

BBSR-
Online-Publikation
16/2025

Baugerechte Faserverbundsysteme für robotisch gewickelte leichte Dach- und Deckensysteme

von

Prof. Dr. Jan Knippers
Valentin Koslowski
Marta Gil Pérez
Prof. Achim Menges
Niccolò Dambrosio
Christoph Zechmeister
Prof. Dr. Markus Milwich
Dr. Simon Küppers
Pascal Mindermann

Baugerechte Faserverbundsysteme für robotisch gewickelte leichte Dach- und Deckensysteme

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wohnen, Stadtentwicklung
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-17.24

Projektlaufzeit: 07.2017 bis 10.2019

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Fachbetreuer

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 3 „Forschung und Innovation im Bauwesen“
Felix Lauffer
felix.lauffer@bbr.bund.de

Dr. Arnd Rose
arnd.rose@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

Universität Stuttgart
Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)
Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
j.knippers@itke.uni-stuttgart.de

Valentin Koslowski
Marta Gil Pérez

Universität Stuttgart
Institut für Computerbasiertes Entwerfen und Baufertigung (ICD)
Prof. Achim Menges
info@icd.uni-stuttgart.de

Niccolò Dambrosio
Christoph Zechmeister

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf (DITF)
Prof. Dr.-Ing. Markus Milwich
info@ditf.de

Dr.-Ing. Simon Küppers
Pascal Mindermann

Redaktion

Universität Stuttgart
Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)

Stand

Oktober 2019

Gestaltung

Universität Stuttgart
Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE)

Bildnachweis

Titelbild: © ICD/ITKE University of Stuttgart
Alle weiteren Foto- und Bildnachweise siehe Abbildungsverzeichnis, S. 3/4.

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Knippers, J.; Menges, A.; Milwich, M.; Koslowski, V.; Gil Pérez, M.; Dambrosio, N.; Zechmeister, C.; Küppers, S.; Mindermann, P., 2025: Baugerechte Faserverbundsysteme für robotisch gewickelte leichte Dach- und Deckensysteme. BBSR-Online-Publikation 16/2025, Bonn. <https://doi.org/10.58007/h78n-0111>

DOI 10.58007/h78n-0111

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Werkstoffuntersuchungen und Materialkombinationsanalyse	8
3	Weiterentwicklung des kernlosen Faserwickelverfahrens.....	19
4	Strukturanalyse und Bemessung	26
5	Machbarkeitsanalyse 400m ² Faserpavillon BUGA Heilbronn 2019	35
5.1	Geometrieentwicklung.....	35
5.2	Integrativer Entwurfsprozess/ Co-Design.....	37
5.3	Tragwerksentwicklung	39
5.4	Validierung der Entwicklungen	42
6	Zusammenfassung	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Elytra Pavillon Links Fertigung, Rechts: Struktur im Innenhof des Victoria and Albert Museums, London, 2016.....	6
Abbildung 2: Entwickelte Imprägniereinheit der Wickelmaschine	9
Abbildung 3: Handimprägnierung von einzelnen Rovingen.....	11
Abbildung 4: Zwei Carbonfaser-Rovinge in Keraguss eingebettet im Querschnitt, Fasern im Inneren der Rovinge sind trocken	12
Abbildung 5: REM-Aufnahmen Verbund aus K3 mit SGL Carbonfasern	13
Abbildung 6: REM-Aufnahmen des trockenen K1 bis K3 von oben nach unten	14
Abbildung 7:: Viskositätsmessungen der Mischung K1 bis K3 (Probe 1 bis 3) und zum Vergleich das Produkt Keraguss P42	15
Abbildung 8: Carbon-Roving mit K3 (links) und allein mit pyrogener Kieselsäure (und Wasserglas) imprägniert (rechts)	16
Abbildung 9: GewickeltesGewickeltes 3-Eck direkt nach der Fertigung (links) und sechs Monate später (rechts) ohne Klarlack, Lagerung bei üblichem Raumklima	16
Abbildung 10: Mit Klarlack beschichteter Prototyp sechs Monate nach Aushärtung, hier treten die weißen Ausscheidungen reduziert auf.....	17
Abbildung 11: Biegeversuch eines Bauteils aus faserverstärkter Keramik	17
Abbildung 12: Orientierende Brandversuche auf normalentflammbar B2 DIN 4102	18
Abbildung 13: Anpassung der vorhandenen Wickelmaschine.....	20
Abbildung 14: Versuche mit einer Imprägnierkammer mit Schaumdichtungen	21
Abbildung 15: Wickeln von rohförmigen Probekörper auf einer Wickelmaschine des Typen X-Winder 4X-23 und Auswahl einiger erstellter rohförmiger Probekörper	23
Abbildung 16: Gewickelte Platte mittels Stampf-Imprägnierung	24
Abbildung 17: Segmentierung der Kuppelgeometrie	35

Abbildung 18: Globale Segmentierung und Entwicklung der Bauteilgemeotrien ...	36
Abbildung 19: Das Kuppeltragwerk besteht auch 7 unterschiedlichen Bauteilen ..	37
Abbildung 20: Integrativer Planungsprozess.....	38
Abbildung 21: Berechnungsmodell des gesamten Bauwerks	39
Abbildung 22: Detailmodelle der einzelnen Bauteile	39
Abbildung 23: Verteilung von Glas- und Carbonfasern in der Bauteilauslegung	41
Abbildung 24: Aufteilung der einzelnen Lagen	41
Abbildung 25: Robotische Herstellungsanlage.....	43
Abbildung 26: Parameter zur Definition der Geometrie eines Bauteils	45
Abbildung 27: Detailaufnahme Bauteil BUGA-Faserpavillon 2019	45
Abbildung 28: Basierend auf den in diesem Projekt entwickelten wissenschaftlich- technischen, integrativen Co-Design Herangehensweisen wurde eine Machbarkeitsstudie als Grundlage für Planung und Bau des BUGA- Faserpavillon 2019 auf der Bundesgartenschau in Heilbronn erstellt, um die Forschungsergebnisse und Anwendungspotentiale von leichten, robotisch gewickelten Dach- und Deckentragssystemen aus Faserverbundwerkstoffen öffentlichkeitswirksam darzustellen.	47

1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe finden in vielen Branchen seit mehreren Jahrzehnten ein breites Anwendungsfeld. Das hohe Leichtbaupotential in Kombination mit guten Dauerhaftigkeitseigenschaften findet Anwendung unter anderem in modernen Flugzeugen, Bootsrümpfen, Rotorblättern von Windkraftanlagen, Chassis von serienproduzierten Autos und zahlreichen Sportgeräten. Die Automobilindustrie arbeitet gerade an hochautomatisierten Fertigungsketten. Es liegen in der Summe in Deutschland umfangreiche und mit hohem volkswirtschaftlichem Aufwand gewonnene Erfahrungen vor.

Im Bauwesen jedoch werden Faserverbunde trotz ihrer Leistungsfähigkeit nur in ganz wenigen Nischenbereichen verwendet. Meistens für nichttragende Bauteile. Die in Deutschland vorhandenen, umfangreichen Erfahrungen und Leichtbaupotential bleiben ungenutzt. Hierfür sehen die Bearbeiter des Forschungsprojektes folgende Gründe:

Faserverbundwerkstoffe erfüllen häufig nicht die hohen Anforderungen des Bauwesens an Brand- Temperatur- und Witterungsbeständigkeit.

Insbesondere Feuerwiderstandsdauern sind erdölbasierten Kunstharzen/ Matrixsystemen nicht machbar.

Es fehlt an Verarbeitungsverfahren, die auf die Anforderungen im Bauwesen angepasst sind und die entsprechende Robustheit während Verarbeitung und Nutzung ermöglichen sowie die Kosten- und ressourceneffiziente Herstellung von Kleinserien.

Die Bearbeiter des Projektes haben seit mehreren Jahren ein Verarbeitungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe, das kernlose Faserwickeln, für die Anforderungen des Bauwesens entwickelt. Das Ziel des Projektes ist es, den Werkstoffen durch dieses Verarbeitungsverfahren ein breites Anwendungspotential zu eröffnen.

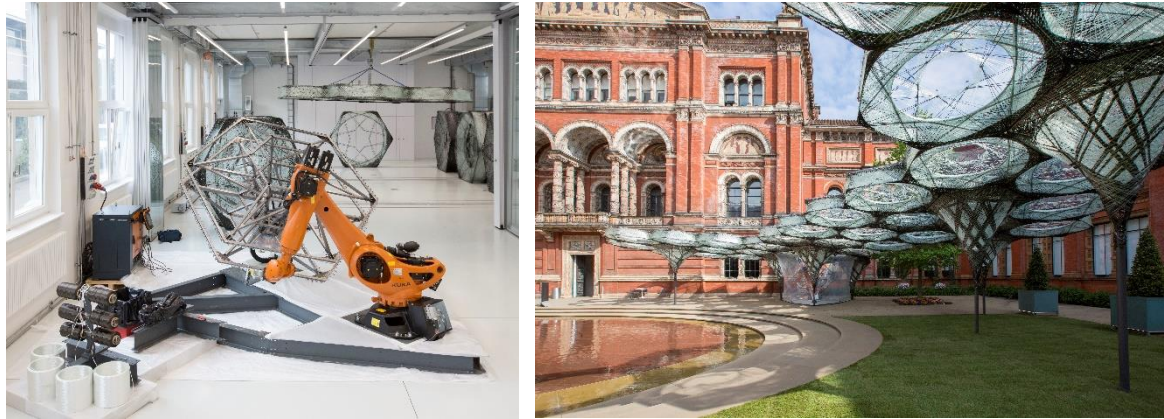


Abbildung 1: Elytra Pavillon Links Fertigung, Rechts: Struktur im Innenhof des Victoria and Albert Museums, London, 2016

Die Tauglichkeit der Verfahren wurde in zahlreichen Versuchsbauten und Demonstratoren ausgezeigt. Dazu gehören der 200 m² Elytra Filament Pavillon, den die Antragssteller 2016 für das Victoria and Albert Museum in London errichtet haben und die ICD/ITKE Forschungspavillons 2012, 2013-14, 2014-15 und 2017.

Für ein breites Anwendungspotential ist die Untersuchung folgender Entwicklungsschritte notwendig:

- Werkstoff -> siehe Kapitel 2 *Werkstoffuntersuchungen* und Materialkombinationsanalyse, Seite 8 ff.
 - Entwicklung eines keramischen Faserverbundwerkstoffes mit Feuerwiderstandsdauer mit Schwerpunkt auf die Faser-Matrix-Haftung
 - Witterungsstabilisierung von Kunststoff-Matrixsystemen
 - Untersuchung der Abminderung der mechanischen Eigenschaften durch Alterung und Bewitterung
 - Untersuchung von alternativen Faserverstärkungen
 - Untersuchung des Brandverhaltens

-
- Entwicklung und Untersuchung der Zeitstandfestigkeit von polymeren Matrixsystemen ohne die typischen FVK-Beschichtungsverfahren. Anwendungsszenarien

Die Materialentwicklungen werden so konzeptioniert, dass sie unabhängig vom kernlosen Wickelverfahren verwendet werden können.

- Verfahren und Konstruktion -> siehe Kapitel 3 *Weiterentwicklung des kernlosen Faserwickelverfahrens* und Kapitel 4 *Strukturanalyse und Bemessung*, Seite 19 ff. bzw. 26 ff.
 - Randbedingungen der Fertigungsmethodik für die Konstruktion/ Geometrie
 - Optimierung der lastpfadgerechten Faseranordnung
 - Entwurfsstrategien zur materialgerechten Lasteinleitung in die Bauteile
 - Statisch/ konstruktive Entwicklung eines standardisierten, hoch-effizienten Dach- und Deckentragwerks
- Demonstrator -> siehe Kapitel 5 *Machbarkeitsanalyse 400m² Faserpavillon BUGA Heilbronn 2019*, Seite 35
Öffentlichkeitswirksame Präsentation der Potentiale der Entwicklungen. Diese erfolgte vor allem mit dem Faserpavillon auf der Bundegartenschau 2019 in Heilbronn. Dieser überspannt 23m, ist 7 m hoch und ist von 17.04 bis 6.10.2019 auf der Bundegartenschau Heilbronn ausgestellt.

2 Werkstoffuntersuchungen und Materialkombinationsanalyse

Zur reproduzierbaren Herstellung der Prüfkörper aus faserverstärkten Materialien wurde eine Faser-Wickelmaschine entworfen, konstruiert und gebaut. Dabei werden Prüfkörper in Anlehnung an die „ISO 1268 Fibre-reinforced plastics - Methods of producing test plates“ hergestellt, damit die Ergebnisse vergleichbar sind. Als Verarbeitungsverfahren wird das Faser-Wickeln gewählt und damit Teil 5 der ISO 1268.

Anforderungen an die Wickelmaschine:

- Reproduzierbare Herstellung von Platten aus faserverstärkten Werkstoffen
- Aufbau der Wickelanlage, Geometrie der Wickelplatte und Faser-Winkel in Anlehnung an *ISO 1268-5: Fibre-reinforced plastics - Methods of producing test plates - Part 5: Filament winding*
- Imprägnierbad
 - Tauchbad mit balligen Rollern für Kunstharze
 - Tauchbad mit balligen Rollern für mineralische Matrixsystem
 - Kalanderroller zur Kontrolle des Faser-Volumengehalts und der Fadenspannung
- Automatisierte Steuerung mit Aufzeichnung des Wickelvorgangs und der einstellbaren Parameter der Anlage



Abbildung 2: Entwickelte Imprägniereinheit der Wickelmaschine

UV-Strahlung beeinträchtigt die optischen Eigenschaften (Vergilbung) und die mechanischen Kennwerte (Versprödung) organischer Harze. Bei Faserverbundbauteilen werden üblicherweise Beschichtungen (Top- oder Gelcoats) aufgebracht um die UV-Beständigkeit der organischen Matrixsysteme (meist Epoxid- oder Polyesterharze) zu gewährleisten. Diese Beschichtungen sind bei den von den Antragsstellern entwickelten, lastpfadgerechten, hocheffizienten, feinen Gitter-Wickelstrukturen nicht aufbringbar.

Daher sind hierfür UV-Absorber oder Inhibitoren in die Matrix einzubringen. Zusätzlich soll überprüft werden, ob UV-Schutzlackierungen mit dem von den Antragstellern entwickelten Herstellungsverfahren vereinbar sind.

Zur Entwicklung eines sortenrein trennbaren Faserverbundwerkstoffs mit Feuerwiderstandsdauer wird die typische Kunststoffmatrix durch eine keramische ersetzt.

Es werden die mechanischen Eigenschaften von carbonfaserverstärkter, wasserglasbasierter Keramik aus Steinmehlen, deren Hauptbestandteile Aluminium- und Siliziumoxide sind, evaluiert.

Methodik:

- Stufenweises Versuchsprogramm: mechanisch, physikalisch, Verarbeitbarkeit
- Schneller, einfacher Test vieler Materialkombinationen
- automatisierte Herstellung der gewickelten Prüfkörper nach ISO 1268-5
- Faser-Matrix Haftung: 4-Punkt-Biegeversuch nach DIN EN ISO 14125

Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Materialkombination der Wasser-glas-Keramik der Firma Keraguss mit Carbonfasern. Es wurde bestätigt, dass E-Glasfasern nicht beständig gegenüber dem PH-Milieu sind und daher AR-Glas zu verwenden ist. Es wurden von der Firma Keraguss drei Rezepturen, im Folgenden bezeichnet als K1, K2 und K3, zur Verfügung gestellt. Anhand der orientierenden Vorversuche, in Form von händischer Einzelroving-Imprägnierung, hat sich gezeigt, dass augenscheinlich K3 eine bessere Imprägnierung zusammen mit Carbonfasern mit Epoxid-Schlichte zeigt als K1, siehe Abbildung 3.

Hierfür untermauernde Messungen konnten aufgrund der nicht ausreichenden Imprägnierung und Reproduzierbarkeit jedoch so nicht durchgeführt werden. K2 weist eine zu geringe Topfzeit von nur wenigen Minuten auf und ist damit in einem Wickelprozess nicht ausreichend lange verarbeitbar.

Das von der Firma Keraguss in geringen Mengen zu Verfügung gestellte Material namens Alpha und Beta zeigte in den Einzelroving-Handimprägnier-Versuchen eine bessere Imprägnierung als das K1 bis K3, sei jedoch preislich undiskutabel teuer für die vorgesehene Anwendung. In den durchgeführten Impärgnierversuchen konnte kein merklicher Unterschied zwischen Alpha und Beta zusammen mit Carbonfasern mit Epoxid-Schlichte festgestellt werden.

Sowohl K1 als auch K3 bildet nach mehreren Tagen nach der Aushärtung eine weiße, pulverige Ausscheidung an der Oberfläche, vgl. Abbildung 9.

Bei den Einzelroving-Handimprägnier-Versuchen wurden die Rovinge mit der Hand breit gefächert auf einen harten Untergrund aufgelegt und mit Matrix übergossen sowie nachfolgend wurde die Matrix über ein bis zwei Minuten händisch einmassiert. Nach Anheben des Rovings wurde das überschüssige Matrix-Material zwischen zwei Fingern sanft abgestreift. Hierbei konnten durchweg bessere Imprägnierungen festgestellt werden als bei jeder getesteten klassischen Imprägnierweise, bei der der Roving unter Spannung gehalten wird. Dies ist auch in den typischerweise verwendeten Imprägnierbädern bei Wickelmaschinen der Fall.



Abbildung 3: Handimprägnierung von einzelnen Rovingen

Anhand von REM-Aufnahmen von K1 bis K3 in Pulverform als auch im Faserverbund, konnte zum einen gezeigt werden, wie die Partikel von Keraguss jeweils geformt sind und welche Größe sie haben, siehe Abbildung 6. So ist das REM-Bild von K1 bis K3 recht ähnlich. Jedoch weisen K2 und K3 größere Partikel auf, welche bei K1 in der REM-Aufnahme nicht so dominant vertreten sind. K2 sowie K3 scheinen scharfkantigere Partikel im Vergleich zu K1 aufzuweisen, siehe Abbildung 6.

Zudem konnte am Verbund gezeigt werden, dass der Roving eine Filterwirkung besitzt und die Matrix nicht tief genug in den Roving eindringen kann, siehe Abbildung 4. Bei einem nicht ausreichend flach ausgebreiteten Roving tritt diese Filterwirkung auf. Um eine gute Imprägnierung bis in den Kern des Rovings zu erzielen, muss daher der Roving durch das Verfahren entsprechen aufgeweitet werden. In einigen Bereichen der Proben konnte gezeigt werden, dass wenn eine Imprägnierung stattfindet, diese durchaus einen guten Verbund von Carbonfasern mit Keraguss erzeugen kann, siehe Abbildung 5.

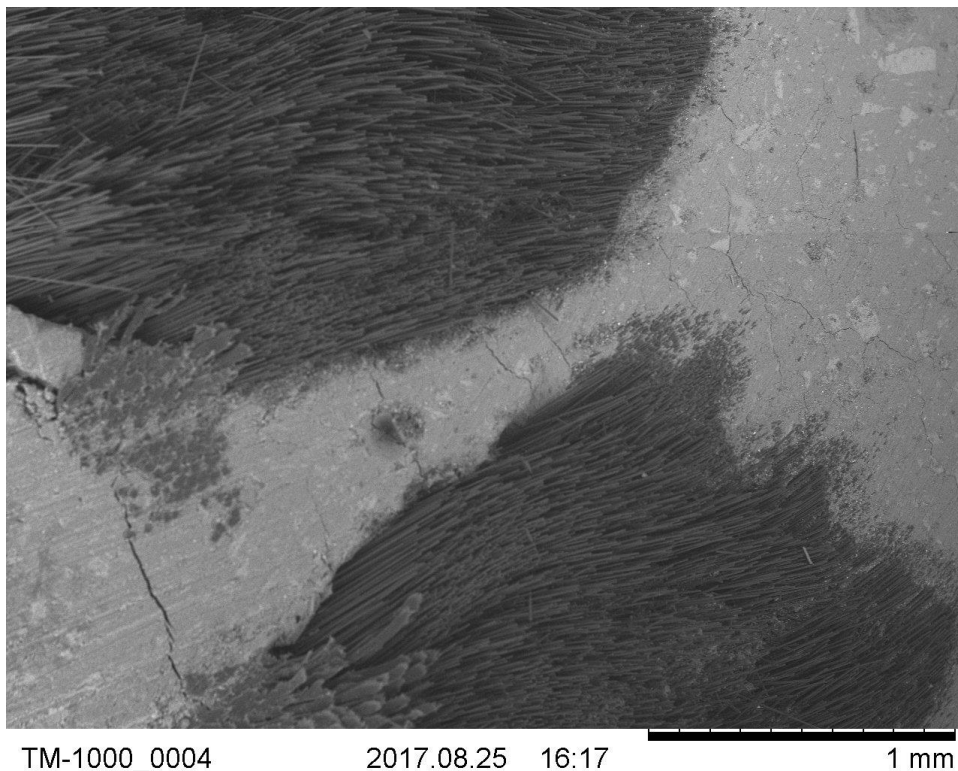


Abbildung 4: Zwei Carbonfaser-Rovinge in Keraguss eingebettet im Querschnitt, Fasern im Inneren der Rovinge sind trocken

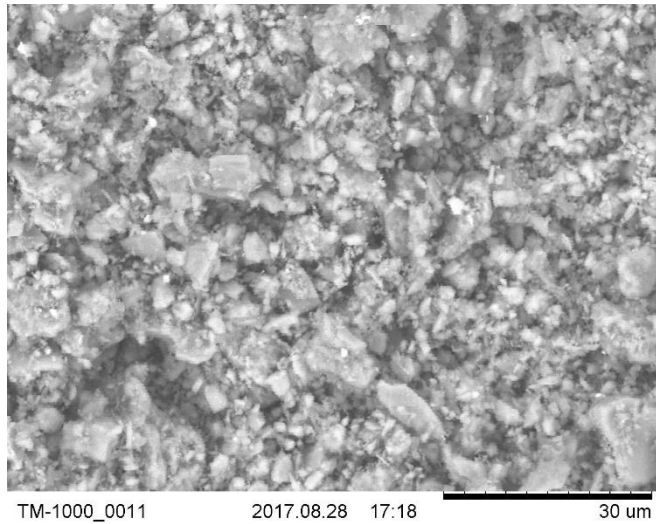


Abbildung 5: REM-Aufnahmen Verbund aus K3 mit SGL Carbonfasern

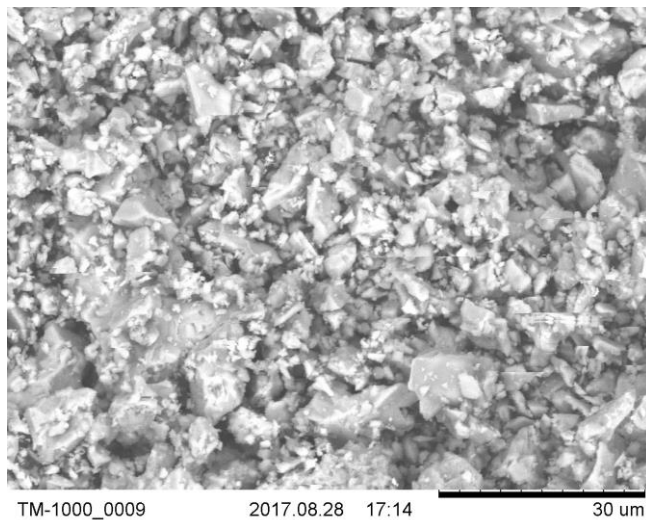
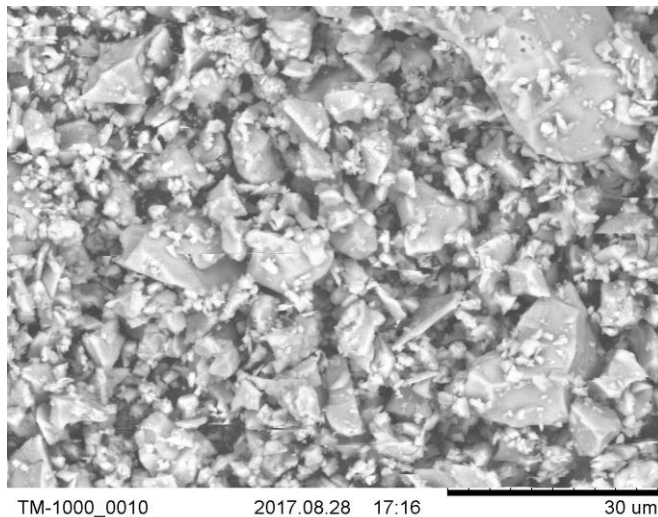


Abbildung 6: REM-Aufnahmen des trockenen K1 bis K3 von oben nach unten

Es wurden Viskositätsmessungen durchgeführt, um das Imprägnierverhalten besser zu verstehen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass die Viskosität aller Proben bei steigender Scherrate abnimmt. Bei Probe 2, also K2, wurde die Messung abgebrochen. Aus dieser Messung wurde abgeleitet, dass eine Imprägnierung der Rovinge bei hohen Scherraten einfacher zu bewerkstelligen sein sollte.

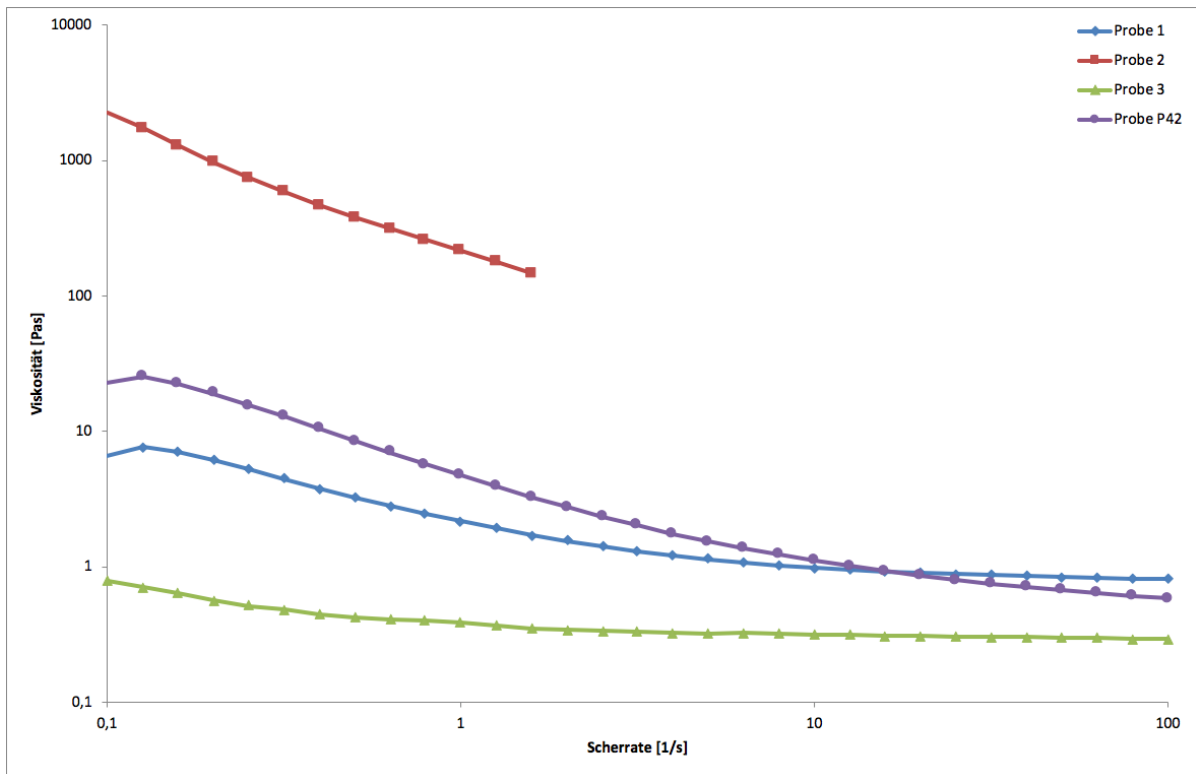


Abbildung 7:: Viskositätsmessungen der Mischung K1 bis K3 (Probe 1 bis 3) und zum Vergleich das Produkt Keraguss P42

Um eine bessere Imprägnierung der Rovinge zu erhalten, muss die Filterwirkung der Rovinge umgangen werden. Ein Ansatz hierzu war die Verringerung der statistischen mittleren Partikelgröße des Pulvers. Neben dem Mahlen des Pulvers ist ein weiterer Ansatz die Beimischung von kleineren Partikeln. Als hierzu geeignet wurde pyrogene Kieselsäure (Produkt Aerosil MOX 170 von Evonik) identifiziert.

Durch die Hinzugabe der pyrogenen Kieselsäure hat sich die Imprägnierung bis zum Kern des Rovings in Einzelroving-Handimprägnierungsversuchen verbessert. Es wurde anhand solcher Versuche ermittelt, dass 10% (Gewicht) Hinzugabe an pyrogener Kieselsäure auf die Gesamtmenge der Matrix eine Verbesserung der Imprägnierung herbeiführt, ohne dass wie bei einer Überdosierung eine schleimartige Konsistenz auftritt.



Abbildung 8: Carbon-Roving mit K3 (links) und allein mit pyrogener Kieselsäure (und Wasserglas) imprägniert (rechts)

Unter Zugabe von pyrogener Kieselsäure konnte händisch eine Platte und ein 3-Eck gewickelt werden.

Um die oben genannten, weißen Ausscheidungen der auf der Oberseite der Bauteile zu minimieren, wurde erfolgreich gezeigt, dass nach dem Abbinden der Matrix eine Lackierung mit einem Klarlack vermindern kann, dass sich die weißen Ausscheidungen bilden, vgl. Abbildung 9 und Abbildung 10.



Abbildung 9: Gewickelter 3-Eck direkt nach der Fertigung (links) und sechs Monate später (rechts) ohne Klarlack, Lagerung bei üblichem Raumklima



Abbildung 10: Mit Klarlack beschichteter Prototyp sechs Monate nach Aushärtung, hier treten die weißen Ausscheidungen reduziert auf



Abbildung 11: Biegeversuch eines Bauteils aus faserverstärkter Keramik

Untersuchung des Brandverhaltens

Es wurden orientierende Versuche nach DIN 4102 durchgeführt. Die Proben mit Epoxidharz erfüllen B2 (Normalentflammbar) nach DIN 4102 und damit die Mindestanforderungen, um im Bauwesen eingesetzt werden zu können.



Abbildung 12: Orientierende Brandversuche auf normalentflammbar B2 DIN 4102

3 Weiterentwicklung des kernlosen Faserwickelverfahrens

Im Rahmen des Projektes wurde insbesondere das Harzbad zum Tränken der Rovings mit Epoxidharz weiterentwickelt. Entwicklungsziel ist eine gleichmäßige Imprägnierung mehrerer paralleler Faserstränge mit einem möglichst einheitlichen Faser Volumen Gehalt in Verbindung mit einer gleichmäßigen Vorspannung aller Faserstränge.

Das verbesserte Harzbad wurde geplant, realisiert und in der Fertigung für den BUGA-Pavillon erprobt.

Auch die Steifigkeit und Geometrie des Führungsrohrs zur Faserablage am Kopf des Roboters wurde optimiert, neu entwickelt und erprobt.

Tränkkopfentwicklung zur automatisierten Herstellung der Prüfkörper und Prototypen

Zur automatisierten, robotischen Verarbeitbarkeit von faserverstärkter Keramik wurde die Entwicklung eines Tränkbades am Roboterkopf untersucht. Folgende Anforderungen ergeben sich dafür:

- Imprägnierung im Roboterkopf, gegen Ende des Faserpfades innerhalb des Kopfes
- Keine Einschränkungen in der Ausrichtung des Roboterkopfes
- Kompakter und leichter Roboterkopf
- Werkzeugmittelpunkt (TCP) soll möglichst starr sein
- Matrixmenge soll justierbar sein
- Roboter-Singularitäten sollen konstruktiv vermieden werden
- Einfache Reinigung durch Einwegteile soll gegeben sein

Die Vorversuche haben ergeben, dass die erforderliche Größe des Imprägnierbades nicht mit den Anforderungen an einen kompakten Wickelkopf vereinbar

sind. Eine Vielzahl an Umlenkungen innerhalb des Bades würden durch die unlöslichen Partikel in der Matrix zu einer Beschädigung der Rovinge führen. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass so bald der Roving unter Spannung gehalten wird eine Imprägnierung deutlich schwieriger zu erzielen ist. Eine im Imprägnierbad den Roving zusammendrückende bzw. massierende Mechanik ist ebenfalls nicht mit den Anforderungen an den Wickelkopf zu vereinbaren. Daraufhin wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

Zu Beginn wurde der Kopf der vorhandenen Wickelmaschine modifiziert, um eine sich bewegende Tränkung im Kopf zu simulieren. Dazu wurde ein Harzbad in die Chargierung der Maschine integriert.



Abbildung 13: Anpassung der vorhandenen Wickelmaschine

Da ein offenes Imprägnierbad, wie sich beim Einbau in die Wickelmaschine gezeigt hat, unter Bewegung signifikant Matrixmaterial verliert, wurde eine Form für eine Imprägnierkammer gesucht, welche dies verhindert. Deshalb wurde eine Imprägnierung innerhalb eines Schlauchs getestet, welcher wie ein Omega angeordnet wurde. Hierbei war die Reibung zwischen Roving und Schlauchinnenwand zu hoch und keine Imprägnierung im Kern des Rovings vorhanden. Durch die besondere Anordnung des Schlauches wurden die Ausrichtungs- und Bewegungsfreiheitsgrade des Roboterkopfes nur geringfügig eingeschränkt.

Es wurde untersucht, wie sich die Imprägnierung verhält bei einer geschlossenen Imprägnierkammer mit beidseitigen Schaumdichtungen. Eine solche Im-

prägnierkammer zeigt keine Einschränkungen der Freiheitsgrade des Roboterkopfes auf. Hierbei konnte unter Verwendung von K3 keine gute Imprägnierung bis in den Kern festgestellt werden.



Abbildung 14: Versuche mit einer Imprägnierkammer mit Schaumdichtungen

Zu Beginn wurden Versuche unternommen die mineralische Matrix innerhalb einer Spritze zu imprägnieren und dann zu wickeln. Hierbei wurde der Roving am Ansatz der Spritze mit Dauer des Versuches beschädigt, bis sich der Ansatz vollständig verstopfte.

Ausgehend von den Viskositätsmessungen wurden Versuche unternommen durch Vibrationen des Imprägnierbades verschiedener Wellenlängen und Amplituden (Ultraschallanregung, exzentrische Rotation) die Imprägnierung zu verbessern. Es zeigte keine erkennbare Verbesserung.

Als Alternative zu den Wickelplatten wurde versucht in einer Gussform ein Roving mehrfach umgelenkt zu spannen, um ein UD-Gelege zu erhalten und den übrigen Raum mit Keraguss zu füllen. Hierbei konnten keine zufriedenstellenden Probekörper hergestellt werden, da die Faserverstärkung nicht ausreichend ausgerichtet und vorgespannt und zudem die Matrix nicht einmassiert werden konnte.

Ebenfalls als Alternative zu den Wickelplatten wurden auf einem X-Winder 4X-23 Röhrchen mit einem Innendurchmesser von 1cm gewickelt. Hierbei konnte ebenfalls keine gute Durchtränkung der Rovinge erzielt werden. Jedoch war es

möglich aufgrund der relativ hohen Matrix-Überschusses eine in sich stabilen Probekörper herzustellen. Es wurde erkannt, dass die zeitlich kontinuierliche Verteilung des Anpressdrucks bei einem rotationssymmetrischen Körper hilft, die Rovinge bei der Ablage zu durchtränken. Für alle getesteten Matrix-Materialien (K1 und K3, mit und ohne pyrogene Kieselsäure) konnte gezeigt werden, dass die Imprägnierung schlechter durchzuführen ist, wenn ein dickerer Roving verwendet wird. Es gibt einen signifikanten Abfall der Imprägnierung bei einem 50K Roving zu einem 12K Roving. Dies liegt offenbar an der gleichbleibenden Eindringtiefe der Matrix beim selben Imprägnierverfahren. Es konnten jedoch keine Unterschiede zwischen den verschiedenen Materialien festgestellt werden.



Abbildung 15: Wickeln von rohformigen Probekörper auf einer Wickelmaschine des Typen X-Winder 4X-23 und Auswahl einiger erstellter rohformiger Probekörper

Die besten Imprägniererergebnisse wurden mit einem Stampf-Imprägnierbad erreicht und mit einer händischen Faserpositionierung unter der Hinzugabe von 10 Gew.-% pyrogener Kieselsäure. Bei der Imprägnierung in einem Stampfbad werden die Fasern in eine Vorratskammer gefüllt mit Matrixmaterial geführt und dort verbleiben sie ohne Spannung für wenige Minuten. Sobald ausreichend Fasern im Stampfbad vorhanden sind kann mit der gleichen Geschwindigkeit Fasermaterial entnommen wie hinzugegeben werden. Die Verweildauer im Bad bestimmt dessen Volumen. Da die Rovinge keine Spannung im Bad aufweisen

liegen sie ungeordnet vor. Daher führt eine Vergrößerung des Volumens zu Problemen aufgrund der Interaktion des Rovings mit anderen Rovingen oder mit sich selbst. Dies limitiert die Größe eines solchen Bades. Während sich die Rovinge im Bad befinden wird die Matrix in die Rovinge gepresst durch eine gleichmäßige Bewegung eines Stempels, welcher über den Rovingen auf und ab bewegt wird.



Abbildung 16: Gewickelte Platte mittels Stampf-Imprägnierung

Roboterpfadprogrammierung zur lastpfadgerechten Ablage der Faserverstärkung

Die robotische Filamentwickeltechnik basiert auf bekannten industriellen Filamentwickelverfahren mit dem zusätzlichen Vorteil der robotergestützten Produktionsautomatisierung - Geschwindigkeit, Präzision, Wiederholgenauigkeit. Dieser Ansatz stellt eine effiziente und kostengünstige Alternative zum Kernwickeln und Handverlegen von Fasern dar. Unter Beibehaltung der Anpassungsfähigkeit dieser Prozesse wird sie durch die Fähigkeit verbessert, die Faserorientierung und -menge an die strukturellen und ästhetischen Anforderungen anzupassen.

Die Simulation der Fertigung spielte eine wesentliche Rolle im Prozess des Design-for-Fabrication. Es liefert wertvolle Erkenntnisse über die Prozessstabilität, so dass frühzeitig fertigungsrelevante Konstruktions- und Strukturentscheidungen getroffen werden können. Es wurde eine Simulationsumgebung entwickelt, die die Eigenschaften der physikalischen Vorfertigungsplattform genau beschreibt. Die CAD-kompatiblen Simulations- und Bewegungsplanungstools ermöglichten schnelle Fertigungsiterationen. Die in einer parametrischen Umgebung implementierten und mit der Design- und Physiksimulation verbundenen Fertigungssimulationswerkzeuge ermöglichten eine robuste Vorbereitung vor der eigentlichen Wicklung und waren für eine deutliche Effizienzsteigerung im gesamten Fertigungsprozess verantwortlich.

4 Strukturanalyse und Bemessung

Strukturmechanische Betrachtung des Wickellaminats unter genormten Dach- und Deckenbelastungen, Versagensfälle und -kriterien, standardisierte Konstruktion von Verbindungs- und Lasteinleitungsbereichen, Erzeugungsregeln von kraftflussgerechten Wickelsequenzen

Materialkonstanten für das unidirektionale Laminat

Für die Berechnung des E-Moduls und G-Moduls eines unidirektionalen Laminats ergeben sich

$$E_{V\parallel} = \phi E_{F\parallel} + (1 - \phi) E_H$$

$$E_{V\perp} = \frac{E_{F\perp} E_H}{\phi E_H + (1 - \phi) E_{F\perp}}$$

$$G_{\parallel\perp} = \frac{G_F G_H}{\phi G_H + (1 - \phi) G_F}$$

mit dem Faservolumengehalt ϕ , dem Elastizitätsmodul E und dem Schubmodul G sowie den Indies E_V für den Verbund, E_F für die Fasern, E_H für das Harz und $E_{\parallel}$ für „in Faserrichtung“ sowie für $E_{\perp}$ „quer zur Faserrichtung“. Die Angaben für das E-Modul quer zur Faserrichtung und für das Schubmodul können nur als erste Abschätzung genutzt werden. Für die Berechnung im vorliegenden Fall ist die Betrachtungsrichtung in Faserrichtung hauptsächlich interessant.

Berechnung der Festigkeiten eines unidirektionalen Laminats

Für eine Aussage über die Festigkeit des Laminats muss die Belastungsrichtung in Relation zum Faseraufbau betrachtet werden, da es mehrere Versagensmechanismen gibt. Man unterscheidet ein Versagen der Fasern von dem Versagen der Matrix. Letzteres tritt bei Schubbelastungen, Zug- sowie Druckbelastungen quer zur Faserorientierung auf. Für die Berechnung im vorliegenden Fall geht man von einer reinen Zuglast in Faserrichtung aus. Somit sind die Fasern der

wirksame Teil des Versagensmechanismus. Bei Druck knicken die Fasern seitlich aus. Wenn man die Interaktionen zwischen den verschiedenen Versagensmoden ausschließt, kann man die Festigkeit im technischen Spannungs-Dehnungs-Diagramm an der Stelle des Maximalwertes identifizieren.

Querkontraktionszahlen

Für die Querkontraktionszahl ν ergibt sich der formale Zusammenhang

$$\nu_{\parallel\perp} = \phi \nu_F + (1 - \phi)\nu_H$$

welcher im Vergleich zu Messergebnissen verlässliche Aussagen liefert.

Wärmeausdehnungskoeffizienten

Der Wärmeausdehnungskoeffizient von Faserverbundstrukturen kann über die Materialauswahl sowie den Lagenaufbau bei flächigen Laminaten in einem gewissen Bereich eingestellt werden. Carbon besitzt in Faserrichtung einen geringen negativen Wärmeausdehnungskoeffizient, was Komponenten im Verbund eine hohe Maßstabilität ermöglicht. Quer zur Faserrichtung liegt er im positiven Bereich und kann je nach Faser-Typ Werte von denen wie Stahl oder Aluminium erreichen. Zudem besitzen Carbonfasern eine geringe Wärmeleitfähigkeit.

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten für Glasfasern liegen im positiven Bereich und sind um eine Größenordnung höher als bei Carbon in Längsrichtung. Der Unterschied zur Querrichtung ist in den Werten nicht so drastisch wie bei den Carbonfasern. Je nach Faserausrichtung liegen die Koeffizienten beim Glas in Bereichen wie auch bei Stahl.

Das Harz, als Kunststoff, hat üblicherweise eine mittlere Wärmeausdehnung zwischen Carbon- und Glasfasern. Generell ist somit bei einer Konstruktion, welche signifikanten Temperaturschwankungen ausgesetzt ist zu zeigen, dass durch die Materialschrumpungen bzw. -ausdehnungen keine Versagensmechanismen ausgelöst werden. Bei Wickellaminaten muss die Faserinteraktion sowie

die Einbringung von metallischen Anschlüssen berücksichtigt werden. Im vorliegenden Fall jedoch sind die Längenänderung des CFK-Wickellaminates bei den zu erwartenden Temperaturwechseln (max. Betriebstemperatur +80°C, Aufbau­temperatur +15°C, min. Betriebstemperatur +5°C) strukturell vernachlässigbar klein. Im vorliegenden Fall, einer unidirektionalen Schicht, wird die Wärmeausdehnung in Längsrichtung durch das Materialverhalten der Carbonfasern dominiert.

Selbst im Holzbau werden Temperaturänderungseffekte strukturell vernachlässigt, obwohl hier die Wärmeausdehnungskoeffizienten typischerweise deutlich größer sind als die des CFK-Verbundes.

Einbauteile im Faserverbundlaminat

Die vorliegenden Wickellamine werden hergestellt, indem die nassen Fasern um Hülen gewickelt werden. Diese somit eingewickelten Hülen aus einer mittelfesten Aluminiumlegierungen mit der Materialnummer EN-AW 6082 (AlSi1MgMn) verbleiben zu Krafteinleitungszwecken in der Komponente.

Die Hülen sind ein Rundrohr mit Außendurchmesser 15mm, Innendurchmesser 12mm und einer Länge von 40mm.

Es gibt keine weiteren Einbauteile, die zum Lastabtrag des Faserverbundwerkstoffes beitragen.

Semiprobabilistisches Sicherheits- und Nachweiskonzept

Nach Eurocode 0:

- DIN EN 1990:12-2010 (Normenausschuss Bauwesen)
- DIN EN 1990/NA:12-2010
- DIN EN 1990/NA/A1:08-2012

Teilsicherheitskonzept:

-
- γ_F Teilsicherheitsbeiwert vergrößert die Einwirkungen E_d (Eigengewicht, Wind, Temperaturänderungen etc.)
 - γ_M Teilsicherheitsbeiwert verringert die Widerstände R_d (Festigkeit, Steifigkeit, etc.)
 - $E_d < R_d$

Grenzzustände:

- Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)
 γ_F -fache, erhöhte Einwirkungen
- Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)
reduziertes Einwirkungsniveau

Einwirkungen:

- Ständige Lasten (Eigengewicht der Bauteile, Ausbaulasten, Vorspannung der Membrane und der Rand- und Kehlseile, etc.)
- Veränderliche Lasten (Wind, Temperaturänderung)

Nachweiskonzept im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) für Faserverbundwerkstoffe

Da die verwendeten Werkstoffe im Rahmen vorhandener Regelwerke nicht bewertet werden können, ist eine vorhabenbezogene Bauartgenehmigung erforderlich. Das ausgewählte Bemessungskonzept stützt sich auf die Betrachtung von Grenzzuständen. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit oder der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Letzter richtet sich nach definierten Bedingungen, welche durch die Nutzung festgelegt werden. Der Grenzzustand der Tragfähigkeit hingegen ist durch das Gefährdungspotential eines Versagens des Tragwerkes bestimmt. Im Weiteren werden nur Betrachtungen des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (GZT) durchgeführt, da die Funktion des Gebäudes alleinig die Tragfähigkeit ist und keine weiteren einschränkenden Bedingungen durch die Nutzung zustande kommen.

Vergleich internationaler Nachweiskonzepte im GZT für FVK im Bauwesen

In diesem Kapitel werden internationale Richtlinien zur Bemessung von Faserverbundwerkstoffen im Bauwesen verglichen. Diese Richtlinien finden seit vielen Jahren Anwendung in der Baupraxis.

BÜV Tragende Kunststoffbauteile 2014

Das Bemessungskonzept stützt sich auf die Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit (GZT). Grundlegend muss für eine positive Bewertung der Tragfähigkeit der akkumulierte Bemessungswert der einwirkenden Lasten geringer sein als der akkumulierte Bemessungswert des Widerstandes. Dieser errechnet sich durch die Verringerung des Widerstands des Tragwerkes R_k , welcher anhand von charakterlichen Eigenschaften berechnet wird, mit Abminderungsfaktoren. Diese Faktoren beziehen Umgebungseinflüsse (A_1 bis A_3) und Fertigungseinflüsse (γ_M) mit ein.

DIN 18820-1991 Laminate aus textilglasverstärkten ungesättigten Polyester- und Phenacrylatharzen für tragende Bauteile, Teil 1 bis 4 (Normenausschuss Bauwesen - zurückgezogen)

Die DIN 18820 ist nicht für den vorliegenden Fall anwendbar, da es sich hier nicht um glasfaserverstärkte ungesättigte Polyester- oder Phenacrylatharz-Verbunde handelt, welche als Tragwerk eingesetzt werden. Sie wird hier trotzdem aufgeführt, um zu verdeutlichen, dass auch hier ein Bemessungskonzept vorgeschlagen wird, welches sehr ähnlich zu den anderen aufgeführten Konzepten ist.

Report EUR 27666 EN Prospect for new Guidance in the design of FRP 2016

Auch hier wird der charakteristische Wert des Tragwerkes X_k entsprechend mehrerer Einflussfaktoren η und einem Sicherheitsfaktor γ_M abgemindert, um zu einem Auslegungswert X_d für die Berechnung zu erhalten.

$$X_d = \eta_c \cdot \frac{X_k}{\gamma_M},$$
$$\eta_c = \eta_{ct} \cdot \eta_{cm} \cdot \eta_{cv} \cdot \eta_{cf},$$

- η_{ct} is the conversion factor for temperature effects;
- η_{cm} is the conversion factor for humidity effects;
- η_{cv} is the conversion factor for creep effects;
- η_{cf} is the conversion factor for fatigue effects.

Abbildung 11: Berechnungsvorschrift des abgeminderten Auslegungswertes, entnommen aus Report EUR 27666 EN 2016, Kapitel 2.3.2 und 2.3.6

DIN EN 13121 Teil 3 - Oberirdische GFK-Tanks und -Behälter

Ebenfalls in der DIN EN 13121 findet sich eine ähnliche und inhaltlich identische Beschreibung zur Ermittlung des Grenzzustandes bei Versagen eines Faserverbundmaterials.

Die Bemessung unter Verwendung von $(A_5 \gamma)$ – fache Lasten (Grenzzustand des Versagens) muss folgender Gleichung entsprechen:

$$A_5 \cdot E_i \cdot \gamma_{F,i} \leq \frac{R_k}{\gamma_M \cdot A_1 \cdot A_2 \cdot A_3 \cdot A_4} \quad (29)$$

Dabei ist

- E_i die Auswirkung der Last;
 R_k die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffs (Laminates)

Abbildung 12: Berechnungsvorschrift zur Verrechnung der Abminderungsfaktoren, entnommen aus DIN EN 13121-3:2016-10, Kapitel 9.3.2

ACMA Guidelines and Recommended Practices for Fiber-Reinforced-Polymer (FRP) Architectural Products 2016

Durch die ACMA-Richtlinien wird die Berechnung der Faserverbundkomponenten um mehrere Lastfälle und deren Kombination vermindert. Die Einflussfaktoren sind ähnlich zu den bereits vorgestellten Bemessungskonzepten. Teilweise können die aufgeführten Lasten, wie seismische oder Schneelasten, in dem vorliegenden Fall vernachlässigt werden.

Load Calculations

- a. Dead Load – Include the weight of every relevant component and attachment.
- b. Live Load – As specified by the local building code or authority having jurisdiction.
- c. Wind Load – As specified by the local building code or authority having jurisdiction.
- d. Seismic Load – As specified by the local building code or authority having jurisdiction.
- e. Temperature Load – As specified by the local building code or authority having jurisdiction.
- f. Other applicable loads described in the governing code.

Load Distribution

- a. Forces will be in reference to gravity load.
- b. Seismic forces will be considered oriented in the horizontal directions.

Abbildung 13: Aufführung von Einflüssen, welche die Tragfähigkeit negativ belasten, entnommen aus ACMA-Guidelines and Recommended Practices for Fiber-Reinforced-Polymer (FRP) Architectural Products 2016, Kapitel 5.2

Vergleich der Nachweiskonzepte

Der Vergleich der international verwendeten Richtlinien zeigt, dass die Konzepte große Ähnlichkeiten aufweisen. Die Nachweisstruktur und die dabei verfolgten Prinzipien stimmen international überein.

Ausgewähltes Nachweiskonzept nach BÜV 2014

Das Nachweiskonzept für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) in Orientierung an die BÜV 2014 durchgeführt, da es die Abminderungsfaktoren und die Teilsicherheitsbeiwerte zum einen eindeutig und stringent darstellt und zu anderen eine gängige Richtlinie im deutschsprachigen Raum für die Bemessung von Faserverbundwerkstoffen ist. Wie der Vergleich im vorherigen Kapitel zeigt, unterscheidet sich dieses Verfahren nicht maßgeblich von den anderen. Es wird der GZT betrachtet, da das Gebäude tragfähig sein muss und ansonsten keine weiteren Anforderungen an das Tragwerk gestellt werden.

Ermittlung der Abminderungsfaktoren A1, A2 und A3

A1 Einwirkungsdauer

Für die unidirektionalen Bereiche des Laminats wird ein äquivalentes Wickellaminat parallel zur Faserrichtung verwendet. Die BÜV 2014 bezieht sich zwar auf die Anwendung von glasfaserverstärkten Laminaten, jedoch wird davon ausgegangen, dass die zeitliche Degradation bei Carbon schwächer abläuft und somit die BÜV 2014 angewendet werden kann.

Anhand der DIN 18820-1991 Teil 2, Seite 2 wird der Faseraufbau „FMU“ für die BÜV 2014 Tabelle B-1a gewählt, welcher dem vorliegenden unidirektionalen Wickellaminataufbau am nächsten kommt. Wirrfasern mit der Kennzeichnung „M“ sowie Fasern in Umfangsrichtung der Kennzeichnung „F“ können im vorliegenden Fall als Laminatdefekte interpretiert werden.

Anhand dieser Nomenklatur kann nun in der BÜV 2014 Tabelle B-1a der A_f^1 für die Standzeit in Jahren bestimmt werden. Dieser ist für ein Wickellaminat „FMU“ parallel zur Wickelrichtung mit $1,8 - \delta$ angegeben. Wobei im vorliegenden Fall, dass Fasermassenanteil δ konservativ mit 0,5 also 50% für den Wickelprozess angenommen wird.

Laut BÜV 2014, Seite 32 kann der Tabellenwert, welcher aus Tabelle 8-1 zu entnehmen wäre, auch berechnet werden über:

$$A^F_1(t_a) = (A_{1,20J.})^{0,253+0,142*\lg(t_a)}$$

A2 Medieneinfluss

Wird für die hier getätigten Untersuchungen als nicht relevant angesehen.

A3 Umgebungstemperatur

Das Tragwerk besteht aus Carbonfasern, Aluminiumhülsen und dem Kunstharz. Die Fasern und die Hülsen unterliegen keinem festigkeitsminderndem Temperatureinfluss im Bereich bis 80°C, das Harz jedoch schon.

Als Fassadentemperatur wird hierbei nach „DIN 18516-1 Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze“ 80°C angenommen.

5 Machbarkeitsanalyse 400m² Faserpavillon BUGA Heilbronn 2019

5.1 Geometrieentwicklung

Frühe Konzepte für den Entwurf konzentrierten sich auf eine weitspannende Kuppelstruktur, um nicht nur das Potenzial des untersuchten Gebäudesystems zu demonstrieren, sondern auch den Grundriss so frei wie möglich für die Ausstellung zu halten. Die ersten Designstudien konzentrierten sich auf die Segmentierung einer bestimmten Zieloberfläche, die die Hülle beschreibt. Eines der Ziele dieser ersten Phase war es, das Verhältnis der verschiedenen Komponententypen zur Gesamtzahl der Komponenten zu reduzieren. Zu diesem Zweck wurde eine regelmäßige sphärische Kappenzielfläche aufgrund ihrer radialen Symmetrie als die am besten geeignete Option angesehen: Die auf diese Fläche angewandte geodätische Unterteilungsmethode erzeugt als Ergebnis fünf identisch diskretisierte Sektoren (Abbildung 17). Dies ermöglichte eine deutliche Reduzierung des vorgenannten Verhältnisses und vereinfachte den Fertigungsaufbau drastisch, indem die Anzahl der verschiedenen erforderlichen Wickelrahmen reduziert wurde.

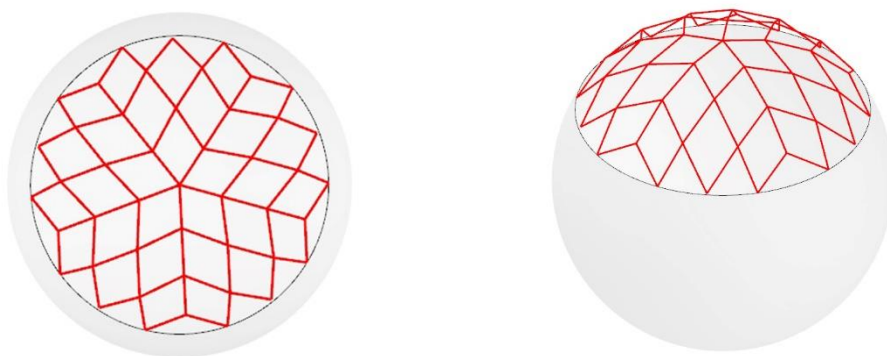


Abbildung 17: Segmentierung der Kuppelgeometrie

Mögliche Komponententypologien, die für die Segmentierungslogik geeignet sind, wurden in dieser Phase ebenfalls untersucht. Zwei Typologien wurden hauptsächlich betrachtet: plattenförmige Komponenten und rohrförmige Komponenten, die die Knotenpunkte derselben segmentierten Oberfläche verbinden. Bei gleicher Oberflächendiskretisierung führt die Wahl der plattenförmigen Komponenten zu einer geringeren Gesamtzahl von Elementen. Sie vergrößern jedoch auch ihre Abmessungen erheblich, so dass sie sowohl für den Transport als auch für die Fertigung ungeeignet sind, da sie den Arbeitsbereich des Roboterarms überschreiten würden. Bei Verwendung von Rohrbauteilen sind die Wickelstifte ausschließlich an den beiden Enden des Elements angeordnet und im Raum entlang von durch das Design definierten Grenzkurven angeordnet. Die Komplexität des Wickelrahmens und die Gesamtzahl der Anschlagpunkte werden dann reduziert, was zu einem effizienteren Herstellungsprozess für großflächige, robotergestützte, faserverstärkte Bauelemente mit einer neuartigen geometrischen Typologie führt. Die kombinierte Wahl der Kugelkappe als Zieloberfläche für das Gesamtdesign, die Diskretisierungsmethode und die Übernahme der Rohrtypologie für die Faserkomponenten führten letztendlich zu einer Kuppelstruktur von 23 m Länge und bis zu 7 m Höhe. Die resultierende Struktur bestand aus 60 Elementen, die jeweils aus 12 Komponententypen.

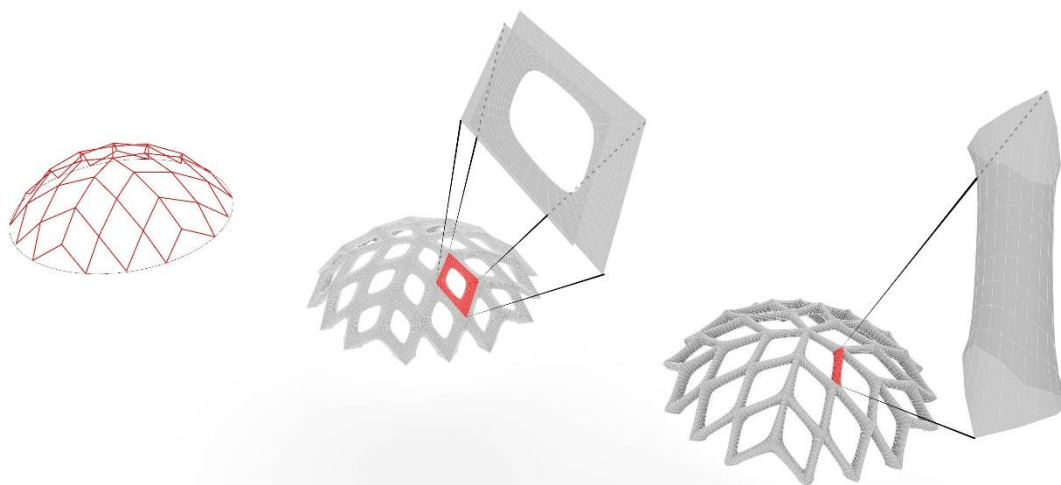


Abbildung 18: Globale Segmentierung und Entwicklung der Bauteilgeometrien

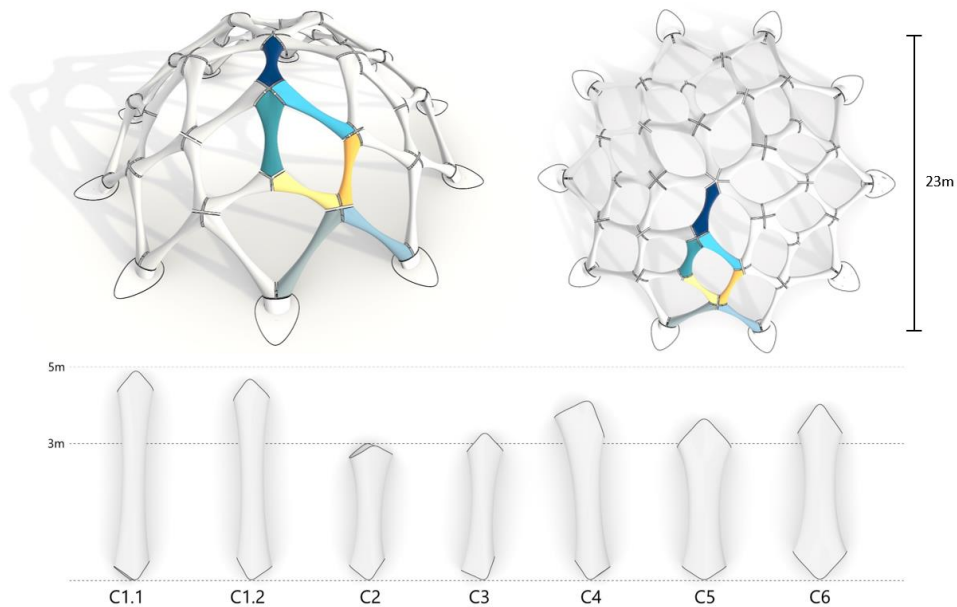


Abbildung 19: Das Kuppeltragwerk besteht aus 7 unterschiedlichen Bauteilen

5.2 Integrativer Entwurfsprozess/ Co-Design

Anstelle eines linearen Workflows wurden Design, Engineering und Fertigung des faserigen Systems in einem kollaborativen Designansatz nahtlos miteinander verbunden. Die Bauteilentwicklung, die Strukturanalyse und die Fertigungssimulation wurden digital in einem ständig aktualisierten Feedbackkreis durchgeführt. Die Faseranordnung, Dichte und Ausrichtung der einzelnen Komponenten wurden auf strenge strukturelle, architektonische und fertigungstechnische Anforderungen abgestimmt.

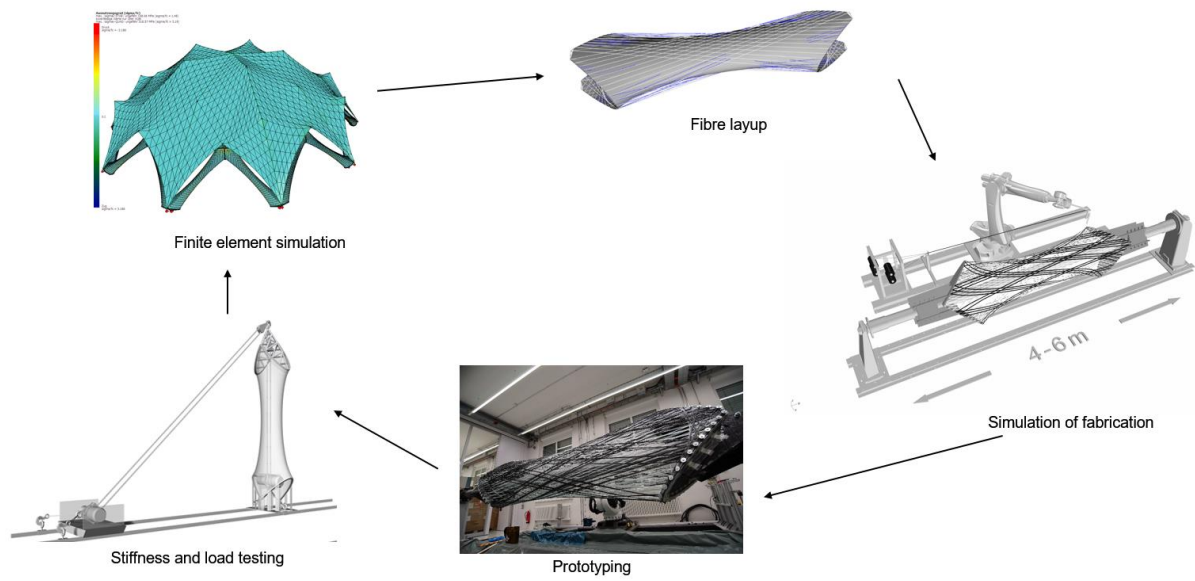


Abbildung 20: Integrativer Planungsprozess

5.3 Tragwerksentwicklung

Die Tragkonstruktion basiert auf einer Rostkonstruktion mit biegesteifen Verbindungen. Die Gesamtkonstruktion wurde mittels Schalenelemente modelliert. Dabei wird das Gitternetz aus Faserverbundelementen vereinfacht zu einem Schalentragwerk mit geschlossener Oberfläche.

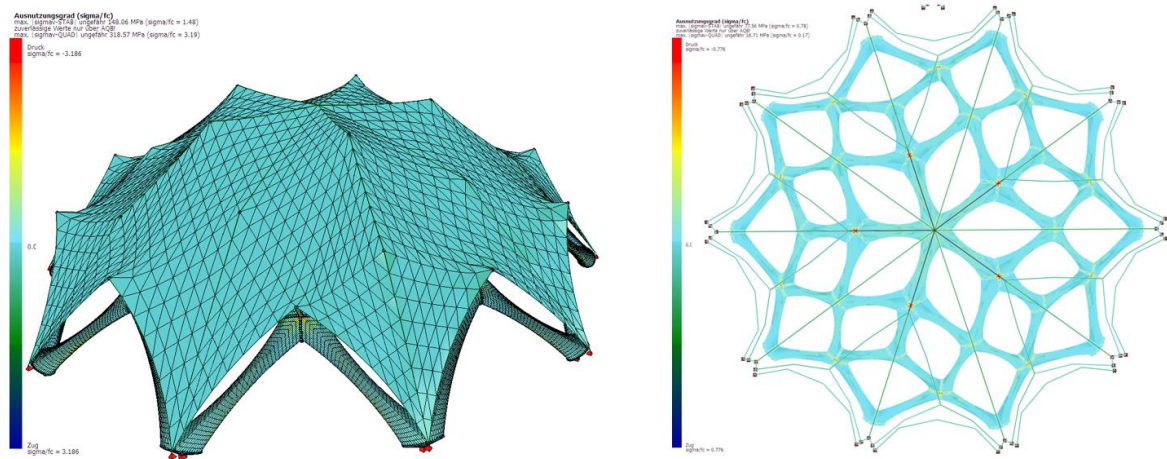


Abbildung 21: Berechnungsmodell des gesamten Bauwerks

Die einzelnen Bauteile wurden detailliert untersucht mit Balkenelementen.

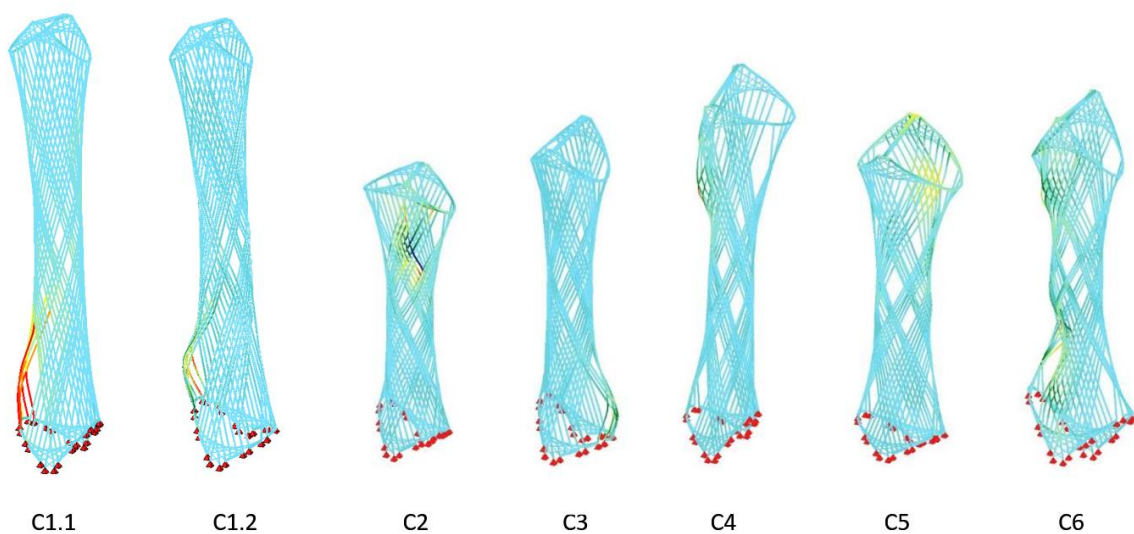


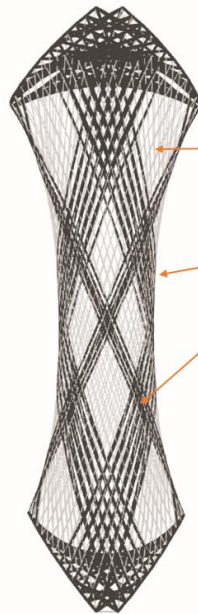
Abbildung 22: Detailmodelle der einzelnen Bauteile

Jede Komponente besteht aus mehreren gewundenen Syntaxcodes, die sich zu einem mehrschichtigen Fasersystem zusammensetzen, wobei jede Schicht so konzipiert ist, dass sie die spezifischen Anforderungen des Systems erfüllt. Während das Fasersystem das Grundkonzept der ersten Glas- und nachfolgenden Kohlefaserschichten mit bereits fertiggestellten Gebäudedemonstratoren teilt, stellt es einen wichtigen Sprung in mehrschichtige, maßgeschneiderte Faserkonfigurationen dar.

Der Glasfaseraufbau, der mit sechs gleichzeitig eingesetzten 2400 Textspulen realisiert wird, wird zuerst gewickelt und baut die globale Geometrie der Bauteile ohne Schalung auf. Zunächst platzierte Fasern bilden eine Gerüstlage, bilden spezifische Oberflächen zur Abstützung der nachfolgenden Fasern und verhindern, dass sie die Mittelachse des Produktionsaufbaus berühren. Um die gewünschte Dichte zu erreichen, wird ein separater Glasfaserkörper darauf gewickelt. Auf die Gerüstlage drücken und zu einer Fläche verdichten. So definiert der Glasfaserkörper die Komponenten antiklastische Oberfläche.

Während das Hauptanliegen des Glasfaseraufbaus darin besteht, die Form des Bauteils zu bestimmen, liefern die Kohlefasern den größten Teil ihrer strukturellen Leistungsfähigkeit. Die Strukturanalyse liefert eine direkte Rückkopplung auf den Kohlefaseraufbau und dient als Generator für die Konstruktion, der kritische Bereiche des Bauteils strategisch verstärkt, um Lasten abzuführen und lokalen Knicken unter Druck und Biegung standzuhalten. Insgesamt besteht die Kohlefaserauflage aus acht gestapelten Schichten, von denen jede aus sechs 50k-Rovings besteht, die zu Strukturbündeln mit einer Höhe von 20mm zusammengewickelt sind. Diese Anordnung variiert je nach Bauteilgeometrie und -lage leicht, um sich bei Bedarf an unterschiedliche Belastungsbedingungen anzupassen.

Material differentiation



1. Shape defining glass fibre body

2. Carbon fibre reinforcement

Kennwerte (in Faserrichtung)	Spezifikation	Zugfestigkeit [10 ³ /mm ²]	E-Modul [10 ³ /mm ²]	Bruchdehnung [%]	Dichte [g/cm ³]	Wärmeausdehnungskoeffizient [10 ⁻⁶ /K]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Faserdurchmesser [μm]
Anorganische Fasern								
Glasfaser	E	3,4–3,5	72–77	3,3–4,8	2,52–2,60	5,00	1	9–24
	R/S	4,4–4,6	75–88	4,1–5,4	2,50–2,53	4,00	1	9–24
	AR	2,7	21–74	2,0–4,3	2,68–2,70		1	9–24
Kohlenstofffaser	HT	3–5	200–250	1,2–1,4	1,75–1,80	-1,00	17	7–9
	IM	4–5	250–350	1,1–1,9	1,73–1,80	-1,20		7–9
	HM	2–4	350–450	0,4–0,8	1,79–1,91	-1,30	115	7–9

Atlas für Kunststoffe + Membranen, Seite 51, Knippers, J.; Cremers, J.; Gabler, M.; Lienhard, J.;
DETAIL Institut für international Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG München, 2010

Abbildung 23: Verteilung von Glas- und Carbonfasern in der Bauteilauslegung

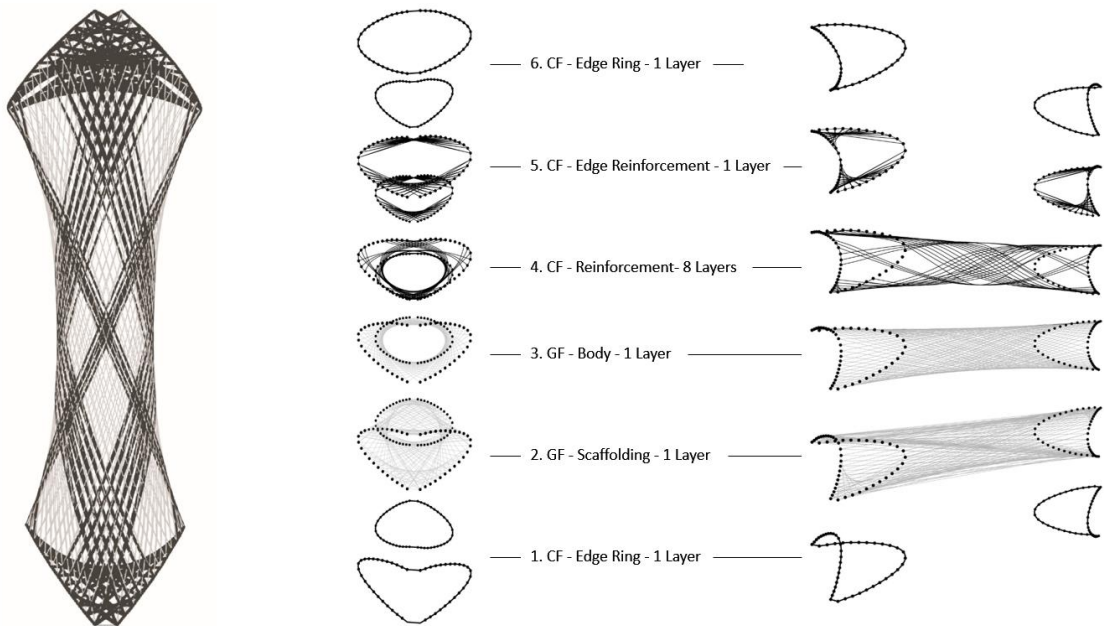


Abbildung 24: Aufteilung der einzelnen Lagen

5.4 Validierung der Entwicklungen

Ein siebenachsiger robotergestützter Fertigungsaufbau mit einem sechssachsigen Industrieroboter und einem externen einachsigen horizontalen Positionierer erleichterte den Fertigungsprozess des 1:1-Prototypen. Das externe kinematische System bestand aus einer aktiv gesteuerten externen Achse, die mit einem Gegenlager über ein Stahlrohr gekoppelt war. Das Stahlelement enthielt eine Befestigungsschnittstelle zur Befestigung des mehrteiligen, wiederverwendbaren Wickelrahmens.

Der serienmäßige sechssachsige Industrieroboterarm wurde mit Spulen-, Imprägnier- und Spannungssteuergeräten ausgestattet. Ein Gatter, das bis zu sechs 8 kg schwere Spulen aus Kohlefaser aufnehmen kann, und ein trommelartiges Harzbad mit einem Tänzermechanismus zur Regelung der Zugkraft im System wurden an der Drehsäule des Roboterarms montiert. Indem die Fasern immer der Bewegung der Maschine folgen konnten, verkürzte diese Anordnung den Abstand, den das imprägnierte Material vom Ausgang des Harzbades bis zur Abscheidedüse zurücklegen musste, erheblich, wodurch das mögliche Risiko einer Beschädigung während der Fahrt minimiert und somit die Qualität des Endprodukts erhöht wurde.



Abbildung 25: Robotische Herstellungsanlage.

Im Vergleich zu konventionelleren GFK-Fertigungsverfahren ersetzt diese Fertigungstechnik Formen durch lineare Elemente, die mit Wickelstiften (oder Ankerpunkten) ausgestattet sind. Die Fasern sind mit den Stiften verbunden, und die strukturell aktive Bauteiloberfläche entsteht aus dem Zusammenspiel von frei gespannten Fasern und deren anschließender gegenseitiger Verformung, wenn der Roboterarm sie schrittweise in das System einbringt. In diesem selbstkalibrierenden System werden die durch den Wickelrahmen definierten Grenzen von großer Bedeutung, da sie den einzigen nahezu unveränderlichen Zustand während des sequenzbedingten Herstellungsprozesses darstellen. Sie haben in ihrer geometrischen Konfiguration die Parameter kodiert, die den Umriss der Komponenten definieren und die es ihnen ermöglichen, sich korrekt in die globale Struktur einzufügen.

Fünf Parameter werden verwendet, um eine Komponente zu definieren:

- **α :** Dihedralwinkel zwischen den Ebenen, die die Profilkurven enthalten. Sie hängt ausschließlich von der Anzahl der Komponenten ab, die in einem Knoten zusammenlaufen. Es kann nur drei Werte annehmen: 72° , 90° und 120° .
- **β :** Winkel, gemessen auf der horizontalen Ebene, zwischen einer der Ebenen, die eine der Profilkurven enthält, und der Mittelachse des Bauteils.
- **γ :** Winkel zwischen der Linie, die durch den Schnittpunkt der beiden Ebenen mit den Profilkurven und der Mittelachse des Bauteils entsteht.
- **L:** Länge der Mittelachse des Bauteils.
- **Grenzkurven:** Ihre Geometrie wird durch das Design definiert. Im Pavillon werden zwei verschiedene Profilkurven verwendet. Eine definiert den Umriss der unteren Komponenten und eine zweite (verlängerte Version der ersten) für die Komponenten zur Oberseite der Kuppel.

Die kontinuierliche Verformung der abgeschiedenen Fasern während des kernlosen Wickelprozesses bestimmt die endgültige Form, Materialanordnung und Oberflächendichte des Bauteils.

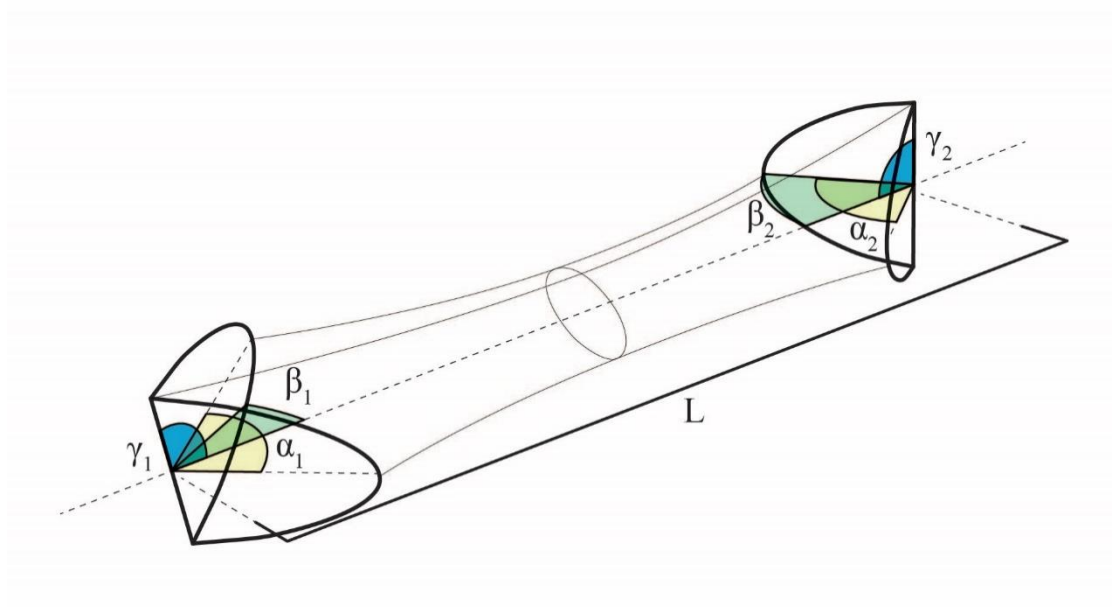


Abbildung 26: Parameter zur Definition der Geometrie eines Bauteils

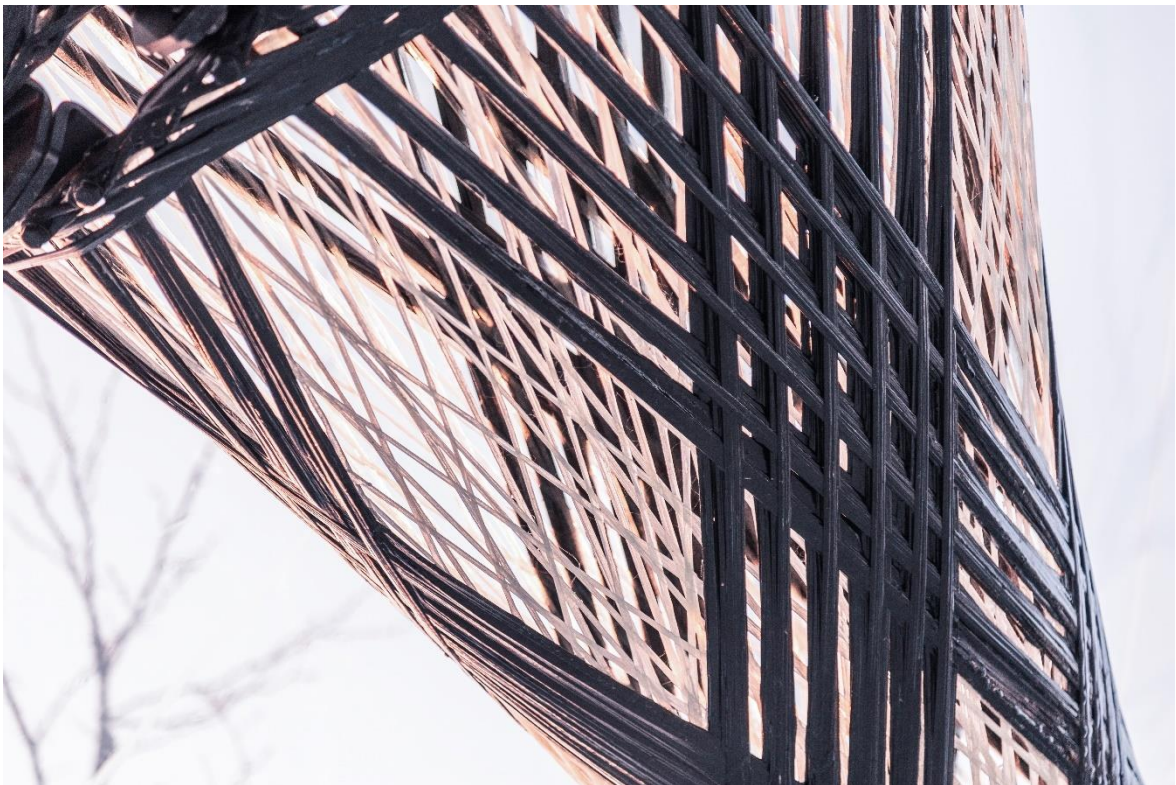


Abbildung 27: Detailaufnahme Bauteil BUGA-Faserpavillon 2019

6 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Verwendung von mineralischen Matrixsystemen anstelle von Kunststoffmatrixsystemen für faserverstärkte Tragkonstruktionen zeigen ein großes Anwendungspotential auf. Die grundsätzliche Machbarkeit wurde im Kleinmaßstäblichen aufgezeigt.

Das kernlose Faserwickelfahren wurde um einen automatisierten Tränkkopf erweitert und verbessert, damit großformatige Bauteile mit gleichbleibenden Eigenschaften hergestellt werden können.

Die grundlegenden Zusammenhänge zur Berechnung und Bemessung für großformatige Faserverbundbauteile wurden zusammengestellt und den speziellen Anforderungen angepasst.

Die integrative Co-Design Herangehensweise ermöglicht die Berücksichtigung zahlreicher Randbedingungen und Parameter die aus wissenschaftliche-technischen und ästhetischen Betrachtungen.

Die Machbarkeitsanalyse des 400 m² großen, ca. 23 m weit spannenden Faserpavillons für die Bundesgartenschau zeigt die Potentiale der untersuchten, integrierten Planungs-, Berechnungs- und Herstellverfahren insbesondere für mineralische Matrixsysteme auf. Basierend auf diese Machbarkeitsanalyse konnte der BUGA-Faserpavillon geplant und gebaut werden, um die Ergebnisse der Forschung einer breiten Öffentlichkeit demonstrieren zu können. Damit soll das Anwendungspotential von Faserverbundwerkstoffen für leichte Dach- und Deckentragwerke öffentlichkeitswirksam aufgezeigt werden.



Abbildung 28: Basierend auf den in diesem Projekt entwickelten wissenschaftlich-technischen, integrativen Co-Design Herangehensweisen wurde eine Machbarkeitsstudie als Grundlage für Planung und Bau des BUGA-Faserpavillon 2019 auf der Bundesgartenschau in Heilbronn erstellt, um die Forschungsergebnisse und Anwendungspotentiale von leichten, robotisch gewickelten Dach- und Deckentragsystemen aus Faserverbundwerkstoffen öffentlichkeitswirksam darzustellen.