

## Effiziente Ortbetondecken unter Verwendung doppelt gekrümmter Systemschalungen

<b>1. Zielerreichung und Projektstatus</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Projektleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2. Wissenschaftliche Leitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2.3. Life Cycle Assessment</b> .....	<b>3</b>
<b>2.4. Entwurf, Geometrie, Systemgrenzen</b> .....	<b>3</b>
<b>2.5. Bemessungsverfahren</b> .....	<b>5</b>
<b>2.6. Herstellungskonzept</b> .....	<b>9</b>
<b>2.7. Versuche Fertigung</b> .....	<b>10</b>
<b>2.8. Klein- und Großversuche</b> .....	<b>12</b>
<b>2.9. Vertiefte bauphysikalische und bauakustische Analysen</b> .....	<b>13</b>
<b>3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten</b> .....	<b>15</b>
<b>4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit</b> .....	<b>15</b>

### 1. Zielerreichung und Projektstatus

Im Verlauf des ersten Forschungsjahres wurde erkannt, dass es sinnvoll ist Teile aus dem zweiten Forschungsjahr schon im ersten Jahr zu behandeln und dafür den Anteil anderer Teile im ersten Jahr zu verringern und im zweiten Jahr vertieft zu bearbeiten. Dieses Vorgehen wird sich positiv auf den Arbeitsfluss und auf die Erreichung der vorgesehenen Endziele auswirken. Da es sich um eine Verschiebung und keine Änderung der Ziele handelt, wurden alle beschriebenen Ziele erreicht und die erarbeiteten Inhalte bieten die entsprechende Basis zur Erarbeitung der für das zweite Forschungsjahr geplanten Inhalte. Bei den in das erste Jahr verlagerten Inhalten handelt es sich hauptsächlich um den Bau der Schalungssysteme und die Durchführung der entsprechenden Aufbauversuche. Mitunter auch hierdurch kam es im 1. Forschungsjahr zu einer kostenneutralen Verlängerung des Projekts, da der notwendigen probeweisen Schalungsaufbau mit einem hohen logistischen Aufwand verbunden war und hierbei auf die Eingliederung in Produktions- und Lieferkapazitäten der Projektpartner Rücksicht genommen werden musste. Die Verlängerung hat den Erkenntnisgewinn sehr positiv beeinflusst.

**Die bisherigen Ergebnisse sind vielversprechend und zeigen, dass die Hauptziele, nämlich die Entwicklung einer ressourcenschonenden Stahlbetondecke in Leichtbauweise einschließlich eines Bemessungsmodells und des dazugehörigen effizienten gekrümmten Schalungskonzeptes, weiterhin als realistisch angesehen werden können.**

Die wichtigsten Meilensteine waren:

- *Vertiefte* Untersuchungen der optimalen Geometrie haben ergeben, dass neben der Deckenform der böhmischen Kappe auch Geschoßdecken in Kreuzgratform (mit geringem Bogenstich) eine potenzielle sinnvolle Einsparung ermöglichen. Zum derzeitigen Zeitpunkt war es noch nicht möglich, sich auf eine Deckenform festzulegen. Aus diesem Grund werden, wenn auch zum Zeitpunkt der Antragstellung noch nicht erwartet, soweit möglich, beide Deckenformen parallel weiterentwickelt.
- Die Anpassbarkeit auf verschiedene Grundrissituationen wurde für beide Deckenformen durch eine umfangreiche Topologiestudie und für die Geschoßdecken in Form der böhmischen Kappe auch durch Konzepte verschiedener Schalungsmethoden untersucht und bestätigt. Hierbei wurden schneller als zum Zeitpunkt der Antragstellung erwartet erfolgreich mehrere Schalungsvarianten konzipiert, gebaut und getestet. Da die Untersuchung zweier Schalungskonzepte nicht vorgesehen war, werden mögliche anpassbarer Schalungskonzepte für die Geschoßdecken in Kreuzgratform im zweiten Forschungsjahr untersucht.

- Die Untersuchungen möglicher alternativer Schalungsoberflächen wurde zugunsten der detaillierten Untersuchungen der Geometrie und Herstellbarkeit der Schalung im ersten Forschungsjahr nur theoretisch *konzeptionell* behandelt. Eine eingehende Behandlung dieser Thematik erfolgt im 2. Forschungsjahr. Dies stellt eine gewisse Abweichung der gesetzten Bearbeitungsreihenfolge dar.
- Es wurden erfolgreich sowohl statische als auch bauphysikalische Fragestellungen behandelt und wegweisende Erkenntnisse zu Schnittgrößen, Tragfähigkeit, Verformung und Luftschallschutz gewonnen, was den angestrebten Ergebnissen entspricht. Um ein besseres Verständnis des komplexen Verhaltens der Bauteile zu erhalten und gesichert einfache Berechnungsmodelle *abzuleiten*, sind noch weitere und detailliertere Simulationen, Experimente und Messungen durchzuführen.
- Um eine realitätsnahe Referenz als Vergleichsbasis für die Nachhaltigkeitsbewertungen zu schaffen, wurde eine erste Basis für ein Tool geschaffen, welches in seiner Endform es ermöglichen wird, bezogen auf die Emissionen, die optimierteste beste Form einer punktgestützten Flachdecke mit den optimierten Formen der erarbeiteten Deckensysteme zu vergleichen.
- Die architektonischen Anforderungen machen thermische Trennungen notwendig. Topologiestudien haben aufgezeigt, dass es weiterer Untersuchungen bedarf, ob mit am Markt verfügbaren thermischen Bauteiltrennungen wie z.B. Thermokörbe alle Grundrissituationen hergestellt werden können oder ob die Entwicklung eines Sonderbauteilkonzepts notwendig ist.
- Weiters wurden auch für das zweite Forschungsjahr schon Vorbereitungen getroffen. Hierzu zählen beispielsweise die Planung und Abklärung der Parameter für einen Prototypen in realen Abmessungen (1 : 1), der als Versuchsobjekt dienen soll.

## 2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

### 2.1. Projektleitung

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Neben der Vertretung gegenüber der FFG umfasste die Projektleitung im Berichtszeitraum auch die terminliche und kaufmännische Projektkoordination, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den Projektpartner:innen (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement. Zusätzlich wurden administrative Aufgaben der Projektorganisation übernommen und die termingerechte Einholung von Partnerbeiträgen.

Personell fand der Abgang von Ing. Jürgen Silberknoll sowie die Aufnahme von Dr. Ufuk Yilmaz als neuer Forschungsreferent der ÖBV statt.

Der Fertigstellungsgrad dieses Arbeitspakets beträgt 100 %.

### 2.2. Wissenschaftliche Leitung

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Das 1. Forschungsjahr war aus Sicht der wissenschaftlichen Leitung sehr erfolgreich. Es wurden erfolgreich mehrere Workshops mit einem hohen Erkenntnisgewinn abgehalten. Alle Partner wurden regelmäßig über den Fortschritt der einzelnen Arbeitspakete informiert und bekamen die Chance, sich auch zu den Arbeitspaketen zu äußern, an denen sie nicht beteiligt waren. Es ist sehr hervorzuheben, dass die verschiedenen beteiligten Forschungspartner und universitären Institute sehr wertschätzend und engagiert an den unterschiedlichen fachlichen Themen zusammenarbeiten und so das Wissen der österreichische Baubranche voranbringen.

Da der abgehaltene Schalungs-Aufbau-Workshop sowohl in seiner Organisation als auch in seiner Durchführung und Nachbereitung sehr aufwendig war und es das Zusammenwirken aller mit In-Kind am Projekt beteiligten Firmen bedurfte, kam es zur kostenneutralen Verlängerung des ersten Forschungsjahrs. Vor allem die Eingliederung der Produktion der Schalungsteile und das zur Verfügung stellen personeller Ressourcen machte dies notwendig.

Im Laufe des ersten Forschungsjahres wurde das Vorziehen von bauphysikalischen 3D-Simulationen der Geschoßdecke als für das Projekt wichtig empfunden. Da während der Arbeiten an den

Schalungskonzepten die Erkenntnis gewonnen wurde, dass die Untersuchung der Schalhäute erst nach dem Schalungs-Aufbau-Workshop sinnvoll ist, konnten diese Simulationen schon im ersten Jahr ermöglicht werden.

Der Arbeitsfortschritt des Projektes ist auf dem erwarteten Stand und die für das Arbeitspaket 2 im ersten Forschungsjahr gesetzten Ziele sind zu 100% erfüllt.

### 2.3. Life Cycle Assessment

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Zur quantitativen Darstellung des CO<sub>2</sub>-Einsparpotentials der erarbeiteten Systemdecke, wird diese mit einer äquivalenten konventionellen Flachdecke verglichen. Hierzu werden die Herstellungsemissionen (Modul A1-A3) der beiden Varianten eines identen statischen Systems gegenübergestellt. Die Beton- und Stahldatensätze für die Berechnung der Emissionen basieren auf Datensätze der *ÖKOBAUDAT*, da diese öffentlich zugänglich sind. Zusätzlich sind unterschiedliche Betonrezepturen und Bewehrungsstähle verfügbar, die eine Anpassung der Materialzusammensetzungen ermöglichen. Damit verschiedene Spannweiten und Grundrisskonfigurationen automatisch berechnet und verglichen werden können, wurde mit der Entwicklung eines Python Tools begonnen, welches jeweils eine optimierte konventionelle punktgestützte Flachdecke bemisst, die Emissionen berechnet und diese anschließend mit dem erarbeiteten Deckensystem für die jeweilige Konfiguration gegenüberstellt. Dieses wurde in einem ersten Schritt bereits für eine repräsentative Konfiguration erarbeitet und getestet

Im weiteren Verlauf soll die aktuell auf der Finite-Differenzen-Methode (FDM) basierende statische Berechnung durch die Implementierung eines effizienteren Solvers, wie etwa *SOFiSTiK*, ersetzt und verbessert werden. Dies ermöglicht nicht nur eine effizientere Berechnung der Flachdecke, sondern vereinfacht den Umgang mit unterschiedlichen Grundrisskonfigurationen. Die geometrischen Randbedingungen sollen mithilfe der 3D-Software *Rhino* und der Erweiterung *Grasshopper* definiert und anschließend mit dem entwickelten Tool verknüpft werden.

Der für des erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 3 wurde zu 100% erfüllt.

### 2.4. Entwurf, Geometrie, Systemgrenzen

**Fertigstellungsgrad:** 100%

In Arbeitspaket 4 wurden neben den bereits in der Vorarbeit zum Forschungsprojekt untersuchten Deckenquerschnitte in Form einer böhmischen Kappe weitere Formen der Deckenuntersicht untersucht. Hierzu zählen um das Deckenfeldzentrum rotierende elliptische Kurven mit verschiedenen Radien, um die Stütze rotierende Kurven (woraus sich kelchförmige Stützen ergeben) und eine Variante aus einfach gekrümmten miteinander verschnittenen Zylindern, woraus sich kreuzgratförmige Deckenformen ergeben. Nach der Bewertung der verschiedenen Kriterien wie Herstellbarkeit und des Einsparungspotentials wurden Decken in der Form einer böhmischen Kappe und in der Form eines Kreuzgrats als potentiell interessante Deckenformen ermittelt. Dabei weist die Kreuzgratform ein größeres Einsparungspotential, aber nach ersten Untersuchungen auch eine größere Verformung und einen etwas höheren Luftschalldurchgang (durch Simulationen ermittelt) auf. Auf Basis der bisherigen Untersuchungen konnte bis jetzt noch keine Festlegung auf eine der beiden Deckenformen stattfinden. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren von Tragwirkung, über Bauphysik bis hin zur Herstellbarkeit ist noch nicht klar, ob eines der beiden Systeme ausgeschieden werden kann. Aus diesem Grund werden beide Systeme, soweit möglich, parallel betrachtet.

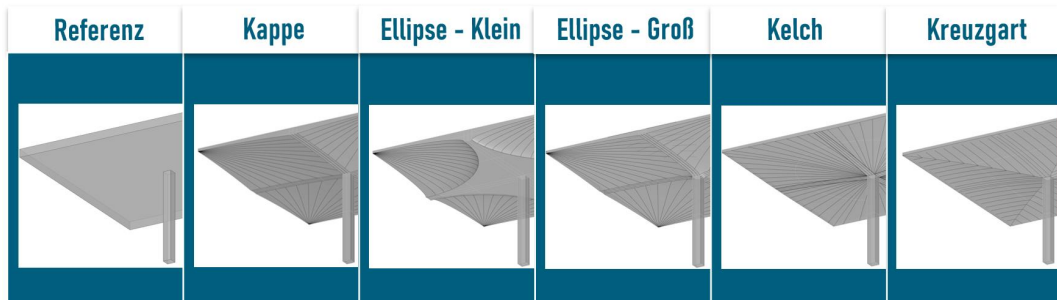


Abbildung 2.4.1: Gegenüberstellung der untersuchten Deckenquerschnitte

### Gegenüberstellung der untersuchten Deckenquerschnitte

Um verschiedene Deckenfelder mit unterschiedlichen Spannweiten und Ausparungsgeometrien möglichst effizient, in Form einer böhmischen Kappe und des Kreuzgrats zu generieren und diese an die anderen Arbeitspakete verteilen zu können, wurde ein entsprechendes Tool entwickelt. In einem ersten Schritt wurden verschiedene Spannweiten und Formen untersucht, wobei eine genaue Aussage über die optimale Spannweite nach weiteren Simulationen getroffen werden kann. Ein Ergebnis der Geometriestudie ist, dass die Festlegung auf einen bis maximal drei Kugelradien (böhmische Kappe) bzw. Zylinderradien (Kreuzgrat) eine sinnvolle Begrenzung der möglichen Decken-/Schalungsgeometrien darstellt, um ein systematisches Schalungssystem herstellen zu können, welches gleichzeitig auf verschiedenste Grundrisskonfigurationen anpassbar bleibt.

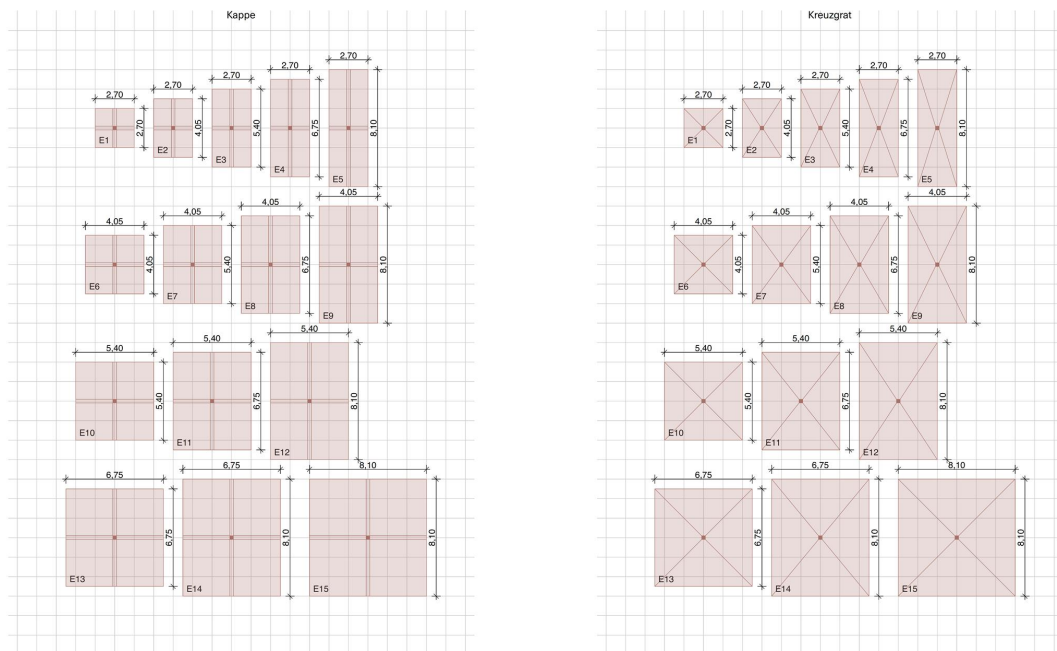


Abbildung 2.4.2: Eine Auswahl verschiedener Deckenformen und Größen

### Eine Auswahl verschiedener Deckenformen und Größen

Mit den beiden Deckenformen wurden im Zuge einer erarbeiteten umfangreichen Typologiestudie verschiedene Grundrissituationen betrachtet. Um die Anwendbarkeit der Decke zu untersuchen, wurde das Thema breit aufgestellt. Auf einen zu tiefen Grad der Detaillierung wurde hierbei bewusst verzichtet, um trotz der Breite der aufgefächerten Thematik einen Überblick behalten zu können und eine möglichst universelle Anwendbarkeit zu gewährleisten. Besonders wichtig ist dies für Personen, welche mit dem Projekt noch nicht vertraut sind. Es wurde besonderes Augenmerk auf die Anwendbarkeit der beiden Systeme, welche in ihrer Grundform punktgestützte Deckensysteme darstellen, in einer Wohnbausituation gelegt, aber auch

andere Nutzungsszenarien betrachtet. Neben den Grundrissituation wurden auch mögliche Fassadensituationen untersucht, um mögliche Empfehlungen für den Umgang mit den neuartigen, sich ergebenden Deckenprofilen zu geben. Es ergeben sich auf Basis der Studie Empfehlungen für die Anwendung der Deckensysteme aber auch Problemstellungen, die im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts untersucht werden müssen. Darunter fallen Thematiken wie die Verwendung und Lage möglicher thermischer Trennungen innerhalb des Deckensystems, die Anwendung des Deckensystems auf rechteckige Grundrisse und die Anwendung des Systems auf Sonderbereiche, in denen das Deckenraster verlassen werden muss.

Auch wurden die bisherigen Untersuchungen der Deckentypologie unter der Prämisse geplant, dass Deckendurchbrüche im Deckenquerschnitt bzw. besonders an den hochbeanspruchten Stellen im Bauteil vermieden werden. Es werden jedoch in weitere Folge auch Deckendurchbrüche an ungünstigen Stellen untersucht und simuliert.

Um eine wirtschaftliche Anwendung der Deckensysteme zu gewährleisten und eine tatsächliche Einsparung in realen Projekten zu generieren, gilt zum momentanen Zeitpunkt die Empfehlung, die Deckensysteme in Form eines regelmäßigen Deckenrasters anzuwenden. Es scheint zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, das System für jede mögliche Grundrissituation anzuwenden. Eine Kombination aus den untersuchten Deckensystemen mit klassischen Flachdecken oder anderen materialeffizienten Systemen könnte, vor allem, um die angestrebte Tragwirkung der Deckensysteme zu generieren und auch in Hinblick auf die Herstellung der Deckensysteme, ein durchaus gangbarer Weg sein. Selbst wenn nur ein Teil der Deckenfläche eines Gebäudes in einer der optimierten Bauweisen gebaut wird, ergibt dies eine reale Einsparung der Emissionen.

Eine der wichtigsten Aussagen, welche nach der Zusammenführung aller bisherigen Ergebnisse des ersten Forschungsjahres getroffen werden kann ist, dass die am Anfang des Projekts aufgestellte Hypothese, dass die beforschten Deckenquerschnitte einen praktikablen Weg der Verringerung der Emissionen darstellen, bestätigt wurde. Außerdem bildet das erste Jahr eine solide Basis für die weiteren Forschungsjahre, in der die noch offenen komplexen Fragestellungen weiter bearbeitet werden sollen.

Aufgrund der multifaktoriellen Einflüsse wurde beim Forschungsstand noch keine obere und untere Grenze der Deckenspannweite festgelegt. Da dies in großem Maße von noch detaillierter zu untersuchenden Faktoren wie z.B. der Bewehrungsführung abhängt und es sich momentan noch um zwei Deckensysteme handelt. Dies wird erst zu einem späteren Zeitpunkt möglich sein.

Die geplanten bauphysikalischen Aktivitäten umfassten die Analyse und ingenieurmäßige Modellierung der Basisgeometrie um erste Aussagen zum bauphysikalischen Verhalten der Deckengeometrie treffen zu können. Diese sollen im Entwurfsprozess berücksichtigt werden, um potentielle bauphysikalische Schwächen des Deckenquerschnitts zu erkennen und gegebenenfalls in weiterer Folge zu minimieren bzw. ihnen entgegen zu wirken.

Der Status der bauphysikalischen Aktivitäten ist folgender: Für die auf Basis anderer projektrelevanter Kriterien vorausgewählten Deckengeometrien Kappe und Kreuzgrat erfolgten mithilfe verschiedener semi-empirischer Modelle erste Prognosen zur schallschutztechnischen Leistungsfähigkeit im Hinblick auf die Einzahlangabe der Luftschalldämmung. Diese Analysen – als Grundlage für die Optimierung bzw. den Entwurfsprozess – dienen dem Vergleich der akustischen Performance der beiden Geometrien untereinander. Als Referenz wurde eine 25 cm dicke Stahlbetonflachdecke herangezogen. Darüber hinaus konnten auch weitere bauphysikalische Herausforderungen im Hinblick auf eine mögliche, praktische Ausführung der doppeltgekrümmten Deckenkonstruktion, wie z.B. im Bereich von Laubengängen, aufgezeigt werden.

Der für des erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 4 wurde zu 100% erfüllt.

## **2.5. Bemessungsverfahren**

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Es wurden mehrere Konzepte für Abstandhalter und auch verschiedene Bewehrungsanordnungen ausgearbeitet, visualisiert, im Zuge eines Workshops diskutiert, und entsprechend adaptiert. Aufgrund der geringeren Komplexität und wirtschaftlicheren Herstellbarkeit wurde im ersten Forschungsjahr eine orthogonale einer radialen Bewehrungsführung vorgezogen. Ob es sich bei der orthogonalen Bewehrung um Stabstahl oder um Matten handeln wird, hängt noch von einigen zu untersuchenden Faktoren wie den Abstandhaltern ab. Die Form der Abstandhalter ist zu einem großen Teil von der Schalhaut abhängig, auf der sie aufgestellt werden. Erste Konzepte wurden im Zuge der Arbeitspakete 7 und 8 entwickelt und teilweise auch getestet. Da hier noch kein optimales Konzept gefunden wurde wird der Erkenntnisgewinn in eine Verbesserung einfließen. Die Untersuchungen um ein ökonomisches Abstandhaltersystem zu konzipieren werden im 2. Forschungsjahr weiterverfolgt.

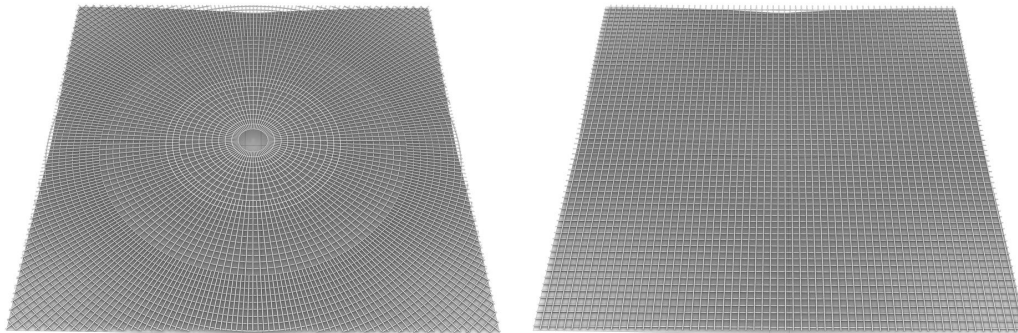


Abbildung 2.5.1: Die bisher angedachten Arten der Bewehrungsführung

#### *Die bisher angedachten Arten der Bewehrungsführung*

Die Typologiestudie hat die vorab noch nicht bedachte Notwendigkeit der thermischen Trennung dünner biegebeanspruchter Bauteile mit veränderlichem Querschnitt aufgezeigt. Im Zuge des Bewehrungsworkshops wurde auch über diese Problemstellung diskutiert und ein möglicher Ansatz erarbeitet. Ob mit am Markt verfügbaren thermischen Bauteiltrennungen wie z.B. Thermokörbe alle Grundrissituationen hergestellt werden können oder ob die Entwicklung eines Sonderbauteilkonzepts notwendig ist müssen weitere Simulationen zeigen. Vor allem da in der Typologiestudie auch für solche Bauteile unübliche Einbausituationen, wie die Verwendung in der Mitte eines Deckensystems anstatt der reinen Anwendung am Rand, bearbeitet wurden Hierbei stellt vor allem die Komplexität eines tragenden aber thermisch trennenden Bauteils in Kombination mit den oben genannten Einflussfaktoren eine anspruchsvolle Aufgabe dar.

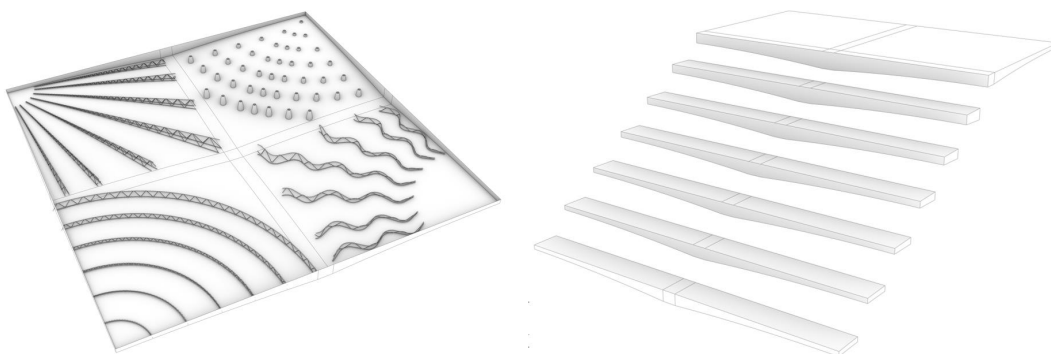


Abbildung 2.5.2: Links: Die ersten Konzepte für Abstandhalter; Rechts: Mehrere Querschnitte einer Decke, die ein thermisch trennendes Bauteil abdecken muss

*Links: Die ersten Konzepte für Abstandhalter; Rechts: Mehrere Querschnitte einer Decke, die ein thermisch trennendes Bauteil abdecken muss*

Im Rahmen des Arbeitspakets statische Analyse konnte im abgeschlossenen Projektjahr die zentrale wissenschaftliche Fragestellung zum Tragverhalten der Flachdecke mit gekrümmter Untersicht beantwortet werden. Ein besonderer Fokus lag auf der Ermittlung des maßgebenden Versagensmechanismus im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Hierfür wurden detaillierte 2D-Schalen- und 3D-Volumenmodelle der EDGES-Decke in den Programmen SOFiSTiK und ATENA aufgebaut. Insbesondere mit den Simulationen am Volumenmodell wurde im Vergleich zu den im Hochbau üblichen 2D-Berechnungen eine erheblich realitätsnähere Abbildung des Lastabtrags ermöglicht.

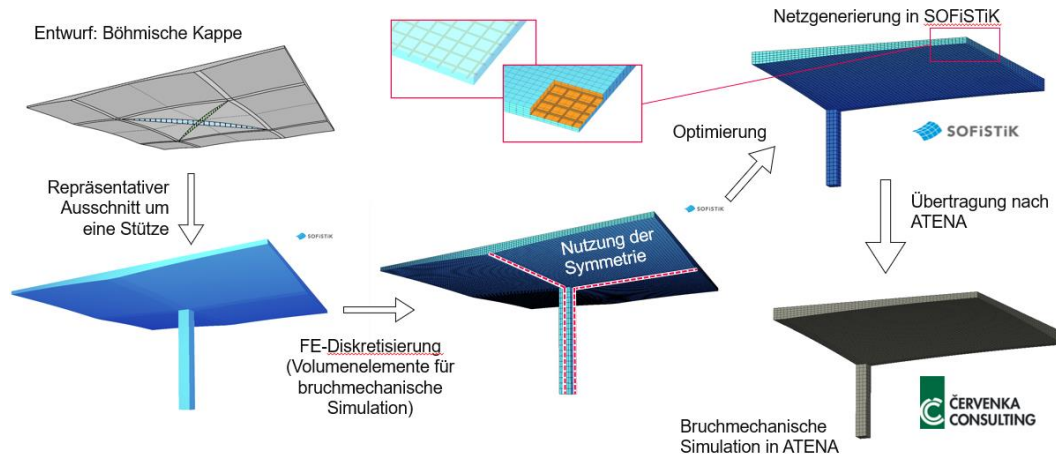


Abbildung 2.5.3: Bruchmechanisches 3D-FE-Modell

### Bruchmechanisches 3D-FE-Modell

Für einen wissenschaftlich fundierten Zugang erwies sich die dreidimensionale Modellierung als unverzichtbar, da nur so die komplexen Mechanismen des Kraft- und Schubflusses über die Plattendicke, die räumlichen Spannungszustände sowie das Verhalten im Zustand II vollständig erfasst werden können. Die im Projekt durchgeführten 3D-bruchmechanischen Simulationen stellten dabei einen zentralen methodischen Baustein dar. Solche Simulationen sind von Natur aus komplex und erfordern die sorgfältige Berücksichtigung zahlreicher Parameter, darunter nichtlineare Material- und Verbundgesetze, die Wahl geeigneter Lösungsverfahren (z. B. Newton-Raphson, Bogenlängenverfahren), die Netzfeinheit sowie angemessene Rand- und Lagerungsbedingungen.

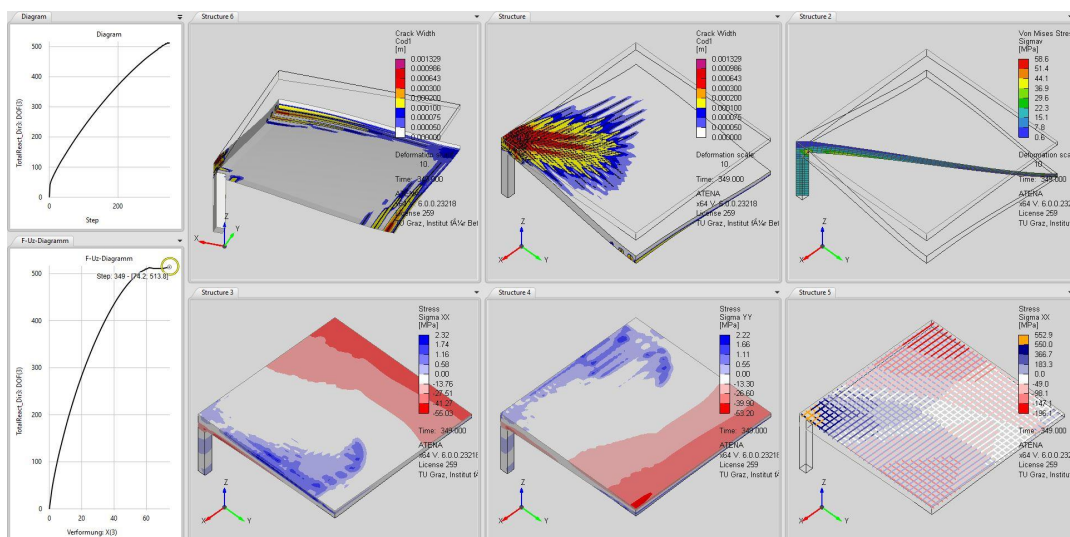


Abbildung 2.5.4: Darstellung der in einer bruchmechanischen Simulation ermittelten Rissbreiten kurz vor dem Bauteilversagen

**Darstellung der in einer bruchmechanischen Simulation ermittelten Rissbreiten kurz vor dem Bauteilversagen**

Die Auswertung der Simulationsergebnisse erwies sich ebenfalls als anspruchsvoll. Analysiert wurden unter anderem das globale Last-Verformungs-Verhalten, die Ankündigung des Versagens im Bruchzustand sowie die lokalen Spannungszustände im Auflagerbereich. Im Vergleich zu einem 2D-Modell lassen sich durch die 3D-Simulation eindeutige Bruchmechanismen identifizieren, einschließlich des Schubflusses in Dickenrichtung der Platte und der Abfolge der maßgebenden Rissprozesse. Die verwendeten bruchmechanischen Modelle kombinierten ein nichtlineares Betonmaterialmodell mit der diskreten Abbildung der Bewehrung mittels Fachwerkstäben.

Ein wesentliches Ergebnis des ersten Projektjahres war die Erkenntnis, dass die Bauteilsteifigkeit der Platte als zuverlässige Steuerungsgröße für die Einstellung des zu erwartenden Bruchmechanismus bzw. den Ausschluss einer ungewollten Durchstanzgefahr herangezogen werden kann. Die Steifigkeit hängt sowohl von der Geometrie und Lagerung der Decke als auch vom Bewehrungsgrad sowie den Materialkennwerten von Beton und Stahl ab. Diese Erkenntnis bildet die Grundlage für weitere Untersuchungen zur ressourcenschonenden Bemessung. Um den Einsatz zusätzlicher Durchstanzbewehrung zu vermeiden und damit Material-, Montage- und Kostenaufwand zu reduzieren, wurde ein Bemessungsvorschlag entwickelt. Dieser zielt darauf ab, Steifigkeitskonstellationen so zu wählen, dass das Durchstanzen als Bruchmechanismus ausgeschlossen werden kann bzw. vorher ein Biegeversagen eintritt. Hiermit wird zudem eine deutliche Versagensankündigung infolge plastischer Dehnung der Biegezugbewehrung bzw. mit freiem Auge erkennbare Rissöffnung und Durchbiegung sichergestellt. Als baupraktischer Ansatz wurde ein Diagramm zum Ausschluss des Durchstanzens für vorgegebene Steifigkeitsverhältnisse erarbeitet. Dies ist insbesondere für die praktische Planung relevant, bei der die konventionelle Biegebemessung weiterhin mittels statischer Analyse und Bemessung am linear-elastischen 2D-Schalenmodell erfolgt, während anschließend anhand der ermittelten Steifigkeit überprüft werden kann, ob das Versagenszenario „Biegung“ oder „Durchstanzen“ maßgebend ist.

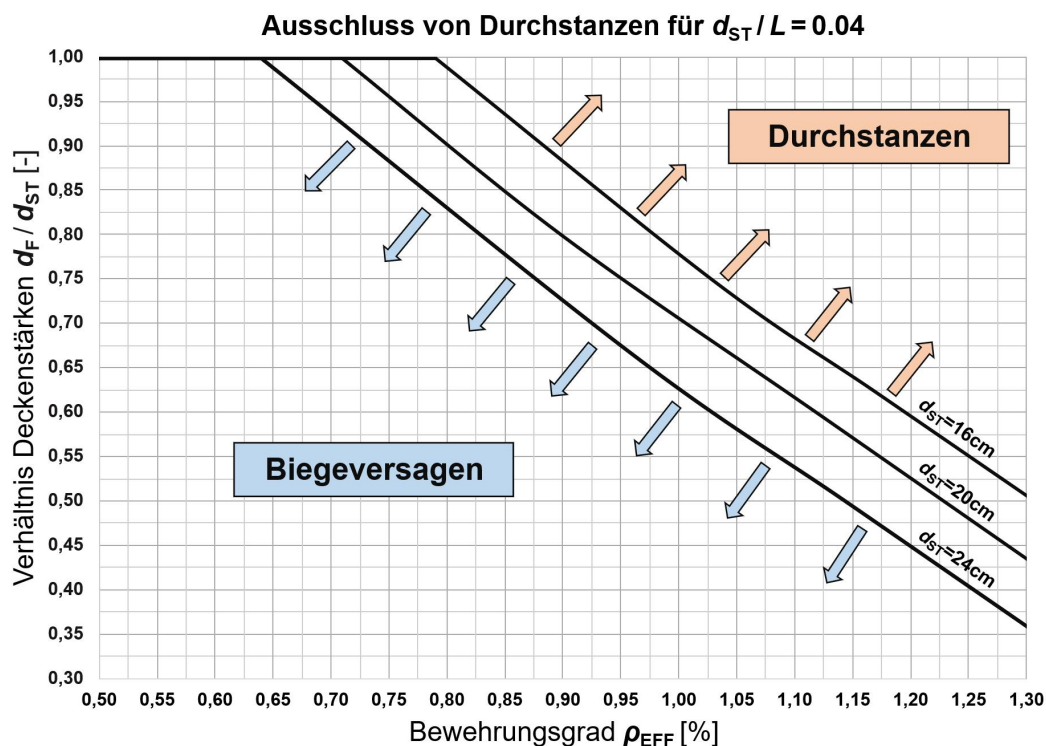


Abbildung 2.5.5: Beispiel eines Diagramms zum Ausschluss des Durchstanzens

**Beispiel eines Diagramms zum Ausschluss des Durchstanzens**

Die im ersten Projektjahr gesetzten Ziele – das Verständnis des Lastabtragmechanismus, die Analyse des Einflusses der gekrümmten Untersicht auf den Schubfluss, die Untersuchung des Durchstanzverhaltens sowie das Ableiten erster Grundlagen für eine ressourceneffiziente Bemessung – wurden erreicht.

Die Arbeitsschritte konnten insgesamt gemäß Plan umgesetzt werden. Wesentliche Abweichungen traten nicht auf. Der aktuelle Fertigstellungsgrad für die Arbeiten im ersten Forschungsjahr beträgt 100 %.

## 2.6. Herstellungskonzept

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Im ersten Forschungsjahr wurde das Arbeitspaket 6 umfangreich bearbeitet. Es wurden 14 potentielle Schalungskonzepte ausgearbeitet und grafisch dargestellt. Dabei wurde von Kartonschalungen über Spindeltische bis zu pneumatischen Schalungen eine möglichst große Anzahl an Ansätzen konzipiert. An den möglichen Varianten wurde in zwei Workshops mit verschiedenen Forschungspartnern gearbeitet und die drei vielversprechendsten Systeme ausformuliert, an denen in weiterer Folge gearbeitet wurde.

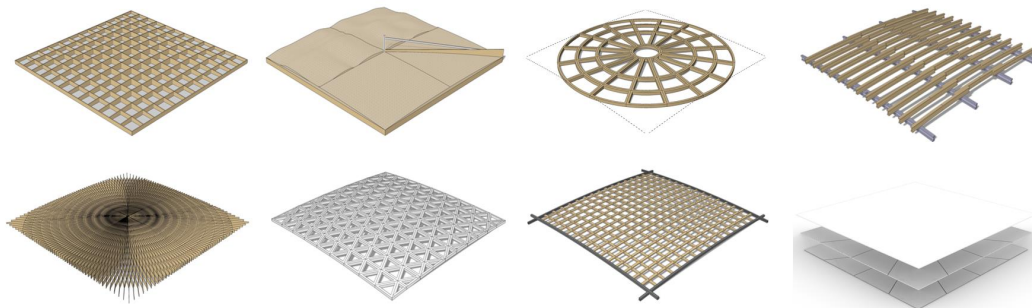


Abbildung 2.6.1: Eine Auswahl der erarbeiteten potentiellen Schalungsmöglichkeiten

### *Eine Auswahl der erarbeiteten potentiellen Schalungsmöglichkeiten*

Bei den weiter verfolgten Schalungsvarianten handelt es sich um ein am Markt verfügbares ebenes Rahmenschalungssystem (Dokadek30), welches verzerrt wird, ein gängiges Trägerschalungssystem (Dokaflex), welches mittels gekrümmter Aufsatzteile modifiziert wird, sowie ein eigens für gekrümmte Decken entwickeltes Schalungssystem aus dreieckigen Rahmenschalungselementen, ähnlich der Form einer geodätischen Kuppel. Alle drei Systeme können unter der Voraussetzung, dass die zu schalende Deckenform wie im Arbeitspaket 4 beschrieben, immer derselben bzw. einer definierten Anzahl an möglichen Formen entspricht, als Systemschalung produziert und angewendet werden. Hierfür wurde auch ein Konzept für die Anordnung der Standardschalungsteile und der Umgang mit Übergangsbereichen zwischen diesen entwickelt. Vor allem in Hinsicht auf eine kosteneffiziente Herstellung gekrümmter Geschoßdecken ist eine solche Systematisierung der Decken bzw. Schalungsgeometrie ein wichtiger Teil des Projekts. Alternativ könnten alle Systeme in der ausgearbeiteten Form auch als Sonderschalung für davon abweichende Geometrien hergestellt oder genutzt werden.

Diese drei Schalungsvarianten erlauben, unter der Nutzung der hierfür verwendbaren bzw. anpassbaren am Schalungsmarkt vorhandenen Schalungskomponenten, doppelt gekrümmte Decken zu schalen. Auch wurde auf für Schalungen wichtige Punkte wie Ergonomie, Gewicht und Wiederverwendbarkeit Rücksicht genommen. Die Schalungskonzepte stellen keine fertig entwickelten Produkte dar. Die Erkenntnisse aus Arbeitspaket 7 zeigen, dass die Systeme auch in ihrer konzeptuellen Form einer Anpassung bedürfen. Hierzu zählen bei dem modifizierten Trägerschalungssystem ein verstellbarer Abstandhalter in der Trägerebene um deren Lage zu sichern und bei der Rahmenschalung aus dreiecksförmigen Elementen die Entwicklung eines eigenen Stützenkopfes, sowie die dafür notwendige Anpassung der Elemente.

Im Zuge der Schalungworkshops wurden auch verschiedene Arten von möglichen Schalungsmaterialien durchgearbeitet. Einer der Erkenntnisgewinne ist, dass das Schalungsmaterial nicht nur rein von der

Wiederverwendbarkeit und Oberfläche, sondern zu einem großen Teil von den Oberflächenanforderungen der Betonbauteile bestimmt wird. Diese Anforderung wird vom Planer festgelegt, was weniger die Option der Anpassung der Schalhaut als die der statisch wirksamen Plattenteile beeinflussbar macht. Schon jetzt gibt es am Schalungsmarkt Schalhautsysteme, bei denen die mit dem Beton in Kontakt tretende Oberfläche auf ein Trägermaterial befestigt wird. Trotz dieses Umstandes macht die Untersuchung bisher wenig bis nicht verwendeter Schalungsmaterialien durchaus Sinn. Hierzu wurden Thermoholz, großflächige Silomeerplatten und Holz, dessen Oberfläche mittels Temperatur geschwärzt (verbrannt) wurde als potentiell relevant erachtet. Vor allem, da zuerst ermittelt werden musste, ob die Herstellung einer gekrümmten Schalhaut notwendig oder ob dies mittels ebener Schalungsplatten möglich ist, machen diese Untersuchungen erst im späteren Verlauf des Forschungsprojektes Sinn. Die bisher aus den in AP8 durchgeführten Versuche erhaltenen Ergebnisse weisen darauf hin, dass die Entwicklung und Herstellung einer gekrümmten Schalungstafel nicht zwingend erforderlich sind. Um diese Ergebnisse zu verifizieren, müssen, neben den durchgeführten Aufbautest, auch Ausschaltungstests durchgeführt werden. Im Besonderen in Hinblick auf die Schalungsplatten, welche mittels Nägel geheftet wurden um die Form herstellen zu können. Die für die Untersuchungen der Schalhaut eingeplanten Ressourcen wurde zum Teil in die Entwicklung der Schalungskonzepte umverteilt. Jedoch wurde im ersten Forschungsjahr, trotz dieses Umstandes eine Sondierung der möglichen Arten der Testung und Bewertung von Schalungsoberflächen recherchiert. Außerdem wurde eine erste Platte aus Thermobuche angefertigt.

Der für das erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 6 wurde zu 100% erfüllt.

## 2.7. Versuche Fertigung

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Im ersten Forschungsjahr wurden in Arbeitspaket 7 das modifizierte Trägerschalungssystem und das eigens für gekrümmte Decken entwickelte Schalungssystem aus dreieckigen Rahmenschalungselementen in eine produzierbare Form gebracht und für das Forschungsprojekt aus klassischen Schalungsmaterialien produziert. Die produzierte Menge an Schalungsmaterial wurde so gewählt, dass alle Schalungssysteme in repräsentierbarer Größe von 6,25 m x 6,25 m aufgebaut werden können. Gewählt wurde hierzu die Form eines Deckenpilzes, da diese der statischen Wirkung des Deckensystems entspricht und es an den Rändern der Deckensysteme immer derartige Schalungssituationen geben wird. Im Zuge eines Workshops wurden sowohl die zwei produzierten als auch die Rahmenschalung Dokadek30 nebeneinander in einer als Stationenbetrieb aufgebauten Situation getestet. Hierfür wurde ein entsprechendes Gerüst und hohle Stützen als Referenz aufgestellt. Der gesamte Workshop wurde multimedial dokumentiert. Die Auswertung der Daten wird im zweiten Forschungsjahr durchgeführt und die Einschätzungen über die Wirtschaftlichkeit der Schalungssysteme, in ihrer konzipierten Basisform, erlauben. Weiters kann aus der Vermessung der aufgebauten Basisgeometrie und auch aus den Messungen nach dem Belastungstest eine Aussage über die derzeit erreichte Genauigkeit der zu erwartenden Deckengeometrie getroffen werden. Hierbei wurde alles mittels einer Totalstation und Prismen aufgemessen. Die erhaltenen Ergebnisse der Vermessung ohne Belastung zeigen, dass die Systeme im Zuge des ersten prototypischen Aufbaus, bezogen auf die SOLL-Form und inkl. potentieller Ausreißer, eine Genauigkeit (vertikale Orientierung) von  $\pm 37,5\text{mm}$  (Dokadek 30),  $\pm 26\text{mm}$  (Trägerschalung) bzw.  $\pm 12\text{mm}$  (dreieckigen Rahmenschalungselementen) erreichten. Es ist hierbei anzumerken, dass es sich beim Untergrund nicht, wie bei Geschoßdecken üblich, um eine ebenen Stahlbetonplatte, sondern um eine Asphaltfläche mit merklichem Gefälle handelte, was eine durchaus erhebliche Erschwernis darstellte und die Genauigkeit mit hoher Wahrscheinlichkeit negativ beeinflusst. Neben der Vermessung wurden auch erste Abstandhalterkonzepte gefertigt und auf den Schalungskörpern testweise aufgestellt.

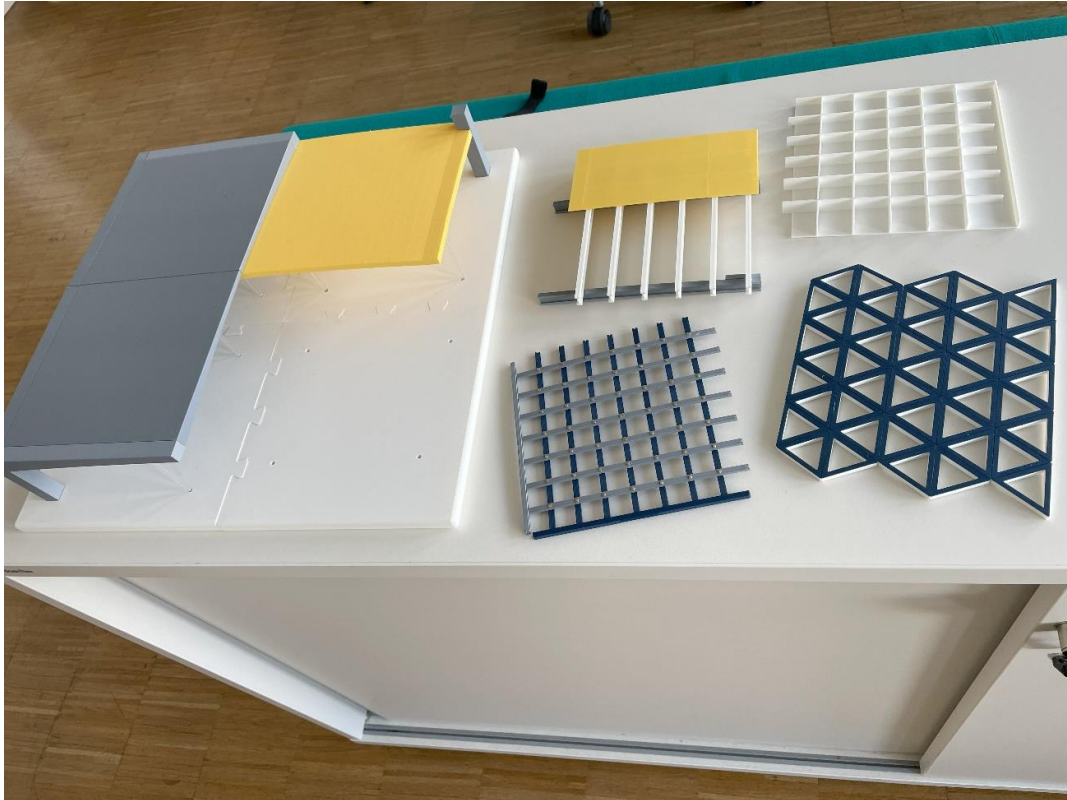


Abbildung 2.7.1: Eine Auswahl der erarbeiteten potentiellen Schalungsmöglichkeiten als 3D-Modelle

*Eine Auswahl der erarbeiteten potentiellen Schalungsmöglichkeiten als 3D-Modelle*



Abbildung 2.7.2: Gerüst Situation des Schalungs-Aufbau-Workshops

### Gerüst Situation des Schalungs-Aufbau-Workshops

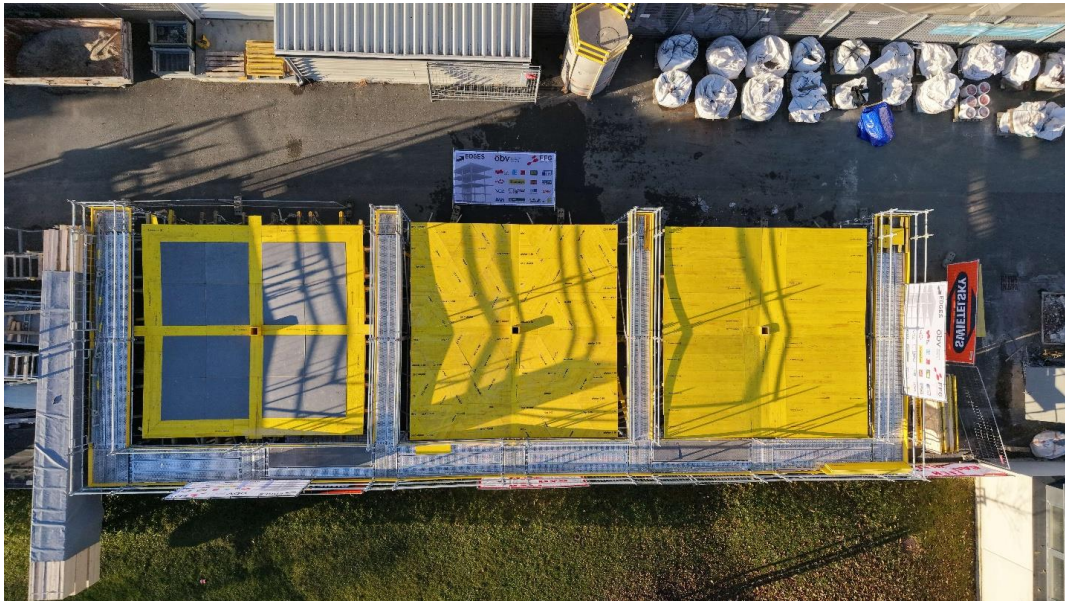


Abbildung 2.7.3: Luftbild der hergestellten Schalungsvarianten

### Luftbild der hergestellten Schalungsvarianten

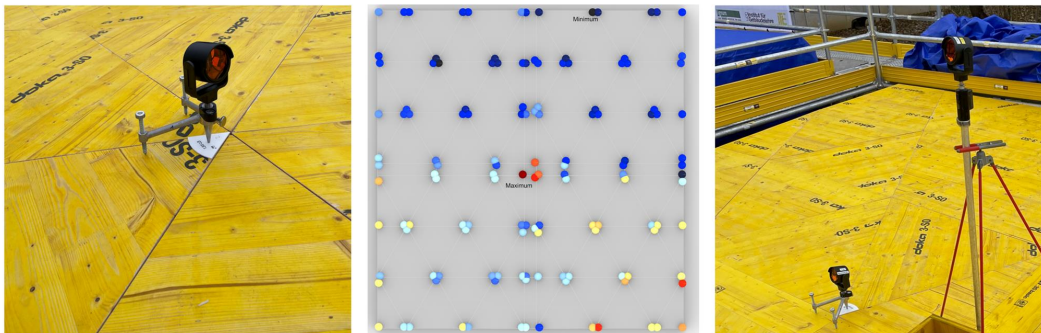


Abbildung 2.7.4: Bilder der Vermessungssituation und das Ergebnisbild eines Schalungssystems

### Bilder der Vermessungssituation und das Ergebnisbild eines Schalungssystems

Vor den Großversuchen wurde alles genau modelliert, 3D gedruckte Modelle und die prototypischen Erstentwürfe gefertigt und deren Zusammenbau getestet.

Tests bezüglich der Schalhaut werden, wie in Arbeitspaket 6 beschrieben, im 2. Forschungsjahr durchgeführt.

Der für des erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 7 wurde zu 100% erfüllt.

### 2.8. Klein- und Großversuche

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Im ersten Jahr wurde nach einem Standort für einen entsprechenden Demonstrator gesucht und die entsprechenden Planungen angestellt. Die Technische Universität Graz hat sich angeboten, den Bau eines Demonstrators auf dem Universitätsgelände zu ermöglichen. Es wurde in ersten Meetings die Art der Messungen und Versuche besprochen. Angedacht sind Messungen der Verformung (Kurzzeit und Langzeit), sowie bauphysikalische Messungen und wenn möglich Versuche zu einer möglichen Bauteilaktivierung. Eine genaue Aufstellung und Planung des Versuchsprogramms und des Bauprozesses, sowie die notwendigen Behördengänge werden im 2. Forschungsjahr weiterverfolgt.



Abbildung 2.8.1: Der für des erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 8 wurde zu 100% erfüllt.

Der für des erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 8 wurde zu 100% erfüllt.

## 2.9. Vertiefte bauphysikalische und bauakustische Analysen

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Die geplanten Aktivitäten waren bauphysikalische Analysen in Hinblick auf das Schwingungsverhalten bzw. der Schallschutzperformance (wie z.B. den Luftschallschutz) mithilfe von numerischen und experimentellen Untersuchungen. Dabei soll das Verhalten der Konstruktion analysiert und mit aktuellen Lösungen verglichen werden. Multiphysikalische FEM-Simulation der Mechanik-Druckakustik-Interaktion zur Prognose der Luftschalldämmung der Rohdecke; Überlegungen zu konstruktivem Impact und zur Modellierung auf Basis von Literaturwerten.

Der Status der bauphysikalischen Aktivitäten ist folgender: Für die doppeltgekrümmte Decke wurde ein multiphysikalisches FEM-Simulationsmodell, mit dem die Mechanik-Druckakustik-Interaktion zur Prognose der frequenzabhängigen Luftschalldämmung berechnet werden kann, erstellt. Mithilfe dieses Modells erfolgten Prognoserechnungen der Luftschalldämmung der beiden Konstruktionsvarianten Kappe und Kreuzgrat. Diese Ergebnisse wurden miteinander verglichen, wobei die Kappe eine bessere Schallschutzperformance zeigte. Um die Schallschutzperformance über den gesamten bauakustisch interessierenden Frequenzbereich (50 Hz bis 5 kHz) vergleichen zu können, wurde hierfür ein recheneffizientes, zweidimensionales Simulationsmodell vorgeschlagen und erarbeitet. Die Validierung des Modells erfolgte mithilfe einer 12 cm dicken Stahlbetonflachdecke, deren frequenzabhängige Schallschutzperformance auf Basis von Literaturwerten und eigenen Messungen der Normdecke im Prüfstand des Labors für Bauphysik (TU Graz) bekannt ist. Zum Vergleich des Verhaltens der Konstruktion mit im Anwendungsbereich üblichen Lösungen wurde eine 25 cm dicke Stahlbetonflachdecke als Referenz herangezogen.

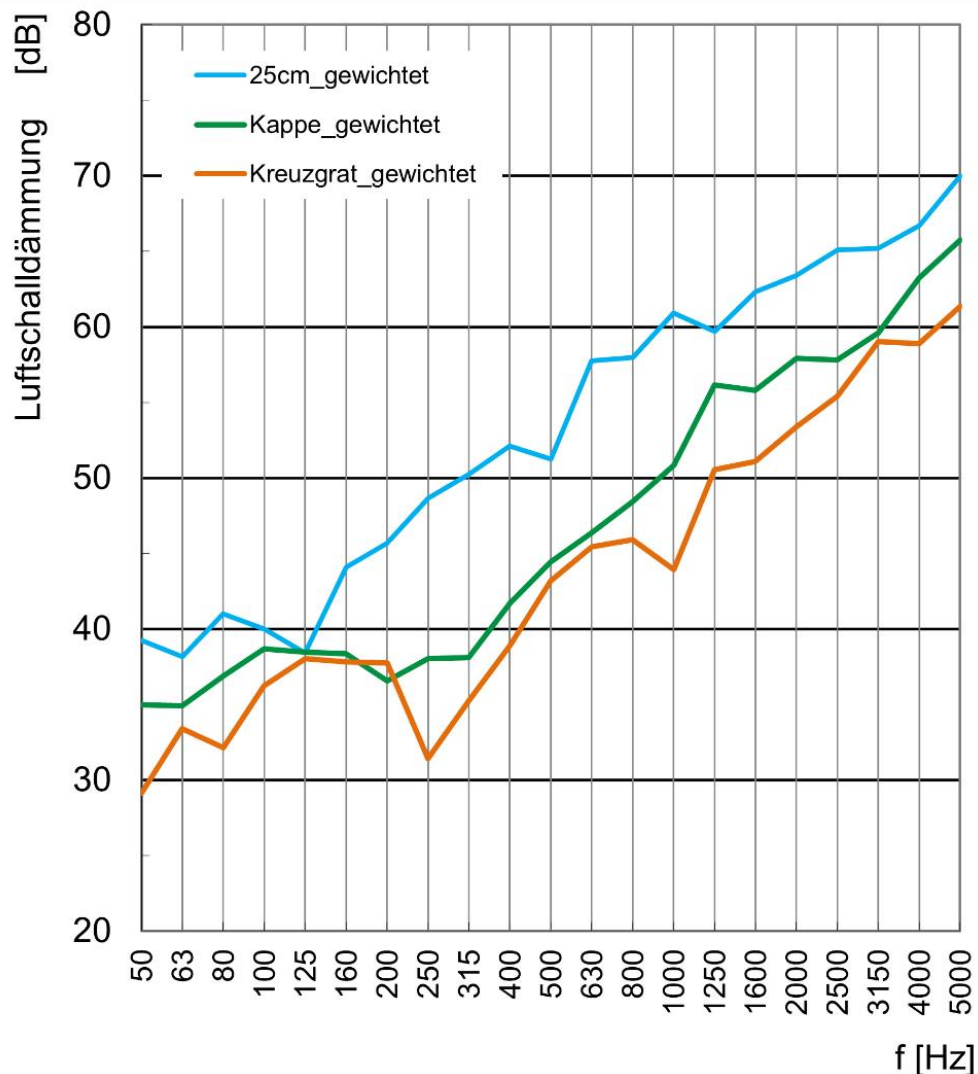


Abbildung 2.9.1: Simulationsergebnisse 2D Luftschalldämmung für die 25 cm Referenzdecke in Kappe und Kreuzgrat für 6m Spannweite

*Simulationsergebnisse 2D Luftschalldämmung für die 25 cm Referenzdecke in Kappe und Kreuzgrat für 6m Spannweite*

Abweichungen + Begründung: Aufgrund des hohen Aufwandes bei der Modellbildung für die Luftschalldämmung wurde aus Effizienzgründen und der Möglichkeit der direkten Validierung die Analyse des Schwingungsverhaltens (der Gebrauchstauglichkeit) nun parallel zu den experimentellen Untersuchungen am noch zu errichtenden Mockup in den Folgejahren geplant.

### Erweiterung 3D Simulation

Die geplanten Aktivitäten entsprechen einer über den ursprünglich geplanten Arbeitsumfang hinausgehenden vertieften Betrachtung des Forschungsobjektes.

Der Status der bauphysikalischen Aktivitäten ist folgender: Um den recheneffizienten 2D Ansatz aus AP9 mittels eines 3D Ansatzes zu validieren, wurde der Arbeitsumfang des LFB um das Arbeitspaket „3D Simulation“ der Luftschalldämmung erweitert. Hierfür wurde ein multiphysikalisches FEM-Simulationsmodell in 3D, das die Mechanik-Druckakustik-Interaktion zur Prognose der frequenzabhängigen Luftschalldämmung berechnet, erarbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Kappegeometrie mit den aus der

3D Prognose erhaltenen Ergebnissen im Rahmen der Modellgenauigkeit eine sehr gute Übereinstimmung mit dem 2D Ansatz aufweist. Beim Kreuzgrat ist der Unterschied der Ergebnisse von 3D zu 2D etwas größer.

Der für das erste Forschungsjahr vorgesehene Anteil am Arbeitspaket 9 wurde zu 100% erfüllt.

### **3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten**

Der Hauptteil der Kosten wurde entsprechend des Antrags verwendet.

Die einzige wesentliche Umschichtung waren die in Arbeitspaket 2 beschriebene Verlagerung von der Untersuchung verschiedener Schalungshäute AP 6 zu den bauphysikalischen 3D-Simulationen AP 9 in Höhe von 5.375 EUR.

Die zugesagten In-Kind-Leistungen der Partner wurden aufgrund des notwendigen, aber sehr aufwendigen Schalungs-Aufbau-Workshops, durch welchen viele Erkenntnisse und Daten generiert werden konnten, teilweise in hohem Maß überschritten - jedoch wurde die zugesagte Gesamtsumme aller Partner mindestens eingebracht.

### **4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit**

Der maßgebende Effekt, der durch den Einsatz der entwickelten Deckensysteme zu erwarten ist, ist eine erhebliche Reduktion des Materialverbrauchs. Dieser Effekt setzt gleichzeitig voraus, dass die Emissionen nicht durch das veränderte Herstellungsverfahren oder verwendete Einbauteile maßgeblich erhöht werden.

Unter dieser Prämisse ist die Verringerung der eingesetzten Ressourcen eine der effektivsten Wege Emissionen für neue Baumaßnahmen zu reduzieren um den Klimawandel, trotz des Baus neuer Gebäude, abzuschwächen bzw. nicht weiter voranzutreiben. Das entwickelte Deckensystem könnte in Kombination mit anderen, gerade in der Forschung untersuchten Ansätzen wie Beton mit emissionsärmeren Rezepturen, durchaus ein noch größeres Einsparungspotential bieten. In dieser Hinsicht ist auch eine kosteneffiziente Herstellbarkeit der Materialeinsparung immens wichtig. Wenn momentan, aufgrund der wirtschaftlichen Lage, zurückgehaltene *Hochbauprojekte* wieder aufgenommen werden, darf bei diesen Bauten nicht aufgrund eines Kostendrucks auf materialsparende Bauweisen verzichtet werden. Neben der Reduktion der ausgestoßenen Emissionen hat die Verringerung des Ressourcenverbrauchs auch positive Effekte auf andere Bereiche, wie den Wasserverbrauch oder die Logistik.

5 Jahre nach Projektabschluss werden die vielfältig aufgestellten Partner des Forschungsprojekts und auch die restliche Branche mit dem im Projekt generierten Wissen mit hoher Planungssicherheit Decken mit gekrümmter Untersicht entwickeln, die Kosten und die Einsparung der Emissionen kalkulieren und diese auch wirtschaftlich herstellen können. Die am Projekt beteiligten Interessensvertretungen fungieren hierbei als Informationsverteilungsplattform, um das System publik zu machen. Mit dem erarbeiteten Wissen, wie sich mit einem solchen Stahlbetonskelettbau flexible Büro, Wohnbauten und auch Aufstockungen realisieren lassen, welche auch eine gute Umnutzung der Gebäude ermöglichen, wird die Wahrscheinlichkeit einer breiten Anwendung weiter erhöht. Eine genaue Aussage über die erreichbaren Einsparungen der Emissionen bedarf weiterer Untersuchungen aller Bereiche des Deckensystems, von der Schalung bis zu einer Empfehlung für einen Fußbodenaufbau und kann erst am Ende des 3. Forschungsjahres getätigt werden. Da die bisherigen Forschungsergebnisse die im Antrag beschriebenen ca. 55% Einsparung an Material auch bei vertiefter Betrachtung bestätigen, bleibt das angestrebte Ziel realistisch. Es wird davon ausgegangen, dass nach Ende des Projekts auf Basis aller Daten weitere Entwicklungen angestoßen werden, um die Effizienz der Deckensysteme weiter zu steigern.