

# **Thermische Hochleistungs-Entkopplung – Next Generation Thermal Break Technology**

THE BOX

N. Fleischhacker, J. Mütterlein, M. Ritter, G. Unger, G. Pilz, A. Andreatta

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**10/2023**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter  
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:

Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Thermische Hochleistungs-Entkopplung

THE BOX

Nikolaus Fleischhacker & Johannes Mütterlein  
FEN Sustain Systems GmbH

Martin Ritter & Gerd Unger  
Alpenländische Veredelungs-Industrie GmbH

Gerald Pilz  
Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe  
Montanuniversität Leoben

Andreas Andreatta  
Technische Versuchs- und Forschungsanstalt TVFA  
Universität Innsbruck

Innsbruck, Oktober, 2023

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

# Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffenen Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der Projektergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open-Access-Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK barrierefrei publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) frei zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>11</b>
3.1.	Motivation für das Projekt .....	11
3.2.	Projektmotivation am Beispiel einer Modellrechnung für ein Wohnhaus .....	11
3.3.	Projektpartner und Kompetenzverteilung.....	13
3.4.	Forschungsschwerpunkt .....	14
3.4.1.	Problemstellungen des Projekts.....	15
3.5.	Stand der Technik .....	16
3.5.1.	Für den Vorschlag der Systemlösung „THE BOX“ relevante Technologien .....	20
3.5.2.	Ergebnisse aus anderen Projekten .....	21
<b>4</b>	<b>Projekthalt</b> .....	<b>26</b>
4.1.	Übersicht und Beschreibung der Arbeitspakete .....	26
4.1.1.	Arbeitspaket 1: Projektmanagement .....	26
4.1.2.	Arbeitspaket 2: Konzeptebene .....	26
4.1.3.	Arbeitspaket 3: Werkstoff- und Subkomponenten-Ebene .....	27
4.1.4.	Arbeitspaket 4: Bauteilebene – „THE BOX“ .....	28
4.1.5.	Arbeitspaket 5: Gebäudeebene – „Systemlösung THE BOX“ .....	28
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>30</b>
5.1.	Konzeptebene .....	30
5.1.1.	Anforderungsspezifikation.....	31
5.1.2.	Erstentwurf „Systemlösung THE BOX“ .....	32
5.2.	Werkstoff- und Subkomponenten-Ebene.....	33
5.2.1.	Kurzzeit-Zugversuche.....	35
5.2.2.	Kurzzeit-Druckversuche .....	36
5.2.3.	Methode Langzeitversuche .....	38
5.2.4.	Langzeit-Zugversuche .....	39
5.2.5.	Langzeit-Druckversuche.....	40
5.2.6.	Thermomechanische Basischarakterisierung.....	41
5.3.	Gesamt-Bauteil „THE BOX“ .....	42
5.3.1.	Mechanische Belastungstests, Versuchsgruppen G01 bis G10 .....	42
5.3.2.	Kaufmännische Kostenanalyse .....	45
5.3.3.	FEM-Simulationen .....	46
5.3.4.	Prototyp Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppen G11-G16.....	46
5.3.5.	Finales Konzept Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppe G17, Referenz .....	48
5.3.6.	Finales Konzept G17, Versuchsserie M/V Interaktion .....	48

5.3.7.	Finales Konzept G17, Versuchsserie Langzeitfestigkeit.....	48
5.3.8.	Bemessungsmodell Systemlösung „THE BOX“ .....	49
5.4.	Prüfung auf Gebäudeebene.....	50
5.4.1.	Untersuchung Brandwiderstand .....	50
5.4.2.	Planung, Errichtung und Monitoring der Langzeit-Feldversuchs-Anlage.....	51
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen.....</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen.....</b>	<b>55</b>
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>56</b>

# 1 Kurzfassung

Europäische, nationale und lokale Energie-Entwicklungsstrategien sehen wesentliche Reduktionen des Energiebedarfs bis 2020 bzw. 2050 vor. Diese Reduktion soll im Gebäudebereich vor allem durch Effizienzsteigerung erreicht werden. Im Bereich der thermischen Gebäudehülle stellt die lastführende Wärmebrücke zum Anschluss von externen Bauteilen wie Balkonen, Loggias, Überdachungen, außenliegenden Fluchtwegen, vorgehängten Fassaden usw. ein, durch verfügbare Produktlösungen zur thermischen Entkopplung vermindertes, aber noch ungelöstes Problem dar. Gegenwärtig wird daher bei Neubau und Sanierung höchster energetischer Effizienz (Niedrigstenergie-, Passiv- bzw. Nullenergiebauweise) die Gestaltungsfreiheit für Planer und in der Folge der Bewohner eingeschränkt. So steht z.B. der steigende Bedarf des Wohn- und Erholungsraumes Balkon im urbanen Raum in direkter Konkurrenz zu energetischen Anforderungen.

Das gegenständliche Projekt „**Thermische Hochleistungs-Entkopplung – THE BOX**“ verfolgte daher die übergeordnete strategische Zielsetzung „Lösung des Problems lastleitende Wärmebrücke“. Dafür sollen erstmals die Anforderungen an eine „wärmebrückenfreie Konstruktion“ mit einem Wärmebrückenverlustkoeffizienten  $\Psi \leq 0.01 \text{ W(mK)}$  /– praktisch Null – auch im erforderlichen Hochlastbereich erfüllt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, bedarf es eines Effizienzsprungs der thermischen Entkopplung um Faktor 15 zum Stand der Technik. Aufbauend auf dem in Forschungsprojekten (u. A. THERM-opti-BALKON [1]) und eigenständiger Sondierung [2][3] erlangten Knowhow hat das Projektteam die Konstruktion „THE BOX“, die die thermische Entkopplung in Geometrie, Konstruktion und Materialien zur Lastüberleitung neu denkt, entworfen.

Dabei wurde der Effizienzsprung im Wesentlichen durch zwei zentrale Maßnahmen erreicht:

- **Materialtechnologische Optimierung: Lastübertragung** im wärmeleitungssensitiven Bereich der thermischen Gebäudehülle ausschließlich über geeignete **Faserverstärkte-Kunststoff-Elemente (FVK)** mit geringer Wärmeleitfähigkeit bei gleichzeitig hoher Zug- bzw. Druckfestigkeit
- **Geometrische und konstruktive Optimierung:** Erhöhung der **Stärke des Dämmkörpers** auf zumindest **200 mm**

Um die „Systemlösung THE BOX“ für eine große Zahl an Problemstellungen (Konstruktion, Material, Geometrie) anbieten zu können und die ausufernde Variantenvielfalt (der deutsche Marktführer Schöck hält mehr als 30.000 Varianten seines „Isokorbs“ vor) einzuschränken, wurde gemäß Abbildung 1 eine modulare thermische Entkopplung mit flexiblen Schnittstellen vorgesehen. An Schnittstellen für innen und außen schließen spezifische Anbindungselemente für die Lastausleitung (außen) und die Lasteinleitung (innen) an. Diese stellen die kraftschlüssige Verbindung zum externen Bauteil bzw. der internen Tragstruktur her.

Aufgrund der ungewissen Langzeitbeständigkeit der FVK-Elemente im Hochlastbereich, vor allem unter Druckbeanspruchung für eine im Bauwesen normativ geregelte Dauerhaftigkeit von 30, 50 oder 100 Jahren wurden im Rahmen des Projekts für die Komponenten der „Systemlösung THE BOX“ umfangreiche und realitätsnahe mechanische Belastungstests durchgeführt. Zur realitätsnahen Prüfung im Gebäude, wurde ein experimenteller Langzeitfeldversuch geplant, umgesetzt und eingeleitet.

Des Weiteren wurde zur Optimierung der einzelnen Komponenten eine große Anzahl an numerischen Finite-Elemente-Simulationen durchgeführt.

Zur Ermittlung des Brandwiderstandes der „Systemlösung THE BOX“ wurde eine Feuerwiderstandsprüfung im Prüflabor des Instituts für Brandschutztechnik und Sicherheitstechnik (IBS) in Linz durchgeführt.

Basierend auf den Ergebnissen aus den Versuchsreihen sowie den numerischen Finite-Elemente-Simulationen wurde die „Systemlösung THE BOX“ iterativ in verschiedenen Varianten optimiert. Aus den gewonnenen Erkenntnissen wurde abschließend das finale Konzept der „Systemlösung THE BOX“ festgelegt und entsprechend den Projektzielen definiert. Das Projekt konnte somit erfolgreich abgeschlossen werden.

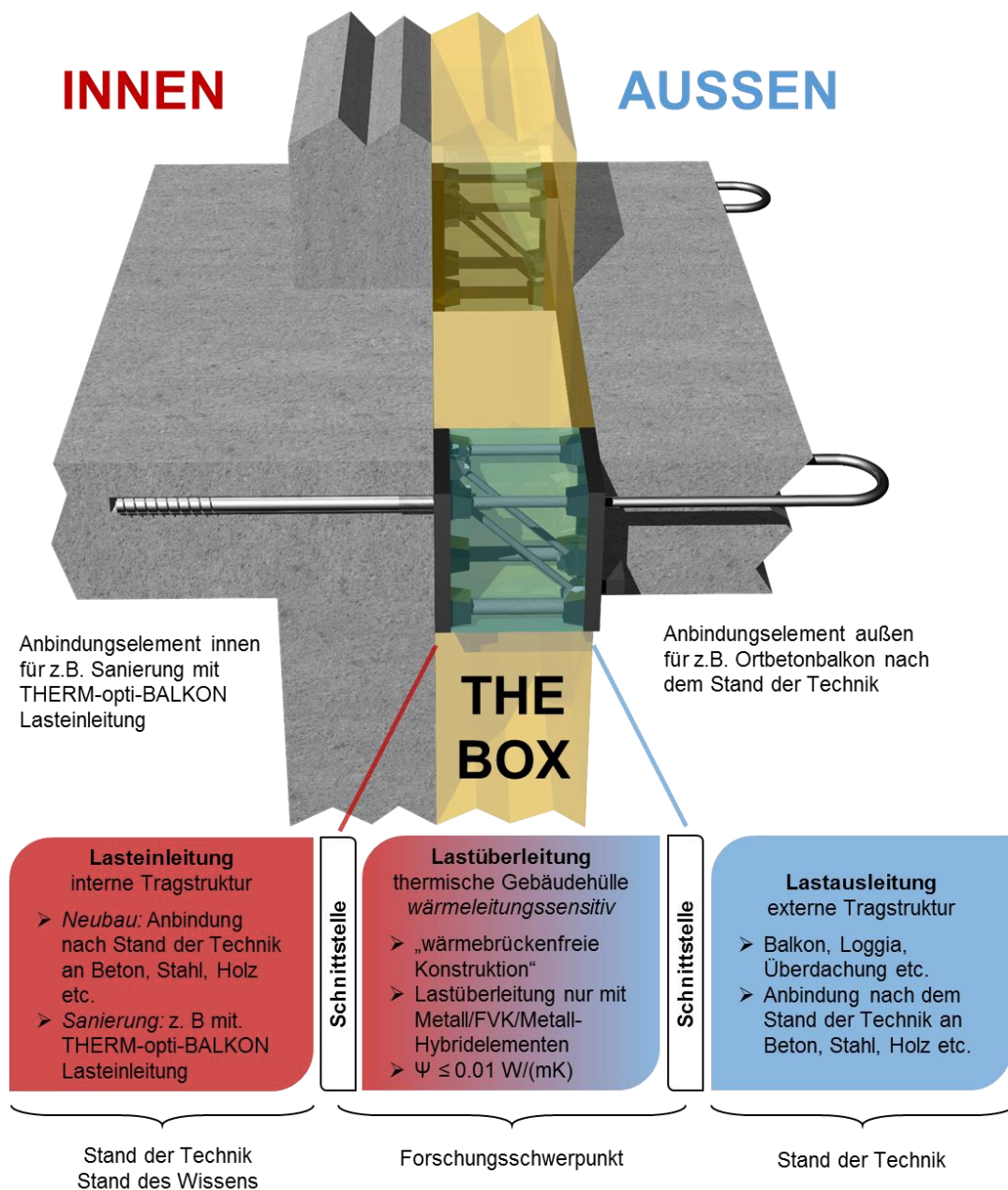


Abbildung 1: Die „Systemlösung THE BOX“

## 2 Abstract

European, national and local energy development strategies envisage substantial reductions in energy demand by 2020 or 2050. In the building sector, this reduction is to be achieved primarily by increasing efficiency. In the area of the thermal building envelope, the load-bearing thermal bridge for the connection of external components such as balconies, loggias, roofing, external escape routes, curtain walls, etc. represents a problem that has been reduced by available product solutions for thermal decoupling but is still unsolved. At present, therefore, new construction and renovation of the highest energy efficiency (ultra-low-energy, passive or zero-energy construction) limit the design freedom for planners and, consequently, for occupants. For example, the increasing demand for living and recreational space in the balcony in urban areas is in direct competition with energy requirements.

The project in question, "Thermal High-Performance Decoupling - THE BOX", therefore pursued the overarching strategic objective of "solving the problem of load-conducting thermal bridges". For this purpose, the requirements for a "thermal bridge-free design" with a thermal bridge loss coefficient  $\Psi \leq 0.01 \text{ W(mK)}$  /- practically zero - were to be met for the first time, even in the required high-load range. Achieving this goal requires an efficiency leap in thermal decoupling by a factor of 15 compared to the state of the art. Building on the know-how gained in research projects (including THERM-opti-BALKON [1]) and independent exploratory work [2][3], the project team has designed "THE BOX", which rethinks thermal decoupling in terms of geometry, design and materials for load transfer.

The efficiency leap was achieved mainly through two central measures:

- **Optimization of material technology:** Load transfer in the heat-conduction-sensitive area of the thermal building envelope exclusively via suitable **fiber-reinforced plastic (FRP)** elements with low thermal conductivity and high tensile and compressive strength at the same time.
- **Geometric and design optimization:** Increase of the thickness of the insulating body to at least **200 mm**.

In order to be able to offer the "system solution THE BOX" for a large number of problems (design, material, geometry) and to limit the proliferating number of variants (the German market leader Schöck has 30,000 variants of its "Isokorb"), a modular thermal decoupling system with flexible interfaces was designed according to Abbildung 1. Specific connection elements for load transfer (outside) and load introduction (inside) are connected to interfaces for inside and outside. These provide the frictional connection to the external component or the internal support structure.

Due to the uncertain long-term durability of the FRP elements in the high-load range, especially under compressive stress for a normatively regulated durability of 30, 50 or 100 years in the construction industry, extensive and realistic mechanical load tests were carried out as part of the project for the components of the "THE BOX system solution". For realistic testing in the building, an experimental long-term field test was planned, implemented, and initiated.

Furthermore, a large number of numerical finite element simulations were carried out to optimize the individual components.

To determine the fire resistance of the system solution "THE BOX", a fire resistance test was carried out in the test laboratory of the Institute for Fire Protection Technology and Safety Engineering (IBS) in Linz.

Based on the results of the test series and the numerical finite element simulations, the system solution "THE BOX" was iteratively optimized in different variants. Finally, the final concept of the system solution "THE BOX" was determined and defined according to the project objectives. The project was thus successfully completed.

# 3 Ausgangslage

## 3.1. Motivation für das Projekt

Der von der Europäischen Union 2007 erstellte Aktionsplan zur energetischen Effizienzsteigerung sieht eine Senkung des Energiebedarfs bis 2020 um 20 % vor [9]. Energiezielpfade auf Bundesebene – Energiestrategie Österreich – und Landesebene wie die Energiestrategie des Landes Tirol [11] sehen Reduktionen des Energiebedarfs auf 50 % des Höchststandes bis 2050 vor. Diese Reduktionen können nur durch Effizienzsteigerungen und Verzicht erreicht werden. In der Folge werden die gesetzlichen und normativen Rahmenbedingungen durch den Gesetzgeber immer schärfer.

Für den Neubau von Gebäuden als auch die Sanierung von Bestandsbauwerken bedeuten die energetischen politischen Zielsetzungen und gesetzlichen Rahmenbedingungen die Notwendigkeit höchster energetischer Effizienz. Zur Erreichung dieser ist eine hochwertige durchgängige thermische Gebäudehülle notwendig. Externe Bauteile, bei denen eine kraftführende Verbindung durch die thermische Gebäudehülle zur Ableitung ihrer (großen) Lasten über die im Gebäudeinneren befindliche mechanische Tragstruktur besteht, durchstoßen diese und verursachen Wärmebrücken. In energetisch hocheffizienten Gebäudedesigns sind daher zurzeit für externe Bauteile mit den vorhandenen Produkten zur thermischen Entkopplung, die den hohen Ansprüchen nicht vollends genügen, oft nur die Vermeidungs- bzw. Weglass-Strategien verfügbar. So können z.B. Balkone oft nur in geringerem Umfang mit kleineren Balkonflächen realisiert werden. Als technische Notlösung werden oftmals sogar eigenständige externe Tragstrukturen errichtet. Diese sind aber nicht immer möglich und schränken im Generellen die Freiheitsgrade der Architekt:innen bzw. des Gebäudedesigns drastisch ein. Gegenläufig den thermischen Anforderungen gewinnen jedoch die externen Wohn- und Lebensräume auf Balkonen usw. im urbanen Raum aufgrund hoher Wohndichte zunehmend an Bedeutung. Ein weiterer Faktor ist das steigende Energie- und Umweltbewusstsein der Bauherr:innen, die durch Einsparung von Heizenergie aufgrund der Effizienzsteigerung Heizkosten sparen und klimaschädliches CO<sub>2</sub> vermeiden wollen. Damit besteht allumfänglich großer Bedarf am Projektziel „Lösung des Problems lastführende Wärmebrücke“ durch die Entwicklung einer praktisch wärmebrückenfreien Konstruktion „Systemlösung THE BOX“ zur thermischen Entkopplung.

## 3.2. Projektmotivation am Beispiel einer Modellrechnung für ein Wohnhaus

Die nachfolgende Tabelle 1 führt durch eine einfache Modellrechnung für ein Wohnhaus mit Platz für 40 Garconnieren. In einem solchen steigt der Heizwärmebedarf (HWB) des Gebäudes ohne Balkone mit 17 280 kWh pro Jahr durch die Wärmebrücken der Balkone bei Verwendung einer thermischen Entkopplung nach dem Stand der Technik um 1920 kWh pro Jahr. Bei Einbau einer thermischen Entkopplung der nächsten Generation – „Systemlösung THE BOX“ – mit einem Wärmebrückenverlustkoeffizienten  $\Psi = 0.01 \text{ W/(mK)}$  beträgt der zusätzliche Energiebedarf nur mehr 128 kWh pro Jahr. Das entspricht einem Zuwachs von lediglich 0.7 %. Werden die besten derzeit verfügbaren thermischen Entkopplungsprodukte eingesetzt, steigt der Heizwärmebedarf des Gebäudes hingegen um 11 %.

Tabelle 1: Projektmotivation am Beispiel einer Modellrechnung für ein Wohnhaus

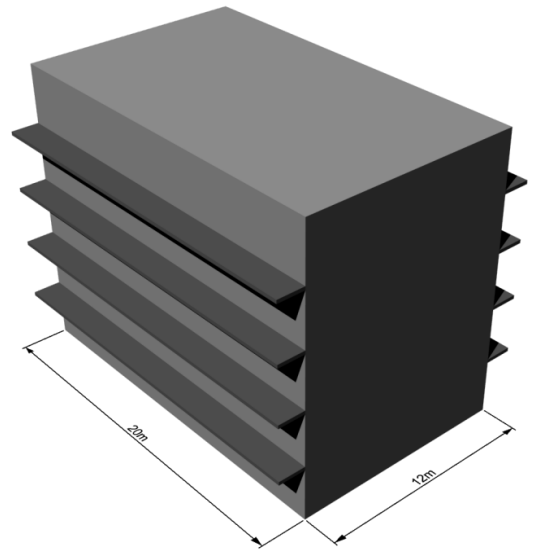
Als vereinfachtes Beispiel für das Potential der Effizienzsteigerung wurde eine Berechnung des Energieeinsparpotenzials an einem fiktiven fünfgeschossigen neu zu errichtenden Wohnhaus mit Platz für 40 Garconnieren ermittelt. Es werden die Varianten

- a. Ohne Balkone
- b. Balkone thermisch entkoppelt mit den besten am Markt verfügbaren Produkten und
- c. Balkone thermisch entkoppelt mit einer thermischen Entkopplung der nächsten Generation mit

$$\Psi_{\text{Balkon Next Generation}} = 0.01 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

untersucht.

**Ergebnis:** Gilt eine thermische Entkopplung als nahezu wärmebrückenfrei, wird durch die angebrachten Balkone mit einer Gesamtlänge von 160 m (!) **nur 128 kWh bzw. 0.7 % Wärmeenergie pro Jahr** mehr benötigt als ohne. Werden die besten derzeit verfügbaren thermischen Entkopplungsprodukte eingesetzt, steigt der Heizwärmebedarf des Gebäudes hingegen um 11 %.



### Geometrie

Länge $l$	20	[m]	Angabe Beispiel
Breite $b$	12	[m]	Angabe Beispiel
Höhe $h$	15	[m]	Angabe Beispiel
Gebäudeoberfläche $A$	1440	[m <sup>2</sup> ]	$2(lb + bh + lh)$
Balkonlänge $L$	160	[m]	$8l$

### Wärmekezzahlen

Wärmedurchgangskoeffizient $U$		0.15	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$	Mittelwert über gesamte Gebäudehülle inkl. Fenster und Keller ohne Balkone – Literaturwert (mit mind. 200 mm Dämmung)	
Wärmebrückenverlustkoeffizient $\Psi$	$\Psi_{\text{Balkon herkömmlich}}$	0.15	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m K}}\right]$	Bei 200 mm Wanddämmstärke (Fleischhacker et al. (2015))	
	$\Psi_{\text{Balkon Next Generation}}$	0.01		Wert für wärmebrückenfreie Konstruktionen	
Heizgradstunden $HGS$		80	[kKh/a]	Literaturwert für Tirol	
Leitwert	$L_{\text{Ohne Balkone}}$	216	[W/K]	100.0%	$U \cdot A$
	$L_{\text{Balkon herkömmlich}}$	24		14.8%	$\Psi_{\text{Bestandsbalkone}} \cdot L$
	$L_{\text{Balkon Next Generation}}$	1.6		0.7%	$\Psi_{\text{Bestandsbalkone}} \cdot L$

### Heizwärmebedarf $HWB$

	$HWB_{\text{ohne Balkone}}$	<b>17280</b>	[kWh/a]	100.0%	$L_{\text{ohne Balkone}} \cdot HGS$
	$HWB_{\text{Balkon herkömmlich}}$	<b>1920</b>		11.1%	$L_{\text{Balkon herkömmlich}} \cdot HGS$
	$HWB_{\text{Balkon Next Generation}}$	<b>128</b>		0.7%	$L_{\text{Balkon Next Generation}} \cdot HGS$
	$HWB_{\text{Gesamt inkl. Balkon herkömmlich}}$	<b>19200</b>		111.1%	$HWB_{\text{ohne Balkon}} + HWB_{\text{Bestandsbalkone}}$
	$HWB_{\text{Gesamt inkl. Balkon Next Generation}}$	<b>17408</b>		100.7%	$HWB_{\text{ohne Balkon}} + HWB_{\text{Balkone saniert}}$

### **3.3. Projektpartner und Kompetenzverteilung**

Zur Lösung der komplexen Fragestellungen im vorliegenden Projekt „THE BOX“ wurde ein multidisziplinäres Projektteam mit weitreichender Erfahrung aus Industrie und Forschung zusammengestellt:

#### **FEN Systems GmbH**

Die FEN Sustain Systems GmbH (FEN Systems) ist ein österreichisches Unternehmen, welches sich auf den Umbau von Energiesystemen auf Klimaneutralität und Autonomie spezialisiert hat. In Zusammenarbeit mit der TVFA (Universität Innsbruck) hat FEN Systems bereits am FFG-Projekt THERM-opti-BALKON-P2 geforscht und eine Versuchsanlage errichtet. Dadurch ist einschlägiges Wissen im Bereich von thermischen Entkopplungselementen unter Verwendung von im Bauwesen üblichen Konstruktionsmaterialien, im speziellen Edelstahl, vorhanden.

#### **AVI - Alpenländische Veredelungs-Industrie GmbH**

Die AVI Alpenländische Veredelungs-Industrie GmbH ist ein österreichischer Hersteller von Betonbewehrungsprodukten, der auf eine lange Tradition mit thermischen Entkopplungsprodukten mit dem Produkt „THERMOKORB“ verweisen kann. Die Verarbeitung von Metall/FVK/Metall-Hybridelementen ist für AVI neu.

#### **Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe**

MUL-WPK verfügt über Wissen zu den Materialeigenschaften sowie der Prüfung von Verbundwerkstoffen. Es wurden umfangreiche Forschungsprojekte zur experimentellen mechanischen und thermo-mechanischen Charakterisierung von FVK durchgeführt.

#### **Technische Versuchs- und Forschungsanstalt der Universität Innsbruck**

Die Technische Versuchs- und Forschungsanstalt der Universität Innsbruck (TVFA) verfügt über umfassendes Wissen in der Prüfung von Bauteilen. Sie ist mit der Durchführung von experimentellen Untersuchungen im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus betraut.

### 3.4. Forschungsschwerpunkt

Im Projekt „THE BOX“ wurde der technologische Sprung hin zu einer Next-Generation-Lösung erforscht. Im Vordergrund steht dabei die Erreichung des Zielwertes eines Wärmebrückenverlustkoeffizienten von  $\Psi \leq 0.01 \text{ W}/(\text{mK})$  und einer damit einhergehenden Effizienzsteigerung um Faktor 15 zum Stand der Technik (Isokorb KXT Combar des deutschen Marktführers Schöck). Dieser Effizienzsprung soll im Wesentlichen durch zwei zentrale Maßnahmen erreicht werden:

- Materialtechnologische Optimierung:** Realisierung der Lastübertragung im wärmeleitungssensitiven Bereich der thermischen Gebäudehülle ausschließlich über FVK-Elemente (N. Fleischhacker [1][2]). Dazu werden für die Komponenten Zug, Schub und Druck aus Moment und Querkraft in einem Fachwerk FVK-Zug- und -Druck-Elemente benötigt. Geeignete Fasern für solche FKV-Elemente (Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe) sind solche mit geringer Wärmeleitfähigkeit bei höherer Zugtragfähigkeit gemäß Tabelle 2 und [2] und [3]. Im Falle von FKV-Elementen unter Druckbeanspruchung ist noch die Sensitivität der Faser auf Druckbeanspruchung zu berücksichtigen. Unter Einbeziehung wirtschaftlicher Überlegungen und der Verfügbarkeit bietet sich vor allem die Glasfaser an. Eine technisch höherwertige Wahl wäre die Basaltfaser. Diese ist jedoch teurer und weniger leicht verfügbar.
- Geometrische und konstruktive Optimierung:** Erhöhung der Stärke des Dämmkörpers auf zumindest 200 mm (Idee aus dem Vorgängerprojekt THERM-opti-BALKON-P2) und Reduktion auf zwei bis vier Durchdringungen bzw. BOXen pro Meter (punkt förmige Wärmebrücken – vor allem aus Flexibilitätsgründen).

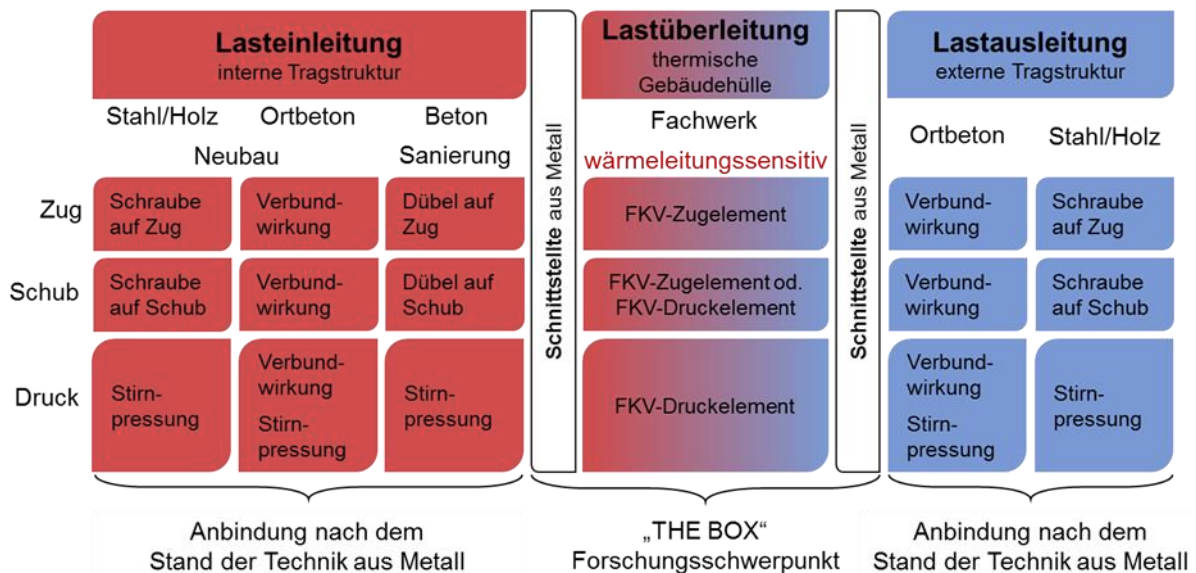


Abbildung 2: Modell der „Systemlösung THE BOX“ – der Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der Lastüberleitung

Um diese beiden Maßnahmen in Einklang mit den Erfahrungen der Partner aus den Vorprojekten (FEN, TVFA und AVI) und dem Insiderwissen des Marktes (AVI) zu bringen, verfolgte das Konsortium folgende Strategien:

- Um den vielen Varianten zur Anbindung im Bereich von Lastaus- und Lasteinleitung, für Neubau und Sanierung, verschiedene Werkstoffkombinationen von Beton, Stahl und Holz,

unterschiedlichen Deckenhöhen usw. gerecht zu werden (ca. 30 000 Varianten bei Schöck), wird eine flexible Systemlösung benötigt. Dafür sieht die „THE BOX“ Schnittstellen aus Metall in wärmeleitungsunkritischen Bereichen zu Anbindungselementen nach dem Stand der Technik (aus Metall) für die verschiedenen Anschlusssituationen vor.

- b) Dies ermöglicht gemäß Abbildung 7 ein immer gleiches Funktionselement „THE BOX“ zur Lastüberleitung. Für die unterschiedlichen Einsatzgebiete müssen „nur“ die jeweiligen Anbindungselemente entwickelt, zugelassen und vorgehalten werden.
- c) Der Einsatz von FVK-Elementen zur Lastübertragung wird ausschließlich auf den wärmeleitungssensitiven Bereich beschränkt. Damit kann der Werkstoffeinsatz des hochtechnologischen und teuren Materials auf ein Minimum reduziert werden. Weiters erlaubt dies das FVK-Fachwerkstragwerk in der BOX einzuschließen und vor äußeren Einflüssen zu schützen. Es ist somit vor den rauen Gepflogenheiten der Baustelle sicher. Auch eine Abschottung vor anderen Medieneinflüssen wie Wasser, Chemikalien wie Taumitteln usw. ist möglich.
- d) Der verbleibende Hohlraum in der BOX wird von Dämmstoff ausgefüllt. Im Falle von nicht brennbarer Mineralwolle könnte dieser die Tragstruktur auch vor den hohen Temperaturen im Brandfall thermisch entkoppeln.
- e) Auch die Anbringung von Brandschutzplatten (Stand der Technik) ist weiterhin möglich.
- f) Das erforderliche Lastniveau wird in Analogie zu „System II“ des Projekts THERM-opti-BALKON-P2 mit der Anzahl – von zwei bis vier – der Funktionselemente „THE BOX“ pro Meter gesteuert.

Es wurde somit bei den Überlegungen zu „THE BOX“ viel Bedacht darauf gelegt dieses technologisch und fertigungstechnisch aufwändige Funktionselement in möglichst nur einer Variante herstellen zu müssen. So könnten die notwendigen hohen Stückzahlen für eine wirtschaftliche Darstellbarkeit als technisch aufwändiges aber industriell gefertigtes Produkt erreicht werden.

### **3.4.1. Problemstellungen des Projekts**

Für die vorgelegte Idee einer nahezu wärmebrückenfreien kraftführenden thermischen Entkopplung „THE BOX“ ergeben sich drei wesentliche Problemstellungen:

- a) Neuer Werkstoff: Der Einsatz des neuen Werkstoffs FVK schließt bisher ungelöste Problemstellungen mit ein und birgt Bedarf an Grundlagenforschung. Die Problembereiche liegen im Speziellen:
  - in der ungewissen Langzeitbeständigkeit bzw. Dauerhaftigkeit (Gewährleistung und Zuverlässigkeit) des Werkstoffes auf 30, 50 oder gar 100 Jahre (normative Anforderungen im Bausektor), die vor allem auf Druckbeanspruchung und im vielfältigen Milieu der Anwendung noch nicht geklärt ist und erst erforscht werden muss (Expertenmeinung des Projektpartners MUL-WPK).
  - in einer im Vergleich zu Bau- und Bewehrungsstählen geringeren mechanischen Robustheit. So können FVK-Stäbe nicht gebogen und rückgebogen werden. Auch ist es unzulässig den Einbau mit gängigen Werkzeugen am Bau (Hammer, Schlägel, usw.) zu bearbeiten. Auch darauf zu gehen und „herumzuhüpfen“ kann zu einer Vorschädigung führen.
  - in der geringeren Brandbeständigkeit. So verliert die Fasern zusammenhaltende Matrix auf Harzbasis bei vergleichsweise geringen Temperaturen an Festigkeit.

- b) Flexible Anbindungsmöglichkeiten: Es wird höchste Flexibilität für die Anbindung zur Ermöglichung einer großen Variantenvielfalt angestrebt. Der Ansatz einer BOX als industrielles mechanisches Produkt auf technisch hohem Niveau erfordert es, sich auf nur möglichst eine Variante für „THE BOX“ zu beschränken um ein solches Produkt innerhalb der Rahmenbedingungen (Stückkosten) herzustellen. Gemäß den Ausführungen im Stand der Technik – die Idee muss so variabel sein, dass Sie einen Großteil davon abdecken kann – wird ein sehr variables Produkt für die vielen unterschiedlichen Fälle gebraucht. So soll die Anwendung im Neubau als auch der Sanierung erfolgen können und so sollen über angepasste Anbindungselemente auch verschiedene Materialkombinationen und Geometrien in Lastaus- und Lasteinleitung abgebildet werden können.
- c) Erfüllung der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in Hinblick auf Fertigungskosten, Prozess, Arbeit und Materialkosten der neuen Werkstoffe.

### 3.5. Stand der Technik

Externe horizontale Bauteile wie z.B. Balkone, Vordächer, Loggias etc. kommen als frei auskragende oder gestützte Konstruktionen im Neubau sowie in Altbausanierungen sehr oft zum Einsatz. Allerdings bilden diese Fassadenanschlüsse eine enorme Schwachstelle, an den von innen nach außen durchlaufenden Stahlträgern bilden sich Wärmebrücken, die zu Bauschäden sowie zu erhöhten Energieverlusten führen können.

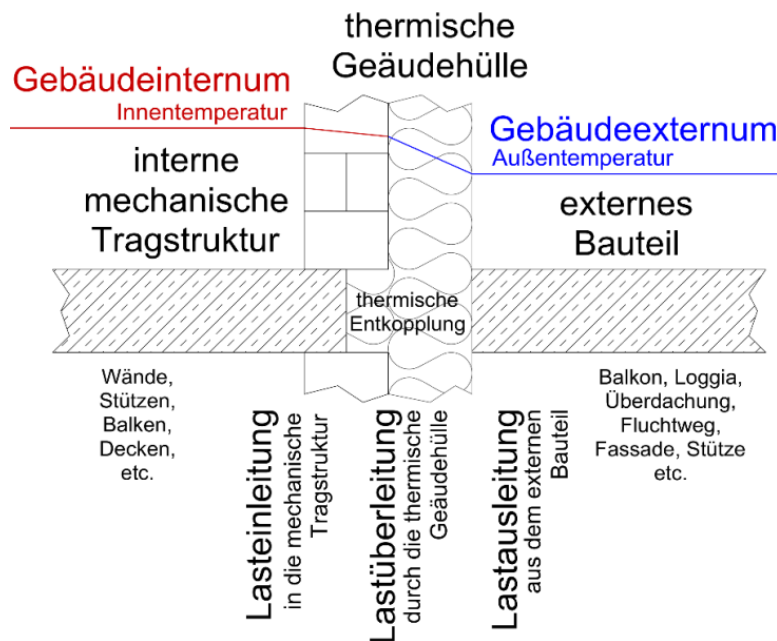


Abbildung 3: Definition der Problemstellung nach N. Fleischhacker

Mit der Erfindung der thermischen Entkopplung durch Eberhard Schöck 1983 [4][5] ist das bauphysikalische Problem der lastführenden Wärmebrücke mit Tauwasserbildung und in Folge Schimmelbildung an sogenannten „Cold Spots“ für den Neubau gelöst. Die Wärmebrückenverluste<sup>1</sup> wurden seit der Markteinführung 1983 von 42 % mit  $\Psi \sim 0.35 \text{ W}/(\text{mK})$  des Ausgangswertes durch stetige Weiterentwicklung der Produkte bis heute auf 18 % und  $\Psi \sim 0.15 \text{ W}/(\text{mK})$  gesenkt. Anwendungsgebiete sind externe horizontale Bauteile wie Balkone, Loggias, Vordächer, externe Stiegehäuser und Fluchtwege und neuerdings vertikale wie Stützen und Wände gegen Außenluft, Attikas usw. Im vorliegenden Projekt „THE BOX“ wird jetzt eine Senkung der Wärmebrückenverluste um Faktor 15 auf 1 % des Ausgangswertes bzw. ein Wärmebrückenverlustkoeffizient von  $\Psi \leq 0.01 \text{ W}/(\text{mK})$  angestrebt.

Die Grundkonstruktion eines linienförmigen thermischen Entkopplungselements mit einer Stärke des Dämmkörpers von 80 mm, das die hohen Lasten externer Bauteile – Zug (aus Moment), Schub (aus Querkraft) und Druck (aus Moment) – gemäß Abbildung 4 aus dem Bauteil ausleitet (Lastausleitung), durch die thermische Gebäudehülle überleitet (Lastüberleitung) und in die interne mechanische Tragstruktur einleitet (Lasteinleitung), ist in unterschiedlicher Detailausführung von unterschiedlichen konkurrierenden Herstellern verfügbar. Im Bereich der thermischen Gebäudehülle (Lastüberleitung) sehen die Konstruktionen vor, die Kraftkomponenten Zug, Schub und Druck in hoch ausgenützten Querschnitten als Zugstäbe aus korrosionsgeschütztem Stahl (mittlerweile meist Edelstahl aufgrund der um Faktor 4 geringeren Wärmeleitfähigkeit und Korrosionsbeständigkeit gegenüber Normalstahl) bzw. Druckstreben aus UHPC oder auch (Edel-)Stahl überzuleiten.

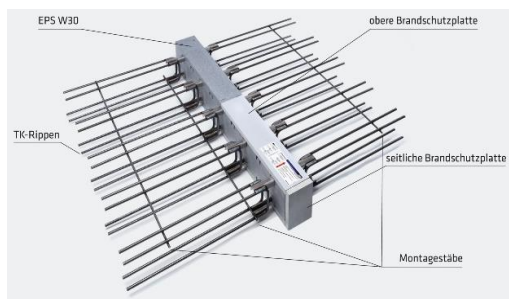


Abbildung 4: AVI Thermokorb XII

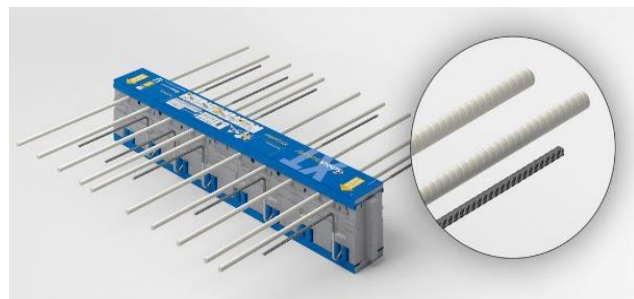


Abbildung 5: Isokorb KXT-Combar mit GFK-Zugstab

Der verbleibende Raum zwischen den kraftführenden Elementen bildet einen Dämmkörper und ist mit Dämmstoff – einem Material minimaler Wärmeleitfähigkeit – ausgefüllt [5]. Die wichtigsten Marktteilnehmer sind die deutschen Hersteller Halfen, Max-Frank und der Marktführer Schöck (auch Marktführer in Österreich). Der größte österreichische Hersteller der beschriebenen thermischen Entkopplungslösungen ist Projektpartner AVI. Weitere kleinere Marktteilnehmer sind unter anderem die Hutter & Schrantz AG aus Österreich oder der Schweizer Hersteller Locher Bewehrungen AG. Mit der Einführung des Schöck Isokorbs R 2011 [6] vom deutschen Marktführer ist neben Lösungen für den

<sup>1</sup> Allen Angaben zum Wärmebrückenverlustkoeffizienten – auch den Folgenden – liegen thermische numerische Simulationen mit einer Referenzwand mit 200 mm Beton und einer Außendämmstärke von 200 mm bei einer Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs von  $\lambda = 0.04 \text{ W}/(\text{mK})$  zugrunde. Alle Angaben sind somit konsistent, können aber von den Herstellerwerten mit unter Umständen anderer Referenz geringfügig abweichen.

Neubau eine erste Variante zur thermischen Entkopplung, die die bauphysikalischen Grundansprüche erfüllen kann, auch für die Sanierung verfügbar.

Energiepolitische Zielsetzungen zur Senkung des Energiebedarfs auf europäischer, nationaler und lokaler Ebene führen im neuen Jahrtausend zur Nachfrage von thermischen Entkopplungsprodukten, die nicht nur den bauphysikalischen Mindestanforderungen, sondern auch den gestiegenen thermischen Anforderungen gerecht werden. Daher kam es im Jahr 2011 zur Einführung der ersten thermischen Entkopplungselemente mit 120 mm starkem Dämmkörper durch den deutschen Marktführer Schöck [6]. Aufgrund der gegebenen Marktnachfrage und Verschärfungen bei Normen und Richtlinien ziehen auch die Mitbewerber mit Produkten nach. Projektpartner AVI beispielweise bietet seit Ende 2015 den THERMOKORB XII mit eigenem Tragkonzept auf Edelstahlbasis als österreichische Antwort an (siehe Abbildung 4). Eine Variante für die Sanierung, die diese erhöhten Anforderungen unter Einsatz herkömmlicher Materialien (Edelstahl) bei minimiertem Montageaufwand noch übertreffen kann, wurde mit „System II“ in den vorhergehenden Projekten THERM-opti-BALKON und THERM-opti-BALKON-P2 entwickelt (siehe Abschnitt 3.5.2).

Mit den derzeit am Markt verfügbaren Systemlösungen zur thermischen Entkopplung von vertikalen externen Bauteilen im Hochlastbereich für den Neubau können die Wärmebrückenverluste auf etwa ein Viertel ( $\sim 24\%$  bzw.  $\Psi \sim 0.2 \text{ W}/(\text{mK})$ ) zur Ausgangssituation ohne thermische Entkopplung abgemindert werden. Mit dem von Schöck im Jänner 2017 vorgestellten Isokorb „KXT Combar“ (siehe Abbildung 5) können die Wärmebrückenverluste weiter auf etwa ein Fünftel ( $\sim 18\%$  bzw.  $\Psi \sim 0.15 \text{ W}/(\text{mK})$ ) gesenkt werden. Dafür werden erstmals GFK-Zugstäbe (Glasfaserbewehrung vom Typ Schöck Combar) in einem kommerziellen thermischen Entkopplungs-Produkt neben den klassischen Baustoffen UHPC für das Drucklager und Edelstahl für den Schub-Zugstab eingesetzt. Schöck kann durch diesen evolutionären Schritt wiederholt die Technologieführerschaft für sich beanspruchen. Trotz der erreichten Fortschritte bleibt beispielsweise der Lebens- und Erholungsraum Balkon aus energetischer Sicht jedoch problematisch. Er steht in Konflikt mit den steigenden thermischen Anforderungen. Allzu oft kommen daher technische Notlösungen wie in Abbildung 6 zur Anwendung.



Abbildung 6: Notlösung Vorstellbalkon für Neubau und Sanierung [21]

GFK-Stäbe bieten generell eine hohe Zugfestigkeit bei gleichsam geringer Wärmeleitfähigkeit. Diese Eignung kann gemäß Tabelle 2 beschrieben werden. Aus den vorliegenden hohen Werten für GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) und BFK (basaltfaserverstärkter Kunststoff) ist das große Potential für lastführende thermische Entkopplungen ersichtlich.

Tabelle 2: Materialien zur Übertragung von Lasten in thermischen Entkopplungen: Bewertung mit Wärmeleitungszug- bzw. Wärmeleitungsdruckfestigkeitskoeffizienten. Eine höhere Zahl bedeutet dabei eine tendenziell bessere Eignung [1], [2], [3].

Material	Materialkennwerte			Vergleichskoeffizienten	
	Zugfestigkeit	Druckfestigkeit	Wärmeleitfähigkeit	Wärmeleit-zugfestigkeitskoeffizient	Wärmeleit-druckfestigkeitskoeffizient
	$f_{t,k}$	$f_{c,k}$	$\lambda$	$f_{t,k}/\lambda$	$f_{c,k}/\lambda$
	[MPa]	[MPa]	[W/(mK)]	[MPa*mK/W]	[MPa*mK/W]
Glasfaser	3400	-	1.00	3400	-
Basaltfaser	3400	-	2.00	1700	-
Betonstahl	550	550	50.00	11.0	11.0
Edelstahl	550	550	15.00	36.7	36.7
UHPC C200	0	200	2.00	-	100.0
GFK	580	500	0.66	878.8	757.6
BFK	1508	1200	0.57	2645.6	2105.3

Im Rahmen der Vorprojekte [1] und [2] wurde die mechanische Kurzzeittragfähigkeit des Systems (siehe Abbildung 7) im Zuge von Tastversuchen (siehe Abbildung 8) nachgewiesen. Die Konstruktion erreicht zufolge numerischen thermischen Untersuchungen einen Wärmebrückenverlustkoeffizienten von  $\Psi = 0.02 \text{ W/(mK)}$  und ermuntert die eingeleiteten Überlegungen weiter zu verfolgen und die noch großen Lücken (siehe Problemstellungen in Abschnitt 3.4.1) im Stand des Wissens und Problemfelder systematisch zu beforschen.

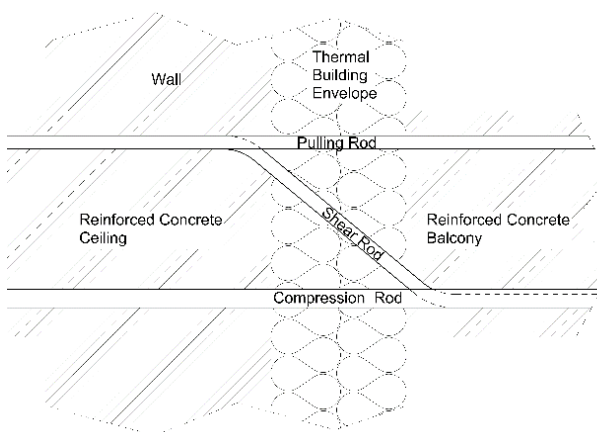


Abbildung 7: Mechanisches System der entworfenen thermischen Entkopplung gänzlich aus GFK und BFK [1]

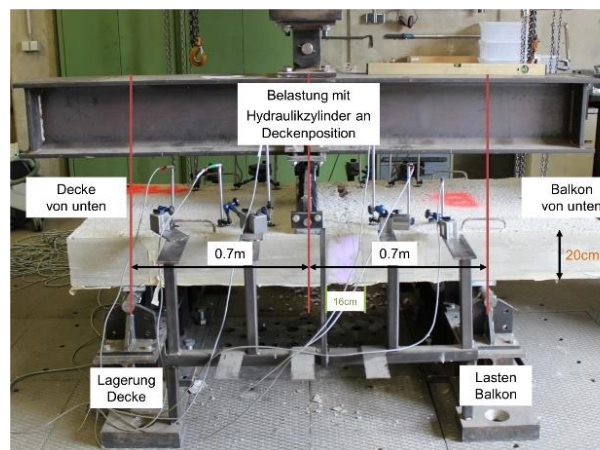


Abbildung 8: Instrumentierter Versuchsaufbau des Tastversuches mit einem Dämmkörper mit 160 mm Stärke [1]

### 3.5.1. Für den Vorschlag der Systemlösung „THE BOX“ relevante Technologien

Für unterschiedliche Materialkombinationen wie Beton/Beton, Beton/Beton-Fertigteil, Beton/Stahl, Beton/Holz, Stahl/Stahl, Holz/Holz usw. bei unterschiedlichen Geometrien wie z.B. variierender Deckenstärke, unterschiedlichen erforderlichen Lastniveaus in Momenten- und Querkrafttragfähigkeit, bei unterschiedlichen Anforderungen an den Brandschutz und jeweils eigenen Varianten für den Neubau und die Sanierung müssen eigens thermische Entkopplungen entwickelt, zugelassen und gemäß den Anforderungen des Projekts angefertigt werden. Dieser Umstand führt bei dem deutschen Marktführer Schöck zu mehr als 30.000 unterschiedlichen Varianten des Schöck Isokorbs [13]. Gleichzeitig stellt dieser Umstand ein großes Problem bei der Neuentwicklung dar, weil mit einem neuen Produkt nur eine geringe Anzahl an Fällen abgedeckt werden kann. Der Lösungsvorschlag des Projektes „THE BOX“ lautet: flexible Schnittstellen.

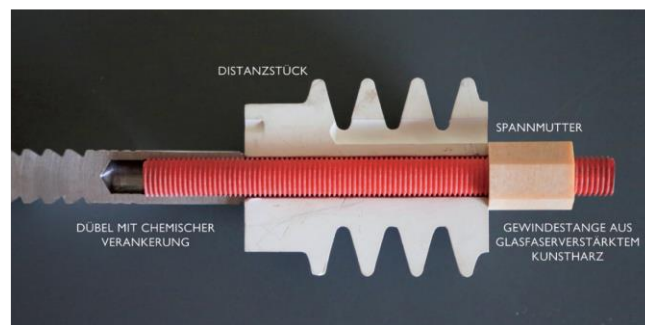
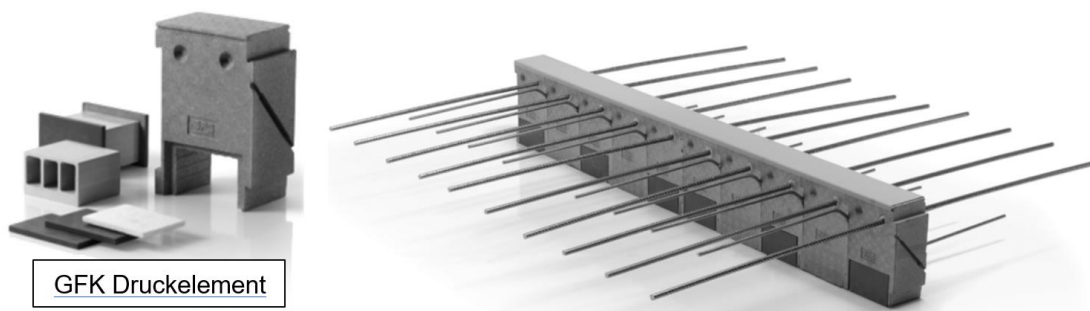


Abbildung 9: IT-Fix thermischer Hochlastanker [14]

Für das angestrebte Ziel einer wärmebrückenfreien Konstruktion mit  $\Psi \leq 0.01 \text{ W}/(\text{mK})$  für „THE BOX“ können ausschließlich hocheffiziente Faserverbundwerkstoffe im wärmeleitungssensitiven Bereich zur Lastüberleitung durch die thermische Gebäudehülle zum Einsatz kommen. Um den Übergang zu Schnittstellen aus Metall zu ermöglichen sind FVK-Zug Elemente (Faser-Verbund-Kunststoff wie GFK oder BFK) mit Metallanbindung (Hybridelemente) notwendig. Das Produkt IT-Fix der französischen Firma ETANCO stellt einen „thermisch getrennten Schwerlastanker“ für den mittleren Last-Bereich dar. Dieser verbindet gemäß Abbildung 7 einen herkömmlichen zugelassenen Spreizanker bzw. chemischen Dübel mit einer Gewindestange aus glasfaserverstärktem Kunstharz geringer Wärmeleitfähigkeit [14]. Die Montage von externen Bauteilen mit „geringen“ Lasten, z.B. zur Aussteifung eines Balkons mit eigener externer Tragstruktur, erfolgt mit einer Spannmutter.

Ein weiteres relevantes Produkt bietet die Schweizer Firma Locher Bewehrungen AG an. Für das thermische Entkopplungselement „isolan plus“ wird gemäß Abbildung 10 ein GFK-Drucklager eingesetzt. Aufgrund eines Dämmkörpers mit nur 80 mm und dem Einsatz von Normalstahl zur Zug- und Schubübertragung liegt der Wärmebrückenverlustkoeffizient nur im Mittelfeld.



GFK Druckelement

Abbildung 10: Thermische Entkopplung „isolan plus“ von der Schweizer Firma Locher Bewehrungen AG mit GFK-Druckelement

### 3.5.2. Ergebnisse aus anderen Projekten

Das Projekt „THE BOX“ kann auf den Erkenntnisgewinnen aus vorhergehenden Forschungsprojekten aufbauen, welche im Folgenden im Detail beschrieben sind.

Tabelle 3: Darstellung der bereits vorliegenden Ergebnisse und Deliverables aus öffentlich geförderten Projekten, auf die das beantragte Projekt aufbaut, bzw. die in dieses einfließen

Förderstelle	Projekt-nummer	Titel	Beschreibung der bereits vorliegenden Ergebnisse und relevanten Deliverables	Ort und Art der Dokumentation
FFG	845163	THERM-opti-BALKON	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Entwicklung von System I zur thermisch entkoppelten Montage von Ortbetonbalkonen bei der thermischen Sanierung</li> <li>➤ Grundlagenforschung zur Lasteinleitung von Zug, Schub und Druck im Stirnbereich einer Betonplatte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Zwischenbericht</li> <li>➤ Endbericht</li> <li>➤ Ergebnisbericht</li> </ul>
FFG	850078	THERM-opti-BALKON-P2	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Entwicklung von System II zur thermisch entkoppelten Montage von Ortbetonbalkonen bei der hochwertigen thermischen Sanierung</li> <li>➤ Bau einer Versuchsanlage Ende 2016 zur Erforschung der Dauerhaftigkeitsaspekte und Erfassung des Langzeitdeformationsverhaltens – Laufende Messung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Zwischenbericht</li> <li>➤ Auszug Dissertation N. Fleischhacker [3]</li> </ul>
FFG	829446	Neuentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmlements unter Verwendung von innovativen Baustoffen	Projekt ist abgeschlossen und Endbericht ist verfügbar. Das entwickelte System aus innovativen Baustoffen setzt auf die Kombination von UHPC und GFK. Eine geplante Markteinführung musste aufgrund derzeit nicht lösbarer Probleme bei der Zulassung abgesagt werden.	Endbericht
FFG	830862	HybridRTM Quality Controlled Manufacturing of Hybrid Material Composites through Resin Transfer Moulding	Das Projekt zeigte die serienmäßige und kosteneffiziente Herstellung von CFK/Metall-Hybrid-Strukturbauteilen für Automobilanwendungen und die dazu erforderlichen Prüfmethode zur Bestimmung der mechanischen und thermomechanischen Eigenschaften von endlosfaserverstärkten CFK Laminaten unter unterschiedlichen Prüfbedingungen.	Endbericht

## THERM-opti-BALKON & THERM-opti-BALKON-P2

Ausschreibung: Stadt der Zukunft 1. & 2. Ausschreibung

Status: Abgeschlossene Projekte von TVFA und FEN

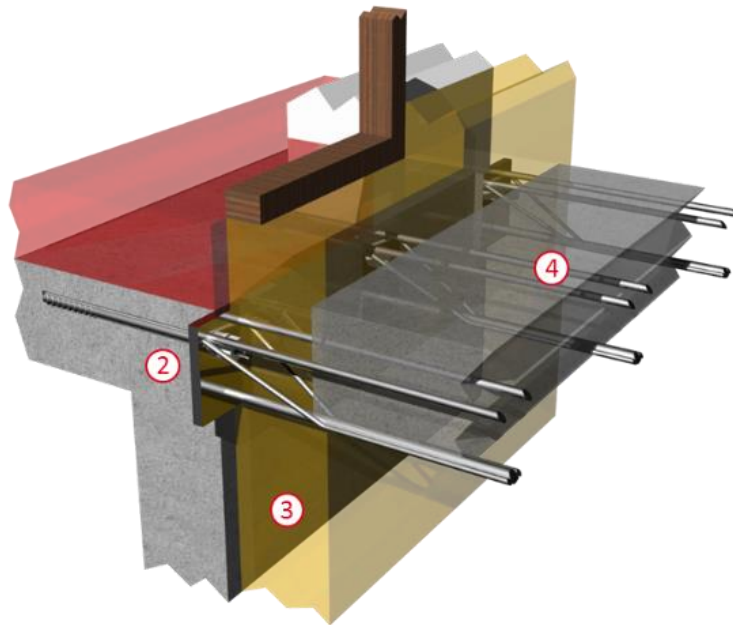


Abbildung 11: Schema THERM-opti-BALKON System II

Wie funktioniert das THERM-opti-BALKON System II:

- Abtragung der baufälligen und sanierungsbedürftigen Balkone
- Herstellung von zwei Hochleistungs-Ankerpunkten pro Meter (z.B. eingeklebte Gewindestange)
- Montage der thermischen Entkopplungselemente System II
- Durchführung einer hochwertigen thermischen Gebäudesanierung (Dämmstärke ab 200 mm)
- Neuerrichtung und -gestaltung des nun thermisch entkoppelten Lebens- und Erholungsraumes Balkon in Ortbetonbauweise

Im Projekt „THERM-opti-BALKON“ wurde die Sanierungslösung „System I“ zur thermisch entkoppelten Neuerrichtung von Ortbeton-Balkonen (Beton/Beton) entwickelt. Der Forschungsschwerpunkt liegt dabei auf dem Bereich der Lasteinleitung und wie die Kräfte im Hochlastbereich der Bestandsdecke verankert werden können.

Die Erfahrungen mit „System I“ führten zur Weiterentwicklung „System II“ im Schwesterprojekt THERM-opti-BALKON-P2. Im Herbst 2016 wurde die Technologie in einer Versuchsanlage [1][2][3] erstmals öffentlich sicht- und erlebbar gemacht. Das System auf Edelstahlbasis nimmt damit den nächsten Entwicklungsschritt. In einem begleitenden Monitoring kann nun die Dauerhaftigkeit und das Langzeit-Deformationsverhalten des Systems überwacht werden. Trotz des Einsatzes von Edelstahl ermöglicht „System II“ eine thermische Entkopplung höchster Güte mit einem Wärmebrückenverlustkoeffizienten von  $\Psi \sim 0.1 \text{ W/mK}$ . Dieser Spitzenwert (Stand der Technik für Sanierung liegt bei  $\Psi \sim 0.3 \text{ W/mK}$  und für Neubau bei  $\Psi \sim 0.15 \text{ W/mK}$ ) kann mit einer Stärke des Dämmkörpers von 200 mm erreicht werden.

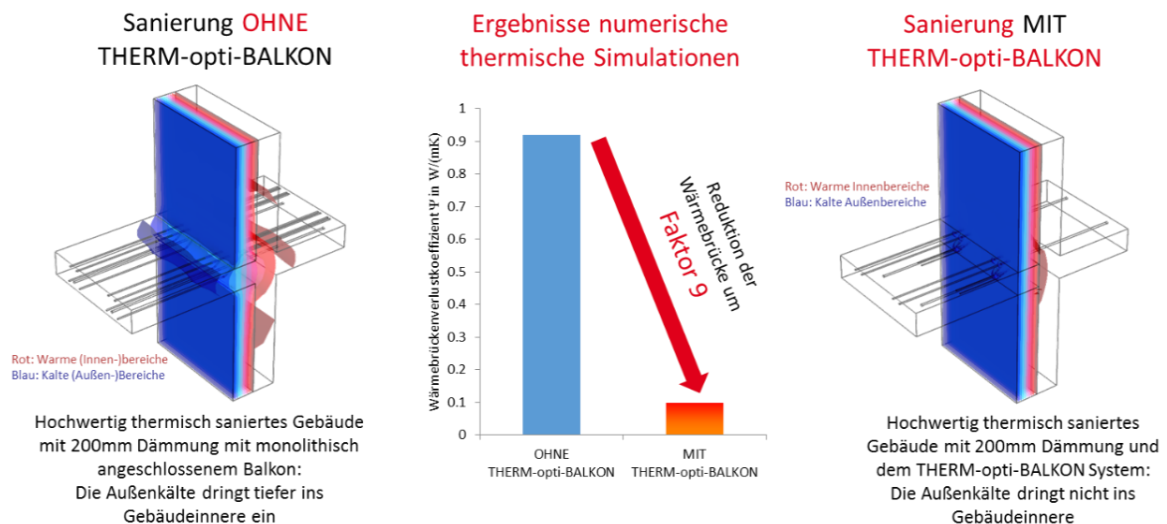


Abbildung 12: Thermische Entkopplung mit THERM-opti-BALKON System II

Die wichtigsten Erkenntnisgewinne für „THE BOX“ sind:

- die Systemdefinition für Lastaus-, Lastüber- und Lasteinleitung gemäß Abbildung 2 und [1][2][3]
- die Wärmebrücken punktförmig mit zwei Entkopplungselementen pro Meter nach „System II“ zu gestalten
- die Möglichkeit die Stärke des Dämmkörpers auf 200 mm zu erhöhen (Stand der Technik 120 mm)
- eine Lösung zur Lasteinleitung für die Sanierung (Kern von THERM-opti-BALKON und THERM-opti-BALKON-P2) mit einem Zugelement (eingeklebte Gewindestange)
- ein Bemessungsmodell für den Bereich der Lasteinleitung
- Versuchssetups und Vorrichtungen auf Bauteil- und Gebäudeebene (Labor TVFA TVFA)
- Know-How zur Realisierung eines Monitoringsystems für eine Versuchsanlage (THERM-opti-BALKON-P2)

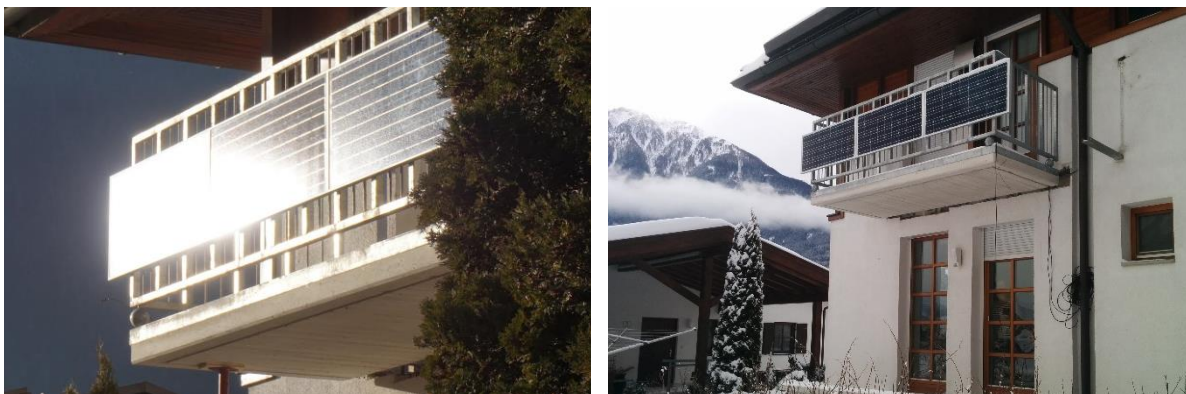


Abbildung 13: Versuchsanlage aus dem Projekt „THERM-opti-BALKON-P2“ bei FEN-Systems Ende 2016

## Neuentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelements unter Verwendung von innovativen Baustoffen

Ausschreibung: Basisprogramm

Status: Abgeschlossenes Projekt von AVI

Im Projekt „Neuentwicklung eines statisch tragenden Wärmedämmelements unter Verwendung von innovativen Baustoffen“ hat Projektpartner AVI den Versuch gestartet, UHPC für Druckbauteile und neue Baustoffe wie GFK für Zugbauteile für den Einsatz in thermischen Entkopplungsprodukten für den Neubau bis zur Marktreife zu entwickeln. Der geplante Marktstart in der zweiten Hälfte 2014, der im Endbericht noch optimistisch angegeben wurde, konnte aufgrund von Problemen bei der Zulassung nicht erfolgen. Die erreichte thermische Performance der Entkopplung wurde zwar verbessert, aber durch den Einsatz des kombinierten UHPC-Druck-Schub-Lagers (thermisch ungünstig aufgrund der Klobigkeit und Größe) konnte das volle Potential zur Effizienzsteigerung der neuartigen GFK-Schlaufe nicht ausgeschöpft werden. Die aufzuwendenden Zulassungskosten und die Kostensensibilität für die industrielle Massenfertigung waren im Vergleich zum energetischen Nutzen und dem damit verbundenen Marktpotential nicht rentabel. Eine Markteinführung ist aufgrund der dargestellten Problematiken bis zur Lösung dieser aufgeschoben.

Für das Projekt „THE BOX“ können folgende Erkenntnisse mitgenommen werden:

- im Bereich der Dauerhaftigkeit auf Zeiträume von 30, 50 bzw. 100 Jahren (Norm) ist die Langzeitbeständigkeit von GFK-Bauteilen in Grundlagenforschung zu untersuchen
- zur Gewährleistung der Brandbeständigkeit (vor allem für höhere Brandklassen) sind schon in der Designphase Vorkehrungen zu treffen
- die Handhabung von FVK auf der Baustelle ist problematisch. Wie kann sichergestellt werden, dass die FVK-Elemente nicht beschädigt werden?

### **HybridRTM - Quality Controlled Manufacturing of Hybrid Material Composites through Resin Transfer Moulding**

Ausschreibung: Produktion der Zukunft

Status: Abgeschlossenes Projekt von MUL-WPK

Im Rahmen dieses Multifirm-Projektes wurden die Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Serienfertigung von C-Faserstrukturbauteilen im Verbund mit Metallkomponenten im „Resin Transfer Moulding Prozess (RTM)“ untersucht. Die primäre Aufgabe des Lehrstuhls WPK-MUL bestand darin, neue Werkstoffentwicklungen vor allem im Bereich neuartiger Matrixharzformulierungen auf PUR-Harzbasis nach Verarbeitung im RTM-Prozess hinsichtlich der resultierenden Struktureigenschaften zu charakterisieren. Dazu wurde eine umfassende Prüfmethodik für C-faserverstärkte Composite-Werkstoffe zur mechanischen, thermo-mechanischen und bruchmechanischen Charakterisierung ausgearbeitet. Entsprechende Werkstoffe wurden u.a. in monotonen Zug- und Druckversuchen, in dynamisch-mechanischer Analyse (DMA) sowie Prüfungen zur interlaminaren Risszähigkeit untersucht. Die dafür verwendete experimentelle Ausstattung sowie die entsprechende Prüf- und Auswertungsmethodik ist auch als grundlegender Ansatz für das gegenständlich zu beantragende Forschungsprojekt „THE BOX“ gut verwendbar.

### **Methodenentwicklung zur Charakterisierung der Langzeittauglichkeit von Kunststoffbauteilen in Kältekompressoren – METHCOMP**

Ausschreibung: Bridge

Status: Abgeschlossenes Projekt von MUL-WPK

Als übergeordnete Zielsetzung wird im Projekt METHCOMP die Verwendbarkeit von Kunststoffen für den Einsatz in Kältekompressoren evaluiert, wobei relevante Kunststoffe für diesen Anwendungsbereich von Schaumwerkstoffen für Dämpfungsanwendungen bis zu C-faserverstärkten

Composites für Ventilanwendungen reichen können. Der Nachweis einer prinzipiellen Eignung von Kunststoffbauteilen verlangt vor allem für derartige Langzeitanwendungsfälle eine praktikable Prüf- und Auswertungsmethodik abgestimmt auf die jeweiligen Werkstoffe sowie die spezifischen Einsatzbedingungen. Die zentrale Aufgabe im Projekt METHCOMP besteht in der Entwicklung geeigneter Prüf- und Extrapolationsmethoden für die Charakterisierung der Langzeiteigenschaften von Kunststoffen für den Kompressoreinsatz. Diese basieren im Wesentlichen auf zeiteffizienten experimentellen Werkstoffuntersuchungen, die unter Anwendung polymerphysikalischer Extrapolationskonzepte eine Abschätzung der mechanischen Langzeiteigenschaften zulassen. Vor allem hinsichtlich der prinzipiellen Extrapolationsmethodik auf Basis beschleunigter Laborversuche sind die bisher vorliegenden Projektergebnisse prinzipiell auch gut auf den prüfmethodischen Ansatz des gegenständlich zu beantragenden Forschungsprojekts „THE BOX“ übertragbar.

# 4 Projektinhalt

## 4.1. Übersicht und Beschreibung der Arbeitspakete

Das übergeordnete qualitative Ziel des Projekts war die „Lösung des Problems lastleitende Wärmebrücke“. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde vom Projektteam die Entwicklung einer flexiblen Systemlösung zur Thermischen Hochleistungs-Entkopplung (Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\Psi < 0.01 \text{ W}/(\text{mK})$ ) – „THE BOX“ – vorgesehen. Diese Systemlösung sollte dabei das Potential haben, im Follow-Up zur Produktreihe weiterentwickelt werden zu können. Zur Erreichung der qualitativen Zielsetzung wurde das Projekt in mehrere quantitative Ziele und Arbeitspakete AP aufgeteilt.

### 4.1.1. Arbeitspaket 1: Projektmanagement

Ziel des Projektmanagements war es diverse Aufgaben aus dem Controlling, dem Berichtswesen und der Kommunikation zwischen den Projektpartnern zu übernehmen, um einen optimalen Ablauf des Projekts zu ermöglichen. Hierbei wurden unter anderem die folgenden Aufgaben ausgeführt:

- Abwicklung und Leitung des Projektes – Koordination und Kommunikation
- Organisation der regelmäßigen Projektmeetings gemäß Zeitplan
- Finanzielle Aspekte – Controlling der Kosten und der Zeitaufwände
- Einmahnung Fristen bzw. Milestones
- Dokumentation und Berichtswesen inkl. redaktioneller Bearbeitung
- Ausblick auf weitergehende Aktivitäten nach Projektabschluss im Follow-Up

### 4.1.2. Arbeitspaket 2: Konzeptebene

Zu Beginn des Projekts wurden, aufbauend auf den Erfahrungen von Projektpartner AVI mit der THERMOKORB Produktreihe und den Ergebnissen der FFG Projekte THERM-opti-BALKON und THERM-opti-BALKON-P2 (siehe Abschnitt 3.5.2), die Anforderungen und einsatzbezogenen Randbedingungen an die „Systemlösung THE BOX“ in den Bereichen Lastaus-, Lastüber-, und Lasteinleitung definiert. Da die Bereiche Lastaus- und Lasteinleitung nach dem Stand der Technik mit herkömmlichen Konstruktionen und Materialien ausgeführt werden, lag das Hauptaugenmerk auf dem wärmesensitiven Bereich der Lastüberleitung in Form von „THE BOX“ als „hermetisch“ abgegrenztes Funktionselement und den Schnittstellen zu Lastaus- und Lasteinleitung. Der thermische Widerstand – Ziel war eine wärmebrückenfreie Konstruktion laut Definition Passivhaus, das bedeutet eine thermische Entkopplung der nächsten Generation – war dagegen eine Optimierungsgröße.

Generell galt es zu definieren:

- Die Geometrie, d.h. vor allem die Stärke des Dämmkörpers
- der mechanische Widerstand, d.h. die Lastniveaus (Hochlastbereich!), die übertragen werden sollen
- der Widerstand gegen Brandeinwirkung, Festlegung der erforderlichen Brandschutzklasse
- das Schwingungsverhalten, d.h. die erforderliche Steifigkeit
- die Dauerhaftigkeit des Bauteils, mit einer Haltbarkeit von 30, 50 oder 100 Jahren, und

- sonstige Einflussparameter.

Ein erster Meilenstein lag hier in der Erstellung eines Pflichtenhefts und einer Bewertung mithilfe einer Nutzwertanalyse.

Aufbauend auf den spezifizierten Anforderungen im Pflichtenheft und unter Berücksichtigung der werkstoffspezifischen, technologisch und normativen Möglichkeiten und den neuen Werkstoffinformationen, u.a. aus mechanischen Basisuntersuchungen an ersten Hybridelementen im AP3, wurde im weiteren Projektverlauf ein erster Entwurf einer möglichen Systemlösung „THE BOX“ unter Einbeziehung und Mithilfe aller Projektpartner entwickelt. Dafür musste im Einzelnen entwickelt werden:

- eine Hochlast-Tragstruktur als Fachwerk zur Übertragung von Zug, Schub und Druck mit Metall/FVK/Metall-Hybridtragelementen (FEN, AVI und TVFA Expert Council)
- Metall/FVK/Metall-Hybridstrukturen für Zug, Schub und Druck unter Berücksichtigung der technologischen Möglichkeiten zur Herstellung, der Einbaufähigkeit, der erforderlichen mechanischen Tragfähigkeit und der Wirtschaftlichkeit in der Herstellung im Hinblick auf eine industrielle Serienfertigung (MUL-WPK, SECAR)
- Schnittstellen zu den Lastausleitungssystemen zur variablen Anbindung von externen Bauteilen (Anbauten) wie Balkone, Attikas, Vordächer, Fluchtwege usw. unterschiedlicher Werkstoffe und Werkstoffkombinationen (Beton, Metall, Holz) und Lasteinleitungssystemen für Neubau und Sanierung unterschiedlicher Werkstoffe (Beton, Metall, Holz)

Die Planung und Konstruktion des Erstentwurfs erfolgte nach ingenieurmäßiger Vorgangsweise mit

- Vordimensionierung und Vorbemessung (mechanisch und thermisch)
- verfeinerten numerischen Simulationen (mechanisch und thermisch)
- begleitender CAD-gestützter Konstruktion bei ständigem Qualitätsmanagement

#### **4.1.3. Arbeitspaket 3: Werkstoff- und Subkomponenten-Ebene**

Der Einsatz des neuen Werkstoffs FVK in Elementen mit Lastübertragung schließt bisher ungelöste Problemstellungen mit ein und birgt Bedarf in Grundlagenforschung. Im AP3 wurde daher in einem ersten Schritt eine umfangreiche Materialrecherche auf Basis des spezifischen Anforderungsprofils aus AP2 durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der Recherche wurden geeignete Hybridstrukturkonzepte mit Metall/FVK/Metall-Aufbau für die primären Lastfälle Zug-, Druck- und Schubbeanspruchung ausgearbeitet und eine Auswahl der Einsatzstoffe (Faser-Matrixmaterialien) getroffen. Hierbei wurden zusätzlich die verarbeitungstechnischen Randbedingungen berücksichtigt.

In einem nächsten Schritt wurden Musterteile für die 3 verschiedenen Hybrid-Strukturvarianten angefertigt und eine mechanische Erstbewertung durchgeführt. In mehreren Überarbeitungsvarianten erfolgte dann eine Optimierung u.a. hinsichtlich allgemeiner Geometrie, Lasteinleitung und Lastübertragung sowie Faserausrichtung.

Zur Prüfung der Musterteile erfolgte die Entwicklung und Konstruktion geeigneter Prüfaufbauten und Einspannvorrichtungen abgestimmt auf die verschiedenen Hybrid-Prüfkörpertypen und die Implementierung an vorhandenen Prüfmaschinen. Des Weiteren wurden bestehende

Deformationsmesseinrichtungen für die vorliegenden Werkstofftypen und Bauteilgeometrien adaptiert (hochauflösende 2D-Kamerasysteme, Kontakt-Extensometer, LVDT, Dehnungsmessstreifen).

Im Anschluss erfolgte die systematische mechanische und thermo-mechanische Charakterisierung der vorliegenden Hybrid-Musterteile in dynamisch-mechanischer Analyse sowie in monotonen Zug- und Druckversuchen. Die mechanischen und thermo-mechanischen Basiseigenschaften (E-Modul, Festigkeit, Bruchdeformation, thermische Einsatzgrenzen) wurden bestimmt und die kritischen Deformationsbereiche lokalisiert.

Das Zug- und Druckkriechverhalten der verschiedenen Hybridelementtypen wurde bei verschiedenen Temperaturen und Prüflaststufen systematisch charakterisiert. Für eine Erstabschätzung des anwendungsrelevanten Langzeitverhaltens wurden außerdem geeignete Extrapolationskonzepte entwickelt.

#### **4.1.4. Arbeitspaket 4: Bauteilebene – „THE BOX“**

Im Anschluss an die Konzeptentwicklung sowie die Prüfung der einzelnen Sub-Komponenten wurden mehrere Chargen von „THE BOX“ Prototypen hergestellt. Hierzu wurden unter anderem die folgenden Komponenten gefertigt:

- Metall/FVK/Metall-Hybridkomponenten auf Basis der Ergebnisse aus AP3
- „Grundplatten“ mit Knoten, auf der die Hybridkomponenten montiert wurden
- Dämmkörper

Anschließend erfolgte die Assemblierung von „THE BOX“ durch Projektpartner AVI mit konventionellen Fügeverfahren in der Metallverarbeitung. Zusätzlich wurden Sonderschnittstellen zur Lastaus- und -einleitung und Funktionsbauteile (aus Stahl) für die anschließende mechanische Laborprüfung auf Bauteilebene gefertigt.

Zur Prüfung des Gesamt-Bauteils „THE BOX“ unter Laborbedingungen wurden experimentelle Bauteilversuche entwickelt. Diese basierten auf Prüfverfahren aus dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 (Drei-Punkt-Biegezug-Versuch) für Versagen durch Moment (Zug- bzw. Druckversagen) (3 Versuche) und Querkraftversagen (3 Versuche). Zur mechanischen Prüfung auf Biegung und Querkraft des Gesamt-Bauteils „THE BOX“ wurden die entsprechenden Prüfaufbauten errichtet.

#### **4.1.5. Arbeitspaket 5: Gebäudeebene – „Systemlösung THE BOX“**

Im Anschluss an die Prüfung der „THE BOX“ Gesamt-Bauteile unter Laborbedingungen im AP4 stand im AP5 die Prüfung der Bauteile im „Gebäude“ unter realitätsnahen Bedingungen im Mittelpunkt. Hierzu wurde ein entsprechender Prüfaufbau eingerichtet. Parallel zur Entwicklung des Prüfaufbaus erfolgte die Erstellung der Prüfkörper. Im Falle von Stahlbeton umfasste dies die Errichtung der Schalung, den Einbau der Bewehrung, die Betonage, das Ausschalen und den Test von Charakterisierungsprüfkörpern (Betonwürfeln udgl.). Anschließend wurden die Prüfkörper in den Prüfaufbau eingebaut. Im Rahmen der mechanischen Prüfung wurde eine Belastung bis zum Versagen der „Systemlösung THE BOX“ aufgebracht. Dabei wurden Verformungen und Kräfte messtechnisch erfasst.

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Versuche wurde ein Bemessungsmodell für „THE BOX“ abgeleitet. Dabei wurde auf bestehende Grundkonzepte von Projektpartner AVI (Produkt THERMOKORB) und die Ergebnisse der THERM-opti-BALKON Projekte [2] zurückgegriffen.

Zur Bestimmung des Langzeitverhaltens der Gesamt-Bauteile „THE BOX“ erfolgte zudem die Entwicklung und Implementierung eines experimentellen Langzeitfeldversuches basierend auf Erfahrungen von AVI (THERMOKORB) und dem Projekt THERM-opti-BALKON-P2 (In-Situ-Versuchsanlage). Zur Aufzeichnung und Überwachung des Langzeitversuches wurden in periodischen Abständen manuelle Messungen durchgeführt – 2 Monate in der Projektlaufzeit und anschließend weitere 2 Jahre In-Kind durch Partner AVI.

Zur Bestimmung des Brandwiderstandes der Gesamt-Bauteile wurde eine Feuerwiderstandsprüfung im Prüflabor des Institutes für Brandschutztechnik und Sicherheitstechnik (IBS) in Linz durchgeführt. Dabei wurde ein Probekörper geprüft und hinsichtlich seiner Tragfähigkeit, seiner raumabschließenden Wirkung und der Wärmedämmkriterien beurteilt.

# 5 Ergebnisse

## 5.1. Konzeptebene

Ziel des Arbeitspakets 2 war in einem ersten Schritt die Erstellung einer Anforderungsspezifikation in Bezug auf Lastein-, Lastüber- und Lastausleitung. Die Bereiche Lastaus- und Lasteinleitung sollten mit herkömmlichen Konstruktionen und Materialien ausgeführt werden. Das Hauptaugenmerk lag somit auf dem wärmesensitiven Bereich der Lastüberleitung als „hermetisch“ abgegrenztes Funktionselement.

Ein weiteres Ziel des Arbeitspakets war der Erstentwurf einer „Systemlösung THE BOX“ durch FEN unter Mithilfe aller Projektpartner. Die Herausforderungen hierbei waren vielfältig, da die Geometrie einerseits von den Marktanforderungen (max. Bauteildicken, Auskragungslängen und damit einhergehende max. normative Verformungen, etc.) vorgegeben wurde, andererseits gibt es Anforderungen vom Österreichischen Institut für Bautechnik hinsichtlich der Erfüllung der bauphysikalischen Randbedingungen, die von planenden Personen nachgewiesen werden müssen. Die Ansprüche an den Tragwiderstand wurden in Anlehnung an ein bestehendes System „Thermokorb“ der Fa. AVI festgelegt. Auch die kaufmännischen Randbedingungen wurden aufgrund der gesammelten Erfahrung definiert.

### 5.1.1. Anforderungsspezifikation

Die Anforderungen an die Bauteile wurden in Form eines Lastenheftes definiert. Die Auswahl der Einsatzstoffe für die FVK-Komponente erfolgte auf Basis einer umfassenden Literatur- und Marktrecherche zu entsprechenden Matrixharzen und Faserwerkstoffen. Aufgrund der Festigkeit, Beständigkeit und des Preis-/Leistungsverhältnisses wurde Epoxidharz (EP) als Matrixkunststoff mit unidirektionaler Glasfaserverstärkung (GF-UD) ausgewählt. Außerdem wurde als Schlüsselement der Hybridstruktur die Anbindung des GFK-Elementes an die weiterführende Lastein- bzw. Lastausleitungskomponente aus Metall identifiziert.

Tabelle 4: Anforderungsspezifikationen „THE BOX“

<b>Anforderungsspezifikationen „THE BOX“</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zug: 75 kN auf Designniveau</li> <li>• Druck: 75 kN auf Designniveau</li> <li>• Querkraft: 20 kN auf Designniveau</li> </ul>
<b>Geometrie:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteilhöhen von 16 bis 24 cm</li> <li>• EPS-Dämmstoffdicke: &gt; 120 mm</li> <li>• Max. Auskragungslängen: in Abhängigkeit der normativen Vorgaben (ÖNORM EN 1992-1-1)</li> </ul>
<b>Mechanischer Widerstand:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRd = 50,0 kNm/m und VRd = 40,0 kN/m für Bauteilhöhe h = 16 cm und</li> <li>• MRd = 100,0 kNm/m und VRd = 65,0 kN/m für Bauteilhöhe h = 24 cm</li> </ul>
<b>Bauphysik:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeleitfähigkeiten <math>\lambda</math>: „0“ W/mK (möglichst „keinen“ Wärmedurchgang – so gering wie möglich);</li> <li>• Feuchteschutz, Innenoberflächentemperatur: min. Innenoberflächentemperatur <math>\geq \theta_{min} = 12,6 \text{ °C}</math> (Annahme: Innenraumtemperatur <math>20 \text{ °C}</math> und rel. Luftfeuchte 50 %); Anm.: Die min. Innenoberflächentemperatur dient zur Vermeidung von Schimmelpilzbildung und Tauwasserausfall (Lt. ÖNORM B 8110-2).</li> <li>• Trittschallpegel L'nT,w: 53 dB (gemäß OIB-Richtlinie 5, Punkt 2.5 Anforderungen an den Trittschallschutz in Gebäuden für nutzbare Terrassen, Dachgärten, Balkone, Loggien und Dachböden)</li> <li>• Trittschallpegel L'nT,w: 48 dB (gemäß OIB-Richtlinie 5, Punkt 2.5 Anforderungen an den Trittschallschutz in Gebäuden für allgemein zugängliche Terrassen, Dachgärten, Balkone, Loggien und Dachböden)</li> <li>• Brandschutz R0 bzw. R60: Brandwiderstandsdauer von 0 bzw. 60 min ohne Verwendung von Brandschutzplatten.</li> <li>• Brandschutz REI120: Max. Brandwiderstandsdauer von 120 min unter Verwendung von Brandschutzplatten.</li> </ul>
<b>Dauerhaftigkeit:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nutzungsdauer von mind. 50 Jahren</li> </ul>
<b>Herstellkosten HK zum Zeitpunkt der kaufmännischen Analyse im Projekt:</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Momentenkorb: 1,10 bis 1,30 €/kNm für Bauteilhöhe h = 20 cm</li> <li>• Querkraftkorb: 0,50 bis 0,70 €/kN für Bauteilhöhe h = 20 cm</li> </ul>

### 5.1.2. Erstentwurf „Systemlösung THE BOX“

Die Grundstruktur von „THE BOX“ basiert auf dem THERMOKORB System des Projektpartners AVI und den Ergebnissen der FFG Projekte THERM-opti-BALKON (siehe Abschnitt 3.5.2).

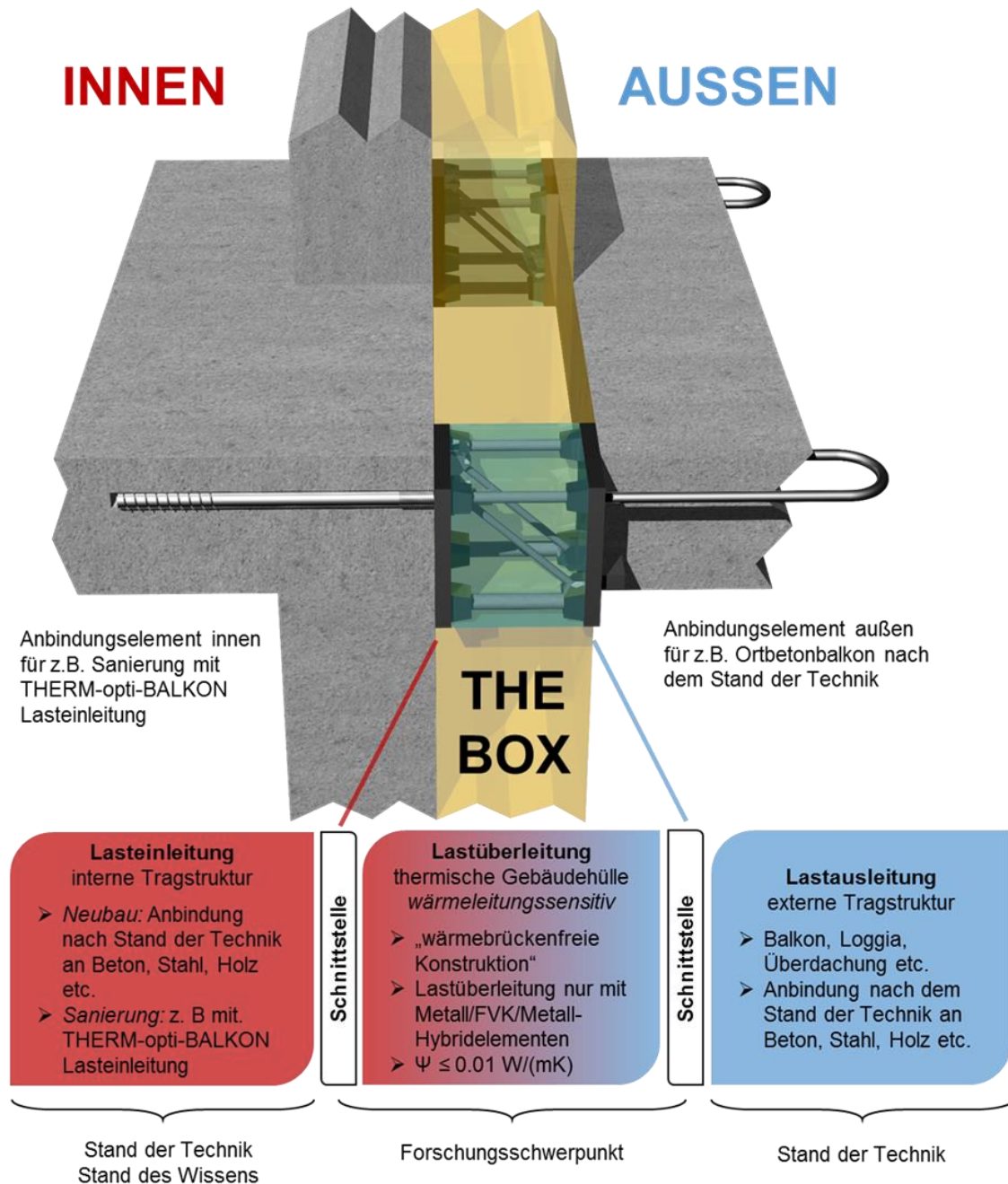


Abbildung 14: Konzept „Systemlösung THE BOX“

Der zentrale Fokus lag hierbei zu Beginn des Projekts auf der Entwicklung einer geeigneten Metall-/Faserverbundkunststoff (FVK)-Hybridstruktur für die thermische Entkopplung. Mehrere mögliche Varianten wurden entwickelt und getestet. Die Vordimensionierung für die Zug- und Druckglieder folgte aufgrund von Versuchen mit GFK-Material an der MUL (siehe Abschnitt 5.2). Hier wurde darauf geachtet, dass den notwendigen Zug- und Druckkräften (ca. 75 kN, entspricht 2Ø10 mm Betonstahl B550) standgehalten werden kann.

Die ersten Prototypen wurden durch Einkleben von einem Metallgewinde in ein FVK Rohr hergestellt (siehe Abschnitt 5.2). Versuche im AP3 ergaben für diese Konstruktion eine unzureichende Zugfestigkeit. Die zweite Generation des Verbindungselements wurde durch den Zukauf von FVK Gewindestangen und der Verbindung mit verschiedenen Längen an Hülsen für den Lastein- und Lastaustrag definiert (siehe Abschnitt 5.2).

Zur thermischen Charakterisierung wurde ein umfangreiches thermisches numerisches Simulationsprogramm durchgeführt.

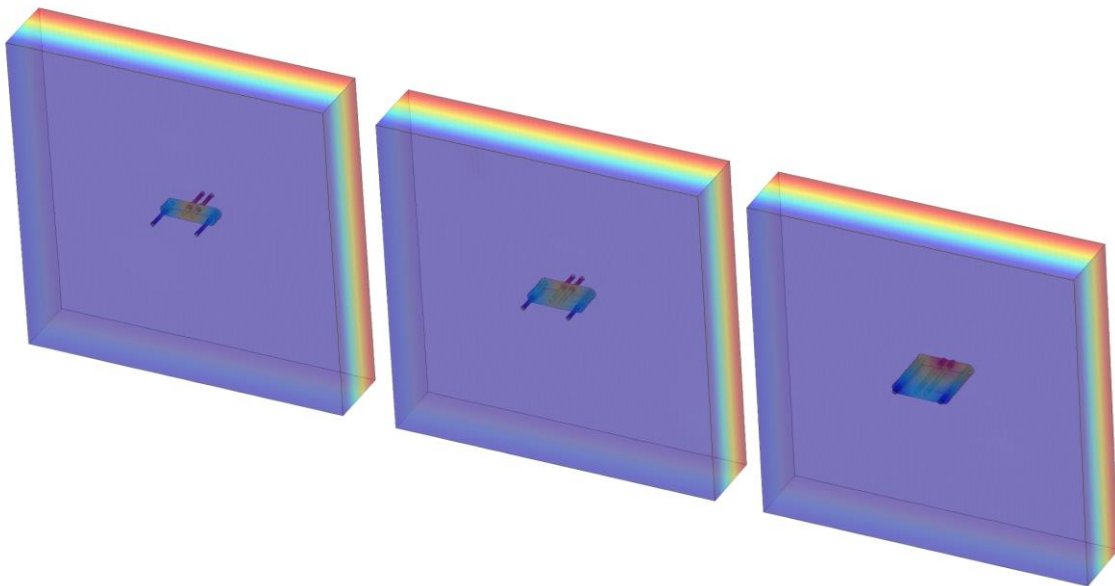


Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der durchgeführten numerischen thermischen Simulationen

## 5.2. Werkstoff- und Subkomponenten-Ebene

Im Sinne einer systematischen Erarbeitung der „Systemlösung THE BOX“ galt es zunächst eine geeignete Metall/Faserverbundkunststoff (FVK)-Hybridstruktur zu entwickeln und primär hinsichtlich mechanischer Festigkeit (Zug-, Druck- und Schubbeanspruchung) zu evaluieren. Hierzu wurden verschiedene Prüfmethoden zur mechanischen Charakterisierung der verschiedenen FVK/Metall-Hybridkomponenten entwickelt und die primären mechanischen Basiseigenschaften der zu verwendenden Werkstoffe anschließend mithilfe von Kurzzeitversuchen ermittelt. Des Weiteren wurde das zeitabhängige Deformationsverhalten der Hybridelemente unter statischer Zug- und Druckbeanspruchung untersucht und somit eine Erstabschätzung des Langzeitdeformationsverhaltens ermöglicht.

### Metal/GFK-Hybrid Prototyp 1:

Das festigkeitsbestimmende Schlüsselement der Hybridstruktur bildet primär die Anbindung des GFK-Elementes an die weiterführende Lastein- bzw. Lastausleitungskomponente aus Metall. Für die Entwicklung einer entsprechend tragfähigen Schnittstelle wurden unterschiedliche Anbindungskonzepte, die prinzipiell in form- und kraftschlüssige Verbindungen zu unterteilen sind, recherchiert und hinsichtlich der spezifischen Vor- und Nachteile diskutiert.

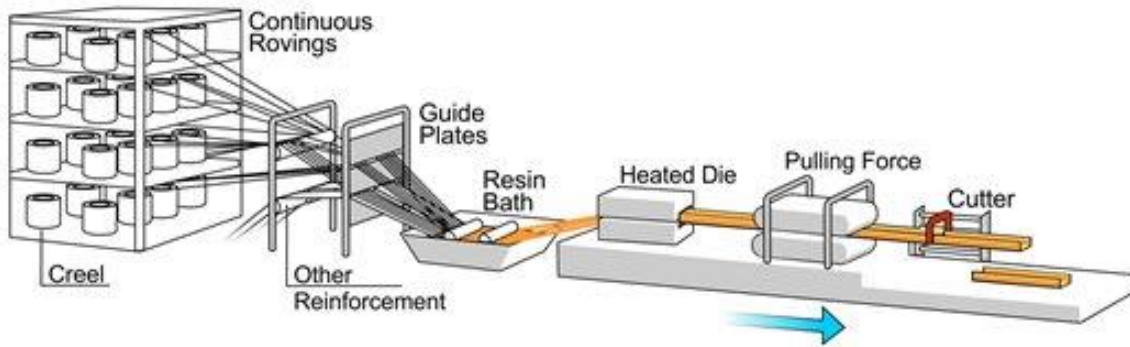


Abbildung 16: Schematischer Aufbau einer Pultrusionsanlage

Insbesondere wegen der homogenen Lastüberleitung wurden für die Metall/GFK Hybride zunächst Klebeverbindungen in Betracht gezogen und die entsprechenden Modellprüfkörper entwickelt und hergestellt.

Diese bestanden aus einem im Pultrusionsverfahren (siehe Abbildung 16) hergestellten GFK-Rohrstück, in das metallische Gewindeeinsätze eingeklebt wurden (siehe Abbildung 19). Nach Herstellung entsprechender Einspannvorrichtungen an der Zug-Prüfmaschine wurde in anschließenden Zugscherversuchen die Zugfestigkeit der Anbindung geprüft (siehe Abbildung 20). Darüber hinaus wurde in einer Serie von unterschiedlichen Verklebungsvarianten (u.a. konische Anbindungsstücke mit und ohne Formschluss) das Festigkeitspotential verklebter Metall/GFK-Hybridstrukturen untersucht.

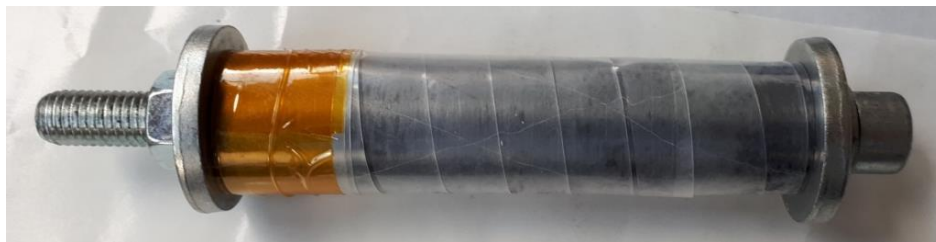


Abbildung 17: Mit Kohlenstofffaser-Prepreg und Shrinktape umwickelter Prüfling



Abbildung 18: Pultrudiertes Rohr mit Gewindeeinsätzen aus Stahl



Abbildung 19: Metall/GFK-Hybridprüfkörper mit eingeklebtem Gewindeeinsatz (links) und mit Anbindungselementen für die Zugprüfung (rechts).



Abbildung 20: Zugprüfanordnung im Labor für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe (links), versagter Prüfkörper nach der Zugprüfung (rechts).

### Metall/GFK-Hybrid Prototyp 2:

Hinsichtlich einer weiteren Steigerung des Festigkeitsniveaus der Metall/GFK-Anbindung und Krafteinleitung in die Kunststoffverbundkomponente wurden spezielle hochfeste Gewindestangen aus glasfaserverstärktem Epoxidharz in die weiterführende mechanische Prüfung aufgenommen. Die Anbindung an die Metallkomponente erfolgte dabei über speziell abgestimmte Metallmuttern, die auf die Gewindestange aufschraubbar (siehe Abbildung 21) die Krafteinleitung gewährleisteten.

#### 5.2.1. Kurzzeit-Zugversuche

Für die Prüfung der Zugfestigkeit derartiger Hybridstrukturen bestehend aus GFK-Gewindestange und beidseitig aufgeschraubten Metallmutterhülsen war zunächst wiederum ein entsprechendes Adapterstück zur Einspannung in die Zugprüfmaschine zu fertigen. In anschließenden Kurzzeit-Zugversuchen wurde das Zugverformungsverhalten dieser Prüfkörper mit Bestimmung der Zugfestigkeit charakterisiert. In einer Serie unterschiedlicher Hülsenlängen mit und ohne zusätzlicher Verklebung wurde der entsprechende Einfluss auf das Festigkeitsverhalten untersucht (siehe Abbildung 21). Für eine detaillierte Charakterisierung des Deformations- und Versagensverhaltens der Prüfkörper wurden die Prüfabläufe in den Zugversuchen mittels Hochgeschwindigkeitskamera und hochauflösender 2D-Videoanalyse erfasst und ausgewertet (siehe Abbildung 22).



Abbildung 21: Gewindestangen mit unterschiedlichen Metallanbindungen

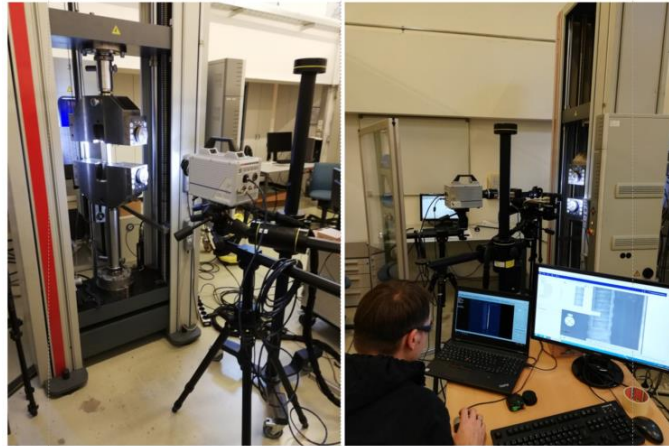


Abbildung 22: Prüfungsanordnung im Zugversuch mit High-Speed Kamera und Full Field Deformationsanalyse  
 In dieser Prüfserie konnte vor allem auch die Abhängigkeit der erreichbaren Zugfestigkeit des Metall/GFK-Hybridprüfkörpers von der verwendeten Hülslenlänge ermittelt werden.

Darüber hinaus wurde im Rahmen einer mikroskopischen Analyse einerseits der Aufbau und die Faserausrichtung der GFK-Gewindestangen und andererseits das Bruchbild der getesteten Prüfkörper untersucht. Damit konnten das Versagensverhalten charakterisiert sowie insbesondere bruchauslösende Zonen lokalisiert werden (siehe Abbildung 23).

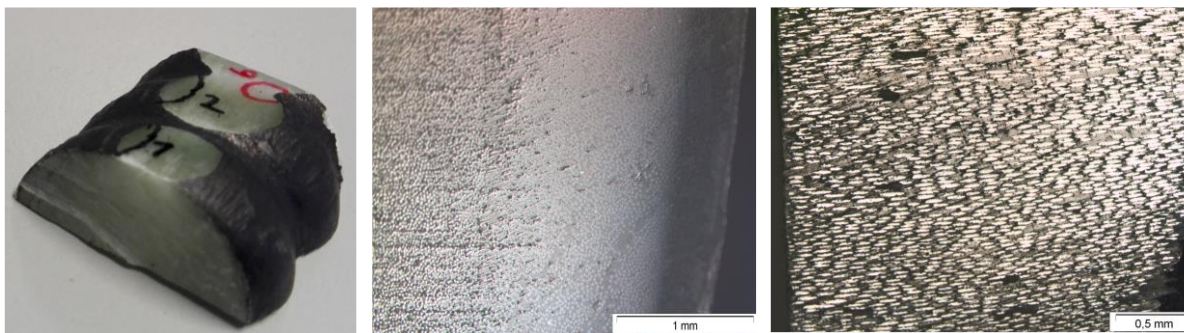


Abbildung 23: Lichtmikroskopische Aufnahmen der GFK-Gewindestange mit Analyse der Faserverteilung (exemplarisch)

### 5.2.2. Kurzzeit-Druckversuche

Zur Untersuchung des Festigkeitsverhaltens der GFK/Metall-Hybridstrukturen unter Druckbeanspruchung wurden monotone Druckversuche an verschiedenen Prüfkörpervarianten durchgeführt. Für die entsprechende experimentelle Umsetzung an der Zug-/Druck-Universalprüfmaschine wurden dafür zunächst geeignete Druck-Einspannelemente konzipiert, gefertigt und in die Prüfungsanordnung implementiert (siehe Abbildung 24).

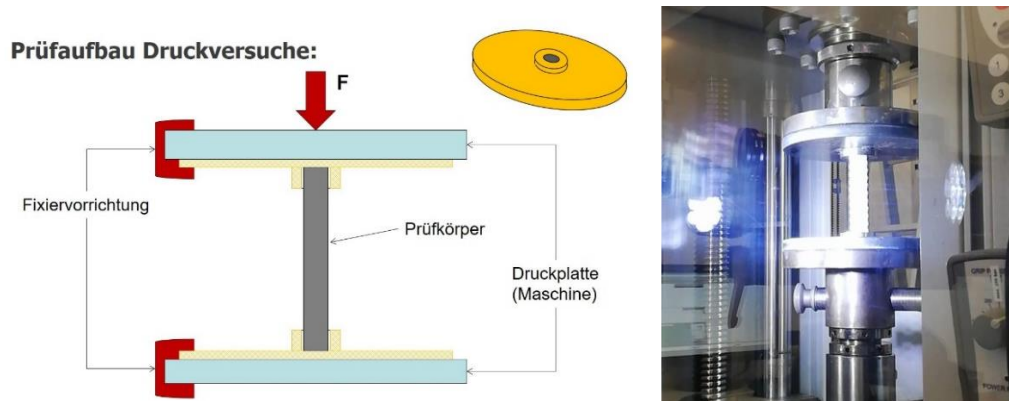


Abbildung 24: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus für monotone Druckversuche (links) und Implementierung an der Zug-/Druck-Universalprüfmaschine (rechts).

Neben der unmittelbaren Bestimmung der Kurzzeit-Druckfestigkeit ermöglichte die optische Erfassung des Deformationsverhaltens in den Druckversuchen eine detaillierte Analyse des Steifigkeits- und Bruchverhaltens der unterschiedlichen Prüfkörpervarianten. Dazu wurde einerseits ein hochauflösendes 2D-Kamerasystem sowie eine zusätzliche High-Speed Kamera versuchsbegleitend verwendet (siehe Abbildung 25).



Abbildung 25: Prüfanordnung für Druckversuche mit Messequipment zur Deformations- und Bruchanalyse.

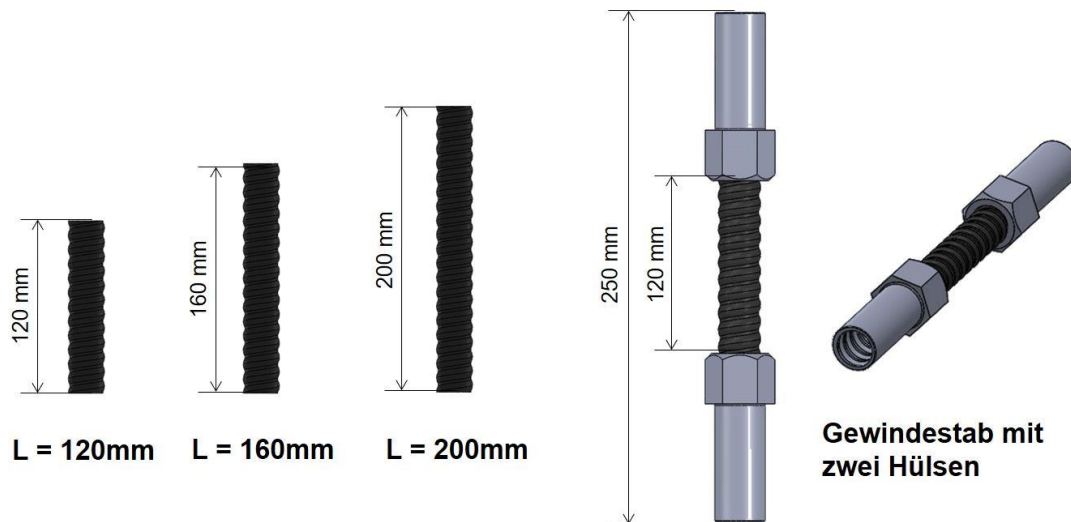


Abbildung 26: Prüfkörpervarianten für Druckversuche

Die geprüften Varianten sind in Abbildung 26 aufgeführt. Die Auswertung erfolgte über die Aufnahme der entsprechenden Druckkraft-Verformungskurven bis zum Bruch. Die im Mittel höchsten Druckfestigkeiten wurden mit den Gewindestäben bei stirnseitiger Lasteinleitung erreicht. Wegen der abnehmenden Druckstabilität der unidirektional verstärkten Stäbe nimmt die Druckfestigkeit mit größer werdender Stablänge ab. Weiters führt die Krafteinleitung über Metallanschlusshülsen zu einer deutlichen Abnahme der Druckfestigkeit. Demgegenüber weisen rohrförmige GFK-Stabprüfkörper mit stirnseitiger Krafteinleitung die höchste Druckfestigkeit auf.

### 5.2.3. Methode Langzeitversuche

Vor allem aufgrund der universellen Einsetzbarkeit der GFK-Gewindestäbe mit hohem Festigkeitsniveau sowohl unter Zug- als auch Druckbelastung wurde dieser Prüfkörpertyp für die weiterführende Charakterisierung des Festigkeitsverhaltens unter Langzeitbeanspruchung verwendet.

Parallel zur mechanischen Basischarakterisierung potenziell tauglicher Hybridelemente wurde eine experimentelle Prüfmethode zur Untersuchung des zeitabhängigen Deformationsverhaltens unter statischer Zugbeanspruchung bereitgestellt, die primär für die Erstabschätzung des Langzeitversagensverhaltens verwendbar ist. Kern dieses als SRCR (Stress Rate accelerated Creep Rupture) bezeichneten Prüfkonzepes ist die mechanische Lastaufbringung auf ein einsatzrelevantes Lastniveau mit anschließender monotoner Steigerung der Last bis zum Bruch. In einer Serie von Einzelversuchen bei schrittweiser Reduzierung der Belastungsgeschwindigkeit wird eine Folge von zunehmenden Versagenszeiten erhalten, die extrapoliert auf die fiktive Belastungsgeschwindigkeit „null“ die Versagenszeit für das zu Grunde liegende initiale Lastniveau bestimmbar macht (siehe Schema in Abbildung 27).

Während die prinzipiell gute Aussagekraft dieses Verfahrens bereits für GFK-Standardprüfkörper gezeigt werden konnte, ist es u.a. Ziel der diesbezüglichen weiterführenden Arbeiten, die Übertragbarkeit dieses Prüfverfahrens auf die hybriden Faserverbundkomponenten zu prüfen und hinsichtlich Aussagekraft für den Langzeiteinsatz zu evaluieren.

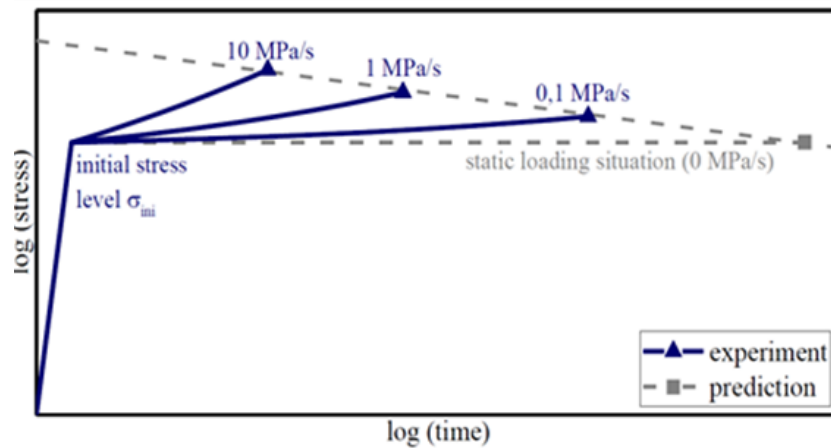


Abbildung 27: Prüfschema für die SRCR-Methode zur Abschätzung des Langzeitversagensverhaltens von Faserverbundkunststoffen

#### 5.2.4. Langzeit-Zugversuche

Für die Langzeitprüfung der Gewindestäbe samt Hülsen im Zugversuch am Bauteilprüffeld des Lehrstuhls MUL-WPK wurde ein spezielles Adapterstück konstruiert und gefertigt. Die Einspannvorrichtung mit einem Prüfkörper nach Versuchsende sind in der folgenden Abbildung 28 dargestellt.



Abbildung 28: Prüfanordnung am Bauteilprüffeld inkl. Adapterstücke zur Einspannung der GFK-Gewindestäbe für Langzeit-Zugprüfungen

Die Langzeit-Zugversuche wurden gemäß dem oben beschriebenen Prüfschema „Stress Rate accelerated Creep Rupture tests (SRCR)“ durchgeführt. Dabei erfolgte zunächst die Belastung auf ein einsatzrelevantes Initiallastniveau  $\sigma_{ini}$  mit anschließender monotoner Steigerung der Last bis zum Bruch. In einer Serie von Einzelversuchen bei schrittweiser Reduzierung der Belastungsgeschwindigkeit wurde eine Folge von zunehmenden Versagenszeiten erhalten, die extrapoliert auf die fiktive Belastungsgeschwindigkeit „null“ die Versagenszeit für das zu Grunde liegende initiale Lastniveau bestimmbar machte.

Für die Bestimmung des Langzeitfestigkeitsverhaltens der GFK-Gewindestäbe wurden diese mit aufgeschraubten Hülsen eingespannt. In einer Serie von Einzelversuchen wurde jeweils ausgehend von der spontan aufgebrachten Ausgangsspannung  $\sigma_{ini}$  die Last monoton bis zum Bruch gesteigert, wobei die Lastrampe in Dekadenschritten von 0,1 bis 0,0001 MPa/s reduziert wurde. Die resultierenden Versagenspunkte wurden somit erhoben. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden der Versagenspunkte mit den jeweiligen Ausgangslastniveaus entspricht dabei nach der SRCR-Methode näherungsweise der Versagenszeit für die statische Kriechbelastung bei diesem Lastniveau.

In weiterer Folge konnte auf diese Weise ein Zeitstand-Schaubild der Kriechversagenszeiten in Abhängigkeit der Kriechlast erstellt werden, wobei dazu im Rahmen der bisherigen Versuche 2 Punkte bestimmt wurden. Diese erste Prognose hinsichtlich des Langzeitfestigkeitsverhaltens der GFK-Stäbe ist jedoch noch mit einigen Unsicherheiten verbunden. Diese betreffen einerseits die signifikante Messwertstreuung insbesondere für das höhere Initiallastniveau. Andererseits sind für eine Absicherung der Aussage hinsichtlich des Langzeitverhaltens weitere Versuche speziell bei niedrigeren Ausgangsspannungen erforderlich. Vor allem für Versuche bei niedrigerem Ausgangslastniveau mit deutlichem Abstand zur Kurzzeit-Festigkeit ist ein konsistenteres Versagensverhalten mit aussagekräftiger Langzeitaussage zu erwarten.

### 5.2.5. Langzeit-Druckversuche

Unter Verwendung des SRCR-Prüfkonzeptes wurden in weiterer Folge die Untersuchungen zur Langzeitcharakterisierung des Festigkeitsverhaltens der GFK-Gewindestäbe unter Druckbeanspruchung durchgeführt. Konkret wurden dazu Gewindestäbe mit aufgeschraubten Hülsen mit einer zuvor festgelegten freien Stablänge unter stirnseitiger Druckkrafteinleitung geprüft (siehe Abbildung 29).



Abbildung 29: Prüfaufbau für Langzeit-Druckprüfungen am Bauteilprüffeld

Die Analyse des Bruchverhaltens der GFK-Gewindestäbe (siehe Abbildung 30) ergab ein grundsätzlich gleiches Versagemuster für alle untersuchten Lastniveaus und Prüfungsgeschwindigkeiten. Dies ist auch eine wichtige Grundvoraussetzung für die Anwendbarkeit der SRCR-Prüfmethode, für die innerhalb einer Prüferie der Versagensmechanismus gleichbleiben muss.



Abbildung 30: Versagensbilder geprüfter GFK-Gewindestäbe nach SRCR-Druckprüfung bei unterschiedlichen Lastniveaus bzw. Lastrampen

### 5.2.6. Thermomechanische Basischarakterisierung

Zur Charakterisierung der Temperaturabhängigkeit der Steifigkeitseigenschaften des vorliegenden GFK-Materials wurden dynamisch-mechanische Versuche bei geringen Beanspruchungsamplituden sowohl im 3-Punkt-Biegemodus als auch im Torsionsmodus durchgeführt. Die Heizrate betrug 2 K/min. In Abbildung 31 sind die verwendeten DMA-Geräte für die 3-Punkt-Biegeversuche (DMA/SDTA 861e, Mettler Toledo, Schwerzenbach, CH) sowie für die Torsionsversuche (Modular Compact Rheometer (MCR) Multidrive, Anton Paar, Graz, A) dargestellt.

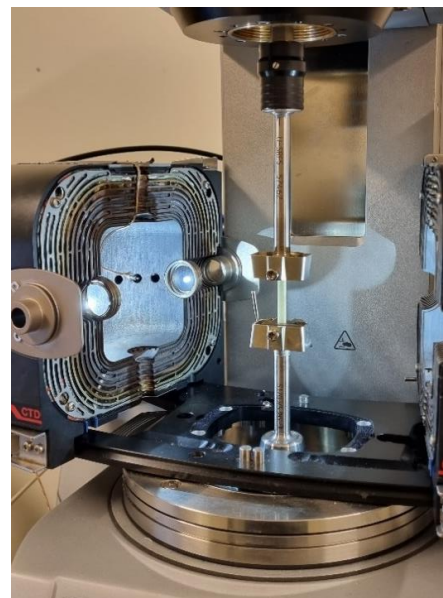


Abbildung 31: Prüfungsanordnungen zur dynamisch-mechanischen Analyse im 3-Punkt-Biegemodus (links) sowie im Torsionsmodus (rechts).

Als resultierende Kennwertfunktionen wurden die temperaturabhängigen Verläufe des dynamischen Elastizitätsmoduls  $E'(T)$  im 3-Punkt-Biegemodus sowie des dynamischen Schubmoduls  $G'(T)$  im Torsionsmodus bestimmt. Zusätzlich wurde die Erweichungs- oder Glasübergangstemperatur  $T_g$  im Maximum der entsprechenden Verläufe des mechanischen Verlustfaktors  $\tan \delta$  ermittelt. Bedingt

durch die unidirektionale Faserorientierung der Prüfkörper und der Beanspruchung im Torsionsmodus quer zur Faserrichtung ist die Verstärkungswirkung der Glasfasern reduziert und die mechanischen Eigenschaften wie auch der G'-Modul werden weitgehend von der polymeren Harzkomponente bestimmt.

## **5.3. Gesamt-Bauteil „THE BOX“**

### **5.3.1. Mechanische Belastungstests, Versuchsgruppen G01 bis G10**

Um das Zusammenwirken der „THE BOX“-Komponenten auf Bauteilebene auf ihre mechanische Funktionsweise überprüfen zu können, wurden zunächst zehn Versuchsgruppen mit unterschiedlichen thermischen Entkopplungen hergestellt.

Gesamtübersicht Prototypen/Versuchsgruppen:

- Versuchsgruppe G01: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 1
- Versuchsgruppe G02: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 2
- Versuchsgruppe G03: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 3
- Versuchsgruppe G04: Probekörper AVI-XII-Thermokorb (Referenzversuch)
- Versuchsgruppe G05: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 4
- Versuchsgruppe G06: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 5
- Versuchsgruppe G07: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 6
- Versuchsgruppe G08: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 7
- Versuchsgruppe G09: Probekörper Schöck Isokorb CXT Typ K M1 V2
- Versuchsgruppe G10: Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 8

Die Betonage der Versuchskörper (siehe Abbildung 32) und die Herstellung der Betonproben der einzelnen Versuchsgruppen G01-G10 erfolgte in mehreren Chargen.



Abbildung 32: Betonage Versuchsgruppen G01 bis G10

Im Anschluss wurde eine Vielzahl an mechanischen Belastungsversuchen an den Versuchsgruppen G01-G10 durchgeführt. Um eine bessere Aussage über die Tragfähigkeit der einzelnen Prototypen (statistische Genauigkeit) zu erhalten, wurden je Typ der thermischen Kopplung drei Versuche durchgeführt (daher die Bezeichnung „Versuchsgruppen“). Des Weiteren wurden auch Versuche mit bereits am Markt erhältlichen Bauteilen (AVI-XII-Thermokorb Versuchsgruppe G04 und Schöck Isokorb CXT Versuchsgruppe G09) zum Vergleich durchgeführt.

In allen Versuchen wurde die Einwirkung eines negativen Biegemoments (Zugkraft – oben, Druckkraft – unten) für alle Gesamt-Bauteile bestimmt. Je nach Art der thermischen Kopplung ergeben sich unterschiedliche Kraftübertragungswege und dementsprechend verschiedene Tragwiderstände der Versuchskörper.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen Impressionen der durchgeführten Belastungsversuche für die verschiedenen Versuchsgruppen.



Abbildung 33: Impressionen mechanische Belastungsversuche Versuchsgruppen G01-G10

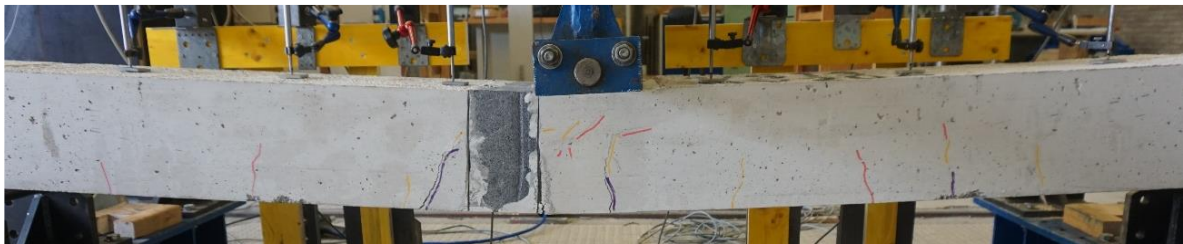


Abbildung 34: Impressionen mechanische Belastungsversuche Versuchsgruppen G01-G10

Die geplanten Verbindungsvarianten (G05, G06, G07, G08, G10) konnten deutlich höhere Bruchlasten im Kurzzeit-Versuch verglichen mit den am Markt erhältlichen Produkten von Schöck und AVI (G04 und G09) erreichen. Dabei ist einzuschränken, dass die tatsächliche Last aber aufgrund des Langzeit-Materialverhaltens geringer anzusetzen ist.

Um ein Versagen der Schweißnähte zwischen den Bügeln aus Betonstahl ( $\varnothing 10$ ) und der Gewindehülsen ausschließen zu können, wurden zusätzlich im firmeninternen Labor der AVI Scherversuche durchgeführt (siehe Abbildung 35).

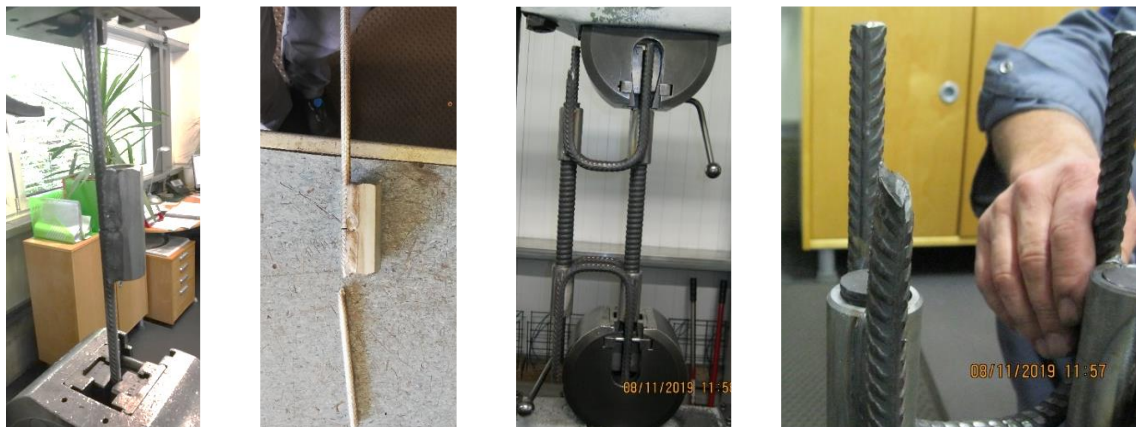


Abbildung 35: Scherversuche der Schweißnaht

### 5.3.2. Kaufmännische Kostenanalyse

Nach der erfolgreichen Durchführung der Bauteilversuche für die Versuchsgruppen G01-G10 und deren technischen Analysen, wurden zur Bestimmung des Marktpotentials kaufmännische Vergleiche angestellt. Die Marktrecherche wurde von der technischen Abteilung sowie der Einkaufsabteilung des Projektpartners AVI durchgeführt. Die Vergleiche waren notwendig, um festzulegen, welche Varianten aus kaufmännischer Sicht für dieses Projekt zielführend waren.

In einem ersten Schritt wurden vom Einkauf des Projektpartners AVI, in Abstimmung mit der Technik, zahlreiche Angebote von potenziellen Lieferanten eingeholt. Die Mengen für eine Serienfertigung mussten auf Basis der Verkaufsmengen für den Thermokorb abgeschätzt werden.

Für die folgenden technischen Anforderungen waren eine intensive Produktrecherche und Anfragen an potenzielle Lieferanten notwendig:

- Übertragung der Zugkraft
- Übertragung der Querkraft
- Übertragung der Druckkraft

Für die Zugkomponente wurde der Einkauf von Projektpartner AVI auf faserverstärkte Stäbe aus unterschiedlichsten Materialien (z.B. GFK und CFK) angesetzt. Die Angebote umfassten z.B. auch Carbon-Stäbe und Basalt-Stäbe. Natürlich musste das Hauptaugenmerk auf die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$ , die Festigkeit, den E-Modul und die Kosten gelegt werden. Auf der Zugseite war es dementsprechend das Ziel, einen Stab zu finden, der in Kombination mit einer Mutter bzw. Gewindehülse verwendet werden kann, um eine Ein- und Ausleitung der Zugkräfte gewährleisten zu können.

Aufgrund der Anforderung nach erhöhtem Brandwiderstand der Bauteile erfolgte für den Querkraftbereich eine Recherche nach Materialien aus gebogenen, faserverstärkten Kunststoffen, aber auch nach nicht-rostenden Stählen. Im späteren Projektverlauf wurde die Eignung eines Materials aus faserverstärktem Kunststoff in Bezug auf die Anforderungen an den Brandwiderstand (siehe OIB-Richtlinien) geprüft.

Im Druckbereich sollten wiederum dieselben Materialien bzw. Stäbe zum Einsatz kommen, die bereits auch im Zugbereich verwendet wurden. Außerdem wurde für die Ein- und Ausleitung von Druckkräften auch der Einsatz von UHPC-Druckkörpern geprüft, zumindest im Anwendungsbereich von thermischen Entkopplungen für Betonbauteile.

### 5.3.3. FEM-Simulationen

Basierend auf den Ergebnissen der Belastungstests für die Versuchsgruppen G01-G10 wurden von Prof. Hinterhölzl und seinem Team an der FH-Wels zusätzlich Finite-Elemente Simulationen durchgeführt (siehe Abbildung 36). Es wurden 3D Computermodelle für eine Auswahl der zuvor durchgeführten Versuche erstellt und die Simulationsergebnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen. Ziel war hier die Plausibilisierung der Materialkennwerte des verwendeten Materials, sowie die Prüfung des Konzepts für die finale Konfiguration des Gesamt-Bauteils. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden weitere kleine Optimierungen vorgenommen.

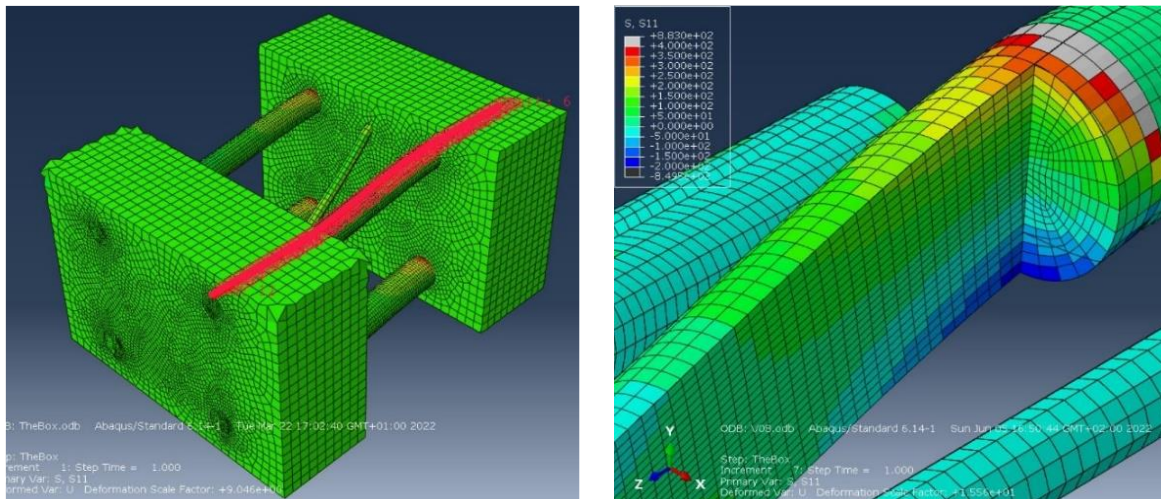


Abbildung 36: Ergebnisse FEM-Simulationen

Für die Auswertung der Spannungen wurden Pfade durch die zu bewertenden Bauteile gelegt und die Spannungsspitzen ausgewertet. Diese wurden dann anschließend miteinander verglichen. Bei den auftretenden Spannungen handelte es sich ausgehend von der Simulation um sehr lokale Probleme. Die Spannungsspitzen traten genau im Bereich der Einspannung auf.

### 5.3.4. Prototyp Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppen G11-G16

Auf Basis der Ergebnisse aus den Belastungstests für die Versuchsgruppen G01-G10, sowie der anschließenden kaufmännischen Analyse und den Ergebnissen aus den FEM-Simulationen wurde festgelegt, dass der Fokus für die Fortführung des Projektes der Entwicklung einer thermischen Hochleistungsentkopplung vorwiegend auf eine thermische Entkopplung von Stahl- und Stahlbetonbauteilen gelegt werden sollte. Hierzu wurden neue Prototypen der Gesamt-Bauteile entwickelt und angefertigt:

- Versuchsgruppe G11: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 9 (geplant aber nicht getestet)
- Versuchsgruppe G12: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 10 (geplant aber nicht getestet)

- Versuchsgruppe G13: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 11 (geplant aber nicht getestet)
- Versuchsgruppe G14: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 12
- Versuchsgruppe G15: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 13
- Versuchsgruppe G16: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 14

Der Fokus bei der Entwicklung der neuen Versuchskörper lag hierbei auf der Kostenoptimierung, weswegen nach Abschluss der im vorhergehenden Kapitel 5.3.2 durchgeführten kaufmännischen Analyse die Versuchsgruppen G11, G12 und G13 verworfen wurden.

Für die Versuchsgruppen G14-G16 (Stahl – Beton Lösung) wurden insgesamt fünfzehn mechanische Belastungstests durchgeführt (siehe Abbildung 37). Innerhalb der Versuche wurde die jeweils maximal mögliche Querschnittsbeanspruchung im Übergangsbereich Glasfaserstäbe – Stahl bzw. Glasfaserstäbe – Beton untersucht. Die Herstellung des Stahlträgers und die Betonage der Beton-Versuchskörper erfolgte durch den Projektpartner TVFA.

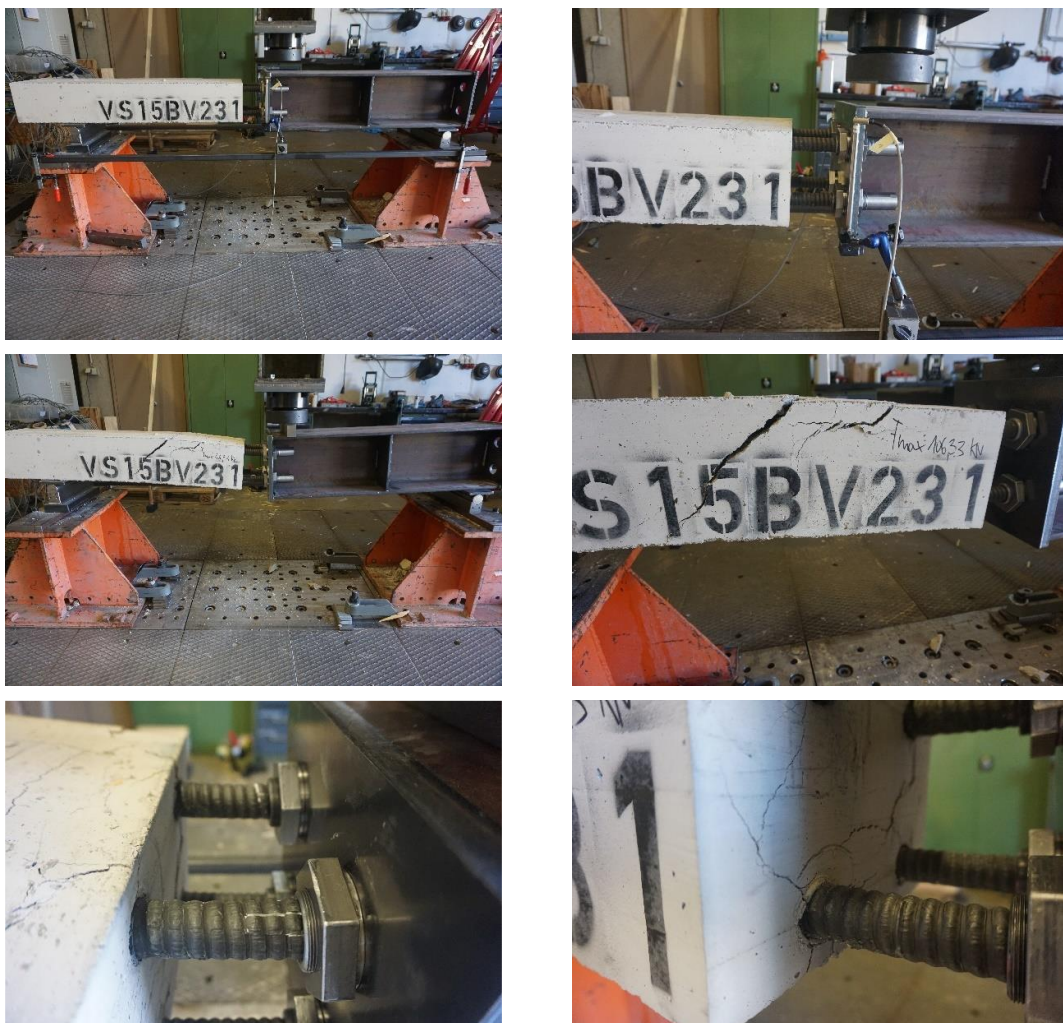


Abbildung 37: Impressionen mechanische Belastungsversuche am Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppen G14-G16

### **5.3.5. Finales Konzept Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppe G17, Referenz**

Auf Basis der Ergebnisse aus den Belastungstests für die Versuchsgruppen G14, G15 und G16 wurde das finale Konzept des Gesamt-Bauteils definiert und als Versuchsgruppe G17 bezeichnet.

- Versuchsgruppe G17: 3 x Probekörper mit thermischer Kopplung GFK Typ 12 (finale Konzept)

Über die Prüfung einer Referenzkonfiguration wurden die Versuche für das Momenten-Querkraft Verhalten 5.3.6 und das Langzeitverhalten 5.3.7 vorbereitet.

### **5.3.6. Finales Konzept G17, Versuchsserie M/V Interaktion**

Nach Festlegung des finalen Konzepts von „THE BOX“ wurden 3 geometrische Versuchsanordnungen mit jeweils unterschiedlichem Momenten- Querkraftverhältnis untersucht. Für jedes dieser drei Momenten- Querkraftverhältnisse wurden fünf Versuche und somit in Summe fünfzehn Versuche durchgeführt. Für jeden Versuch wurden die maximale Bruchlast sowie die maßgebenden Schnittgrößen in den Nachweisquerschnitten ermittelt. Zusammenfassend aus den vorhergehenden mechanischen Belastungsversuchen konnte so die Momenten/Querkraftbeziehung für die Versuchsgruppe G17 bestimmt werden. Die gewonnenen Daten bildeten in weiterer Folge die Grundlage für die Herleitung eines Bemessungsmodells für die erarbeitete „Stahl – Beton-Lösung“.

### **5.3.7. Finales Konzept G17, Versuchsserie Langzeitfestigkeit**

Zur Ermittlung des Langzeitverhaltens der Glasfaserstäbe auf Bauteilniveau wurde eine Versuchsserie mit insgesamt zwanzig Versuchen durchgeführt. Ausgehend von einer festgelegten Initiallast aus 5.3.5 wurde die Belastung, weggesteuert mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten, bis zum Versagen gesteigert. Die Initiallast wurde mit 70 % der mittleren Bruchlast, die anhand von zehn rein statischen Versuchen ermittelt wurde, festgelegt. Anschließend wurden Ermüdungsversuche vorgenommen. Basierend auf den Ergebnissen aus der Versuchsserie wurden die wichtigsten Bruchschnittgrößen, die Bauteilverformung, sowie die zu erwartende und die tatsächlich aufgetretene Zeitspanne bis zum Bruch ermittelt.



Abbildung 38: Untersuchung Langzeitfestigkeit, Finales Konzept G17

### 5.3.8. Bemessungsmodell Systemlösung „THE BOX“

Auf Basis der durchgeführten Versuchsserien wurde ein Bemessungsmodell für das finale Konzept G17 von „THE BOX“ erstellt. Für die M/V-Verhältnisse 0,12 / 0,55 / 1,0 / 1,55 wurden jeweils vier vergleichbare Versuche in die Auswertung einbezogen. Aus den Versuchsergebnissen wurden die 5 %-Fraktilwerte ermittelt, welche durch einen für GFK-Stäbe erforderlichen Langzeitfaktor von 2 abgemindert wurden. Dieser abgeminderte 5 %-Fraktilwert nochmals reduziert um den Materialteilsicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  ergab den Widerstand auf Bemessungsniveau  $M_{Rd}$  bzw.  $V_{Rd}$ . Eine weitere Reduktion um einen globalen Lastteilsicherheitsbeiwert  $\gamma_E$  resultierte in der Tragfähigkeit auf Gebrauchslastniveau.

## 5.4. Prüfung auf Gebäudeebene

Im finalen Projektjahr lag der Fokus auf der Prüfung im „Gebäude“. Die Systemlösung „THE BOX“ sollte realitätsnah unter vorher definierten Randbedingungen getestet werden. Zusätzlich wurde zur Bestimmung des Verhaltens im Brandfall, in Zusammenarbeit mit dem Institut für Brandschutztechnik und Sicherheitsforschung in Linz, ein Brandversuch durchgeführt.

### 5.4.1. Untersuchung Brandwiderstand

Zur Ermittlung des Brandwiderstandes der Systemlösung „THE BOX“ wurde im finalen Projektjahr eine Feuerwiderstandsprüfung im Prüflabor des Instituts für Brandschutztechnik und Sicherheitstechnik (IBS) in Linz durchgeführt. Dabei wurde ein Probekörper geprüft und hinsichtlich seiner Tragfähigkeit, seiner raumabschließenden Wirkung und der Wärmedämmkriterien beurteilt. Die Brandbelastung erfolgte dabei von der Unterseite. Der Probekörper wurde als Prototyp in Einzelfertigung hergestellt. Beim gegenständlichen Deckenelement bestehend aus massivem Stahlbeton, wurde ein Kragplattenanschluss vom TK-Typ „THE BOX“ eingebaut. Der Probekörper mit der gesamten Balkon- und Deckenbewehrung, inklusive den Kragplattenanschlüssen, wurde mit Beton der Güte C20/25 ausgegossen.

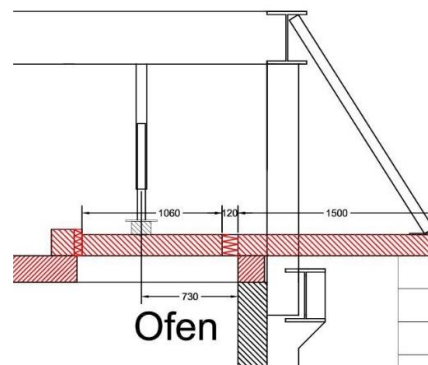


Abbildung 39: Versuchsaufbau Brandversuch

Zur Simulation einer möglichen Last im Brandfall wurde eine Belastung von  $\sim 24,4$  kN im Abstand von 730 mm vom Auflager aufgebracht und über die gesamte Versuchszeit konstant geregelt. Der Prüfofen wurde gemäß der Einheitstemperaturzeitkurve (ÖNORM EN 1363, Teil 1, Punkt 5.1.1.) beheizt. Im Prüfofen sowie an der feuerabgewandten Seite des Probekörpers wurde über den gesamten Versuchszeitraum die Temperatur an verschiedenen Punkten erfasst. Am Probekörper wurde die Verformung entsprechend der ÖNORM EN 1365, Teil 2, an verschiedenen Messpunkten bestimmt. Ziel der Prüfung war die Ermittlung der Dauer der Tragfähigkeit gemäß oben genannter ÖNORM.



Abbildung 40: Impressionen Brandversuch

#### 5.4.2. Planung, Errichtung und Monitoring der Langzeit-Feldversuchs-Anlage

Zur realitätsnahen Prüfung der „Systemlösung THE BOX“, wurde ein experimenteller Langzeitfeldversuch geplant und eingeleitet. Der Versuchsaufbau erfolgte in Form einer Stahlkonstruktion mit zwei Kragarmen. Die Dauerbelastung des Probekörpers erfolgte auf einem Gebrauchslastniveau mit M/V-Verhältnis = 1,0 entsprechend dem Bemessungsmodell im maßgebenden Schnitt. Die Belastung erfolgte durch Verwendung von Stahlknüppeln.

Um eine längerfristige Überwachung des Versuches zu ermöglichen, wurde ein Langzeit-Monitoringsystem geplant und entwickelt. Für jeden Kragträger wurden 4 Messstellen definiert, an welchen die folgenden Messgrößen aufgezeichnet wurden: Vertikale Verschiebung am Kragende (Messstellen 1), vertikale Verschiebung im Anschlussbereich (Messstellen 2), Dehnung und Stauchung der GFK-Stäbe (Messstellen 3+4). Es erfolgten regelmäßige manuelle Messung mit Schiebelehre (Genauigkeit 1/100 mm).

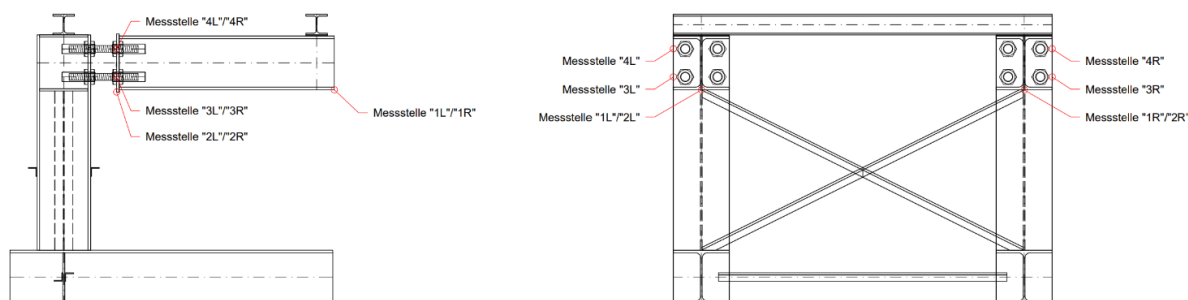


Abbildung 41: Versuchsaufbau Langzeit-Feldversuchs-Anlage



Abbildung 42: Impressionen Langzeit-Feldversuchs-Anlage

Im Rahmen des Versuchsaufbaus wurden eine Nullmessung bzw. Messungen mit unterschiedlichen Teillasten durchgeführt. Gegen Ende des vorliegenden Projekts erfolgte die offizielle Inbetriebnahme des Langzeitversuches. In den ersten Monaten wurden Messungen 1 x wöchentlich durchgeführt, im weiteren Verlauf werden die Messintervalle verlängert. Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt in Diagrammform für Gesamtverformung und den Verformungszuwachs.

## 6 Schlussfolgerungen

Zu Beginn des Projektes musste zunächst eine geeignete Metall/Faserverbundkunststoff (FVK)-Hybridstruktur entwickelt werden und primär hinsichtlich mechanischer Festigkeit (Zug-, Druck- und Schubbeanspruchung) evaluiert werden. Hierbei wurde ersichtlich, dass die Entwicklung eines tragfähigen Hybridelements, bei dem die Lastüberleitung von Metall auf FVK auf möglichst kurzer Länge stattfindet, eine große Herausforderung darstellt. Insbesondere aufgrund der sehr hohen zu übertragenden Lasten bei zugleich geringen Kosten für ein solches Bauteil. Konstruktionstechnisch konnte diese Herausforderung nur teilweise im Rahmen des Projekts gelöst werden.

Aufgrund der höheren Kosten verglichen zu am Markt erhältlichen Produkten wurde in der in AP4 durchgeführten kaufmännischen Analyse der Entwicklungsfokus auf Elemente für „Stahl/Stahlbeton“ gelegt.

Bezüglich der Beurteilung des Langzeitverhaltens der eingesetzten Faserverbundkunststoffe konnten im Projekt wesentliche Fortschritte erzielt werden. Der verwendete prüfmethodische Ansatz einer beschleunigten Charakterisierung des Langzeit-Kriechverhaltens mittels monotoner Zug- und Druckversuche bei sehr langsamen Laststeigerungsraten (Stress Rate accelerated Creep Ruptur- Tests, SRCR) wurde bisher vorrangig an Standardprüfkörpern aus Faserverbundkunststoffen verwendet. Die Anwendung der SRCR-Methode auf Metall/GFK-Hybridkomponenten zeigte prinzipiell eine gute Verwendbarkeit dieser Methode, die zumindest eine erste Abschätzung des anwendungsrelevanten Langzeit-Kriechverhaltens unter realen Einsatzlasten zulässt. Unter besonderer Berücksichtigung des Versagensverhaltens derartiger Hybridkomponenten sind grundlegende Erkenntnisse zum Struktur-Eigenschaftsverhalten unter quasi-statischer Langzeitbelastung ableitbar, die auch als wichtige Basis zum Werkstoffverständnis ähnlich gelagerter Problemstellungen verwendbar sind.

Für das Bauwesen ist eine unmittelbare Anwendbarkeit der gefundenen Erkenntnisse zur Beurteilung des Langzeitverhaltens – vor allem auf Systemebene – noch nicht vollständig gegeben, sodass dafür weiterer Forschungsbedarf gegeben ist.

Des Weiteren hat sich im Projektverlauf herausgestellt, dass für die finale Systemlösung „THE BOX“ massive Einzelteile mit hohen Durchmessern verwendet werden müssen. Diese könnten teilweise die Weiterentwicklung zu einem Produkt für den Projektpartner AVI erschweren. Auch die Brandbeständigkeit der thermischen Entkopplung stellt eine Herausforderung dar, dies könnte jedoch in Zukunft mit der Verwendung neuer Materialien insbesondere mit sich derzeit in der Entwicklung befindlichen Epoxidharzen verbessert werden. Weitere Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten hängen darüber hinaus von den noch nicht gänzlich vorliegenden Ergebnissen der Langzeitversuche ab. Eine effektive Markteinführung von der Systemlösung „THE BOX“ ist davon abhängig, ob es gelingen wird, eine wirtschaftlich sinnvolle Variante im Vergleich zu anderen am Markt befindlichen Systemen weiterzuentwickeln.

Auch Gesetzgebungen zum Thema Ökologie und Nachhaltigkeit könnten den Einsatz von GFK als Bewehrungsmaterial einschränken bzw. gänzlich unmöglich machen, da eine Recyclierbarkeit und eine saubere Trennung der Baustoffe beim Abbruch fraglich ist.

Baurechtliche Auflagen in Bezug auf Brandschutz und Mindest-Lebensdauer von Bauwerken in Bezug auf die Langzeittragfähigkeit könnten den Einsatz von GFK ebenfalls wesentlich erschweren.

Im weiteren Verlauf ist geplant, die in diesem Projekt gewonnenen Ergebnisse und insbesondere auch die Ergebnisse aus der Langzeit-Prüfanlage in einem Folgeprojekt weiter zu erforschen. Die erreichten Projektergebnisse – vor allem zum Langzeitverhalten von FKV/Metall-Hybrid-Bauteilen – sind für alle Bereiche des Bauwesens, insbesondere für Hersteller von Bewehrungsprodukten, von Interesse. Auch für die Hersteller von GFK-Produkten sind die Projektergebnisse von Interesse, bzw. können weitere Entwicklungen auf den Ergebnissen aufgebaut werden.

## 7 Ausblick und Empfehlungen

Im Forschungsprojekt „THE BOX“ wurden wesentliche Grundlagenarbeiten zum Langzeitverhalten von FKV/Metall-Hybrid-Elementen und Bauteilen durchgeführt. Hinsichtlich der Beurteilung des Langzeitverhaltens des eingesetzten FKV-Materials besteht jedoch – vor allem auf Systemebene – für das Bauwesen weiterhin Forschungsbedarf. Ausschlaggebend sind hier auch die Ergebnisse der Langzeit-Feldversuchs-Anlage, welche entsprechend abzuwarten sind. Das Konsortium evaluiert hierzu weiterführende F&E-Aktivitäten zu setzen. Für eine präzisere Abschätzung des Langzeit-Kriechverhaltens auch in Richtung Bauteilzulassung ist eine prüfmethodische Optimierung des SRCR-Verfahrens notwendig. Dies betrifft einerseits größere Prüfumfänge zur statistischen Absicherung der ermittelten Versagenspunkte, die punktuelle Absicherung der Langzeitprognose durch Versuche bei niedrigen Laststeigerungsraten sowie die systematische Analyse und Korrelation mechanischer Ergebnisse mit den zugrundeliegenden Versagensmechanismen.

Auch die Anbindung der Elemente auf den in der Baupraxis notwendigen Baustahl wurde zwar erstmals gelöst, für eine weiterführende Produktentwicklung sind aber ebenfalls noch gezielte weitere F&E-Aktivitäten notwendig. Diese betreffen primär eine eingehende Analyse der Schnittstellen zwischen den FVK-Elementen und den angrenzenden Metallstrukturen zur Lastein- bzw. Lastausleitung als versagenskritische Bereiche der Gesamtstruktur. Innovative Konzepte zur Lastübertragung mittels Kraft- und Formschluss sind hier als Basis für eine entsprechende Weiterentwicklung der bestehenden Lösungsansätze zu sehen. Ergänzend dazu sind für eine zuverlässige Evaluierung optimierter Metall/FKV-Hybridkonzepte entsprechende Prüfmethoden mit Verwendung geeigneter Hybrid-Prüfkörper zu entwickeln. Eine durchgängige Werkstoffcharakterisierung auf Sub-Komponenten- wie auch auf Bauteilebene ermöglicht schließlich auch die Ableitung grundlegender Struktur-Bauteileigenschaftsbeziehungen als Basis für eine treffsichere Bauteilauslegung sowie eine zuverlässige Abschätzung erforderlicher Langzeiteigenschaften.

Auch in Bezug auf die Brandbeständigkeit der thermischen Entkopplung sind weitere Forschungsarbeiten zu betreiben. Insbesondere die Verwendung von anderen Epoxidharzen verspricht großes Potential und sollte Ziel zukünftiger Forschungsaktivitäten bzgl. thermischer Entkopplung werden.

Generell ist festzuhalten, dass im Forschungsprojekt „THE BOX“ eine funktionierende Systemlösung entwickelt werden konnte. Diese hat das Potenzial in einem Demonstrationsvorhaben umgesetzt zu werden und die möglichen Energie-Einsparungen darzustellen. Herausforderungen liegen hierbei in der baupraktischen Umsetzung, für die das System „THE BOX“ noch nicht optimiert ist. Da die Langzeitfestigkeit nicht abschließend geklärt ist, stellt die Demonstration über lange Zeiträume (30 Jahre +) ebenfalls eine Herausforderung dar.

# 8 Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: „Die Systemlösung THE BOX“ .....	8
Abbildung 2: Modell der „Systemlösung THE BOX“ – der Forschungsschwerpunkt befindet sich im Bereich der Lastüberleitung.....	14
Abbildung 3: Definition der Problemstellung nach N. Fleischhacker .....	16
Abbildung 4: AVI Thermokorb XII .....	17
Abbildung 5: Isokorb KXT-Combar mit GFK-Zugstab.....	17
Abbildung 6: Notlösung Vorstellbalkon für Neubau und Sanierung [21].....	18
Abbildung 7: Mechanisches System der entworfenen thermischen Entkopplung gänzlich aus GFK und BFK [1].....	19
Abbildung 8: Instrumentierter Versuchsaufbau des Tastversuches mit einem Dämmkörper mit 160 mm Stärke [1] .....	19
Abbildung 9: IT-Fix thermischer Hochlastanker [14].....	20
Abbildung 10: Thermische Entkopplung „isolan plus“ von der Schweizer Firma Locher Bewehrungen AG mit GFK-Druckelement .....	21
Abbildung 11: Schema THERM-opti-BALKON System II .....	22
Abbildung 12: Thermische Entkopplung mit THERM-opti-BALKON System II .....	23
Abbildung 13: Versuchsanlage aus dem Projekt „THERM-opti-BALKON-P2“ bei ´FEN-Systems Ende 2016 .....	23
Abbildung 14: Konzept „Systemlösung THE BOX“ .....	32
Abbildung 15: Beispielhafte Darstellung der durchgeführten numerischen thermischen Simulationen .....	33
Abbildung 16: Schematischer Aufbau eines Pultrusionsanlage .....	34
Abbildung 17: Mit Kohlenstofffaser-Prepreg und Shrinkrape umwickelter Prüfling .....	34
Abbildung 18: Pultrudiertes Rohr mit Gewindeeinsätzen aus Stahl .....	34
Abbildung 19: Metall/GFK-Hybridprüfkörper mit eingeklebtem Gewindeeinsatz (links) und mit Anbindungselementen für die Zugprüfung (rechts). .....	35
Abbildung 20: Zugprüfanordnung im Labor für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe (links), versagter Prüfkörper nach der Zug-prüfung (rechts).....	35
Abbildung 21: Gewindestangen mit unterschiedlichen Metellanbindungen .....	35
Abbildung 22: Prüfanordnung im Zugversuch mit High-Speed Kamera und Full Field Deformationsanalyse.....	36
Abbildung 23: Lichtmikroskopische Aufnahmen der GFK-Gewindestange mit Analyse der Faserverteilung (exemplarisch).....	36
Abbildung 24: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus für monotone Druckversuche (links) und Implementierung an der Zug/Druck-Universalprüfmaschine (rechts). .....	37
Abbildung 25: Prüfanordnung für Druckversuche mit Messequipment zur Deformations- und Bruchanalyse.....	37
Abbildung 26: Prüfkörpervarianten für Druckversuche .....	38
Abbildung 27: Prüfschema für die SRCR-Methode zur Abschätzung des Langzeitversagensverhaltens von Faserverbundkunststoffen .....	39

Abbildung 28: Prüfanordnung am Bauteilprüffeld inkl. Adapterstücke zur Einspannung der GFK-Gewindestäbe für Langzeit-Zugprüfungen .....	39
Abbildung 29: Prüfaufbau für Langzeit-Druckprüfungen am Bauteilprüffeld.....	40
Abbildung 30: Versagensbilder geprüfter GFK-Gewindestäben nach SRCR-Druckprüfung bei unterschiedlichen Lastniveaus bzw. Lastrampen .....	41
Abbildung 31: Prüfanordnungen zur dynamisch-mechanischen Analyse im 3-Punktbiegemodus (links) sowie im Torsionsmodus (rechts). .....	41
Abbildung 32: Betonage Versuchsgruppen G01 bis G10 .....	43
Abbildung 33: Impressionen mechanische Belastungsversuche Versuchsgruppen G01-G10 .....	44
Abbildung 34: Impressionen mechanische Belastungsversuche Versuchsgruppen G01-G10 .....	44
Abbildung 35: Scherversuche der Schweißnaht.....	45
Abbildung 36: Ergebnisse FEM-Simulationen .....	46
Abbildung 37: Impressionen mechanische Belastungsversuche am Gesamt-Bauteil, Versuchsgruppen G14-G16.....	47
Abbildung 38: Untersuchung Langzeitfestigkeit, Finales Konzept G17.....	49
Abbildung 39: Versuchsaufbau Brandversuch .....	50
Abbildung 40: Impressionen Brandversuch .....	51
Abbildung 41: Versuchsaufbau Langzeit-Feldversuchs-Anlage.....	51
Abbildung 42: Impressionen Langzeit-Feldversuchs-Anlage.....	52

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Projektmotivation am Beispiel einer Modellrechnung für ein Wohnhaus.....	12
Tabelle 2: Materialien zur Übertragung von Lasten in thermischen Entkopplungen: Bewertung mit Wärmeleitungszug- bzw. Wärmeleitungsdruckfestigkeitskoeffizienten. Eine höhere Zahl bedeutet dabei eine tendenziell bessere Eignung [1], [2], [3]. .....	19
Tabelle 3: Darstellung der bereits vorliegenden Ergebnisse und Deliverables aus öffentlich geförderten Projekten, auf die das beantragte Projekt aufbaut, bzw. die in dieses einfließen .....	21
Tabelle 4: Anforderungsspezifikationen „THE BOX“ .....	31

## Literaturverzeichnis

- [1] N. Fleischhacker, Ein neues Verfahren zur nachträglichen thermisch entkoppelten Montage von Stahlbetonbalkonen, Innsbruck, 2017.
- [2] N. Fleischhacker, „High Performance thermal uncoupling of projecting structures using non-metallic concrete reinforcement,“ in 11th Central European Congress on Concrete Engineering, Hainburg, 2015.
- [3] N. Fleischhacker, „Potential nichtmetallischer Bewehrung zur Verringerung konstruktiver Wärmebrücken am Beispiel Balkonkragplatte,“ 2016.
- [4] „Eberhard Schöck,“ September.
- [5] Schöck Bauteile GmbH, „Rundgang im Schöck-Museum - Entwicklungsstufen des Schöck Isokorb,“ Baden-Baden, 2017.
- [6] Schöck Bauteile Ges.m.b.H, „Startschuss für den neuen Isokorb R zur energieeffizienten Balkonsanierung,“ Presseausendung, 2011.
- [7] Schöck Bauteile GmbH, „Wohnen der Zukunft im "Green-Village",“ 2011.
- [8] Etanco, IT-Fix, Wilnsdorf, 2017.
- [9] „2020 energy strategy,“ 2017.
- [10] „EnergieStrategie Österreich“.
- [11] L. Tirol, „Energiestrategie,“ 2017.
- [12] E. Fleischhacker, „Managementansatz nach E. Fleischhacker,“ Pettnau, 2017.
- [13] Schöck Bauteile GmbH, „Größere Balkone bei Passivhäusern – dank optimaler Dämmung,“ Baden-Baden, 2017.
- [14] ETANCO, „IT-Fix,“ 2016.
- [15] Locher Bewehrungen AG, „isolan plus,“ Au, 2016.
- [16] ALPENLÄNDISCHE VEREDELUNGS-INDUSTRIE GESELLSCHAFT M.B.H, „AVI,“ [Online]. Available: <http://www.avi.at/produkte/thermokorb-4/>. [Zugriff am 06 März 2017].
- [17] Österreichisches Institut für Bautechnik, OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz, 2015.
- [18] E. Fleischhacker, „Nachhaltigkeit Definition E. Fleischhacker,“ 2017.
- [19] E. Fleischhacker, „Systemdefinition nach E. Fleischhacker,“ Pettnau, 2017.
- [20] „Technische Information Schöck Isokorb R,“ 2013.
- [21] Van Bergen GmbH, „Anbaubalkone und Vorstellbalkone,“ Kranenburg.
- [22] „Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden“, 2. Bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer 2007, Helmut Schürmann.

## Abkürzungsverzeichnis

FEN SYSTEMS	FEN Sustain Systems GmbH
AVI	Alpenländische Veredelungs-Industrie GmbH
MUL-WPK	Montanuniversität Leoben Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe
TVFA	Universität Innsbruck
FVK	Faser-Kunststoff Verbund
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
SRCR	Stress Rate accelerated Creep Rupture (Prüfmethode)
EP	Epoxidharz
GF-UD	unidirektionale Glasfaserverstärkung