von ca. 2400kg/m^2 verdichtet, wodurch das einzelne Lehmelement (Tiefe 1,0m) fast 2.5t wiegt. Die verwendete Mischung stammt von einem Bauvorhaben der Firma ERNE. Sie erreicht eine Mindestdruckfestigkeit von 2 N/mm^2 . Die Sieblinie entspricht, unter Annahme eines Größtkorns von 22mm, annähernd einer

Fullerkurve für Stampflehm, was eine gute Verdichtbarkeit bedeutet. Durch die Verwendung einer „kontrollierten und überwachten“ Mischung der Fa. ERNE, ist die Vergleichbarkeit der gebauten Bögen für das Mock-Up sichergestellt.

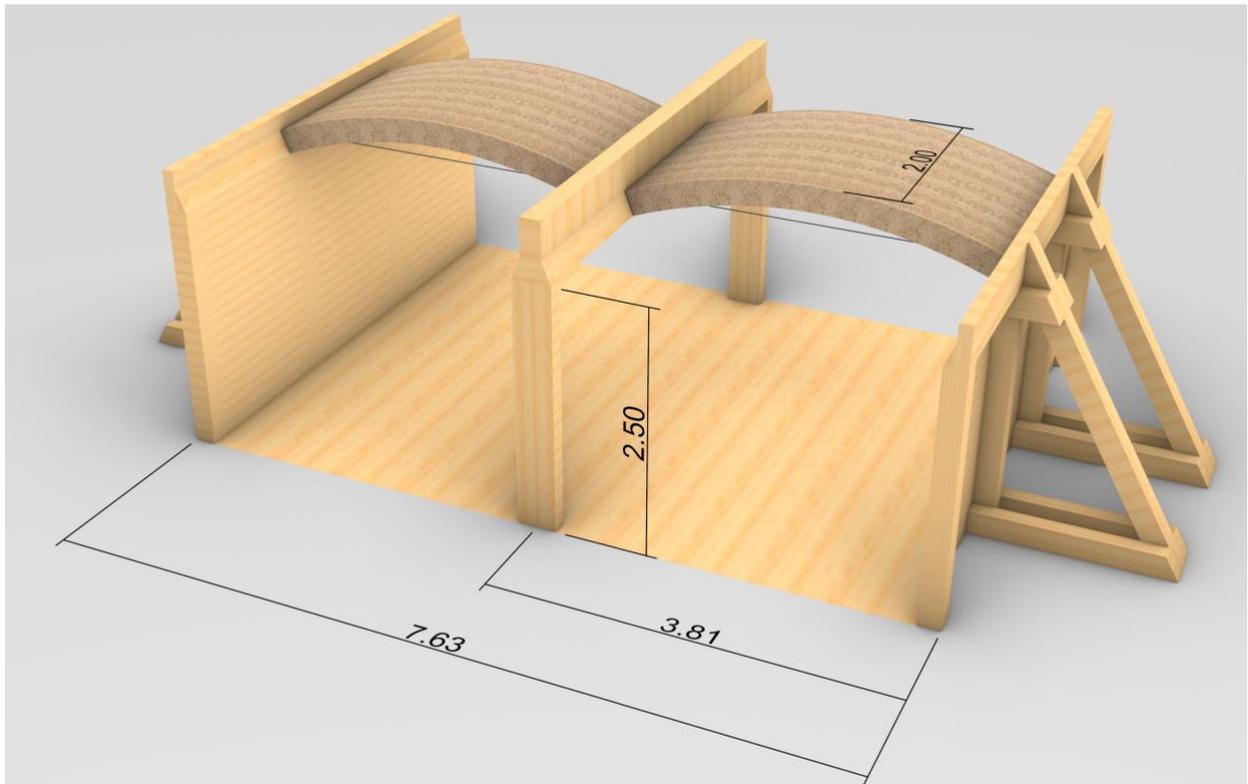


8 Bogenelement am Kran

Planung des Mock-Ups

Um die Bögen aus Stampflehm erstmals in die Realität umzusetzen, wurde ein Mock-Up mit realen Abmessungen geplant. Ein wichtiger Aspekt des Mock-Ups ist, die Konstruktion in möglichst realitätsnaher Umgebung als Geschossdecke begreifbar und erlebbar zu machen. Zusätzlich sollen durch die Planung und den Bau des Mock-Ups zahlreiche für die Ausführung relevante Erkenntnisse gewonnen werden.

Um den Eindruck einer für den späteren Einsatz vorgesehenen Einsatz als Geschossdecke möglichst gut abzubilden, werden Wandbekleidungen in Form von Holzplatten eingesetzt.

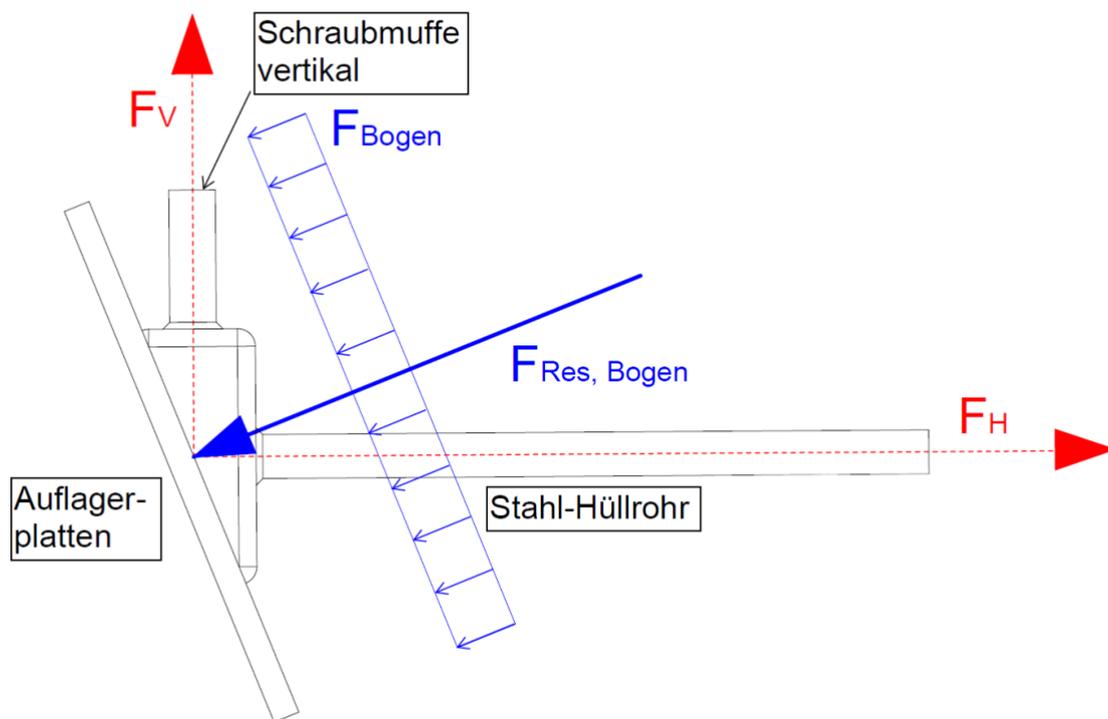


9 Isometrie Mock-Up

Im Rahmen der Planung wurde der Einsatz der Zugstangen mehrfach diskutiert. Für den späteren Einsatz als Geschossdecke sind diese Zugstangen insbesondere beim Thema Brandschutz hinderlich und werden auch optisch nicht in jeder Situation gewünscht. Statisch sind sie nicht erforderlich, mit Ausnahme der beiden Randfelder. Da das Mock-Up im Grunde aus zwei Randfeldern besteht, konnten die Zugstangen nicht entfallen.

Der Detailausbildung des Auflagerbereiches wurde bei der Planung des Mock-Ups besondere Bedeutung zugemessen. Es wurde hierbei ein Auflagerdetail aus Stahleinbauteilen entwickelt, welches die Horizontalen und vertikalen Kräfte ohne Exzentrizitäten in die Unterkonstruktion einleiten kann.

Zudem ermöglicht dieses Auflagerdetail, die vorgefertigten Elemente mittels eines Krans anzuheben. Um keine Randmomente während des Einbau- und Hebevorgangs in die Bogenelemente einzuleiten, ist das Detail so konzipiert, dass sich die Wirkungslinien der Stützlinsen, der horizontalen Kraft der Zugstange und der vertikalen Auflagerkraft im Endzustand bzw. der vertikalen Kraft im Montaguzustand in einem Punkt schneiden. So ist sichergestellt, dass kein Versatzmoment auftritt – zu keinem Zeitpunkt.



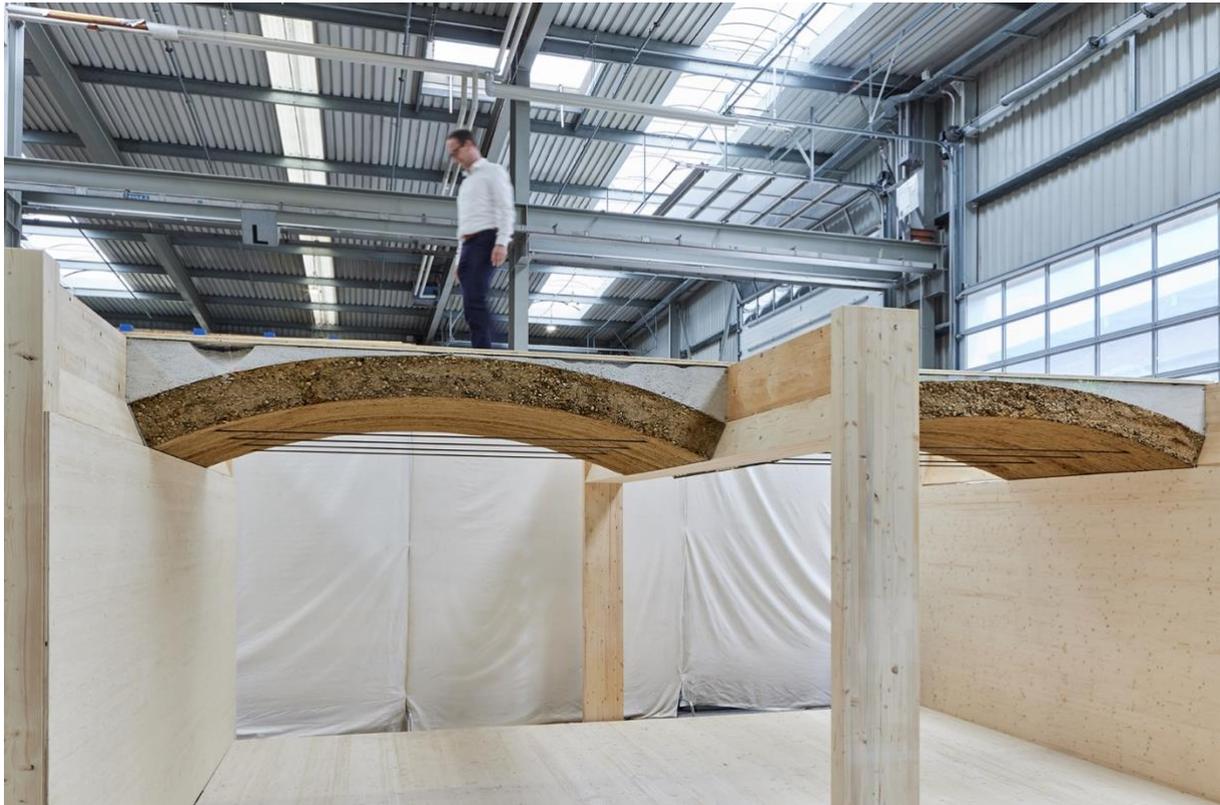
10 Kraftfluss Auflagerdetail

Das Randprofil aus Stahl wird bereits beim Stampfen mit eingebaut. Die Zugstangen können im Endzustand demontiert und wiederverwendet werden. Mit Ausnahme der Bögen in den Endfeldern, sind die Zugstangen im eingebauten Zustand statisch nicht erforderlich.

Für den Transport- und Einbaufall erwies sich das Detail als sehr gut geeignet. Die Zugstangen lassen sich gut einbauen und befestigen. In den Bereichen zwischen Hülse und Schalung musste die Verdichtung des Lehms von Hand nachgebessert werden.

Bau des Mock-Ups

Das Holzgerüst des Mock-Ups ist CNC-abgebunden. Die Brettschichtholzträger, die den Bogenelementen als Auflager dienen, werden mit Schwalbenschwänzen zwischen die Pfosten gehängt. Hier besteht die Herausforderung darin, das Tragwerk ausreichend gegen „Auseinander-drücken“ zu sichern und die Kappen gut in einer Flucht auszurichten um anschließend durch Verfüllen der Fugen einen nahtlosen Übergang zwischen den einzelnen Elementen herzustellen.



11 Fertiges Mock-Up

Der Zwischenraum zwischen Brettsperrholzplatte und dem Lehmbo gen wird mit einer Schüttung gefüllt, die die Lasten von der BSH-Platte auf den Bogen übertragen kann. Die BSH-Elemente können im Endzustand auch die notwendige Scheibensteifigkeit einer Geschossdecke sicherstellen. Sämtliche Schichten sind im Falle eines Rückbaus sortenrein voneinander trennbar.

Belastungsversuche

Das Forschungsvorhaben hatte als primäres Ziel, mit einem Mock-Up die grundsätzliche Machbarkeit von tragenden Bögen aus Lehm zu zeigen.

Sämtliche Versuche zur Tragfähigkeit und Robustheit der Bögen erfolgen auf einem experimentellen Niveau noch ohne Überwachung oder messtechnische Begleitung.

Überwachte Test und mit Messtechnik begleitete Test stehen noch aus.

Der erste fertige und gedrehte Bogen wurde am Boden liegend mit 25kg Säcken belastet.



12 Belasteter Bogen (ca. 800 kg/m²)

Die Säcke werden schichtweise aufgebracht, bis zu einer Gesamtbelastung: 2530kg oder 803,2 kg/m². Die Länge des Bogens wird vor der Belastung auf dem Boden markiert. Weder eine Längenänderung noch eine Durchbiegung ist erkennbar oder mit dem Meterstab messbar.

Belastungsversuche am Mock-Up oder Rückbau durch Zerstörung

Nach vier Wochen Standzeit, musste das Mock-Up zurückgebaut werden. Der Platz in der Halle wurde benötigt.

Um möglichst viele Erkenntnisse zur Robustheit der Lehmbojen-Decke gewinnen zu können, war das Ziel, den Bogen bewusst zum Versagen zu bringen, durch:

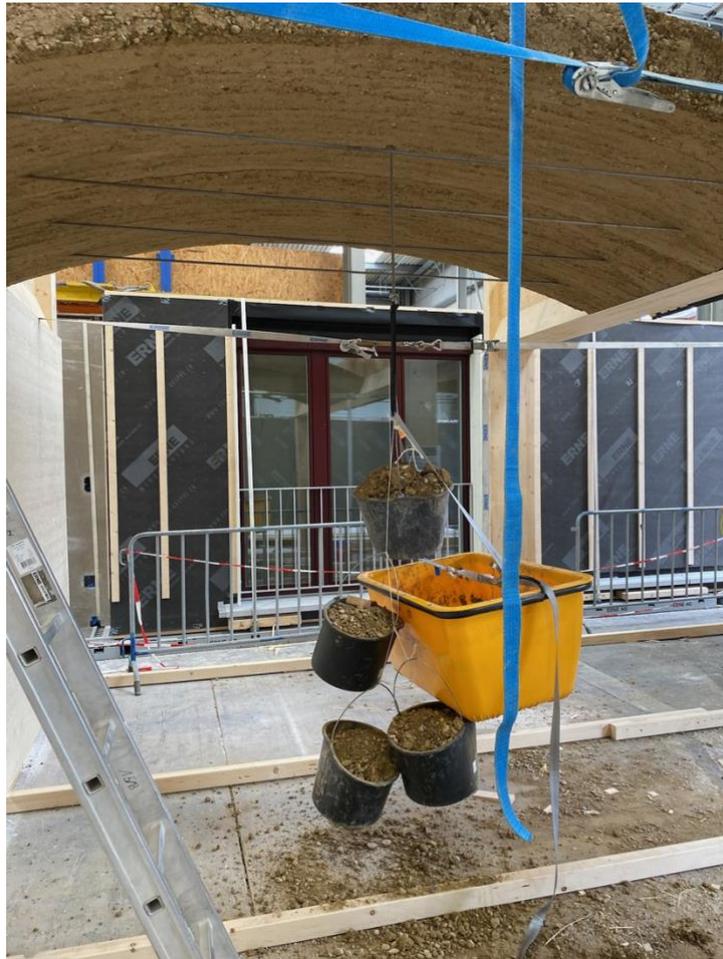
- Hohe (einseitige), punktuelle Last (1.6t Gewicht)
- Wasser
- Hohe Anhängelast (ca. 300kg)
- Dynamische Belastung



13 1.6t Gewicht halbseitig

Die Bögen halten der Last ohne weiteres Stand, sie rutschen nicht tiefer zwischen die Widerlager, auch wenn sie impulshaft und dynamisch belastet werden. Die Holzkonstruktion allerdings schwingt und es kommt deutlich hörbar zu Setzungen im Schwalbenschwanz. Die Unterkonstruktion ist die Schwachstelle und nicht der Lehmboogen.

Ein weiterer Lastfall, dem eine raumabschließende Kappe standhalten muss, ist eine punktuelle Last, wie sie durch schwere Aufhängungen, z.B. durch Beleuchtungen, auftritt. Um dies zu simulieren, wird eine Gewindestange durch eines der Ankerlöcher geführt und mit einer Unterlegscheibe (Außendurchmesser 58 mm) und Mutter auf der Oberseite gesichert. Nach und nach wird an die Gewindestange ein Gewicht von ca. 300kg, bestehend aus mit Lehm gefüllten Eimern und einer mit Wasser gefüllten 200 l Mörtelwanne, gehängt. Es lässt sich kein Unterschied zwischen belastetem Bogensegment und unbelastetem Bogensegment erkennen.



14 300kg Einzellast

Es war nicht möglich, den Bogen durch hohe, einseitige Lasten oder Anhängelasten zum Versagen zu bringen.

Um einen Eindruck von der Wasserresistenz zu erhalten wird ein Wasserschlauch auf die Konstruktion gelegt. Zunächst fließt das Wasser zwischen Stahlbauteil und Holzwiderlager in den Raum, die Fußpunkte nassen zuerst durch, aus den Stoßstellen fällt die Füllung der Fugen und das Wasser rinnt zwischen den einzelnen Elementen hindurch. Am Fußpunkt beginnend, den Rändern des Elementes folgend fallen kleinere durchnässte Schollen ab, darunter ist das Material fast vollständig trocken. Nach ca. 1 Std. Bewässerung wird der Versuch beendet, der Bogen konnte in dieser Zeit nicht zum (Teil)-Versagen gebracht werden.



15 Bewässern des Bogens

Erfreulicherweise hat sich gezeigt, dass die Bögen eine hohe Robustheit aufweisen, insbesondere gegen die Szenarien, die als kritisch für die Bögen angesehen wurden.

Hohe Einzellasten (auch einseitig), hohe punktuelle Anhängelasten und vor allem Wasser konnten die Bögen nicht zum Versagen bringen.

Erst das Anheben der Bögen in Feldmitte um ca. 40cm hat, wie erwartet, zum Aufreißen der Bögen am unteren Rand (in den $\frac{1}{4}$ Punkten) bzw. am oberen Rand (in Feldmitte) geführt und der Bogen konnte zurückgebaut werden.



16 Rückbau durch Anheben der Bögen

Erfreulicherweise hat sich gezeigt, dass die Bögen eine hohe Robustheit aufweisen, insbesondere gegen die Szenarien, die als kritisch für die Bögen angesehen wurden.

Hohe Einzellasten (auch einseitig), hohe punktuelle Anhängelasten und vor allem Wasser konnten die Bögen nicht zum Versagen bringen.

Erst das Anheben der Bögen in Feldmitte um ca. 40cm hat, wie erwartet, zum Aufreißen der Bögen am unteren Rand (in den $\frac{1}{4}$ Punkten) bzw. am oberen Rand (in Feldmitte) geführt und der Bogen konnte zurückgebaut werden.

Fazit und Ausblick

Geschossdecken aus tragenden Lehm-Bögen zu bauen, ist die Idee der wh-p Ingenieure und Bez+Kock Architekten für das neue Besucherzentrum am Schloss Charlottenburg in Berlin.

Im Rahmen eines Forschungsprojekts, gefördert durch die DBU, konnte gezeigt werden, dass dies grundsätzlich möglich ist. Das gebaute Mock-Up zeigt den Raumeindruck von gestampften Lehmbögen, die nach dem Prinzip der preußischen Kappendecke als tragendes Element eingesetzt wurden.

Insbesondere zur Robustheit, Herstellung und Machbarkeit konnten einige Fragen geklärt werden, andererseits sind neue Fragen aufgetaucht, die jetzt im Rahmen eines weiteren Forschungsprojekts für dieses Bauvorhaben, aber vor allem auch für eine Serienreife geklärt werden sollen. In einem Brandversuch soll die Feuerwiderstandsdauer geprüft werden und die akustischen Eigenschaften zwischen zwei Geschossen.

Tragende Bögen aus reinem Lehm könnten nach Ansicht der Autoren eine Alternative zur Holzbalkendecke sein. Geschossdecken aus Holz fehlt oft die (thermische) Masse. Bei einer Decke mit Lehmbögen ist die Masse in ausreichendem Masse vorhanden.

Abbildungen

- 1 Mock-Up © wh-p Ingenieure
- 2 Wettbewerbsbeiträge wh-p Ingenieure mit tragenden Bögen aus Lehm © wh-p Ingenieure
- 3 Besucherzentrum Schloss Charlottenburg, Wettbewerb 1. Preis Bez + Kock Architekten mit wh-p Ingenieure © Bez + Kock Architekten
- 4 Besucherzentrum Schloss Charlottenburg, Wettbewerb 1. Preis Bez + Kock Architekten mit wh-p Ingenieure © Bez + Kock Architekten
- 5 Grafische Ausgabe mit der Geometrie und Stützline © wh-p Ingenieure
- 6 Grafische Ausgabe zum Stützlinienkriterium © wh-p Ingenieure
- 7 Drehen eines Bogenelements mit dem Kipptisch © wh-p Ingenieure
- 8 Bogenelement am Kran © wh-p Ingenieure
- 9 Isometrie Mock-Up © wh-p Ingenieure
- 10 Kraftfluss Auflagerdetail © wh-p Ingenieure
- 11 Fertiges Mock-Up © arnefotos | Arne Hartenburg
- 12 Belasteter Bogen © wh-p Ingenieure
- 13 1.6t Gewicht halbseitig © wh-p Ingenieure
- 14 300kg Anhängelast © wh-p Ingenieure
- 15 Bewässern des Bogens © wh-p Ingenieure
- 16 Rückbau durch Anheben der Bögen © wh-p Ingenieure

Literatur

- 1) Weber, Paul; „Entwicklung und Bemessung einer Lehmkappen-Deckenkonstruktion“, Master-Arbeit TU-Berlin, 18.4.2023
- 2) Tarantino, Cotana, Viviani; „Shot-Earth for eco-friendly and Human-Comfortable Construction Industry“, Springer Verlag
- 3) Röhlen, Ziegert; „Lehmbau-Praxis“, Beuth-Verlag

Autoren

Stumpf, Martin, geb. 1973; 1994–2000 Studium konstruktiver Ingenieurbau Universität Dortmund; Geschäftsführender Gesellschafter bei wh-p Ingenieure Basel, Stuttgart, Berlin; seit 2020 Professor für Tragwerksentwurf an der Hochschule für Technik Stuttgart, Fakultät Architektur und Gestaltung

Ginter, Andreas, geb. 1987; 2008-2013 Studium Bauingenieurwesen HTWG Konstanz; Teamleiter bei wh-p Ingenieure Berlin

Warhof, Nora, geb. 1985; 2007-2009 Lehre zur Zimmerin - überwiegend im Reisegewerbe tätig; seit 2013 Zimmerin für Restaurierungsarbeiten (Ausbildung in Görlitz); seit 2021 Bachelor in Bauphysik (HfT Stuttgart)