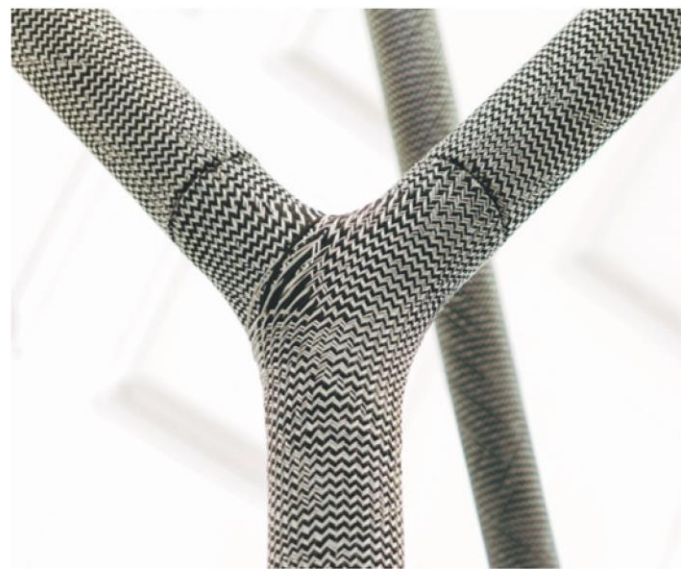
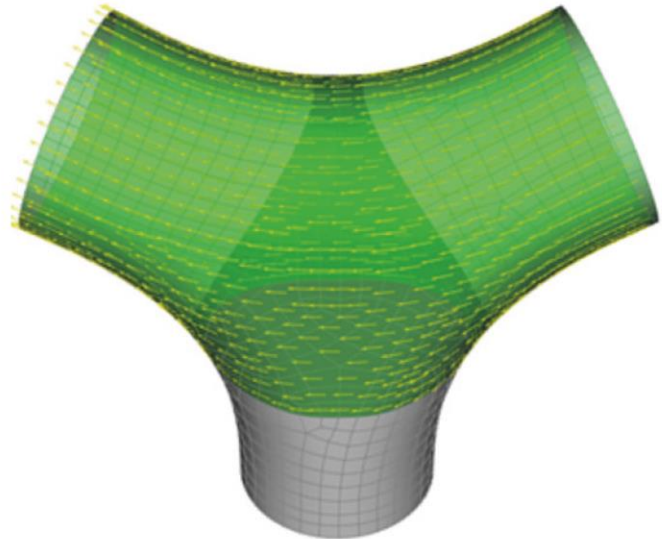




Forschungsberichte

itke

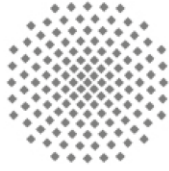
45



Florian A. Jonas

Knoten für Tragkonstruktionen
aus betongefülltem
Faser-Kunststoff-Verbund,
inspiriert von der Biomechanik
pflanzlicher Verzweigungen

Sondierung einer neuen Bauweise für
Tragknoten aus geflochtenem Textil und Beton



Forschungsberichte

itke

aus dem Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen,
Universität Stuttgart

Herausgeber:
Professor Dr.-Ing. Jan Knippers

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen:
Forschungsbericht 45

Florian A. Jonas:

Knoten für Tragkonstruktionen aus betongefülltem
Faser-Kunststoff-Verbund, inspiriert von der Biomechanik
pflanzlicher Verzweigungen: Sondierung einer neuen Bauweise
für Tragknoten aus geflochtenem Textil und Beton

Stuttgart, August 2020

ISBN 978-3-922302-45-2

D 93

© Institut für Tragkonstruktionen
und Konstruktives Entwerfen
Universität Stuttgart
Keplerstraße 11
D-70174 Stuttgart



Alle Rechte, insbesondere der Übersetzung, bleiben vorbehalten.
Vervielfältigung jeglicher Art, auch auszugsweise, ist nicht gestattet.

Knoten für Tragkonstruktionen
aus betongefülltem Faser-Kunststoff-Verbund, inspiriert von
der Biomechanik pflanzlicher Verzweigungen

Sondierung einer neuen Bauweise für Tragknoten aus geflochtenem
Textil und Beton

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Florian A. Jonas
aus Neuweid

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Tag der mündlichen Prüfung: 3. Juli 2020

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der
Universität Stuttgart, 2020

Dank

Diese Arbeit entstand während der Jahre als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart.

Mein sehr besonderer Dank gilt meinem Betreuer und Leiter des Instituts Herrn Professor Dr.-Ing. Jan Knippers, der es mir ermöglichte, Teil eines brillanten Teams zu werden und in einem interdisziplinären Forschungsprojekt mitwirken zu können. Seine fortwährende Unterstützung, dem steten Angebot zur Diskussion, seine profunde Expertise und seine Zuversicht in meine Forschungen wertschätze ich sehr. Insbesondere das von ihm entgegengebrachte Vertrauen und die Möglichkeit zur freien, selbstständigen und eigenverantwortlichen Arbeitsweise war für mich eine prägende Bereicherung und hat mich umso mehr motiviert, vielen verschiedenen Forschungsfragen nachzugehen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht, Leiter des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart, für sein Interesse und die Begutachtung.

Ermöglicht wurde das Entstehen dieser Arbeit durch die Mitarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures“, der aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) finanziert wurde. Für die hervorragende Zusammenarbeit danke ich den Beteiligten der kooperierenden Institute von der PBG der Universität Freiburg Herrn Professor Dr. Thomas Speck, Dr. Tom Masselter, Dr. Katharina Bunk sowie vom ITFT der Universität Stuttgart Herrn Professor Dr.-Ing. Götz T. Gresser, Prof. Dr.-Ing. Markus Milwich sowie Frau Larissa Born und Claudia Möhl.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Leitern und Mitarbeitern der Materialprüfungsanstalt Stuttgart, der Öffentlichen Baustoffprüfstelle der Hochschule für Technik Stuttgart sowie den Fakultätswerkstätten der Fakultät für Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart für die kollegiale Zusammenarbeit und die Unterstützung bei den Belastungsversuchen.

Des Weiteren danke ich insbesondere meinen Kollegen Herrn Nikolas Früh, Dr.-Ing. Alexander Hub, Axel Körner, Valentin Koslowski und Daniel Sonntag für ihr Interesse und die konstruktiven Diskussionen zu meiner Arbeit sowie allen Unterstützenden am Institut. Mit Freude über die enthusiastische Mitarbeit und die Forschungsneugierde bedanke ich mich für die studentischen Beiträge zur Erforschung der Biomechanik bei Jule Gruber, Jens Winter und Lei Zhang, für die Mitarbeit bei Belastungsversuchen und Probenvorbereitungen bei Akram Al Assadi, Aaron Miller, Shubham Soni und Johannes Zehrer, zur Automatisierung des Herstellungsprozesses bei Samantha Melnyk, Fabian Kappenberg und Hans-Jakob Wagner, außerdem zur Zeichnungserstellung bei Julia Gospodinova, Malte Didrigkeit, Alexandre Mballa-Ekobena und Karmin Shin.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden für ihre Motivation und ihren Zuspruch.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Knotens für verzweigte Tragkonstruktionen aus betonverfüllten Faserverbundwerkstoffen in der Architektur und im Bauwesen. Basierend auf der Analyse der Funktionsprinzipien pflanzlicher Verzweigungen wird ein biegesteifes Bauteil mit hohen Beanspruchbarkeiten und großer geometrischer Gestaltungsfreiheit entwickelt.

Biologisches Vorbild sind ausgewählte pflanzliche Verzweigungen der Araliengewächse, die hinsichtlich ihrer Effizienz des Lastabtrags untersucht werden. Um transversal isotrope Materialien in der strukturmechanischen Simulation berücksichtigen zu können, wird eine Methode zur Ermittlung der Faserorientierungsinformation aus Mikro-Computertomografie-Daten erarbeitet. Das Konzept der Bauteilentwicklung beruht auf den vorgefundenen Prinzipien, wie dem Einsatz faserartiger Strukturen und deren lastangepasster Anordnung.

Der verzweigte Tragknoten besteht aus einem Kern aus Beton und einer Hülle aus Faser-Kunststoff-Verbund (FKV). Um einen kontinuierlichen Verlauf der Carbonfasern über den Verzweigungsbereich des Bauteils und eine lastpfadangepasste Ablage zu ermöglichen, wird das Flechtverfahren zur Verarbeitung der textilen Verstärkung gewählt.

Die FKV-Hülle nimmt Druckkräfte und Zugkräfte resultierend aus Momenteneinwirkung auf. Zusätzlich steigert sie die Drucktragfähigkeit des Betons durch Umschnürungswirkung, indem sie dessen Dehnung behindert und einen mehraxialen Spannungszustand hervorruft.

Belastungsversuche der Bauteile und deren numerisch-mechanische Analyse zeigen das Tragverhalten der neuen, hybriden Tragknoten und demonstrieren deren Funktionsfähigkeit sowie das Anwendungspotential für verzweigte Konstruktionen.

Abstract

This thesis describes the development of a joint for branched building structures made of concrete-filled fibre-reinforced composites in architecture and construction. Based on the analysis of plant branching's functional principles, a rigid structural element with a high load-bearing capacity and large geometric freedom of design is developed.

The biological role models are selected plant branchings of the Araliaceae family, which are investigated concerning the efficiency of their structural performance. To consider transversal isotropic materials in the structural-mechanical simulation, a method to determine the fibre orientation information from micro-computed tomography data is implemented. The concept of the structural component development rests upon the discovered principles like the usage of fibrous structures and their load-adapted arrangement.

The branched load-bearing joint consists of a concrete core and a fibre-reinforced plastic (FRP) hull. To enable a continuous course of carbon fibres over the branching area of the component and a load-adapted arrangement, the braiding method is chosen to process the textile reinforcement.

The FRP hull transfers compressive and tensile forces resulting from bending action. Furthermore, it enhances the compressive strength of the concrete through the confinement by the formation of a multi-axial stress state.

Load tests of the components and their numerical analysis validate the load-bearing behaviour of the novel hybrid joints and demonstrate their operativeness and the application potential for branched constructions.

Inhalt

Formelzeichen	VIII
Begriffsdefinition	X
1. Einführung	1
1.1. Motivation	2
1.2. Ziel der Untersuchung	2
1.3. Methodik	3
2. Hintergrund	5
2.1. Biologie	5
2.1.1. Funktionsprinzipien, Biomechanik, Hydraulik..	5
2.1.2. Funktionelles Design	6
2.1.3. Hydraulik	7
2.1.4. Vorspannung durch Wachstum	8
2.1.5. Weitere biologische Prinzipien	8
2.1.6. Biomechanische Analyse von Verzweigungen...	9
2.2. Technik	10
2.2.1. Konventionelle Knotenkonstruktionen	10
2.2.2. FKV-Material im Bauwesen	11
2.3. Verzweigungen	12
2.3.1. Fokussierung auf Verzweigungen	12
2.3.2. Verzweigungen bei Pflanzen	13
2.3.3. Verzweigungen im Bauwesen	16
2.4. Bau-Bionik	16
3. Strukturmechanische Untersuchung verzweigter biologischer Vorbilder	19
3.1. Ziel der biomechanischen Untersuchungen	19
3.2. Stand der Forschung und Hintergrund	20
3.3. Methodenentwicklung und Anwendung	23
3.3.1. Parametrisiertes Stabwerkmodell	24
3.3.2. Numerisch-mechanische Analyse	25
3.4. Ergebnisse für Schefflera arboricola	35
3.4.1. Ergebnisse des Parametermodells	35
3.4.2. Ergebnisse der numerisch-mechanischen Analyse	41
4. Gegenüberstellung von verzweigten Pflanzen und Stützen	47
5. Entwurf von verzweigten Tragstrukturen	53
5.1. Funktion	53
5.2. Form	55
5.2.1. Globale Struktur – Verzweigte Stützen	55
5.2.2. Begriffe zur verzweigten Stütze	56
5.2.3. Formfindung	57
5.2.4. Einfluss der Stabwinkelstellung	61
5.3. Konstruktion	63
5.3.1. Fasern	63
5.3.2. Matrix	66
5.3.3. FKV – Faser-Kunststoff-Verbund	67
5.3.4. Textile Verfahren für verzweigte Hüllen	69
5.3.5. Herstellung von FKV-Beton-Tragknoten	77
6. Untersuchung an FKV-umschnürten Betonzylindern	81
6.1. Ziel und Versuchsprogramm	81
6.2. Stand der Forschung	82
6.2.1. Beton unter mehraxialer Belastung	82

6.2.2. Tragfähigkeitssteigerung durch Umschnürungswirkung	84
6.3. Auslegung von FKV-umschnürten Betonzylindern ...	90
6.4. Beton-GF-EP-Wickelrohre: Vorversuche	92
6.5. Beton-CF-EP-Geflechtröhre (biaxial) und Wickelrohre: Druckversuche	94
6.5.1. Herstellung der Probekörper	95
6.5.2. Versuchsaufbau Ringzugprüfung der CF-EP-Umschnürungen („split disc test“)	97
6.5.3. Ergebnisse der Materialprüfungen FKV	99
6.5.4. Versuchsaufbau Druckprüfung	102
6.5.5. Ergebnisse der Druckversuche	102
6.6. Beton-CF-GF-EP-Geflechtröhre (triaxial): Druck-, Biegeversuche	105
6.6.1. Herstellung	105
6.6.2. Versuchsaufbau Flachprobenprüfung	108
6.6.3. Versuchsaufbau „split disc test“	108
6.6.4. Ergebnisse der Materialprüfung FKV	108
6.6.5. Versuchsanordnung der Druck- und Biegeversuche	113
6.6.6. Ergebnisse der Druck- und Biegeversuche	113
6.7. Beton-CF-EP-Geflechtröhre: Verbundversuche	119
6.7.1. Versuchsziel	119
6.7.2. Versuchsaufbau	119
6.7.3. Auslegung der Probekörper	119
6.7.4. Herstellung der Probekörper	120
6.7.5. Prüfung	120
6.7.6. Ergebnisse	121
6.7.7. Einordnung der Ergebnisse	122
6.8. Gegenüberstellung mit analytischen Ergebnissen ...	123
6.9. Gegenüberstellung mit numerisch-mechanischen Ergebnissen	125
6.9.1. Simulation des Tragverhaltens	125
6.9.2. Materialmodelle im Elementtest	128
6.9.3. Numerisch-mechanische Berechnung	131
6.10. Zusammenfassung	133
7. Untersuchung an betongefüllten CF-EP-Tragknoten	135
7.1. Ziel und Ausgangslage	135
7.2. Experimentelle Untersuchung an Hybrid-Knoten ...	135
7.2.1. Herstellung	137
7.2.2. Eigenschaften des Festbetons	138
7.2.3. Ergebnisse der FKV-Materialprüfung	138
7.2.4. Versuchsaufbau der Belastungsversuche	139
7.2.5. Ergebnisse der Belastungsversuche	140
7.3. Numerisch-mechanische Untersuchung an Hybrid-Tragknoten	147
7.4. Zusammenfassung	150
8. Entwicklungsmöglichkeiten, Anwendungspotential	151
8.1. Mehrschenkligige FKV-Beton-Tragknoten	151
8.2. Zukünftige Entwicklungen und Ausblick	152
9. Zusammenfassung	154
Verzeichnisse	158
Literatur	158
Abbildungen	172
Tabellen	179
Curriculum Vitae	181

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben:

A	Fläche
b	Breite
d	Durchmesser
d_{FK}	Durchmesser, Flecht kern
d_s	Durchmesser, Stahlscheibe
E	Elastizitätsmodul
E_c	Elastizitätsmodul des Betons
$E_{c,dyn}$	Elastizitätsmodul des Betons, dynamisch ermittelt
$E_{c,S}$	Elastizitätsmodul des Betons, Sekantenmodul
$E_{fkv,y}$	Elastizitätsmodul Faser-Kunststoff-Verbund, in y-Richtung
F	Kraft
f_c	Betondruckfestigkeit, einaxial
f_{cc}	Betondruckfestigkeit des umschnürten Betons
f_{ccu}	Betondruckspannung des umschnürten Betons beim Bruch
f_{cten}	Betonzugfestigkeit (hier: ten, t: s. tangential)
G_{xy}	Schubmodul
g_A	Flächengewicht
g_c	Dissipierte Energie pro Einheitsfläche
g_F	Fadenlängengewicht
h	Höhe
h_K	Höhe des Kerns
I	Flächenträgheitsmoment
K	Umfangssteifigkeit
l_F	Fadenlänge
M	Biegemoment
m	Masse
N	Normalkraft
N_k	Knicklast
n	Anzahl
p_r	Pressung in radialer Richtung
R_c	Einaxiale Druckfestigkeit ($=f_c$)
R_t	Einaxiale Zugfestigkeit ($=f_{cten}$)
R_b	Biaxiale Druckfestigkeit
r	Radius
s_k	Knicklänge
s	Standardabweichung (Stichproben), $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$
TVP	Theoretischer Verzweigungspunkt
t	Wanddicke
U_K	Kernumfang
u_U	Umgreifung des Stamms
V	Volumen
w	Verformung
\bar{x}	Mittelwert, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$
z	Teilungszahl

Griechische Buchstaben:

α	Winkel
α_f	Faserwinkel
α_F	Flechtwinkel
α_T	Temperatúrausdehnungskoeffizient
δ_t	Zug-Dilatanz
δ_c	Druck-Dilatanz
ε	Dehnung
ε_{c0}	Betondehnung bei f_c
ε_{cc}	Betondehnung bei f_{cc}
ε_{ccu}	Betondehnung bei f_{ccu}
$\varepsilon_{fkv,u,y}$	Dehnung, Faser-Kunststoff-Verbund, Bruch in y-Richtung
$\varepsilon_{f,u}$	Bruchdehnung Faser

η	Viskosedämpfungsparameter
κ_{Vs}	Krümmung verholzter Stränge
κ_{cm}	Plastische Dehnung bei uniaxialer Druckfestigkeit
κ_{cr}	Effektive plastische Grenzdehnung bei Druck
κ_{tr}	Plastische Zugdehngrenze
μ	Reibbeiwert
ν	Variationskoeffizient, $\nu = \frac{s}{\bar{x}}$
ν_c	Querdehnzahl des Betons
ν_{xy}	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
σ	Spannung
σ_c	Spannung im Beton
$\sigma_{fkv,y}$	Spannung im Faser-Kunststoff-Verbund, in y-Richtung
τ_{max}	Maximale Schubspannung
φ_f	Faservolumengehalt
ψ	Dilatanzwinkel
Ω_{ci}	Spannung beim Start der nichtlinearen Verfestigung
Ω_{cr}	Verbleibende relative Druckspannung
Ω_{tr}	Verbleibende relative Zugspannung

Indices:

Material und Erzeugnis:

$_{.c}$	Beton (concrete)
$_{.F}$	Faden
$_{.f}$	Faser (fibre)
$_{.fkv}$	Faser-Kunststoff-Verbund
$_{.m}$	Matrix (matrix)

Art:

$_{.c}$	umschnürt (confined) in Kombination mit Beton
$_{.u}$	höchstwertig (ultimate)

Richtung:

$_{.a}$	axial
$_{.r}$	radial
$_{.t}$	tangential
$_{.x}$	x-Richtung
$_{.y}$	y-Richtung
$_{.z}$	z-Richtung
$_{.ll}$	parallel
$_{.H}$	horizontal
$_{.V}$	vertikal

Art der Beanspruchung:

$_{.com}$	Compression
$_{.ten}$	Tension

Weitere:

$_{.c}$	Nachfolger (Child)
$_{.p}$	Vorgänger (Parent)

Einheiten:

tex	Feinheit eines Fadens 1 tex = 1 g / (1000 m)
24 k	Faden mit 24 000 Einzelfilamenten (k $\hat{=}$ kilo $\hat{=}$ tausend)

Tensoren werden fettgedruckt. Zusätzliche Formelzeichen mit lokaler Relevanz werden im Text benannt.

Begriffsdefinition

Ein Tragknoten ist ein tragendes Knotenbauteil einer verzweigten Konstruktion. Dieser Begriff grenzt das entwickelte Bauteil sprachlich ab und hebt dessen primäre Funktion hervor.

1. Einführung

Verzweigte Tragstrukturen sind sowohl in der Natur als auch in der Technik ein dominantes Prinzip. Sie prägt ein starker Form-Funktionszusammenhang. Ihr Tragkonzept zeichnet sich durch eine hohe Tragwerkseffizienz aus – eine hohe Leistungsfähigkeit bei geringem Materialeinsatz. Dadurch wecken sie in beiden Gebieten intensive Forschungsbestrebungen.

Die Zusammenhänge zwischen Lastabtrag, äußerer Gestalt und innerer faserartiger Struktur ausgewählter pflanzlicher Verzweigungen sind nicht nur im Hinblick eines tiefergehenden biomechanischen Verständnisses interessant. Vielmehr kann das Erarbeiten von Funktionsprinzipien, insbesondere bezogen auf die Tragfähigkeit und Strategie, Ideengeber und Inspiration für neue technische Bauteilentwicklungen sein.

Voraussetzung ist eine gründliche Erarbeitung der Funktionsprinzipien pflanzlicher Verzweigungen, damit ein Transfer auf technische Konstruktionen möglich ist. Dieser Übertrag ist ein vordringliches Merkmal der Wissenschaftsdisziplin der Bionik. Die Untersuchungen biologischer Vorbilder können Ergebnisse liefern, die auch unter einem anderen Aspekt bedeutsam sind: Durch kontraintuitive Lösungsansätze können sie bei Ingenieurinnen und Ingenieuren Auslöser sein, bereichernde Alternativen zu entwickeln – im Sinne eines „out of the box thinking“.

Prämisse für die hierfür notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit ist eine gemeinsame Sprache zum Informationsaustausch. Eine Sensibilisierung der Gesprächspartner und ein grundlegendes Verständnis für die Diskutierenden ist unabdingbar, denn es haben sich viele ähnliche Begriffe für unterschiedliche Objekte in den verschiedenen Disziplinen herausgebildet. Manche Termini müssen kontextual Verwendung finden, um aussagekräftig zu sein. Zum Beispiel ist dies an den Begriffen „Struktur“ und „Gewebe“ nachvollziehbar:

<i>Disziplin:</i>	<i>Semantische Bedeutung:</i>
Ingenieurwesen	Struktur: Tragstruktur
Biologie	Struktur: Gewebestruktur
Textilwesen	Gewebe: Gewebtes Textil
Biologie	Gewebe: Einheit von Zellen

Präzise Begriffe in der eigenen Fachdisziplin können in einer anderen indifferent oder widersprüchlich sein (Niklas 1992, S. 4). Synergie entsteht in interdisziplinärer Zusammenarbeit, wenn von den Mitwirkenden überlappend gearbeitet wird (Bild 1).

Diese Dissertation entstand durch die Mitarbeit im Forschungsprojekt A06 „Branchings and axes in selected plant species as concept generators for high load-bearing joints of branched building structures“ des Sonderforschungsbereichs Transregio 141 „Biological Design and Integrative Structures“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde. Projektbeteiligte waren die *plant biomimetics group* (PBG) der Universität Freiburg, das *Institut für Textil- und Fasertechnologien* (ITFT) sowie das *Institut für*

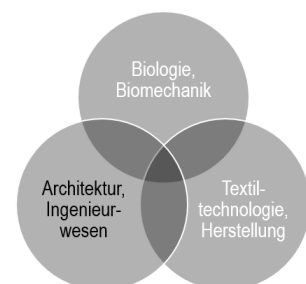


Bild 1:
Interdisziplinärer Kontext

Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart.

1.1. Motivation

Verzweigte Strukturen sind im Bauwesen und in der Architektur eine hervorragende Möglichkeit, ästhetische und filigrane Tragwerke zu generieren. Sie sammeln viele Einzelasten oder flächig verteilte Lasten, wie die einer Dachebene, und leiten sie konzentriert ein. Obwohl es wesentliche Unterschiede zwischen typischen verzweigten Bauteilen und pflanzlichen verzweigten Strukturen gibt, sind sie auch in der Natur eine wesentliche Strategie, um mit effizientem Materialeinsatz verteilte Massen zu tragen, z. B. das Blattwerk zum Erhalt einer großen Oberfläche für die Photosynthese.

Während konventionelle Knotenkonstruktionen die primären Anforderungen der Tragwerksplanung, wie Standfestigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit erfüllen, weisen sie hinsichtlich weiterer Kriterien Unterschiede auf: ökonomische und mechanische Effizienz, technisch einfache Herstellung und geringer Montageaufwand. Auch hinsichtlich der äußeren Form und der planmäßigen Beanspruchbarkeit unterscheiden sie sich. An Beispielen für Konstruktionen von Knotenpunkten aus Stahl wird dies besonders deutlich (vgl. Kapitel 2.2.1).

Die Beispiele einzelner Konstruktionen erfüllen zwar manche Kriterien und liefern für ihren Einsatzort angepasste Lösungen, allerdings erfüllt keine alle. Dies stellt eine Herausforderung für die Entwicklung alternativer Tragknoten dar. Die biomechanische Analyse ausgewählter pflanzlicher Verzweigungen ist Generator für das Konzept der Tragknoten, basierend auf faserartigen Werkstoffen mit bioinspirierter Faseranordnung.

1.2. Ziel der Untersuchung

Ziel ist es, eine Alternative zu bestehenden Knotenkonstruktionen für Tragwerkelemente, wie verzweigte Stützen, zu entwickeln. Kennzeichnend sollen eine hohe Tragfähigkeit und ein effizienter Materialeinsatz sein, die durch eine lastadaptierte äußere Kontur und innere Struktur erreicht werden. Eingesetzt werden hierfür Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) und Beton. Neben der Erfüllung von tragwerkstechnischen Anforderungen, als Knotenpunkt statisch unbestimmter Systeme, sollen vielfältige Entwurfsmöglichkeiten durch die Variabilität der Form gegeben werden und durch eine gleichmäßige, durchgängige Oberfläche hohe gestalterische Anforderungen erfüllt werden.

Weiteres Ziel ist es, die Biomechanik und das Tragverhalten von Verzweigungen ausgewählter Arten der Araliengewächse zu untersuchen, da sich deren verholzte Verzweigungen durch besonders auffällige Stamm-Ast-Anschlüsse auszeichnen. Ferner ist die Entwicklung von Methoden zur bildgestützten Faserorientierungsanalyse notwendig, um den Form-Funktionszusammenhang bezogen auf die innere Faseranordnung untersuchen zu können, indem die Struktur

der verholzten Gewebe bei mechanischen Berechnungen Berücksichtigung finden kann.

Wesentliche Fragestellung für die Bauteilherstellung des faserbasierten technischen Ansatzes ist es, wie sich ein kontinuierlicher Faserverlauf im Bereich von Verzweigungen realisieren lässt und welche Limitation Hybrid-Tragknoten aufweisen. Im Fokus der Untersuchung stehen außerdem das Verformungs- und Tragverhalten geflochtener FKV-umschnürter Betonbauteile einfacher und komplexer Geometrie. Die rechnerische Traglastermittlung für diese Bauteile sowie die experimentelle Überprüfung der Ergebnisse sind ebenfalls Gegenstand der Untersuchung.

1.3. Methodik

Im Folgenden werden Inhalt und Methodik der einzelnen Kapitel näher erläutert:

Kapitel 2 beinhaltet die für diese Untersuchung notwendigen Hintergrundinformation und gibt den Stand der Forschung wieder. Anhand ausgewählter Literatur werden Verzweigungen in Natur und Technik näher erläutert.

Kapitel 3 geht auf die Methodenentwicklung für die biomechanische Analyse ein, insbesondere die Programmerstellung zur Faserorientierungsanalyse basierend auf Bilddaten. Antworten auf bisher offene Forschungsfragen werden anhand zweier unterschiedlicher Ansätze erarbeitet – mittels eines abstrahierten parametrischen Stabwerksmodells und eines detaillierten numerischen Volumenmodells. Anhand statistischer Auswertungen von Winkeldifferenzen belastungsoptimierter und in pflanzlichen Untersuchungsobjekten vorgefundener Faseranordnungen werden qualitative Aussagen zum biomechanischen Tragverhalten getroffen.

Kapitel 4 enthält eine Gegenüberstellung pflanzlicher und technischer Verzweigungen des Bauwesens. Vergleiche auf Systemebene von Funktion und Gestalt sowie die mechanische Analyse von Tragprinzipien geben Aufschluss über Unterschiede und Gemeinsamkeiten der natürlichen und künstlichen Konstruktionen. Während sich die Untersuchungen in Kapitel 3 und den anderen Kapiteln meist auf lokale Tragknoten beziehen, stehen hier vor allem verzweigte Strukturen auf globaler Systemebene im Fokus.

Kapitel 5 befasst sich mit dem Entwurf verzweigter Tragkonstruktionen. Diese werden unter besonderer Berücksichtigung der neuartigen Hybrid-Tragknoten hinsichtlich der für den Entwurf maßgeblichen Kriterien Form, Funktion und Konstruktion vorgestellt. Grundlegende Zusammenhänge in Konsequenz des gewählten Herstellverfahrens sowie die Eigenschaften der Verbundwerkstoffe und der hybriden Konstruktion sind darin ebenfalls zusammengefasst.

Kapitel 6 konzentriert sich auf die Untersuchungen an FKV-Bauteilen zylindrischer Geometrie, die eine hohe Tragfähigkeit durch Umschnürungswirkung aufweisen. Experimentell wird anhand mehrerer Versuchsreihen untersucht, inwiefern

die für die Verzweigungsstrukturen angedachte Hybrid-Bauweise basierend auf geflochtenem FKV Potential zur Steigerung der Tragfähigkeit durch Ausbilden eines mehraxialen Spannungszustands im Beton birgt. Die Resultate werden mit Ergebnissen aus analytischen Berechnungsmodellen aus der Literatur verglichen und ebenfalls numerisch-mechanischen Berechnungen gegenübergestellt.

Kapitel 7 erfasst die Anwendung der betongefüllten FKV-Hybrid-Bauweise für geometrisch komplexe verzweigte Bauteile. Es handelt sich um eine Synthese der Ergebnisse zur pflanzlichen Faseranordnung und den Erkenntnissen bezüglich der Auslegung und Materialwahl des vorigen Kapitels zur Steigerung der Tragfähigkeit. Eine Serie von hergestellten Tragknoten wird experimentell bis zur maximalen Tragfähigkeit zerstörend geprüft und die Ergebnisse werden mit denen numerisch-mechanischer Berechnungen verglichen.

Kapitel 8 gibt einen Einblick in die Herstellung von Tragknoten mit mehr als drei Schenkeln und präsentiert die semi-automatische Herstellung eines Prototyps einer Verzweigung mit vier Schenkeln. Weitere Fragestellungen, die diese Grundlagenforschung betreffen, werden vorgestellt und es wird ein Ausblick auf künftige Entwicklungsmöglichkeiten gegeben.

Kapitel 9 fasst die wichtigsten Ergebnisse dieser Untersuchung zusammen.

2. Hintergrund

2.1. Biologie

2.1.1. Funktionsprinzipien, Biomechanik, Hydraulik

Geleitet vom Gedanken der Funktionskongruenz werden verzweigte Pflanzen, deren Struktur eine Tragfunktion erfüllt, und verzweigte Tragelemente in der Architektur hier parallel untersucht. So zeigen bestehende Arbeiten, dass Naturwissenschaften von den Pflanzen im Bereich der Biomechanik lernen können (Niklas et al. 2006, S. 1).

Untersuchungen zur Biomechanik sind bereits im 19. Jhd. dokumentiert (Schwendener 1874; Beyse 1881). Einen Überblick über die Vielzahl an Arbeiten zur Biomechanik geben Niklas et al. (2006), speziell zu Bäumen James et al. (2017), speziell zu pflanzlichen Stämmen schreiben Speck und Burgert (2011). Zur Untersuchung eingesetzt werden analytische, experimentelle, zerstörende und nicht-zerstörende mechanische Belastungsversuche sowie Simulationsmodelle unter statischen als auch dynamischen Einwirkungen, zu letzteren findet sich ein Überblick in James et al. (2017).

Zur Aufrechterhaltung der Reproduktionsfähigkeit, d. h. zum Fortbestand der Art, sind Bäume wie auch andere Pflanzen auf den Widerstand gegen mechanische Einwirkungen angewiesen, wie bei Blüten und Früchten tragenden Ästen. Durch Photosynthese wird die Energieversorgung der Organe sichergestellt und werden Zucker bereitgestellt, um Leistungsfähigkeit und Wachstum zu ermöglichen. Wichtig für die Umwandlung der Lichtenergie in für die Pflanze nutzbare innere Energie ist die Lichtausbeute, also das effiziente Ausfüllen des Raumes mit Chloroplasten enthaltenden Organen wie dem Blattwerk. Verästelte und verzweigte Strukturen sind hierfür eine breit vorkommende Strategie, um in Relation zur Pflanzengröße kleine Oberflächen in Form von Blättern in hoher Zahl für die Photosyntheseprozesse zur Verfügung zu stellen.

Aus Ingenieurssicht erreichen Pflanzen unter Maßgabe der Ressourceneffizienz einen trade-off zwischen den verschiedenen zum Überleben wichtigen Funktionen (Wachstum, Versorgung mit Wasser und Nährstoffen, Schutz vor Umwelteinflüssen, Fressfeinden und Standfestigkeit etc.). Unter dem Aspekt des Risikomanagements, bezogen auf die Tragfunktionen, handelt es sich um eine Abwägung bezüglich der Größe der Investition in Form von Materialeinsatz und Energieaufwand, um die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Schadensfolge durch Zerstörung von Gewebe, Verlust der Funktionsintegrität und Standsicherheit zu reduzieren. Einwirkende Kräfte wie durch Wind und Widerstände sind dabei probabilistische Größen. Naheliegend ist es deshalb, die mittlere Tragfähigkeit gegenüber wahrscheinlich auftretenden Beanspruchungen zu erhöhen. Sicherheitsfaktoren, als Verhältnis zwischen der Beanspruchbarkeit und Gebrauchslast, wurden beispielsweise für den Stamm von Bäumen zu circa 4,5 bestimmt (Mattheck et al. 1993). Die Methode des quantifizierten Risikomanagements wird zwar derzeit nicht aus der Perspektive des pflanzlichen Überlebens angewendet, aber für Nutzpflanzen sowie zur Gefährdungsbeurteilung und als Entscheidungshilfe für Maßnahmen in der Baumpflege eingesetzt (Stewart et al. 2013).

2.1.2. Funktionelles Design

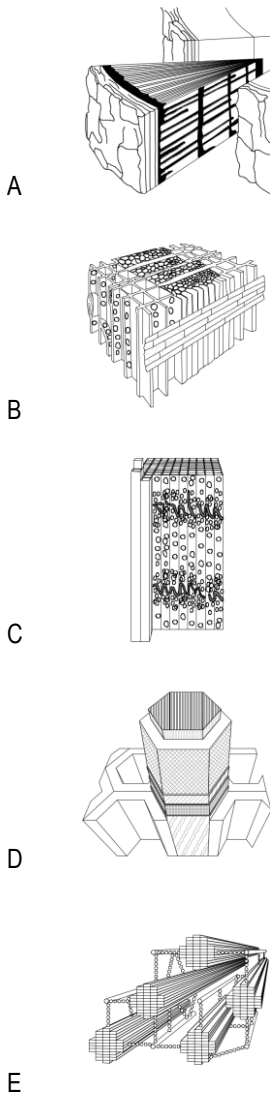


Bild 2:
 Hierarchische Ebenen von Holz (Pinie)
 A: Integrale Ebene (Stammstruktur)
 B: Makroskopische E. (Gewebestrukt.)
 C: Mikroskopische E. (Zellstruktur)
 D: Ultrastrukturelle E. (Zellwand)
 E: Biochemische E. (biochemische
 Zusammensetzung der Zellwand)

nach Speck und Rowe (2006)

Die Gestalt von Bäumen ist das Ergebnis von multifunktionellem Design, bei dem eine wichtige Funktion die Tragfähigkeit ist (Speck und Burgert 2011). Bezogen auf die Stämme von Hart- und Weichholz geben Speck und Burgert (2011) einen Überblick über den Einfluss der Wuchsform sowie den Einfluss struktureller und physikalischer Eigenschaften auf die Mechanik von Stämmen und Verzweigungen. Wichtige Eigenschaften sind dabei der hierarchische Aufbau des Holzes, die Dichte in Korrelation zur Festigkeit sowie der Wasser- und Gasgehalt. Ferner können Pflanzen sensitiv für mechanische Reize sein und auf diese reagieren (Speck und Burgert 2011), wie durch Ausrichtung des Stammes aufgrund gravitroper Reize oder der Thigmomorphogenese. Letztere bezeichnet die Veränderung des Wachstums als Reaktion der Pflanze auf mechanische Reize (Jaffee 1973, S. 143) und setzt Mechanosensitivität für den internen mechanischen Zustand lebender Zellen voraus (James et al. 2017).

Ein Baumstamm stellt ein komplexes biologisches System dar, das auf mehreren hierarchischen Ebenen in verschiedenen Größenordnungen betrachtet werden muss, um Wachstumsprozesse und die Wirkmechanismen zur Herausbildung der Tragfähigkeit verstehen zu können. Dabei durchlaufen selbsttragende Stämme von Pflanzen während ihrer Lebensspanne durch Wachstum bis zu sechs Größenordnungen (Niklas 1992, S. 6; Niklas et al. 2006).

Das Ingenieurinnen und Ingenieuren vertraute Verständnis von Holz als Werkstoff mit anisotropen oder transversal isotropen Materialeigenschaften und die vereinfachte Annahme linear-elastischen Verhaltens statt nicht-linearem steht ein aus Sicht der Biologie hochkomplexes System aus circa 35 verschiedenen Zelltypen (Cosgrove 2005, S. 850) und diversen biochemischen Prozessen entgegen. Konzepte aus den Ingenieurwissenschaften sind dementsprechend bei biomechanischen Untersuchungen sorgsam anzuwenden (James et al. 2017).

Tatsächlich handelt es sich bei Holz nicht um ein Material, sondern um eine organisierte und feingranulierte Struktur verschiedener Zelltypen und Geweben, deren Gesamtaufbau sich vereinfacht mit mittleren Materialeigenschaften beschreiben lässt. Stämme von Pflanzen können aus technischer Sicht als eine Art biologischer Faser-Verbundbalken gesehen werden (Speck und Burgert 2011), deren hierarchische Ebenen sich in über ein Dutzend Größenordnungen erstrecken (Speck und Burgert 2011).

Speck und Rowe (2006) teilen am Beispiel einer Pinie den Stamm und Tracheide in fünf hierarchische Ebenen ein (Bild 2): Die integrale Ebene (Stammstruktur, mit circa 100 m – 1 mm), die makroskopische Ebene (Gewebestrukt., ~ 10 cm – 0,1 mm), die mikroskopische Ebene (Zellstruktur, ~ 0,1 mm – 1 µm), die ultrastrukturelle Ebene (Zellwandstruktur, ~ 1 µm – 10 nm) und die biochemische Ebene (Zusammensetzung der Zellwand, 10 nm – 0,1 nm).

Bestimmend für die Materialeigenschaften des Holzes von Stämmen sind neben der Dichte vor allem der Aufbau der Zellwände (Speck und Burgert 2011). Die Zellwand kann aus einer dünneren primären Zellwand sowie einer dickeren sekundären und einer tertiären Zellwand bestehen.

Die primäre Zellwand besteht aus Zellulosefasern ($d \sim 3 \text{ nm}$), die in einer Matrix aus Hemizellulose, Pektin, Proteinen und Lignin eingebettet ist, und erfüllt zwei widersprüchliche Funktionen: Zum einen muss sie durch plastische Verformbarkeit Wachstum ermöglichen, zum anderen zusammen mit dem Zellinnendruck (Pneu) eine Steifigkeit aufweisen, die die mechanische Belastbarkeit sicherstellt. Erreicht wird dies durch hochentwickelte Verbindungsmuster, die während des Wachstums verändert werden können (Speck und Burgert 2011). So bestehen zwischen Zellulose und Hemizellulose keine kovalenten Bindungen, sondern schwächere Wasserstoffbrückenbindungen, wie Cosgrove (2005) im Artikel zum Wachstum der pflanzlichen Zellwand beschreibt.

Die sekundäre Zellwand besteht aus ähnlichen Materialien, allerdings liegt ein größerer Zelluloseanteil vor (Bild 3), da sie vor allem mechanische Funktionen erfüllt und das Wachstum der Zelle beim Aufbau dieser Zellwand meist abgeschlossen ist (Speck und Burgert 2011). Maßgeblich für die Steifigkeit und die Beanspruchbarkeit ist die Zellulose-Fibrillen-Anordnung und Ausrichtung in der Zellwand (Speck und Burgert 2011).

2.1.3. Hydraulik

Wasser, Nähr- und Mineralstoffe werden zwischen Wurzeln und Blattwerk leitungsführender Pflanzen ausgetauscht. Wasser und Lösungen steigen aufgrund des Kapillareffekts, Wurzelldrucks oder des Transpirationssogs nach oben. Bei Tracheiden und Tracheen handelt es sich um langgestreckte abgestorbene verholzte Zellen, die dem Transport dienen. Tracheiden sind evolutionsgeschichtlich älter, haben Hof-tüpfel zur Weiterleitung und übernehmen eine Tragfunktion. Tracheen hingegen haben aufgelöste Querwände und bilden ein langes Röhrensystem, das ausschließlich Wasser transportiert, übernehmen keine tragende Funktion und kommen nicht ohne Tracheiden vor. (Roth-Nebelsick 2006)

Nach Flindt (2002) haben Tracheen mit $20 - 400 \mu\text{m}$ (bis zu $700 \mu\text{m}$) größere Durchmesser als Tracheiden von Nadelhölzern mit circa $20 - 40 \mu\text{m}$. Mit größerem Durchmesser sind sie deutlich leistungsfähiger, da der Radius in der Hagen-Poiseuille-Gleichung in der Potenz einfließt (Zimmermann und Brown 1971).

Für verzweigte Systeme ist die Verteilung des zur Leitung zur Verfügung stehenden effektiven Querschnitts relevant. Dieser ist definiert als Quotient aus Durchfluss zur relativen Photosynthese-aktiven Blattmasse und berücksichtigt die verschiedene Anzahl und Beschaffenheit der in einem Querschnitt vorkommenden Leiter (Zimmermann 1978). Während da Vinci noch von Querschnitten gleichen Durchflusses ausging (Richter und Bell 1970, Notiz Nr. 394 - 396), stellt Murray (1926) Überlegungen zum minimalen Energieaufwand in einer Verzweigung eines Transportsystems mit laminarer Strömung auf und findet optimale Verhältnisse, wenn für jeden Punkt zwischen den Hierarchieebenen entlang des Flusses die Summe der dritten

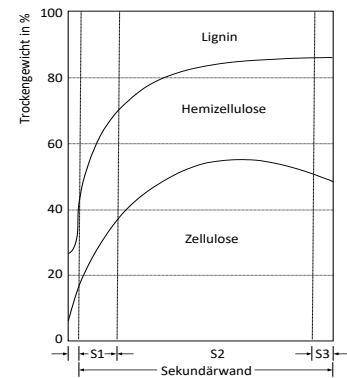


Bild 3:
Verteilung der Hauptbestandteile der Zellwände von Koniferen (Nadelhölzern) für verschiedene Lagen nach Panshin und Zeeuw (1980)

Potenz der Radien gleich groß ist ($D_V^3 = D_{N1}^3 + D_{N2}^3$). McCulloh et al. (2003) stellen durch Messungen an Pflanzenxylem fest, dass Murrays Gesetz zutreffend ist, allerdings nur gilt, solange die Funktion der Leitungsführung im Vordergrund steht und die Tragfunktion untergeordnet ist.

Sind beide Funktionen für die Pflanze, die des mechanischen Widerstands und die der Versorgung, relevant, muss die Ausbildung der Biomasse beiden Anforderungen gerecht werden und das Optimum unterscheidet sich vom Ergebnis, das nur eine Anforderung berücksichtigt (McCulloh et al. 2003).

Im Zusammenhang mit der mechanisch oder vielmehr hydraulisch begründeten Anlagerung von Biomasse, als Tragsystem oder zur Leitungsführung, wurde die „pipe model theorie“ entwickelt, die sinngemäß aussagt, dass für eine Einheitsmenge Blätter (eines Baums) ein Rohr eines bestimmten Querschnitts besteht, das vom Stamm zur Blattmasse verläuft, also durch Photosynthese-inaktives Gewebe, und als Leiter und mechanische Stützfunktion dient (Shinozaki et al. 1964). Ein Rohr ist dabei als Bündel von Einzelleitern zu interpretieren und ein Querschnitt als transportaktiver effektiver Querschnitt. Lehnebach et al. (2018) gibt einen aktuellen Überblick und hinterfragt die Theorie eingehend. Beispiele für die Anwendung von bioinspiriertem hierarchischem Design bei verzweigten Transportsystemen für Fluide, Gase und chemische Reaktionspartner gibt Zheng et al. (2017).

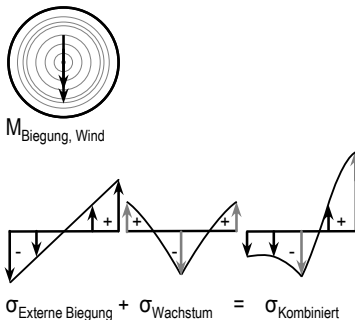


Bild 4:
Prinzip der Reduktion von Druckspannungen und Erhöhung der Zugspannungen eines Baumstammquerschnitts durch Wachstumsspannungen für eine Biegebeanspruchung aus Wind nach Mattheck und Kubler (1997)



Bild 5:
Vorspannung bei Pflanzen: Rhabarber zeigt unterschiedliche Längen nach Querschnittsseparation

2.1.4. Vorspannung durch Wachstum

Forschungsergebnisse zeigen, dass durch unterschiedliche Wachstumsraten Eigenspannungszustände (Bild 4) ausgebildet werden können, die sich günstig auf die Stabilität von schlanken Stämmen auswirken (Speck und Burgert 2011).

Die Druckfestigkeit von grünem Holz ist geringer als die Zugfestigkeit, sie liegt zum Beispiel für drei ausgewählte Weichholzarten (Pinie (*Pinus virginiana*), Lawsons Scheinzypresse (*Chamaecyparis lawsoniana*), und Sitka-Fichte (*Picea sitchensis*)) im Mittelwert bei lediglich einem Drittel (Forest Products Laboratory 2010). Eine Zugvorspannung der Randbereiche eines Stammquerschnitts ruft eine Druckzone im mittleren zentralen Bereich hervor. Für Biegebeanspruchungen, deren Normalspannungen nach außen hin zunehmen, kann dadurch der Querschnittswiderstand gesteigert werden, denn auf der durch Momenteneinwirkung druckbeanspruchten Querschnittsseite werden die Druckspannungen um den Betrag der Zugvorspannung reduziert (Panshin und Zeeuw 1980; Mattheck und Kubler 1997).

Das differentielle Wachstum und deren Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften untersuchen Vandiver und Goriely (2008) anhand der nichtlinearen Elastizitätstheorie am Beispiel von Pflanzenstengeln (Bild 5).

2.1.5. Weitere biologische Prinzipien

Weitere biologische Prinzipien, die auch in die VDI-Richtlinie 6226 eingeflossen sind, klassifizieren Knippers und Speck (2012) folgendermaßen: Die Heterogenität, die sich durch geometrische Unterschiede auszeichnet und derzeit mit gradierten Materialien aufgegriffen wird; die Anisotropie, die bei Faser-Matrix-Verbund-Materialien vorliegt und in diesem

Projekt verfolgt wird; oder die Hierarchie, die durch unterschiedliche Ausprägung auf verschiedenen Größenordnungsebenen bei gleicher Molekülstruktur zu unterschiedlichen Eigenschaften führt.

2.1.6. Biomechanische Analyse von Verzweigungen

Hesse et al. (2016; 2018) untersuchen die Biomechanik von *Dracaena marginata* Verzweigungen mit Hilfe der Magnetresonanztomografie. Mit dieser Methode ist es möglich, lebende Pflanzenteile zu analysieren, sie zu be- und entlasten und nach einer weiteren Wachstumsphase erneut zu prüfen. Belastungsinduzierte Verformungen äußerer als auch innerer Gewebe können dadurch im Räumlichen beobachtet, quantifiziert und mit unbelasteten Zuständen virtuell überlagert werden (Hesse et al. 2016). Im Projekt A06 des TRR 141, das auf ausgewählte zweikeimblättrige Pflanzen (Eudikotyledonen) fokussiert ist, wird die Methode der Mikro-Computertomografie an nicht lebenden, getrockneten, verholzten Verzweigungen von verschiedenen Arten der Familie der Araliaceae angewendet.

Ein wie im Projekt A06 methodisch ähnlicher Forschungsansatz für bioinspirierte technische Verzweigungen, allerdings mit anderen biologischen Vorbildern und ohne das Ziel zur Anwendung der Verzweigungen speziell im Bauwesen, existiert im SPP 1420. Ergebnisse im Bereich der Verzweigungen sind unter anderem ein Einblick in die Biomechanik der Gattung *Dracaena* durch Versuche und Simulationen sowie die Entwicklung von Herstellungsmethoden für drei- und vierschenklige Verzweigungen aus CF-EP mit Durchmessern von wenigen Zentimetern und schließlich Tests an Prototypen (Haushahn et al. 2012; Müller et al. 2013; Hufenbach et al. 2011b).

Ebenfalls bekannt sind andere biomimetische Faser-Verbund-Materialien und unverzweigte Konstruktionen wie der „technical plant stem“ (Masselter und Speck 2011; Milwich und Speck 2010).

2.2. Technik

2.2.1. Konventionelle Knotenkonstruktionen



A



B



C

Kreuzungspunkte mehrerer Stäbe können in der Technik nach der Materialität oder nach der Art der Verbindung eingeteilt werden. Unterschieden werden kann zwischen Knotenpunkten, bei denen alle zulaufenden Stäbe gestoßen werden, ein Stab durchgängig ist und die anderen an diesen anschließen, oder bei denen ein Knotenbauteil vorgesehen wird. Letztere ermöglichen den einfachen Anschluss jeweils einzelner Stäbe.

Wichtige Kriterien zur Beurteilung von Knotenkonstruktionen sind deren Herstelleraufwand, Kosten, Tragfähigkeit und Ästhetik. Im Folgenden wird auf diese für verschiedene gebaute Beispiele eingegangen (Bild 6):

Bei Variante A werden Profile unterschiedlichen Durchmessers, Schlitzbleche und eine Kopfplatte verschweißt. Die äußere Kontur ist unregelmäßig und es sind Querschnittsprünge vorhanden. Die Beanspruchbarkeit durch Biegemomente ist im Gegensatz zum Normkraftabtrag gering.

Der Herstellungsaufwand bei Variante B ist erhöht, da die Profile präzise geschnitten werden müssen und die zu verschweißenden Schnittkanten eine komplexe Geometrie aufweisen. Die Kontur der Profile ist durchgängig, aber nicht gevoutet. Ohne zusätzliche Verstärkungen der Rohrwand können in der Regel lediglich Querschnitte annähernd gleicher Größe gestoßen werden, um ohne Zusatzmaßnahmen eine gute Tragfähigkeit aufzuweisen.

Der größte Herstellungsaufwand der drei Beispiele ist für hochbeanspruchbare Stahlgussknoten (Variante C) notwendig. Deren Oberfläche ist glatt und die Kontur durchgängig. Letztere kann durch Verrundung und Verjüngung ästhetisch gestaltet und die Form zudem der Belastung angepasst werden (Schlaich und Schober 1999). Durch die Verlagerung der Verbindung an das Ende des Tragknotens wird die komplexe Aufgabe des Anschlusses mehrere Stäbe geometrisch entzerrt. Die Stäbe können einzeln entlang der Stöße verschweißt werden. Häufig sind Tragknoten umso ökonomischer, je größer die eingesetzte Stückzahl ist, da sich die Gussformen dann mehrfach benutzen lassen.

Konstruktionen aus Stahlbeton sind auch für nicht ausschließlich orthogonale Kreuzungspunkte bekannt, wie beispielsweise die von *Nervi* geplanten Stützen der Italienischen Botschaft in Brasilien oder die von *Calatrava* entworfenen verzweigten Stützen der *Ciudad de las artes y de las ciencias*. Nachteilig ist der hohe Schalungs- und Bewehrungsaufwand komplexer Betonknoten. An Verbindungselementen für Stabtragwerke aus ultrahochfestem Beton, der stahlfaserverstärkt, selbstentlüftend und selbstnivellierend ist, ohne konventionelle Bewehrung und mit trockenen Fugstellen wird geforscht (Lehmberg et al. 2014).

Während diese beschriebenen Konstruktionsarten zwar manche der genannten Kriterien erfüllen, kann keine Variante allen vollständig gerecht werden. Das Ziel ist deshalb, eine alternative Knotenkonstruktion zu entwickeln. Hierfür wird eine Hybrid-Bauweise mit kontinuierlichen Faserverläufen im Verzweigungsbereich in Faser-Kunststoff-Bauweise und Beton angestrebt. Während Beton ein traditionell häufig eingesetzter Baustoff ist, werden FKV im Bauwesen zwar zunehmend, aber dennoch vergleichsweise

Bild 6:
Konventionell hergestellte Tragknoten
aus Stahl

A: Geschweißt mit Schlitzblechen
(Parkplatzüberdachung, St. Anton)

B: Komplex verschnitten geschweißt
(King's Cross Station, London)

C: Stahlguss
(Paddington Station, London)

selten eingesetzt. Einen Überblick über die Anwendung von FKV-Material im Bauwesen gibt das nächste Kapitel.

2.2.2. FKV-Material im Bauwesen

Anwendungsgebiete von FKV-Materialien im Bauwesen sind die Verstärkung von Bestandsgebäuden durch externe Vorspannung, Umschnürung von Druckgliedern, wie zur Erdbebenverstärkung, eine Nutzlaststeigerung oder das Kleben von Lamellen zur Verstärkung der Zugzone bei Balken und Platten. Zum Einsatz von FKV-Verstärkungen existieren Empfehlungen, wie die DAfStb-Richtlinie *Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung* (DAfStb 2012). Für den Entwurf und die Bemessung von FKV-Bauwerken mit tragenden Kunststoffbauteilen existieren Empfehlungen des BÜV (Bau-Überwachungsverein 2014). Der Bedarf einer europäischen normativen Regelung zum Bau mit FKV-Materialien wurde 2007 festgesetzt und wird derzeit erarbeitet (Ascione et al. 2016), auch deshalb kann Bauen mit FKV vielfach noch nicht als Regelbauweise bezeichnet werden.

Bauwerke, deren Primärtragkonstruktion FKV-Materialien beinhaltet, lassen sich hinsichtlich des Anteils und dessen Funktion einteilen in: mit FKV verstärkte Tragwerke, Textilbetontragwerke und FKV-Tragstrukturen, die im Wesentlichen aus FKV bestehen.

Bergmeister (2003) gibt umfassende Informationen zu Kohlenstofffasern im Ingenieurbau und zur Verstärkung mit diesen im konstruktiven Ingenieurbau (Bergmeister et al. 2013). Zur Verstärkung von Stahlbetondruckgliedern gibt Niedermeier (2009) einen umfassenden Einblick. Häufig verstärkte Tragelemente, wie durch Kleben von CF-EP Lamellen oder externer Vorspannung, sind Platten und Balken von Decken und Überbauten (Autobahnbrücke A93 über die Donau, Regensburg).

Forschungsergebnisse zu Textilbeton ermöglichen den Bau von mehreren Brücken mit textiler statt mit Stahlbewehrung. Zum Einsatz kommen sowohl AR-Glasfaserbewehrungen, wie bei der Textilbrücke in Kempten (Ehlig et al. 2012), der Geh- und Radwegebrücke Albstadt-Lautlingen (Hegger et al. 2011a; Hegger et al. 2011b), die zusätzlich mit Monolitzen vorgespannt ist, als auch Carbonfaserbewehrungen, wie bei der Brücke Albstadt-Ebingen (Helbig et al. 2016). Vorteile generiert die Textilbetonbauweise durch die Dauerhaftigkeit sowie die Gewichtseinsparung gegenüber Stahlbeton wegen geringeren notwendigen Betondeckungen. Auch doppelt gekrümmte Geometrien für Schalentragwerke mit sehr dünnen Wanddicken lassen sich in Textilbetonbauweise herstellen, wie ein Versuchsbau der ETH Zürich demonstriert (Méndez Echenagucia et al. 2019).

Vorteile erzielt die FKV-Bauweise gegenüber konventionellen Baumaterialien durch die geringe Dichte des Verbundwerkstoffs und dessen hohe gewichtsbezogene Steifigkeit und Festigkeit. Der Materialeinsatz ist effizient, da sich die Anordnung der Fasern auf den Lastabtrag anpassen lässt. Außerdem ermöglicht sie neuartige und innovative Leichtbaukonstruktionen, wie es der Pavillon der Bundesgartenschau Heilbronn 2019, mit einer Spannweite von 23 m und einem Konstruktionsgewicht von $7,6 \text{ kg/m}^2$, zeigt. Die Tragelemente bestehen aus kernlos gewickelten CF-GF-EP und werden mit einer ETFE-Folie überspannt.

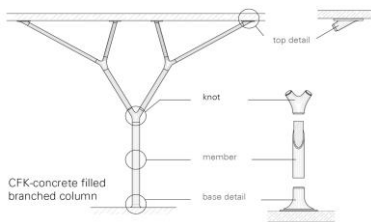


Bild 7:
Verzweigte Stütze in FKV-Beton-Hybrid-Bauweise (Quelle: ITKE)

Die angestrebte Hybrid-Bauweise für Verzweigungen (Bild 7) ähnelt der, die aus dem Bereich der Verstärkungen durch FKV-umschnürte Druckglieder bekannt ist. Die Bauteile bestehen hier aus einer CF-EP-Hülle mit geflochtenem Textil und einem Betonkern. Es handelt sich weder um eine Textilbeton- noch um eine reine FKV-Bauweise.

Der mögliche Effekt der Tragfähigkeitssteigerung durch Umschnürungswirkung (vgl. Kapitel 6.2.2) soll auch bei den geometrisch komplexeren Verzweigungen genutzt werden (vgl. Kapitel 7).

2.3. Verzweigungen

2.3.1. Fokussierung auf Verzweigungen

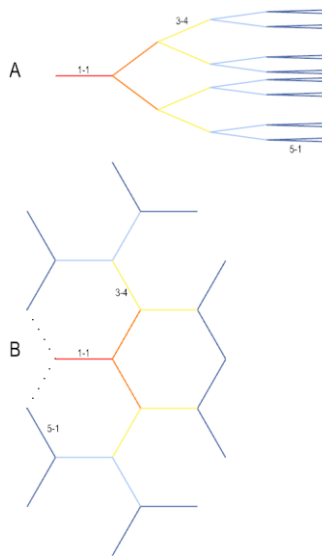


Bild 8:
Verzweigte Strukturen mit beispielhafter Benennung von Elementen
A: offen
B: geschlossen

Bevor auf die Einzelheiten der verzweigten Systeme, ihre Gestalt und Funktionen in der Biologie und bei den Tragkonstruktionen eingegangen wird, werden zugehörige Begriffe definiert, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden.

Der Ausdruck Verzweigung, wie er im Zusammenhang mit natürlichen und technischen Systemen vorkommt, bezeichnet hier eine Stelle eines durchgängigen Systems, ab der statt einem Element mehrere vorliegen.

Die Achslinien dieser Elemente treffen sich in einem Verzweigungspunkt. Das Element vor dieser Verzweigung wird als Vorgänger (parent), das danach als Nachfolger (child) bezeichnet. Nachfolger mit gleichem Vorgänger werden als Nachbarn oder Geschwister (sibling) bezeichnet und gehören gemeinsam einer Hierarchieebene an.

Offene Verzweigungen erinnern an fraktale Strukturen und zeichnen sich durch ein Ausgangselement aus, das mehrfach oder wiederholt verzweigt und deren andere Enden frei sind. Eine Benennung der Elemente kann durch die Hierarchieebene und Nummerierung der Nachbarn erfolgen (Bild 8 A).

Geschlossene verzweigte Strukturen können durch Verbinden freier Enden erhalten werden. Werden drei gerade Elemente in einem Verzweigungspunkt verbunden, so können sie in einer geschlossenen Konfiguration hexagonale Zellen beranden (Bild 8 B, hexagonales Gitter als Spezialfall eines regelmäßigen Polygonnetzes mit der Valenz drei).

In der Biologie finden sich häufig unterschiedliche Durchmesser für Vorgänger und Nachfolger der verbundenen Äste. Hier werden die Ausdrücke Gabelung (fork) und Verzweigung (branch) gebraucht ohne eine Aussage über das Verhältnis der Durchmesser der angeschlossenen Elemente in einem Knotenpunkt zu treffen, wie es bisweilen der Fall ist (Slater und Harbinson 2010).

Mit diesen Begriffen können verzweigte Systeme und Verzweigungen beziehungsweise deren äußere Form prägnant beschrieben werden. Jedoch ist nicht nur die äußere Gestalt, sondern auch die Ausbildung der inneren Struktur von pflanzlichen Verzweigungen von Interesse, da sie durch Faserverlauf und -anordnung für viele Funktionen, wie die der Tragfähigkeit und dem Transport für Pflanzen wesentlich sind (Bild 9).

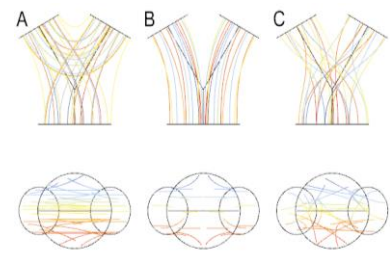


Bild 9:
Auswahl möglicher „Faserverläufe“ für Verzweigungen
A: Mechanisch induzierte Anordnung
B: Hydraulisch induzierte Anordnung
C: Chaotische Anordnung

2.3.2. Verzweigungen bei Pflanzen

Folgende Absätze geben einen Einblick zum Zusammenhang zwischen Funktion und Gestalt von Bäumen und andere Pflanzen.

Vor allem grundlegende Ergebnisse im Zusammenhang zwischen der Form und Gestalt von pflanzlichen Verzweigungen und den mechanischen Ursachen dafür werden angeführt: So erlaubt die Anwendung biomechanisch inspirierter rechnergestützter Methoden optimierte Bauteilauslegungen. Eine Optimierung der äußeren Form wird durch die CAO-Methode (Computer Aided Optimization) erreicht (Mattheck und Burkhardt 1990; Mattheck 1992). Zur Optimierung der Gestalt, der Topologieoptimierung, dient die SKO-Methode (Soft Kill Option, Baumgartner et al. 1992). Die innere Struktur, wie die Faserausrichtung und -anordnung, kann durch CAIO (Computer Aided Internal Optimization) verbessert werden (Kriechbaum 1992; Mattheck und Kubler 1997). Letztere wurde zum Beispiel auf einen gekrümmten Kragarm, dessen System einer Verzweigung mit lediglich einem belasteten Nachfolger ähnlich ist, angewendet (Mattheck und Reuschel 1999).

Auch evolutionäre Algorithmen und mehrere aufeinander aufbauende Strukturoptimierungen, wie im Verfahren ELiSE (Evolutionary Light Structure Engineering), werden zur Erzeugung von verbesserten Leichtbaukonstruktionen eingesetzt (Hamm 2018).

Durch Implementierung mancher Methoden in kommerziellen Programmen finden sie eine breite Anwendung.

Demgegenüber existieren zur Strukturoptimierung auch einfache Konstruktionsweisen, die auf grafischen Hilfsmitteln beruhen, wie die Methode der Schubvierecke (Mattheck und Bethge 2007), die der Kraftkegel (Mattheck 2010; Haller 2013) oder die der Zugdreiecke, die durch Ausrundung von einspringenden Ecken die Reduktion von Kerbspannungen im Vergleich zu kreisförmigen Ausrundungen ermöglicht (Scherrer 2004; Sörensen 2008).

Auch wenn Verfahren und Methoden gefunden wurden, die für eine Bauteilauslegung im Stand der Technik eingesetzt werden, sind dennoch die Modellvorstellungen von Verzweigungen zur Ausbildung von Beanspruchbarkeit durch lastgerechtes Wachstum Gegenstand der Forschungsdiskussion. Der Analogie eines Baumes als Kette (Mattheck 1993), deren schwächstes Bindeglied zum Versagen führt, widerspricht zum Beispiel Slater (2016) und setzt eine eigene Analogie entgegen. Slater interpretiert die Kettenanalogie direkt und führt an, dass die Belastung mancher, aber nicht aller nachfolgenden Elemente zu keinem Versagen des Vorgängers (Stamms) führt. Lediglich durch Belastung aller Nachfolger kann der Vorgänger zum Versagen gebracht werden. Solche Denkmodelle bieten per se Angriffsflächen und sind meist nur für einen Aspekt des zu erfassenden Sachverhalts geeignet.

Sie dienen dennoch als Hilfestellung zur Unterstützung der Vorstellungskraft.

Die Argumentation steht beispielhaft auch für die eingangs erwähnte notwendige Sensibilisierung für verwendete Begriffe. So führt Slater (2016) an, dass bei einer verzweigten Struktur das Nachfolgerelement eine geringere „Stärke“ („strength“ = Festigkeit) aufweist als der Stamm, das Vorgängerelement. Außerdem führt er an, dass Zweige (als Nachfolger) bei Spannungen („stresses“) brechen, die einzeln keine ausreichende Kraft weiterleiten und die größere Struktur (Vorgänger) nicht gefährden (Slater 2016). Es ist anzunehmen, dass der Begriff der Spannungen „stresses“ hier Kraft meint, wie er auch im Teilsatz richtigerweise verwendet wird, und mit dem Begriff „strength“ nicht Festigkeit, sondern Widerstandskraft gemeint ist. Die Festigkeit, die aufnehmbaren Spannungen des Holzes vor und nach der Verzweigung, muss per se nicht unterschiedlich sein.

Die Idee des schwächsten Glieds der Kette, das zum Versagen führt, lässt sich in Bezug auf einen verzweigten Baum weiterdenken. Für den Fall einer Belastung an den Astenden, die eine gleichmäßige Ausnutzung an allen Stellen des Baumes hervorruft, ist diese Idee, bei der eine Kerbe als schwaches Bindeglied zu einem Versagen führen könnte, nicht falsch. Es kann vermutet werden, dass die verzweigte Struktur der Pflanze hinsichtlich der am wahrscheinlichsten auftretenden Belastungssituation ausgebildet wird und dieser Beanspruchung durch Anpassungsprozesse wie dem Wachstum entgegenwirkt, um mit einem bestimmten Sicherheitsniveau starken Schädigungen zu widerstehen. In diesem Sinne logisch fortgesetzt kann vermutet werden, dass das globale Sicherheitsniveau gegen Totalversagen (Bruch des Stammes, Verlust der Standsicherheit durch Entwurzelung) ein unterschiedliches Sicherheitsniveau im Vergleich zum lokalen Versagen eines Hauptastes aufweist. Für ein höheres globales Sicherheitsniveau spricht die höhere Schadensfolge (Absterben nach Umfallen), dem entgegen steht der höhere Aufwand (Invest).

Es wird angenommen, dass ein Strang einer Verzweigung (ein Teilsystem der Tragstruktur) einer relativ höheren Belastung ausgesetzt wird als das Gesamtsystem. Aus einer Wahrscheinlichkeitsbetrachtung der Windverteilung folgt zum Beispiel, dass eine lokale Windeinwirkung auf eine definierte Fläche einen höheren Betrag aufweist als eine Einwirkung, die auf eine größere Fläche bezogen ist; das heißt, die Beanspruchung eines Teilsystems durch eine lokale Einwirkung ist vermutlich größer als die Beanspruchung des Teilsystems aus globaler Einwirkung. In Konsequenz bedeutet das: Um ein ähnliches Sicherheitsniveau gegen Versagen zu erreichen, muss das Teilsystem (Nachfolger) relativ höheren Beanspruchungen widerstehen. Die Lastweiterleitung des Teilsystems aus lokaler Einwirkung zum Vorgänger ist demnach höher als der Anteil dieses Teilsystems bei globaler Belastung. Der Vorgänger muss der Summe der Einwirkungen aus allen global belasteten Teilsystemen widerstehen, die geringer sein wird als die Summe der Einwirkungen der Teilsysteme unter lokalen Belastungen, deren Auftreten in der Praxis unwahrscheinlich ist. Zum Beispiel ist die Einwirkung auf einen Hauptast, die mit höherer Wahrscheinlichkeit größer ist als der Anteil der Belastung, die dieser Ast unter Vollast der Krone erfährt, für den Stamm unproblematisch, da nur ein Ast belastet wird

statt mehrere; für den Ast selbst erscheint es jedoch als der maßgebende Lastfall.

Eine weitere Diskussion besteht um die Hypothese gleichmäßiger Spannungen (Metzger 1893), welche Mattheck auf Ast- und Wurzelnbindungen erweitert (Mattheck 1988) und später als Axiom der konstanten Spannungen bezeichnet: „Unvermeidbare Spannungen werden gleichmäßig an der Oberfläche des Baumes verteilt, Spannungen an der Oberfläche des Baumes sind im zeitlichen Mittel an jedem Punkt einheitlich; gewachsene Kerben verursachen keine Kerbspannungen“ (übersetzt aus Mattheck und Kubler 1997). Mattheck selbst stellt eine „allgemeingültige Beweisführung“ für dieses Axiom in Frage und verweist vielmehr auf die praktische Bedeutung zur Optimierung von Tragstrukturen (Mattheck 2006).

Bestmöglichen Widerstand für eine Belastungssituation ist nicht immer das vorrangige Kriterium zur Gestaltung der Form von Bäumen. Vielmehr sind auch andere Funktionen relevant. Genenz et al. (1997) stellen zum Beispiel überproportional dünne Äste an Astbruchstellen von Pappeln fest.

Wie Spatz konstatiert, sei diese Hypothese weder bewiesen noch nicht bewiesen und deutet auf die Schwierigkeit der Definition des zeitlichen Mittels hin (Niklas und Spatz 2012, S. 185).

Die Betitelung mit „Axiom“ unterstreicht hierbei die beweislose Voraussetzung des Satzes und beinhaltet gleichzeitig die Annahme einer logischen Unabhängigkeit zu anderen Untersuchungsgebieten. Slater (2016) kritisiert das Axiom der konstanten Spannungen hinsichtlich des Spannungsausgleichs als Mittelwert über die Zeit und interpretiert es außerdem als Hypothese, die nicht geprüft werden kann, da der zeitliche Mittelwert nicht genügend genau definiert ist. Eine jährliche Ausmittlung könne es nicht sein, da das Wachstum nicht von der Zeit, sondern von der saisonalen Entwicklung und dem Nährstoffangebot abhängig sei. Slater führt an, dass junge Zweige noch keine Belastungshistorie haben und die Annahme auch deshalb problematisch sei.

Dies führt zu der Schlussfolgerung, dass Wachstum als Reaktion auf eine mechanische Einwirkung entweder als Reizreaktion unmittelbar stattfindet oder es eine Art Gedächtnis der Belastungshistorie geben muss. Handelt es sich um eine unmittelbare Reizreaktion auf mechanische Reize, kann diese nur in Phasen aktiven Wachstums stattfinden. Der Mittelwert über die Zeit enthält demnach auch Anteile inaktiven Wachstums während der passiven Phasen.

Eine Reaktion auf äußere mechanische Einwirkung kann von weiteren, auch konkurrierenden Anforderungen beeinflusst werden. Einerseits muss es einen Grundbauplan geben, der allgemeine Fälle abdeckt, und andererseits muss die Einwirkung in ausreichender Dauer, Häufigkeit und Intensität auftreten, um eine Reaktion nach sich zu ziehen. Es ist erwiesen, dass einige Pflanzen auf mechanische Reize reagieren können, diese also registrieren und darauf zum Beispiel durch Wachstumsänderung reagieren (vgl. Kapitel 2.1.2). Es besteht ein wesentlicher Unterschied zwischen einer Reizreaktion, deren Antwort prozessbedingt verzögert eintritt, oder ob angenommen wird, dass es sich um eine Reaktion auf einen gleitenden Durchschnitt mehrerer Einzelereignisse handelt, die zeitlich versetzt auftreten. Letzteres erfordert eine Akkumulation und Speicherung der

Information zeitlich versetzter Einwirkungen und deren Bewertung als Auslöser für Wachstum, was als „reflektierendes Wachstumsgedächtnis“ bezeichnet werden könnte.

Slater (2016) schlussfolgert, dass das Axiom konstanter Spannungen trotz präziserer Definition die komplexen Vorgänge des Wachstums nicht genügend beschreiben können wird und die Ausbildung einer gleichmäßigen Spannungsverteilung die oberirdische Form von Bäumen vorgibt.

Zu bedenken ist, dass für die Gültigkeit eines Axioms zwar die Nichtbeweisbarkeit unschädlich ist, gleichzeitig die logische Unabhängigkeit zu anderen Sätzen aber gegeben sein muss. Vor diesem Hintergrund scheint es zunächst angemessener von einer Hypothese gleichverteilter Spannungen zu sprechen. Aktuelle Untersuchungen weisen möglicherweise darauf hin, dass Dehnungen statt Spannungen Auslöser für das adaptive Wachstum sind (James et al. 2017).

2.3.3. Verzweigungen im Bauwesen

Md Rian und Sassone (2014) geben einen umfassenden Überblick über Verzweigungen und fraktal-ähnliche Strukturen in der Architektur und im Bauwesen und zeigen deren historische Entwicklung bis zu aktuellen Bauwerken und Simulationsverfahren auf.

Bei verzweigten Stützen handelt es sich im Rahmen dieser Arbeit um normalkraftdominierte statische Systeme, die meist mehrfach unbestimmt sind und in der Baupraxis häufig bezüglich der eingesetzten Masse optimiert sind. Zur Beurteilung der Effizienz des Gesamttragwerks muss die Stütze und das horizontale Tragelement berücksichtigt werden. Durch die zahlreichen Unterstützungspunkte wird die Spannweite verringert, wodurch sich die statisch erforderliche Höhe wesentlich reduziert. Dieser Sekundäreffekt trägt neben der Stütze selbst wesentlich zu einem effizienten Gesamttragwerk bei.

Die Beanspruchung verzweigter Stützen unterscheidet sich wesentlich von der von Bäumen, wie es bereits in der Literatur erörtert wurde (Schulitz, Helmut C., et al. 2001) und in Kapitel 4 erläutert wird. Der Begriff der „Baumstützen“, der in Untersuchungen zu natürlichen Konstruktionen und Gestaltbildungsprozessen der Natur um die Forschergruppe von Frei Otto verwendet wird, hält sich bis heute. Im Kontext der historischen Entwicklung und vor dem Hintergrund der biologischen Inspiration verwenden Nachtigall und Pohl (2013) den Begriff der „Baumstützen“ in Führungszeichen. Laien mögen dazu verleitet sein, diese Bezeichnung zu verwenden, da die optische Ähnlichkeit verzweigter Stützen zu verzweigten Bäumen offensichtlich gegeben ist. Fachkundigen ist diese irreführende Verwendung verwehrt, da sie implizit ein falsches Bild der Tragwirkung vermittelt und es scheint ihnen geboten, eine falsche Verwendung zu korrigieren.

2.4. Bau-Bionik

Um von einem bionischen Vorgehen sprechen zu können, definiert die Richtlinie VDI 6220 bzw. DIN ISO 18458 drei Kriterien, die erfüllt werden müssen: ein biologisches Vorbild, die Abstraktion vom biologischen Vorbild und die Anwendung der Abstraktion. Nachtigall beschreibt im Buch

„Bionik als Wissenschaft“ das Erkennen, Abstrahieren und Umsetzen als wesentliche Merkmale eines bionischen Verfahrens. Nachtigall ordnet die Bau-Bionik als Teilgebiet der Bionik ein und beschreibt sie als Verknüpfung von Analogieforschung und technischer Bionik (Nachtigall und Pohl 2013). Außerdem klassifiziert er Bauwerke in drei Kategorien: in natur-ähnliche, natur-analoge und integrative. Erstere sind Bauwerke, für die Formen aus der Natur übernommen wurden, wie sie zum Beispiel in Entwürfen von Calatrava, wie in dem des Bahnhofs *Station World Trade Center*, zu erkennen sind. Analogien zur Natur spiegeln sich in den Arbeiten zu den natürlichen Konstruktionen und Gestaltbildungsprozessen um Frei Otto, wie im SFB 64 „Weitgespannte Flächen-tragwerke“ und SFB 230 „Natürliche Konstruktionen“, wieder. Zuletzt zeichnen sich natur-integrative Ansätze durch „Integration bionischer Prinzipien in architektonischen Strukturen“ aus (Nachtigall und Pohl 2013), zu welchen einige der Forschungspavillons des ITKE und ICD gezählt werden können.

Demnach ist die provisorische Kuppel des Planetariums Jena im Jahr 1924 nicht im Sinne eines bionischen Prozesses entstanden, da lediglich ihre äußere Struktur denen von Radiolarien ähnelt und neben der ähnlichen Gestalt kein Transfer eines Funktionsprinzips stattgefunden hat (Nachtigall und Pohl 2013).

Eine Bewertung hinsichtlich der Ressourceneffizienz von Beispielen aus der Bionik nehmen Niebaum und Seitz (2017) vor. Festzuhalten bleibt, dass bionische Methoden als Werkzeug interpretiert werden können, die Funktionsprinzipien fördern, die es erlauben technische Probleme gegebenenfalls anhand neuer Aspekte zu lösen. „Bionisch“ bezeichnet lediglich den gewählten Entwicklungsansatz, nicht jedoch die Wertigkeit der Lösung (Niebaum und Seitz 2017).

Aktuelle Beispiele, die die Anwendung biologischer Prinzipien auf Bauwerke aufzeigen, finden sich in einer Reihe von Forschungspavillons. Diese transferieren zum Beispiel das Prinzip der lokalen Adaption von Material, wie durch das Vorbild des amerikanischen Hummers, dessen Chitin-Fasern in einer Proteinmatrix variiert angeordnet sind, so dass sowohl sehr harte und widerstandsfähige Scheren und Panzerungen entstehen, als auch sehr nachgiebige, wie im Bereich der Gliedergrenzen am Körper, die sich bei Bewegung verformen (Knippers et al. 2015). Das Vorbild der Deckflügel des Kartoffelkäfers zeigt einen Sandwich-Aufbau und eine ebenfalls lokale Differenzierung von Fasern, die für einen Forschungspavillon (Dörstelmann et al. 2015b) ein leitender Entwurfsgedanke waren. Nicht nur im Sinne der Materialanordnung, sondern in Bezug auf den Herstellungsprozess selbst kann ein Vorbild aus der Biologie dienen, wie der Nestbau der Wasserspinne zeigt, der zu einer neuartigen Herstellungsmethode eines weiteren Forschungspavillons führte (Dörstelmann et al. 2015a). Alle drei Versuchsbauten sind im Leichtbau zu verorten und zeichnen sich durch geringe Konstruktionsgewichte von 10 kg/m^2 und darunter aus. Nicht nur mit linienförmigen Ausgangsmaterialien, bestehend aus mit epoxidharzgetränkten Kohle- und Glasfasersträngen, sondern auch mit Platten aus Holz wurden biomimetische Entwurfsmethoden in Form eines Forschungspavillons umgesetzt (Knippers et al. 2013).

3. Strukturmechanische Untersuchung verzweigter biologischer Vorbilder

Die Untersuchungen zu *Schefflera arboricola* (Bild 10) wurden in Kooperation zwischen den Instituten der Universität Stuttgart (ITKE) und Freiburg (PBG) durchgeführt. Die PBG beschäftigte sich dabei im Wesentlichen mit der Datenerhebung zu Morphologie, Ontogenie sowie Experimenten zur Biomechanik. Am ITKE dienen die erhobenen Daten der PBG als Grundlage für biomechanische Untersuchungen und Computersimulationen zur Analyse des Tragverhaltens.



Bild 10:
Schefflera arboricola: Zimmerpflanze

3.1. Ziel der biomechanischen Untersuchungen

S. arboricola weist einen ungewöhnlichen ‚fingerartigen‘ Stamm-Ast-Anschluss auf, deren äußere verholzte Form und auch deren innerer Faserverlauf mechanisch bedeutsam sein könnten. Ziel ist, an ausgewählten pflanzlichen Verzweigungen der *S. arboricola* eingehend ihr biomechanisches Verhalten zu untersuchen, das Tragverhalten zu erschließen und Form-Funktionszusammenhänge zu erkennen (Bild 11, Bild 12).

Die Untersuchungen haben nicht das Ziel zu einer technischen Anwendung im Sinne eines bionischen Prozesses zu führen, sondern werden schon durch den Wissenszuwachs des Fachbereichs Biologie und Biomechanik legitimiert. Dennoch bestehen Ähnlichkeiten des biologischen Untersuchungsgegenstandes und der Neuentwicklung der technischen Anwendung in Bezug auf die faserartige Materialität.

Ziel ist es, Verformungen, Spannungen und Tragprinzipien für verschiedene Belastungszustände zu erschließen. Angewandt werden verschiedene numerisch-mechanische Methoden, wie die der Finiten-Elemente (FE). Durch Abstraktion und Modellierung als Stabwerkmodell wird versucht anhand von Parameterstudien, die die äußere Form beeinflussen, Rückschlüsse auf den Form-Funktionszusammenhang der ‚fingerartigen‘ Verzweigung herauszuarbeiten.

Motiviert werden die Parameterstudien von dokumentierten morphologischen Unterschieden verschiedener Pflanzenarten. Durch Untersuchungen an einem möglichst detaillierten FE-Volumenmodell mit genauem Abbild der Geometrie, den Abrundungen und Berücksichtigung der tatsächlichen Faser- und Materialanordnung können Ergebnisse wie Spannungsverläufe und Verformungen erhalten werden.



Bild 11:
S. arboricola: Abgeschnittener Stamm zur Provokation einer Verzweigungsbildung



Bild 12:
S. arboricola: decortizierte und getrocknete Verzweigung mit aufgelösten Einzelsträngen im Stamm-Ast-Anschlussbereich

Einteilung der untersuchten Araliengewächse:

Stamm: Magnoliophyta
 Magnoliophytina
 Klasse: Magnoliatae Rosidae
 Aralianae
 Ordnung: Araliales
 Familie: Araliaceae Juss.
 Gattung: Schefflera J.R.Forst. & G.Forst.
 Art: Schefflera arboricola

Stamm: Magnoliophyta
 Klasse: Magnoliatae Rosidae
 Aralianae
 Ordnung: Apiales
 Familie: Araliaceae
 Gattung: Fatsia
 Art: Fatsia japonica
 Trivialname: Zimmeraralie

Stamm: Magnoliophyta
 Magnoliophytina
 Klasse: Magnoliatae Rosidae
 Aralianae
 Ordnung: Araliales
 Familie: Araliaceae Juss.
 Gattung: Polyscias J.R.Forst. & G.Forst.
 Art: Polyscias balfouriana

3.2. Stand der Forschung und Hintergrund

Beschreibung der Biologie

Untersuchungen der Arten *Schefflera actinophylla*, einer Baumart, und *Schefflera arboricola*, einer kleineren, strau-chigen Art mit einem Astdurchmesser von circa 1 cm, zeigen nach Entfernung des Cortex im Verbindungsbereich die Auflösung des annähernd kreisförmigen Querschnitts in Einzelstränge (Tomlinson et al. 2005).

Diese als ‚fingerartige‘ Ausbildungen beschriebenen verholzten Stränge umgreifen den Hauptstamm um bis zu 180°. Die Einzelstränge wachsen in unterschiedlichen Höhen aus dem Stamm (im Folgenden als Höhenversatz bezeichnet, auch wenn Stämme schräg im Raum orientiert sind). Vom mittleren Einzelstrang zu den äußeren Einzelsträngen sind die Austrittsstellen jeweils apikaler.

Ältere Verzweigungsbereiche zeigen ein Zusammenwachsen der Einzelstränge zu einem Schaft mit geriffelter Oberfläche, an dem die vormaligen Einzelstränge noch ablesbar sind.

Morphologische Untersuchungen an Verzweigungen weiterer Araliaceae zeigen, dass die ‚fingerartig‘ ausgebildeten Stamm-Ast-Verbindungen nicht nur bei Arten der *Schefflera* vorkommen, sondern auch bei *Fatsia japonica* und *Polyscias balfouriana* (Bunk et al. 2017). Alle drei Sträucher erreichen Wuchshöhen von mehreren Metern. Die Ausbildung von Verzweigungen wurde jeweils durch Abschneiden der Stämme mit einem Durchmesser von circa 1 cm angeregt. Anhand der Untersuchung verschiedener transversaler Querschnitte gleichen Abstands konnte mit Hilfe der Dünnschicht-Mikroskopie der Verlauf der Einzelstränge, die nach drei Wochen des Abschneidens zunächst in Form nicht verholzter Leitbündel zu erkennen sind und später verholzen (nach 10 Wochen mindestens festgestellt), nachvollzogen werden (Bunk et al. 2017).

Die Gestalt der Einzelstränge unterscheidet sich innerhalb der drei Arten. *S. arboricola* zeigt 8 – 10 verholzte Stränge, die höhenversetzt am Stamm ansetzen, eine Umgreifung von circa 180° und eine breite Astanschlussstelle (Bunk et al. 2017).

F. japonica zeigt 12 – 16 Einzelstränge nahezu ohne Höhenversatz und eine Umgreifung von circa 180° – 360° (Bunk et al. 2017).

P. balfouriana zeigt 7 – 9 verholzte Stränge, die auf gleicher Höhe ansetzen und den Stamm entlang des Umfangs zwischen 180° – 270° umgreifen (Bunk et al. 2017).

Beschreibung der Biomechanik von Schefflera arboricola

Die PBG hat in Kooperation mit dem ITKE experimentelle Belastungsversuche an Verzweigungen von *S. arboricola* durchgeführt. Diese liefern quantitative Ergebnisse in Form von Lastverformungskurven sowie Versagensmechanismen. Die Verzweigungen von *S. arboricola* werden jeweils am Stamm eingespannt (Bild 13).

Eine Stahlhülse befestigt den mit Epoxidharz eingeklebten Stamm anhand eines Innengewindes über einen Schraubanschluss an der Prüfmaschine. Die vertikale Lastaufbringung erfolgt weggesteuert am Astende. Der Einfluss des Einklebens (elastische Bettung) gegenüber einer idealen Einspannung auf das Ergebnis der vertikalen Verformung liegt, berechnet am vereinfachten statischen Modell, bei unter 2 % (Bild 13).

Aus noch unveröffentlichten experimentellen Untersuchungen zur Biomechanik an feuchten, getrockneten und wiederbefeuchteten Verzweigungen der *S. arboricola* liegen Versuchsergebnisse vor (Quelle: PBG, K. Bunk). Demnach kann für den Mittelwert des Elastizitätsmoduls im wiederbefeuchteten Zustand (60 % Wassergehalt) ein Wert von circa 3800 N/mm² angenommen werden (PBG).

Zur Dokumentation der untersuchten verzweigten Geometrien wurde von der PBG neben der Fotografie Laser-scanning und Mikrocomputertomografie eingesetzt. Der verwendete Hand-Laserscanner erlaubt die Aufnahme von Objekten im Dezimeterbereich. Die Aufnahmewinkel sind so zu wählen, dass keine Verschattungen auftreten, was bei den hinterschnittenen Proben nur bedingt möglich ist. Die Scans sind einfach und innerhalb von wenigen Minuten durchführbar, so dass auch während des Belastungstests in Pausen, in denen das Lastniveau konstant gehalten wird, gescannt werden kann. Die Laserscan-Methode führt im Ergebnis zu Oberflächennetzen.

Die Mikro-CT-Methode (Röntgen-Computertomografie) generiert digitale Bilder, die nach der Rekonstruktion Aufschluss über die innere und äußere Struktur geben. Bei dem verwendeten Gerät ist die Größe der Objekte auf wenige Zentimeter beschränkt.

Für die Bearbeitung in CAD-Programmen ist die Erzeugung eines Oberflächennetzes aus den 3D-Bilddaten zweckmäßig. Durch Setzen eines Schwellenwertes wird das Objekt vom Hintergrund separiert und die Grenzfläche vernetzt (Bild 14).

Untersuchungen anderer pflanzlicher Verzweigungen wurden zum Beispiel von Slater und Ennos (2015a) an verzweigten Haselnusspflanzen durchgeführt. Diese Verzweigungsbereiche weisen eine ineinander verschlungene Faserstruktur im Zwickelbereich auf. In Belastungsversuchen, die ein Aufreißen im Zwickelbereich zeigen, konnten verschiedene Versagensmodi festgestellt werden (Slater und Ennos 2015b): ein Druckversagen am äußeren Rand im gekrümmten Bereich der Verzweigung mit anschließendem Zugversagen im inneren Zwickelbereich (Typ I), ein Zugversagen im Zwickel ohne vorangegangenes Druckversagen (Typ II) und ein Astversagen auf Biegung initiiert durch Versagen der Druckzone (Typ III).

Aus den experimentellen Beobachtungen der PBG wird ersichtlich, dass Verzweigungen von *S. arboricola* eine ähnliche Versagensart (Typ I) zeigen, obwohl es sich um eine unterschiedliche Art handelt und der Querschnitt aufgelöst ist. In Belastungsversuchen versagt der mittlere druckbeanspruchte Einzelstrang, danach lösen sich die äußeren unter Auffaserung an der Stammanschlussstelle ab.

Beschreibung bisheriger Simulationsmethoden

Analysen zur Biomechanik und zu Simulationen an *S. arboricola* beschreiben Born et al. (2016).

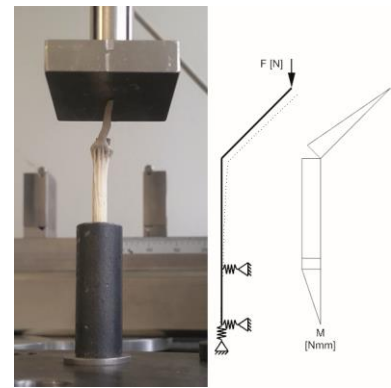


Bild 13:

S. arboricola: Belastungsversuch und zugehöriges vereinfachtes statisches Modell zur Überprüfung des Versuchsaufbaus (Versuchsdurchführung K. Bunk, F. Jonas an der PBG)



Bild 14:

Oberflächennetz ermittelt aus rekonstruierten µCT Bilddaten

Schwager et al. (2010; Schwager et al. 2013) untersuchen mehrere Verzweigungen biomechanisch, darunter Monokotyledonen und Kakteen. Sie verwenden Fotografie und stereo-scanning-Methoden zur Erfassung der äußeren Geometrie, Dünnschnitt-Mikroskopie zum Aufschluss der inneren Struktur und strukturmechanische Simulationen mit isotropem Materialansatz zum Erschließen des Tragverhaltens. Sie erkennen, dass eine kontraintuitive geometrische Form im Verzweigungsbereich von Kakteen, bestehend aus konkaven und konvexen Bereichen, Spannungen, im Vergleich zu einfach ausgerundeten Formen und optimierten Formen, weiter reduzieren können.

Die hier verwendeten Methoden sind von diesen sowie von Untersuchungen im SPP 1420 zur Klärung des Tragverhaltens ausgewählter Verzweigungen beeinflusst und werden in weiterentwickelter Form angewendet.

Die Berücksichtigung von Faserorientierungen ist in anderen Forschungsbereichen weit verbreitet (Dobrovolskij et al. 2017; Mönnich et al. 2011; Kastner et al. 2008). In der Biomechanik und Medizintechnik werden Simulationsmodelle auf Basis von Rekonstruktionen digitaler Bilderstapel zur Analyse von Knochenstrukturen verwendet (Enns-Bray et al. 2014; Nazemi et al. 2016). In der Baubranche wird beispielsweise die Orientierung von Kurzfasern in Beton untersucht (Herrmann und Schnell 2019).

Die mechanischen Eigenschaften von Faser-Matrix-Werkstoffen, bei denen häufig die Eigenschaften der Fasern in Bezug auf die Festigkeit und die Steifigkeit dominant gegenüber der Matrix sind, werden neben den Eigenschaften der einzelnen Komponenten und den Verbundeigenschaften vor allem durch das Faser-Matrix-Verhältnis und der Anordnung der Fasern, wie der Verteilung und Orientierung im Raum, bestimmt. Entsprechen die Faserorientierungen den Richtungen der Hauptspannungen einer lastabtragenden Struktur, resultiert daraus häufig ein günstiges Tragverhalten. Eingesetzt wird die Analyse von Orientierungen in bestehenden Tragstrukturen, wie bei biomechanischen Untersuchungen als auch bei Faser-Matrix-Verbundbauteilen zur Fertigungsüberwachung, Qualitätssicherung und Simulation des Tragverhaltens von Bauteilen, um anisotrope oder transversal isotrope Materialeigenschaften berücksichtigen zu können.

Offene Forschungsfragen

Offene Fragen im Hinblick auf die ausgewählten ‚fingerartigen‘ Verzweigungen sind deren Form-Funktionszusammenhang und die mechanische Bedeutung der äußeren Gestalt und inneren Struktur für günstiges Tragverhalten im Sinne der Vermeidung von Spannungsspitzen und effizientem Materialeinsatz.

Bunk et al. (2017) stellen unter anderem folgende Hypothesen auf, die bisher weder bestätigt noch widerlegt wurden (sinngemäß übersetzt und zusammengefasst):

1. Eine große Umgreifung des Stamms und eine hohe Anzahl der verholzten Stränge führt zu einer höheren Steifigkeit der Stamm-Ast-Verbindung sowie möglicherweise zu einer größeren Wasserleitung. *F. japonica* weist gegenüber *S. arboricola* und *P. balfouriana* eine höhere Anzahl an Strängen und eine höhere Umgreifung auf.

2. Ein basalerer und hierarchischerer Ansatz der ‚Finger‘ am Stamm (ein Höhenversatz der Ansatzstellen der verholzten Stränge) führt zu einer größeren mechanischen Steifigkeit der Verzweigung.

3. Die verholzten Stränge sind derart angepasst, um Druckkräfte auf der abaxialen Seite und Zugkräfte auf der adaxialen Seite der Verzweigung gut aufnehmen zu können.

4. Die verholzten Stränge versagen nacheinander anstatt eines plötzlichen Versagens der Verzweigung.

5. Die Länge und die Krümmung der seitlichen Leitbündel (hier: Einzelstränge) korrelieren mit der Umgreifung der verholzten Stränge um den Stamm.

Punkt 4 wurde anhand weggesteuerter Versuche bestätigt (Bunk et al. 2017). Hier erscheint jedoch die Fragestellung interessant, inwiefern eine Umlagerung der Kräfte nach Ausfall von Teilsystemen bzw. eine weitere gesteigerte Lastaufnahme nach Ausfall von Einzelsträngen möglich ist. Weitere Fragestellungen sind, wie sich mechanische Belastungen auf die besondere Gestalt und Struktur der Verzweigung der Araliaceae auswirken, inwiefern Methoden der numerischen Simulation anwendbar sind, welche Tragprinzipien zu erkennen sind und inwiefern die Orientierungen der Fasern innerhalb der komplexen Verzweigungsgeometrie lastgerecht angeordnet sind.

3.3. Methodenentwicklung und Anwendung

Zur Analyse des Tragverhaltens der pflanzlichen Verzweigungen wird eine Methode weiterentwickelt, mit der aus den Bilddaten physischer Objekte digitale Simulationsmodelle (FE) generiert werden können.

Für beide Untersuchungsmethoden stehen Daten aus biomechanischen Versuchen, von Laser- und Mikro-CT-Scans verschiedener Verzweigungen von *S. arboricola* der PBG Freiburg zur Verfügung. Durch die Mikro-CT-Aufnahmen liegt pro Verzweigung ein Bilderstapel von circa 2000 Bildern in einer Auflösung von jeweils 1224 x 1224 Pixeln mit einer Pixelgröße von 21,64 µm vor. Die Bilderstapel werden in das Open-Source-Programm *Fiji* (Schindelin et al. 2012) geladen und bearbeitet (Beschneiden, Schwellwertanalyse), ähnlich des Vorgehens nach Bunk et al. (2017). Anhand des Plug-Ins *3dViewer* werden anschließend Oberflächennetze im Dateiformat STL exportiert (Resamplingfaktor 4, Schwellwert 50), was der Weiterverarbeitung in einem CAD-Programm dient.

Zur Beschreibung der Geometrie einer Verzweigung gilt im Folgenden die Definition in Bild 15, die im Allgemeinen für Verzweigungen mit annähernd geraden Ästen verwendet werden kann. Der Stamm- und Astdurchmesser der simulierten Verzweigungen von *S. arboricola* beträgt circa 8 mm und 6 mm.

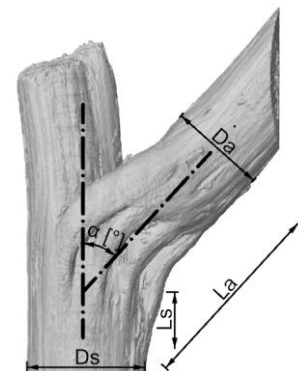


Bild 15:

Maßdefinition an einer Verzweigung

Ds Stammdurchmesser

Da Astdurchmesser

TVP Theor. Verzweigungspunkt
zw. Stamm- und Astachse

La Abstand TVP, Lastangriffspunkt

Ls Abstand TVP, Festhaltung

α Astneigungswinkel [°]

3.3.1. Parametrisiertes Stabwerkmodell

Abstrahieren von ‚Achsverläufen‘

Die Lage der Stabachsen wird aus dem Oberflächennetz erarbeitet. Hierzu werden mehrere horizontale Ebenen mit der Oberfläche der Verzweigung verschnitten. Die Schwerpunkte der Flächen, die von den resultierenden Schnittkurven, den Berandungen der verholzten Stränge, begrenzt werden, dienen als Stützstellen der Achslinien. In der Draufsicht wird eine Schrägstellung um circa 10° des Astes deutlich (Bild 16). Der Ansatz der verholzten Stränge am Stamm ist nicht exakt regelmäßig, so entspringt Einzelstrang 4 dem Stamm oberhalb der Nachbarstränge. Als Ansatzpunkt der Einzelstränge werden ihre Schnittpunkte mit der Oberfläche des Stamms verstanden. Es ist erkennbar, dass die Ansatzpunkte zum mittleren Einzelstrang hin überwiegend basaler liegen. Neben der bestehenden morphologischen und ontogenetischen Beschreibung der Verzweigung von *S. arboricola* erlaubt die mechanisch motivierte Erfassung der Achsen der verholzten Stränge zusätzlich strukturmechanische Untersuchungen an Stabwerkmodellen.

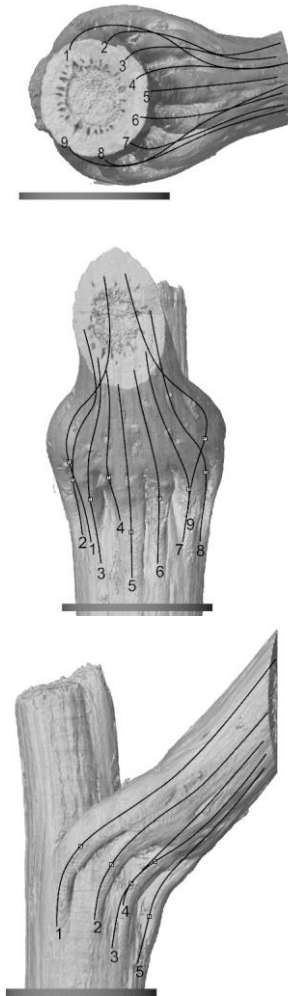


Bild 16:
Aus rekonstruierten μ CT Bilddaten
erzeugtes Oberflächennetz und
extrahierte Achsverläufe

Aufbau eines parametrischen Stabwerkmodells

Um den Einfluss verschiedener geometrischer Variationen auf das Tragverhalten untersuchen und die offenen Forschungsfragen behandeln zu können, wird ein Parametermodell aufgebaut, bei dem die Einzelstränge durch Stäbe modelliert werden (Bild 16).

Der Fokus der Untersuchung liegt auf dem Einfluss der unterschiedlichen Verläufe von Einzelsträngen. Der Stamm und der Ast werden im Modell nicht berücksichtigt, sondern nur der aufgelöste Übergangsbereich.

Die Kategorien für ein parametrisiertes Stabwerkmodell werden auf Basis der Untersuchungen an Araliaceae (Bunk et al. 2017) festgelegt und deren Werte innerhalb des in der Morphologie beschriebenen Bereichs gewählt. Die unterstrichenen Parameter stellen das Referenzmodell (0) dar, mit dem die Variationen verglichen werden und das einer ausgewählten Verzweigung von *S. arboricola* am nächsten kommt.

n_{VS}	Anzahl verholzter Stränge:	5, <u>9</u> , 13
u_U	Umgreifung des Stamms in %:	43, <u>66</u> , 87
α_A	Neigung der Ansatzebene in Grad:	0, <u>31</u>
κ_{VS}	Krümmung verholzter Stränge:	K_I , K_V , <u>K_S</u>
	Belastung durch eine Kraft:	F_V , F_H

mit:

- K_I Keine Krümmung, gerader Stabverlauf
- K_V Krümmung in vertikaler Richtung ausgeprägt
- K_S In zwei Richtungen gekrümmter Stabverlauf
- F_V Kraft, vertikal
- F_H Kraft, horizontal

Für beide Belastungen werden die Parameter aller vier Kategorien n_{VS} , u_U , α_A und κ_{VS} variiert, wobei stets nur eine Kategorie abgeändert wird und die Parameter der drei anderen auf dem Originalwert gesetzt bleiben, so dass sich pro Lastfall acht unterschiedliche Kombinationen ergeben.

Im Anschluss werden die Parameter des Modells noch in Anlehnung an natürlich vorkommende Variationen nach Tabelle 1 gesetzt.

Tabelle 1: Parameterkombinationen in Anlehnung der von Bunk et al. (2017) untersuchten Arten der Familie Araliaceae

Art	n_{Vs}	u_U	α_A	K_{Vs}
–	–	%	°	–
<i>S. arboricola</i>	9	66	31	K_s
<i>F. japonica</i>	13	66	0	K_v
<i>P. balfouriana</i>	5	66	0	K_s

Das parametrisierte Modell wird aus den abstrahierten Achsverläufen entwickelt (Bild 17). Dazu werden Vereinfachungen angenommen, wie die des symmetrischen Aufbaus. Ansatzpunkte werden auf einer elliptischen Bahn ($\alpha_A = 31^\circ$) bzw. auf einer Kreisbahn ($\alpha_A = 0^\circ$) mit gleichen Abständen entlang des Umfangs geführt. Außer im Modell $\alpha_A = 0^\circ$ befinden sich alle Ansatzpunkte am Stamm in einer Ebene, nichtsdestotrotz kann die Lage der Schwerpunkte der Ansatzpunkte verschieden sein. Für das Modell $\alpha_A = 0^\circ$ wird die horizontale Ebene, in der die Ansatzpunkte angreifen, auf die Höhe des Schwerpunkts des Referenzmodells verschoben.

Die Achsverläufe werden anhand von NURBS-Kurven (nicht-uniforme rationale B-Splines) angenähert, wobei Anfangs- und Endtangente parallel zur Stamm- bzw. Astachse orientiert sind. Die Achslinien schneiden Ellipsen unterschiedlicher Radien an mehreren Stützstellen gleichen Abstands entlang des Ellipsenumfangs. Die Kurve des mittleren Stranges liegt in einer auf den Stamm bezogen radialen Ebene und hat einen Wendepunkt. Die Krümmungen sind über den Verlauf veränderlich. Alle anderen Kurven haben veränderliche Krümmungen mit über den Verlauf der Kurve veränderlichen Hauptausrichtungen. Projiziert in die Seit- und Draufsicht liegt jeweils ein Wendepunkt vor.

Die Einzelstränge werden am Stamm eingespannt, da im untersuchten Vorbild Vouten an den Strängen ersichtlich sind (Bild 18). Die Einzelstränge werden bis zu einem Astquerschnitt, der senkrecht zur Astachse steht, geführt und miteinander gekoppelt. Der Lastangriffspunkt befindet sich im gemittelten Schwerpunkt der Einzelstrangenden. Für alle untersuchten Varianten beträgt der horizontale Abstand der Einzelkraft zur Stammachse 11,73 mm. Der vertikale Abstand des Ortes des Lastangriffs zum Schwerpunkt der Ansatzpunkte am Stamm des Referenzmodells beträgt 16,84 mm. Alle Einzelstränge werden im Referenzmodell vereinfacht mit Kreisquerschnitten mit einem Durchmesser von 2,00 mm modelliert. Varianten mit anderen Parametern werden volumengleich zum Referenzmodell erzeugt, indem die Stabdurchmesser angepasst werden, um eine Vergleichbarkeit der Modelle zu begünstigen. Die Berechnung wird geometrisch nichtlinear (mit großen Verformungen) mit linear-elastischem Material ($E = 3800 \text{ N/mm}^2$) mit den FE-Programmen Sofistik und Ansys durchgeführt.

3.3.2. Numerisch-mechanische Analyse

Daten aus bildgebenden Verfahren erlauben es, pflanzliche Verzweigungen spezifisch biomechanisch zu untersuchen. Dabei können Details der äußeren Form, wie einzelne Holzstränge, sowie mechanisch relevante innere Strukturen

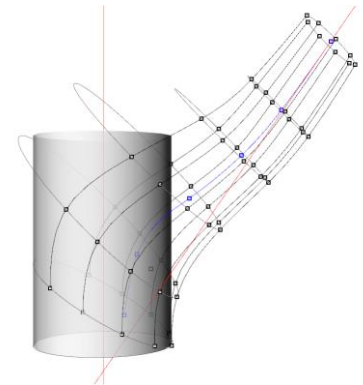


Bild 17: *S. arboricola*: Parametrisiertes Modell auf Basis von Geometriedaten einer abstrahierten Verzweigung

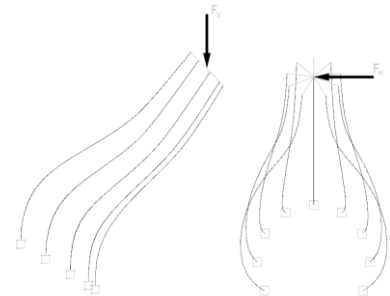


Bild 18: *S. arboricola*: Statisches System und Lastfälle des parametrisierten Modells mit einer Einspannung der Einzelstränge am Stamm und Kopplungen am Astende (grau)

detailliert erfasst werden und im Modell Berücksichtigung finden, um Verformungen und Spannungen vorgegebener Lastfälle zu berechnen (Bild 19).

In Kapitel 3.2 wird erläutert, welche Informationen die Methoden Laserscanning und Mikro-CT liefern können. Der resultierende Informationsgehalt der digitalen Geometriedaten, die für die FE-Simulation genutzt werden können, ist unterschiedlich.

Die Bandbreite erstreckt sich von der Verwendung eines Oberflächennetzes zur Berandung des Untersuchungsobjekts, über die Verwendung von Information über die innere Struktur, die auch in Abstufungen möglich ist, bis hin zur vollständigen Nutzung der Information aus dem Mikro-CT-Scan, in dem das Raster mit einer Auflösung von einem oder mehreren Voxeln direkt als Finites-Element mit Hexaeder-netz erfasst wird (Grun et al. 2018). Auch die Berechnung von orthotropen Materialeigenschaften basierend auf Stichproben von Strukturen mit unterschiedlichen Faseranordnungen und eine anschließende Berechnung am Gesamtmodell ist möglich (Ayadi et al. 2016). Letztere Vorgehensweisen können zu großen Gleichungssystemen führen und benötigen für die Zuordnung der Materialeigenschaften eine Referenztabelle, die zunächst ermittelt werden muss. Bei Bauteilen können die mechanischen Eigenschaften bzw. Grauwert-Dichte-Verhältnisse durch das Scannen des Untersuchungsobjekts zusammen mit Stoffen bekannter Eigenschaften bestimmt werden. Diese Beziehungen sind materialabhängig und können nicht-linear sein.

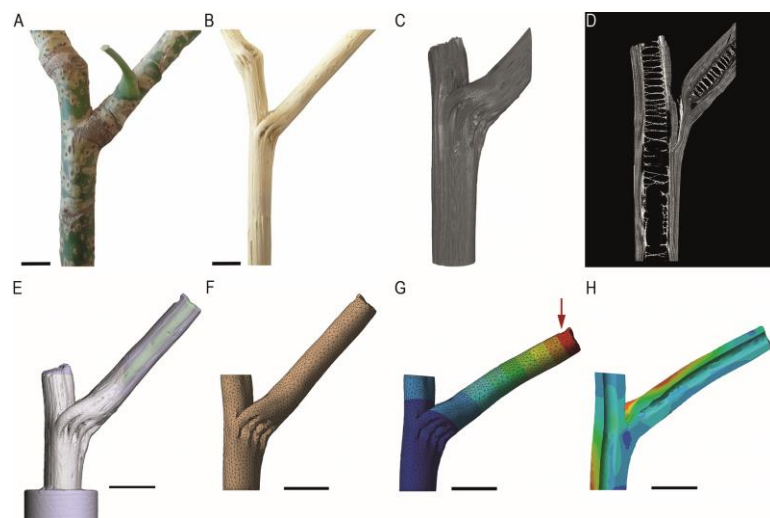


Bild 19: Biomechanische Simulation einer pflanzlichen Verzweigung (hier: *Schefflera arboricola*)

A: Untersuchungsobjekt ex situ, B: Präparation, hier: Trocknen und Entfernen des Cortex (Rinde), C: Rekonstruiertes 3D-Modell aus einem Graubildstapel einer Mikro-CT-Aufnahme, D: 2D-Graubild als Schnitt durch die Verzweigung, E: Aus Laser- und Mikro-CT-Scan zusammengesetzte Oberfläche des Untersuchungsobjekts, F: Volumennetz, G: FE-Simulation: Verformung unter Randbedingungen, H: Spannungen unter Randbedingungen (schematisch).

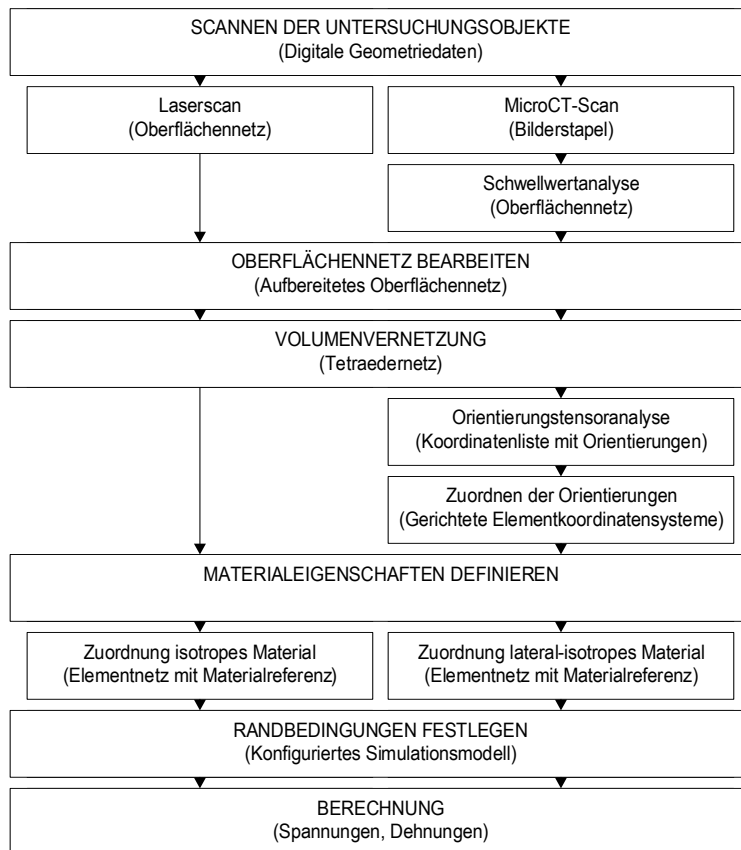
Bild A – D: © Katharina Bunk, PBG, Universität Freiburg

Die beiden erstgenannten Vorgehensweisen nutzen jeweils ein Oberflächennetz, das aus verschiedenen Quellen resultiert (Bild 20). Untersucht werden pflanzliche Verzweigungen, die eine faserartige verholzte Struktur aufweisen. Verholzte Strukturen können treffend mit einem anisotropen

Materialgesetz beschrieben werden (Ranz 2007). Die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften in den beiden Nebenrichtungen (tangential, radial) sind im Vergleich zur Hauptrichtung gering.

Für die untersuchte Verzweigung ist eine Differenzierung der beiden Nebenrichtungen aufgrund der vorhandenen Daten nicht möglich. Deshalb wird die vereinfachte Annahme getroffen, das Material transversal isotrop anstatt anisotrop in der Simulation zu berücksichtigen.

Anstatt die Materialeigenschaften direkt mit dem Grauwert zu korrelieren, wird die Orientierung der Fasern erarbeitet, um transversal isotropes Material zuzuordnen. Jedes Elementkoordinatensystem wird derart modifiziert, dass die x-Richtung parallel zur vorherrschenden Richtung in diesem Bereich liegt, um die Spannungen und Dehnungen für verschiedene Lastfälle zu berechnen.



Legende: GEMEINSAMER VORGANG, Spezifischer Vorgang / Methode, (Ergebnis)

Bild 20: Prozess zur Analyse der Biomechanik pflanzlicher Vorbilder basierend auf digitalen Geometriedaten

Mit dem gewählten Verhältnis der Elastizitätsmodule (Tabelle 2) des Holzes von $E_T : E_R : E_L$ mit $1 : 1 : 5$ (Schwager und Neinhuis 2016) ist die Hauptrichtung gegenüber den Nebenrichtungen weniger steif als für Nadelholz mit $1 : 1,7 : 20$ oder für Laubholz mit $1 : 1,7 : 13$ (Ranz 2007).

Tabelle 2: Annahme der Materialparameter für getrocknetes Holz von *S. arboricola* in Anlehnung an Schwager und Neinhuis (2016)

E_x	3800 MPa
$E_y/E_x, (E_y = E_z)$	0,20
$G_{xy}/E_x, (G_{xy} = G_{xz})$	0,12
G_{yz}/E_x	0,08
$\nu_{xy} = \nu_{xz}$	0,30
$\nu_{yz} = \nu_{zy}$	0,25
$\nu_{yx} = \nu_{yx}$	0,06

Für die Festigkeit des Holzes von *S. arboricola* in Längsrichtung ist aus internen Untersuchungen der PBG ein Wert der Druckfestigkeit von $f_x = 26,9$ MPa bekannt. Weitere Festigkeitswerte werden anhand der Festigkeitsverhältnisse von C24 skaliert. Als Bruchkriterium wird das Hashin-Kriterium verwendet.

Für die Berücksichtigung der Schädigung nach dem *continuum damage model* werden Parameter aus der Literatur (Sandhaas 2012) für Konstruktionsholz im Verhältnis übertragen. Die Parameter für den Zug- und Druckbereich werden näherungsweise als gleich groß angenommen (Tabelle 3).

Tabelle 3: Angenommene Schädigungsparameter für das CDM in Anlehnung an Sandhaas (2012).

$g_{c,f}$	5,00 N/mm
η_f	0,01
$g_{c,m}$	0,50 N/mm
η_m	0,01

mit:

- $g_{c,f}$ Dissipierte Energie pro Einheitsfläche, Faser
- η_f Viskosedämpfungsparameter, Faser
- $g_{c,m}$ Dissipierte Energie pro Einheitsfläche, Matrix
- η_m Viskosedämpfungsparameter, Matrix

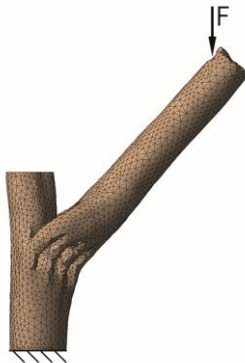


Bild 21: *S. arboricola*: statisches System und ein Lastfall des Volumenmodells mit einer Einspannung am Stamm und einer vertikalen Belastung am Astende

Die Berechnungen im Programm ANSYS erfolgen geometrisch nichtlinear mit exakten Verformungen, mit dem Schädigungsmodell (CDM) mit quadratischen Tetraederelementen (SOLID 187) unter Aufbringung einer Verschiebung am Astende und einer Einspannung am Stamm (Bild 21). Die für die Schädigungsberechnung verwendete Steifigkeitsmatrix lautet (vgl. Gross et al. 2016):

$$\sigma_{ij} = C_{d,ij} \epsilon_{ij} = (1 - d) C_{ij} \epsilon_{ij} \quad \text{Gl. 1}$$

- σ_{ij} Spannungen
- $C_{d,ij}$ Abgeminderte Steifigkeitsmatrix
- C_{ij} Steifigkeitsmatrix
- ϵ_{ij} Dehnungen
- d Schädigungsparameter

Die Ergebnisse der numerischen Berechnungen an einer Verzweigung von *S. arboricola* zeigen, dass sich mit linear-elastischem Material, das isotrop oder transversal isotrop definiert wird, die in den Versuchen beobachteten Versagensmechanismen nicht oder nur unzureichend abbilden lassen. Erst durch die Berücksichtigung der Schädigung zeigen die Simulationen ein Verhalten, das mit dem aus biomechanischen Versuchen übereinstimmt. Unter den gegebenen Annahmen sind die Ergebnisse allerdings als qualitative Indikatoren aufzufassen und haben keine quantitative Aussagekraft. Nichtsdestotrotz zeigen die Simulationen mit

Volumenmodellen wie auch die parametrischen Modelle, auch mit Kompensation der unterschiedlichen Randbedingungen, gegenüber den Belastungsversuchen steiferes Verhalten im Lastverformungsdiagramm.

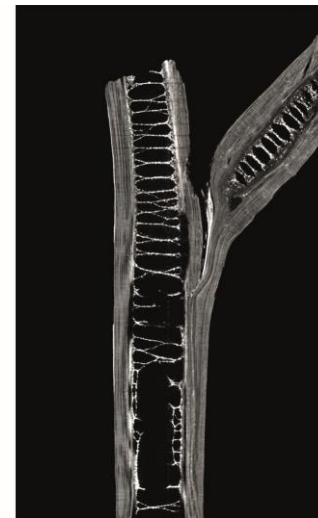
Vorgehensweise zur Berücksichtigung der Faserorientierungen bei der biomechanischen Analyse pflanzlicher Verzweigungen
Anhand von Mikro-CT-Scans werden Bilderstapel erzeugt, die die räumliche innere Struktur der Untersuchungsobjekte darstellen (Bild 22 A). Die Grauwerte der Bilder entstehen durch Detektion der Reststrahlung beim Durchdringen der Untersuchungsobjekte. Je heller ein Bereich dargestellt wird, umso dichter und dicker ist die Materialanordnung in diesem. Aus der Helligkeit lässt sich indes nicht direkt auf die Dichte oder die mechanischen Eigenschaften rückschließen.

Jeder Pixel eines Bildes enthält die Information eines Grauwertes (Integerwert von 0 – 255). Man spricht im Räumlichen von einem Voxel analog zum Pixel in einem zweidimensionalen Bild. Aus der Verteilung der Grauwerte lassen sich typische Merkmale zur Trennung vom Hintergrund oder zur Eingrenzung des Untersuchungsbereichs ermitteln (Bild 22 B). Um mathematische Operationen auszuführen, wird jedes Bild als Matrix erfasst, deren Einträge dem Farbwert eines Farbraumes, hier ein Bit (2^8), entsprechen. Der geometrische Ort in Koordinatenform eines Bildpunktes bezogen auf eine Ecke als Ursprung des Bilderstapels berechnet sich anhand des Rastermaßes der zugrundeliegenden Bildinformation durch Multiplikation der Indices mit dem Skalar der Rasterweite.

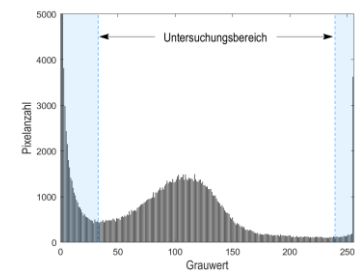
Dunkle Bereiche, die nicht analysiert werden sollen, sind zum Beispiel der Hintergrund und Löcher im Untersuchungsobjekt. Weiße Bereiche können im Beispiel die sehr hellen Markbereiche sein (Bild 22 A). Histogramme der vorkommenden Grauwerte erleichtern die Wahl der Schwellwerte (Bild 22 B) zur Festlegung des Untersuchungsbereichs. Günstig ist es, wenn der Hauptanteil der vorkommenden Grauwerte des zu analysierenden Bereichs sich im Histogramm deutlich von den auszuschließenden Bereichen abhebt.

Im Beispiel von *S. arboricola* (Bsp. ‚Schefflera 4d‘, PBG Nomenklatur) ist die Kantenlänge eines Voxels $21,64 \mu\text{m}$, was auch dem Abstand benachbarter Einzelbilder entspricht. Das heißt, die Länge erkannter Objekte mit beispielsweise einer Voxelanzahl von 27 Voxel beträgt bei würfelförmiger Anordnung minimal $0,06 \text{ mm}$ und bei linearer Anordnung maximal $0,58 \text{ mm}$, sofern die Anordnung in Richtung der Raumdiagonale mit $1,01 \text{ mm}$ ausgeschlossen wird. Bezogen auf den hierarchischen Aufbau von pflanzlichen Stämmen (vgl. Kapitel 2) können mit dieser Methode Objekte und Strukturen im Bereich der mikroskopischen Ebene und größer untersucht werden, nicht jedoch Eigenschaften im Bereich der ultrastrukturellen Ebene, wie dem Aufbau der Zellwände und der Orientierung von Zellulosefibrillen. Im Zusammenhang mit dieser Untersuchungsmethode wird der Begriff ‚Faser‘ allgemein für längliche Objekte verwendet. Ein Rückschluss auf die Materialart oder deren chemische Zusammensetzung ist ohne weiteres nicht möglich.

Laut biologischer Definition handelt es sich bei Fasern um lange schlanke Sklerenchymzellen, die für das pflanzliche Gewebe Festigungs- und Stützelemente sind. Diese Fasern können aus unterschiedlichem Zellmaterial bestehen, wie Bastfasern (Hanf, Jute, etc.) oder auch aus Xylem (Holz),



A



B

Bild 22:
Analyse am Mikro-CT-Bild des Verzweigungsbereichs von *S. arboricola*

A: Lateraler Schnitt, 8-bit Graubild aufgenommen durch PBG

B: Histogramm: Große Anzahl an Werten im sehr dunklen Bereich (Hintergrundrauschen), Grauwerte mittleren Bereichs (Untersuchungsbereich) und sehr helle Bereiche (Markbereich)

oder nicht lignifiziert sein. Auch Fasern wie Tracheiden, die andere Funktionen wie die der Wasserleitung erfüllen, sind anzuführen.

Das erstellte Programm¹ analysiert Faserorientierungen anhand digitaler Bilddaten (2D und 3D) mit Grauwertinformation (Bild 23). Ergebnis der Analyse sind Listen, die bereichsweise mittlere Orientierungen eines Bildes oder Bilderstapels beinhalten. Die Ergebnisse liegen für einen quadratischen bzw. würfelförmigen Rasterbereich vor, dessen Größe mit einem Parameter festgelegt wird. Jeder Rasterbereich kann mehrere Objekte enthalten. Für jedes Element des Rasters liegen pro Objekt und als Mittelwerte nach der Analyse folgende Information vor: zugehörige Pixel bzw. Voxel und deren Lage, Flächeninhalte bzw. Volumen, Schwerpunkt, Umrandung bzw. Oberfläche sowie die Hauptrichtung der Anordnung der Pixel (Voxel) in dieser Region in Form eines Winkels (2D) beziehungsweise zweier Winkel (3D) sowie ihre Eindeutigkeit. Anstatt Winkel und Skalare als Ergebnis auszugeben, enthält die Liste Vektoren und zugehörige Eigenwerte.

Der Ablauf des Programms gliedert sich wie folgt:



Legende: VORGANG, (Zwischenergebnis)

Bild 23: Ablauf des Programms zur Analyse von Faserorientierungen, Schritt „Orientierungstensoranalyse“ in Bild 20

Ein wichtiger Schritt nach dem Festlegen des Untersuchungsbereichs via Eingrenzung des untersuchten Grauwertumfangs und der Rasterung ist die Segmentierung, die Umwandlung der Graubilder in binäre Bilder, mit Werten von 0 und 1. Damit lassen sich Verfahren der Bildanalyse wie die „blob“-Analyse (binary large objects) einsetzen, die Information von Objekten gleicher Eigenschaft eines Bildes ermitteln können.

¹ Das Programm wird mit MATLAB© erstellt. Teilweise, wie für die „blob“-Analyse, kann auf kommerzielle Programmbibliotheken (ML) zurückgegriffen werden. Die Schnittstelle zum Ergebnis-Mapping zwischen dem Faseranalyse-Programm und der FE-Software wird anhand von Textdateien, die mit einem VBA-Programm bearbeitet werden, realisiert. Die Ergebnisse der Analyse werden mit Rhino/Grasshopper visualisiert und kontrolliert.

Wird das Untersuchungsobjekt im Bild vom Hintergrund freigestellt, so ermittelt das adaptive Verfahren eine harte Grenzlinie (2D) bzw. eine Grenzoberfläche (3D) am Rand des Objekts, das in der nachfolgenden Orientierungsanalyse eine Verzerrung der Ergebnisse verursacht. Durch Modifikation der Eingabedatei, also durch Verändern des Grauwertes des Hintergrunds von schwarz zum Wert des Mittelwertes des gesamten Randbereichs wird dieses Problem vermieden (Bild 24). Für im Bild getrennte Fasern können gut Orientierungen ermittelt werden. Um zusammenhängende Bereiche zu trennen wird das Verfahren der Erosion (Bild 25) eingesetzt, das die Ausdehnung eines Objekts verringert (Marques 2011)^{ML}.

Als Segmentierungsmethode eingesetzt werden hier verschiedene Schwellwertverfahren wie globale Schwellenwerte, die manuell gesetzt werden oder automatisch ermittelt werden (Otsu 1979)^{ML}, sowie lokale Schwellwertverfahren, mit denen Schwellenwerte nicht für das ganze Bild einheitlich, sondern pro Pixel aus einer vorgegebenen Anzahl an Pixeln in der Umgebung statistisch berechnet werden (Bradley und Roth 2011). Dieses adaptive Schwellwertverfahren liefert für die untersuchte Verzweigung, im Vergleich zu den beiden vorgenannten Verfahren, die besten Ergebnisse. Einen Überblick über weitere Segmentierungsmethoden gibt Wirjadi (2007).

Alle Objekte gleicher Eigenschaft eines jeden Rasterbereichs werden analysiert und ihre Orientierung je nach Ausdehnung pro Objekt bestimmt. Sie sind in Bild 26 als Ellipsen dargestellt. Als zusätzliche Filterbedingung wird eine Mindestgröße für Objekte festgelegt, die weiterverarbeitet werden. Außerdem müssen sie ein Schlankheitskriterium, berechnet aus dem Quotienten der Beträge der 1. und 2. Hauptrichtung des Richtungsvektors, erfüllen. Beide Parameter sind spezifisch auf das Untersuchungsobjekt abzustimmen.

Die Wahl des Rasterbereichs beeinflusst die enthaltenen Objekte, da an den Grenzen eine Trennung erfolgt. Diese Trennung ist vor allem bei großen zusammenhängenden Strukturen notwendig, kann aber das Ergebnis beeinflussen. Liegt zum Beispiel eine gekrümmte Faser gänzlich innerhalb eines Rasterbereichs, so wird die Orientierung der ganzen Faser berechnet, wird die Faser jedoch mehrfach geschnitten, so werden als Orientierungsergebnisse Tangenten der Faser an mehreren Punkten erhalten. Je nach gewählter Rasterbereichsgröße liegen unterschiedliche Ergebnisdichten vor.

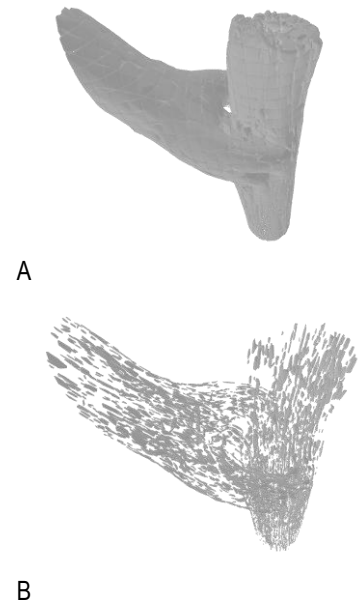


Bild 24: Separation zusammenhängender flächiger Bereiche nahe der Oberfläche durch Modifikation und Erosion als Input für die Orientierungsanalyse
A: Modell ohne Modifikation
B: Modell mit Erosion

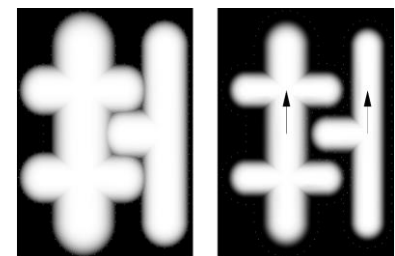


Bild 25: Effekt der Erosion zur Trennung von Objekten

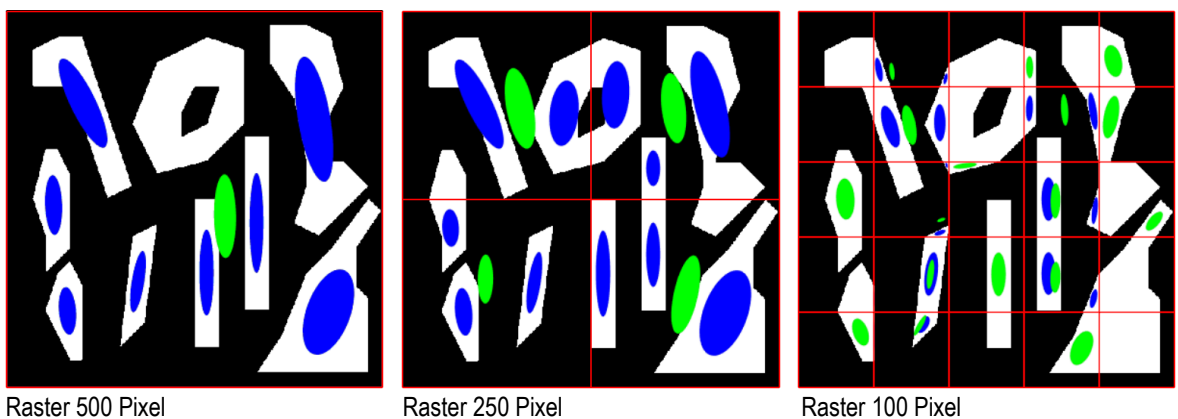


Bild 26: Analyseergebnisse mit unterschiedlichen Rastergrößen eines binären Bildes mit 500 x 500 Pixel
Grüne Ellipsen: Ergebnis gemittelt, Blaue Ellipsen: Ergebnis pro Objekt

Der Einheitsvektor der Orientierung ist im Räumlichen in Polarkoordinaten definiert zu (Kastner et al. 2008):

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2}$$

Die mittlere Orientierung eines Rasterelements wird aus dem dyadischen Produkt jeder einzelnen Orientierung berechnet und anhand der Ausdehnung (2D: Flächeninhalt, 3D: Volumen) jedes einzelnen enthaltenen Objekts gewichtet ermittelt (Clarke und Eberhardt 2002):

$$\mathbf{a}_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^n w^k} \left(\sum_{k=1}^n w^k \mathbf{p}_i^k \otimes \mathbf{p}_j^k \right) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 3}$$

Nach einer Hauptachsentransformation des Orientierungstensors werden die Eigenwerte λ_i und die Eigenvektoren \mathbf{e}_i erhalten. Die Orientierungstensenoren können als Ellipsoid im Raum dargestellt werden, indem die Vektoren, erhalten durch die Multiplikation der Einheitsvektoren mit den Eigenwerten, als drei Hauptachsen entsprechend interpretiert werden (Gruber et al. 2011). Bild 27 zeigt die Häufigkeitsverteilung der analysierten Eigenwerte für unterschiedliche Parameter des Schlankheitskriteriums (Analyse: Bild 22).

Die Summe der Diagonalelemente des Orientierungstensors ist stets gleich eins. Gilt $a_{11} = a_{22} = a_{33}$, so liegt keine eindeutige Orientierung vor, für eine Orientierung parallel zur x-Achse ist beispielsweise $a_{11} = 1$, $a_{22} = 0$ und $a_{33} = 0$ (Kastner et al. 2008).

Die Schwerpunkte der resultierenden mittleren Orientierungen werden ebenfalls gewichtet berechnet:

$$\mathbf{x}_s = \frac{1}{\sum_{k=1}^n w^k} \left(\sum_{k=1}^n w^k \mathbf{s}^k \right) = \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 4}$$

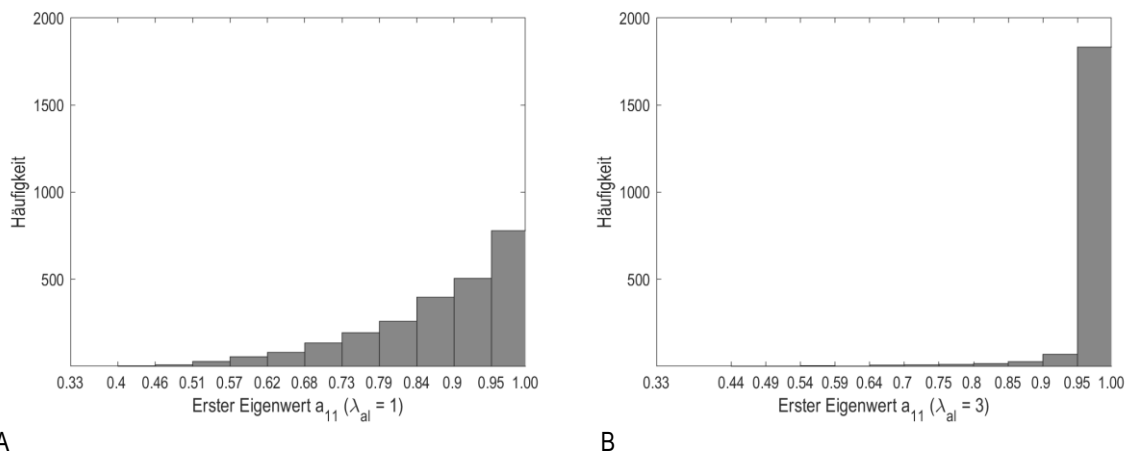


Bild 27: Histogramme der ersten Eigenwerte der Orientierungsvektoren
 A: Schlankheitskriterium $\lambda_{al} = 1$, B: Schlankheitskriterium $\lambda_{al} = 3$

Die Orientierungsanalyse für die ausgewählte Verzweigung der *S. arboricola* erfolgt am Bilderstapel im Räumlichen. Zur Veranschaulichung sind die Ergebnisse für einen transversalen Schnitt dargestellt (Bild 28).

Nach der Segmentierung ist eine faserartige Struktur zu erkennen, deren Hauptrichtungen in vielen Bereichen tendenziell in ähnlicher Richtung wie der Stammachse und der Astachse verläuft.

Besonders interessant sind die Orientierungsergebnisse in den Einzelsträngen. Sie sind überwiegend entlang der äußeren Kontur angeordnet, werden zum Markbereich hin aber auch in wenig ausgeprägter und anderer Orientierung vorgefunden.

Die Umrechnung der Ergebnisse in Mittelwerte pro Rasterelement homogenisiert die unterschiedlichen Richtungen in einem Bereich.

Der Vorteil ist hierbei, dass auch kleine Objekte einen Beitrag zur Ausrichtung liefern können, die beim Mapping auf das Finite-Element-Netz ansonsten verloren gingen.

Der Untersuchungsbereich des Bildes schließt sehr helle Bereiche im Markbereich ein, von dem angenommen wird, dass er geringen Einfluss auf die mechanische Analyse hat. Diese enthalten linsenförmige Hohlräume, die vermutlich auf starkes Schwinden beim Trocknungsvorgang zurückzuführen sind. Die Ergebnisse im Markbereich sind bei kleiner Rastergröße unschädlich für das FE-Modell, da die Berücksichtigung nur für die verholzten Bereiche und nicht für den Markbereich erfolgt.

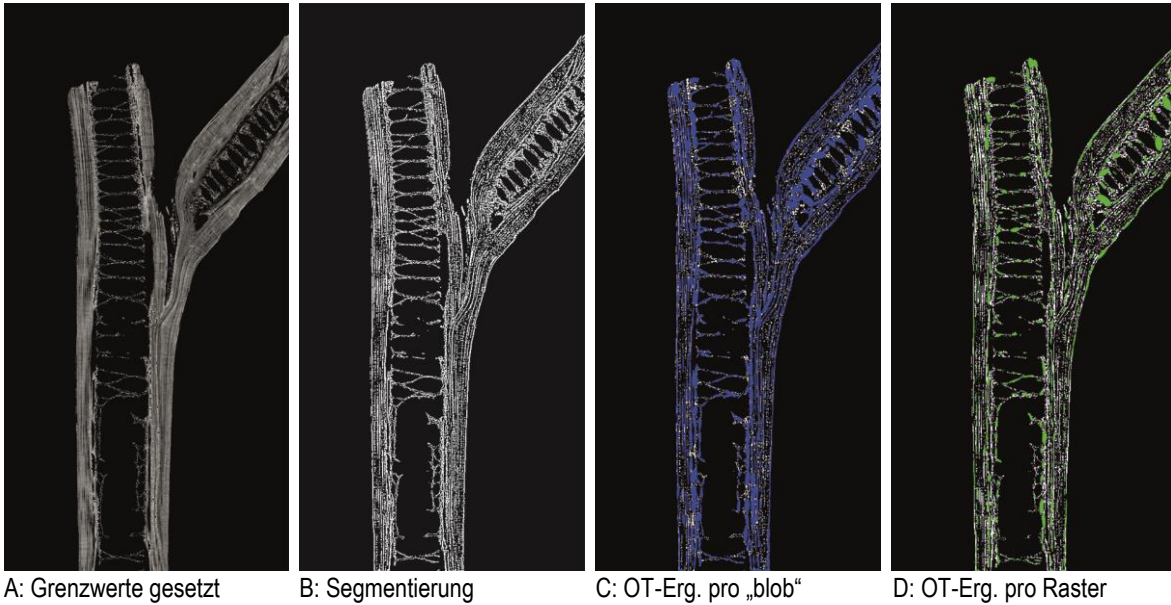


Bild 28: Ergebnisse der Orientierungstensoranalyse am Beispiel von *S. arboricola*

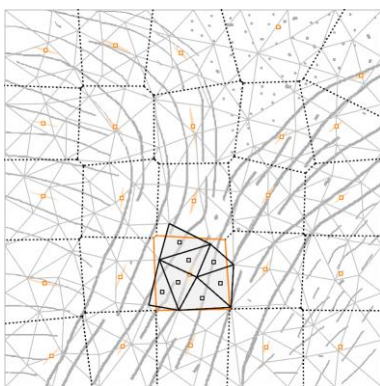
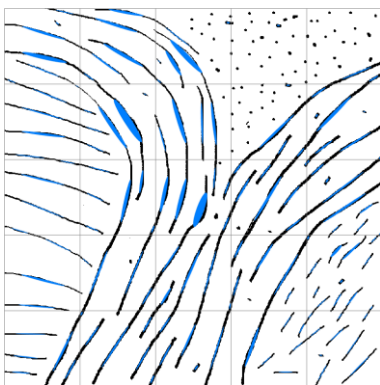


Bild 29:
 Orientierungsergebnis (2D) eines theoretischen Beispiels
 A: Rasterbezogene OT-Erg. pro „blob“
 B: Rasterbezogene gemittelte OT-Erg. und Mapping auf FE-Netz (Schema)

Um die Richtungsinformation in das FE-Modell zu übertragen, werden die Elementkoordinatensysteme basierend auf dem jeweils nächstgelegenen Orientierungsergebnis rotiert (Bild 29).

Die Anzahl der Rasterbereiche und FE-Elemente drückt indirekt die Rasterbereichsdichte beziehungsweise die Netzdichte aus. Ist die Anzahl der FE-Elemente mindestens so groß wie die Anzahl an Rasterbereichen, können alle gemittelten Ergebnisse des Rasters in der Berechnung Berücksichtigung finden. Im Beispiel werden Verhältnisse der Anzahlen der Rasterbereiche zu den FE-Elementen von 5 bis 20 gewählt.

Bei durch die Rasterung angeschnittenen Objekten kann es systematisch zu falschen Ergebnissen der Orientierungsanalyse kommen. Zu unterscheiden sind flächige Objekte und linienförmige Objekte. Flächige Objekte, wie an der Oberfläche, können durch eine Modifikation vermieden werden. Wenn eine Faser (linienförmiges Objekt) an den Enden geschnitten wird, so ist die Ermittlung der Orientierung valide möglich. Wird eine Faser jedoch so durchtrennt, dass zum Beispiel die Breite die längste Seite darstellt, wird eine Orientierung abweichend zur eigentlichen Längsrichtung ermittelt. Das Problem kann sowohl bei einfachen Objekten auftreten als auch bei Körpern, die hauptsächlich nahe einer Kante liegen und vierfach angeschnitten werden. Das Ergebnis für diese Objekte kann demnach zufällig richtig sein oder aber falsch.

Wegen der großen Ausdehnung zusammenhängender Bereiche ist eine Unterteilung durch das Raster jedoch unerlässlich, um Orientierungen entlang des Verlaufs von faserartigen Strängen zu erfassen.

Zusätzliche Filterbedingungen reduzieren nicht valide Ergebnisse der Orientierungsermittlung, wie die Kriterien der Mindestgröße V_{al} und der Mindestschlankheit λ_{al} . Es handelt sich um eine global wirkende Maßnahme, die Abhilfe zwar nicht spezifisch für jeden Fall schafft, aber über alle Ergebnisse die Qualität insgesamt verbessert.

3.4. Ergebnisse für *Schefflera arboricola*

3.4.1. Ergebnisse des Parametermodells

Für beide Belastungen, die horizontale und vertikale Einzelkraft, werden Traglastberechnungen aller Varianten durchgeführt und die Verformungen sowie die Normalkräfte in den Stäben dargestellt (Bild 30 bis Bild 33). Verschiebungen und Verdrehungen am Astende aller Einzelstränge sind im theoretischen Schwerpunkt des Astanschnitts gekoppelt und die Fußpunkte eingespannt. Es handelt sich um ein mehrfach statisch unbestimmtes System. Der Begriff Steifigkeit bezieht sich hier auf ein mit einer Einzelkraft belastetes Gesamtsystem und dessen Verformung am Astende. Die Ergebnisse in Bezug auf die offenen Fragen aus Kapitel 3.2 wurden am parametrisierten Modell basierend auf einer Verzweigung von *S. arboricola* ermittelt (Bild 30 – Bild 33).

1. Die gegenüber dem Referenzmodell größere Umgreifung führt nicht zu einer höheren Steifigkeit, sondern, wie auch eine kleinere Umgreifung, zu einem nachgiebigeren System (vgl. Bild 30, Bild 34: Verformung, $u_U = 43\%$, $0, u_U = 87\%$). Aussagen über die Verhältnisse zur Hydromechanik können mit der gewählten Methode nicht getroffen werden.

2. Der „hierarchische“ Ansatz (Fall „0“) $\alpha_A = 31^\circ$, also der Höhenversatz der Ansatzpunkte der Stränge am Stamm führt gegenüber der Variante $\alpha_A = 0^\circ$ für vertikale Belastungen zu einem steiferen Verhalten. Für horizontale Belastungen ergibt sich ein nicht aussagekräftiger geringer Unterschied.

3. Wie vermutet rufen vertikale Belastungen Druck- und Zugnormalkräfte hervor, wobei die äußersten Stränge am höchsten zugkraftbelastet sind und der mittlere die größte Drucknormalkraft erfährt (Bild 32, Fall 0). Die Kräfte der dazwischenliegenden Stränge sind zwischen diesen beiden Extremen abgestuft.

Die Aufweitung, die zum Verzweigungspunkt hin zunehmenden Abstände der Einzelstränge zur Astachse, führt für vertikale Einzelkräfte zu einer vergrößerten Nachgiebigkeit. Diese ändert sich für horizontale Einzelkräfte gegenüber nicht aufgeweiteten Varianten nur geringfügig. Obwohl die Einzelquerschnitte der Einzelstränge nicht miteinander verbunden sind (das Ebenbleiben der Querschnitte ist per se nicht gegeben, eventuell aber durch Stabsteifigkeitsverhältnisse in guter Näherung annehmbar), steigt das Flächenträgheitsmoment durch den zunehmenden Abstand der Querschnittseinzelflächen zum TVP hin tendenziell an, wenn auch nicht wie bei verbundenen Querschnitten quadratisch. Gegenläufig zu diesem Effekt ist die Nachgiebigkeit des Einzelstrangs: Diese nimmt mit zunehmender Krümmung ebenfalls zu.

Bemerkenswert sind die Varianten $\alpha_A = 0^\circ$ und insbesondere $u_U = 87\%$: Nicht die äußeren Stränge weisen hier die höchsten Zugkräfte auf, sondern die den äußeren Strängen jeweils nächstgelegenen (Bild 32). Für die Variante $\alpha_A = 0^\circ$ trifft dies bis zu einer Verformung von circa 3 mm zu, für die Variante $u_U = 87\%$ gänzlich. Bei allen anderen Varianten sind die jeweils äußersten Stränge am stärksten

zugbeansprucht. Bei kleiner Umgreifung ($\alpha_A = 43\%$) und wenig gekrümmtem bzw. geradem Verlauf ($\kappa_{Vs} = K_v$ und $\kappa_{Vs} = K$) ist dieser Effekt nicht nachweisbar. Hier sind die äußersten Einzelstränge betragsmäßig am höchsten normalkraftbelastet. Dies deutet auf die Stützung der Hypothese der angepassten Verläufe insofern hin, dass im Referenzmodell die gekrümmten Achsverläufe durch Beeinflussung der geometrischen Steifigkeit die Beträge der Beanspruchungen auf mehrere Stränge gleichmäßiger verteilen, als es bei manchen Varianten der Fall ist.

Unter vertikaler Belastung tritt das größte Biegemoment im Einzelstrang an der Einspannstelle der äußersten Stränge auf, das zweitgrößte im mittleren Strang. Während die größten Biegebeanspruchungen bei zugbeanspruchten Einzelsträngen an der Einspannstelle auftreten, liegen sie bei den druckbeanspruchten am Ort der größten unteren Krümmung.

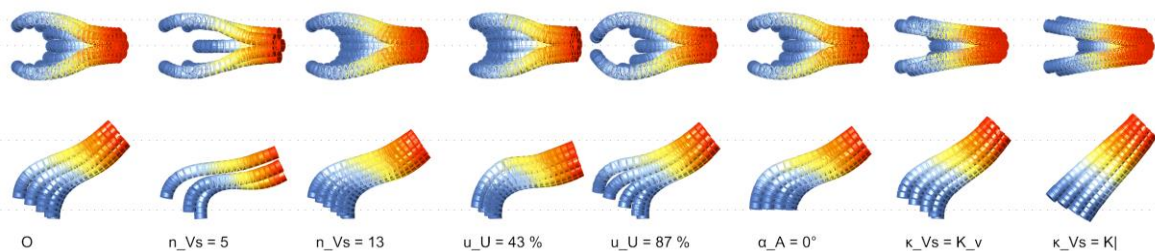


Bild 30: Verformungen des Parametermodells für eine vertikale Belastung von $F_v = 170\text{ N}$

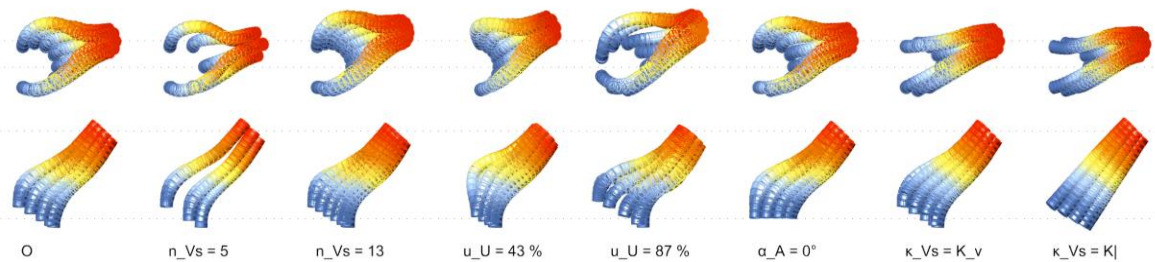


Bild 31: Verformungen des Parametermodells für eine horizontale Belastung von $F_h = 350\text{ N}$

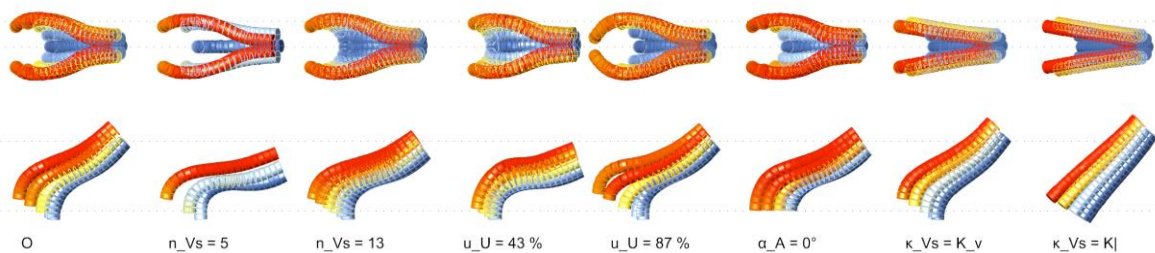


Bild 32: Normalkräfte des Parametermodells für eine vertikale Belastung von $F_v = 170\text{ N}$

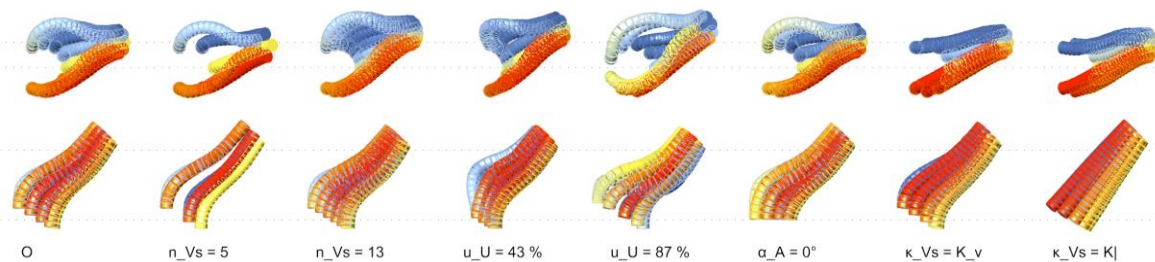


Bild 33: Normalkräfte des Parametermodells für eine horizontale Belastung von $F_h = 350\text{ N}$

4. Im Referenzmodell stellt sich für vertikale Belastungen tendenziell zunächst eine Spannungsüberschreitung der äußeren Einzelstränge auf Zug und bei weiterer Belastung des mittleren Einzelstrangs auf Druck ein (vgl. Slater et al. 2015, Typ I, Versagen erst im Druckbereich, dann im Zugbereich). Dies deutet zwar darauf hin, dass die Stränge nacheinander versagen, hat aber praktisch vermutlich keine Bedeutung, da die Belastung in der Simulation weggesteuert aufgebracht wird und die Belastung in der Realität durch eine Kraft stattfindet (Wind, Eigengewicht). Das heißt, in situ kann nach Versagensinitiierung die Last nicht weiter gesteigert werden.

5. Um Durchdringungen im Cortex, wie sie bei geraden Stäben auftreten würden, zu vermeiden, sind gekrümmte Stränge notwendig. Umso größer die Umgreifung, umso stärker sind die gekrümmten Verläufe.

Für die Varianten mit Parametern in Anlehnung an die in pflanzlichen Beispielverzweigungen vorkommenden Merkmale (Tabelle 1) wird festgestellt, dass der Einfluss des Parameters der Einzelstranganzahl alle anderen dominiert. Die Ergebnisse sind unwesentlich verschieden von den Varianten $n_Vs = 5$ bzw. $n_Vs = 13$.

Bezogen auf die Parameter kann festgehalten werden: Der Winkel der Ebene der Ansatzpunkte und auch das Einfügen von Krümmungen führen für vertikale Belastungen zu einer größeren Nachgiebigkeit des Gesamtsystems. Bei horizontalen Belastungen beeinflusst der Krümmungsparameter das Verformungsverhalten, da druckbeanspruchte gerade Stränge gegenüber Varianten mit gekrümmten nach innen ausweichen. Die Erhöhung der Anzahl der Stränge führt ebenfalls zu einem nachgiebigeren System.

Spannungswerte, die mit einer wahrscheinlichen Annahme Spannungsversagen hervorrufen (> 20 MPa), treten in den Modellen bereits bei 0,2 mm Verformung auf (Bild 34). Das Referenzmodell zeigt eine stetige Zunahme der aufnehmbaren Kraft: Zunächst reagiert das System nachgiebig, versteift sich aber mit zunehmender Last wieder, ohne ein Stabilitätsversagen aufzuweisen.

Die Ansatzpunkte auf einer Ebene zu halten, führt zu einem stets nachgiebigeren Verhalten. Die Modelle mit fünf Stäben weisen ein steiferes Tragverhalten auf. Da die Stäbe zu einem großen Teil durch Momente beansprucht werden, generiert die Reduktion der Stabanzahl bei gleichem Volumen vermutlich ein steiferes Verhalten, da die größeren Querschnitte eine überproportional höhere Querschnittssteifigkeit besitzen. Eine weitreichendere Umgreifung wirkt sich zunächst nicht aus. Im höher beanspruchten Bereich reagiert dieses System nachgiebiger als die Referenz, während eine kleinere Umgreifung bereits im anfänglichen und mittleren Bereich nachgiebiger und am Ende des dargestellten Bereichs etwas steifer reagiert. Im Modell mit großer Umgreifung ist das äußerste Einzelstrangpaar wie im Referenzmodell nicht mehr dasjenige mit der größten Momentenbeanspruchung. Im Anfangsbereich zeigen auch die Modelle mit geraden bzw. nur vertikal gekrümmten Stäben ein steiferes Tragverhalten, weisen jedoch bereits nach circa 5 – 7 mm ein lokales Tragfähigkeitsmaximum (Stabilitätsversagen) auf.

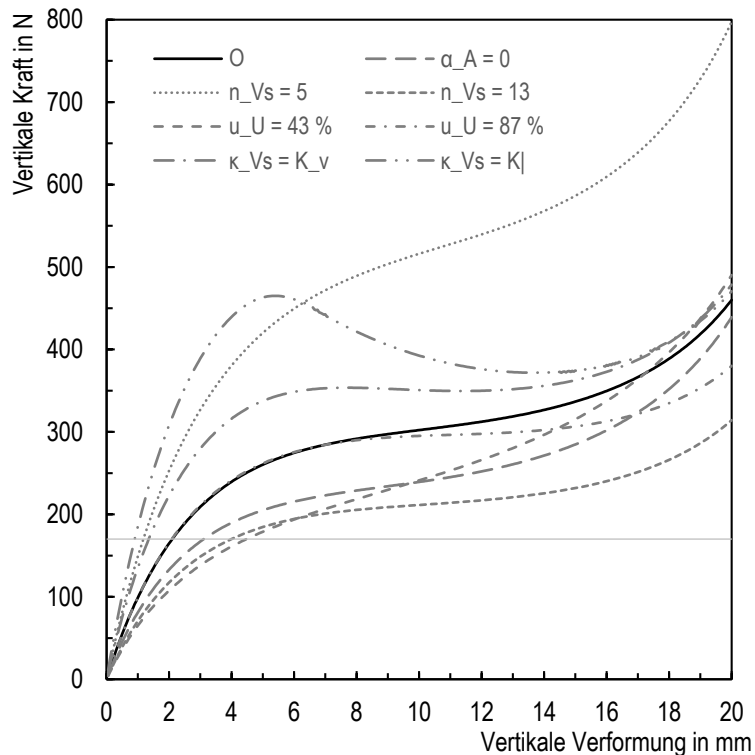


Bild 34: Lastverformungsdiagramm für eine vertikale Einzellast am Astende mit eingespannter Lagerung der Einzelstränge am Ansatzpunkt am Stamm

Die Modelle mit den veränderten Krümmungen können wegen Durchdringungen der Stäbe bzw. aufgrund des engen Anliegens am Stamm in der Realität nicht vorkommen.

Um eine Verformung von 10 mm zu erreichen, ist für horizontale Belastungen das 2,5-Fache des Betrags der vertikalen Belastung notwendig, wobei zum Lastabtrag vier der neun Stränge zugbeansprucht und vier druckbeansprucht sind. Der mittlere Einzelstrang ist nahezu ausschließlich biegebeansprucht. Im Bereich von 0,2 mm werden die anzunehmenden Höchstspannungen überschritten. Die Lastverformungskurve des Referenzmodells zeigt annähernd zwei lineare Bereiche auf, wobei die Steifigkeit des zweiten Bereichs geringer ist als die des ersten (Bild 35).

Eine horizontale Anordnung der Ansatzpunkte der Stränge am Stamm ändert die Lastverformungskurve hin zu einer annähernd linearen Kurve, deren Neigung am Anfang nur etwas geringer als die der Referenzkurve ist und diese später schneidet. Auch hier zeigt das Modell mit fünf Strängen ein steiferes Verhalten. Die Modelle mit anderen Krümmungen weisen geringere Traglasten auf. Das System mit geraden Stäben zeigt kein Stabilitätsversagen, mit nur vertikal gekrümmten Stäben deutet sich eine Verzweigung der Lastverformungskurve bei circa 6 mm an. Die Lastverformungskurven der Modelle mit geringerer und höherer Umgreifung unterscheiden sich nur geringfügig voneinander und führen in beiden Fällen zu einem nachgiebigeren Tragverhalten.

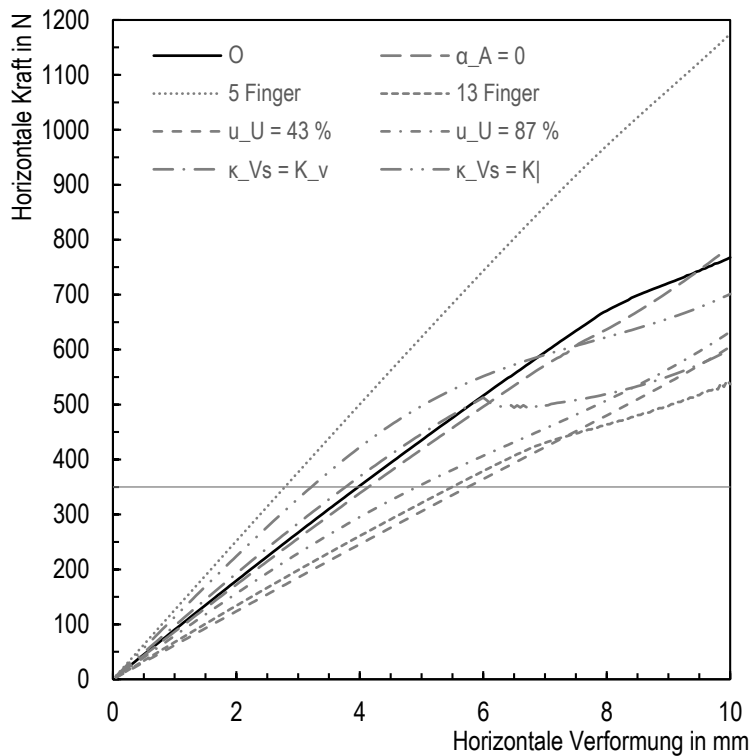


Bild 35: Lastverformungsdiagramm für eine horizontale Einzellast am Astende mit eingespannter Lagerung der einzelnen Einzelstränge am Ansatzpunkt

Kennzeichnend für das Tragverhalten ist ein Einknicken des mittleren druckbeanspruchten Einzelstrangs (O). Dies zeigen sowohl experimentelle Untersuchungen der PBG als auch die Ergebnisse des parametrischen Stabwerkmodells. Bemerkenswert ist das Auftreten eines gegendrehenden Moments am mittleren Einzelstrang nahe der Einspannstelle (Bild 36). Dieser Effekt zeigt sich im Modell mit dem Parameter $\alpha_A = 0^\circ$ nicht. Die Höchstwerte der Normalkräfte und der Biegemomente sind im Referenzmodell jeweils geringer. In beiden Fällen führt eine Drucknormalkraft (resultierend aus vertikaler äußerer Last) wegen der starken Anfangskrümmung des mittleren Einzelstrangs, die am Astende auf den Einzelstrang einwirkt, zu einer Biegebelastung.

Die über den Verlauf veränderlichen Krümmungsdifferenzen bezogen auf den Ausgangszustand stehen mit den Biegemomenten über Gl. 5 in Zusammenhang.

$$\kappa = \frac{1}{r} = \frac{M}{EI} \quad \text{Gl. 5}$$

κ Krümmung
 r Radius
 M Biegemoment
 E Elastizitätsmodul
 I Flächenträgheitsmoment

Besonders bei großer Verformung wird deutlich, dass die Drucknormalkraft zunehmend zu einer Biegebeanspruchung im gekrümmten unteren Bereich des fünften verholzten Stranges führt (Bild 36). Die äußeren Einzelstränge werden gleichzeitig geradegezogen, so dass sich der vertikale Abstand dieser Stränge, der Hebelarm für tangential wirkende Momente, verringert und sich der Verdrehwiderstand verkleinert.

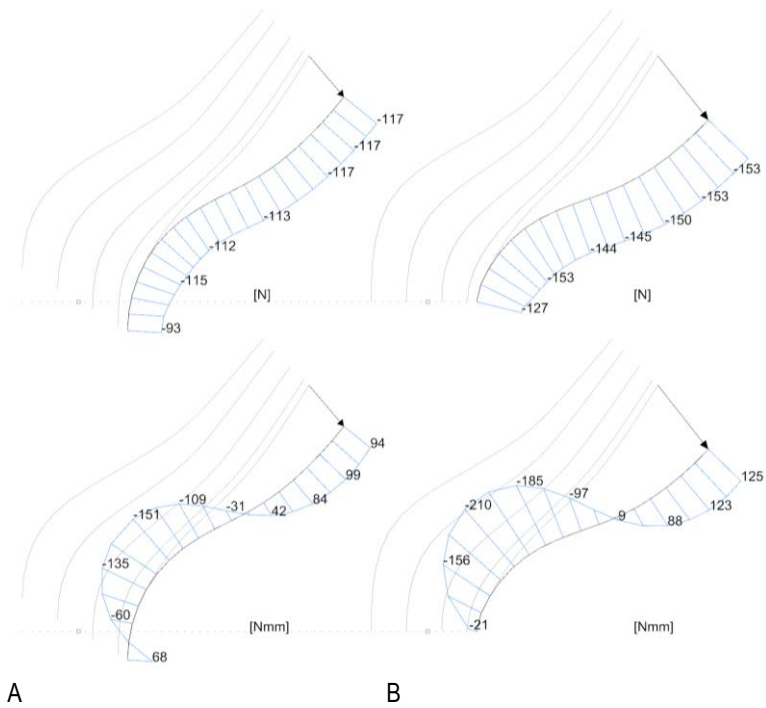


Bild 36: Normalkraft und Momentenverlauf des fünften Einzelstranges für eine vertikale Einzelkraft
 A: Referenzmodell, B: Parametersatz $\alpha_A = 0$, Pfeil: maximale Verformung

Für Längskräfte wirkt der untere rechtsgekrümmte Bereich, der sich relativ zum oberen Bereich durch Krümmung stark verformt, als eine Art Biegefeder.

Phänomenologisch am Einzelstrang betrachtet können die für die untersuchten Araliaceae Arten typischen Verläufe für Verbindungen zwischen einem Punkt am Stamm P_s und einem Punkt am Ast P_a gegenüber Verbindungen mit konstanter Krümmung zu einem kleineren Verzweigungswinkel oder zu einer Reduktion der Höhe führen (Bild 37).

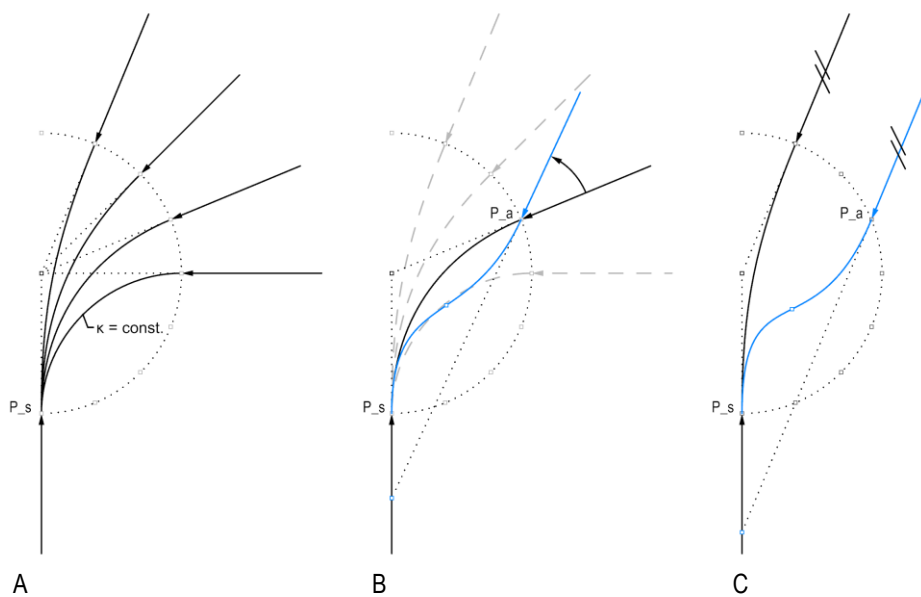


Bild 37: Gegenüber Verbindungen konstanter Krümmung erzeugte Verläufe von Einzelsträngen in Annäherung an das Prinzip der Araliaceae anhand von Endtangente, deren Schnittpunkt jenseits der Ansatzpunkte liegt
 A: Endtangente senkrecht zu einem Kreis, B: Erzeugung via Verdrehung einer Endtangente, C: via Verschiebung

Die Erzeugung dieser Verläufe wird in guter Näherung erreicht, indem im gewünschten Verzweigungswinkel Halbtangenten für Ast- und Stammachse festgelegt werden, deren Schnittpunkt unterhalb des theoretischen Verzweigungspunkts (TVP) liegt und die mit einer Kurve (z. B. NURBS, Grad 3) verbunden werden. Die typische Resultierende weist eine veränderliche Krümmung sowie einen Wendepunkt auf.

3.4.2. Ergebnisse der numerisch-mechanischen Analyse

Wesentliche Voraussetzung für die numerisch-mechanische Analyse ist die Berücksichtigung transversal isotroper Materialeigenschaften der faserartigen Strukturen der untersuchten biologischen Verzweigung. Hierzu werden die bereichsweise gemittelten Orientierungsergebnisse pro Element ins Simulationsmodell übertragen (Bild 38).

Für eine vertikale Belastung am Ast zeigen Querschnitte von Einzelsträngen zu den Randfasern hin Hauptspannungsvektoren maximaler und minimaler Beträge ähnlich eines Biegetragverhaltens. Diese Beobachtung wird vom dominierenden Trend überlagert, dass die Extrema der Hauptspannungen zu mittleren und äußeren Einzelsträngen hin zunehmen. Die Kreisringquerschnitte des Astes und des Stammbereichs zeigen für Einwirkungen aus Biegemomenten typische Hauptspannungsverläufe.

Ein seitlicher stumpfer Anschluss der Einzelstränge in Richtung der Astachse würde zu Ringzugspannungen im Stamm führen. Stattdessen werden die äußeren Stränge bis hinter die Hälfte des Stammumfangs weitergeführt und mit kontinuierlicher Richtungsänderung der Fasern nahezu parallel zur Stammachse im Stamm verankert. Da der Anschluss zwischen den äußersten Seiten und der Hinterseite des Stammes liegt, treten Ringzugspannungen kleineren Betrags auf. In Bild 39 B ist der Übergangsbereich der Lasteinleitung zu sehen: Die Hauptspannungen verlaufen im Stamm in Richtung der angeschlossenen Einzelstränge und ändern ihre Richtung hin zur Vertikalen nach unten hin zusehends. Am unteren Anschnitt ist ein Großteil der Spannungen umgelagert und verläuft typisch für einen gelagerten Kreisringquerschnitt.

Es wird vermutet, dass durch die Art der Führung der Einzelstränge eine Lasteinleitung, die zu Biegebeanspruchungen in der Wand des Kreisringquerschnitts führt, sowie Ringzugspannungen vermieden werden und stattdessen der ganze Stammquerschnitt gleichmäßiger belastet wird. Nichtsdestotrotz treten am oberen Zwickel zwischen äußersten Einzelsträngen und dem oberen Stammabschnitt auch negative Hauptspannungen auf (Druck). Nahe diesen Bereichen treten im Versuch die ersten Schädigungen in Form eines Spalts auf.

Sobald in einem Bereich eine Schädigung auftritt, reduziert sich die Steifigkeit der betreffenden Elemente, wodurch eine weitere Lastaufnahme auf umliegende noch nicht geschädigte Bereich verlagert wird. Der numerische Prozess der Schädigung ist irreversibel und ändert das statische System nachhaltig. Wegen den geschätzten Elastizitätsgrößen, Festigkeitsparameter im Verhältnis analog zu C24 sowie Parameter für die Energiedissipation des Schädigungsmodells, werden die tatsächlichen Beträge der auftretenden

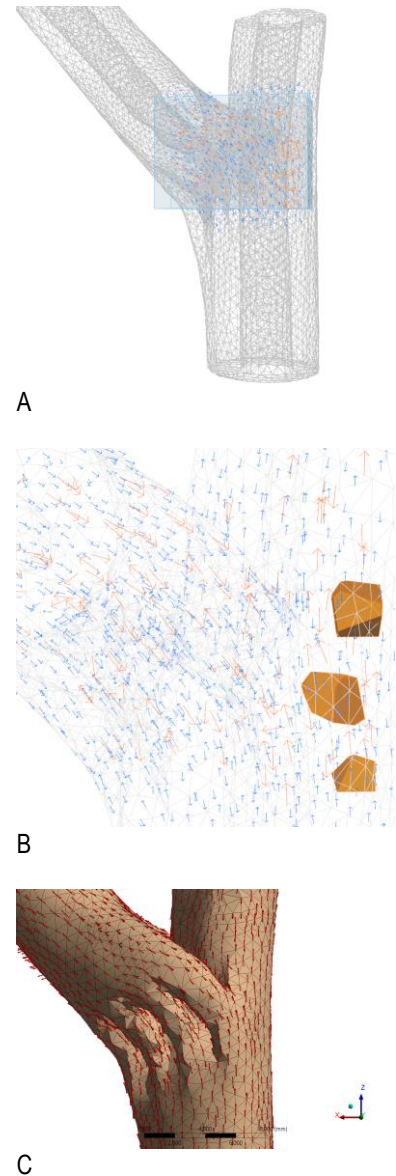


Bild 38: Ergebnis des Mappings der analysierten Faserverläufe auf die Volumenelemente des FE-Netzes
 A: Auswahlbereich Orientierungen
 B: Orientierungsvektoren pro „blob“ (blau) und pro Gruppe (orange) mit Darstellung dreier Einflussbereiche
 C: Ausgerichtete Elementkoordinatensysteme (x-Richtung) im FE-Volumennetz

Spannungen im Untersuchungsgegenstand nur näherungsweise bestimmt. Dennoch lassen sich qualitative Aussagen treffen.

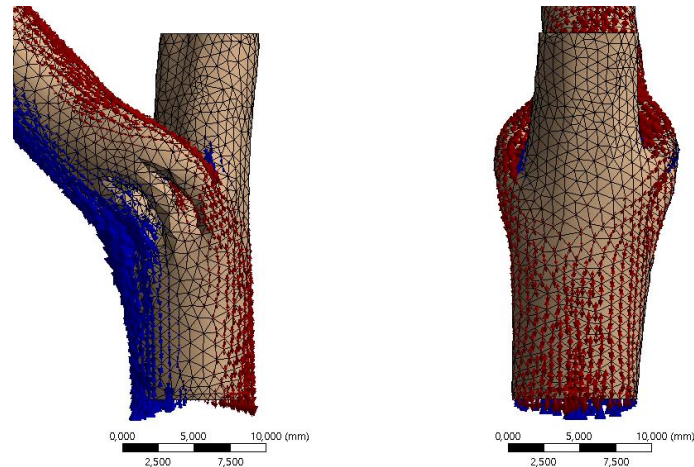


Bild 39: Hauptspannungstrajektorien für eine vertikale Einzelkraft am Astende (rot: Zug, blau: Druck)

Aus biomechanischen Versuchen an *S. arboricola* sind Versagensereignisse wie das Ausbilden eines Risses zwischen den äußersten Einzelsträngen im oberen Zwickel, das Druckversagen des mittleren Einzelstranges und das weitere Einreißen der Ansätze die äußersten Einzelstränge mit Reißen der Faserartigen seitlichen Einzelstränge bekannt (K. Bunk, interne Versuchsergebnisse).

Im Vergleich zu den Versuchsergebnissen mit gemessenen Verformungen in der Größenordnung von mehreren Zentimetern bleiben die Verformungen in der Simulation auf wenige Millimeter beschränkt, bevor Schädigungen in Bereichen auftreten, die zu einem Abbruch der Berechnung führen. Die aufnehmbare Last in der Simulation beträgt ungefähr ein Drittel der aufnehmbaren Last im Experiment. Tendenziell zeigt das Bruchkriterium in den Simulationen Orte hoher Ausnutzung in Bereichen, in denen im Versuch optisch Versagen festgestellt werden kann.

Weitere im biomechanischen Versuch optisch wahrnehmbare Versagenskennzeichen werden im Modell unter Berücksichtigung von Schädigung berechnet. Simulationsergebnisse für die Lastverformungskurve bleiben jedoch, auch mit in mehreren Berechnungen variierten Abminderungen der angenommenen Elastizitätsgrößen, Festigkeit und Parametern des Schädigungsmodells, hinter denen der in Versuchen bestimmten zurück. Grund hierfür kann eine unzureichende Information über die Materialparameter sein – bis auf die Bestimmung des Elastizitätsmoduls in longitudinaler Richtung liegen keine Versuchsdaten vor. Ein weiterer Grund kann die Messung der Verformung im Versuch anhand des Traversenwegs sein. Das Lastverformungsdiagramm zeigt wie im Versuch einen nichtlinearen Verlauf mit einem ausgeprägten Scheitel und einem abfallenden Ast.

Die Simulation liefert qualitative Ergebnisse zum Versagensmechanismus in Bezug auf die Bestimmung der maßgeblichen Lastart und Wirkung. So zeigt sich im Bereich des Zwickels zwischen dem äußersten oberen Ast und dem Stamm zuerst ein Versagen der Matrix auf Zug und später auch der Fasern (Bild 40).

Betrachtet werden drei Punkte auf der Lastverformungskurve bzw. deren korrespondierende Zeitpunkte, $z = 0,5$ bei halber aufnehmbarer Last, $z = 1$ bei aufnehmbarer Last und $z = 2$ im letzten konvergenten Lastschritt.

Schädigung durch Matrixversagen auf Zug liegt in der Simulation zunächst im unregelmäßig angeordneten, vierten Einzelstrang vor ($z = 1$), anschließend in den apikalen Zwickeln der äußersten Einzelstränge sowie auch im Lasteinleitungsbereich der angeschlossenen äußersten Einzelstränge im Stamm ($z = 2$). Der vierte Einzelstrang reißt im Versuch vermutlich noch vor den äußersten Einzelsträngen ein.

Schädigung durch Matrixversagen auf Druck tritt in den Zwickelbereichen zwischen den Einzelsträngen auf sowie vor allem im mittleren Einzelstrang, insbesondere an der inneren Rundung der sichelförmigen Aufweitung in der Draufsicht. In diesem gerundeten Bereich treten durch die gevouteten, relativ steifen äußeren Stränge deutlich Querdruckspannungen auf.

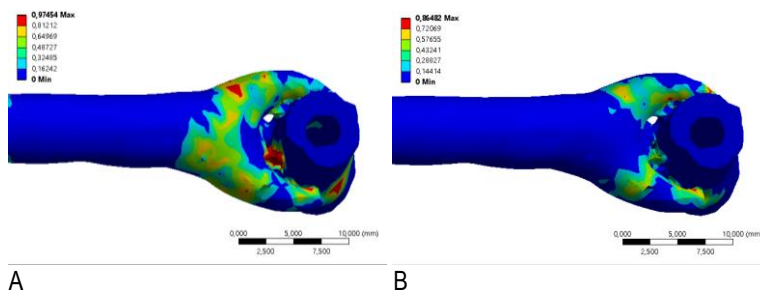


Bild 40: Simulation für vertikale Belastung am Astende ($z = 2$)
 B: Schädigung Matrix-Zug, B: Schädigung Fasern-Zug

Winkeldifferenzen aus OT-Analyse und CAIO

Es wird angenommen, dass die Winkeldifferenzen zwischen den Ergebnissen aus der Orientierungstensoranalyse und der CAIO (computer aided internal optimization, Kriechbaum 1992) ein Kriterium zur Beurteilung der Effizienz der Faserrichtung sind.

Die mit dem Programm ermittelten Faserrichtungen der biologischen Vorbilder werden elementweise mit denen verglichen, die mit dem CAIO-Verfahren berechnet werden (jeweils nach dem fünften Iterationsschritt, Schubspannungsänderung $< 1,5\%$). Eine kleine Winkeldifferenz dieser beiden Richtungen zeigt eine lastangepasste Orientierung an (Bild 41).

Die auftretenden Winkeldifferenzen werden ungewichtet und gewichtet mit dem Betrag der zugehörigen ersten Hauptspannung getrennt für drei Bereiche, im Stamm unterhalb des Astanschlusses, im Anschlussbereich mit Einzelsträngen und im ungestörten Astbereich, in Histogrammen dargestellt.

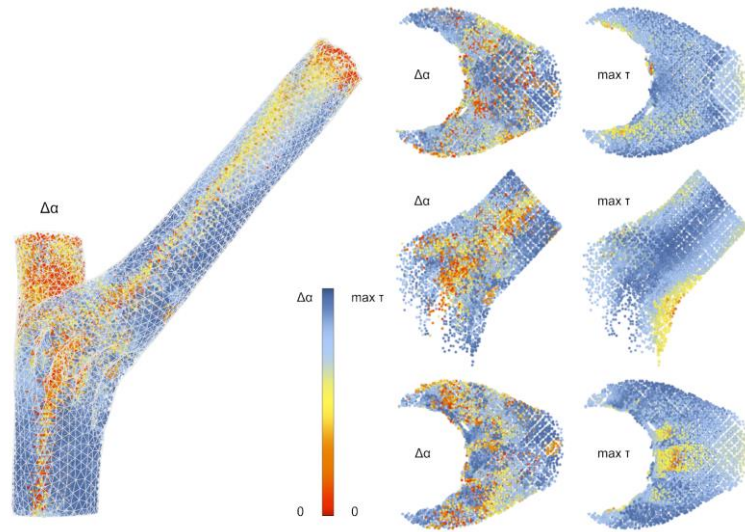


Bild 41: Winkeldifferenzen der Ergebnisse aus der OT-Analyse und der CAIO sowie maximale Schubspannungen im Stamm-Ast-Anschlussbereich, vertikale Last

Im Bereich der ‚fingerartigen‘ Stamm-Ast-Verbindung unterscheiden sich die Diagramme der relativen Häufigkeiten (Bild 42, Bild 43) von denen für die Bereiche mit annähernd geradem Achsverlauf und mit konstantem Querschnitt im Stamm und Astbereich (Bild 44, Bild 45): Die Werte sind stärker verteilt. Der Median der Winkeldifferenzen beträgt im Anschlussbereich circa 20°, im Astbereich für eine vertikale Belastung circa 15° und für eine horizontale circa 10°. Auffällig ist der größere Median der Winkeldifferenzen im Bereich des Stamms für horizontale Belastungen von knapp 30°.

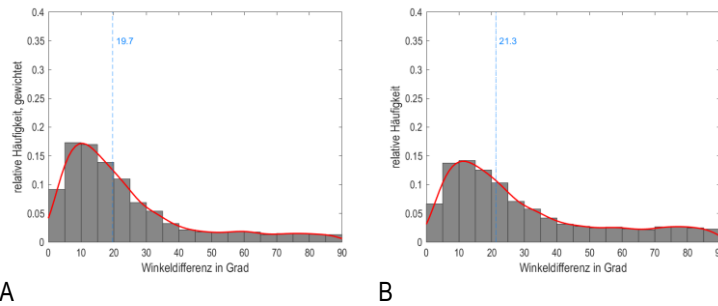


Bild 42: Relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen der Richtungsvektoren der ersten Hauptspannung aus der Orientierungstensoranalyse (a_{11}) und aus der CAIO für eine vertikale Belastung im ‚fingerartigen‘ Anschlussbereich A: gewichtet, B: ungewichtet

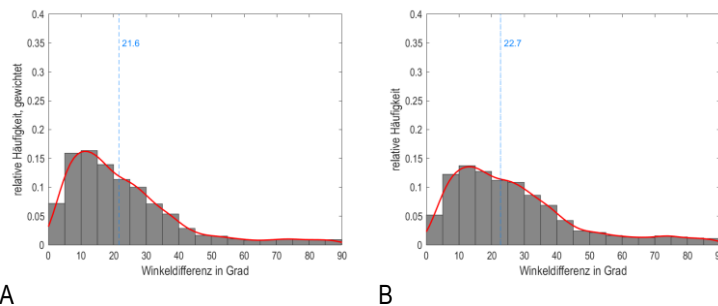


Bild 43: Relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen der Richtungsvektoren der ersten Hauptspannung aus der Orientierungstensoranalyse (a_{11}) und aus der CAIO für eine horizontale Belastung im ‚fingerartigen‘ Anschlussbereich A: gewichtet, B: ungewichtet

Im Anschlussbereich zeigen die Diagramme für horizontale und vertikale Belastungen einen ähnlichen Verlauf (Bild 42, Bild 43). Der Einfluss der Wichtung nach dem Betrag der größten Hauptspannung ändert den Verlauf geringfügig.

Im Stamm- und Astbereich zeigt sich nur für vertikale Belastungen ein ähnlicher Verlauf (Bild 44). In beiden Bereichen ist die Biegung der Kreisringquerschnitte mit Normalspannungen parallel zur Achse vorherrschend.

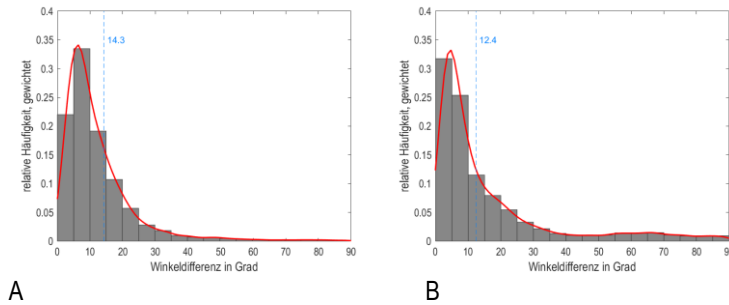


Bild 44: Gewichtete relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen für eine vertikale Belastung

A: Astbereich, B: Stamm unterhalb Verzweigungspunkt

Für horizontale Belastungen zeigt der Bereich im Ast ähnliches Verhalten (Bild 45), der Bereich im Stamm deutlich ein verschiedenes, da dieser durch Torsion beansprucht wird. Für diesen Fall zeigt der Anschlussbereich einen geringeren Median ($21,6^\circ$ zu $27,4^\circ$).

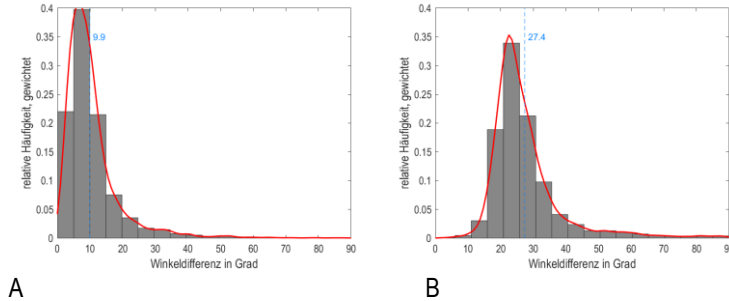


Bild 45: Gewichtete relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen für eine horizontale Belastung

A: Astbereich, B: Stamm unterhalb Verzweigungspunkt

Für eine horizontale Einzelkraft am Astende liegt der Betrag des Medians der Winkeldifferenzen für den Anschlussbereich ($\sim 20^\circ$) zwischen den Werten für den Astbereich ($\sim 10^\circ$) und denjenigen des Stammbereichs ($\sim 27^\circ$). Unter der Annahme, dass die Winkeldifferenz ein Kriterium für die Lastadaption des Faserverlaufs ist, kann festgestellt werden, dass die Anpassung des Faserverlaufs in den Einzelsträngen für eine horizontale Belastung zwar weniger gut als die im Astbereich ist, aber besser als im Stammbereich (Bild 43 A, Bild 45). Für eine vertikale Belastung bleibt die Adaption der Fasern im Anschlussbereich demnach hinter derer im Stamm und Astbereich zurück (Bild 42 A, Bild 44). Ferner zeigt sich, dass die Fasern für den vertikalen Lastfall günstiger angeordnet sind.

Das Beanspruchungsniveau einzelner Fasern bzw. im Bereich lokaler Ausrichtungen kann rechnerisch anhand einer

Wichtung erfolgen, die es erlaubt hoch und wenig belastete Bereiche differenziert in die Bewertung einfließen zu lassen. Dies erscheint umso wichtiger, da angenommen wird, dass die Untersuchungsobjekte für Lasten aus verschiedenen Richtungen angepasst sind und die Winkeldifferenzen für einen einzelnen Lastfall deshalb vermutlich nicht exakt der Optimierung entsprechen können.

Das entwickelte Vorgehen ermöglicht einen grundlegenden Einblick in die Biomechanik der untersuchten pflanzlichen Verzweigungen, bei der nicht nur die äußere Form, sondern auch die innere Struktur zur Modellbildung und Aussagenbasis beiträgt. Das entwickelte Programm zur Analyse der Faserorientierungen von 3D-Strukturen anhand von Bilderstapeln kann mit Wahl der entsprechenden Eingangsparameter zudem auch auf andere Untersuchungsgegenstände, die nicht nur pflanzlich sein müssen, angewendet werden.

Es wird vermutet, dass die Methode der Winkeldifferenzen zur Beurteilung der Lastadaption für Aussagen qualitativer Art gültig ist. Zur Beurteilung der Güte quantitativer Aussagen sind weitere Untersuchungen notwendig. Insbesondere ein Vergleich der Winkeldifferenzen an zusätzlichen Beispielen dieser und anderer Arten könnten Aufschluss über biomechanische Zusammenhänge geben.

Ein Transfer dieser Untersuchungsmethode auf die technische Produktentwicklung und -fertigung könnte zum Beispiel zur systematischen Beurteilung von herstellungsbedingten Abweichungen bei FKV-Bauteilen dienen, indem Histogramme von Winkeldifferenzen, gebildet aus den Richtungen der ersten Hauptspannung und den analysierten Faserrichtungen, zur Beurteilung herangezogen werden.

4. Gegenüberstellung von verzweigten Pflanzen und Stützen

Die Tragfähigkeit ist bei Pflanzen neben vielen weiteren zum Überleben relevanten Funktionen, wie der Wasser- und Nährstoffversorgung oder der Schutz vor Fressfeinden und Umwelteinflüssen, von essentieller Bedeutung. Um das vielschichtige Anforderungsprofil erfüllen zu können, ist für die einzelne Pflanze ein ausgewogener Einsatz der Ressourcen zur Existenzsicherung und Reproduktion notwendig.

Die Optimierungsziele zur Erhaltung der einzelnen Funktionen können sich dabei widersprechen und in verschiedenen Teilen der Pflanze unterschiedlich priorisiert sein. Im Stamm eines Baumes sind zum Beispiel die Funktionen Lastabtrag und Nährstoffversorgung vorherrschend. Im Blattwerk sind diese ebenfalls wichtig, treten jedoch in den Hintergrund, da die Photosynthese Hauptaufgabe ist. Die Energiegewinnung erfordert eine möglichst große licht-exponierte Oberfläche, die – konträr zur strukturmechanischen Optimierung – eine große Windangriffsfläche darstellt.

Konsequent weitergedacht kann es daher prinzipiell möglich sein, dass eine technische Tragstruktur leistungsfähiger ist als ein multifunktionales biologisches Vorbild, da sich eine Optimierung auf weniger Ziele ausrichten muss. Diese Hypothese wurde im Projekt TRR 141 B05 aufgestellt und untersucht. Ein grafenbasierter abstrakter Ansatz zur Übertragung von biologischen Konzepten auf technische Tragstrukturen findet sich in Paul et al. (2016).

Die Hauptkategorien von Verzweigungen sind offene und geschlossene Verzweigungen (Bild 8, Bild 46). Offene Verzweigungen sind in Pflanzen allgegenwärtig, aber auch geschlossene Verzweigungen kommen in der Natur sehr häufig vor, zum Beispiel bei Kieselalgen (Diatomeen). In Gebäuden finden sich ebenfalls Beispiele für beide Verzweigungsarten, in verzweigten Stützen (offen) oder Trägerrosten und Gitterschalen (geschlossen).

Im Bauwesen ist die Unterscheidung in offene und geschlossene Verzweigungen in Bezug auf die Verbindung der Elemente und die Herstellung relevant. Durch Unterteilen der Bauelemente im Bereich der Stäbe anstatt im Verzweigungspunkt wird der Stabanschluss wesentlich vereinfacht, da lediglich zwei kollineare Stabenden zu verbinden sind und nicht drei oder mehrere Stäbe in unterschiedlichen Winkeln. Bei offenen Verzweigungen kann eine Steckverbindung ausgebildet werden, die bei geschlossenen Verzweigungen geometrisch bedingt (Ringschluss), wegen der Längsverschiebung in abweichenden Richtungen während der Montage, in der Regel nicht möglich ist.

Eine Methode, geschlossen verzweigte Strukturen herzustellen, ist das Verbinden der Stabenden. Eine alternative Methode ist es, kastenförmige Elemente mit der halben Querschnittsbreite herzustellen, die entlang der Kanten punktuell, linienförmig (Bolzen, Verschraubung) oder flächig (Klebung) zum gewählten Querschnitt verbunden werden. Anstatt den Gesamtquerschnitt durch Fügen von zwei ähnlichen Einzelquerschnitten entlang des Wabenrandes herzustellen, kann der Gesamtquerschnitt auch aus zwei offenen Teilquerschnitten zusammengesetzt werden, die punktuell miteinander verbunden werden, wie die Konstruktion des „Elytra“ Pavillons aus faserverstärktem Kunststoff mit aufgelösten Querschnitten in einem integrativen



Bild 46:
Offene und geschlossene Verzweigungen in der Architektur, Modell Frei Otto, ZKM | Zentrum für Kunst und Medien Karlsruhe

Ansatz von additiver Fertigung, Tragfunktion und Form zeigt (Prado et al. 2017).

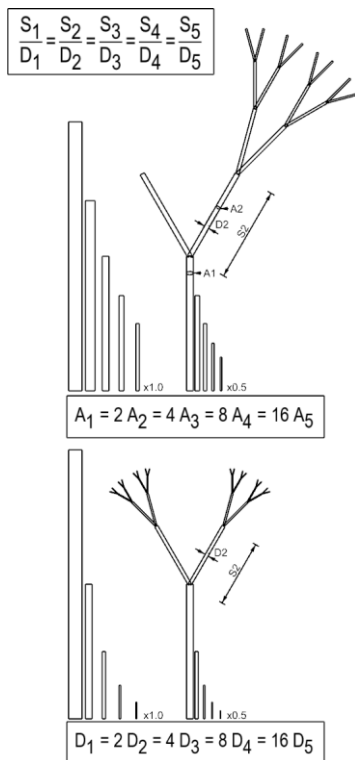


Bild 47:
Verzweigungen nach Bildungsregeln
oben: konstantes Flächenverhältnis
unten: konstantes
Durchmesserverhältnis
nach Otto (1995)

Otto (1995) erschließt generische Prinzipien der Gestaltbildung und teilt hierarchisch angeordnete Y-förmige Verzweigungen nach den Verhältnissen von Durchmessern, Länge der Schenkel und Abstufungen der Durchmesser ein (Bild 47).

Pflanzen haben verschiedene Verzweigungsstrategien entwickelt, die sich stark unterscheiden. Hallé et al. (1978) bestimmen basierend auf vier morphologischen Aspekten 23 Architekturmodelle, die bei Bäumen vorzufinden sind.

Anatomisch eingeteilt werden Verzweigungen der Pflanzenachse nach der Entstehung und Gestalt in gabelige (dichotom) und seitliche Verzweigungen. Dichotome Verzweigungen zeichnen sich durch ein in zwei Teile aufgespaltenes Scheitelmeristem (Bildungsgewebe) aus. Verzweigungen mit Gabelschenkeln gleichen Durchmessers werden ferner in isotome und bei unterschiedlichem Durchmesser in anisotome eingeteilt. Eine Gabelung kann idealtypisch planar sein, aber auch geknickt. Entsprechend wird eine Verzweigung mit drei gleichwertigen Ästen aufgehend von einem Stamm als trichotome Verzweigung bezeichnet (Bild 48, B). Diese besitzt vier „Schenkel“ oder „Arme“. Bei seitlichen Verzweigungen wird ferner differenziert, ob der Haupttrieb auf der Hauptachse weiterwächst (monopodial, z. B. Nadelbäume) oder von Seitentrieben abgelöst wird (sympodial, z. B. Weinrebe).

Gebaute und pflanzliche Tragstrukturen unterscheiden sich grundlegend in ihrer Entstehung. Während erstere in Form von vorkonfektionierten Bauteilen zu einer Tragstruktur vorab definierter Geometrie zusammengesetzt werden, wachsen andere über einen längeren Zeitraum, meist sogar während ihres ganzen Lebens heran. Die Materialisation erfolgt dabei durch komplexe chemische und physikalische Prozesse, wie der Lignifizierung, der Verholzung von Gewebe. Die Gestaltwerdung der biologischen Vorbilder wird permanent durch äußere Randbedingungen, wie den Lichteinfall oder mechanische Beanspruchungen, beeinflusst und auch aktiv durch sekundäres Dickenwachstum und die Bildung von Reaktionsholz angepasst. Durch die Ausbildung von Druckholz ist zum Beispiel eine Reaktion auf äußere mechanische Einwirkungen wie Wind, Schnee oder Eigengewicht anhand einer Druckvorspannung senkrecht zum Querschnitt, in Faserlängsrichtung, möglich. Die Fähigkeit von Pflanzen zur Formänderung ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber künstlichen Tragstrukturen.

Bei den ‚fingerartigen‘ Stamm-Ast-Verbindungen der *Araliaceae* oder der mittigen Aufdickung anstatt einer Ausrundung der trichotomen Verzweigung von *Edgeworthia chrysanthia* handelt sich um Geometrien, die aus Ingenieurssicht kontraintuitiv ausgebildet sind (Bild 48). Gerade diese besonderen äußeren Morphologien sind es, die neue Erkenntnisse über die geometrische Ausbildung zur Vermeidung von Spannungsspitzen und zur Optimierung von Trageigenschaften liefern können, wie die Untersuchung an Säulenkakteen, bei der eine Eindellung im Astanschlussbereich zu einer Verteilung von Spannungsspitzen führt (Schwager et al. 2010; Masselter et al. 2016) oder Ausrundungen von Astverbindungen zur Reduktion von Kerbspannungen zeigen (Scherrer 2004; Mattheck 2006).

Die statischen Systeme von verzweigten Bäumen und Sträuchern sind im Vergleich zu verzweigten Stützen unterschiedlich (Bild 49). Äste sind in der Regel als Kragarme ausgebildet und erfahren durch den Windwiderstand des Blattwerks, dem Eigengewicht und Niederschlag bzw. Schnee Biegemomente.

Während die Astenden der Bäume frei sind, werden in gebauten verzweigten Stützen bzw. Pfeilern zumeist Zugglieder, wie durch einen Trägerrost bzw. den Träger des Überbaus, an den Enden angebracht. In diesen überbestimmten statischen Systemen dominieren Normalkräfte gegenüber Biegemomenten. Vorteilhaft sind hierbei die bessere Ausnutzung des Gesamtquerschnitts wegen einer konstanten statt linearen Dehnungsverteilung sowie geringere notwendige Flächenträgheitsmomente, was eine schlanke Konstruktion erlaubt.

Wegen dieses grundlegenden Unterschieds ist ein direkter Übertrag von Prinzipien der Tragfunktion kritisch zu prüfen.

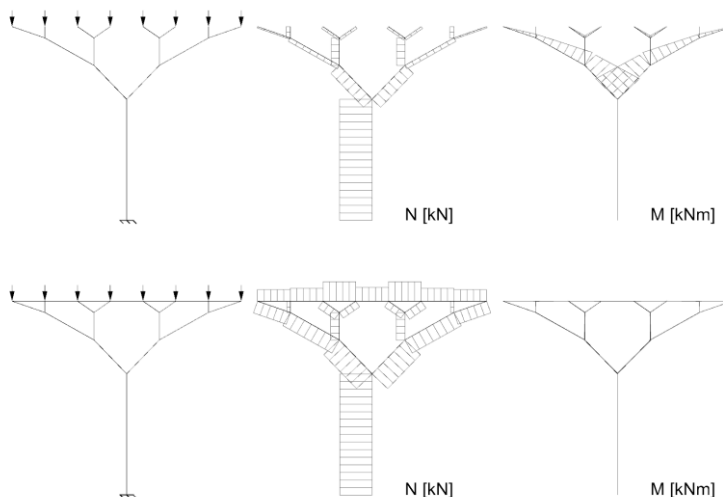


Bild 49: Qualitative Schnittkraftverläufe von Bäumen und verzweigten Stützen, aus Born et al. (2016)

Während sich die statischen Systeme zwischen den apikalen pflanzlichen und gebauten Tragsystemen (Bild 50 A, B) wesentlich unterscheiden, haben Bäume mit Stelzwurzeln Ähnlichkeit zum statischen System von verzweigten Stützen (Bild 50 B, C). Vermutlich verankern die Wurzeln im Boden



A



B



C

Bild 48:

Pflanzliche Verzweigungen

A: *Schefflera arboricola* (decortifiziert)

B: *Edgeworthia chrysanthia*

C: *Socratea exorrhiza*

den Stamm sowohl in vertikaler Richtung als auch in horizontaler. Womöglich können durch die Stelzwurzeln auch Biegemomente (Einspannung) in den Boden eingeleitet werden, zumindest aber bietet die Auflösung des Stammes basal in mehrere Stränge günstige Hebelverhältnisse zum Abtrag von Biegemomenten.

Bei Wanderpalmen (*Socratea exorrhiza*) wachsen zusätzliche Wurzelausschläge aus dem Stamm in den Boden hinein und festigen den Stand des Baumes während dessen Wuchs (Goldsmith und Zahawi 2007). Derzeit wird dies in der Forschung kontrovers diskutiert. Es scheint am wahrscheinlichsten, dass das Ausbilden der Stelzwurzeln eine Reduzierung des mechanisch notwendigen Stammdurchmessers erlaubt und einen Geschwindigkeitsvorteil bei der Besiedelung von Brachflächen für diese Pionierpflanzen hat (Goldsmith und Zahawi 2007).

Einen allgemeinen Überblick und Literaturvergleich zu pflanzlichen Verankerungen bietet Stubbs et al. (2019).

Weiterführende Untersuchungen an pflanzlichen Wurzelverankerungen erscheinen wegen der im Vergleich zu Verzweigungen mit freien Enden ähnlicheren Tragwirkung und der dadurch erhöhten Wahrscheinlichkeit gemeinsamer Funktionsprinzipien interessant und vielversprechend.

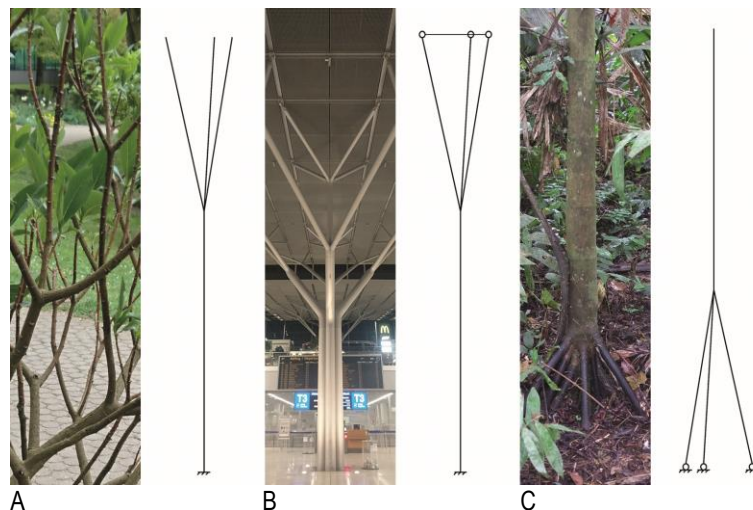


Bild 50: Vergleich von statischen Systemen pflanzlicher Verzweigungen und derer von Tragkonstruktionen

A: verzweigter Kragarm einer trichotomen pflanzlichen Verzweigung (*Edgeworthia chrysanthia*), B: verzweigte Stütze mit Trägerrost als Zugband (Flughafen Stuttgart), C: verzweigte Wurzeln (*Socratea exorrhiza*), ähnliches statisches System wie im mittleren Bild

Für eine planare Verzweigung mit zwei nachfolgenden Gliedern ergeben sich für Spezialfälle verschiedener Funktionen unterschiedliche Schlüsse für die Verhältnisse der Radien der vorigen und nachfolgenden Glieder (Tabelle 4). Es handelt sich hierbei um eine allgemeine, nicht pflanzenspezifische Betrachtung auf funktionaler Ebene, basierend auf einer Verzweigung mit kreisförmigen Querschnitten, die pro Hierarchieebene gleiche Anforderungen und Ausprägungen innehat. Wirken zwei Biegemomente gleichen Wertes so auf die nachfolgenden Glieder („Äste“) ein, dass deren Addition den doppelten Wert im Vorgängerelement annimmt, ergibt sich aus dem Zusammenhang der Flächenträgheitsmomente

für kreisförmige Querschnitte ein Radiusverhältnis von circa 1 : 1,2. Die Nährstoffversorgung einer Pflanze erfolgt gegebenenfalls nur in Teilen des Querschnitts (vgl. Kap. 2). Unter der Annahme, dass die Leitung nur in einem Bereich entlang des Umfangs mit konstanter Stärke erfolgt, ergibt sich theoretisch ein Zusammenhang zwischen den Größenverhältnissen der Radien für das Beispiel von 1 : 2. Für optimale Verhältnisse in Bezug auf das Energieminimum zur Durchströmung der Verzweigung und unter der Annahme, dass der ganze Querschnitt Leitungsfunktion hat, ergibt sich theoretisch ein Durchmesser Verhältnis für den „optimalen Transport“ von 1 : 1,26.

Tabelle 4: Theoretische Durchmesseränderungen bei dreischenkigen Verzweigungen unterschiedlicher Annahmen für Belastungen und Durchströmungen

	Momentenbelastung	Normalkraftbelastung*	Versorgungserfordernis**	Murrays Gesetz***
Child	M	N	$A_{v,c}$	r_1, r_2
Parent	2 M	2 N	$2 A_{v,c}$	r_P
	erforderliches Trägheitsmoment	erforderliche Fläche	erf. Fläche Versorgungsgewebe	für optimalen Transport
Regel	$I_c = 0.5 I_p$	$A_c = 0.5 A_p$	$A_{v,c} = 0.5 A_{v,p}$	$r^3 = r_1^3 + r_2^3$, $r_c = r_1 = r_2$
Child	$I_c = r_c^4 \pi$	$A_c = r_c^2 \pi$	$A_{v,c} = U_c t$ $= 2 r \pi t$	$2 r_1^3 = r_p^3$
Parent	$r_p = 2^{1/4} r_c$	$r_p = 2^{1/2} r_c$	$r_p = 2 r_c$	$r_p = r_c^{3/2}$
Faktor	1,19	1,41	2,00	1,26

* Tragsystem in der Technik, nicht in der Natur vorherrschend

** Annahme eines dünnwandigen Kreisringquerschnitts

*** Murray (1926), McCulloh et al. (2003)

M Biegemoment

N Normalkraft

I_c, I_p Flächenträgheitsmoment (Child, Parent)

A_c, A_p Statisch wirksame Querschnittsfläche

$A_{v,c}, A_{v,p}$ Querschnittsfläche mit Versorgungsfunktion

t konstante Wanddicke

Kennzeichnend für pflanzliche Verzweigungen ist es, beiden Funktionen – mit artspezifisch unterschiedlicher Wichtung – gerecht zu werden. Die Tabelle zeigt Anhaltswerte für die Extreme der beiden Funktionen auf. Teile des Querschnitts, wie verholzte Ringquerschnitte mit innenliegendem Markbereich, können dabei auch gradiert unterschiedliche Funktionen erfüllen.

5. Entwurf von verzweigten Tragstrukturen

5.1. Funktion

Bei verzweigten Stützen existiert ein inhärenter Zusammenhang zwischen der Form und der Funktion der Tragfähigkeit. So kann die Tragfunktion verzweigter Strukturen durch eine formaktive Gestalt effizient gestaltet werden.

Dieses Prinzip nutzten bereits Baumeister der Gotik, um hohe Räume mit weitläufigen Nutzflächen aus Mauerwerk zu schaffen (Bild 51). Im letzten Jahrhundert setzten geschlossene verzweigte Tragstrukturen, wie die Fachwerkkuppeln von *Buckminster Fuller*, neue Maßstäbe hinsichtlich rationaler Konstruktion und äußerster Effizienz im Lastabtrag. Gitterschalen mit geschlossenen Verzweigungen werden heute zum einen in doppelt gekrümmter Geometrie gleicher Krümmung hergestellt, wie die Primärtragkonstruktion des *Gondwanaland Zoos* in Leipzig mit einer Spannweite von bis zu 160 m, zum anderen auch mit unterschiedlichen Krümmungen mit wechselnden Knotengeometrien, wie die Schalterhalle der *Kingscross Station* in London. In den letzten Jahrzehnten kamen auch mehrfach offen verzweigte Pfeiler und Stützen aus Stahl zur Anwendung (Bild 52).

Bei verzweigten Stützen handelt es sich um innerlich mehrfach statisch unbestimmte Systeme. In der Regel werden sie so ausgelegt, dass sie im maßgebenden Lastfall überwiegend Drucknormalkräfte aufnehmen. Eine Beanspruchung durch Biegemomente tritt – wenn auch untergeordnet – trotz des horizontal angeordneten Zugbandes auf. Als druckbeanspruchte schlanke Systeme hängt ihre Tragfähigkeit neben der Festigkeit auch von der Stabilität ab.

Insbesondere bei hohen Räumen lassen sich durch die großen lichten Abstände verzweigter Stützen weitläufige Nutzflächen erzielen. Verzweigte Druckglieder bieten hier gegenüber unverzweigten Vorteile (Bild 53).

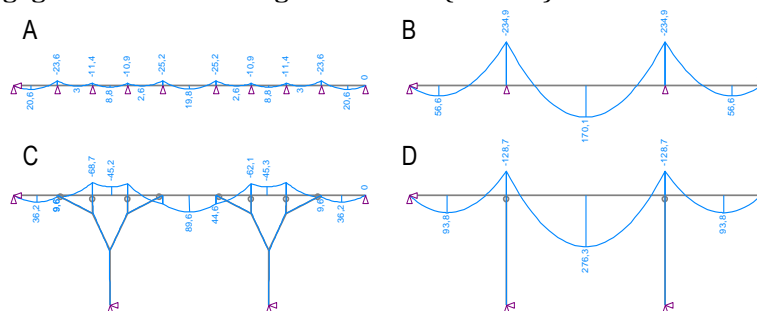


Bild 53: Vergleich der Biegemomente in kNm von vier Tragsystemen mit 40 m Länge unter einer vertikalen Linienlast von 10 kN/m

A: Durchlaufträger, B: Durchlaufträger mit zwei Zwischenauflagern, C: Durchlaufträger mit Lagern an den Enden, D: Durchlaufträger mit zwei Stützen gleichen Abstands wie „C“

Bei gleicher Anzahl an Fußpunkten sind bei verzweigter Konstruktionsweise kleinere statische Höhen der darüberliegenden horizontalen Tragelemente erforderlich, da die Spannweiten durch mehrere Stützenkopfpunkte reduziert werden. Dies führt zu geringerer Biege- und Durchstanbeanspruchung des Überbaus oder der Decke. Nicht nur die Baumasse der verzweigten Stützen selbst, sondern vor allem die Baumasse des Überbaus kann dadurch reduziert werden, was sich günstig auf die Gesamtmasse des Tragwerks auswirkt.

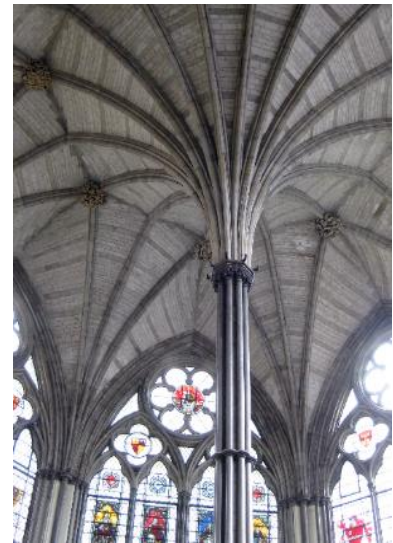


Bild 51: Deckenuntersicht östliches Langhaus Westminster Abbey, London (1269); Mauerwerk



Bild 52: Verzweigte Pfeiler einer Fußgängerbrücke, Untertürkheim (1991); Stahlgussknoten

Im Gegensatz zu Konstruktionen aus Stahl mit einheitlichem Material wird hier eine Hybrid-Bauweise angestrebt, bestehend aus einer Hülle aus Faserverbundwerkstoff und einem Kern aus Beton. Die Hülle kann im Verbundbauteil verschiedene Aufgaben erfüllen, indem sie als Schalung und Bewehrung dient (Tabelle 5). Der Beton kann zum Lastabtrag und zur Aussteifung verwendet werden, um Beulen des FKV-Bauteils zu verhindern. Daraus ergeben sich verschiedene Anforderungen an die Hülle, den Kern und den Verbund:

Tabelle 5: Anforderungen an Kern und Hülle gemäß Funktion

	1.	2.	3.	4.
Anforderung an die Hülle:	Schalung	Schalung, Querkraftbewehrung	Schalung, Bewehrung	Aussteifung
Formhaltige Hülle (Betonierdruck)	ja	ja	ja	ja
Tragfähigkeit im Brandfall	nein	ja	ja	ja
Tragwirkung Beton	ja	ja	ja	nein
Tragwirkung Hülle	nein	ja	ja	ja
Verbundwirkung erforderlich	nein	ja	ja	nein
Kraftübertragung auf Tragelemente	nein	ja	ja	ja

Soll die Hülle als Schalung dienen und die konventionelle Bewehrung gänzlich ersetzen, muss sie formstabil sein, eine Verbundwirkung zum Beton haben sowie Zugkräfte aufnehmen. Für eine Heißbemessung bietet FKV wegen der niedrigen Glasübergangstemperatur, bei der das Harz von einem festen in einen zähflüssigen Zustand übergeht, unzureichende Beständigkeit. Glasübergangstemperaturen gebräuchlicher Harze wie Phenolharze, Vinylesterharze und Epoxidharze liegen in der Regel unter 150 °C. Bei dem in den Versuchen verwendeten Epoxidharz liegt die Glasübergangstemperatur laut Herstellerangabe bei circa 80 °C.

Verglichen mit den in einem Brand auftretenden Temperaturen von mehreren hundert Grad nach bereits wenigen Minuten ist die Tragfähigkeit im Brandfall ohne Zusatzmaßnahmen nicht gegeben. Durch Aufbringen einer Beschichtung, die bei hohen Temperaturen aufschäumt, oder einer Einhausung kann der Hitzeeinwirkung auf die Bauteiloberseite entgegengewirkt werden. Auch der Einsatz derzeit in Entwicklung befindlicher mineralischer Matrixsysteme, die hitzebeständig sind, erscheint vielversprechend.

Eine pragmatische Lösung ist die Kombination der Hülle als Bewehrung zusammen mit konventioneller Längsbewehrung für den Brandfall. Auch der Einsatz von stahlfaserbewehrtem Beton statt der konventionellen Bewehrung kann zur Lösung der Brandproblematik beitragen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Widerstand der Konstruktion im Brandfall nicht weiter untersucht. Der Einsatz der Hülle als Schalung und Bewehrung liegen im Fokus dieser Arbeit (Tabelle 5 Nr. 3).

5.2. Form

Aspekte zur Form werden auf globaler Ebene, der gesamten Tragstruktur, und auf lokaler Ebene, des verzweigten Tragknotens, behandelt.

5.2.1. Globale Struktur – Verzweigte Stützen

Die Geometrie verzweigter Tragsysteme kann, wie für den Demonstrator zur Ausstellung „Baubionik“ (Bild 54), parametrisch mit CAD (computer aided design) aufgebaut werden (Bild 55).



Bild 54:
Verzweigte Tragstruktur mit triaxial geflochtenem Textil, Ausstellung „Baubionik“ im Schloss Rosenstein (PBG, ITKE, ITFT)

Die verzweigte Tragstruktur mit circa 6,2 m Höhe besteht aus sieben Knoten, deren drei Schenkel jeweils in einer Ebene liegen. Geometrische Parameter des Modells sind die Längen der Stäbe, die Winkel um die Stabachse und die Winkel der Schenkel gemessen in der Ebene.

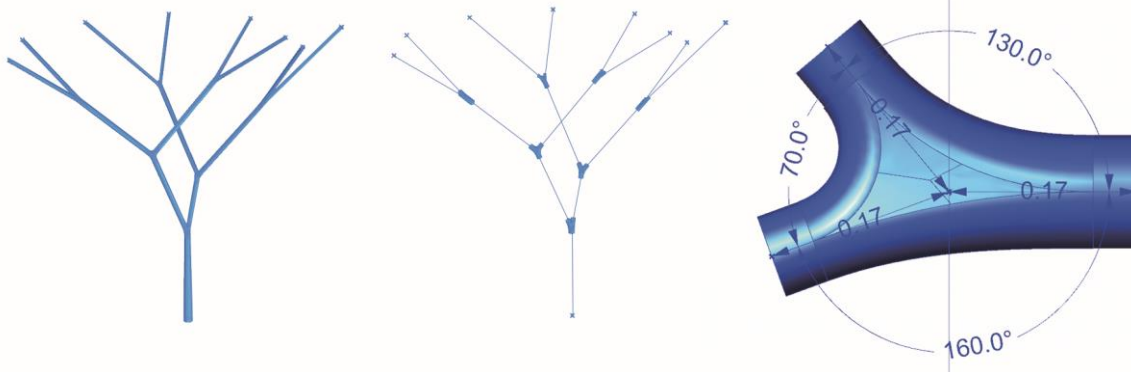


Bild 55:
Globale Tragstruktur – Lokale
Verzweigung – Parametrisierung:
Modell des Großdemonstrators zur
Ausstellung „Baubionik“ im Schloss
Rosenstein

Das Einbinden des Modells in den Entwurf verzweigter Tragkonstruktionen erzeugt ein konsistentes dreidimensionales Gesamtmodell der Tragstruktur auf globaler und lokaler Ebene. Änderungen an Parametern, wie Winkel oder Durchmesser der Stäbe, im globalen System werden automatisch in den Detailgeometrien der einzelnen Knoten aktualisiert. Deren Geometrien können anschließend direkt in die Berechnung und Nachweisführung der Knoten einfließen.

5.2.2. Begriffe zur verzweigten Stütze

Bei verzweigten Stützen handelt es sich um Tragelemente zur Aufnahme von vorrangig Drucknormalkräften und untergeordnet Biegemomenten. Vorrangig haben verzweigte Stützen einen Fußpunkt und mehrere Stützenkopfpunkte. Die äußersten Stabenden sind nicht frei, sondern an ein horizontales Tragelement, wie ein Zugband, einen Trägerrost, eine Betondecke oder Ähnliches, angeschlossen.

Ausgehend von dem untersten an den Stützenfußpunkt angeschlossenen Stab verästelt sich die verzweigte Stütze nach oben hin zunehmend. Ist die Anzahl der Stäbe zwischen Fuß- und Kopfpunkt für jeden der n -Stränge identisch, liegt eine regelmäßige hierarchische Ordnung vor. Die Verzweigungspunkte zwischen zwei Hierarchieebenen müssen nicht in einer geometrischen Ebene liegen. Die Teilungszahl wird als Faktor zur Berechnung der Anzahl der Stäbe der nächsten Hierarchieebene eingeführt (vgl. mit McCulloh et al. 2003: conduit furcation number F). Eine Teilungszahl von 4 beschreibt einer Verästelung von einem Stab vor dem Verzweigungspunkt zu vier Stäben nach dem Verzweigungspunkt (Teilung 1 zu 4). Die Anzahl der Kopfpunkte berechnet sich nach Gl. 6 zum Beispiel bei drei Hierarchieebenen mit einer Teilungszahl von 4 zu 16 (Gl. 6).

$$n_{\text{Kopf}} = z^{n_{\text{He}} - 1} \quad \text{Gl. 6}$$

n_{Kopf} Anzahl der Stützenkopfpunkte (\triangleq Anzahl der Stränge)
 z Teilungszahl
 n_{He} Anzahl der Hierarchieebenen

Die Stabanzahl wird für regelmäßig hierarchische Verzweigungen berechnet zu:

$$n_{\text{Stab}} = \sum_{i=0}^{n_{\text{He}}-1} z^i \quad \text{Gl. 7}$$

n_{Stab} Stabanzahl im System
 n_{He} Anzahl der Hierarchieebenen
 z Teilungszahl als Faktor

Für ein Raster mit 16 Stützenkopfpunkten ergeben sich mit einer Teilungszahl von 4 drei Hierarchieebene (Gl. 6, umgeformt nach n_{He}).

Eine verzweigte Stütze mit vier Stützenkopfpunkten, mit regelmäßiger hierarchischer Ordnung und der Teilungszahl 2 hat demnach in der ersten Hierarchieebene einen Stab, in der zweiten zwei Stäbe und in der dritten vier Stäbe. Jeder Strang besteht hierbei aus vier Stäben. Die Gesamtstabanzahl ist 7. Die Betrachtung ist unabhängig von der tatsächlichen geometrischen Anordnung.

Die Stützen am Flughafen Stuttgart Terminal 3 weisen beispielsweise vier Hierarchieebenen auf (Bild 56). Die Teilungszahl ist unregelmäßig 4-3-4; es handelt sich um eine verzweigte Stütze mit pro Ebene einem, vier, zwölf und 48 Stäben, insgesamt 65 Stäben.



Bild 56:
Verzweigte Stütze am Stuttgarter Flughafen

5.2.3. Formfindung

Der Form-Funktionszusammenhang, die Abhängigkeit des Kräfteverlaufs von der gewählten formaktiven Geometrie, ist eine den Entwurf beeinflussende Abhängigkeit. Mit Methoden zur Strukturoptimierung können für gegebene Randbedingungen je nach Vorgabe des Optimierungsziels, wie der Minimierung des Eigengewichts oder der Nachgiebigkeit, „optimale“ Konfigurationen gefunden werden. Für widersprüchliche Ziele, wie Erhöhung der Tragfähigkeit und minimales Gewicht, gilt es Kompromisslösungen zu finden. Für eine Beurteilung der Lösungen sind weitere Eigenschaften zu berücksichtigen, wie die Robustheit, also der Widerstand des Gesamttragsystems gegenüber geänderten Eingangsparametern aus Imperfektion oder Laststellung.

Zur Erzeugung verzweigter Strukturen können natürliche Gestaltbildungsprozesse eingesetzt werden, wie dies Hänge Modelle beispielsweise von *Gaudi* zum Entwurf der *Sagrada Familia* demonstrieren oder Forschungen von *Frei Otto* aufzeigen. So lassen sich aus Fadenmodellen verzweigte Strukturen erzeugen, indem die Fäden in einem Raster angeordnet werden und das Raster aus einer Flüssigkeit gehoben wird. Durch die Oberflächenspannung neigen die Fäden dazu aneinander zu haften. Dem entgegen wirkt die Schwerkraft, wonach sich die Fäden parallel ausrichten würden. In einer Projektstudie zu verzweigten Stützen eines Seminars von *Frei Otto* für eine Ausstellungshalle wurde dies anhand von Fasern in einem Polyesterbad gezeigt, die nach Erhärten ein festes Modell bilden (Projektstudie „Baumstrukturen“ Yale Universität, USA 1960, Studierende bei *Frei Otto* während eines Seminars). Das physikalische Modell wies eine Topologie mit drei Hierarchieebenen und der Teilungszahl 4 auf.

Virtuell können mit Relaxationsmodellen derartige verzweigte Strukturen nachgebildet werden. Diese phänomenologische Herangehensweise basiert auf einem Teilchen-Feder-System, das im Gleichgewichtszustand der Topologie verzweigter Stützen entspricht (Bild 57).

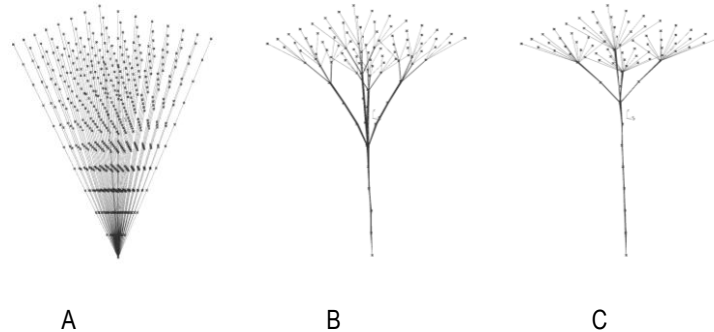


Bild 57: Feder-Kraft-Modell zur Topologiefindung

A: Ausgangssystem, B: System mit Teilungszahl 4, C: System mit stärkerer horizontaler Anziehungskraft zwischen den Knoten

Angewendet auf hierarchisch regelmäßige Verzweigungen werden die Stützenkopfpunkte ($n > 1$) und der Stützenfußpunkt als starr gehalten angenommen und Linien zwischen diesen erstellt. Die Linien werden äquidistant unterteilt (Anzahl m) und für jedes Segment wird eine Feder (Anzahl $n \cdot m$) definiert. Die Punkte an den Segmentenden werden horizontal pro Ebene orthogonal vernetzt. Die Startgeometrie ist eine V-förmige Struktur mit einem Strang pro Stützenkopfpunkt mit vernetzten Ebenen zwischen den Diskretisierungspunkten. Anschließend werden für jedes Segment eine Feder und für jede horizontale Netzkante eine Anziehungskraft definiert. Das Verhältnis der Federkraft und der Anziehungskraft bestimmt die geometrische Form der Struktur. Die Anziehungskraft ist über ein Potenzgesetz definiert (Gl. 8) und nimmt mit dem Abstand zwischen verbundenen Knoten je nach Einstellung linear oder quadratisch zu.

$$F = c * x^{-y} \quad \text{Gl. 8}$$

- F Kraft zwischen zwei Punkten
- x Abstand zwischen zwei Punkten
- y Exponent
- c Faktor

Für die V-förmige Grundstruktur ist für alle Segmente aller Stränge jeweils eine lineare Feder definiert. Ziel der Iteration ist es, den geometrischen Ort der Knoten zu bestimmen, in dem die Anziehungskräfte mit den rückhaltenden Kräften aus den Federn an den Segmenten im Gleichgewicht sind. Variationen des Verhältnisses der Federsteifigkeit und des Faktors der Anziehungskraft bewirken unterschiedliche Geometrien. Im Grenzfall, in dem die Anziehungskraft gleich Null ist, wird die V-förmige Ausgangsgeometrie erhalten. Ist das Verhältnis der Federsteifigkeit zur Anziehungskraft groß, resultiert eine Geometrie, in der sich alle aufgehenden Elemente im obersten Diskretisierungspunkt verzweigen.

Die Feder-Kraft-Methode ist eine Möglichkeit zur Generierung verzweigter Geometrien. Mechanisch informiert, referenziert und deshalb besser geeignet sind Verfahren der Strukturoptimierung:

Die Strukturoptimierung dient als Methode, um trageffiziente Konfigurationen für verzweigte Bauteile zu finden. Sie wird eingeteilt in die Dimensions- und Gestaltoptimierung (Baier et al. 1994, S. 163). Die Gestaltoptimierung kann weiter differenziert werden in Methoden zur Formoptimierung und Topologieoptimierung. Bei der Formoptimierung wird die Geometrie des Bauteils variiert ohne die Topologie zu ändern (Mattheck 1982, 1992). Bei der Topologieoptimierung wird die Lage und Anordnung geometrischer Strukturen im Raum verändert. Besonders geeignet für den Tragwerksentwurf ist bei Vorgabe der Topologie mit diskreten Stäben die Formfindung verzweigter Strukturen mit einer Kombination aus Formoptimierung und Dimensionierung, bei der die Stabilität berücksichtigt wird (Bild 58).

Optimierungskriterien für eine verzweigte Stütze können exemplarisch die Zielfunktion der Massenreduktion mit Nebenbedingungen wie dem Stabknicken bzw. der Festigkeit sein. Bletzinger (1990) gibt eine Beziehung zur Querschnittsoptimierung in Fachwerken unter Berücksichtigung von Spannungen und Knicken an (Gl. 9). Außerdem zeigt Bletzinger (1990) zwei Ergebnisse einer Optimierung einer verzweigten Stütze, bei der die Orte der Knoten variiert werden. Bei der ersten handelt es sich um eine fächerförmige Anordnung der schrägen Stäbe, die vom Ort der Einzellastaufbringung zu einem gemeinsamen Punkt zusammenlaufen. Diese Lösung stellt ein lokales Minimum dar. Die Struktur besitzt zwei Ebenen mit einem Vorgänger und vier Nachfolgern. Bei der zweiten Lösung handelt es sich um ein Verzweigungssystem mit drei Ebenen und einer Teilungszahl von 2, dem globalen Minimum. Typisch für die Anwendung von evolutionären Algorithmen ist die Möglichkeit, nicht das absolute Minimum zu erhalten, sondern einen Iterationsausgang mit einem lokalen Minimum.

Im Folgenden wird das Ergebnis der beschriebenen Optimierung am Beispiel einer räumlich verzweigten Stütze vorgestellt. Als Optimierungsziel wird die Reduktion des Gesamtgewichts festgelegt. Gesucht sind die Lage der Knotenpunkte im Raum sowie die erforderlichen Querschnitte. Die Querschnittsdimensionierung, die die Stabilität berücksichtigt, wird mit einem evolutionären Optimierungsalgorithmus kombiniert. Das System ist eingespannt und an den Knoten der Stützenkopfpunkte werden Biegemomentengelenke definiert. Für die Zugstäbe werden Vollquerschnitte vorgegeben und für die Druckstäbe Kreisringquerschnitte ($d/t = 50$), die beide in 1 mm-Schritten abgestuft werden.

Im symmetrischen System erhalten die korrespondierenden Stäbe der vier Quadranten gleiche Querschnitte, deren Durchmesser für die erste Ebene gleich sind und bei der zweiten Ebene nach außen zunehmen. Typisch für das regelmäßige Raster am Stützenkopf sind leicht gegenläufig geneigte innere Stäbe in der zweiten Ebene.

Für eine Verzweigung mit lediglich zwei statt drei Hierarchieebenen und einer Teilungszahl von 16 erhält man im Beispiel aus Bild 59 als bestes Ergebnis das 1,6-Fache Gewicht für die Stütze.

$$\hat{g}_i = \left(\frac{-c \pi^2 E x_j}{l_j^2} - \sigma_j \right) (x_j - \bar{x}_{Lj}) \leq 0$$

Gl. 9 aus Bletzinger (1990), mit:

- σ_j Spannung im i-ten Stab
- x_j Unbekannte Querschnittsfläche
- \bar{x}_{Lj} Zusätzliche untere Schranke
- $\bar{x}_{Lj} > x_{Lj} \geq 0$
- c Formfaktor ($c = l/A^2$, Kreis $c = \pi/4$)
- E Elastizitätsmodul
- l_j Stablänge

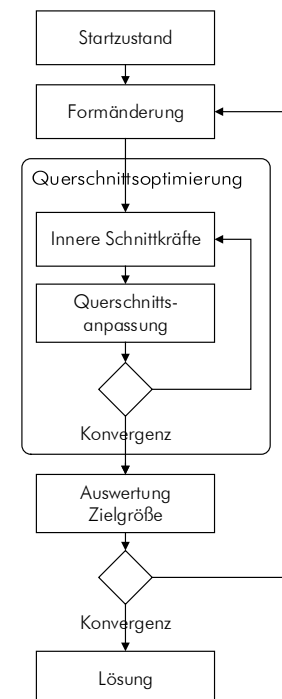


Bild 58: Formoptimierung einer verzweigten Stütze in Anlehnung an Bletzinger (1990)

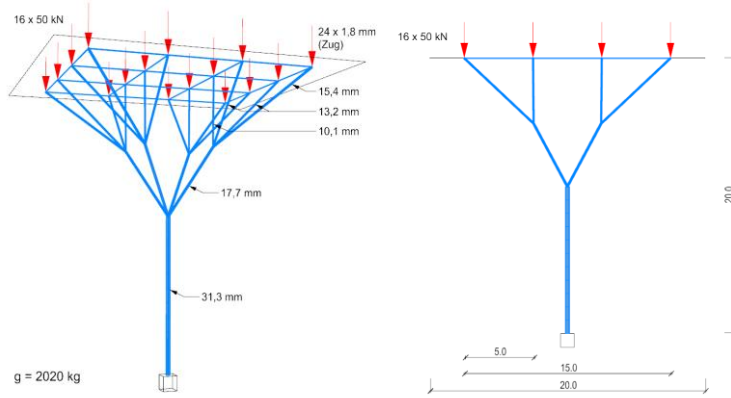


Bild 59: Formoptimierung einer verzweigten Stütze mit 16 vertikal beanspruchten Stützenkopfpunkten

Ohne Berücksichtigung der Stabilität kann eine lediglich V-förmige Anordnung der aufgehenden Stäbe erhalten werden. Der Einsatz von Optimierungsalgorithmen in kommerziellen Programmen lässt sich durch grafische Programmieroberflächen leicht auf andere baupraktisch relevante Problemstellungen anpassen. Weitere Aufgabe kann zum Beispiel die optimale Stützenkopfanordnung sein, falls nicht jeder Punkt des Trägerrosts unterstützt wird.

Zur Gestaltfindung kann außerdem die Methode der Topologieoptimierung eingesetzt werden. Die Verfahren beruhen unter anderem auf dem Herabsetzen des Elastizitätsmoduls von Finiten-Elementen, die wenig beansprucht sind. Beispielsweise werden für einen möglichen Strukturraum, der als Randbedingungen linksseitig zwei Auflager enthält und rechtsseitig zwei horizontale Kräfte, nach Reduktion der Fläche auf die meistbeanspruchten Bereiche je nach Auflagerabstand verschiedene Strukturen erhalten, die an H-, V- oder Y-Formen erinnern (Bild 60 A). Je nach vorgegebenem Ziel der akzeptablen Restfläche werden für variierte Seitenverhältnisse unterschiedliche Strukturen erhalten (Bild 60). Stabilitätsversagen, wie oben bei der Diskretisierung mit Stäben angeführt, wird hier nicht berücksichtigt.

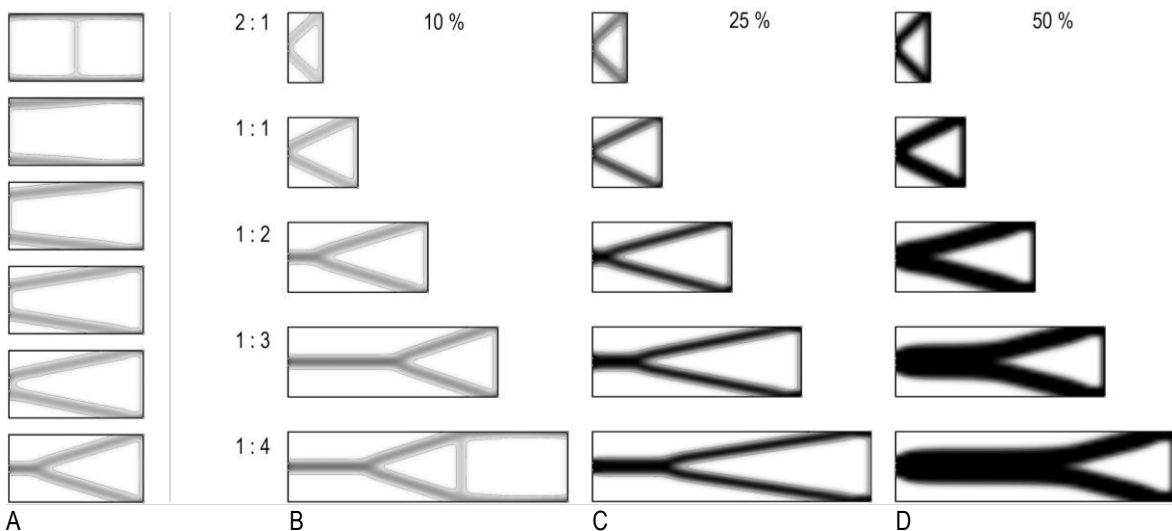


Bild 60: Topologieoptimierung ebener Strukturen
 A: Variation der linksseitigen Auflagerabstände,
 B – D: Verschiedene Zielvorgaben an Restfläche mit Variation der Seitenverhältnisse

Zu beobachten ist bei gleichen Randbedingungen ein Einfluss der Höhe der erlaubten Restfläche auf die Form und auch auf die Topologie. Bei Seitenverhältnissen zwischen 2 : 1 und 1 : 1 stellt sich eine V-förmige Struktur ein. Bei Seitenverhältnissen zwischen 1 : 2 und 1 : 4 werden Y-förmige Verzweigungen erhalten. Beim Seitenverhältnis 1 : 4 und einer Restfläche von 10 % wird eine zusätzliche zugbeanspruchte Strebe erhalten. Unter dem Aspekt der Topologieoptimierung werden – übertragen auf die Raumkonzeption – verzweigte Stützen mit zwei Einzelkräften ungefähr erhalten, falls die Höhe das Zweifache der Breite beträgt.

Wie zuvor beschrieben stehen verschiedene Methoden der Formfindung zur Verfügung, sowohl experimentelle Methoden, solche, die diese phänomenologisch oder mechanisch basiert virtuell nachbilden, sowie die Methoden der Strukturoptimierung, die sich ihrerseits in verschiedene Verfahren einteilen lassen. Durch die gute Verfügbarkeit der Methoden in kommerziellen Programmen können auch aufwendige Optimierungen mit evolutionären Algorithmen praktisch eingesetzt werden und stellen ein effektives Hilfsmittel sowohl zum Erkennen grundlegender Zusammenhänge der Gestalt von verzweigten Stützen als auch für deren Entwurf dar.

5.2.4. Einfluss der Stabwinkelstellung

Im Folgenden wird untersucht, welchen Einfluss eine vertikale Verschiebung des Verzweigungspunktes einer symmetrisch verzweigten Stütze mit zwei Nachfolgern auf die Tragfähigkeit hat.

Bild 61 zeigt den Zusammenhang zwischen der einwirkenden und aufnehmbaren Last eines schrägen Stabes einer verzweigten Stütze in Abhängigkeit der Neigung gegen die Horizontale für eine vertikale Einzellast. Mit zunehmendem Winkel nähert sich die einwirkende Kraft der äußeren an (Bild 61A). Für die Normalkraft im Stab gilt:

$$N = \frac{F_v}{\sin \alpha} \quad \text{Gl. 10}$$

F_v Vertikale Einzellast
 N Einwirkende Normalkraft

Die aufnehmbare Normalkraft nimmt mit zunehmendem Winkel ab, da sich die Stablänge vergrößert (Bild 61 B).

$$N_k = \left(\frac{\pi \cos \alpha}{s_k} \right)^2 EI \quad \text{Gl. 11}$$

s_k Euler Knicklänge
 E Elastizitätsmodul
 I Flächenträgheitsmoment
 N_k Aufnehmbare Normalkraft

Akzeptable Lösungen werden erhalten, wenn die aufnehmbare Normalkraft größer ist als die einwirkende (Bild 61 C).

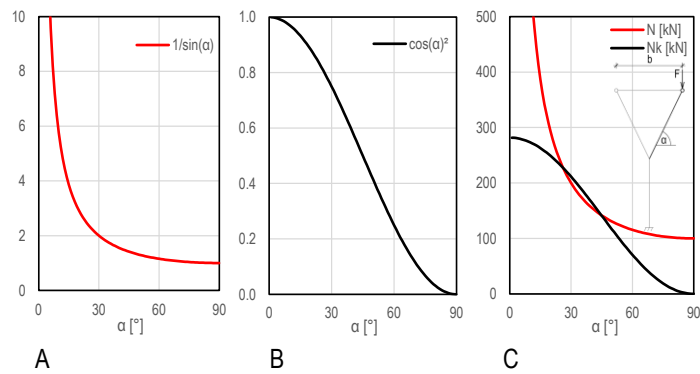


Bild 61: Einwirkende Normalkraft N und aufnehmbare Knicklast N_k in kN

A: Term der einwirkenden Normalkraft normiert mit F ,

B: Term der aufnehmbaren Normalkraft normiert mit $(\pi / s_k)^2 EI$,

C: Beispiel mit $EI = 714 \text{ kNm}^2$, $d = 125 \text{ mm}$, $t = 5 \text{ mm}$, $b = 10 \text{ m}$

Bei einem Winkel von 35° stellt sich bei gegebener Schlankheit aus mechanischer Sicht das beste Verhältnis zwischen Einwirkung und Widerstand ein (Bild 61 C).

Unter der Voraussetzung gleicher zulässiger Festigkeit im Bereich einer Verzweigung lässt sich für normalkraftbelastete Systeme in Abhängigkeit des Winkels der nachfolgenden Schenkel, gemessen gegen die Horizontale, das Durchmesser Verhältnis von Vorgänger und Nachfolger angeben. Bild 62 zeigt dies für verschiedene Anzahlen an Nachfolgern ohne Berücksichtigung einer Tragfähigkeitssteigerung.

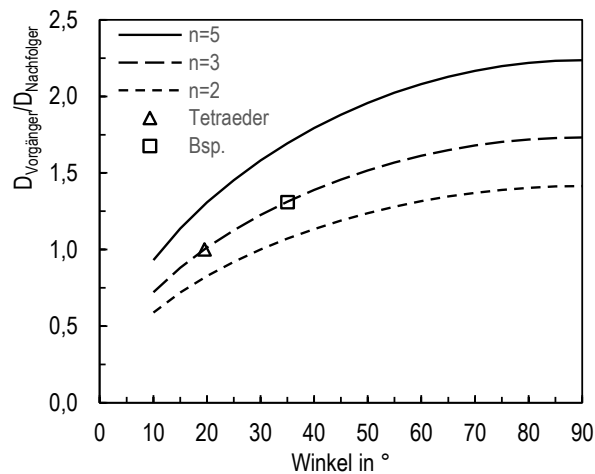


Bild 62:

Durchmesser Verhältnis des Nachfolgers bei räumlicher Anordnung im Verhältnis zum Durchmesser des Vorgängers für unterschiedliche Anzahl angeschlossener Stäben

5.3. Konstruktion

Im Folgenden werden grundlegende Informationen zu Fasern und Matrixsystemen zusammengefasst. Diese Werkstoffe sind Bestandteil von Faser-Verbunden, deren Herstellung, Verarbeitung sowie resultierende physikalische und mechanische Eigenschaften ebenfalls vorgestellt werden. Anschließend wird auf die Herstellung spezieller verzweigter Textilien als Voraussetzung für verzweigte Hüllen eingegangen sowie deren Aufbau und Fertigung für hybride FKV-Beton-Tragknoten erläutert.

5.3.1. Fasern

Die zum Flechten verwendeten Kohlenstoff- und Glasfasern sind Multifilamente und bestehen aus einer bestimmten Anzahl Endlosfasern, sogenannten Filamenten (DIN 60000). Mehrere (tausend) Filamente werden ersponnen und zu einem Multifilament (Roving) zusammengefasst (Bild 64). Gängige Multifilamente bestehen aus 1 k – 24 k und mehr Filamenten (1 k = 1000 Filamente). Multifilamente mit größerer Anzahl an Filamenten werden als *heavy tows* bezeichnet. Die Feinheit wird in *Tex* angegeben. Häufig sind die Rovings geringfügig verdreht, um ein Separieren der einzelnen Filamente zu verhindern.

In der Regel sind die Rovings für FKV mit einer Schlichte beaufschlagt. Diese Faserpräparation erfüllt mehrere Aufgaben, wie die Haftvermittlung zwischen Fasern und Matrix, den Schutz der Fasern vor Knicken und Abrieb sowie eine bessere Verarbeitbarkeit. (Teschner 2013)

Wichtig für die angestrebte Verwendung sind neben hoher Festigkeit ein hoher Elastizitätsmodul der Fasern sowie eine gute Alkalibeständigkeit.

Glasfasern

Glasfasern sind meist weiß (Bild 64), anorganisch, amorph, und verhalten sich isotrop hinsichtlich der Steifigkeit und Festigkeit.

Hergestellt werden sie in einem Schmelzspinnverfahren mit Temperaturen bis circa 1400 °C. Das geschmolzene Glas wird durch Düsen gepresst und schnell abgezogen, damit es im Durchmesser von 5 – 24 µm erstarrt (Schürmann 2007). Glasfasern bestehen überwiegend aus Quarz (SiO₂) vernetzt mit anderen Oxiden wie Al₂O₃, CaO, B₂O₃, MgO und weiteren (DIN 1259-1).

In der Regel haben Glasfasern eine geringe Alkalibeständigkeit. Alkali resistente Glasfasern (AR) aus Natrium-Zirkon-Silikat-Glas mit einem hohen Anteil an Na₂O und ZrO₂ sind auch in alkalischen Milieus dauerhaft beständig und für die Einbettung in Mörtel und Beton geeignet (DIN 1259-1).

Kohlenstofffasern

Handelsübliche Kohlenstofffasern bzw. Carbonfasern sind schwarz (Bild 64). Die organischen Fasern bestehen zu 90 % aus Kohlenstoff in grafitierter Form (Schürmann 2007). Auf molekularer Ebene bestehen die Fasern aus geschichteten länglichen Grafitketten, die in Faserrichtung orientiert und aus hexagonalen Gittern aufgebaut sind. Während die länglichen Gitterstrukturen in Faserrichtung starke kovalente Bindungen aufweisen, existieren zwischen diesen Schichten schwächere Van-der-Waals-Bindungen (Bild 65). Die Fasern

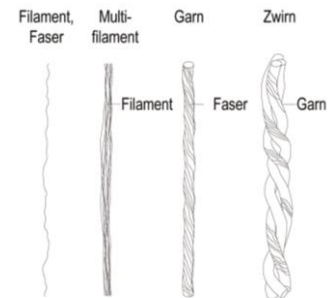


Bild 63:
Mögliche Verarbeitungsformen von Filamenten nach Knippers et al. (2010)



Bild 64:
Rovings aus Carbon in schwarz und Glasfasern in weiß

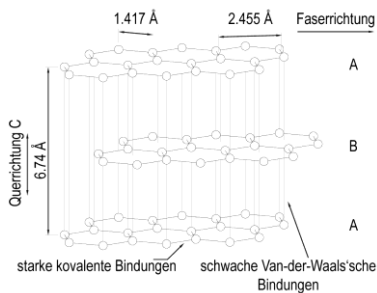


Bild 65:
Gitteraufbau eines Kohlenstoff-Einkristalls und schematische Darstellung der Bandstruktur von grafitierten Kohlenstofffasern nach Flemming und Roth (2003), S. 557

bestehen aus Fibrillen eingelagert in amorphem, also atomar unregelmäßig angeordnetem Kohlenstoff (Schürmann 2007). Dieser unterschiedliche Aufbau der grafitierten Kohlenstofffasern ist der Grund für die anisotropen Eigenschaften in Bezug auf die Festigkeit, Steifigkeit und Wärmeausdehnung.

Die Festigkeiten und Steifigkeiten können in Querrichtung nur circa ein Zehntel derer in axialer Richtung betragen. Dadurch lassen sich die Fasern zur Verarbeitung mit einer Schere schneiden.

Carbonfasern sind sehr gut alkalibeständig. Die Wärmeausdehnung ist in Längsrichtung negativ, in Querrichtung positiv. Durch die Anordnung von Fasern in unterschiedlichen Faserwinkeln können stabförmige Bauteile mit praktisch keiner Wärmeausdehnung hergestellt werden (Schürmann 2007). In axialer Richtung sind sie gut wärmeleitend, weniger in Querrichtung (Schürmann 2007).

Carbonfasern sind elektrisch leitfähig, der spezifische Widerstand beträgt $8 - 20 \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ (Schürmann 2007). Wegen der Leitfähigkeit und der Differenz des elektrischen Potentials beispielsweise gegenüber Metallen (Aluminium $-1,65 \text{ V}$, Eisen $-0,44 \text{ V}$, Kohlenstoff $+0,74 \text{ V}$) besteht bei Vorhandensein von Elektrolyten die Möglichkeit der Kontaktkorrosion in Verbindung mit anderen Werkstoffen. Kommt es zu einer elektrochemischen Reaktion zwischen Metall und CFKV, ist die Anode, auf der ein Materialabtrag stattfindet, wegen des geringeren elektrischen Potentials das Metall und die Carbonfaser die Kathode (Flemming und Roth 2003). In Folge wird die Korrosion metallischer Verbindungsmittel begünstigt. Abhilfe schafft beispielsweise eine elektrische Isolation der beiden Materialien durch Beschichtungen.

Die Spannungsdehnungslinie der Carbonfaser ist überwiegend linear und ab circa 90 % der Festigkeit zum Bruch hin progressiv (Schürmann 2007). Beim Entwurf für ein duktileres Tragverhalten ist bei der Faserauswahl wegen der Sprödigkeit und der geringen Bruchdehnung im Vergleich zu Stahl besondere Sorgfalt erforderlich (Tabelle 6). Durch die hohen Steifigkeiten und Festigkeiten in Faserlängsrichtung in Verbindung mit einer geringen Dichte zeichnen sich Carbonfasern als hervorragender Konstruktionswerkstoff aus. Dies geht aus dem Ashby-Diagramm, in dem Materialien im Verhältnis von Elastizitätsmodul und Festigkeit eingetragen sind, besonders deutlich hervor (Lienhard 2014).

Großindustriell sind zwei Verfahren zur Herstellung von Carbonfasern als Endlosfasern für CF-EP-Bauteile etabliert: die Produktion auf Basis von Polyacrylnitril (PAN) im Lösungsmittelspinnprozess (Bild 66) und die auf Basis von Pech im Schmelzspinnprozess, wobei erstere die kostengünstigere Produktion ermöglicht (Flemming und Roth 2003).

Im PAN Verfahren werden 86 % der Carbonfasern hergestellt, das im Folgenden beschrieben wird (Witten 2014):

(1) Das nicht schmelzbare Ausgangsmaterial Polyacrylnitril wird gelöst und durch Düsen gepresst zu Filamenten gesponnen, die gewaschen, gestreckt, getrocknet und aufgewickelt werden. Das Precursormaterial wird in den nächsten Schritten zu Carbonfasern prozessiert. (2) Zunächst werden die Ausgangsfilamente in Luftatmosphäre gestreckt und bei 250 – 300 °C oxidiert. Dadurch werden unschmelzbare stabilisierte Fasern erhalten. (3) Anschließend erfolgt die Carbonisierung in Stickstoffatmosphäre bei 600 – 1800 °C ohne Zugspannung. (4) Für zwischenmodulige, hochfeste und ultrahochfeste Fasern erfolgt eine weitere thermische Behandlung in einer Argonatmosphäre bei 2000 – 3000 °C. Höhere Steifigkeitswerte werden durch höhere Temperaturen erzielt. (5) Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe wird die Oberfläche der Faser modifiziert, industriell meist durch die anodische Oxidation (Witten 2014). (6) Im letzten Schritt vor der Verpackung werden die Fasern präpariert, indem sie mit einer Schlichte überzogen werden.

Die Imprägnierung erfolgt beispielsweise in Form eines Tauchbads und beträgt in der Regel circa 0,5 – 2,5 %, häufig 1 % des Masseanteils der Fasern. Die Schlichte muss auf den weiterführenden textilen Prozess und die verwendete Matrix abgestimmt sein. Eine weiterführende Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Fasern und Matrix findet sich beispielsweise in Wetjen (2016).

Basaltfasern

Basaltfasern haben ein schwarz bis grün-bräunliches Erscheinungsbild. Die anorganischen Fasern werden aus geschmolzenem Basalt, einem Ergussgestein vulkanischen Ursprungs, in einem Schmelzspinnverfahren mit Temperaturen bis circa 1450 °C gewonnen (DIN SPEC 25714). Als Naturprodukt unterliegt die exakte Zusammensetzung der Basaltfasern, die aus Oxiden bestehen, dem aus der Lagerstätte gewonnenen Ausgangsmaterial. Basaltfasern weisen eine gute Alkalibeständigkeit auf (Bergmeister 2003), sind nicht leitend, inert und UV-beständig (Schürmann 2007).

Basaltfasern werden in dieser Arbeit nicht verwendet, können mittelfristig wegen der guten mechanischen Eigenschaften aber eine Alternative zu Carbonfasern sein, falls zukünftige Entwicklungen Verfügbarkeit, Preis und die Nachhaltigkeit gegenüber Carbonfasern positiv beeinflussen.

Reißlängen

Die Reißlängen der Chemiefasern liegen deutlich über denen der im Bauwesen gebräuchlichen Metalle und Hochleistungsstähle (Bild 67). Die Reißlänge von Glasfasern beträgt circa das Vier- bis Achtfache derer von Spannstahl, die von Carbonfasern sogar das 10- bis 15-Fache.

Faserfestigkeiten

Die Festigkeiten von Glas, Basaltfasern und HT-Carbonfasern liegen mit 3 – 5 GPa in ähnlicher Größenordnung (Tabelle 6). Die Festigkeit der AR-Glasfasern ist etwas geringer, wie auch die der HM-Carbonfasern. Während die Elastizitätsmodule von Glas- und Basaltfasern ähnlich groß sind, weisen die der Carbonfasern drei- bis siebenfach höhere Werte auf. Glasfasern haben höhere Bruchdehnungen als Carbonfasern, wo-

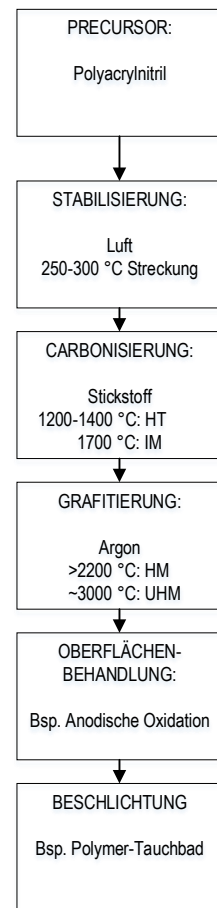


Bild 66:
Prozessweg zur Herstellung von Kohlenstofffasern basierend auf Polyacrylnitril nach Eickenbusch und Krauss (2013) und Witten (2014)

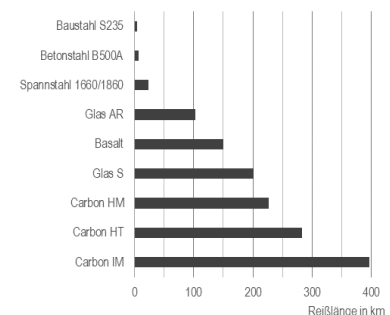


Bild 67:
Reißlängen ausgewählter Stähle und Chemiefasern

bei die ähnlichen Werte von AR-Glasfasern und Basaltfasern etwas unter den der anderen Glasfaserarten liegen. Im Gegensatz zu den mechanisch isotropen Glasfasern weisen die Carbonfasern ein ausgeprägtes anisotropes Verhalten auf (Bergmeister 2003).

Die Carbonfasern lassen sich im Herstellungsprozess nicht für alle mechanischen Eigenschaften gleichzeitig verbessern. So zeigen Fasern mit sehr hohen Festigkeiten nur mittlere Werte für den Elastizitätsmodul und umgekehrt (Bergmeister 2003).

Tabelle 6: Physikalische und mechanische Eigenschaften ausgewählter mineralischer Fasern

Faser	Art	f_{ten}	E_{ten}	ϵ_{ten}	ρ	α_T	d_f	Quelle
		GPa	GPa	%	g/cm ³	10 ⁻⁶ /K	µm	
Glas	E	3,45	72	4,6	2,62	5,4	9 - 24	(Teschner 2013)
	R	4,40	85	4,6	2,55	4,1	9 - 24	(Teschner 2013)
	S	4,90	87	5,7	2,48	2,0	9 - 24	(Teschner 2013)
	AR	2,70	21 - 74	2,0 - 4,3	2,68 - 2,70	-	9 - 24	(Knippers et al. 2010)
Basalt	-	3,90	85	3,2	2,65	0,6	9 - 13	(Teschner 2013)
Carbon	HT	3 - 5	200 - 250	1,2 - 1,4	1,75 - 1,80	-1,0	6 - 9	(Knippers et al. 2010)
	IM	4 - 7	250 - 350	1,1 - 1,9	1,73 - 1,80	-1,2	6 - 9	(Knippers et al. 2010)
	HM	2 - 4	350 - 450	0,4 - 0,8	1,79 - 1,91	-1,3	5 - 9	(Knippers et al. 2010)

E: electric glass, R: resitance glass, S: high-strength glass, AR: alkali-resistant glass; HT: high tensile strength, IM: intermediate modulus, HM: high modulus; ausführliche Einteilung s. Bergmeister (2003), Witten (2014)

5.3.2. Matrix

Eingesetzt werden im Allgemeinen Matrixmaterialien basierend auf Keramik, Kunststoff, Glas oder auch Beton. Gerade keramische Matrixmaterialien haben vielversprechende Eigenschaften hinsichtlich der Beständigkeit bei hohen Temperaturen und werden in der Automobilindustrie z. B. für Bremsbacken erfolgreich eingesetzt. Deren Potential für Anwendungen im Bauwesen ist momentan Gegenstand der Forschung.

Matrix aus Kunststoff wird eingeteilt in Duroplaste, Thermoplaste und Elastomere. Gängige Harze (Duroplaste) sind Epoxidharze, Polyesterharz (UP) und Vinylester (VE), (Schürmann 2007). Günstige Eigenschaften bei höheren Temperaturen weist Phenolharz (PF) auf, da der maßgebliche Steifigkeitsabfall erst bei circa 300 °C auftritt (Knippers et al. 2010). Eine Brandbeständigkeit bis 300 °C weisen Polyimide und Bismaleinimide auf (Schürmann 2007).

Die eingesetzten Epoxidharze werden aus zwei Komponenten, dem Harz und dem Härter zusammengemischt. Ihre amorphe Struktur erhalten sie durch eine dreidimensionale räumlich engmaschige Vernetzung (Hauptvalenzbindung)

gen). Einmal ausgehärtet lassen sie sich unter Wärmeeinwirkung nicht mehr umformen, sondern zersetzen sich bei Steigerung der Temperatur. Beim Härten wird eine vollständig vernetzte Copolymerisation angestrebt, die auch Ziel des Nachhärtens (Tempern) ist, bei dem der FKV-Werkstoff für eine bestimmte Zeit erhitzt wird, um günstige Reaktionsbedingungen zu schaffen.

Die Eigenschaften der Matrix können durch Zugabe von Füllstoffen wesentlich geändert werden.

In dieser Arbeit wird als Matrix für die Fasern Epoxidharz verwendet.

5.3.3. FKV – Faser-Kunststoff-Verbund

Die Materialeigenschaften eines FKV beschreiben die Eigenschaften einer Struktur auf makroskopischer Ebene. Mit Hilfe der klassischen Laminattheorie (CLT, classic laminate theory) können mechanische Eigenschaften von Laminaten und Spannungen bezogen auf Laminatschichten berechnet werden. Ein Laminat besteht aus mehreren imprägnierten textilen unidirektionalen Einzellagen (UD-Schicht). Zunächst werden mechanische Eigenschaften mit den Mischungsregeln für jede Einzelschicht bestimmt. Anschließend werden diese mechanischen Eigenschaften des Gesamtlaminats unter Berücksichtigung der Ausrichtungen und Schichtdicken der Einzellagen berechnet.

Während Festigkeiten von 4 000 MPa bei Glas- und Kohlenstofffasern und bei letzteren Elastizitätsmodule von 250 000 MPa üblich sind (Tabelle 6), liegen die mechanischen Kenngrößen des Verbunds deutlich darunter, da die Fasern in Kombination mit einer in der Regel wesentlich weniger festen und weniger steifen Matrix wirken. Im Vergleich von UD-Schichten zu im Bauwesen üblichen Betonen und Stählen zeigen sie dennoch hohe Festigkeiten und Elastizitätsmodule (Bild 68). Trotz der Nichtlinearität der Fasern kann linearelastisches Materialverhalten in den baupraktischen Fällen als hinreichend genau angenommen werden. Die Druckfestigkeit von CF-EP-Verbunden aus biaxialem Geflecht ist kleiner als die Zugfestigkeit (Birkefeld 2013).

Maßgeblichen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften haben der Faserwinkel (Bild 69) und der Faservolumengehalt.

Der Fasermassenanteil berechnet sich zu:

$$\psi_m = \frac{m_f}{m_{fkv}}$$

Gl. 12
nach Clarke und
Eberhardt (2002)

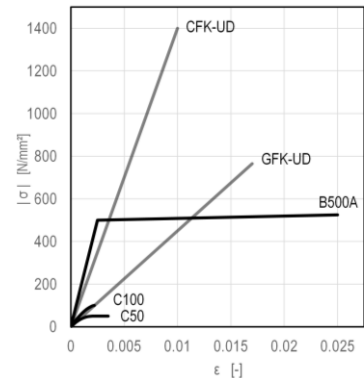
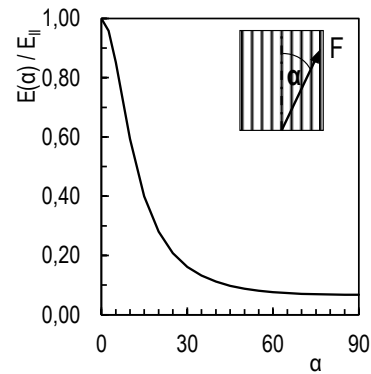
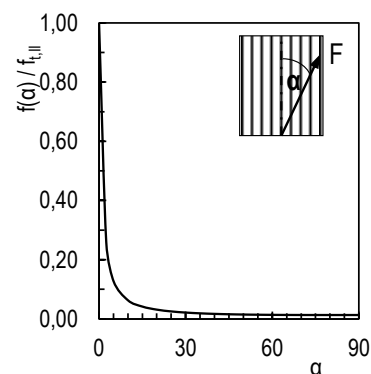


Bild 68:
Spannungsdehnungslinien von CF-EP (CFK), GF-EP (GFK), Betonstahl und Beton im Vergleich



A



B

Bild 69:
Einfluss des Faserwinkels auf die mechanischen Eigenschaften einer UD-Schicht (CF-EP)
A: Elastizitätsmodul
B: Zugfestigkeit

Der Faservolumengehalt wird erhalten aus:

$$\varphi = \frac{1}{1 + \frac{1 - \psi_m \cdot \rho_f}{\psi_m \cdot \rho_m}} = \frac{V_f}{V_{fkv}}$$

Gl. 13
nach Clarke und
Eberhardt (2002)

- ρ_f Dichte der Fasern
- ρ_m Dichte der Matrix
- ψ_m Fasermassenanteil
- m_f Masse Fasern
- m_{fkv} Masse Faser-Kunststoff-Verbund
- V_f Volumen Fasern
- V_{fkv} Volumen Faser-Kunststoff-Verbund

Der faserparallele Elastizitätsmodul E_{II} kann nach Gl. 14 anhand der Mischungsregel berechnet werden, wie auch weitere relevante Kenngrößen mechanischer Eigenschaften (Schürmann 2007):

$$E_{II} = E_{fII} \cdot \varphi_f + E_m \cdot (1 - \varphi_f) \quad \text{Gl. 14}$$

aus Schürmann (2007)

- E_{II} Faserparalleler Elastizitätsmodul UD-Schicht
- E_{fII} Faserparalleler Elastizitätsmodul einer Faser
- E_m Elastizitätsmodul der Matrix
- φ_f Faservolumengehalt

Imprägnierung von FKV-Bauteilen

Das Imprägnieren bezeichnet hier ein Verfahren zum Einbringen von Matrixmaterial in Fasern.

Die Imprägnierverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Durchführung und der erzielbaren Qualität von FKV-Bauteilen in Bezug auf den Faservolumengehalt, die Maßhaltigkeit, die Stückzeiten und Kosten als auch durch ihren Einsatzzweck. Angewendet wird in dieser Arbeit das Verfahren des Handlaminierens, mit dem erfahrungsgemäß Faservolumengehalte von 40 % erzielt werden können, und das Vakuuminfusionsverfahren (VRI), mit dem Faservolumengehalte von bis zu 60 % erzielt werden können. Von einer Verwendung von bereits vorimprägnierten Rovings, Gelegen oder anderen Textilien, sogenannten Prepregs, wird wegen des Flechtvorgangs abgesehen. Weitere Herstellungsverfahren, wie das Resin Transfer Verfahren (RTM), bei dem nach Einlage des Verstärkungstextils Formhälften geschlossen und unter niedrigem Druck Harz injiziert wird (Witten 2014), erfordern eine Form, bieten aber die Möglichkeit einer hohen Produktqualität und hoher Stückzahlen.

Anstatt einer Serienfertigung mit gleicher Geometrie, wie sie zum Beispiel im Automobilbau üblich ist, weisen die Verzweigungen für die architektonische Anwendung individuelle Geometrien oder geringe Stückzahlen auf, weshalb auf Herstellverfahren, die eine Form notwendig machen, verzichtet wird.

Das Vakuuminfusionsverfahren kann bei komplexen Bauteilgeometrien eingesetzt werden. Hierbei wird durch Unterdruck Harz in das zu imprägnierende Textil gezogen. Die Viskosität der Vakuuminfusionsharze ist in der Regel höher als diejenige der zur Handlamination eingesetzten oder der von in Nasswickelverfahren verwendeten, bei denen ein Abtropfen nicht erwünscht ist.

Wie in Bild 70 gezeigt werden in Vorbereitung zur Vakuuminfusion mehrere Lagen über dem Textil angebracht. Nach der Erhärtung des Harzes werden diese Lagen wieder entfernt und das FKV-Bauteil erhalten. Für eine gute Oberflächenqualität und konstante Laminatdicken ist eine faltenfreie Ablage der Lagen, insbesondere der unteren Schichten, erforderlich.

Der Aufbau der Vakuuminfusion, wie sie im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird, besteht aus folgenden Lagen (Bild 70, Bild 71):

Zunächst wird ein Abreißgewebe (2) auf das Textil abgelegt, welches sicherstellt, dass sich die eingesetzten Lagen nach Erhärten des Harzes wieder vom FKV-Bauteil lösen lassen, da nur eine geringe Haftung zwischen Abreißgewebe (Polyamid) und Harz (keine chemische Bindungsfähigkeit) besteht. Ein weiteres Trennvlies (3) sorgt für eine spätere gute Ablösung und gewährleistet zusammen mit einem Gitter (4), das die Durchströmung begünstigt, eine gute Verteilung des Harzes. Die semipermeable Membran (5) hat die Eigenschaft luftdurchlässig zu sein, nicht aber harzdurchlässig. Alle Lagen unter der Membran (5) werden mit Harz infiltriert. Deshalb gilt es, diese an den Rändern sorgfältig abzudichten und einen Einlass für das Harz (Einlass, 8) vorzusehen. Über der Membran liegt ein Vlies, das eine Besaugung der gesamten Membranoberfläche ermöglicht. Darüber befindet sich eine luftdichte Folie, die einen Auslass für die abzuziehende Luft enthält (Auslass, 9).

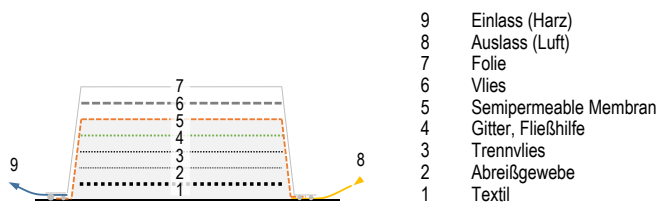


Bild 71: Schematischer Aufbau einer Vakuuminfusion

Bei eingeschlossenen konvexen Formen, wie zur Herstellung eines Rohres, wird der Formkern entweder mechanisch mittels einer hydraulischen Presse entfernt oder bei teilbaren Kernen stückweise entnommen.

5.3.4. Textile Verfahren für verzweigte Hüllen

Die Herstellung hochbelastbarer verzweigter Hüllen aus FKV stellt wegen der notwendigen lastangepassten Anordnung der Fasern und der komplexen Geometrie mit veränderlicher doppeltgekrümmter Oberfläche, die mehrfach geöffnet ist, eine besondere Herausforderung für die Produktion textiler Erzeugnisse dar.

Die Hülle aus Faserverbundwerkstoff für die Verzweigung muss die Anforderungen der Formbeständigkeit während der Montage und Betonage erfüllen. Dies erfordert eine geschlossene Oberfläche und ausreichenden Widerstand gegen Frischbetondruck. Ein kontinuierlicher Faserverlauf zwischen den einzelnen Schenkeln oder zumindest paarweise zwischen zwei benachbarten Schenkeln ist notwendig, um gute mechanische Eigenschaften zu erreichen.



Bild 70:

Lagenaufbau Vakuuminfusionsverfahren (VRI©)

- 1 Textil (hier: biax. Carbongeflecht)
- 2 Abreißgewebe
- 3 Trennvlies
- 4 Gitter
- 5 Semipermeable Membran
- 6 Vlies
- 7 Folie (transparent)

Weben

Die Fertigung verzweigter Hüllen anhand der Webtechnik ist Gegenstand der Forschung und für Durchmesser von mehreren Zentimetern realisiert (Fazeli et al. 2017). Eine Ausrundung zwischen den gewebten Schläuchen liegt jedoch nicht vor.

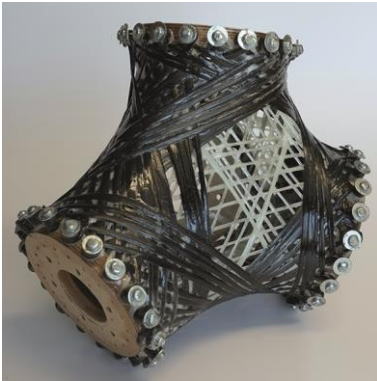


Bild 72:
Konzeptstudie einer vierschenkligen
Verzweigung hergestellt im Wickel-
verfahren (GF/CF-EP, d = 150 mm,
studentische Arbeit)

Wickeln

Eine Vorgehensweise zum kernlosen Wickeln für verzweigte Tragstrukturen ist es, durch die Ablage von Glasfasern zunächst die Zielgeometrie herzustellen und anschließend mit Carbonfasern lastangepasst weiterzuwickeln. Die Wickelstrategien – die Reihenfolge der abgelegten Rovings und deren Fadenspannung bestimmt die Form des Bauteils – wird anhand von Simulationen ermittelt und die praktische Handhabbarkeit in Form von Demonstratoren aufgezeigt (Bild 72).

Um eine für die Hybrid-Bauweise notwendige geschlossene äußere Kontur herstellen zu können, erscheint die Wickeltechnik jedoch ungeeignet, da Lücken nur durch großen Material- und Wickelaufwand vermieden werden können.

Flechten allgemein

Textilien mit guter Flächenabdeckung lassen sich mithilfe der Flechttechnik herstellen, bei der eine hohe Anzahl an Fäden gleichzeitig verarbeitet wird. Besonders für Bauteile mit kurvigem Achsverlauf und veränderlicher Kontur ist sie gut einsetzbar. Die Rovings (Parallelfaserbündel) können jedoch nicht in Umfangsrichtung wie bei der Wickeltechnik angeordnet werden, wie es für maximale Steifigkeit und Festigkeit einer sehr effizienten Umschnürungswirkung notwendig wäre (Jonas und Knippers 2017, S. 518).

Die Flechttechnik ermöglicht eine endkonturnahe Fertigung von dreidimensionalen Bauteilen mit gekrümmter Stabachse und synklastisch oder antiklastisch doppelgekrümmter Oberfläche. Das Flechten ist ein textiler Herstellungsprozess, bei dem durch kreuzweises Übereinanderlegen von kontinuierlichen Fasersträngen ein Textil erzeugt wird. Die zugeführten Fäden sind meist radial angeordnet und werden von Klöppeln abgezogen. Der Flecht kern, auf dem das Textil abgelegt wird, wird senkrecht zur Ebene der Flecht fäden vorge-schoben.

Wird aus den Textilien durch Versetzen mit einer Matrix ein faserverstärktes Kunststoffbauteil mit strukturmechanischem Verwendungszweck gefertigt, ist es wichtig, dass die Fäden gleichmäßig ohne Schlaufenbildung abgelegt werden.

Die Fadenanordnung ist dabei im Wesentlichen abhängig von:

- der Feinheit,
- der Bestückung der Flechtmaschine,
- der Vorschubgeschwindigkeit des Flecht kerns,
- der Flügelraddrehzahl,
- dem Flechtringdurchmesser und
- dem Flecht kern durchmesser.

Um ein geschlossenes Textil zu erhalten, ist es notwendig, die Fadenanzahl, den Fadendurchmesser und den Flechtwinkel auf den Flecht kern durchmesser (Gl. 15) abzustimmen. Letzterer berechnet sich nach Rosenbaum (1991) zu:

$$d_{FK} = \frac{b_F \cdot n_F}{2 \cdot \cos \alpha_F} \quad \text{Gl. 15}$$

mit:

- d_{FK} Durchmesser des Flechtkerns
- b_F Ablagebreite des Flechtfadens
- n_F Anzahl der Flechtfäden
- α_F Flechtwinkel

Die Geschwindigkeiten können während des Flechtvorgangs verändert werden, die Fadenanzahl ist jedoch konstant, da eine Änderung ein Stoppen des Flechtprozesses und Faserenden im Textil zur Folge hat.

Für die Flechtvorgänge im Rahmen dieser Arbeit steht eine Radialflechtmaschine (Fa. Herzog) der DITF Denkendorf zur Verfügung, mit 144 möglichen Flechtfäden und einem Spezialumbau mit 72 Stehfäden, deren Fadenspannung einzeln via Stellmotoren kraftkontrolliert gesteuert werden kann (Bild 73, Schema Bild 74).

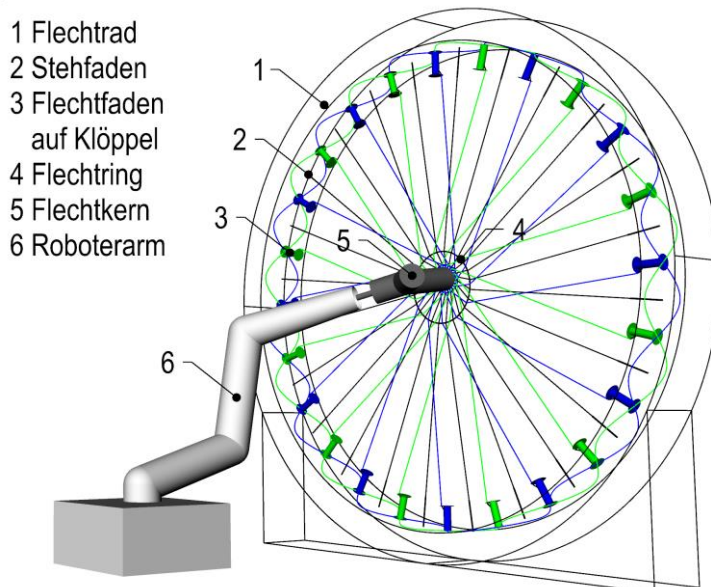


Bild 74: Prinzipieller Aufbau von Flechtrad und Flechtroboter zum Flechten einer Verzweigung



Bild 73: Roboter und Flechtrad (d ~ 4 m) der DITF Denkendorf

In senkrechter Blickrichtung auf das Flechtrad bewegen sich die Spulen, von denen die Flechtfäden zum Flechtzentrum hin abgezogen werden, gegenläufig entlang des Umfangs (Bild 74). Während die Hälfte der Spulenträger im Uhrzeigersinn läuft, bewegt sich jeder zweite gegen den Uhrzeigersinn.

Vom Flechtzentrum in radialer Richtung betrachtet bewegen sich die Spulenträger gegenläufig sinusförmig, um entgegenkommende Spulenträger passieren zu können. Dieser Positionswechsel ist der Grund für das Überkreuzen der abgezogenen Flechtfäden.

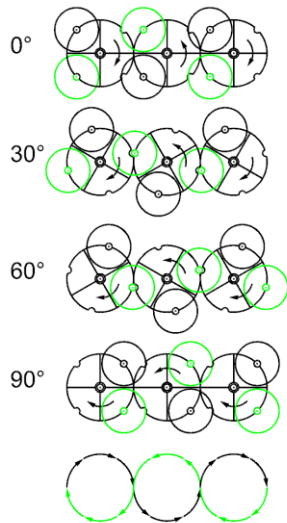


Bild 75:
Bewegung dreier ausgewählter Spulenträger während des Flechtvorgangs



Bild 76:
Zweiflechtiges (biaxiales)
Schlauchtextil aus Carbon-Rovings

Bewegt werden die Spulen von Flügelrädern, die entsprechende Aussparungen zum Transportieren haben (Bild 75). Im Zentrum der Kreisplatten werden die optionalen Stehfäden zugeführt.

Wenn Stehfäden zugeführt werden, entsteht ein triaxiales Geflecht mit drei Faserrichtungen, ohne Zufuhr ein biaxiales (Bild 76).

Im Gegensatz zu den Flechtfäden ist die Ondulation (Faserwelligkeit) der Stehfäden geringer. Stehfäden können in 0° Richtung angeordnet werden. Die Ablage von Flechtfäden ist ungefähr innerhalb der Grenzen von circa 30° bis 75° möglich. Der Winkel zwischen „Flechtfadennachse“ und Bauteilachse wird als Flechtwinkel bezeichnet.

Die Flechtmaschine wird anhand eines Flechtprogramms gesteuert, das Parameter wie Geschwindigkeiten für Vorschub, Flügelradzahl oder Fadenvorspannung enthält.

Das Erfordernis der guten Flächenabdeckung zum Erhalt einer geschlossenen Oberfläche, die Ablage der Fäden sowie die Einhaltung bestimmter Faserwinkel setzen eine präzise Materialwahl und Bestückung voraus, einhergehend mit der Wahl passender Geschwindigkeiten abgestimmt auf die Geometrie des Flechtkerns. Die Anwendbarkeit des Flechtens wird trotz sorgfältiger Prozessauslegung durch Bauteile mit starken Krümmungen, Durchmesseränderungen und großen Dimensionen begrenzt. Zudem existieren Bauteilgeometrien, die zwar beflechtbar sind, deren innere Geometrie, also die prozessbedingte Fadenanordnung und Richtung, aber nicht die strukturmechanischen Erfordernisse erfüllen.

Die herstellungsbedingt enge Wechselwirkung zwischen äußerer Form und Fadenanordnung ist eine Abhängigkeit, die beim Entwurf zu berücksichtigen ist, um ein ressourceneffizientes, wohldimensioniertes Bauteil zu erstellen. Ein streng funktionaler Entwurf unterliegt zumindest der Maßgabe der Erfüllung der strukturmechanischen Anforderungen als auch der Herstellbarkeit. Resultierend aus dem engen Funktionszusammenhang sowie der äußeren und inneren Geometrie ist ein ausgewogener Kompromiss zwischen Herstellung und Tragfähigkeit zu finden.

In der Regel wird ein Laminat aus verschiedenen textilen Lagen, die auch vorimprägniert sein können, hergestellt. Eine Geflechtlage besteht aus sich überkreuzenden Fäden, die in zwei oder mehr Faserrichtungen angeordnet sind. Zur näherungsweise Berechnung der mechanischen Eigenschaften einer Geflechtlage mit Hilfe der CLT werden die einzelnen Faserrichtungen als Lage interpretiert, obwohl sich diese gegenseitig durchdringen. Eine wichtige Eingangsgröße zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften einer unidirektionalen Schicht ist das Flächengewicht, das anhand der Fadenfeinheit und der abgelegten Fadenlänge pro Fläche für die gewählte Fadenanzahl ermittelt wird.

Die Fadenlänge (Gl. 16) pro Umschlingung (Bild 77) und die Höhe des Kerns für eine Umschlingung (Gl. 17) bestimmen sich zu:

$$l_F = \frac{U_K}{\sin \alpha_F} \quad \text{Gl. 16}$$

$$h = \frac{U_K}{\tan \alpha_F} \quad \text{Gl. 17}$$

Auf vereinfacht geometrischer Basis kann das Flächengewicht näherungsweise nach Gl. 18 aus dem Quotienten des Flechtfadengewichts und der abgewickelten Mantelfläche berechnet werden. Umso größer der Flechtwinkel ist, desto größer ist das erhaltene Flächengewicht.

$$g_A = \frac{g}{A} = \frac{n_F l_F g_F}{U_K h} \quad \text{Gl. 18}$$

n_F Fadenanzahl
 l_F Fadenlänge
 g_F Fadenlängengewicht
 U_K Kernumfang
 h_K Kernhöhe

Die nötige Kernhöhe für eine vollständige Umschlingung durch den Flechtfaden stellt Bild 77 für verschiedene Flechtwinkel dar. Die Flechtfäden umfahren den Kern mit konstanter Steigung in Form einer Helix, die abgelegt an der Kernoberfläche einen typischen S-Schlag aufweist.

Die Einheitszelle ist das Muster des Geflechts, also dasjenige Element des Textils, das durch wiederholte Aneinanderreihung die Textilstruktur bildet (Bild 78).

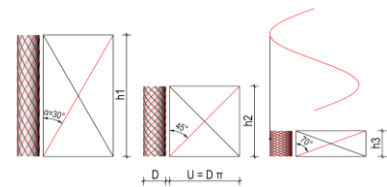


Bild 77: Einfluss des Flechtwinkels auf die Länge einer Umschlingung

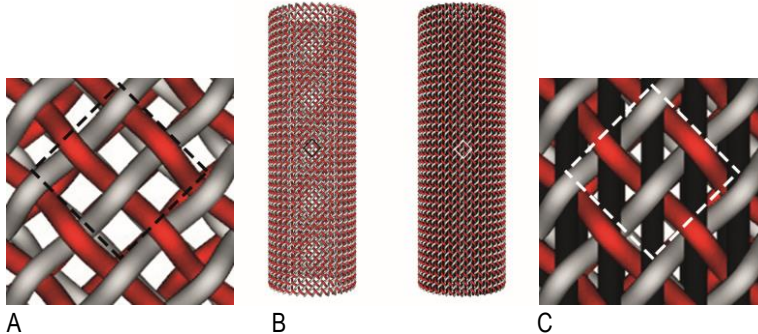


Bild 78: Einheitszelle des Geflechts (diamond binding, schematisch und ohne volle Flächenabdeckung)

A: Detail Einheitszelle biaxial, B: Geflecht mit und ohne Stehfäden, C: Detail Einheitszelle triaxial

Hier nicht zur Anwendung kommen Berechnungen an Einheitszellen mit mikromechanischen Modellen, mit denen für das Geflecht repräsentative mechanische Eigenschaften und Versagensarten bestimmt werden können (van den Berg 2010).

Verfahren zum Flechten von Verzweigungen

Es gibt mehrere Methoden zum Flechten von Y-förmigen Verzweigungen (Born et al. 2016).

Beim Flechten mit zwei Flechtzentren (Müller et al. 2013) werden durch eine variierte Anordnung der Spulenhalter während des Flechtvorgangs in einem Flechtdurchgang der Stamm und beide Äste beflochten. Auf dem Stamm wird eine

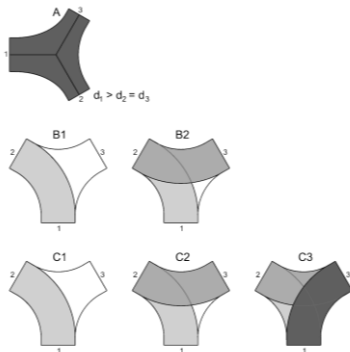


Bild 79:
Flechtprinzipien für Verzweigungen

Lage abgelegt (Bild 79 Verfahren A). Bei gleichbleibender Fadenanzahl und dem Ziel guter Flächenabdeckung ist eine Reduktion des Durchmessers der Schenkel 2 und 3 notwendig. Eine kontinuierliche Fadenanordnung zwischen diesen Schenkeln ist im Zwickelbereich nicht möglich. Angewandt wird dieses Verfahren zur Herstellung von Verzweigungen im einstelligen Zentimeterbereich (Müller et al. 2013).

Bei einer weiteren Methode zum Verzweigungsflechten wird ein variabler Flechtring eingesetzt (Hufenbach et al. 2011a). Die Prototypen der genannten Quellen weisen Durchmesser von lediglich wenigen Zentimetern und damit eine für die Tragstrukturen von Gebäuden nicht ausreichende Größenordnung auf.

Beim Flechten mit einem Flechtzentrum, wie es hier angewandt wird, werden pro Flechtvorgang zwei Schenkel umflochten.

Das Verfahren B aus Bild 79, bei dem zunächst von Schenkel 1 nach Schenkel 2 geflochten wird, dann von Schenkel 2 nach Schenkel 3, kann zu einer mangelnden Abdeckung des Zwickels zwischen Schenkel 3 und 1 führen. Zumindest ist eine Anordnung kontinuierlicher Fäden zwischen den beiden Schenkeln nicht möglich (Born et al. 2016).

Erst ein weiteres Umflechten des Schenkels 3 zu Schenkel 1 des Verfahrens C erlaubt durchgängige Faserverläufe in den Zwickeln, wie sie für einen guten Kräfteübertrag notwendig sind (Bild 79 C). Das Geflecht liegt an den Schenkeln stets zweilagig und im Zwickelbereich mindestens einlagig vor, mit möglichen Überdeckungen vom Geflecht der beiden anderen Schenkelpaare. In der Draufsicht betrachtet sind im Zentrum der Verzweigung bis zu drei Lagen angeordnet.

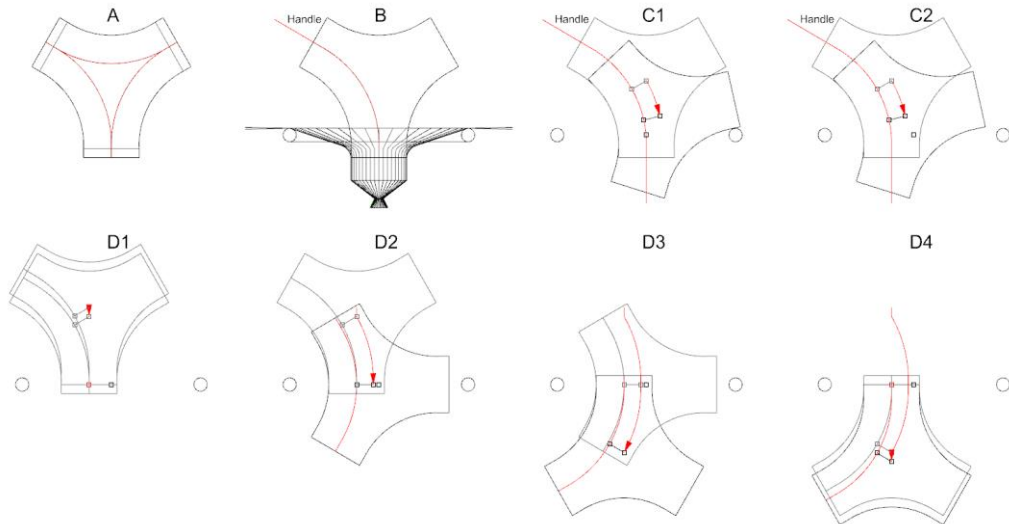
Durch die Wiederholung des Flechtprogramms pro Schenkelpaar kann für die symmetrische Beispielverzweigung ein annähernd identischer textiler Lagenaufbau auf allen drei Schenkeln erreicht werden. Der Aufbau unterscheidet sich in diesem Fall lediglich in der Reihenfolge der Überdeckung der einzelnen Lagen. Die erste Geflechtlage von Schenkel 1 nach 2 ist die unterste Lage. Die zweite Geflechtlage von Schenkel 2 nach 3 liegt über der ersten Lage, jedoch unter der zweiten. Die dritte Geflechtlage von Schenkel 2 nach 3 liegt über den beiden anderen Lagen (Möhl et al. 2017).

Das Verfahren nach Bild 79 C kann ebenso für asymmetrische Verzweigungen mit unterschiedlichen Durchmessern und Schenkelwinkeln angewendet werden sowie für nicht planare Verzweigungen.

Angewendetes Verfahren zum Verzweigungsflechten

Die Flechttechnik wird wegen der potentiellen Skalierbarkeit und konzeptionellen Machbarkeit für die Herstellung verzweigter textiler Hüllen ausgewählt. Mit ihr lassen sich die Anforderungen einer geschlossenen Oberfläche ebenso wie die mechanisch erforderliche kontinuierliche Fadenanordnung erfüllen. Die Durchmesseränderungen zwischen den Schenkeln unterliegen bestimmten Grenzen, falls eine gute Flächenabdeckung oder die Einhaltung eines bestimmten Faserwinkels relevant sind.

Nach den Grundlagen des Flechtens und dem konzeptionellen Vorgehen wird im Folgenden die Methode des Verzweigungs-flechtens erläutert. Bild 80 A zeigt die Bauteilachse und den aus geometrischen Körpern zusammengesetzten, verzweigten Flecht kern, der entlang seiner Translationsachsen geführt beflochten wird.



Bei jedem Anflechtvorgang wird Textil inhomogen abgelegt. Um diesen Bereich außerhalb des Bauteils zu verschieben, wird eine konische Verlängerung angebracht (Bild 80 B). Beim Abflechten wird der Kern nach dem Beflechten des Bauteils noch etwas weiterbewegt, um das entstandene Geflecht abzubinden, bevor es gekappt wird.

Limitierend für die Größe der Bauteile ist neben dem Durchmesser und der Anzahl der Flecht fäden vor allem der Durchmesser des Flechtrings, da der Flecht kern im Flechtprozess vollständig durch diesen geführt werden muss (Bild 74).

Während der Durchmesser zylindrischer Flechtkerne nur etwas kleiner sein muss als der des Flechtrings, ist dieser bei einer verzweigten Struktur deutlich reduziert. Ist die Schenkellänge bei zentrischem Überflechten trotz Reduktion zu groß (Bild 80 C1), kann der Flecht kern exzentrisch geführt werden (Bild 80 C2). Alternativ kann der Flecht kern auch schräg ohne Rotation mit seitlichem Versatz geführt werden. In beiden Fällen können die Fasern nicht exakt entlang der Bauteilachse abgelegt werden.

Die Bewegung des Flecht kerns durch den Flechtring führt ein Roboterarm aus. Im zylindrischen Anfangsbereich bewegt er den Kern senkrecht zum Flechtrad durch das Flechtzentrum (Bild 80 D1), im nicht konstant gekrümmten Bereich dreht und verschiebt er den Kern entsprechend (Bild 80 D2 – 4).

Für die ebenen Verzweigungen mit drei identischen Schenkelgeometrien kann das Flechtprogramm wiederholt werden.

Bild 80:

Prinzip der Flecht kernbewegung

A: Verzweigung mit Bauteilachse

B: Anflechten

C1: Zentrischer Flecht pfad (Kollision)

C2: Exzentrischer Flecht pfad (möglich)

D1 – 4: Beflechten zweier Schenkel

Konsequenzen des gewählten Verfahrens zur Herstellung von verzweigten Hüllen

Die Anzahl der Umflechtungen zweier Schenkel kann gemäß der zum Kraftabtrag notwendigen Anzahl innerhalb der herstellungsbedingten Grenzen festgelegt werden.

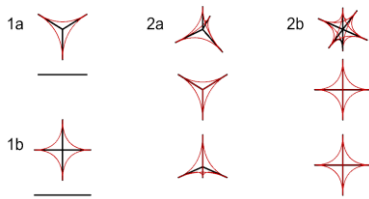
Anhand theoretischer Überlegungen lässt sich die Anzahl an Umflechtungen für eine einlagige Beflechtung jeweils eines Schenkelpaares bestimmen.

Bei einer Verzweigung mit drei und mehr Schenkeln gilt sowohl für planare als auch für abgeknickte Verzweigungen (Bild 81, 1):

$$n_{\text{Umflechtung}} = n_{\text{Schenkel}} \tag{Gl. 19}$$

Bei vier Schenkeln, die im Raum angeordnet sind, entspricht die theoretische Anzahl an Umflechtungen der Kantenzahl des geometrischen Körpers, der von den Endpunkten der Schenkel aufgespannt wird, einem Tetraeder mit sechs Kanten (Bild 81, 2a).

Modellhaft steht für jede Umflechtung eine Kante zwischen den Punkten am Ende zweier Schenkel. Werden die Endpunkte eines jeden Schenkels im Raum miteinander verbunden, ergibt sich die Anzahl der möglichen Verbindungen nach Gl. 20 zu:



$$n_V = \sum_{i=1}^{i=n_P} (n_P - i) - n_E \tag{Gl. 20}$$

Bild 81:
Umflechtungen von Verzweigungen

1a: Ebene Verzweigung mit drei Schenkeln

1b: Ebene Verzweigung mit vier Schenkeln,

2a: Räumliche Verzweigung mit vier Schenkeln und sechs Umflechtungen

2b: Räumliche Verzweigung mit sechs Schenkeln und 12 Umflechtungen

mit:

n_V Anzahl an Verbindungen

n_P Anzahl an Punkten

n_E Anzahl geometrischer Einschränkung

Dies entspricht der Mindestanzahl an Umflechtungen, falls jede Verbindung exakt einmal mit einem durchgängigen Textil belegt werden soll. Die Anzahl der Lagen im Modell gleicht der Anzahl der an den Punkt angeschlossenen Kanten.

Aus praktischen Gründen kann die Anzahl der Verbindungen reduziert werden. Für ein Modell mit sechs Schenkeln in den Raumrichtungen eines kartesischen Koordinatensystems, bei dem insgesamt drei Schenkelpaare einander gegenüberliegen und exakt gegensätzlich ausgerichtet sind, ergeben sich 15 mögliche Verbindungen (Tabelle 7, n_V). Ein Punkt weist jeweils fünf mögliche Verbindungen auf. Um auf die gegenüberliegenden Schenkel zu flechten, müsste der Flechtschlauch an vier Stellen geöffnet werden. Schließt man deshalb die Verbindungen zu gegenüberliegenden Schenkeln aus, so reduziert sich mit der geometrischen Einschränkung von drei Paaren im Beispiel die Anzahl auf 12 Umflechtungen (Tabelle 7, $n_{V,red}$). Das heißt, es wurde die Anzahl der Verbindungen der angeschlossenen Kanten an einen Punkt von 5 auf 4 reduziert. Weitere Einschränkungen, aus Gründen der Herstellung oder falls mehrere Schenkel in einer Ebene liegen und nur direkt benachbarte miteinander verbunden werden, sind gegebenenfalls zusätzlich zu berücksichtigen.

Die Ermittlung der Anzahl der Verbindungen kann auch anhand einer konvexen Hülle der Endpunkte im Raum erfolgen. Dabei werden nicht alle Punkte miteinander verbunden, sondern lediglich diejenigen, deren Verbindung als Kante einer Dreiecksfläche nicht zu einer Durchdringung des aufgespannten Körpers führt. Dies reduziert die Anzahl der möglichen Verbindungen zusätzlich und definiert die Mindestanzahl an Verbindungen, die notwendig sind, um

jeden Zwickel zwischen zwei Schenkeln mindestens einmal zu beflechten.

Tabelle 7: Verbindungen der Schenkelpunkte von Verzweigungen

n_p	n_v	n_{pv}	$n_{v,red}$	$n_{pv,red}$	$n_{v,hull}$	$n_{pv,hull}$
2	1	-	-	-	-	-
3	3	2,0	-	-	3	2,0
4	6	3,0	6	3,0	6	3,0
5	10	4,0	8	3,2	9	3,6
6	15	5,0	12	4,0	12	4,0
7	21	6,0	18	5,1	15	4,3
8	28	7,0	24	6,0	18	4,5

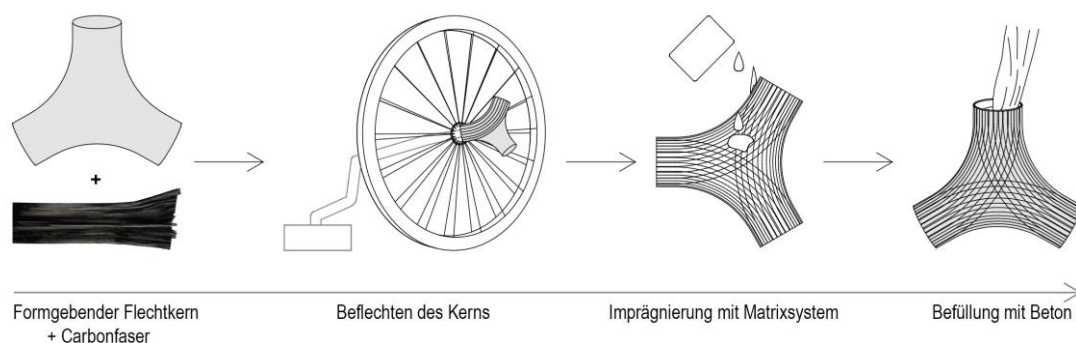
- n_p Anzahl der Schenkelpunkte
- n_v Mögliche Verbindungsanzahl, assoziativ gezählt nach Gl. 20
- n_{pv} Mittlere Kantenanzahl zum Punkt, analog $n_{pv,red}$, $n_{pv,hull}$
- $n_{v,red}$ Reduzierte Verbindungsanzahl wegen Einschränkung
- $n_{v,hull}$ Mögliche Verbindungsanzahl, ermittelt via konvexer Hülle

Je nach geometrischer Konfiguration unterscheidet sich die Lagenanzahl des Geflechts am Ende der Schenkel. Während bei einer Verzweigung mit vier Schenkeln (Tetraedern) die Lagenanzahl bei gleichmäßiger Anzahl an Flechtvorgängen das Dreifache oder ein Vielfaches davon beträgt, ist die Lagenanzahl bei einer Verzweigung mit acht Schenkeln, von denen sechs in einer Ebene und die zwei verbleibenden Schenkel zu beiden Seiten dieser Ebene liegen, unterschiedlich. Werden die Schenkel in der Ebene nur mit ihren direkten Nachbarn und den beiden Schenkeln außerhalb der Ebene verbunden, so bestehen sie aus jeweils vier Lagen, während die außerhalb der Ebene liegenden Schenkel jeweils sechs Lagen zählen. Insgesamt ergeben sich in diesem Beispiel 18 Verbindungen.

5.3.5. Herstellung von FKV-Beton-Tragknoten

Die Herstellung der zum Patent (Jonas et al. 2018b) angemeldeten FKV-Beton-Tragknoten gliedert sich im Wesentlichen in vier Schritte (Bild 82):

Die Herstellung eines formgebenden und -stabilen Flechtkerns (1), die Ablage eines umschließenden Textils an dessen Oberfläche (2), die Weiterverarbeitung einer Hülle zu einem faserverstärkten Kunststoffbauteil und die Entfernung des Kerns (3) sowie das Befüllen mit Beton (4).



Nur durch die Stehfäden kann eine Faserausrichtung in Richtung der Bauteilachse erreicht werden, wie sie auch bei den biologischen Vorbildern vorliegt.

Bild 82: Schritte zur Herstellung verzweigter Tragknoten

Die Anforderungen an das Flechtkernmaterial sind Fräsbarkeit, mindestens geringe mechanische Beanspruchbarkeit, Formbeständigkeit im Vakuum und eine ausreichende Temperaturbeständigkeit, die mindestens so hoch ist, dass Deformationen durch Temperaturen aus der exothermen Harzreaktion und den Nachbehandlungstemperaturen ausgeschlossen werden können. Zudem muss der Fräskern aus dem festen FKV-Bauteil herauslösbar sein.

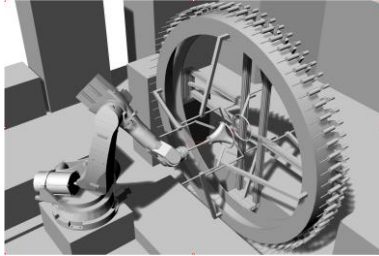


Bild 83:
Digitale Flechtplanung zur
Generierung des Steuerungscode

Durch die Simulation der Flechtkernbewegung können die Durchführbarkeit vorab beurteilt und Kollisionen vermieden werden (Bild 83). Da die Flechtkerngröße durch den Innendurchmesser des Flechtrings begrenzt wird, ist bei relativ großen verzweigten Flechtkernen eine exakte digitale Planung für einen effizienten Flechtvorgang unerlässlich. Basierend auf diesen geometrischen Bewegungsmodellen wird der Steuerungscode für den Roboter generiert. Ein manueller Vorgang ist es derzeit, die Rovings im Flechtzentrum kurzzeitig aufzuspreizen, um die im aktuellen Flechtvorgang ausgesparten Schenkel durch das Flechtzentrum führen zu können. Die Flechtdauer beträgt pro Vorgang wenige Minuten. Mit dem verwendeten Flechtringdurchmesser, der circa 1/10 des Flechtraddurchmessers beträgt, können Verzweigungen mit maximalen Abmaßen mit Schenkellängen von circa 17,5 cm und Durchmessern von circa 12,0 cm beflochten werden.

Nach dem Beflechten des Kerns wird er demontiert, das Textil im Vakuuminfusions- oder im Handlaminationsverfahren zu einer verzweigten Hülle verarbeitet und der Flechtkern entfernt. Zur Fertigung einzelner verzweigter Tragknoten ist das Verschließen der stirnseitigen Öffnungen vor der Betonage notwendig. Vorzugsweise wird selbstverdichtender Beton für den tragfähigen Kern verwendet und die Oberfläche nachbehandelt (Bild 84).



Bild 84: Hybrider Tragknoten mit drei Schenkeln, in Kooperation mit dem ITFT hergestellter Funktionsdemonstrator mit nachbehandelter, geschliffener Oberfläche in der Ausstellung „Baubionik“, Naturkundemuseum Stuttgart

In der angestrebten Hybrid-Bauweise von verzweigten Stützen sollen modulare Hüllen miteinander verbunden werden

können, so dass eine Betonage der gesamten Stütze erfolgen kann.

Für die in den Versuchsreihen hergestellten Flechtkerne wird expandiertes Polystyrol (Druckfestigkeit $\sim 0,3$ MPa) verwendet, das kostengünstig ist und gut durch Fräsen bearbeitet werden kann, manchmal allerdings eine unzureichende Temperaturbeständigkeit für die angewendeten Nacherhärtungstemperaturen von bis zu 80°C aufweist. Beflochten werden die Kerne mit einer Radialflechtmaschine, die mit maximal 144 Flechtfäden und 72 Stehfäden besetzt werden kann (vgl. Kapitel 5.3.4, Bild 73). Zum Einsatz kommen Glas- und Carbonrovings oder nur Carbonrovings.

Lokale Knotengeometrie

Für einen konsistenten parametrisierten Entwurf ist die generische Erzeugung der Detailgeometrie und deren Weiterverwendbarkeit in Berechnungsprogrammen erforderlich. Deshalb wird ein allgemeiner CAD-Generator für Verzweigungen mit ebener und räumlicher Anordnung der Schenkel erstellt. Die Oberfläche so erzeugter Verzweigungen (Bild 55 rechts, Bild 85) wird anhand folgender Parameter pro Schenkel bzw. Schenkelzwischenraum beeinflusst von:

- dem Richtungsvektor Schenkelachse,
- dem Durchmesser am Anschnitt,
- der Schenkellänge und
- der Ausrundung zwischen zwei Schenkeln.

Die Knotenhülle ebener Verzweigungen besteht aus drei Translationsflächen mit dazwischenliegenden Freiformflächen (oben und unten) sowie einem Zylindermantel pro Schenkelende. Die Translationsflächen werden zwischen je zwei Halbkreisen zweier Schenkel entlang einer NURBS-Kurve (Non-Uniform Rational B-Spline) aufgezogen (Bild 85). Die Kurve mit drei Kontrollpunkten definiert die Ausrundung zwischen je zwei Schenkeln. Jeweils ein Kontrollpunkt befindet sich am Ende zweier benachbarter Schenkel und einer im Ursprung. Durch Wichtung der einzelnen Kontrollpunkte können die Krümmung und der Verlauf der Kurve beeinflusst werden. Die Wichtung des mittleren Punktes, des Punktes im Ursprung, wird parametrisiert und kann mit einem Wert von 0 bis 1 beeinflusst werden. Für den Wert 0 wird der Kontrollpunkt nicht berücksichtigt und es entsteht eine Strecke vom ersten zum dritten Punkt. Für den Wert 1 sowie die Bereiche dazwischen wird eine Ausrundung erhalten. Die Freiflächen mit drei Eckpunkten werden für die nachgelagerte Netzgenerierung in drei viereckige Flächen unterteilt (in Bild 85 dargestellt), indem die Berandungskante in der Mitte geteilt wird. Außerdem wird der Verzweigungskörper mehrfach geschnitten, um weitere Kanten zu erhalten. Diese verbessern das Ergebnis der automatischen Netzerstellung, da FE-Knoten der Hülle und des Kerns auf diesen Kanten kongruent erzeugt werden.

Problematisch zum Beflechten sind Flächen, die konkave Bereiche im Sinne beider Hauptkrümmungen aufweisen (Bild 86). Ist zumindest eine Hauptkrümmung konvex, so kann eine Beflechtung ohne Abheben des Geflechtes, wie bei Sattelflächen, möglich sein. Dies hängt vom Verhältnis der Krümmungen der konvexen und konkaven Richtung ab. Während ein Zylinder mit den Hauptkrümmungen $k_1 = 0$ und $k_2 = 1/r$ gut beflochten werden kann, kann eine starke Einschnürung des Zylinders problematisch sein.

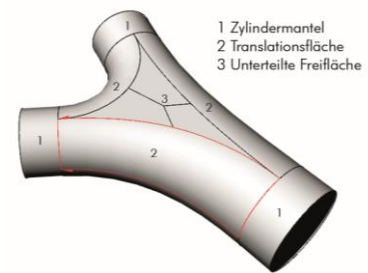


Bild 85:
Parametrisierte Geometrie einer ebenen Verzweigung



Bild 86:
Mehrfachverzweigung mit konkaven und für die Flechtanlage verbesserten Flächen

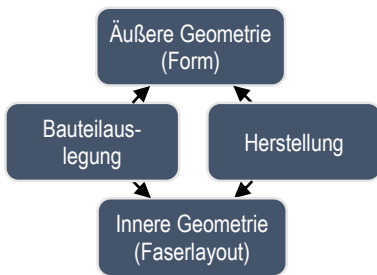


Bild 87:
Gegenseitige Beeinflussung von
Anforderungen an Tragfähigkeit und
Randbedingungen der Herstellung

Der starke Form-Funktionszusammenhang der globalen Tragstruktur legt ebenfalls die Richtungsvektoren der Verzweigungsachsen fest. Wesentlichen Einfluss auf die Tragfähigkeit auf lokaler Ebene hat neben der Werkstoffwahl die äußere Kontur. Bei der mechanisch sinnvollen Formenwahl sind herstellungsbedingte Grenzen, wie die Limitierung durch den Flechtringdurchmesser oder durch konkave Flächen, zu berücksichtigen. Neben der äußeren Form unterliegt auch die innere Struktur der Hülle dem Erfordernis der Traglasteffizienz und der prozessbedingten Einschränkung der Fadenanordnung. Die im Flechtverfahren einstellbaren Faserwinkel und die resultierende Flächenabdeckung sind wiederum auch kontur- und formabhängig. Es liegt also eine enge Verknüpfung sowohl zwischen äußerer Kontur, innerer Struktur als auch der Bauteilaulegung und Herstellung vor (Bild 87).

6. Untersuchung an FKV-umschnürten Betonzylindern

Umschnürungen von Beton können zu einer Steigerung der Drucktragfähigkeit führen, wenn sie steif genug sind, um durch eine Dehnungsbehinderung einen mehraxialen Spannungszustand im Beton hervorzurufen. Für unverzweigte Stützen ist dies eine übliche Bauweise und Verstärkungsmaßnahme (vgl. Kapitel 2.2.2).

Für hochbeanspruchbare Verzweigungsknoten ist es wünschenswert, diesen Effekt ebenfalls nutzen zu können. Wie in Kapitel 5.3.4 dargelegt, stellt das Flechtverfahren eine vielversprechende Herstellmethode dar, um FKV-Hüllen für Verzweigungsknoten zu produzieren. Erstmals werden in dieser Arbeit Untersuchungsergebnisse geflochtener FKV-Beton-Tragknoten und FKV-umschnürter Betonzylinder auf Basis von geflochtenen Textilien vorgestellt. Im Gegensatz zu gewickelten Rohren können geflochtene Rohre herstellungsbedingt keine Faserausrichtung annähernd in Umfangsrichtung aufweisen. Zudem kommt es durch die überkreuzenden Fasern zu einer Wellung (Ondulation) der Faserverläufe, die die Steifigkeit und die Festigkeit des FKV gegenüber Lamina-ten mit geradlinigem Verlauf verringern. Für die Anwendung zur Umschnürung von Betonzylindern ist die Effizienz gegenüber gewickelten Matten oder Rovings demnach geringer.

Die Eigenschaften der Hybrid-Bauteile basierend auf geflochtenen Textilien werden zunächst experimentell an Probekörpern einfacher Geometrie untersucht. Um festzustellen, ob die Umschnürung mit geflochtenem FKV bei verzweigten Tragknoten wie bei umschnürten Betonzylindern ebenfalls zum Effekt einer gegenüber der einaxialen Festigkeit des Betons gesteigerten Tragfähigkeit führt, wird systematisch in zwei Schritten vorgegangen:

Zunächst wird an geometrisch einfachen Zylindern versucht, den Effekt der Tragfähigkeitssteigerung erstmals für geflochtene Umschnürungen nachzuweisen, mit bestehenden Modellen zu vergleichen und einzuordnen. Danach wird dieser Effekt erstmals für geometrisch komplexe Verzweigungen mit umschnürtem geflochtenem FKV nachgewiesen und das Tragverhalten der verzweigten FKV-Beton-Bauteile erforscht (vgl. Kapitel 7).

6.1. Ziel und Versuchsprogramm

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Untersuchung des Tragverhaltens FKV-umhüllte Betonzylinder in zwei Versuchsreihen mit insgesamt 15 Probekörpern zerstörend in Druck- und Biegeversuchen geprüft sowie die Ergebnisse einer vorangegangenen Versuchsreihe mit neun GF-EP umschnürten Probekörpern ausgewertet (Tabelle 8). Begleitend werden die Materialeigenschaften des Betons (Frisch- und Festbetonprüfung, Biegezugprüfung, Schwindrinne) bestimmt. Zur Ermittlung der Materialparameter der FKV-Hüllen werden Prüfungen an circa 70 Flach- und Ringzugproben durchgeführt.

Ziel der ersten Versuchsreihe ist es, den für umwickelte Betonzylinder und betongefüllte, gewickelte FKV-Rohre bekannten Effekt der Tragfähigkeitssteigerung bei Druckbeanspruchung durch passive Umschnürung auch für Rohre aus

FKV, bestehend aus zweiflechtigem (biaxialem) Textil aus Carbonfasern, nachzuweisen.

Ziel der zweiten Versuchsreihe ist es, den Effekt der Tragfähigkeitssteigerung von Umschnürungen aus FKV mit dreiflechtigem (triaxialem) Geflecht aus Glas und Carbonfasern zu untersuchen. Außerdem untersucht wird die Prüfmethode zur Ermittlung von Materialparametern des FKV durch Ringzugproben im Vergleich zu Flachproben sowie der Einfluss der Umhüllung auf die Biegetragfähigkeit von FKV-Beton-Verbundbauteilen.

Tabelle 8: Übersicht der experimentellen Versuche an umschnürten Betonzylindern

Serie	d _c	FKV-Typ	Textil	Lastart	Anzahl	Parameter
Nr.	mm	–	–	–	–	–
0*	100	GF-EP	Wicklung	Druck	9+3	Betonfestigkeit
1**	200	CF-EP	W., biax. Flechtung	Druck	6+3	Lagenanzahl Textilart
2_1	160	GF-CF-EP	triax. Flechtung	Druck	6+3	Lagenanzahl Flechtwinkel
2_2	160	GF-CF-EP	triax. Flechtung	Bieg.	3	Lagenanzahl Flechtwinkel

* Experimentelle Durchführung der Voruntersuchung durch Dr.-Ing. Hub

** Veröffentlicht in Jonas und Knippers (2017)

6.2. Stand der Forschung

Im Folgenden wird auf Beton im mehraxialen Spannungszustand eingegangen und der Effekt der Tragfähigkeitssteigerung durch Umschnürung erläutert.

6.2.1. Beton unter mehraxialer Belastung

Mehraxialer Spannungszustand im Beton

Unter mehraxialer Druckbelastung zeigt Beton eine höhere Festigkeit als unter einaxialer Spannung (Bild 88). Richart et al. (1928) beschreiben einen linearen Zusammenhang zwischen der gesteigerten und der einaxialen Festigkeit in linearer Abhängigkeit des Seitendrucks:

$$f_{cc} = f_c + k \sigma_1, \text{ mit } k = 4,1$$

Gl. 21

Kupfer (1973) stellt eine um 25 % erhöhte Tragfähigkeit für biaxial belastete Betonscheiben gegenüber uniaxial belasteten fest. Speck (2008) erforscht die Tragfähigkeitssteigerung mit zunehmender Betonfestigkeit experimentell, schließt, dass für hochfeste Betone das Steigerungspotential auf 10 % sinkt, und entwickelt zudem ein einheitliches dreiaxiales Bruchkriterium für normal- und hochfeste Betone (Speck und Curbach 2010). Den Zusammenhang zwischen Seitendruck und einaxialer Festigkeit untersucht Rogge (2002) an zylindrischen Betonprüfkörpern in einer Triaxialzelle: Die Festigkeiten der Versuchsergebnisse liegen oberhalb der Grenzlinie, die sich aus dem Mohr-Coulomb-

Kriterium mit dem Faktor $k = 4,0$ ergibt (vgl. Gl. 21). Neben der Tragfähigkeit steigt auch das plastische Verformungsvermögen, die Duktilität, bei Vorhandensein eines rotations-symmetrischen Spannungszustands stark an (Zilch und Zehetmaier 2010).

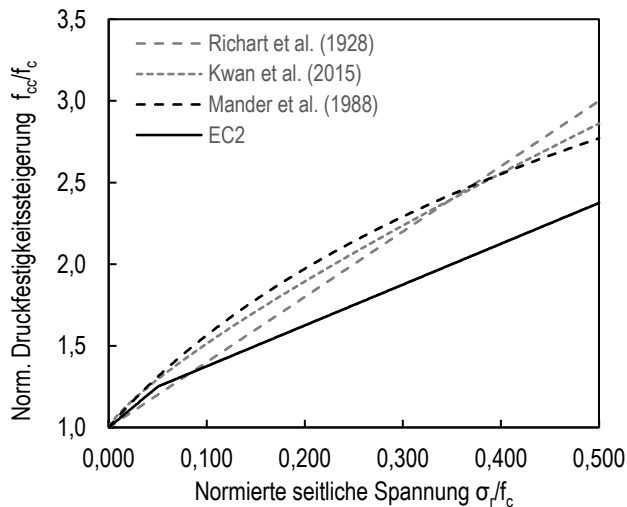


Bild 88: Betonfestigkeit im rotationssymmetrischen Spannungszustand bei axialer Belastung aus Jonas und Knippers (2017)

Die Modelle zur Beschreibung der Bruchspannungsfläche mehraxial belasteten Betons im Hauptspannungsraum (Zilch und Zehetmaier 2010) ordnet Speck (2008) nach der Anzahl der benötigten Parameter zu: Ein-Parameter-Modelle sind Rankine, Van Mises, Tresca, Zwei-Parameter-Modelle Mohr-Coloumb und Drucker-Prager und Mehr-Parameter-Modelle sind William-Warнке, Ottosen oder Menétrey-William.

Mehraxiale Spannungszustände entstehen nicht nur durch zusätzliche aktiv aufgebrachte Seitendrücke, sondern auch durch einen passiv entstehenden Seitendruck infolge einer Dehnungsbehinderung, wie bei einer Teilflächenpressung durch umliegenden Beton oder durch eine äußere Umschnürung. Eingeteilt werden mehraxiale Spannungszustände deshalb in aktive und passive Umschnürungen von Beton unter Längsdruck in Abhängigkeit von der Ursache des Seitendrucks.

Eine aktive Umschnürung liegt vor, wenn der Beton unter Längsdruck zusätzlich durch einen aktiven Seitendruck, wie er durch einen triaxialen Versuchsstand aufgebracht werden kann, beansprucht wird.

Eine passive Umschnürung liegt zum Beispiel vor, wenn der Seitendruck von der Steifigkeit einer Umschnürung abhängt. Dies ist für linear-elastische Umschnürungsmaterialien, wie durch FKV, durch die aus einer Dehnungsbehinderung ein Seitendruck resultiert, gegeben. Für Stahl gilt dies ebenfalls, allerdings nur bis zur Streckgrenze, im plastischen Bereich erfolgt eine Zuordnung zur aktiven Umschnürung (Lim und Ozbakkaloglu 2015a; Piscesa et al. 2016).

Aktiv und passiv umschnürter Beton weisen eine deutliche Erhöhung der maximalen axialen und lateralen Dehnungen gegenüber nicht umschnürtem Beton auf, die Kurvenverläufe der axial-lateralen Dehnungen sind jedoch unterschiedlich. Im anfänglichen elastischen Bereich ist das Verhalten ähnlich. Beton mit aktivem Seitendruck zeigt nach Erreichen einer Spannung von 0,6 – 0,8 der Höchstspannung

f_c eine Mikrorissbildung, die zu einem exponentiellen Ansteigen der seitlichen Dehnung führt. Der passiv umschnürte Beton weist im zweiten Bereich einen asymptotischen Verlauf auf (Lim und Ozbakkaloglu 2015a, S. 9).

Mehraxiale Spannungszustände kommen bei Betonbauteilen häufig vor und werden in der Bemessungspraxis bei konzentrierten Lastenleitungen wie bei Stützen-Deckenknoten und Teilflächenpressungen näher untersucht. Zum Ausbilden eines vorteilhaften mehraxialen Spannungszustandes von Druckgliedern dienen Maßnahmen zum Aufbringen einer seitlichen Druckspannung. Prinzipiell könnte dies bei einem Kern-Hülle-Bauteil – sofern praktikabel anzuwenden – durch eine Volumenvergrößerung des Kerns, wie Quellen, durch eine Verringerung des Hülldurchmessers, wie Schrumpfen, durch eine Umwicklung unter Vorspannung, durch thermische Maßnahmen während der Betonerhärtung oder durch den Mechanismus der Dehnungsbehinderung durch unterschiedliche Steifigkeiten der Verbundpartner erfolgen.

Die Vorspannung des Kerns gegen die Hülle durch eine quellfähige Zwischenschicht untersuchen Mortazavi et al. (2003) experimentell und vergleichen diese mit Tragfähigkeitsprognosen. In deren Versuchen wird eine Steigerung der Tragfähigkeit gegenüber umschnürten Probekörpern ohne quellfähiges Material von 35 % erreicht. Eine Herausforderung ist hierbei die exakte Berücksichtigung und Kontrolle des Quelleffekts über den Zeitverlauf.

Im Folgenden wird die gängige passive Umschnürung durch FKV-Werkstoffe weiter behandelt.

6.2.2. Tragfähigkeitssteigerung durch Umschnürungswirkung

Die Tragfähigkeit von Druckgliedern aus Beton kann durch eine Umschnürung gesteigert werden, indem das Verbundbauteil so entworfen wird, dass sich für einaxiale Belastungen mehraxiale Druckspannungszustände im Beton ausbilden. Der Beton im Kern wird axial gedrückt und erfährt in Längs- und Querrichtung eine Dehnung. Die Hülle wird derart steif ausgelegt, dass sie eine Querdehnungsbehinderung für den Beton darstellt. Dadurch wirkt eine radiale Pressung zwischen der Hülle und dem Kern senkrecht auf die Oberfläche des Betons (Bild 89). Im Modell existiert zwischen der Pressung und der nach außen wirkenden inneren Spannung im Beton ein Gleichgewicht.

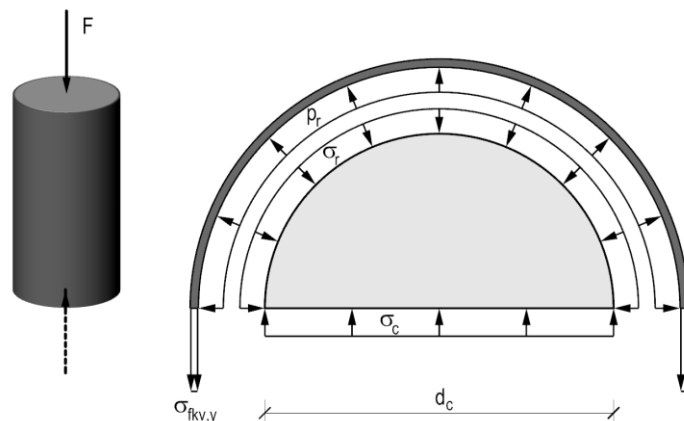


Bild 89: Kräfte und Spannungen am umschnürten Betonzylinder

F	Längskraft
σ_r	Radiale Spannung
p_r	Radiale Pressung
$\sigma_{fkv,y}$	Tangentiale Normalspannung der Umschnürung
d_c	Betonkerndurchmesser
σ_c	Spannung im Beton

Für diesen Fall ergibt sich aus dem Gleichgewichtszustand der Zusammenhang zwischen der Pressung und der Normalspannung in Umfangsrichtung (tangential) anhand der materialunabhängigen „Kesselformel“ (Gl. 22).

$$\sigma_{fkv,y} = \frac{p_r \cdot d_c}{2 \cdot t} \quad \text{Gl. 22}$$

p_r	Radiale Pressung
$\sigma_{fkv,y}$	Tangentiale Normalspannung der Umschnürung
d_c	Betonkerndurchmesser
t	Wanddicke der Umschnürung

Das Quer-Längsdehnungsverhältnis des Betons unterliegt keinem linearen Zusammenhang. Das Querdehnverhalten ist sowohl vom Axialdehnungsniveau abhängig als auch von der vorhandenen radialen Pressung. Wegen der Verträglichkeit ist die radiale Verformung des Betonkerns gleich der radialen Hülle. Es liegt eine formschlüssige druckbeanspruchte Verbindung vor. Unter der Annahme, dass eine radiale Pressung der Hülle lediglich zu Spannungen in Umfangsrichtung führt, gilt für die Umfangsdehnung der Hülle ein einfacher Zusammenhang für linear-elastisches Umschnürungsmaterial:

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_{fkv,y}}{E_{fkv,y}} \quad \text{Gl. 23}$$

ε_t	Tangentiale Dehnung
$\sigma_{fkv,y}$	Normalspannung der Umschnürung, y-Laminatrichtung
$E_{fkv,y}$	Elastizitätsmodul der Umschnürung, y-Laminatrichtung

Die y-Richtung des Laminatkoordinatensystems entspricht der Umfangsrichtung im Polarkoordinatensystem. Der Wert der Umfangsdehnung entspricht der radialen Dehnung, es gilt:

$$\varepsilon_t = \varepsilon_r \quad \text{Gl. 24}$$

ε_t	Tangentiale Dehnung
ε_r	Radiale Dehnung

Sowohl die Funktion der Querdehnung des Betons als auch die radiale Verformung der Hülle hängen von der radialen Pressung ab.

Damit eine Tragfähigkeitssteigerung eintritt, muss die Umschnürung eine ausreichend große Steifigkeit in Abhängigkeit der Betonfestigkeitsklasse aufweisen. Die Umschnürungssteifigkeit ist hier wie folgt definiert:

$$K = \frac{E_{fkv,y} \cdot t}{r} \tag{Gl. 25}$$

- K Umschnürungssteifigkeit
- $E_{fkv,y}$ Steifigkeit in Umfangsrichtung
- t Wanddicke
- r Radius

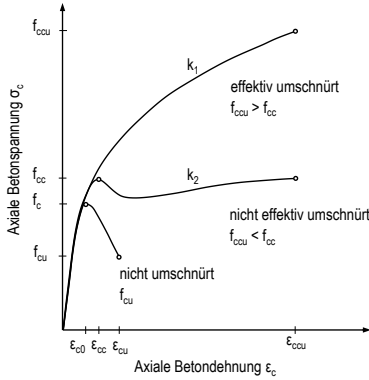


Bild 90: Mögliche Verläufe der Spannungsdehnungslinien von FKV-umschnürten Betonzylindern mit unterschiedlich großen Steifigkeiten der Hülle in Anlehnung an Teng et al. (2009) und Kwan et al. (2015)

Eine effektive Umschnürung von Betonzylindern ist gegeben, wenn die Drucktragfähigkeit mit Umschnürung höher liegt als ohne (Hu et al. 2003).

Eine weitere Differenzierung hinsichtlich der Effektivität einer Umschnürung wird von Lam und Teng (2003) verwendet. Es lassen sich drei Arten möglicher Verläufe der Spannungsdehnungslinien FKV-umschnürten Betons unterscheiden (Bild 90). Der erste Verlauf ist durch eine streng monotone Zunahme der Spannung gekennzeichnet, der zweite weist einen Scheitel auf (f_{cc}) und die Bruchfestigkeit liegt über der einaxialen Festigkeit ($f_{ccu} > f_c$). Im dritten Bereich ist ebenfalls ein Scheitel vorhanden, jedoch liegt die Bruchfestigkeit unter der einaxialen Festigkeit.

Kwan et al. (2015) beziehen sich auf diese Einteilung und ändern die Definition. Die Grenzlinien zwischen diesen drei Bereichen definieren sie als Wirksamkeitsniveaus k_1 und k_2 in Abhängigkeit der einaxialen Betonfestigkeit. Das Wirksamkeitsniveau k_1 markiert die Grenze zu einer monoton steigenden Spannungsdehnungslinie, das Wirksamkeitsniveau k_2 markiert die Grenze zu einem Verlauf der Spannungsdehnungslinie mit einem Abfall von maximal 15 % nach dem Scheitel und anschließender Tragfähigkeitssteigerung auf das Niveau f_{cc} . Die Grenzlinien in Abhängigkeit der einaxialen Betonfestigkeit geben an, welche Umschnürungssteifigkeit K theoretisch notwendig ist, um eine effektive Umschnürung zu erhalten (Bild 91).

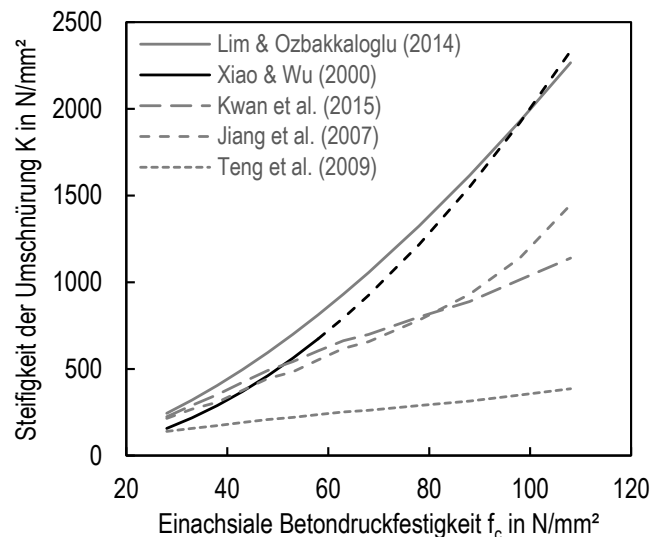


Bild 91: Mindestens erforderliche Steifigkeiten von FKV-Umschnürungen für eine effektive Umschnürung in Anlehnung an Jonas und Knippers (2017)

Die Grenzlinien können als Mindestwerte zur Auslegung mit spezifischem Bauteilverhalten genutzt werden. Lim und Ozbakkaloglu (2014a) geben die Mindeststeifigkeit der Umschnürung mit $K_{min} = f_c^{1,65}$, Xiao et al. (2010) mit $K_{min} = 0,2 f_c^2$ an, um einen streng monoton ansteigenden Verlauf der Spannungsdehnungslinien und eine Tragfähigkeitssteigerung zu

erhalten. Darüber hinaus vergleicht Hu (2013) neun Kriterien verschiedener Quellen unter Anwendung auf 200 umschnürte Probekörper und entwickelt zusätzlich ein eigenes Kriterium basierend auf einem vereinheitlichten Modell zur Drucktragfähigkeitssteigerung.

Wie groß die Steigerung der Druckfähigkeit bei einer Mindestumschnürung bzw. bei einem Beispielwert von 2500 N/mm^2 ist, zeigt Bild 92, das näherungsweise für den Entwurf verwendet werden kann. Der Beispielwert steht für eine vergleichsweise steife Umschnürung. Er entspricht einem Betonkerndurchmesser von 200 mm und einer Umschnürung mit 2 mm unidirektionalem CF-EP mit $E_{fkV} = 125 \text{ GPa}$ (Gl. 25).

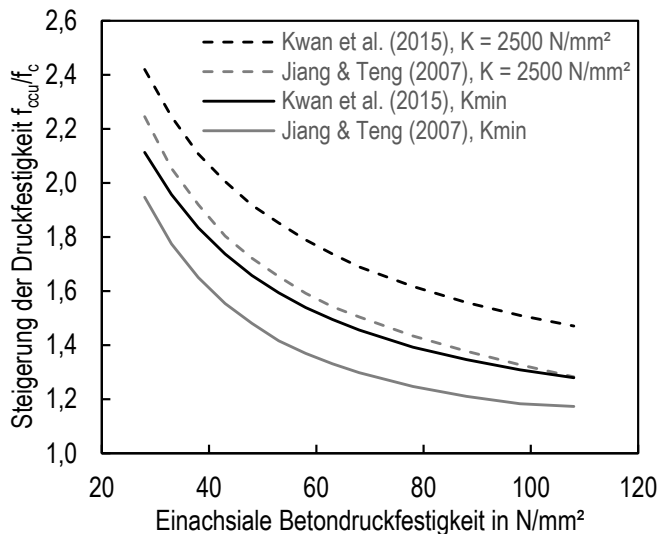


Bild 92: Potential von FKV-Umschnürungen zur Steigerung der Betondruckfestigkeit, ausgewertet anhand zweier Modelle (Jiang und Teng 2007; Kwan et al. 2015) nach Jonas und Knippers (2017)

Ein Modell zur Erfassung des Lastverformungsverhaltens von umschnürtem Beton mit Bewehrung entwickelt Mander et al. (1988). Es basiert auf einem Energiegleichgewicht und verwendet die Spannungsdehnungslinie von Popovics (1973). Um die erhöhte Festigkeit des Betons bestimmen zu können, wird die Bruchgrenzfläche nach William und Warnke (1974) für Seitendruck und axiale Druckbeanspruchung ausgewertet. Der erbringbare Seitendruck ergibt sich aus der maximalen Kraft, die die Bügelbewehrung aufnehmen kann. Die maximale Längsdehnung beim ersten Bügelversagen wird anhand eines Energiegleichgewichts prognostiziert, in das die Bruchenergie unbewehrten und bewehrten Betons sowie die Energieaufnahme der Umschnürungsbewehrung einfließt. Das Modell ist wegen des linearen Verhaltens der FKV-Umschnürungen im Gegensatz zu den duktilen Stahlumschnürungen nicht direkt anwendbar und wurde in Folge weiterentwickelt.

Eine der ersten Verwendungen von FKV-Beton-Stützen, bei der die Hülle Schalung und Umschnürung des Betons ist, beschreiben Mirmiran und Shahawy (1996). Neben der erhöhten Festigkeit und Duktilität heben sie auch die Dauerhaftigkeit als Vorteil dieser Bauweise hervor und stellen erste Berechnungsmodelle auf. Entscheidend für die Güte der Berechnung ist das korrekte Erfassen des Dilatanzverhaltens des Betons (Mirmiran und Shahawy 1997).

Sowohl umwickelte Betonstützen als auch ausbetonierte FKV-Rohre stehen unter großem Forschungsdruck, wie zahlreich dokumentierte Versuchsreihen und Berechnungsmodelle zeigen. So vergleichen Ozbakkaloglu et al. (2013) 88 Berechnungsmodelle hinsichtlich der Güte der Prognose der axialen Spannungsdehnungslinie von zylindrischen Proben unter axialer Druckbelastung. Sie teilen die Modelle in analytische Modelle (analytical) und bemessungsorientierte Modelle (design-oriented) ein, erstellen eine Testdatenbank mit mehreren hundert Proben verschiedener Autoren und werten diese aus.

Analytische Modelle können in der Regel die Spannungsdehnungskurven genauer abbilden als Bemessungsmodelle, sind jedoch in der Anwendung komplexer, da es sich meist um eine iterative Berechnung handelt. Zudem erfordern sie häufig mehr Eingangsparameter als empirische Modelle, wie:

v_c	Querdehnzahl des Betons
f_c	Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
ε_{c0}	Dehnung bei f_c
E_c	Elastizitätsmodul des Betons
$E_{fkv,y}$	Elastizitätsmodul der Hülle in Umfangsrichtung
t	Wanddicke der Hülle
r	Radius des Betonzylinders
$\varepsilon_{fkv,u,y}$	Bruchdehnung der Hülle in Umfangsrichtung

Analytische Modelle mit inkrementell iterativen Berechnungen von Spannungsdehnungskurven umschnürter Betonzylinder, wie in Jiang und Teng (2007) und Kwan et al. (2015), lassen sich zweckmäßig in die einzelnen Teilberechnungen und Beziehungen gliedern: in die axial-laterale Dehnungsbeziehung des Betons, in die Seitendruck-laterale Dehnungsbeziehung der Hülle und die axiale Spannungsdehnungsbeziehung des umschnürten Betons.

Neben anderen Einflussgrößen ist sowohl die axial-laterale Dehnungsbeziehung des Betons als auch die radiale Dehnung ($\varepsilon_{fkv,r}$) der Hülle von der radialen Pressung (p_r) abhängig. Die radiale Dehnung des Betons und der Hülle muss wegen der Verträglichkeit den gleichen Betrag einnehmen.

Bei iterativen Berechnungen wird für ein vorgegebenes Dehnungsinkrement der Seitendruck so lange variiert, bis die Differenz aus den beiden radialen Dehnungen, der des Betonzylinders und der der Umschnürung, Null wird bzw. unterhalb einer vorgegebenen Schranke liegt:

$$\varepsilon_{c,r}(p_r) - \varepsilon_{fkv,r}(p_r) \approx 0 \quad \begin{array}{l} \text{Gl. 26} \\ \text{nach Jonas und Knippers} \\ \text{(2017)} \end{array}$$

Das Vorgehen wird für jedes Dehnungsinkrement, für jeden zu berechnenden Punkt auf der Spannungsdehnungslinie, wiederholt.

Bei der analytischen Berechnung wird also zunächst ein axiales Dehnungsinkrement vorgegeben. Anschließend wird der zugehörige Seitendruck zum Beispiel anhand einer numerischen Nullstellensuche bestimmt und im letzten Schritt anhand der axialen Spannungsdehnungsbeziehung für umschnürten Beton der zum Dehnungszustand gehörige Spannungswert ermittelt.

Neben der inkrementell iterativen Berechnung existieren auch analytische Modelle, mit denen Spannungsdeh-

nungslinien direkt berechnet werden können. Beispielsweise erarbeiten Eid und Paultre (2007) ein Modell, basierend auf dem Drucker-Prager Bruchkriterium für kreisförmige Querschnitte mit Stahl- oder FKV-Umschnürung. Im Folgenden eine Auswahl analytischer Modelle: Eid und Paultre 2007, 2008, 2017; Saadatmanesh et al. 1994; Samaan 1997; Marijn R. Spoelstra und Giorgio Monti 1999; Jiang und Teng 2007; Teng, J., Huang, Y., Lam, L., Ye, L. 2007; Cui und Sheikh 2010; Pellegrino und Modena 2010; Kwan et al. 2015; Lim und Ozbakkaloglu 2015b.

Bemessungsorientierte Modelle (design-oriented) benötigen häufig weniger Eingangsparameter.

Getrimmt auf eine erleichterte Anwendung entwickeln Pour et al. (2018) ein vereinfachtes Berechnungsmodell auf Basis von Datensätzen von mehr als tausend Probekörpern. Die verwendeten Datenbanken stammen aus Ozbakkaloglu und Lim (2013) sowie Lim und Ozbakkaloglu (2014a) und werden um weitere Einträge erweitert. Durch statistische Analysen werden Beiwerte gefunden, die eine hohe Ergebnisgüte ermöglichen, obwohl die Anzahl der Eingangsparameter klein ist, wie durch den Verzicht auf den Parameter der Umfangsbruchdehnung, dessen Berücksichtigung in der Regel zu genaueren Ergebnissen führt (Ozbakkaloglu und Lim 2013).

Im Vergleich mit anderen Modellen liefert dieses Modell ähnlich gute oder bessere Ergebnisse der Spannungsdehnungskurven und ist für Betone bis 120 MPa anwendbar. Anhand von zwei Punkten auf der Spannungsdehnungslinie, dem sogenannten Übergangspunkt (transition-point) und dem Punkt im Bruchzustand, wird eine angenäherte Spannungsdehnungslinie erzeugt. Bis zum Übergangspunkt wird eine nichtlineare, danach eine lineare Beziehung verwendet. Zur Ermittlung der beiden maßgebenden Punkte sind lediglich sechs Parameter notwendig:

f_c	Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
ϵ_{c0}	Dehnung bei f_c
r	Radius des Betonzylinders
$E_{fr,y}$	Elastizitätsmodul der Hülle in Umfangsrichtung
t	Wanddicke der Hülle
$\epsilon_{f,u}$	Bruchdehnung der Faser

Weitere bemessungsorientierte Modelle sind beispielsweise von Xiao und Wu (2000), Xiao und Wu (2003), Lam und Teng (2002), Lam und Teng (2003) sowie Teng et al. (2009).

Im Folgenden wird näher auf den wichtigen Parameter der Umfangsbruchdehnung eingegangen. Bei FKV-Umschnürungen ist diese in der Regel geringer als die einaxiale Zugbruchdehnung, die an Flachproben ermittelt wird (Mirmiran und Shahawy 1997; Shahawy et al. 2000, S. 479). Lam und Teng (2003) vermuten, dass die reduzierte Festigkeit auf eine lokale Schädigung durch Spannungsspitzen verursacht durch den Zuschlag im Beton begründet wird. Zudem werden die Umschnürungen nicht nur in einaxialer Richtung, wie bei Flachprobentests, beansprucht, sondern auch in radialer Richtung gedrückt, wodurch Umlenkkräfte entstehen.

Lam und Teng (2003) geben für CF-EP-Verbunde Reduktionsfaktoren zur Berechnung der Umfangsbruchdehnung aus der Zugbruchdehnung zwischen 0,58 und 0,79 an.

Xiao und Wu (2003) konstatieren für CF-EP und GF-EP Faktoren zwischen 0,5 und 0,8.

Es wird festgestellt, dass die beiden Haupteinflussgrößen auf den Reduktionsfaktor, die Betonfestigkeit und die Art des Materials sind (Lim und Ozbakkaloglu 2014b; Jian et al. 2015). Zudem nimmt der Reduktionsfaktor mit höherer einaxialer Betonfestigkeit und höherem Elastizitätsmodul des Umschnürungsmaterials in Umfangsrichtung ab.

Lim und Ozbakkaloglu (2014a) geben für die Ermittlung des Reduktionsfaktors $k_{\epsilon,f}$ eine Beziehung nach Gl. 27 an, die eine gute Übereinstimmung mit Versuchen aufweist (Lim und Ozbakkaloglu 2014b; Jian et al. 2015).

$$k_{\epsilon,f} = 0,9 - 2,3 f_c \cdot 10^{-3} - 0,75 E_{fkv,y} \cdot 10^{-6} \quad \text{Gl. 27}$$

- f_c Einaxiale Druckfestigkeit des Betons
- $E_{fkv,y}$ Elastizitätsmodul der Hülle in Umfangsrichtung in MPa im Intervall [100 000; 640 000]

Zur Einordnung der Ergebnisse der Belastungsversuche werden die Spannungsdehnungslinien in Kapitel 6.8 mit analytisch berechneten verglichen.

6.3. Auslegung von FKV-umschnürten Betonzylindern

Für die Anwendung von FKV-Verstärkungen im Bauwesen, wie auch die Umschnürung, sei auf Bergmeister (2005), Bergmeister et al. (2013), DAfStb (2012), DAfStb (2013) sowie die umfangreichen Arbeiten von Niedermeier (2009) verwiesen. Käseberg et al. (2018) machen einen Vorschlag zur Adaption der Richtlinie für Gelege hinsichtlich des Ansatzes zur Bruchdehnung der Carbonfasern, der Querschnittstragfähigkeit und der Maximaldehnung zur Ermittlung der Bauteiltragfähigkeit, basierend auf internationalen und eigenen Untersuchungen.

Im Folgenden werden der Entwurf und die Auslegung von umschnürten Betonbauteilen (Bild 93), wie sie für die Probekörper zum Einsatz kommen, vorgestellt.

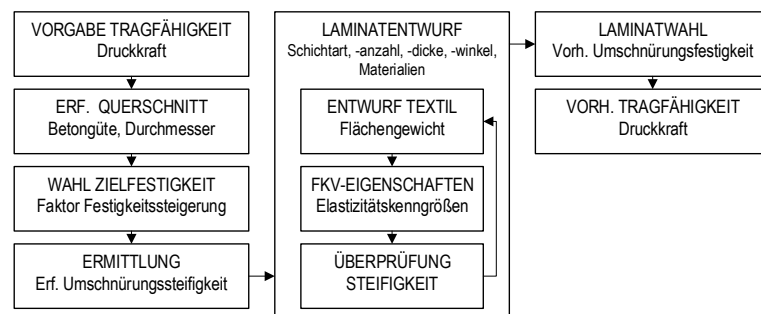


Bild 93: Entwurf von umschnürten Druckzylindern zur Steigerung der Drucktragfähigkeit durch Ausbilden eines mehraxialen Spannungszustands anhand von FKV-Umschnürungen

Eine Besonderheit der Auslegung druckbelasteter FKV-umschnürter Betonbauteile ist die Abhängigkeit der Tragfähigkeit von der Umschnürungssteifigkeit der Hülle in Umfangsrichtung. Der Faktor der möglichen Drucktragfähigkeitsstei-

gerung basierend auf diesem Effekt kann vorab anhand Auswertungen empirischer Untersuchungen und analytischer Modelle erfolgen (Bild 92). Die notwendige Umschnürungssteifigkeit zum Erreichen einer Tragfähigkeitssteigerung kann grafisch oder rechnerisch basierend auf empirischen und analytischen Grundlagen bei bekannter Betonfestigkeit ermittelt werden (Jonas und Knippers 2017). Entweder wird der Mindestwert der Laminatdicke vorab für gewählte Materialeigenschaften und Durchmesser bestimmt oder alternativ die erforderliche Umschnürungssteifigkeit des FKV in Umfangsrichtung bei gewählter Geometrie ermittelt. Ist der Durchmesser festgelegt, können die Laminatdicke und der Laminataufbau, sofern keine prozesstechnischen Randbedingungen entgegenstehen, variiert werden, um die notwendige Umfangssteifigkeit zu erhalten.

Inbesondere die Ausrichtung zur Umfangsrichtung, die Ondulation der Fasern der Einzelschichten, die Materialeigenschaften sowie der Faservolumengehalt sind wichtige Einflussgrößen für die erzielbaren Elastizitätskennwerte. Die physikalischen Eigenschaften der verwendeten Fasern und die Prozessrandbedingungen schränken die Bandbreite gewünschter Steifigkeitswerte zusätzlich ein. Liegen die erforderlichen Umfangssteifigkeiten trotz Ausnutzung der Bandbreite über den praktisch erreichbaren Werten, ist die Wanddicke zu erhöhen.

Der Laminatentwurf beschränkt sich bei Umschnürung mit unidirektionalen Gelegen, wie sie für Verstärkungen von Stützen häufig eingesetzt werden, meist auf die Wanddicke bzw. die Anzahl der Lagen. Eine Anordnung der Verstärkungsfasern in Umfangsrichtung ist in der Regel zweckmäßig, da so im Vergleich zu anderen Faserwinkeln die höchsten Umfangssteifigkeiten bei geringstem Materialeinsatz erreicht werden können.

Im Hinblick auf die Verwendung von Geflechtem für verzweigte Bauteile ist jedoch wegen der komplexen Knotengeometrie und den Einschränkungen in Bezug auf den Faserwinkel durch den Flechtprozess eine unidirektionale Anordnung nicht möglich. Für zylindrische unverzweigte Bauteile mit einer Krümmung in lediglich eine Richtung ist eine unidirektionale Umschnürung in Umfangsrichtung zur Erzeugung eines ringförmigen Seitendrucks normal zur Oberfläche der Hülle ausreichend. Die komplexe Knotengeometrie weist eine veränderliche Krümmung in zwei Richtungen auf. Um einen Seitendruck auf den Beton erzeugen zu können, müssen Umlenkkräfte entlang beider Krümmungen aufgenommen werden können. Die Fasern sollten deshalb mindestens in zwei verschiedene Richtungen, zumindest in Richtung einer Hauptkrümmung, angeordnet werden, um eine Umschnürungswirkung zu fördern.

Darüber hinaus ist die Aufnahme weiterer Kräfte, wie durch Imperfektion und äußere Lasten, die Biegemomente in den Tragknoten erzeugen, zusätzlich bei der Fadenanordnung zu berücksichtigen.

Die Laminatdicke kann bei gewähltem Fadenmaterial nur schrittweise durch wiederholtes Überflechten des Kerns vergrößert werden.

Die Elastizitätsgrößen hängen von folgenden Parametern ab: Fadendurchmesser, -anzahl und -ausrichtung, Lagenanzahl, Bindungsart, den Faser-, Harz- und Verbundeigenschaften sowie dem Faservolumengehalt.

Ziel des Laminatentwurfs ist es, einen Laminataufbau zu erreichen, der die Mindestumschnürungssteifigkeit gewährleistet, herstellbar ist und eine geschlossene Flächenabdeckung aufweist.

Für Lamine mit unidirektionalen Einzelschichten können die Elastizitätsgrößen, wie der Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung, mittels der klassischen Laminattheorie (CLT) abgeschätzt werden.

Für die FKV basierend auf geflochtenen Textilien kann diese rechnerische Methode zur Berechnung der Ingenieurkenngrößen unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors für die Ondulation (z. B. 0,8) ebenfalls als Näherung verwendet werden (Bild 94).

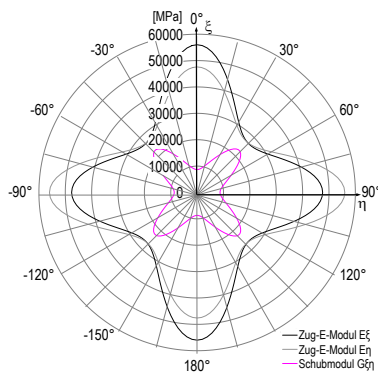


Bild 94:
Polardiagramm eines triaxialen
CF-EP-Geflechts
Verhältnis des Flächengewichts der
Flechtäden zu Stehfäden 2 : 1,36

Für die biaxialen und triaxialen Geflechte wird hierfür angenommen, dass sie als zwei bzw. drei UD-Schichten mit unterschiedlichen Faserwinkeln aufgefasst werden können, obwohl es sich eigentlich nicht um Lagen handelt, sondern um ein Textil, dessen Fasern sich durchdringen und überkreuzen. Für einen symmetrischen Aufbau sind die Lagen bei halbiertes Dicke entsprechend zu verdoppeln. Nach Wahl der Anzahl und Durchmesser der Rovings werden die Flächengewichte nach Gl. 18 berechnet. Zur Erzielung hoher Steifigkeiten in Umfangsrichtung ist es naheliegend, den Flechtwinkel möglichst groß zu wählen. In den Versuchen liegt der Zielwert des Flechtwinkels deshalb überwiegend bei 70°. Größere Winkel können zu einer Verschlechterung der Ablage des Geflechts führen. Die Rovings liegen dann so eng, dass sie sich gegenseitig sperren und sich das Textil bereichsweise vom Kern abhebt.

Bestehende Bemessungsdiagramme sind in der Regel für UD-Umschnürungen entwickelt, die eine hohe Steifigkeit in Umfangsrichtung und eine geringe Steifigkeit in Längsrichtung aufweisen. Bei Geflechtes ist die Ausprägung hoher orthotroper Unterschiede wie bei UD-Laminaten weniger stark. Deshalb ist anzunehmen, dass diese vermehrt Lasten in axialer Richtung aufnehmen, die zu Dehnungen führen können, die der Dehnungsbehinderung entgegenstehen. Negativ auf die Umschnürungswirkung können sich auch Strukturdehnungen auswirken, die durch umgelenkte Fasern im Textil entstehen. Eine Umschnürung durch Geflechte ist für zylindrische Bauteile deshalb vermutlich insgesamt weniger effizient als mit UD-Lagen. Vorteilhaft erscheinen sie insbesondere vor dem Hintergrund der komplexen verzweigten Geometrie.

6.4. Beton-GF-EP-Wickelrohre: Vorversuche

Die Druckversuche² erfolgten an betongefüllten, glasfaserverstärkten (GF-EP) Wickelrohren. Die Wickelrohre wiesen vier Lagen mit einem Wickelwinkel von +40°, -40°, +40° und -40° auf. Die zylindrischen Probekörper wurden mit zwei unterschiedlichen Betonen im Betonlabor der Firma Züblin hergestellt (h = 400 mm, d = 100 mm).

Die Eigenschaften des Betons sind in Tabelle 9 und des GF-EP in Tabelle 10 zusammenfasst. Der Elastizitätsmodul

² Experimentelle Durchführung der Vorversuche: Dr.-Ing. Hub.

der FKV-Rohre in Umfangsrichtung wird auf Basis der theoretischen Zusammenhänge anhand der klassischen Laminattheorie mit dem Programm *Compositor*³ bestimmt.

Tabelle 9: Betoneigenschaften der untersuchten Proben (VR0)

Probenname	Beton	$f_{c,cyl}$ N/mm ²	ϵ_{c1} mm/m	E_c N/mm ²	v_c –	Anzahl –
P02, P06, P07, P08, P09	,B25'	49,7	2,715	31000	0,18	5
P11, P14, P16, P17	,B55'	73,5	2,841	31000	0,18	4

Tabelle 10: FKV-Eigenschaften der untersuchten Proben (VR0)

Probenname	Typ FKV –	E_{fkv} N/mm ²	t_{fkv} mm	K N/mm ²
P02, P06, P07, P08, P09	GF-EP, Wickelrohr	22000*	2,9	528
P11, P14, P16, P17	GF-EP, Wickelrohr	22000*	2,9	528

*mit CLT berechneter Wert für einen Faservolumengehalt von 50 %.

Die Angaben aus Tabelle 9 und Tabelle 10 sind ausreichend, um gängige analytische und empirische Modelle zur Tragfähigkeit von FKV-umschnürten Betonzylindern verwenden zu können. Nach Xiao und Wu (2000), Jiang und Teng (2007) und Kwan et al. (2015) ist eine Umschnürungssteifigkeit von 528 N/mm² der Proben P02 – P09 notwendig, um ein Verhalten nach Wirksamkeitsniveau k1, also einen streng-monotonen Anstieg der Lastverformungskurve, zu zeigen. Die Proben P11 – P17 erreichen demnach nur ein Verhalten, das zwischen dem Wirksamkeitsniveau k2 und k1 liegt, das mit einer Tragfähigkeitssteigerung einhergehen kann, allerdings keine streng-monotone Lastverformungskurve aufweist.

Bild 95 zeigt typische Versagensbilder der betongefüllten GF-EP-Wickelrohre. Deutlich erkennbar sind Risse parallel zu den Faserlagen im Winkel von -40° und +40° bis hin zu Rissen in Längsrichtung. Die Schlankheit ist im Vergleich zu den Betonzylindern der Normprüfung für Betonzylinder (DIN EN 12390-13) doppelt so groß. Die Prüfkörper weisen mit zunehmender Prüfkraft teilweise eine Durchbiegung zur Seite auf.

Die Kraft-Dehnungslinien der betongefüllten GF-EP-Wickelrohre zeigen für die beiden Betone unterschiedliche Ergebnisse (Bild 96). Während beim Beton B25 die Prüfkraft mit Umschnürung gegenüber der Referenzprobe von 390 kN im Mittel auf 710 kN um das 1,8-Fache gesteigert werden kann, erhöht sich die Prüfkraft für den höherfesten Beton B55 von 578 kN auf 658 kN um das 1,1-Fache nur geringfügig.

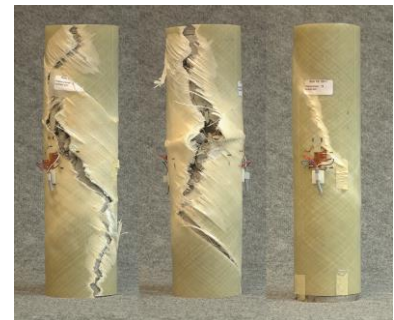


Bild 95:
Bruchbilder GF-EP-Versuchskörper
von links nach rechts: Probe P02, P06,
P11 (Dr.-Ing. Hub)

³ Programm Compositor v20, Hilfsmittel zur Analyse von Laminaten aus Faserverbundkunststoffen, Institut für Kunststoffverarbeitung, RWTH Aachen

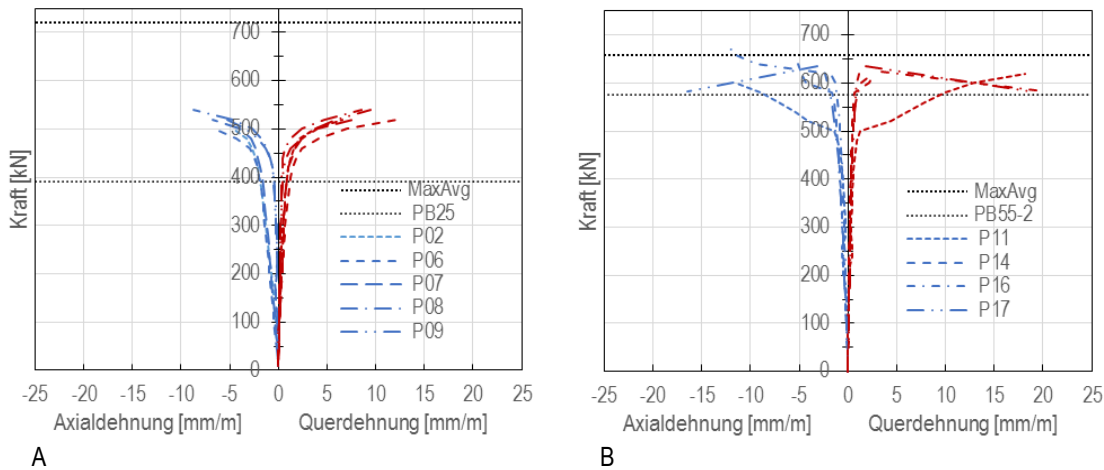


Bild 96: Spannungsdehnungslinien der betongefüllten GF-EP-Druckproben, A: P02-P09 (B25), B: P11-P17 (B55)

Für das Ausbilden einer Tragwirkung nach Wirksamkeitsniveau k_1 (6.2.2) ist für einen Beton höherer Festigkeit eine größere Umschnürungssteifigkeit notwendig als für einen Beton geringerer Festigkeit. Dies spiegelt sich in den Versuchsergebnissen wieder: Die Proben kleinerer Betonfestigkeit erreichen eine größere Tragfähigkeitssteigerung als die Proben mit größerer Betonfestigkeit (Tabelle 11). Die aufnehmbare Kraft der Proben P02 – P09 übertrifft im Mittel diejenige der Proben P11 – P17.

Tabelle 11: Bezogene Betonfestigkeiten f_c bzw. f_{ccu} ermittelt in Druckversuchen (VR0)

	PB25 (ref.)	P02-P09		PB55 (ref.)	P11-17		
n	-	1	5	n	-	2	4
\bar{x}	N/mm ²	49,8	91,1	\bar{x}	N/mm ²	73,6	84,3
s	-	-	3,2	s	-	-	3,0

6.5. Beton-CF-EP-Geflechtröhre (biaxial) und Wickelröhre: Druckversuche

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in Jonas und Knippers (2017) in kompakter Form veröffentlicht und werden hinsichtlich der für diese Arbeit relevanten Gesichtspunkte im Folgenden auszugsweise wiedergegeben.

Untersucht werden insgesamt neun Druckprüfkörper, wovon drei Betonreferenzprüfkörper und sechs mit Carbon umschnürt sind (Tabelle 12).

Tabelle 12: Versuchsreihe 1, Übersicht Prüfungen

Serie	Belastungsart	Anzahl	Faserlagen	Faserwinkel
Ref.	Druck (Ref.)	3	0	-
W	Druck	3	(1) + 1	(0° 90°), 89°
B1	Druck	1	4	~ 66°
B2	Druck	1	6	~ 66°
B3	Druck	1	7	~ 66°

W Wickelrohr (wound)

B Flechtrrohr (braided)

Zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der FKV-Umschnürungen werden insgesamt 13 Rohrabschnitte (Ringe) im „split disc test“ untersucht (Tabelle 13).

Tabelle 13: Versuchsreihe 1, CF-GF-EP-Betonzylinder, FKV-Prüfungen

Serie	Test	Anzahl	Prüfrichtung	Faserwinkel
W	split disc	4	Umfangsrichtung	(0° 90°), 89°
B1	split disc	3	Umfangsrichtung	~ 66°
B2	split disc	3	Umfangsrichtung	~ 66°
B3	split disc	3	Umfangsrichtung	~ 66°

6.5.1. Herstellung der Probekörper

Hergestellt werden insgesamt neun Probekörper mit einem Verhältnis von Höhe zu Durchmesser von 2 : 1 ($h = 400$ mm, Betonkerndurchmesser $d_c = 200$ mm), davon drei Probekörper ohne CF-EP-Umschnürung, drei mit einem Wickelrohr und drei mit einem Geflechtrohr (Jonas und Knippers 2017).

Die Schalung der Referenzproben besteht aus einem Kartonrohr mit innenliegender Kunststoffbeschichtung. Für die Flechtrohre wird ein Textil, ein zweiflechtiger (biaxialer) Geflechschlauch aus Carbon, zugekauft, woraus im Vakuuminfusionsverfahren an den DITF Denkendorf Rohre hergestellt werden. Im Fall der Referenzproben werden die Kartonschalungen vor der Prüfung entfernt, die Carbonrohre verbleiben als verlorene Schalung auf dem Betonkern.

Die Wickelrohre werden werkseitig in einem Autoklaven hergestellt. Hierzu wird auf den mit Trennmittel versehenen Wickeldorn zunächst ein Gewebe 0°|90° mit einer Dicke von 0,23 mm angebracht. Danach wird ein vorimprägnierter Roving in einem möglichst steilen Winkel um das Gewebe gewickelt. Die Eigenschaften des Prepregs nach DIN 29971 sind: Faserflächengewicht 600 g/m², Harzgehalt 35 %, Prepregflächengewicht 920 g/mm² (aus Datenblatt); die Fasereigenschaften sind: Filamentanzahl 50 K, $d_F = 7$ µm, $E = 240$ GPa, $f_u = 4000$ MPa, $\epsilon_u = 1,6$ %, $\rho = 1,8$ g/cm³ (aus Datenblatt).

Prozessbedingt erreicht der Wickelwinkel nicht die für eine größtmögliche Steifigkeit in Umfangsrichtung erwünschten 90°, sondern circa 89°. Die gesamte Wanddicke des Wickelrohres beträgt 2,15 mm. Nach dem Erhärten wird das Rohr im Werk unter Einsatz einer hydraulischen Presse vom Wickeldorn entfernt und auf Maß zugeschnitten.

Zur Herstellung der drei Geflechtrohre werden zunächst drei Flechtkerne aus PVC-Rohren gefertigt. Damit sich die Rohre später vom ausgehärteten FKV-Bauteil entfernen lassen, werden sie mit Trennmittel eingestrichen und in jeweils drei Segmente zerschnitten. Auf die PVC-Innenschalungen wird der Flechschlauch lagenweise mit Hilfe eines Konus aufgezogen (4, 6 bzw. 7 Lagen) und der Aufbau für das Vakuuminfusionsverfahren (VRI) gemäß der Methodenbeschreibung in Kapitel 5.3.3 durchgeführt (Bild 97). Anstatt den Lagenaufbau des VRI gegen die geschlitzten Innenrohre abzdichten, wird im Rohrrinneren zusätzlich ein Folienschlauch eingezogen und gegen diesen abgedichtet (Bild 97 b).

Laut Herstellerangaben besteht der Geflechschlauch aus 288 Carbonrovings (6 K, 400 tex, $E = 240$ GPa, $f_u = 4100$ MPa, $\epsilon_u = 1,7$ %, $\rho = 1,77$ g/cm³, aus Datenblatt). Das Infusionsharz wird im Verhältnis von Harz : Härter zu 100 : 28 Masseanteilen in mehreren Portionen gemischt ($E = 3,1$ GPa, $f_u = 70$ MPa, $\epsilon_u = 7 - 10$ %, $\rho = 1,15$ g/cm³, Viskosität 5 - 25 mPa·s, aus Datenblatt) und hat bei Raumtemperatur mit dem verwendeten Härter eine im Vergleich zu anderen

Härten lange Topfzeit von 4 – 5,5 h (aus Datenblatt). Nach dem Erhärten des Harzes bei Raumtemperatur erfolgt ein Nacherhärten für 15 h bei einer Temperatur von 60 °C. Die hergestellten Rohre (Bild 97 c) werden mit Hilfe eines Nassschneiders trennschleifend abgelängt. Die Probekörper für den Halbschalenzugversuch werden unmittelbar neben einzelnen Geflechtröhren in einer Breite von 1 – 3 cm entnommen.

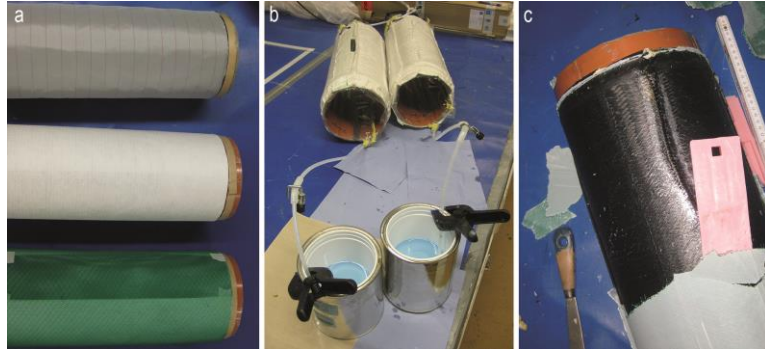


Bild 97: Herstellung von Geflechtröhren im VRI-Verfahren

a: Anbringen verschiedener Lagen: Abreißgewebe, Trennvlies, Gittergewebe (vgl. Bild 70, Bild 71, Lage 1, 2, 3), b: Vakuuminfusion mit Epoxidharz, c: Abnehmen der verharzten Lagen zum Freilegen des Bauteils (Abreißgewebe noch anhaftend)

Zur Vorbereitung der Betonage wird ein Ende des Rohres mit einer Schaltafel verschlossen. Der Beton der Zielfestigkeitsklasse C50/60 mit 8 mm Größtkorn enthält Zuschläge aus Kalkstein. Die abgezielte Konsistenz wird im Hinblick auf die spätere Betonage einer komplexen Verzweigungsgeometrie nahezu selbstverdichtend eingestellt. Die Frischbetoneigenschaften nach DIN EN 12350-5 sind ein Ausbreitmaß von 640 mm und nach DIN EN 206-1 eine Konsistenz der Klasse F6 (sehr fließfähig).

Die Betonage erfolgt auf dem Gelände eines Transportbetonwerks, das 2 m³ des Betons herstellt und per gereinigtem Fahrmixer zur Verfügung stellt. Das Befüllen der Probekörper erfolgt mit Handschaufeln. Die betonierten Proben werden für wenige Sekunden (< 5 s) auf einem Rütteltisch verdichtet. Zur Ermittlung der Festigkeit und der Schwindeneigenschaften werden begleitend mehrere Würfel hergestellt und eine Schwindrinne befüllt.

Nach der Betonage werden die Proben wie folgt behandelt:

- Tag 1: Ausschalen und Transport zum Prüfort
- Tag 1 – 8: Lagerung im Wasserbad
- ab Tag 21: Lagerung bei Raumbedingungen, Aufbringen eines Mörtelbetts mit Quarzsand auf einer Seite sowie Anbringen der Dehnmessstreifen
- Tag 28: Druckprüfung

Ein gängiger Praxiswert zur Auswahl der Messgitterlänge der Dehnmessstreifen (DMS) ist die Regel, dass die Messgitterlänge mindestens das Drei- bis Fünffache des Durchmessers des Größtkorns des Betons betragen sollte. Außerdem gilt nach Naik et al. (1994) die Empfehlung, dass die Messgitterlänge mindestens so groß wie die Einheitszelle des Geflechts sein sollte. Die Diagonalen der Einheitszellen (vgl. Kapitel 5.3.4) gemessen an fünf Stellen pro Rohr haben im Mittel Werte von 3,6 mm und 1,8 mm inne.

Mit der Wahl von DMS mit einer einheitlichen Messgitterlänge von 60 mm sind beide Kriterien erfüllt. Angebracht werden die DMS nach einem Anschleifen des Untergrunds auf eine trockene und staubfreie Oberfläche. Für die offenporige Betonoberfläche wird ein Kleber auf Basis von Cyanacrylat mit größerer Viskosität verwendet als für die CF-EP-Bauteile. Eingesetzt werden DMS mit bereits angebrachtem Kabel zum Anschluss in Dreileitertechnik.

6.5.2. Versuchsaufbau Ringzugprüfung der CF-EP-Umschnürungen („split disc test“)

Bei den durchgeführten Versuchen „split disc test“ handelt es sich um eine zerstörende Prüfung ringförmiger Probekörper mit quasi-statischer Belastung (Bild 98).

Versuchsziel ist die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften der CF-EP-Umschnürungen vor allem in Umfangsrichtung hinsichtlich des Elastizitätsmoduls, der Festigkeit, der Bruchdehnung sowie des Bruchverhaltens.

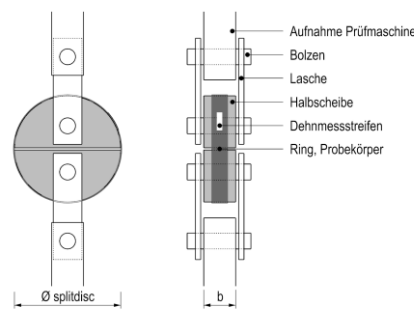


Bild 98: Aufbau des „split disc test“, Halbscheiben-Zugversuch

Die beiden Halbscheiben – in der Ansicht Kreissegmente, annähernd Halbkreise – werden im Versuch auseinander bewegt. Dadurch wirkt auf den Probekörper innenseitig eine Pressung ein. Der Versuch wird in Anlehnung an ASTM D2290 aufgebaut. Die Bolzen in den Halbschalen sind nicht exakt im Schwerpunkt angeordnet, sondern in vertikaler Richtung nach außen versetzt, so dass sich der Versuchsstand mit zunehmender Belastung gerade ausrichtet.

Der Ringschluss und die relative Biegeweichheit des dünnwandigen Rohres führen zu einer Ringzugspannung im Probekörper in Kombination mit einer innenseitigen Pressung. Diese kombinierte Beanspruchung, die primär radiale und tangentielle Spannungen erzeugt, liegt gegenüber Tests an Flachproben (DIN EN ISO 527-1, DIN EN ISO 527-4), bei denen die Probekörper im mittleren Probekörperbereich planmäßig Normalspannungen widerstehen, näher an der Beanspruchungskombination, der die Umschnürung ausgesetzt ist (Bild 89).

Neben der gegenüber Flachproben ähnlicheren Beanspruchung hat die Anwendung dieser Prüfmethode auch praktische Gründe: Um zu vermeiden, dass zusätzliche flache Probekörper separat hergestellt werden müssen, werden direkt an den Rohren ringförmige Probekörper entnommen. Dadurch werden systematische Fehler durch herstellungsbedingt unterschiedliche Faservolumenanteile verschiedener Vakuuminfusionen oder das Verändern der Textilstruktur beim Schneiden und Abrollen der auf das Rohr gestreiften Textilien zum flachen Ablegen ausgeschlossen.

Im Bereich des Spalts unterliegt die Probe dem Einfluss von Biegespannungen. Erfahrungsgemäß verfälschen bereits kleine Biegungen einer Dehnungsmessung, die an der Oberfläche des Querschnitts erfolgt und durch die auf einen konstanten Dehnungsanteil geschlossen werden soll, deutlich. Deshalb ist ein Abstand der Dehnungsmessstelle vom Spalt einzuhalten.

Die Ringzugspannung ist nur bei reibungsfreier Lagerung konstant über dem Ringumfang verteilt. Bei reibungsbehafteter Lagerung nimmt die Ringzugkraft von der Hälfte der Prüfkraft an der Stelle des Spalts bis zum Scheitel hin um den Reibanteil ab. Das heißt, wird die Prüfkraft, die an der Aufnahme der Prüfmaschine registriert wird, einer Dehnung ermittelt an den Scheiteln des Rings gegenübergestellt, so wird der Betrag der Dehnung geringer ausfallen, da die Dehnung verursachende Kraft im Ring durch die Reibung verkleinert wird. Wird der Elastizitätsmodul jedoch mit Dehnungswerten, die per se geringer ausfallen als die zur Prüfkraft bzw. korrespondierenden Spannungen ermittelten, so resultiert dies in überhöhten Werten.

Zum Abschätzen des zu erwartenden Fehlers kann die Zugkraft Z im Ring näherungsweise unter der Annahme dünnwandiger biegeweicher Ringe nach der Seilreibungsformel nach Gl. 28 berechnet werden.

$$F(\alpha) = F_0 \cdot e^{-\mu \cdot \alpha} \quad \text{Gl. 28} \\ \text{nach Euler-Eytelwein}$$

F_0 Kraft im Ring an der Stelle des Spalts (halbe Prüfkraft)

μ Reibbeiwert

α Umlenkwinkel (Viertelscheibe $\sim \left(\frac{\pi}{2}\right)$)

Unter der Annahme, dass der Reibbeiwert maximal den Wert zweier Stahloberflächen bzw. mit reibreduzierenden Maßnahmen 1/10 davon beträgt ($\mu=0,2$ bis $0,02$), ergibt sich für die Umlenkung ein Abminderungsfaktor 0,73 bis 0,96 der Ringzugkraft im Scheitel des Rings im Vergleich zur Stelle am Spalt.

Die mittlere Ringzugspannung wird aus dem Quotienten der Prüfkraft geteilt durch die Gesamtquerschnittsfläche eines gedanklich in der Mitte geschnittenen Rings berechnet (Jonas und Knippers 2017).

Zur Ermittlung realistischer Werte der Elastizitätsmodule werden folgende Maßnahmen getroffen: Zum einen wird der Ort der DMS-Messung so nah wie möglich am Spalt angeordnet, damit der Reibanteil gering bleibt (Integral über die Kontaktlänge), jedoch so weit wie nötig von der Stelle des Spalts entfernt, um Einflüsse aus der Biegung auf die Dehnungsmessung zu vermeiden. Yoon et al. (1997) empfehlen einen Mindestwinkel von 15° zum horizontalen Spalt für deren Versuchsaufbau, der hier als Anhaltswert übernommen wird. Außerdem wird versucht, die Reibeinflüsse zu minimieren: In der ersten Versuchsreihe durch das Aufbringen von Schmiermittel zwischen der glatten Stahlfläche und den Ringen, wie in Perillo et al. (2014), in der zweiten durch eine PTFE-Folie. Das Aufbringen einer definierten Schichtdicke des Schmiermittels ist nur bedingt durchführbar. Die Handhabung zugeschnittener PTFE-Folie ist einfacher, was die erreichbare Reproduzierbarkeit erhöht.

Die Prüfkraft wird zyklisch aufgebracht, so dass anfängliche Setzungen des Versuchsstands bei der Ermittlung

des Elastizitätsmoduls keinen Einfluss haben. Der zweite Vorteil der zyklischen Lastaufbringung ist die Möglichkeit, den Elastizitätsmodul aus einem Mittelwert der ansteigenden und der abfallenden Kurve zu bestimmen, wodurch sich der Spannungsanteil aus Reibungsverlusten theoretisch egalisiert, wie Yoon et al. (1997) zeigen.

Die Prüfkraft wird über die gebogene Fläche der zwei Halbscheiben ($d_s = 195 \text{ mm}$, $t_s = 50 \text{ mm}$) auf den ringförmigen Prüfkörper aufgebracht. Die Halbschalen sind wiederum über je einen Bolzen mit zwei Stahllaschen und einem weiteren Bolzen an der Aufnahme der spindelgetriebenen Prüfmaschine (Höchstkraft 100 kN) befestigt.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min und die Vorkraft, hier als Spannung definiert, 30 N/mm². Nach zwei Zyklen wird die Prüfspannung jeweils ausgehend von 50 N/mm² als Startwert verdoppelt (Bild 99). Der erste Zyklus dient jeweils dem Abbau von Setzungen. Zwischen den Be- und Entlastungsphasen wird die Prüfkraft für 10 s gehalten.

Die ringförmigen Prüfkörper sind mit mindestens einem Dehnmessstreifen ($l = 60 \text{ mm}$) in Umfangsrichtung ausgestattet, der in Dreileitertechnik angeschlossen wird.

Die Messgrößen sind die Prüfkraft, der Traversenweg sowie der Widerstand der DMS. Die DMS werden separat anhand eines Universalmessverstärkers registriert und in der Auswertung nachgelagert manuell zugeordnet.

Der Elastizitätsmodul als Sekante wird im Intervall von 30 bis 100 N/mm² bei den geflochtenen Proben und im Intervall von 30 bis 200 N/mm² bei den gewickelten Proben als Mittelwert des an- und absteigenden Verlaufs im Spannungsdehnungsdiagramm ausgewertet (Bild 100).

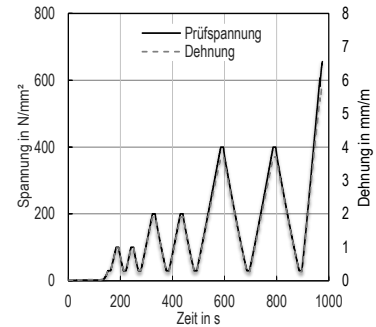


Bild 99:
Exemplarischer Verlauf von Spannung und Dehnung einer Ringprobe (Wickelrohr) im „split disc test“ unter mehrfach gesteigerter zyklischer Belastung bis zum Bruch

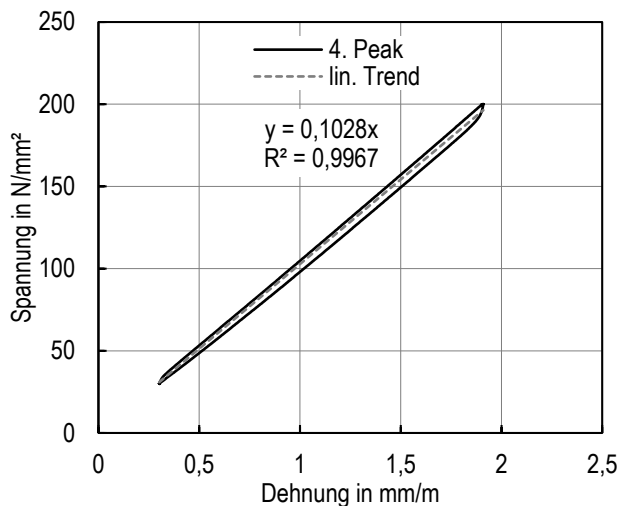


Bild 100: Spannungsdehnungsdiagramm der in Bild 99 gezeigten Probe im Bereich des vierten Peaks (380 s – 490 s) mit einer an- und absteigenden Kurve sowie einem linearen Trend

6.5.3. Ergebnisse der Materialprüfungen FKV

Die geometrischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Ringproben sind in Tabelle 14 gelistet. Der Faservolumengehalt wird durch Kalzinierung nach DIN ISO 1172 bestimmt. Der Faservolumengehalt der Geflechtrohre mit im Mittel 38 % ist deutlich geringer als der der industriell hergestellten Wickelrohre mit im Mittel 54 %, ebenso die

Flächengewichte der Laminats. Der Faservolumengehalt korreliert stark mit dem Elastizitätsmodul (Gl. 14). Nicht nur wegen des geringeren Faservolumengehalts, sondern auch wegen des kleineren Faserwinkels liegen die Werte der Elastizitätsmodule der Geflechtproben unter denen der Wickelproben (Tabelle 14).

Das Versagen der Ringe im „split disc test“ tritt schlagartig durch einen Riss quer zum Ring ein. Akustisch ist dies durch einen Knall wahrnehmbar, dem vereinzelt ein knisternendes Geräusch vorausgeht.

Die Festigkeitswerte in Umfangsrichtung der Geflechtrohre liegen im Bereich von circa 127 – 296 N/mm² und bleiben deutlich unter denen für das Wickelrohr ermittelten Werten, die das 2,5- bis 4-Fache betragen (Tabelle 14). Dies ist neben dem geringeren Faservolumengehalt vor allem auf die unterschiedlichen Faserwinkel von circa 67° zu 89° zurückzuführen. Der Trend ist auch bei den Werten für die Elastizitätsmodule festzustellen, die Werte der Wickelrohre sind mehr als doppelt so hoch. Die Streuung der mechanischen Kennwerte für den Elastizitätsmodul der Geflechtproben ist im Vergleich zu den Wickelproben größer.

Tabelle 14: Eigenschaften der FKV-Rohre, Mittelwerte aus Jonas und Knippers (2017)

	nLage	t _{fkv}	α _f	φ _f	g _{A, fkv}	g _{A, f}	f _{ten, y}	ε _{ten, y}	E _y
	–	mm	°	%	g/m ²	g/m ²	MPa	mm/m	GPa
B1	4	2,4	66±1	41	3616	1742	157,2	4,8	39,9
B2	6	4,0	67±5	41	5338	2903	296,1	7,6	51,8
B3	7	5,3	67±5	33	6737	3096	127,2	3,0	48,2
W	2	1,92 0,23	89 0 90	54	3045	2055	715,5	6,4	113,7

B1 – B3 Geflochtene Rohre (jeweils drei Ringe entnommen)

W Gewickelte Rohre (insgesamt 4 Ringe entnommen)

nLage Anzahl der Lagen

t_{fkv} Gesamtdicke des Laminats, ermittelt an Ringen

α_f Faserwinkel, 0° entspricht der Längsrichtung (am Rohr)

φ_f Faservolumengehalt, ermittelt an Ringen

g_{A, fkv} Flächengewicht des Laminats, ermittelt an Ringen

g_{A, f} Berechnetes Flächengewicht der Fasern (an Ringen)

f_{ten, y} Zugfestigkeit in Umfangsrichtung, Mittelwert aller Ringe

ε_{ten, y} Zugehörige Bruchdehnung, Mittelwert aller Ringe

E_y E-modul in Umfangsrichtung, Mittelwert aller Ringe

Zur Anwendung analytischer und numerisch-mechanischer Modelle und zur Berechnung der Tragfähigkeit der umschnürten Bauteile sind neben den Eigenschaften in Umfangsrichtung zusätzliche Parameter notwendig, die näherungsweise mit Methoden der CLT (vgl. Kapitel 6.3) ermittelt werden (Tabelle 15).

Anhand des Faktors der Ondulation, der direkt auf die Steifigkeitswerte der Faserschicht einwirkt, werden die Parameter basierend auf den experimentell ermittelten Werten für die Elastizitätsmodule in E_y berechnet.

Tabelle 15: Steifigkeiten der Umschnürung, Mithilfe CLT ermittelte Werte der FKV-Rohre aus Jonas und Knippers (2017)

	K	F _{Ondulat}	E _x	E _y	G _{xy}	v _{yx}	v _{xy}
	MPa	-	GPa	GPaA	GPa	-	-
B1	956	0,73	6,5	39,4	11,8	0,20	1,24
B2	2065	0,95	6,6	51,8	14,2	0,19	1,46
B3	2548	0,97	5,5	48,2	11,7	0,19	1,44
W	2440	-	-	-	-	-	-

K Umfangssteifigkeit

E_x Elastizitätsmodul in Längsrichtung

E_y Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung

G_{xy} Schubmodul

v_{yx} Querdehnzahl (Wirkung tangential in y, Ursache axial in x)

v_{xy} Querdehnzahl (Wirkung axial in x, Ursache tangential in y)

Diskussion

Die höhere Streuung der mechanischen Eigenschaften der Geflechtproben ist vermutlich herstellungsbedingt. Während die Wickelrohre Produkt eines industriellen Prozesses sind, werden die Geflechtrohre manuell hergestellt, wodurch die Geometrie der Ringe stärker von der eines Kreises abweicht als die der Wickelproben. Dadurch können sich beim „split disc test“ durch Anlegen des Ringes an die Kreisgeometrie zusätzliche Biegebeanspruchungen einstellen.

Ein weiterer Grund ist die Faltenausbildung des Textils bei den Geflechtrohren, die zu Umlenkkraften führen kann.

Zudem ist das Verhältnis der Umwicklungen eines Rovings zwischen dem Wickelrohr und den Geflechtrohren wegen des unterschiedlichen Faserwinkels gänzlich verschieden. Während beim Wickelrohr die Faserbündel annähernd in Umfangsrichtung angeordnet sind, liegen sie in den Geflechtrohren mit circa 67° deutlich gedreht vor. Die Beanspruchung des FKV ist nicht faserparallel, sondern beinhaltet einen deutlichen Schubanteil. Angeschnitten ist bei den Wickelrohren lediglich ein Roving an den Rändern, während bei den Geflechtrohren jeder Roving angeschnitten wird. Es lässt sich vermuten, dass die größere Anzahl angeschnittener Faserbündel zusammen mit der variierenden Laminatdicke anfälliger für an den Rändern induzierte Störungen ist und neben den Geometrieabweichungen Grund für die größere Streuung in den Ergebniswerten der Geflechtproben im Vergleich zu den Wickelproben ist.

Die Faserbündel des FKV aus Geflecht liegen im Gegensatz zu den maßgebenden äußeren Faserbündeln des Wickelrohres gewellt vor. Die Ondulation führt zu einer Strukturdehnung des geflochtenen FKV. Die Aufnahme von Normalspannungen hat wegen der Umlenkungen im Inneren der Textilstruktur, vor allem der überkreuzten Flechtfaserbündel, einen komplexen Spannungszustand zur Folge, mit Spannungen zwischen und quer zu den Faserbündeln.

Es ist bekannt, dass die Bruchdehnung der FKV-Umschnürung geringer ausfällt als diejenige, die an Flachproben ermittelt wird (vgl. Kapitel 6.2.2). Aus der Korrelation zwischen der Dehnung und der Spannung für das linear-elastische FKV-Material wird angenommen, dass die auftretenden Widerstände der Umschnürung die Beanspruchbarkeiten, die an Flachproben in Längsrichtung ermittelt werden, ebenfalls unterschreiten.

Der Spannungszustand im „split disc test“ beinhaltet Querdruckspannungen, die bei einer Umschnürung im Gegensatz zu einem Versuch an Flachproben auftreten. Dennoch

bildet der „split disc test“ nicht die durch die Körnung des Betons und dessen Inhomogenität induzierten, lokalen Spannungsspitzen ab, wie auch Shahawy et al. (2000) erwähnen. Es wird vermutet, dass eine Schädigung der Hülle auch durch Rissufer des Betons veranlasst wird. Bezüglich der unterschiedlichen Festigkeiten beziehungsweise Bruchdehnungen weisen Lam und Teng (2003) unter anderem auf Marijn R. Spoelstra und Giorgio Monti (1999) hin. Xiao und Wu (2003) führen als Gründe unterschiedliche Herstellungsqualitäten, Risse und Delamination von Lagen an.

6.5.4. Versuchsaufbau Druckprüfung

Bei den zerstörenden Prüfungen handelt es sich um quasi-statische Druckversuche (Bild 101).

Versuchsziel ist die Ermittlung von Lastverformungskurven, Druckfestigkeiten (in Anlehnung an DIN EN 12390-3), den zugehörigen Dehnungen sowie Versagensmechanismen. An den Betonreferenzprüfkörpern wird zusätzlich der stabilisierte Elastizitätsmodul (Sekantenmodul) in Anlehnung an DIN EN 12390-13, Verfahren B bestimmt.

Die Prüfkraft wird stirnseitig anhand von zwei Stahlplatten ($d_s = 195 \text{ mm}$, $t_s = 20 \text{ mm}$) direkt auf den Betonzylinder ($d_{c,soll} = 200 \text{ mm}$) eingeleitet, nicht auf die Carbonhülle. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt $0,5 \text{ MPa/s}$ und die Vorkraft 30 kN . Die Betonreferenzprüfkörper werden an einer Anlage mit 600 kN Höchstdruckkraft getestet, die mit einer Carbonhülle an einer hydraulischen Prüfanlage mit 6000 kN Höchstdruckkraft.

Die Prüfkörper sind auf halber Höhe mit je zwei vertikalen und horizontalen Dehnmessstreifen ausgestattet. Zur Erfassung der Längenänderung des gesamten Probekörpers sind zusätzlich zwei induktive Wegaufnehmer mit einer Messlänge von 50 mm angeordnet. Die Messgrößen sind die Prüfkraft, die Dehnungen in axialer und tangentialer Richtung (ermittelt an jeweils zwei DMS) sowie die Gesamtdehnung in axialer Richtung, ermittelt anhand von zwei Wegaufnehmern.

Die Prüfkraft wird von der Prüfanlage erfasst. Die sechs Sensoren werden anhand eines Universalmessverstärkers mit zehn Werten pro Sekunde registriert. Zur späteren manuellen Synchronisierung der Messdaten wird die Vorkraft für 10 s gehalten.

6.5.5. Ergebnisse der Druckversuche

Die Ergebnisse der Druckprüfung der Referenzbetonkörper zeigt Tabelle 16, die der umschnürten Betonzylinder Tabelle 17. Die einaxiale Zylinderdruckfestigkeit des Betons beträgt $52,1 \text{ N/mm}^2$.

Tabelle 16: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28 Tage) aus Jonas und Knippers (2017)

n=3	ρ_c	$f_{c,cyl}$	$E_{c,S}$	ϵ_{c1_axial} (WA)	ϵ_{c1_axial} (DMS)	ϵ_{c1_quer} (DMS)	$v_{(\sigma_a)}$
	t/m^3	N/mm^2	GPA	mm/m	mm/m	mm/m	-
\bar{x}	2,32	52,1	32,9	-2,80	-2,55	1,19	0,21
s	0,01	1,2	0,6	0,10	0,33	0,46	0,02

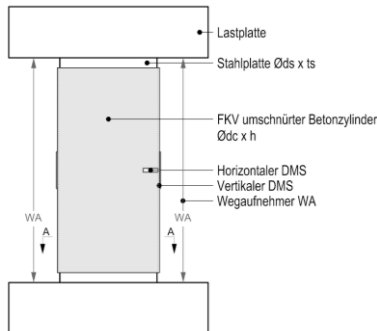


Bild 101: Versuchsanordnung der Druckprüfung von umschnürten Betonzylindern, ausgestattet mit paarweise gegenüberliegenden Dehnmessstreifen in Längs- und Umfangsrichtung sowie Wegaufnehmern, nach Jonas und Knippers (2017)

ρ_c	Rohdichte des Betons
$f_{c,cyl}$	Mittlere einaxiale Zylinderdruckfestigkeit
$E_{c,S}$	Elastizitätsmodul des Betons (Sekantenmodul)
$\epsilon_{c1_axial}(WA)$	Betondehnung bei f_c , Mittelwert Wegaufnehmerdaten
$\epsilon_{c1_axial}(DMS)$	Betondehnung bei f_c , Mittelwert aus DMS-Daten
$\epsilon_{c1_quer}(DMS)$	Betondehnung bei f_c , Mittelwert aus DMS-Daten
$\nu(\sigma_a)$	Querdehnzahl des Betons, Ermittelt bei σ_a

Tabelle 17: Mechanische Eigenschaften der umschnürten Betonzylinder (28 Tage) aus Jonas und Knippers (2017)

	f_{ccu}	ϵ_{c1_axial} (WA)	ϵ_{c1_axial} (DMS)	ϵ_{c1_quer} (DMS)	$f_{ccu}/f_{c,cyl}$
	N/mm ²	mm/m	mm/m	mm/m	-
B1	-65,3	-8,61	-7,90	7,51	1,25
B2	-78,5	-11,62	-10,93	6,89	1,51
B3	-89,0	-14,98	-13,59	7,77	1,71
W	-84,8	-10,14	-9,46	4,37	1,63

f_{ccu} Maximale aufnehmbare Druckspannung
Weitere Parameter s. Tabelle 17.

Typisch für das Versagen der umschnürten Betonzylinder ist ein schlagartiges Aufreißen der Umschnürung, das akustisch in Form eines lauten Knalls wahrzunehmen ist. Der Riss in der Umschnürung tritt bei allen Proben stets in vertikaler Richtung auf (Bild 102). Bei manchen Proben verläuft er überwiegend vertikal und abschnittsweise schräg. Bei den Proben mit gewickelten Umschnürungen verläuft der Riss nicht immer bis zu beiden Rändern (Bild 102, rechts, Probe W3).

Die verbleibenden Betonbruchstücke ähneln tendenziell zwei Kegeln, die mit einer stumpfen Spitze aufeinander stehen und von weiteren ringförmig angeordneten, länglichen Betonbruchstücken umgeben sind.



Bild 102:
VR1: Probe B2 und Probe W3 nach dem Belastungsversuch mit aufge-rissenen Umschnürungen

In Bild 103 sind die Spannungsdehnungslinien der Referenzproben und der umschnürten Betonzylinder dargestellt.

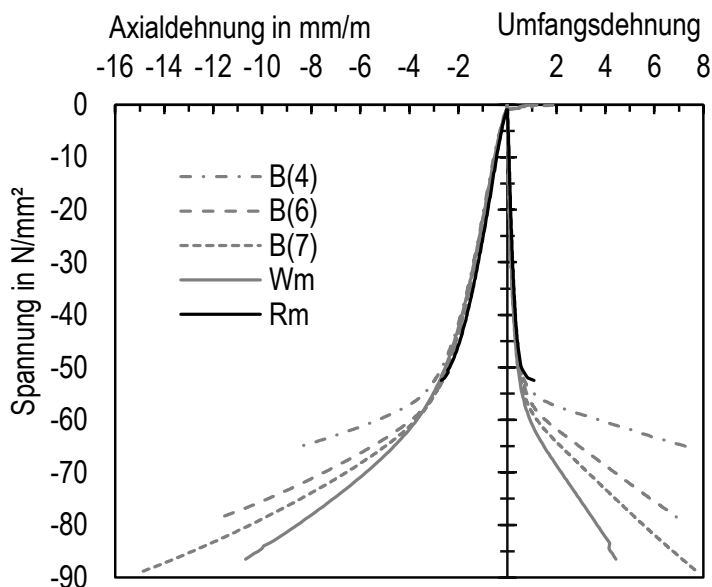


Bild 103: Experimentell ermittelte Spannungsdehnungslinien von Betonzylindern (Rm: Referenzbetonzylinder, Mittelwert von $n = 3$) und umschnürten Betonzylindern (B: geflochtene Hülle, in Klammern die Lagenanzahl, Wm: gewickelte Umschnürung, Mittelwert von $n = 3$)

Beide Arten der Umschnürung steigern die Drucktragfähigkeit sowie die Bruchdehnungen in axialer und Umfangsrich-

tung. Die gewickelten Umschnürungen steigern die Tragfähigkeit bezogen auf die Referenzdruckfestigkeit um das 1,6-Fache. Die geflochtenen Umschnürungen steigern die Tragfähigkeit mit zunehmender Lagenanzahl bis über den Wert der gewickelten hinaus (Bild 103, Tabelle 17). Die Proben mit gewickeltem Rohr weisen geringere Bruchdehnungen in axialer und Umfangsrichtung auf als die mit sechs und sieben Geflechtlagen hergestellten Rohre.

Die Effizienz der gewickelten Umschnürungen ist höher als die der geflochtenen.

Die gewickelten Proben wurden mit einem Flächengewicht des CF-EP-Materials hergestellt, das deutlich unter dem aller geflochtenen Proben liegt (Tabelle 14). Ebenso ist der Faservolumengehalt prozessbedingt niedriger als bei den geflochtenen Umschnürungen. Im Vergleich zu den Faserflächengewichten (Tabelle 14) liegt die gewickelte Umschnürung zwischen der vier- und sechslagigen geflochtenen Umschnürung, obwohl die Tragfähigkeit im Bereich zwischen der sechs- und siebenlagigen Hülle liegt. Bezogen auf das Flächengewicht der gewickelten Umschnürung wurde bei den Geflechtrohren circa das 1,5-Fache an Carbonfasern verwendet, um die gleiche Tragfähigkeitssteigerung zu erreichen.

Diskussion

Die ermittelten Eigenschaften des Festbetons (Tabelle 16) stimmen mit den analytisch nach EC2 ermittelten Werten der Spannungsdehnungslinie gut überein (Jonas und Knippers 2017). Dies schließt methodische Fehler der experimentellen Durchführung nicht aus, fördert jedoch das Vertrauen in die ermittelten Ergebnisse.

Durch die industrielle Fertigung der Wickelrohre sind sie sehr maßhaltig. Die Flechtröhre entsprechen in zwei Aspekten nicht exakt der Kreisringgeometrie: Zum einen stellt sich wegen des tendenziell nachgiebigen Kunststoffes der Innenschalung und der Dreiteilung durch den prozessbedingten Unterdruck eine Deformation des Kreisringquerschnitts ein. Zum anderen werden trotz des Versuchs, die Flechtschläuche möglichst straff auf die Schalung zu ziehen, durch die unterdruckinduzierte Kompaktierung der bis zu sieben Textilschichten überwiegend in Längsrichtung mehrere wellige Materialballungen aufgeworfen, die zu einer nicht gänzlich über den Umfang verteilten, konstanten Wanddicke führen. Es wird vermutet, dass die querdruckempfindlichen Carbonfaserlagen durch die Umlenkkräfte, die in diesen verdickten Bereichen auftreten, geringere Festigkeiten aufweisen können.

Fazit

Die experimentellen Versuche zeigen, dass eine Steigerung der Drucktragfähigkeit gegenüber der einaxialen Festigkeit des Betons durch eine Umschnürung nicht nur mit Wickelrohren (Faktor 1,6), sondern auch mit biaxialen Geflechtrohren (Faktor 1,7) möglich ist. Das heißt, auch Geflechtrohre bieten eine wirksame Umschnürungssteifigkeit. Sie benötigen wegen der geringeren Steifigkeit im Vergleich zum Wickelrohr jedoch größere Wanddicken. Die erzielte Steigerung der Tragfähigkeit liegt im Bereich der mit Wickelrohren erreichbaren Werte und kann über die Lagenanzahl variiert werden. Die Werte der erzielbaren Bruchdehnungen liegen vergleichsweise höher.

6.6. Beton-CF-GF-EP-Geflechthrore (triaxial): Druck-, Biegeversuche

Untersucht werden neun zylinderförmige Hybrid-Bauteile mit einer Umschnürung aus CF-GF-EP und einem Kern aus Beton in Druck- und Biegeversuchen sowie drei Betonreferenzproben (Tabelle 18).

Tabelle 18: Versuchsreihe 2, Übersicht der Prüfungen

Serie	Belastungsart	Anzahl	Faserlagen	Faserwinkel °
D_CG_Ref	Druck	3	0	-
D_CG_2	Druck	3	2	70
D_CG_4	Druck	3	4	70
B_CG_30	Biegung	1	2	30
B_CG_45	Biegung	1	2	45
B_CG_70	Biegung	1	2	70

insgesamt: 9 Druckprüfungen, 3 Biegeprüfungen

Untersucht werden die mechanischen Eigenschaften der Umschnürung aus triaxialem Geflecht (Bild 104) mit Carbonrovings in Längsrichtung und Glasrovings in Flechtrichtung. Hierzu werden 50 Flachproben im Zugversuch sowie 10 Ringzugproben im „split disc test“ (Bild 98) geprüft (Tabelle 19).

Tabelle 19: Versuchsreihe 2, CF-GF-EP-Betonzylinder, FKV-Prüfungen

Serie	Test	Anzahl	Prüfrichtung	Faserwinkel °
D_CG_2	DIN ISO 527 split disc	5 + 5 2	Axial + Transversal Umfangsrichtung	70
D_CG_4	DIN ISO 527 split disc	5 + 5 2	Axial + Transversal Umfangsrichtung	70
B_CG_30	DIN ISO 527 split disc	5 + 5 2	Axial + Transversal Umfangsrichtung	30
B_CG_45	DIN ISO 527 split disc	5 + 5 2	Axial + Transversal Umfangsrichtung	45
B_CG_70	DIN ISO 527 split disc	5 + 5 2	Axial + Transversal Umfangsrichtung	70

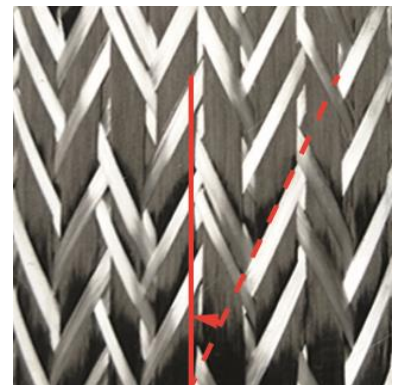
Anmerkung: Probendicke abweichend zu DIN ISO 527.

insgesamt: 50 Flachproben, 10 Ringe

6.6.1. Herstellung

Für die Druckprüfung werden neun zylindrische Probekörper hergestellt, drei für die Biegeprüfung. Das Verhältnis der Druckprüfkörper von Höhe zu Durchmesser entspricht 2:1 ($h = 320 \text{ mm}$, $d_c = 160 \text{ mm}$ bzw. Referenzproben $h = 300 \text{ mm}$, $d_c = 150 \text{ mm}$). Die Biegeprüfkörper sind bei gleichem Durchmesser länger ($h = 1100 \text{ mm}$, $d_c = 160 \text{ mm}$). Alle Probekörper außer den Referenzprüfkörpern bestehen aus einer Hülle aus faserverstärktem Kunststoff mit triaxialem Geflecht aus Carbonrovings in Längsrichtung und Glasrovings in Flechtrichtung.

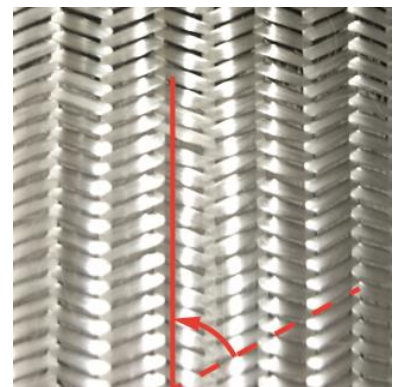
Die Druckprobekörper liegen in drei Konfigurationen vor: ohne Umschnürung (Referenzproben) und mit Umschnürung bestehend aus FKV mit zwei oder vier Lagen geflochtenem Textil. Bei den drei Biegeproben mit jeweils zwei Lagen werden die Flechtwinkel variiert.



$\alpha_F = 30^\circ$



$\alpha_F = 45^\circ$



$\alpha_F = 70^\circ$

Bild 104: Details triaxialer Geflechte mit Stehfäden aus Carbonfasern und Flecht-fäden aus Glasfasern in unterschiedlichen Flechtwinkeln

Die Fertigung der FKV-Rohre erfolgt im Labor der DITF Denkendorf. Fünf CF-GF-EP-Rohre werden hergestellt, zwei für die Hüllen des Druckversuchs und drei für die Hüllen des Biegeversuchs. Die Probekörper für die Herstellung der Hybrid-Bauteile sowie die Probekörper zur Bestimmung der Materialeigenschaften des FKV werden jeweils aus dem gleichen Rohr entnommen (Bild 105). Begleitend zu den Rohren werden fünf FKV-Platten im Vakuuminfusionsverfahren zur Herstellung von Flachproben mit möglichst ähnlichem Verfahren gefertigt, deren Geflecht vor der Infusion des Rohrs abgewickelt wird.

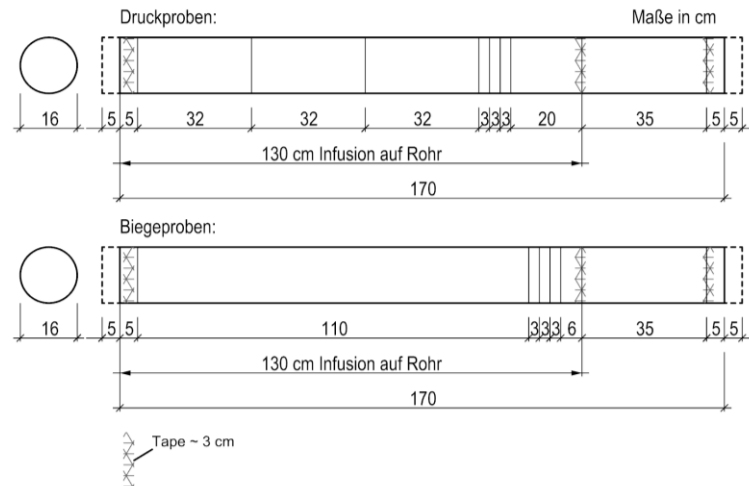


Bild 105: Belegung und Schnittmuster hergestellter FKV-Rohre, Maße in cm

Die Flechtschläuche der CF-GF-EP-Rohre (Bild 106) bestehen aus Carbonrovings in Längsrichtung (48 K, 3200 tex, $E = 250$ GPa, $f_u = 4300$ MPa, $\epsilon_u = 1,7$ %, $\rho = 1,77$ g/cm³, aus Datenblatt) und E-Glasfasern (600 tex, $E = 76$ GPa, $f_u = 1598$ MPa, $\epsilon_u = 2,1$ %, $\rho = 2,64$ g/cm³, aus Datenblatt).

Als Flechkern wird ein dreifach längsgeschlitztes Rohr aus PVC (Polyvinylchlorid) eingesetzt und von einer Radialflechtmaschine mit 144 Flechtfäden und 72 Stehfäden beflochten. Durch die Teilung der innenliegenden Form kann sie nach Aushärten des Bauteils wieder entnommen werden. Zur Herstellung der FKV-Rohre wird die Methode der Vakuuminfusion angewandt (vgl. Kapitel 5.3.3). Dadurch kann im Vergleich zur Handlamination ein erhöhter Faservolumengehalt mit besserer Benetzung der Fasern erzielt werden.

In dieser Versuchsreihe wird Epoxidharz, gemischt in einem Verhältnis von Harz zu Härter von 100 : 28, verwendet ($E = 3,1$ GPa, $f_u = 70$ MPa, $\epsilon_u = 7 - 10$ %, $\rho = 1,15$ g/cm³, aus Datenblatt). Nach Abschluss der Vakuuminfusion werden die FKV-Bauteile 6 h bei einer Temperatur von 70 °C getempert. Nach dem Entformen werden die Rohre sowie die Ringproben trennschleifend mittels eines Nassschneiders abgeschnitten. Die parallel produzierten FKV-Platten werden zu Probekörpern für die Zugprüfung zugeschnitten. Alle neun verwendeten Umschnürungen sowie Details der innenliegenden Oberfläche der FKV-Struktur zeigt Bild 106. Zur Betonage werden die Rohre an einem Ende mit einer Schalung verschlossen.

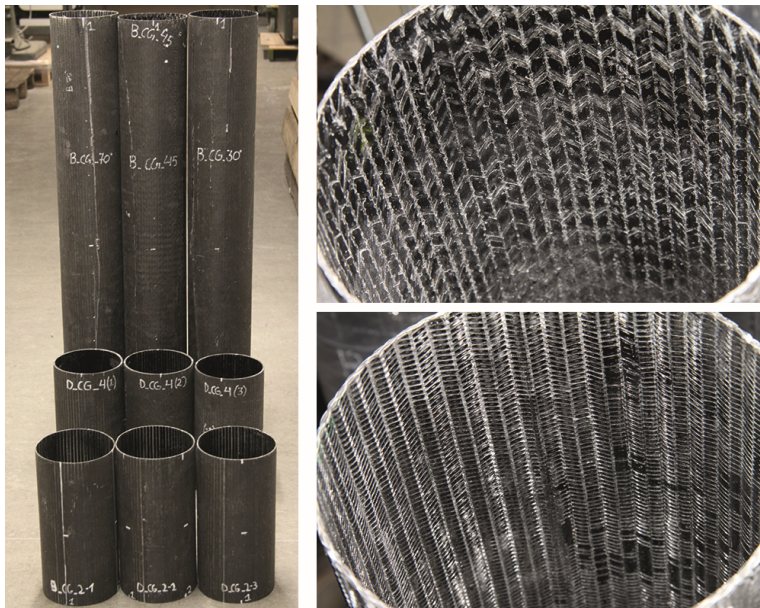


Bild 106: Hergestellte FKV-Rohre, links; Details der innenliegenden Struktur: Flechtwinkel 30°, rechts oben; Flechtwinkel 70°, rechts unten

Die Probekörper werden mit Beton der Festigkeitsklasse C50/60 mit 8 mm Größtkorn befüllt. Hierzu wird in einem Transportbetonwerk 2 m³ Beton hergestellt und in einen gereinigten Fahrmischer gegeben. Das Ausbreitmaß des Betons nach DIN EN 12350-5 beträgt 64 cm. Die Konsistenz nach DIN EN 206 ist „sehr fließfähig“. Der Beton wird mit einer Handschaufel eingebracht und das Bauteil für wenige Sekunden auf einem Tisch gerüttelt.

Nach der Betonage werden die Proben wie folgt behandelt:

- Tag 1: Ausschalen und Transport zum Prüfort
- Tag 1 – 7: Lagerung im Wasserbad
- Tag 7 – 21: Lagerung im Feuchtraum
- ab Tag 21: Lagerung bei Raumbedingungen, Planschleifen, Anbringen der Dehnmessstreifen
- Tag 28: Druckprüfung
- Tag 29: Biegeprüfung

Die Diagonalen der Einheitszellen der triaxialen Geflechte, gemessen an mehreren Stellen pro Rohr, betragen hier im Mittel für die Textilien mit 30° Flechtwinkel 22 mm und 35 mm, mit 45° Flechtwinkel 20 mm und 20 mm sowie bei 70° Flechtwinkel 25 mm und 10 mm.

Laut Kwan et al. (2015) ist für eine einaxiale Betonfestigkeit von $f_c = 65 \text{ N/mm}^2$ eine Mindestumschnürungssteifigkeit von circa 600 N/mm^2 erforderlich, um ein Wirksamkeitsniveau von k_1 (s. Kapitel 6.3), eine monoton ansteigende Spannungsdehnungslinie, zu erreichen. Für das Niveau k_2 ist demnach eine Umschnürungssteifigkeit von circa 300 N/mm^2 notwendig. Die Lamine der Proben werden ausgelegt, um diese Anforderungen hinsichtlich der theoretisch erforderlichen Umschnürungssteifigkeit zu erfüllen. Im Mittel erzielen die Prüfkörper mit zweilagigem Geflecht eine Umschnürungssteifigkeit von 323 N/mm^2 und die mit vierlagiger Hülle 586 N/mm^2 , letztere liegen etwas unterhalb des erforderlichen Wertes (Tabelle 20).

Tabelle 20: Eigenschaften der Druckprobekörper mit triaxial geflochtenen CF-GF-EP-Umschnürungen

Probe	Lagen	α	t	d_A	h	$E_{fkv,y}$	K
	-	°	mm	mm	mm	GPa	MPa
D_CG_2 (1)	2	70	2,1	161,2	324,6	11,9	318
D_CG_2 (2)	2	70	2,2	161,5	325,6	11,9	333
D_CG_2 (3)	2	70	2,1	161,1	323,6	11,9	319
D_CG_4 (1)	4	70	3,8	165,1	324,7	11,9	574
D_CG_4 (2)	4	70	3,9	164,8	323,1	11,9	591
D_CG_4 (3)	4	70	3,9	164,7	314,6	11,9	592

 α_F Flechtwinkel

t Wanddicke

 d_A Außendurchmesser

h Probenhöhe

 $E_{fkv,y}$ E-modul des Laminats in Umfangsrichtung, berechnet

K Umschnürungssteifigkeit, berechnet

6.6.2. Versuchsaufbau Flachprobenprüfung

Die Zugprüfung nach DIN EN ISO 527-1 (Probekörpertyp 3 mit Aufleimern aus GF-EP-Laminat) wird für die Ermittlung der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung und des Elastizitätsmoduls der FKV angewandt, wobei die Dickenabmessung als Resultat des unterschiedlichen Lagenaufbaus abweicht. In Summe wurden 50 Flachproben getestet, je fünf Proben in axialer und fünf in transversaler Richtung für jedes der fünf Rohre unterschiedlicher Faseranordnung.

6.6.3. Versuchsaufbau „split disc test“

Der Versuchsaufbau entspricht, bis auf die folgenden Abweichungen, dem in Kapitel 6.5.2 beschriebenen. Der Durchmesser der Halbschalen ist $d_s = 156$ mm (Bild 98). Der Abstand der Halbschalen zueinander beträgt 2 mm. Außerdem wird in dieser Versuchsreihe eine Folie aus Polytetrafluorethylen (PTFE) verwendet, die besser reproduzierbare Lagerungsbedingungen schafft, um die Reibung zwischen Probe und Versuchsstand zu verringern.

Auch hier wird der Elastizitätsmodul als Mittelwert der Steigung der Spannungsdehnungslinie des Belastungs- und Entlastungspfads bestimmt, um die Reibungseffekte zu kompensieren (Bild 100). In Summe werden 10 Proben getestet. Je zwei Ringe mit einer Breite von 30 mm werden aus jedem der fünf hergestellten Rohre entnommen.

6.6.4. Ergebnisse der Materialprüfung FKV

Die erhaltenen Ergebnisse der Zugprüfung an Flachproben sind in Tabelle 21 als Mittelwerte von je fünf Proben gelistet.

Tabelle 21: Experimentell an Flachproben (je n = 5) bestimmte Materialeigenschaften der CF-GF-EP-Verbunde basierend auf triaxial geflochtenem Textil

S.	B30_2							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	824,0	11,82	64,67	0,37	29,2	4,57	6,29	0,05
s	104,1	1,47	8,25	0,07	2,5	0,58	0,63	0,01
v	0,13	0,12	0,13	0,18	0,08	0,13	0,10	0,13

S.	B45_2							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{t,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	765,2	13,28	52,65	0,45	45,5	11,16	6,60	0,06
s	38,8	0,74	2,64	0,03	2,6	3,40	0,34	0,01
v	0,05	0,06	0,05	0,07	0,06	0,30	0,05	0,15

S.	B70_2							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	754,2	15,09	46,42	0,23	182,7	27,37	11,76	0,07
s	20,0	0,46	1,26	0,02	5,5	1,99	0,47	0,01
v	0,03	0,03	0,03	0,10	0,03	0,07	0,04	0,12

S.	D70_2							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	764,8	14,10	51,33	0,22	215,3	23,15	13,65	0,05
s	110,0	1,75	2,06	0,03	10,7	2,21	0,69	0,00
v	0,14	0,12	0,04	0,15	0,05	0,10	0,05	0,08

S.	D70_4							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	-	-	-	-	212,6	24,58	14,07	0,08
s	-	-	-	-	8,2	1,55	1,01	0,01
v	-	-	-	-	0,04	0,06	0,07	0,12

S. Serie

$f_{ten,x}$ Zugfestigkeit, analog für die transversale Richtung

$\epsilon_{ten,x}$ Bruchdehnung

E_x Elastizitätsmodul in x-Richtung (axial)

ν_{xy} Querkontraktionszahl (x-Ri.: Kraft, y-Ri.: Querdehnung)

\bar{x} Mittelwert, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

s Standardabweichung (Stichproben), $s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$

v Variationskoeffizient, $v = \frac{s}{\bar{x}}$

Die Spannungsdehnungslinien (nicht dargestellt) verlaufen annähernd linear-elastisch. Die Graphen mancher Proben weisen ein „Knie“ (Puck 1965), einen Bereich veränderlicher Krümmung im Übergangsbereich zweier näherungsweise linearer Abschnitte der Spannungsdehnungslinie auf. Dieser Steifigkeitsabfall wird durch voranschreitende Matrixschädigung (Risse) veranlasst, einhergehend mit Zwischenfaserbrüchen. Die Höchstkraft wird bei Faserbruch erreicht.

Die Zugfestigkeit in axialer Richtung, in der die Stehfäden aus Carbon angeordnet sind, ist deutlich größer als in transversaler Richtung. Bei den Proben mit einem Flechtwinkel von 70° beträgt die Zugfestigkeit in dieser Richtung das circa Vierfache des Wertes in transversaler Richtung. Bei den axial belasteten Proben verringert sich mit zunehmendem Faserwinkel der Wert der Zugfestigkeit und des Elastizitätsmoduls, der Wert der Bruchdehnung steigt. Bei den transversal belasteten Proben erhöhen sich mit zunehmendem Faserwinkel die Werte der Zugfestigkeit, der Bruchdehnung sowie des Elastizitätsmoduls.

Die Querkontraktionszahlen in axialer Richtung sind deutlich größer als diejenigen der Querrichtung und liegen stets unter 0,5. Bei den transversalen Proben werden Werte der Querkontraktionszahlen zwischen 0,05 und 0,08 festgestellt. Die ermittelten Eigenschaften der Proben mit gleichem Faserwinkel, betreffend B70_2, D70_2 und D70_4, liegen in einem ähnlichen Bereich.

Die Ergebnisse der Zugprüfung an Ringproben im „split disc test“ zeigt Tabelle 22 als Mittelwerte von je zwei Proben.

Tabelle 22: Experimentell an Ringproben im Zugversuch bestimmte Materialeigenschaften der CF-GF-EP-Verbunde basierend auf dreiflechtigem Textil

Serie	Transversal		
	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y
	MPa	mm/m	GPa
B30_2	11,6	2,9	3,3
B45_2	55,1	6,3	9,7
B70_2	202,1	15,9	15,6
D70_2	198,9	17,8	13,1
D70_4	246,8	17,0	15,8

$f_{ten,y}$ Zugfestigkeit

$\epsilon_{ten,y}$ Dehnungswert, grafisch ermittelt

E_y Elastizitätsmodul in y-Richtung (transversal)

Die Spannungsdehnungslinien im Ringzugversuch (nicht dargestellt) weisen häufig nicht vollständig klassisch linear-elastische Verläufe auf, wie sie im Zugversuch üblich sind, sondern nur im überwiegenden Teil, der in der Mitte eines unregelmäßigen Anfangs- und Endbereichs liegt. Vielmehr stellt sich ein linear-elastischer Bereich häufig erst nach Aufbringen einer Vorkraft von bis zu einem Zehntel, in einem Fall bis zu einem Achtel, der maximal aufnehmbaren Kraft ein.

Im Bereich zwischen der Zugfestigkeit und eines Wertes, der $1/20$ darunterliegt, tritt häufig ein Steigungsabfall der Spannungsdehnungslinie auf, die im folgenden Verlauf große Dehnungen bei kleiner Laststeigerung aufweist, bis sie nahezu horizontal bis zum Bruch ausläuft. Wird die Bruchdehnung in diesen Fällen aus dem maximalen Dehnungswert ermittelt, werden wegen des beschriebenen horizontalen Auslaufens der Spannungsdehnungslinie im Vergleich zu den Zugproben keine plausiblen Werte erhalten. Stattdessen wird zur Auswertung eines kennzeichnenden Dehnungswertes die Spannungsdehnungslinie zunächst in den Ursprung verschoben, indem durch lineare Extrapolation des Anfangsbereichs ein entsprechender Versatz bestimmt wird. Als kennzeichnender Wert der Dehnung wird derjenige Wert in Tabelle 22 angeführt, der durch den Schnittpunkt zweier Tangenten an die Spannungsdehnungslinie nahe des Bereichs des Steigungsabfalls und der Maximalkraft auftritt.

Eine Tangente wird am oberen, näherungsweise linear-elastischen Bereich der Spannungsdehnungslinie angelegt, die zweite am nahezu horizontal verlaufenden Bereich. Für die Proben D70_2(1), D70_2(2), D70_4(2), B30_2(1) und B30_2(2) ist dies nicht notwendig, da die Spannungsdehnungslinien übliche linear-elastische Verläufe aufweisen und die jeweiligen DMS beim Kraftmaximum versagen, wodurch der Maximalwert der Bruchdehnung klar markiert ist. Festzustellen ist, dass die Dehnungswerte für D70_4(1) und D70_4(2) zu nahezu dem gleichen Ergebnis führen, obwohl sie nach den beschriebenen unterschiedlichen Verfahren ermittelt wurden.

Die Zugfestigkeit der Ringe in transversaler Richtung nimmt mit Erhöhung des Flechtwinkels tendenziell zu, ebenso die Bruchdehnung sowie der Elastizitätsmodul. Obwohl die letzten drei angeführten Werte den gleichen Faserwinkel aufweisen, betragen die Unterschiede bis zu circa 48 N/mm², 2,0 mm/m und 2,7 GPa. Gerade die Abweichung beim Wert der Festigkeit ist durch den wenig variierenden Faservolumengehalt nicht zu begründen.

Die Serien, die mit den unterschiedlichen Prüfmethoden untersucht werden, werden möglichst ähnlich hergestellt; so wird das Geflecht vom gleichen Rohr entnommen, das in einem Schuss überflochten wird. Die Herstellung von Platten und Ringen macht jedoch den Aufbau verschiedener Vakuuminfusionen notwendig. Dadurch unterscheiden sich die Faservolumenanteile der hergestellten Probekörper der Serien. Tabelle 23 listet neben dem Faserwinkel, der nur kleine Abweichungen zwischen den 70° Serien aufweist, auch die Faservolumenanteile, die durch Kalzinierung ((DIN ISO 1172) an je zwei circa 4 cm² großen Stücken pro Platte bzw. pro Ring der transversalen Serien durchgeführt werden. Insgesamt werden 20 FKV-Stücke beprobt. Während der Faservolumenanteil der Flachproben für die Biegeprüfung bei circa 35 % und für die Druckprüfung bis zu 46 % beträgt, liegt er bei den Ringen deutlich höher bei mindestens 44 % und bis zu 53 %. Umso größer der Faservolumenanteil (Gl. 13), umso größer der Faseranteil des FKV und umso größer der erwartete Elastizitätsmodul.

Die Ergebnisse beider Methoden zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften wie die Zugfestigkeit, die Bruchdehnung und der Elastizitätsmodul mit Erhöhung des Faserwinkels steigen. Die Serien mit einem Soll-Faserwinkel von 70° sind B70_2, D70_2 und D70_4. Die Ergebnisse der Serien D70_2 und D70_4 zeigen im Zugversuch an Flachproben ähnliche Werte, obwohl die Dicke und Lagenanzahl unterschiedlich ist (Tabelle 21). Dies gilt auch für die Probe B70_2, die jedoch einen relativ größeren Unterschied aufweist. Im Ringzugversuch liegen die Ergebnisse der Serien B70_2 und D70_4 in einem ähnlichen Bereich, die der Serie D70_2 weichen ab (Tabelle 22).

Die Festigkeiten, die an Ringzugproben festgestellt werden, betragen das 0,92- bis 1,22-Fache der an Flachproben ermittelten (Tabelle 23).

Aus der weiteren Betrachtung ausgenommen ist die Serie BCG_30, deren Werte deutlich abweichen. Diese Diskrepanz ist vermutlich auf eine nicht durchgehende und nicht gleichmäßige Harzverteilung zurückzuführen, denn bereits die Zugfestigkeit des Harzes liegt laut Datenblatt mit 70 N/mm² deutlich höher als die ermittelte Festigkeit.

Das Massenverhältnis (C : G) der Carbon- und Glasfasern ist abhängig vom Flechtwinkel und beträgt für die Proben 72 : 28 bei 30°, 67 : 33 bei 45° und 50 : 50 bei 70°.

Tabelle 23: Faserwinkel und Faservolumenanteile (φ_f) der Flach- und Ringzugproben im Vergleich

Probe	α_f	$\varphi_{f,Flachpr.}$	$\varphi_{f,Ringpr.}$	$\varphi_{f,Faktor}$	$f_{ten,y,Faktor}$
	°	%	%	-	-
B30_2	28	35,3	48,8	1,38	(0,40)
B45_2	45	33,5	44,3	1,32	1,22
B70_2	69	34,5	51,5	1,49	1,10
D70_2	71	46,0	49,8	1,08	0,92
D70_4	70	41,5	53,2	1,28	1,16

Interpretation

Die im „split disc test“ ermittelten Festigkeiten sollen geringer sein als die an Flachproben ermittelten Werte, denn die radialen Pressungen führen zu einer kombinierten Beanspruchung, für die der Widerstand geringer ist als für eine reine Zugbeanspruchung. Dies trifft für die Serie D70_2 zu (198,9 N/mm² zu 215,9 N/mm²), jedoch nicht für die anderen.

Der Faservolumenanteil der Ringproben jeder Serie ist höher als der der Flachproben. Während der Unterschied des Faservolumenanteils zwischen Flach- und Ringproben der Serie D70_2 mit 4 % gering ist, liegt er bei anderen Arten bei 10 % und größer. Tendenziell zeigen sich höhere Festigkeiten der Ringzugproben, außer für die Serie D70_2. Für alle Proben, die höhere Festigkeiten (> Faktor 1,1) zeigen, liegt auch der Faservolumenanteil höher (> Faktor 1,28). Bei der Serie B70_2, der einzigen, bei der die Festigkeit im Ringzugversuch geringer ausfällt, ist der Faktor des Faservolumenanteils deutlich kleiner als bei den anderen drei Serien (1,08). Es wird vermutet, dass der Effekt der kombinierten Beanspruchung vom höheren Faservolumenanteil dominiert wird.

Die ermittelten Elastizitätsmodule der Serien B70_2 und D70_4 zeigen für die Ringzugproben mit deutlich höheren Faservolumenanteilen erwartungsgemäß höhere Werte, für die Probe mit wenig unterschiedlichem Faservolumenanteil D70_2 zeigt sich ein ähnlicher, geringfügig höherer Wert.

Diskussion

Die Versuchsdurchführung für die Ringzugproben ist verglichen mit den Versuchen an Flachproben aufwendiger. Für jeden Durchmesser sind Halbschalen mit entsprechendem Radius herzustellen. Es finden sich zwar adaptive Prüfstände (ASTM D2290), die im Durchmesser angepasst werden können, jedoch ist wegen der nicht gleichmäßigen Auflage eine Auswertung von weiteren Parametern als der Festigkeit nur bedingt möglich. Für eine Eigenüberwachung einer Produktion scheinen sie sinnvoll. Zudem kann bei Flachproben auf das Kleben von DMS in Längsrichtung verzichtet werden und zur Verringerung des Aufwands der Probenvorbereitung stattdessen auf einen Extensometer zurückgegriffen werden.

Bei den Flachproben werden statistisch auswertbare Serien mit je fünf Proben getestet. Für signifikante Aussagen, die Unterschiede der beiden Prüfmethode betreffend, ist eine größere Anzahl als zwei Ringzugproben zu prüfen. Deshalb stellen die ermittelten Werte lediglich Anhaltswerte dar.

Vermutlich ist der unregelmäßige Anfangsbereich der Spannungsdehnungslinie im Ringzugversuch auf Dehnungen zurückzuführen, die aus Biegespannungen induziert durch Abstände zwischen nicht exakt formschlüssigen Proben und Prüfbauteilen hervorgerufen werden. Während des Versuchs nimmt die Ringzugkraft zu und die Proben legen sich vermutlich formschlüssig an.

6.6.5. Versuchsanordnung der Druck- und Biegeversuche

Druckversuch

Der Versuch wird analog zu den Druckversuchen der ersten Versuchsreihe ($d_{c,soll} = 160 \text{ mm}$, $d_s = 150 \text{ mm}$, $t = 20 \text{ mm}$) aufgebaut (vgl. Kapitel 6.5.3, Bild 101). Im quasi-statischen Druckversuch werden neun Proben weggesteuert und mit einer Verschiebung von $0,5 \text{ mm/min}$ belastet.

Vier Dehnmessstreifen werden in Probenmitte auf der Oberfläche der FKV-Umschnürung angebracht, wovon je zwei diametral gegenüber in Längsrichtung sowie zwei in Querrichtung angebracht werden. Zwei zusätzliche Wegaufnehmer ermitteln die Längsdehnungen.

Biegeversuch

Das Ziel der Vier-Punkt-Biegeprüfung ist es, die Biegetragfähigkeit der betongefüllten FKV-Rohre basierend auf triaxialem Geflecht zu ermitteln (Bild 107). Drei Probekörper mit unterschiedlichen Flechtwinkeln (30° , 45° , 70°) werden geprüft.

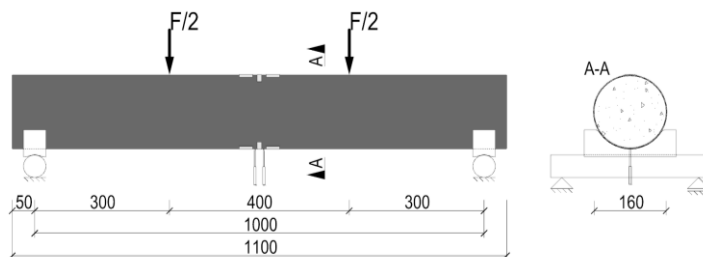


Bild 107: Versuchsaufbau Vier-Punkt-Biegeprüfung

Der Auflagerabstand der Probekörper ($l = 1100 \text{ mm}$) beträgt 1000 mm . Die Lasteinleitung erfolgt 300 mm vom Auflager nach innen versetzt. Die U-förmigen Auflagerbänke mit einer Länge von 50 mm weisen einen Durchmesser von 165 mm auf, der etwas größer ist als der Durchmesser der FKV-Betonprobekörper. Die Auflagerbänke werden zur gelenkigen Lagerung auf Stahlzylinder gelegt. Sechs Dehnmessstreifen werden pro Prüfling möglichst mittig angebracht: Drei an der Oberseite und drei an der Unterseite, davon auf jeder Seite zwei in axialer Richtung mit einem Abstand von 50 mm und einer in der Mitte in Querrichtung entlang des Umfangs. Die Belastungsgeschwindigkeit beträgt 1 mm/m . Die Durchbiegung wird in der Mitte der Proben an der Unterseite mit zwei Wegaufnehmern gemessen.

6.6.6. Ergebnisse der Druck- und Biegeversuche

Betoneigenschaften

Drei zylinderförmige Probekörper werden im Druckversuch in Anlehnung an DIN EN 12390-3 nach der Ermittlung des stabilisierten Elastizitätsmoduls nach DIN EN 12390-13

geprüft. Die gemittelten Werte der Ergebnisse der Druckversuche der Betonproben enthält Tabelle 24.

Tabelle 24: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28 Tage)

n=3	ρ_c	f_{cten}	$f_{c,cyl}$	$E_{c,S}$	$\epsilon_{c1_axial(WA)}$	$\epsilon_{cu_axial(WA)}$	$\nu(\sigma_a)$
	t/m ³	N/mm ²	N/mm ²	GPA	mm/m	mm/m	-
\bar{x}	2,34	11,2	-66,3	35,3	-3,05	-3,61	0,22
s	0,02	0,3	1,3	0,8	0,10	0,33	0,01
v	0,01	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05

f_{cten} Mittlere Betonzugfestigkeit nach DIN EN 12390-5
 $f_{c,cyl}$ Mittlere einaxiale Zylinderdruckfestigkeit
 $E_{c,S}$ Elastizitätsmodul des Betons (Sekantenmodul)
 $\epsilon_{c1_axial(WA)}$ Betondehnung bei f_c , Mittelwert aus WA-Daten
 $\epsilon_{cu_axial(WA)}$ Betondehnung bei Bruch, Mittelwert aus WA-Daten
 $\nu(\sigma_a)$ Querdehnzahl des Betons, ermittelt bei σ_a

Die Querdehnzahl wird auf Basis der Dehnung zugehörig zum oberen Spannungswert des Tests zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls berechnet. Ein begleitend geprüfter Betonwürfel zeigt eine Festigkeit von 73,2 N/mm². Das Schwinden wird mittels einer Schwindrinne bei Raumkonditionen bis zum 28. Tag gemessen und erreicht Werte zwischen -0,2 mm/m und -0,3 mm/m.

Druckversuche

Das Hauptziel der Durchführung der Druckversuche ist die Untersuchung des Tragverhaltens und des Umschnürungseffekts der FKV-Betonproben mit unterschiedlichen Wanddicken. Die triaxial geflochtenen FKV-Umschnürungen werden mit Glasfasern in einem Flechtwinkel von 70°, bezogen auf die axiale Richtung, und Stehfäden aus Carbonfasern mit 0° hergestellt. Jeweils drei Proben mit zwei unterschiedlichen Konfigurationen der Umschnürung mit zwei und vier Lagen werden beprobt.

Bild 108 und Bild 109 zeigen die Probekörper nach dem Bruch. Charakteristisch für das Versagen aller Druckproben mit Umschnürung ist ein länglicher Riss der Umschnürung mindestens im Bereich des mittleren Drittels der Bauteilhöhe. Der Riss in der Umschnürung entwickelt sich unter weiterer Belastung zu den äußeren Enden hin.

Überwiegend verlaufen die Risse durch die Glasfasern, parallel zu den Carbonfasern, in manchen Fällen treten diese abschnittsweise auf und sind von schräg verlaufenden Rissen unterbrochen. In den vierlagigen FKV-Proben tritt das Versagen schlagartig, begleitet von einem lauten Knall ein. Bei den zweilagigen ist dies weniger deutlich ausgeprägt.

Die mittlere Druckfestigkeit der Proben mit zwei Lagen liegt mit 65,9 N/mm² nahe des mittleren Wertes der Referenzproben von 66,3 N/mm² (Tabelle 25). Die mittlere Druckfestigkeit der Proben mit vier Lagen ist mit 68,4 N/mm² etwas höher. Die axiale Dehnung der zweilagigen Proben liegt im Bereich der Betonreferenzproben, die der vier Lagen deutlich höher. Die Werte für die mittlere maximale Umfangsdehnung sind für die zwei- und vierlagigen Proben ähnlich groß.

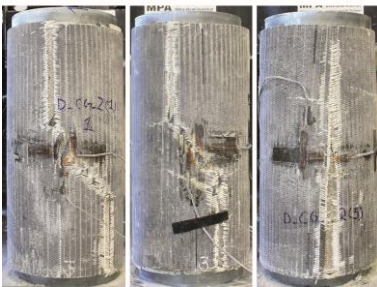


Bild 108:
Versuchsreihe 2: Getestete Proben der Serie C.CG_2: Probe (1), (2) und (3) nach dem Versuch

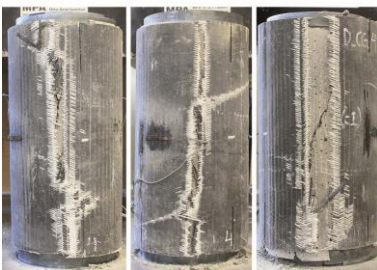


Bild 109:
Versuchsreihe 2: Getestete Proben der Serie C.CG_4: Probe (1), (2) und (3) nach dem Versuch

Tabelle 25: Mechanische Eigenschaften der umschnürten Betonzylinder (28 Tage)

Serie		f_{ccu}	$\epsilon_{c1_quer}(DMS)$	$\epsilon_{c1_axial}(WA)$	$\epsilon_{c1_axial}(DMS)$	f_{ccu}/f_c
		N/mm ²	mm/m	mm/m	mm/m	-
D_CG_2	\bar{x}	-65,9	1,49	-3,60	-0,71	0,99
	s	1,3	0,11	0,06	0,08	-
	v	0,02	0,07	0,02	0,11	-
D_CG_4	\bar{x}	-68,4	1,40	-3,91	-0,35	1,03
	s	0,6	0,24	0,07	0,05	-
	v	0,01	0,17	0,02	0,13	-

Die axialen sowie die transversalen Spannungen und Dehnungen zeigt Bild 110. Die Spannungen werden durch Division der gemessenen Kraft mit der Querschnittsfläche des Betons berechnet. Angegeben sind die Dehnungen in Umfangsrichtung, basierend auf Messdaten zweier DMS, und die Dehnungen in Längsrichtung, ermittelt aus Daten der zwei Wegaufnehmer. Die angegebene Dehnung in Umfangsrichtung wird aus dem Mittel der beiden horizontal angebrachten DMS bestimmt.

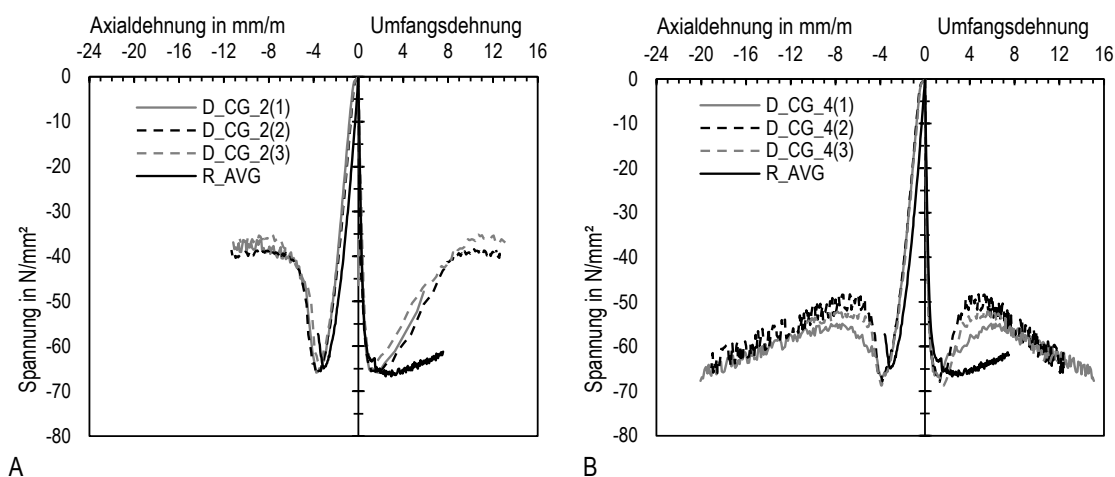


Bild 110: Spannungsdehnungslinien umschnürter C-G-EP-Betonzylinder
A: D_CG_2, B: D_CG_4

Die Spannungsdehnungslinien zeigen, dass weder die Umschnürungen mit zwei noch mit vier Lagen zu einer wesentlichen Erhöhung der Tragfähigkeit führen. Beide Umschnürungstypen erhöhen die Bruchdehnung. Die vierlagige Konfiguration reduziert den Spannungsabfall nach Erreichen des Festigkeitswertes und führt zu einem zweiten Anstieg der Spannungen, die fast ähnlich hoch sind wie die Maximalkraft. Dahingegen zeigen die Proben mit zweilagiger Umschnürung einen kontinuierlichen Abfall der Spannungen nach dem Höchstwert. Beide Umschnürungstypen steigern das Arbeitsvermögen des Bauteils, die vierlagigen mehr als die zweilagigen.

Fazit Druckproben

Die Umschnürungssteifigkeit gemäß dem Modell nach Kwan et al. (2015), die sogar höher liegt, als nach dem Modell von Teng et al. (2009), hat nicht zu der erwarteten Steigerung der Festigkeit geführt. Die Modelle zur Auslegung basieren auf Erfahrungen von Umschnürungen, bei denen der Hauptfaseranteil in Umfangsrichtung orientiert ist. Diese Voraussetzung ist bei den verwendeten FKV, basierend auf geflochtenem

Textil mit Stehfäden aus Carbon und Flechtfäden aus Glas, nicht gegeben. Stattdessen liegen die Flechtfäden in einem Winkel von circa 70° vor. Es wird vermutet, dass nicht nur die Steifigkeit in Umfangsrichtung, sondern auch das Steifigkeitsverhältnis zwischen Umfangsrichtung und axialer Richtung Einfluss auf die Tragfähigkeit hat. Das Steifigkeitsverhältnis ist gegenüber den Umschnürungen, auf denen die Modelle basieren, hier deutlich kleiner.

Die in Druckversuchen ermittelten Spannungsdehnungslinien der Proben mit zwei und vier Lagen zeigen unterschiedliche Verläufe. Erstere zeigen nach Erreichen der Höchstkraft einen Abfall bis zum Bruch. Bei Letzteren steigt die widerstehende Kraft noch bis etwa auf das Niveau der Höchstkraft an, bevor die Proben schlagartig versagen. Statt eines Verlaufs nach k_1 und k_2 (vgl. Kwan et al. 2015) zeigt sich bei den zweilagigen Probekörpern ein Verlauf, der tendenziell einem nicht umschnürten Beton entspricht, und ein Verlauf nach k_1 . Beide Umschnürungen führen zu einer Erhöhung der aufnehmbaren Dehnungen, insbesondere die vierlagigen.

Es wird vermutet, dass eine Erhöhung der Wanddicke über das für die Auslegung nach aktuellen Modellen erforderliche Maß hinaus eine Steigerung der Tragfähigkeit bewirken kann. Empfehlenswert scheint neben höheren Umfangssteifigkeiten auch die Änderung des Steifigkeitsverhältnisses von Quer- zu Längsrichtung durch die Verwendung von Carbonrovings in Flechtrichtung, deren Elastizitätsmodul um ein Vielfaches des von Glasrovings beträgt, sowie ein höheres Flächengewicht in Querrichtung durch Ändern der Fadenanzahl und -feinheit.

Die Stehfäden tragen nicht zur Ausbildung des Umschnürungseffekts bei. Aus Sicht der Tragwirkung in Bezug auf eine effektive Umschnürung kann nicht festgestellt werden, dass die Verwendung dreier Richtungen im Geflecht für zylindrische Druckprobekörper einen Vorteil gegenüber biaxialem Geflecht bietet.

Wie die Versuche an Zylinderproben zeigen, ist das im Hinblick auf die Anwendung in verzweigten Tragknoten mit planmäßiger Biegebeanspruchung gewählte Materialkonzept mit steifen Carbonfasern in axialer Richtung und weniger steifen und festen Glasfasern in transversaler Richtung nicht ausreichend wirksam, um eine Tragfähigkeitssteigerung durch Umschnürung herbeizuführen. Zur Anwendung triaxialer Geflechte in verzweigten Tragknoten ist bei gegebenem erforderlichem Widerstand in axialer Richtung, für das Nebenziel der Tragfähigkeitssteigerung eine größere Umfangssteifigkeit, die zudem ein Vorhaltemaß gegenüber den mit Modellen zur Auslegung ermittelten Werten aufweisen, notwendig.

Biegeversuch

Limitierend für die Belastungssteigerung der Proben in der Vier-Punkt-Biegeprüfung ist in allen drei Fällen ein Bruch der Hülle. Der Riss in der Hülle tritt stets an der Seite, ungefähr auf der halben Höhe des Querschnitts in Längsrichtung im Bereich der Lasteinleitung, auf und breitet sich zu den äußeren Rändern hin aus (Bild 111). Bevor der Riss durch Separieren und Reißen der Rovings eintritt, verfärbt sich das EP-Harz im entsprechenden Bereich weiß und splittert teilweise ab. Dies ist ein Indiz für Zwischenfaserbrüche, bei denen sich der Brechungsindex des Lichts im Harz durch

schädigungsinduzierte kleine Risse ändert und deshalb milchig erscheint (Schürmann 2007).

Neben dem beschriebenen Riss ist eine Schädigung des FKV in der Druckzone am zur Mitte hin gerichteten Rand der Lasteinleitung festzustellen. Der durch Druck kompaktierte, lokale Schädigungsbereich verläuft linienförmig im oberen Drittel des Umfangs. Während der Belastungssteigerung konnte ein dumpfes Geräusch vernommen werden, das womöglich auf einen Biegeriss im Beton oder eine Umlagerung im Inneren der Proben hinweist. Die Enden der Proben sind offen. Mit zunehmender Last tritt eine Relativbewegung zwischen Kern und Hülle ein, die bis zu circa 2 mm beträgt.

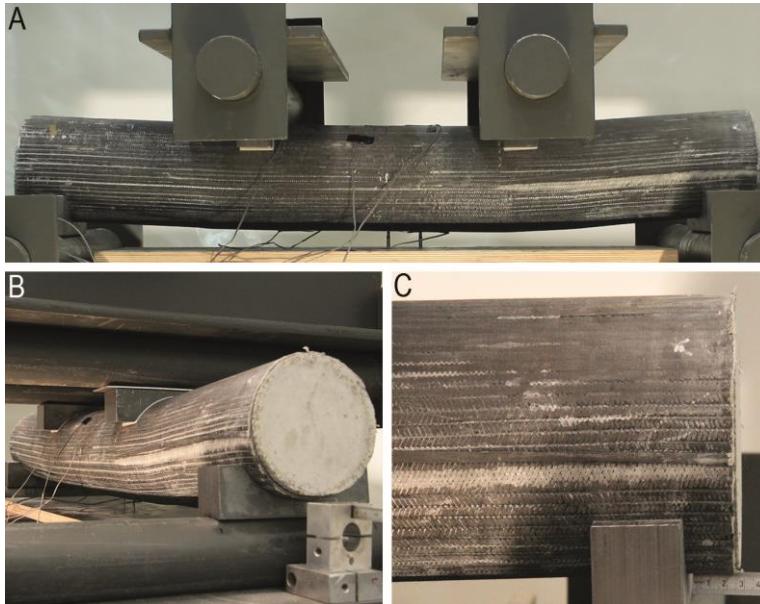


Bild 111: Versuchsreihe 2: Biegeversuch: Probe B_CG_70

A: Probe mit voranschreitender Verfärbung der Matrix seitlich in Längsrichtung und zunehmender Rissentwicklung, ausgehend unterhalb der Lasteinleitung progressiv zum Auflager, B: Beginnende Klaffung in Umfangsrichtung, C: Versatz zwischen Kern und Hülle aus Schubbeanspruchung

Die Lastverformungskurven der drei Biegeproben zeigt Bild 112. Die Tragfähigkeit korreliert mit dem Faserwinkel: Umso höher der Faserwinkel ist, desto höher ist die Traglast. Mit zunehmendem Flechtwinkel steigt das Flächengewicht der Fasern, die in Umfangsrichtung günstig wirken, und deren Effektivität. Bei größeren Flechtwinkeln erhöht sich sowohl der Bauteilwiderstand als auch das Verformungsvermögen bis zum Versagenseintritt. Die Lastverformungskurve des Balkens mit 70° kann in mindestens vier Bereiche ähnlicher Steigung eingeordnet werden. Im ersten Bereich liegt der Beton vermutlich in ungerissenem Zustand vor. Im nächsten treten die beschriebenen Zwischenfaserbrüche auf. Pro Bereich fällt die Steifigkeit jeweils ab.

Eine Betonreferenzprobe ohne Umschnürung trägt rechnerisch eine Prüflast von 30 kN, bevor die effektive Biegezugspannung des Betons überschritten wird. Dies entspricht einem Biegemoment von 4,5 kNm. In Probe B_CG_45 und B_CG_70 kann ein Steigungswechsel der Lastverformungskurve bei 25 kN festgestellt werden, was vermutlich den Bereich hin zum gerissenen Beton markiert.

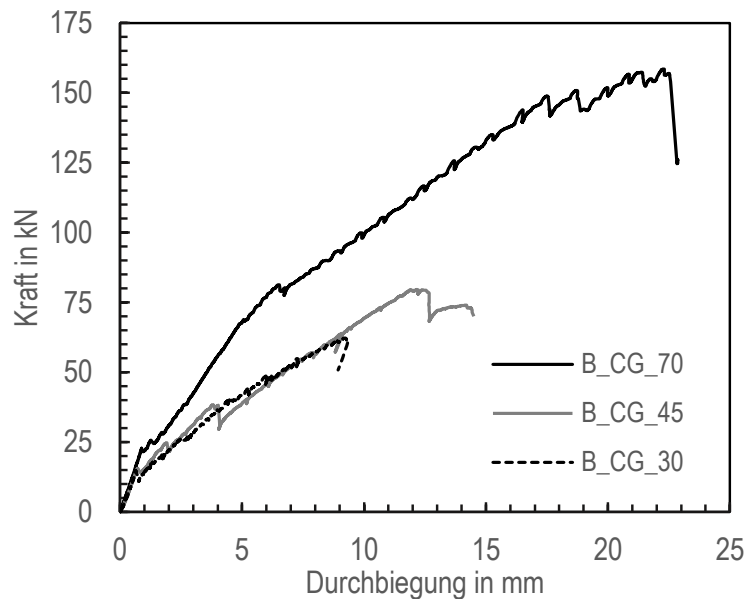


Bild 112: Vier-Punkt-Biegeprüfung: Lastverformungskurve dreier Biegeproben

Gegenüber einem unbewehrten Balken ist die Tragfähigkeit des Balkens B_CG_70 5-mal so groß, gegenüber der Probe B_CG_30 ist sie 2,5-mal so groß (Tabelle 26).

Tabelle 26: Versuchsreihe 2: Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeprüfung

Probe	F_{\max}	$w(F_{\max})$	$\epsilon_{ax,top}(DMS)$	$\epsilon_{ax,bot}(DMS)$	$M_{\max,calc}$
	kN	mm	mm/m	mm/m	kNm
B_CG_30	62,2	9,2	-1,55	2,93	9,3
B_CG_45	79,6	12,2	-3,01	3,94	11,9
B_CG_70	158,5	22,3	(-4,33)	8,62	23,8

F_{\max}	Maximale Prüfkraft
$M_{\max,calc}$	Aus maximaler Prüfkraft berechnetes Moment
$w(F_{\max})$	Durchbiegung in der Mitte bei F_{\max}
$\epsilon_{ax,top}(DMS)$	Dehnung an der Oberfläche bei F_{\max} , Oberseite
$\epsilon_{ax,bot}(DMS)$	Dehnung an der Oberfläche bei F_{\max} , Unterseite

Die Dehnungen bei Höchstkraft an der Oberfläche der FKV-Hülle bleiben hinter den bei Flachproben erreichten Werten zurück (vgl. Tabelle 21, Tabelle 26). Für den Probekörper B_CG_30 betragen die axialen Zugdehnungen an der Bauteilunterseite das 0,6-Fache, für B_CG_45 das 0,4-Fache und für die 70° Probe das 0,3-Fache. Der DMS bei Probe B_CG_70 ist bei Höchstkraft nicht mehr intakt, angegeben ist der letzte registrierte gültige Wert zugehörig zu einem Kraftwert von -148,8 kN (Tabelle 26).

Die registrierten maximalen Stauchungen auf der FKV-Oberfläche sind stets kleiner als die Zugdehnungen. Diese asymmetrische Beanspruchung kann der Lasteinleitung geschuldet sein. Typischerweise sind auch die Widerstände und Bruchdehnungen im Druckversuch von FKV-Geflechtern geringer als die Widerstände im Zugversuch (Birkefeld 2013). Maßgeblich für das Bauteilversagen sind jedoch nicht die Dehnungsgrenzwerte in den Druck- und Zugbereichen, sondern das beschriebene Versagen durch Ausbildung von seitlichen Rissen. Die Bewehrung aus Carbonrovings in Längsrichtung kann nicht gänzlich ausgenutzt werden. Der Widerstand in Umfangsrichtung ist hier maßgeblich für den Bauteilwiderstand, der überwiegend aus den Flechtäden resultiert, die vermutlich ähnlich wie eine Bügelbewehrung wirken.

Eine Traglaststeigerung kann zunächst durch Erhöhung des Schubwiderstands erreicht werden, bis gegebenenfalls andere Versagensmechanismen limitieren. Ziele einer verbesserten Auslegung sind demnach die Erhöhung des Flächengewichts der Flechtfäden, die Anordnung in einem effektiveren Winkel oder Flechtfäden aus Carbonmaterial.

6.7. Beton-CF-EP-Geflechtrohre: Verbundversuche

Der Kraftübertrag der beiden Verbundpartner Beton und Faser-Kunststoff-Verbund hat Einfluss auf das Tragverhalten von Bauteilen in dieser Hybrid-Bauweise. Die übertragbare Scherkraft hängt von der mechanischen Verzahnung und der Rauheit der Innenseite der Umschnürung ab. Bei der Verwendung von XPS-Kernen ist die Innenseite der Umschnürung meist leicht gewellt und glatt. Durch Rückstände auf der Oberfläche des Flechtkerns kann nach der Betonage eine Schwachschicht vorliegen. Anhand von Druckversuchen wird die übertragbare Scherkraft an zylinderförmigen Proben bestimmt.

6.7.1. Versuchsziel

Ziel der Versuche ist es, durch relatives Verschieben des Kerns gegen die Hülle die maximale Schubspannung Gl. 29 infolge Scherung zu bestimmen und den Einfluss der Tufting-Pins auf diese quantitativ zu untersuchen.

$$\tau_{\max} = \frac{F_{\max}}{A_{\text{Mantel}}} \quad \text{Gl. 29}$$

6.7.2. Versuchsaufbau

Die Proben in Kreiszyylinderform ($h/d \sim 2:1$) bestehen aus einem Rohr, das teilweise ausbetoniert ist (Bild 113). Im Versuch wird das freie Rohrende auf die Druckplatte aufgestellt und am oberen Ende durch Auflegen einer Stahlplatte ausschließlich über die Betonquerschnittsfläche belastet. Im Bereich der Grenzfläche der beiden Verbundwerkstoffe Beton und CF-EP wird dadurch eine Schubspannung erzeugt. Mit steigender Druckkraft wird der Kern in axialer Richtung relativ gegen die Hülle verschoben. Gegenüber baupraktischen Querschnitten wird der Durchmesser der CF-EP-Probekörper auf circa 56 mm verkleinert.

6.7.3. Auslegung der Probekörper

Die Wanddicke der Hülle wird gegenüber dem typischen umschnürten Bauteil deutlich erhöht, um ein Druckversagen oder Beulen der Hülle zu vermeiden (4-Lagen-Carbongeflecht, $t \sim 4 \text{ mm}$). Die Zielfestigkeit des Betons nach 28 Tagen ist 40 N/mm^2 . Wegen des kleinen Durchmessers und der Durchdringung des inneren Volumens durch die CF-EP-Stifte wird das Größtkorn des Betons bzw. Mörtels auf 2 mm beschränkt.

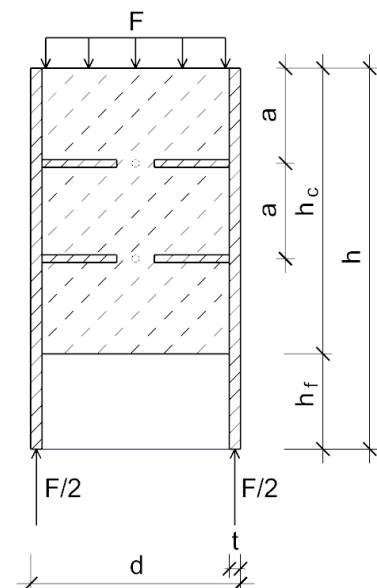


Bild 113:
Geometrie der Probekörper mit
Tufting-Pins für den Ausdrückversuch

6.7.4. Herstellung der Probekörper

Bei den Probekörpern handelt es sich um zum Teil betongefüllte Carbon- und Stahlrohre. Die Herstellung der Carbonrohre erfolgt an den DITF durch eine studentische Hilfskraft. Die faserverstärkten Rohre werden im Vakuuminfusionsverfahren (VAP©) gefertigt (Epoxidharz EPIKOTE Resin MGS RIMR135, Härter EPICURE Curing Agent MGS RIMH 137). Der Geflechschlauch besteht aus vier Lagen mit je 124 Flechtfäden (Tenax -E HTA40 6K) und 72 Stehfäden (Tenax-E HTS40 12K). Der angestrebte Flechtwinkel beträgt 70°.

Es werden Carbonrohre mit und ohne Tufting-Pins hergestellt. Die Wanddicken werden jeweils an den Enden an vier Stellen vor der Betonage gemessen. Nach Erhärten des Betons werden die Stirnflächen plangeschliffen und die Höhen sowie Durchmesser an jeweils vier Stellen gemessen (Tabelle 27). Der Mörtel mit einem w/z Wert von 0,6 besteht aus Sand 0/2 (63 kg), Zement CEM II/ALL 32,5 R (21 kg) und Wasser (12,6 kg). Die Proben werden nach 25 Tagen zur Vorbereitung aus dem Wasserbad entnommen und abgedeckt bis zur Prüfung gelagert.

Tabelle 27: Maße der Ausdrückprobekörper

Probe	h	h _f	t	h _c *	A _{c,Mantelfläche}
-	mm	mm	mm	mm	mm ²
CU1	101,0	25,8	4,1	75,2	10352
CU2	101,6	25,9	4,1	75,6	10409
CUC1	98,7	25,3	4,0	73,3	10091
CUC2	100,2	26,4	3,7	73,8	10152
CUC3	102,0	26,5	4,2	75,5	10388
CT1C1	101,1	24,4	4,1	76,6	10545
CT1C2	102,0	26,3	4,2	75,7	10416
CT1C3	102,2	25,7	4,0	76,5	10525
CS1	100,9	26,9	2,5	74,0	15994
CS2	99,6	27,4	2,5	72,2	15601
CS3	100,4	29,4	2,5	70,9	15334

* Berechnet.

h_f, h_c Definition s. Bild 113

CU, CUC Serien mit geflochtenem CF-EP-Rohr ohne Tufting-Pins

CT1C Serie mit geflochtenem CF-EP-Rohr mit Tufting-Pins

CS Serie mit Stahlrohr

Bei den Tufting-Pins handelt es sich um harzumschlossene Faserschlaufen, deren Form annähernd ein elliptischer Zylinder ist. Die lange Achse der Ellipse im Querschnitt misst im Mittel 6,4 mm, die kurze 3,5 mm bzw. der Faserkern 3,2 mm und 1,6 mm. Die Stifte sind circa 2,5 cm lang. Zur näherungsweise Bestimmung des Fasergehalts wird das Bauteil vor und nach dem Imprägnieren bzw. Erhärten gewogen, der Massenanteil beträgt $w_{f,m} = 60\%$.

6.7.5. Prüfung

Die Druckprüfung der elf Proben erfolgt weggesteuert an einer Prüfmaschine mit 100 kN Nennkraft (Zwick Z100) mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min nach Erreichen einer Vorkraft von 50 N bis zu einer Verschiebung von 20 mm. Die Lastplatten aus S235 haben die Durchmesser 44,3 mm und 68,8 mm mit jeweils 10 mm Dicke. Die ausgewerteten Messgrößen sind die Kraft und die Verformung. Die Abstandsänderung der starr gelagerten Lastplatten wird anhand eines

Extensometers mit zwei Gabelfühlern gemessen, die exzentrisch angebrachte Metallprofile greifen (Bild 114).

6.7.6. Ergebnisse

Tabelle 28 zeigt die Ergebnisse der begleitenden Materialprüfung für den verwendeten Mörtel nach DIN EN 196-1.

Tabelle 28: Eigenschaften des verwendeten Mörtels nach DIN EN 196-1 (28Tage)

	ρ_c (n=3) t/m ³	f_{cten} (n=3) N/mm ²	f_c (n=6) N/mm ²
\bar{x}	2,26	1,8	38,6
s	0,01	0,1	1,0

Der Mittelwert der Schubspannung der drei Proben mit Tufting-Pins (CT1C) liegt 1,2 N/mm² über dem Mittelwert der Schubspannung der fünf Proben ohne Tufting-Pins (CU(C)) (Bild 115), derjenige der Proben mit Stahlrohren 3,5 N/mm² darunter. Die Mittelwerte aller drei Probentypen liegen unter dem rechnerisch ermittelten Wert der maximalen Scherfestigkeit des Betons nach Mörsch (1904).

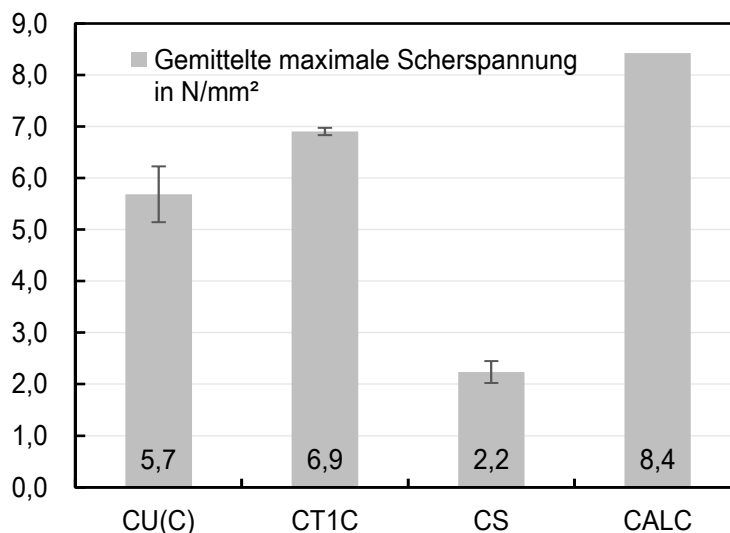


Bild 115: Mittelwerte der maximalen Schubspannung der Verbundprobekörper mit Carbonrohren ohne Pins (CU(C)), mit Pins (CT1C), mit Stahlrohren (CS) und gegenüber dem Rechenwert (CALC) der maximalen Schubspannung für reinen Beton

Alle Proben ohne Stifte zeigen einen nahezu geradlinigen Anstieg der Lastverformungskurve sowie ein deutliches Maximum (Bild 116, Reihen CU(C) und CS). Im abfallenden Bereich liegt eine deutliche Krümmungsänderung mit geringer werdendem Abfall bei zunehmender Verformung vor. Die Werte der Prüfkraft streben gegen einen Restwert. Die Proben mit Stiften (CT1C) zeigen ebenfalls ein Maximum, jedoch ein lokales. Nach einem Abfall der Prüfkraft und einem zweiten Anstieg erreicht sie das globale Maximum. Danach fällt die Kraft langsamer ab als bei den Proben ohne Stifte. Die Steigung im zweiten Anstieg ist deutlich flacher als die Steigung bis zum ersten lokalen Maximum. Bild 116 zeigt die Ergebnisse als Schubspannungs-Verformungskurve der Proben.



Versuchsbeginn



Eingedrückter Betonkern

Bild 114:
Probe CU1 im Ausdrückversuch

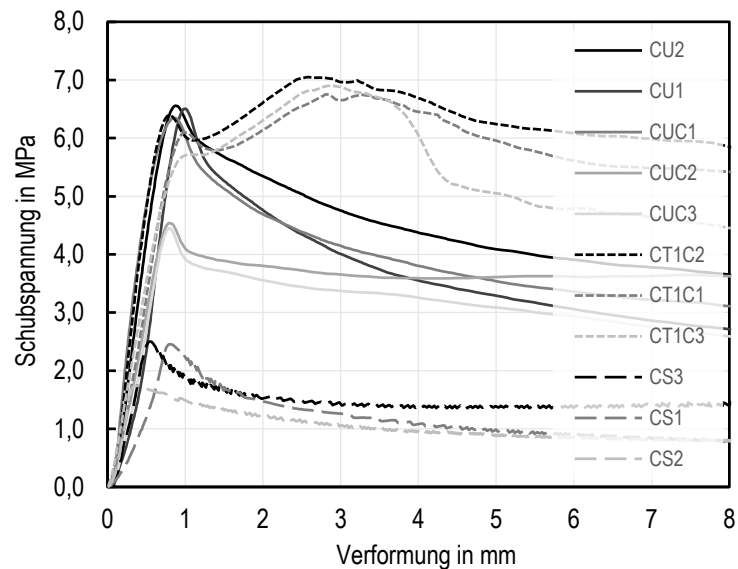


Bild 116: Schubspannungs-Verformungskurven der betongefüllten Rohrproben im Ausdrückversuch

6.7.7. Einordnung der Ergebnisse

Im Vergleich zum Doppellaschen-Zugversuch (Ortlepp et al. 2011) kann sich im gewählten Versuchsaufbau mit zylindrischen Proben eine radiale Kraftkomponente ausbilden, die die Reibkraft erhöht. Dies ist vermutlich ursächlich für den geringeren Unterschied – wie Ergebnisse von Vorversuchen zeigen – zwischen getufteten und nicht getufteten Proben im Vergleich zum Doppellaschen-Zugversuch.

Nach Überwinden der Haftkraft kommt es bei den getufteten Proben zu einem zweiten Kraftanstieg, da die Pins einen Widerstand gegen Abscheren bieten. Die Tufting-Pins sind von Kopfbolzendübeln im Verbundbau verschieden, da sie aus näherungsweise linear-elastischen CF-EP bestehen, im Vergleich zu Stahl nicht duktil sind und keine Endverankerung aufweisen. Die mittlere Kraftdifferenz bei der mittleren Maximalkraft (72,1 kN, 2,75 mm) der Proben CT1C mit Pins zu der mittleren Kraft der Proben CU(C) ohne Pins an der Stelle 2,75 mm beträgt 30,2 kN. Angenommen diese Kraft wird von den 12 Stiften aufgenommen, entspricht dies pro Stift einer Abscherkraft von 2,5 kN. Bezogen auf die mittlere Faserquerschnittsfläche eines Stifts von 16,1 mm² entspricht dies einer Schubspannung von 156,5 N/mm² pro Pin.

6.8. Gegenüberstellung mit analytischen Ergebnissen

Die Spannungsdehnungslinien der ersten und zweiten Versuchsreihe an FKV-umschnürten Betonzylindern sind in Jonas und Knippers (2017) bzw. Jonas et al. (2019) denen aus Berechnungsmodellen gegenübergestellt. Festzustellen ist, dass sich für die gewickelten Proben eine bessere Übereinstimmung ergibt als für die geflochtenen.

Zwei weitere aktuelle Modelle aus der Literatur sind die von Eid und Paultre (2017) und Pour et al. (2018), die ebenfalls eine hohe Ergebnisgüte aufweisen.

Das Modell nach Pour et al. (2018) zeichnet sich zudem durch die einfache Anwendung aufgrund einer geringen Anzahl an Eingabeparametern aus. In diesem wird für die Ermittlung der durch Umschnürung gesteigerten Festigkeit die Beziehung nach Richart et al. (1928) in abgewandelter Form verwendet (Gl. 21). Sie enthält einen geringeren Faktor zur Berechnung der Festigkeit ($< 2,5$), da im Term zur Ermittlung der seitlichen Spannungen durch die Umschnürung die Fasereigenschaften anstatt der FKV-Eigenschaften eingesetzt werden. Das heißt, die Steifigkeitsänderung durch die Matrixergänzung der Fasern zu einem FKV sowie die Reduktion der Faserbruchdehnung in Bezug auf die Umschnürungsbruchdehnung werden durch diesen kleineren Faktor implizit berücksichtigt. Zur Modellerstellung werten die Autoren eine Vielzahl (> 1000) von dokumentierten Versuchsergebnissen aus und erstellen mit Hilfe der Fehlerrechnung neue Beiwerte und Beziehungen zur Ermittlung einer analytischen Spannungsdehnungslinie für umschnürten Beton.

Das Modell von Eid und Paultre (2017) ist vor allem wegen des breiten Anwendungsgebiets von Interesse, da mit diesem Spannungsdehnungslinien für druckbelastete Bauteile mit FKV-Umschnürungen, Bügelbewehrung und Längsbewehrung in Kombination oder einzeln für kreisförmige und rechteckige Querschnitte berechnet werden können.

In Bild 117 sind ergänzend zu den Spannungsdehnungslinien der ersten Versuchsreihe die Auswertungen der zwei Modelle im Vergleich dargestellt. Für die tatsächliche FKV-Bruchdehnung am Bauteil wird der 0,63-fache Wert eingesetzt, der durch Flachprobenprüfungen ermittelt wird. Abweichend von der ursprünglichen Definition werden im Modell nach Pour et al. (2018) die Werte des Elastizitätsmoduls des FKV und nicht wie vorgesehen der Fasern eingesetzt. Andernfalls ergeben sich Kurvenverläufe, die stark von den experimentell ermittelten abweichen. Für die Serie basierend auf Wickelrohren (W) prognostiziert das Modell nach Lam und Teng (2003) die besten Ergebnisse. Für die Proben mit geflochtenen Rohren werden mit dem Modell nach Eid und Paultre (2017) weniger gute Verläufe im Bereich des Übergangspunktes berechnet, jedoch die Festigkeit und Bruchdehnung im Vergleich zu den anderen Modellen am besten bestimmt.

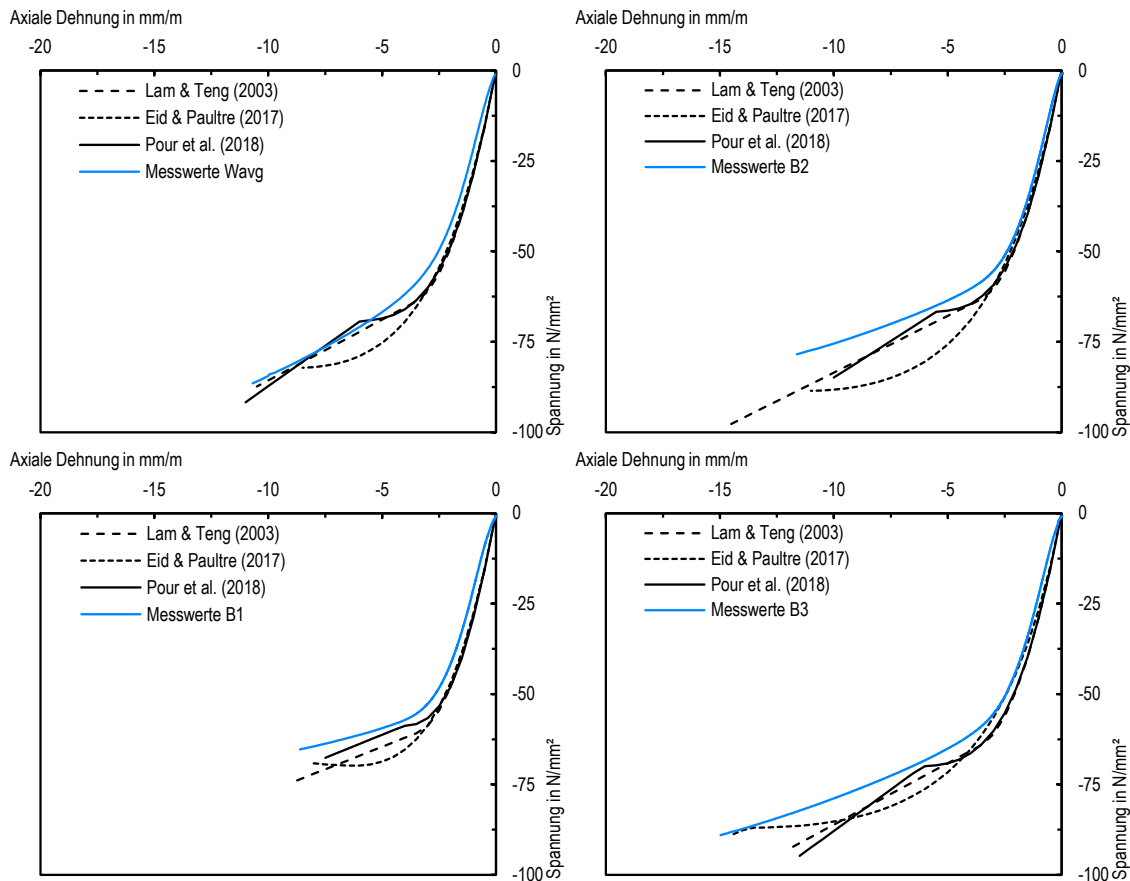


Bild 117: VR1: Vergleich von experimentell ermittelten und berechneten Spannungsdehnungslinien FKV-umschnürter Betonzylinder

W: Umschnürung durch Wickelrohr ($n = 3$), B1 – B3: Flechtrohr mit 4,6 und 7 Lagen

Problematisch für die Anwendung bestehender Berechnungsmodelle für geflochtene FKV-Umschnürungen ist, dass diese in der Regel für andere Voraussetzungen entwickelt wurden. Im Vergleich zu gewickelten Umschnürungen liegen bei geflochtenen kleinere Faserwinkel vor. Außerdem verursacht beim Geflecht der textile Aufbau mit vielen sich überkreuzenden Rovings eine Strukturdehnung. Zudem berücksichtigen die oben dargestellten Modelle, wie die Modelle nach Kwan et al. (2015) und Teng et al. (2009), den Lastabtrag der Hülle für die Tragfähigkeitssteigerung in axialer Richtung nicht explizit bzw. basierend auf empirisch ermittelten Werten nur implizit. Wickelrohre mit dem Hauptbestandteil der Fasern in Umfangsrichtung haben ähnliche Materialeigenschaften wie unidirektionale Schichten, mit einer hohen Steifigkeit in Umfangsrichtung und lediglich einem Bruchteil der Steifigkeit in axialer Richtung. Für eine unidirektionale Schicht aus CF-EP folgt nach Schürmann (2007) beispielsweise ein Verhältnis der Elastizitätsmodule von $E_{\parallel} : E_{\perp} \sim 16$ (Orthotropiegrad). Bei geflochtenem FKV beeinflusst der Flechtwinkel die Materialkennwerte wesentlich. In Umfangsrichtung liegt zwar noch eine höhere Steifigkeit vor als in axialer Richtung (vgl. Tabelle 15), das Verhältnis $\bar{E}_y : \bar{E}_x \sim 8$ ist jedoch deutlich geringer.

Die Querdehnzahl der UD-Schicht für Dehnungen in axialer Rohrrichtung, also senkrecht zur UD-Schicht mit der Wirkung in faserparalleler Richtung, liegt bei $\nu_{\parallel\perp}(\text{CF-EP UD-Schicht}) = 0,02$ (Schürmann 2007). Die zugehörige Querdehnzahl der aus Geflecht hergestellten FKV für Dehnungen, die in

y-Richtung wirken und durch Dehnungen in x-Richtung verursacht werden, ist mit $\nu_{yx} = 0,2$ deutlich größer.

In der ersten Versuchsreihe entspricht der Lagenaufbau der Wickelrohre nicht gänzlich dem einer UD-Schicht, da er eine bezogen auf die Gesamtdicke dünne Schicht Gewebe enthält und der Faserwinkel circa 89° statt 90° beträgt. Es wird angenommen, dass das Verhältnis der Elastizitätsmodule und der Wert der Querdehnzahl der UD-Schicht den herstellungsbedingt gerade nicht erreichbaren Grenzfall für ein Wickelrohr darstellen. Das Verhältnis der Elastizitätsmodule wird demzufolge voraussichtlich etwas kleiner und die Querdehnzahl etwas größer sein als die der UD-Schicht, aber dennoch eine ähnliche Tendenz aufweisen. Das heißt, eine Belastung in axialer Rohrrichtung führt bei den Proben mit Geflechrohr zu einer bis zu circa zehnmal höheren Ausdehnung der Umschnürung in Umfangsrichtung als bei Proben mit Wickelrohren. Dies ist für die Verwendung der bestehenden Modelle, die aus Untersuchungen an gewickelten FKV-umschnürten Betonzylindern hervorgegangen sind, für Bauteile mit FKV-Umschnürungen auf Basis geflochtener Textilien beachtenswert.

Bestehende Modelle sind dementsprechend per se nur bedingt geeignet, Ergebnisse für Proben mit Flechrohren zu prognostizieren. Zur Steigerung der Ergebnisgüte der Berechnungen sind in den Modellen der Faserwinkel, orthotrope Eigenschaften oder zumindest ein Verhältniswert der Steifigkeiten zu berücksichtigen. Mit einem größeren Datensatz können die Parameter des Modells nach Pour et al. (2018) für geflochtene Rohre mit der Methode der Fehlerrechnung angepasst werden.

Die vorhandenen Berechnungsmodelle setzen für die Anwendbarkeit stets Bauteile mit über die Länge konstantem Querschnitt voraus. Für komplexe Verzweigungsgeometrien sind diese Annahmen jedoch ungültig und die Anwendung von FE-Simulationen vermutlich besser geeignet.

6.9. Gegenüberstellung mit numerisch-mechanischen Ergebnissen

6.9.1. Simulation des Tragverhaltens

Neben den design-orientierten, analytischen und inkrementell-iterativen Berechnungsmethoden für FKV-umschnürte Bauteile sind auch numerisch-mechanische anzuführen.

Die für den Beton verwendeten Materialmodelle in den FE-Programmen lassen sich einteilen in Ansätze basierend auf der Plastizitätstheorie, Schädigungsmodellen und Kopplungen dieser beiden (Gholampour und Ozbakkaloglu 2017). Daneben existiert auch der Ansatz zur Berechnung mit „microplane“ Modellen (Gambarelli et al. 2014). Merkmale der verwendeten Ansätze der Plastizität zur Beschreibung des nichtlinearen Materialverhaltens von umschnürtem Beton zur Berechnung des plastischen Dehnungsinkrements sind eine Fließbedingung, eine Abhängigkeit von der Belastungsvorgeschichte durch Ver- und Entfestigung und eine nicht-assoziative Fließregel, bei der das plastische Potential also nicht der Fließbedingung entspricht (Schlegel 2006).

Häufig werden Fließbedingungen basierend auf dem Modell nach Drucker-Prager eingesetzt, wie auch beim Plastizitätsansatz nach Yu et al. (2010a), der eine schädigungsbedingte Steifigkeitsabnahme des Materials nicht einbezieht. Ansätze mit Schädigung erfassen diese zwar, berücksichtigen allerdings keine irreversiblen Verformungen und keine unelastischen Volumendehnungen. Kombinationen dieser beiden Verfahren entwickeln zum Beispiel Lubliner et al. (1989), Lee und Fenves (1998) oder Grassl und Jirásek (2006). Yu et al. (2010b) adressieren die Einschränkungen ihres Plastizitätsmodells und entwickeln ein modifiziertes Modell (CDPM, concrete damage plasticity model) bezüglich der Fließbedingung, der Verfestigungsfunktion, der Fließregel und des Schädigungsparameters, indem sie diese mit Umschnürungseigenschaften assoziieren. Deren modifiziertes Modell eignet sich für Beton unter aktivem Seitendruck und Seitendruck resultierend aus FKV-Umschnürungen zur Berechnung von kreis-, rechteck- und kastenförmigen Querschnitten, allerdings benötigt es für nicht kreisförmige Querschnitte auf empirischen Daten basierende Eingabeparameter (Teng et al. 2015). Weiterhin stellen Yu et al. (2010a) fest, dass folgende Punkte in modifizierten Drucker-Prager Modellen enthalten sein sollte, um genaue Ergebnisse für FKV-umschnürten Beton zu erhalten: Eine Fließbedingung, die von der dritten deviatorischen Spannungskomponente abhängt, eine Verfestigungsfunktion, die den Umschnürungsdruck berücksichtigt, und eine Fließregel, die nicht nur vom Umschnürungsdruck, sondern auch von dessen Inkrement abhängt (Yu et al. 2010a). Jiang et al. (2011) fokussieren sich bei der Anwendung des Drucker-Prager Modells im Speziellen auf das plastische Dilatanzverhalten, das eine Funktion der axialen Dehnung und des Umschnürungsverhältnisses ist, und nehmen eine Erweiterung vor.

Jiang und Wu (2012) zeigen anhand mehrerer Beispiele die Identifikation von Parametern für experimentelle Versuche zur Berechnung von FKV-umschnürten Betonbauteilen. Demnach lässt sich das Tragverhalten gut mit den modifizierten DP-Modellen beschreiben. Außerdem stellen sie fest, dass die Verfestigungsfunktion von der plastischen Dehnung und der FKV-Umschnürungssteifigkeit abhängt, der Reibungswinkel etwas abnimmt, wenn die plastischen Verformungen steigen, und der plastische Dilatanzwinkel eine Funktion der axialen plastischen Dehnung sowie der auf die Betonfestigkeit bezogenen Umschnürungssteifigkeit ist.

Teng et al. (2015) veröffentlichen nach eigener Aussage zum ersten Mal genaue FE-Untersuchungsergebnisse für das 3D-Tragverhalten von Stahl- und FKV-umschnürten Beton, basierend auf dem Modell von Yu et al. (2010b). Gholampour und Ozbakkaloglu (2017) simulieren FKV-umschnürten faserbewehrten Beton mit Berücksichtigung des Stahlfasergehalts, der Faserschlankheit, des Umschnürungsdrucks, der Betonfestigkeit und der nichtlinearen Dilatanz des Betons. Erweiterungen des CDPM schlagen des Weiteren vor: Szwed und Kamińska (2017) in Bezug auf das plastische Potential, Gholampour und Ozbakkaloglu (2017) in Bezug auf eine neue Versagensfläche und eine neue Fließregel basierend auf experimentellen Datensätzen sowie Li et al. (2019) bezüglich der Fließregel und der Verfestigungsfunktion, basierend auf Untersuchungen von gleichmäßig und nicht gleichmäßig FKV-umschnürten Betonbauteilen.

Simulationen von FKV-umschnürten stahlbewehrten Stützen mit guter Übereinstimmung zu experimentell ermittelten Lastverformungskurven und einer Parameterstudie mit Variation der Lagenanzahl, des Faserwinkels und des Bewehrungsgrad führen Hussein Abdallah et al. (2017) durch.

Neben dem Drucker-Prager Modell kann Beton auch mit anderen dreiaxialen, plastischen Materialgesetzen für Beton beschrieben werden: zum Beispiel nach Hammoud et al. (2013), Menétrey (1994) bzw. Menétrey-William, welches von Dong et al. (2015b) eingesetzt wird.

Wie bereits bei den analytischen Modellen erwähnt, ist die laterale Dehnung ein wesentlicher Parameter zur Beschreibung des Tragverhaltens FKV-umschnürter Druckglieder. Der Schlüssel zur Berechnung dieser Bauteile mit der FE-Analyse liegt im genauen Materialmodell für den Beton unter mehraxialer Spannung (Teng et al. 2015, S. 15).

Bei stahluumschnürtem Beton ist die genaue Vorhersage des Dilatanzverhaltens weniger kritisch, da der Umschnürungsdruck nach dem Fließen des Stahls im plastischen Bereich nicht mehr vom Dilatanzverhalten des Betons abhängt. Für FKV-Beton-Bauteile, deren Umschnürung linear-elastisches Verhalten aufweist, hängt jedoch der Umschnürungsdruck vom Dilatanzverhalten ab (Teng et al. 2015, S. 16). Auch das Nachbruchverhalten des Betons ist für das Erreichen eines Spannungszuwachses wichtig (Gambarelli et al. 2014, S. 309).

Während die lateral-axiale Dehnungsbeziehung des Betons bei aktivem Seitendruck annähernd durch eine exponentielle Funktion beschrieben wird, zeigt sie bei Beton mit passiver Umschnürung mit FKV zunächst einen linearen und anschließend einen asymptotischen Verlauf (Lim und Ozbakkaloglu 2015a; Dong et al. 2015b). Entscheidend bei den häufig verwendeten Drucker-Prager Modellen ist es, den Parameter des Dilatanzwinkels, der maßgeblich das Verhältnis der lateral-axialen Dehnung beeinflusst, adäquat zu berücksichtigen (Hany et al. 2015).

Eine Herausforderung bei der FE-Simulation von umschnürten Bauteilen ist die Berechnung adäquater Volumendehnungen, denn auch das volumetrische Verhalten weicht bei passiven Umschnürungen von dem der aktiven Umschnürung ab. Hany et al. (2015) adressieren diese Einschränkungen durch eine Erweiterung des Materialgesetzes ABAQUS® mit einer Verfestigungsfunktion und eines neuen Beton-Dilatanz-Modells als Funktion der Umschnürungssteifigkeit.

Zuvor hatten Rousakis et al. (2008) für den Dilatanzwinkel einen konstanten Wert vorgeschlagen und einen Zusammenhang zwischen diesem mit der Betondruckfestigkeit und der Umschnürungssteifigkeit festgestellt. Eid und Paultre (2007) drücken den Dilatanzwinkel ebenfalls als Funktion der lateralen Steifigkeit aus. Dong et al. (2015a) erarbeiten ein Modell zur Beschreibung der lateralen Dehnung in Abhängigkeit von der axialen Dehnung, der Umschnürungsspannung und der Betonfestigkeit. Sie vermuten, dass die Größe der lateralen Dehnung von diesen drei Parametern gesteuert wird und unabhängig von der Art des Umschnürungsdrucks aus passiver oder aktiver Umschnürung ist. Dabei ist zu beachten, dass bei passiver Umschnürung der Seitendruck auch von der axialen Dehnung abhängt und dieser bei aktiver konstant ist.

Hany et al. (2016) verwenden zur Berechnung des Dilatanzwinkels Beziehungen nach Papanikolaou und Kappos (2007), die auf Analysen empirischer Daten basieren. Des Weiteren nutzen sie zur Berechnung von lateral-axialen Spannungsdehnungslinien die Beziehung von Teng et al. (2015), die für kreisförmige Querschnitte eine sehr hohe Ergebnisgüte aufweist.

Um genaue Ergebnisse für FKV-umschnürte Probekörper zu erhalten, ist es bei den genannten Berechnungsmodellen in der Regel notwendig, den Parameter der Umschnürungssteifigkeit anzugeben. Dieser hängt unter anderem vom Radius der Umschnürung ab. Bei komplexen Geometrien, wie im Verzweigungsbereich eines Tragknotens mit Krümmungen in zwei Richtungen, liegt ein Übergang verschiedener Ausrundungsradien vor. Eine Prognose des seitlichen Dehnungsverhaltens mit den beschriebenen Verfahren ist deshalb nur eingeschränkt möglich.

In dieser Arbeit wird für die Modellierung von Beton das Materialgesetz nach Menétrey-William verwendet, das sich durch doppeltgekrümmte Versagensflächen mit kontinuierlichem Übergang auszeichnet. In der Schnittebene senkrecht zur hydrostatischen Achse beschreiben die resultierenden Schnittkurven der Grenzflächen mehrere zusammengesetzte Ellipsen, deren Abstand im Druckbereich mit Vergrößerung der Spannung unterproportional abnimmt. Das Modell kann Beton unter mehraxialem Spannungszustand im Allgemeinen genauer beschreiben als Drucker-Prager Modelle mit konischen oder kegelförmig-konischen Oberflächen. Des Weiteren werden eine nicht-assoziative Fließregel und nichtlineare Ver- und Entfestigungsfunktionen (exponentiell) verwendet.

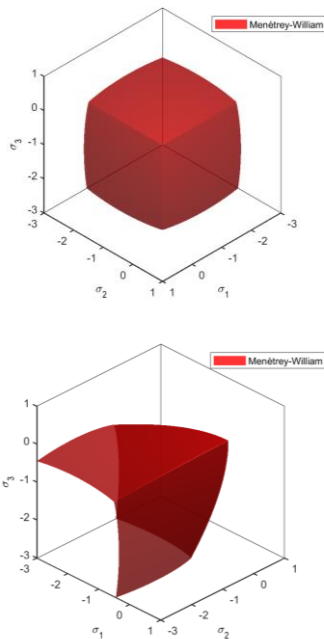


Bild 118:
Grafische Darstellung der Fließbedingung nach Menétrey-William, enthalten in ANSYS®

6.9.2. Materialmodelle im Elementtest

Anhand der Ergebnisse einer Simulation an einem einfachen Modell wird die Eignung des Drucker-Prager Modells und des Menétrey-William Modells untersucht. Hierfür wird ein kommerzielles FE-Programm eingesetzt, das diese Werkstoffmodelle enthält (ANSYS®).

Die Berechnungen werden an einem würfelförmigen Element mit einer Seitenlänge von 10 mm mit den Parametern nach Tabelle 29 für einen Beton der Festigkeit 50 N/mm² durchgeführt (Bild 119). Der Seitendruck und die axiale Verschiebung werden nacheinander aufgebracht.

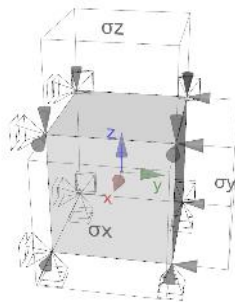


Bild 119:
Modell des Elementtests für triaxiale Belastungen

Tabelle 29: Betoneigenschaften für den Elementtest

Linear-elastisch:		DP	MW
E_c	MPa	34000	34000
ν	-	0,2	0,2
Basiswerte:			
R_c	MPa	50	50
R_t	MPa	5	5
R_b	MPa	60	60
δ_t	-	0,25	-
δ_c	-	1,0	-
ψ	°	-	15
Lineare Entfestigung:			
κ_{cm}	-	0,001029	0,001029
κ_{cr}	-	0,003500	0,003500
Ω_{ci}	-	0,33	0,33
Ω_{cr}	-	0,1	0,1
κ_{tr}	-	0,005	0,005
Ω_{tr}	-	0,1	0,1

Bild 120 zeigt eine Auswertung der Materialmodelle nach Drucker-Prager und Menétrey-William mit linearer Entfestigung mit unterschiedlichen Seitendrücken. Während die Spannungsdehnungslinie mit dem DP-Modell für einen Seitendruck von 25 MPa ($\sigma_1/f_c = 0,5$) lediglich zu $87,5 \text{ N/mm}^2$ berechnet wird, bildet das MW-Modell den Einfluss der seitlichen Spannungen realitätsnäher mit $149,0 \text{ N/mm}^2$ ab. Die Festigkeitswerte und zugehörigen Dehnungswerte werden im Modell nach MW deutlich stärker gesteigert als im Modell nach DP (Bild 120).

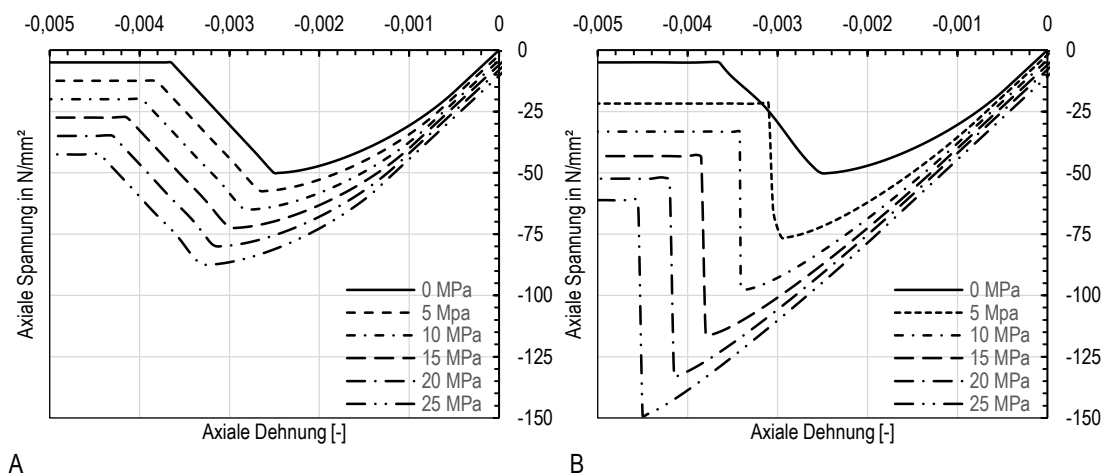


Bild 120: Spannungsdehnungslinien im Elementtest mit unterschiedlichen Seitendrücken
A: Auswertung modifiziertes Drucker-Prager Modell, B: Auswertung Menétrey-William Modell

In Bild 121 sind die gesteigerten Festigkeiten f_{cc} und seitlichen Spannungen σ_1 normiert mit der Betonfestigkeit dargestellt. Die Ergebnisse aus dem Modell nach Menétrey-William stimmen für die gewählten Materialparameter mit den aus der Literatur nach Richart et al. (1928), Mander et al. (1988) und Kwan et al. (2015) berechneten überein. Die Auswertung nach EC2 bildet die Tragfähigkeitssteigerung konservativer ab. Ebenfalls unterschätzt wird die Tragfähigkeitssteigerung im rotationssymmetrischen Spannungszustand nach dem modifizierten Drucker-Prager Modell.

Die gesteigerten Axialdehnungen ε_{cc} des Betons nach EC2 und insbesondere die Ergebnisse der Auswertungen an

einem Element weichen von den aus den Literaturquellen berechneten deutlich ab. Die Axialdehnungen ϵ_{cc} der numerisch-mechanischen Berechnungsergebnisse zeigen nur eine geringfügige Steigerung. Eine parametrische Auswertung des Modells zeigt, dass die maximal aufnehmbaren Druckspannungen und die zugehörigen Dehnungen im Rahmen der numerischen Genauigkeit unabhängig vom Dilatanzwinkel sind.

Das Drucker-Prager Modell lässt sich gut auf umschnürte Betonzylinder anwenden (vgl. Kapitel 6.9.1), hier wird jedoch das Modell nach Menétrey-William bevorzugt, da es die Bruchgrenzfläche realitätsnäher abbildet und mit den Referenzwerten übereinstimmende Spannungswerte liefert.

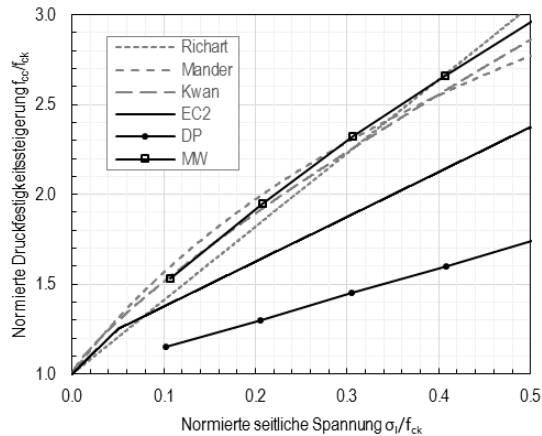
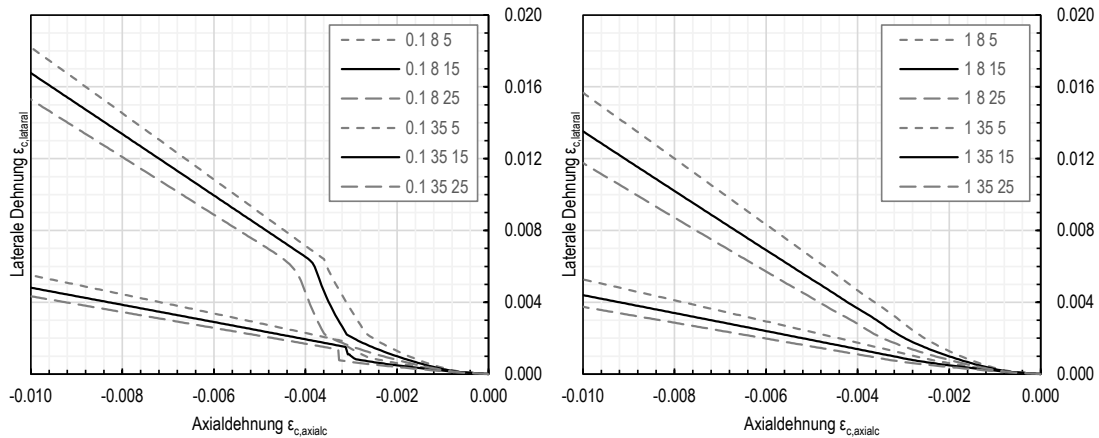


Bild 121: Druckfestigkeitssteigerung im rotationsymmetrischen Spannungszustand nach verschiedenen Quellen im Vergleich zur numerisch-mechanischen Berechnung

Der Dilatanzwinkel ist definiert als das Verhältnis der Volumendehnung zur Scherdehnung und ist ein Maß für die Volumenänderung durch einwirkende Scherkräfte. Theoretisch mögliche Dilatanzwinkel des Materialmodells MW für Beton (Gl. 30) liegen mit einer Zugfestigkeit von 10 % der Druckfestigkeit im Wertebereich von circa $4,0^\circ$ bis $35,3^\circ$.

$$\frac{R_t}{\sqrt{2} R_c} < \tan \psi \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \quad \begin{array}{l} \text{Gl. 30} \\ \text{aus ANSYS®} \end{array}$$

Die Ausbildung eines mehraxialen Spannungszustands im Beton ist von der seitlichen Ausdehnung des Betons abhängig. Umso größer die seitliche Dehnung des Betons ist, desto größer sind die Pressungen an der Innenseite der Umschnürung, die über die Kesselformel mit der Ringzugkraft in der Hülle in Beziehung steht. Bild 122 gibt einen Überblick über die erreichbaren Extremwerte der lateralen Dehnung gemäß den oben angeführten Grenzwerten der Dilatanzwinkel für verschiedene seitliche Spannungen des Materialmodells MW. Mit Werten der lateralen Dehnung von circa 4 % bis 18 % bei 10-prozentiger Axialdehnung im plastischen Bereich ergeben sich theoretisch Querdehnraten von 0,4 bis 1,8.



A B
 Bild 122: Auswertung des Modells MW: Einfluss des Dilatanzwinkels (8° , 35°) auf die seitliche Dehnung für verschiedene seitliche Spannungen (5 MPa, 15 MPa, 25 MPa) unter axialer Verschiebung, A: $\Omega_{cr} = 0,1$ und B: $\Omega_{cr} = 1,0$

6.9.3. Numerisch-mechanische Berechnung

Im Folgenden wird die Finite-Elemente (FE)-Simulation mit einem kommerziellen Programm (ANSYS®) zur Ermittlung der Lastverformungskurven und der Tragfähigkeit der FKV-umschnürten Betonproben der ersten Versuchsreihe beschrieben (Bild 123). Häufig zu finden ist die Modellierung lediglich eines Viertels des Bauteils (Gambarelli et al. 2014) oder eines Ausschnitts (Hany et al. 2015), um die Elementanzahl und Berechnungszeit zu verringern. Da die Berechnungszeit hier unkritisch ist, wird stets das ganze Bauteil modelliert.



Bild 123:
 Randbedingungen

Elementierung und Vernetzung

Für die Komponenten des Bauteils, bestehend aus dem zylindrischen Betonkern ($h = 400 \text{ mm}$, $d_c = 200,4 \text{ mm}$) und der rohrförmigen FKV-Umschnürung, werden Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet. Schalenelemente mit 8 Knoten (SHELL 281, $\sim 0,2 \text{ n}_{\text{Elem.}}/\text{cm}^2$) repräsentieren die Umschnürung und Volumenelemente mit überwiegend 20 Knoten (SOLID 186, $0,8 \text{ n}_{\text{Elem.}}/\text{cm}^3$) den Betonkern. Die Knoten der beiden Elementarten werden im Kontaktbereich kongruent generiert. Wie auch in Gambarelli et al. (2014) wird ideal fester Verbund angenommen. Das heißt, an einem geometrischen Punkt an der Oberfläche des Betonkerns liegen jeweils zwei Knoten vor, deren Verformungen miteinander gekoppelt sind. Durch den Einsatz von Kontaktelementen werden die unterschiedlichen Freiheitsgrade der verwendeten Elemente behandelt. Wie Hany et al. (2015) behaupten, beeinflussen die Verbundeigenschaften zwischen Beton und FKV die Umschnürungswirkung unwesentlich.

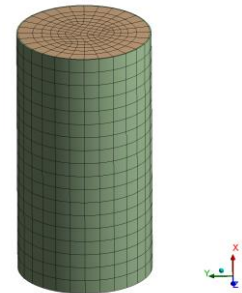


Bild 124:
 Netz mit Schalen- und Volumenelementen der Zylinderproben

Materialeigenschaften

Für den Beton wird ein Werkstoffgesetz nach Menétrey-William (ANSYS®) verwendet. Mit den gewählten Parametern steigt für einaxiale Druckbelastungen die Spannung zunächst nichtlinear an und verläuft im Entfestigungsbereich leicht linear rückläufig (Tabelle 30). Für den FKV wird ein orthotropes, linear-elastisches Werkstoffgesetz mit gleichen Eigenschaften in axialer und radialer Richtung gewählt (Tabelle 31).

Tabelle 30: Parameter für den Beton

Menétrey-William		
Linear-elastisch:		
E_c	MPa	34 000
ν	-	0,2
Basiswerte:		
R_c	MPa	52,1
R_t	MPa	5,21
R_b	MPa	62,52
ψ	°	4,1
Entfestigung: linear		
κ_{cm}	-	0,001216
κ_{cr}	-	0,1
Ω_{ci}	-	0,33
Ω_{cr}	-	0,01
κ_{tr}	-	0,005
Ω_{tr}	-	1

Tabelle 31: VR1: Verwendete Parameter für den FKV

Linear-elastisch, orthotrop					
		W	B1	B2	B3
E_x	MPa	126 500	6500	6600	5500
E_y	MPa	7 800	39400	51800	48200
E_z	MPa	7 800	6500	6600	5500
ν_{xy}	-	0,28	1,24	1,46	1,44
ν_{yz}	-	0,40	0,2	0,19	0,19
ν_{xz}	-	0,28	1,24	1,46	1,44
G_{xy}	MPa	3 500	11800	14200	11700
G_{yz}	MPa	2 700	5000	5000	5000
G_{xz}	MPa	3 500	11800	14200	11700
t	mm	2,0	2,4	4,0	5,3

Versagensindikator ist die abgeminderte Bruchdehnung des FKV in Umfangsrichtung.

Randbedingungen

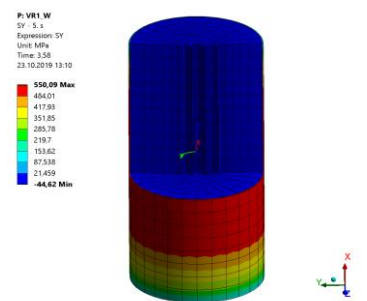
Die Knoten einer Betonoberfläche werden in die drei Raumrichtungen gehalten, die der anderen Betonoberfläche in mehreren Lastschritten axial verschoben und ebenfalls seitlich gehalten.

Ergebnisse

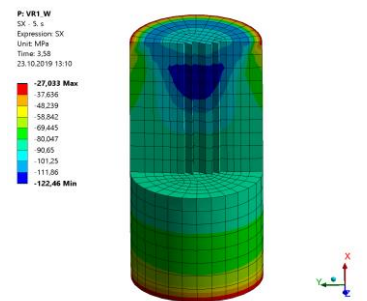
Die Ergebnisgrößen sowie die Spannungen und Dehnungen des Kerns und der Umschnürung werden im Querschnitt in der Mitte des Bauteils ausgewertet (Bild 125). Die Lastverformungskurven der vier Probenarten zeigen tendenziell ähnliche Verläufe zur Messkurve. Die der Probe W zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die Übereinstimmung der Spannungen für die geflochtenen Probekörper ist mit identischer Materialdefinition für den Beton geringer als diejenige für die Probe W. Als Gründe hierfür werden unterschiedliche Umschnürungssteifigkeiten und die Streuung der gemessenen Eigenschaften der Hülle vermutet. Exemplarisch wird durch Variation des Dilatanzwinkels für Probe B1 ein übereinstimmender Verlauf erzeugt.

Die numerisch-mechanisch ermittelten Kurven der Proben mit geflochtener Umschnürung zeigen ein etwas nachgiebigeres Verhalten als die der analytischen Berechnung.

Die Tragfähigkeit der Proben wird zwar für Typ W und B1 rechnerisch gut bestimmt, jedoch für Probe B2 und B3 überschätzt.



Spannungen in tangentialer Richtung



Spannungen in axialer Richtung

Bild 125:
Exemplarische Ergebnisse für Probe VR1_W

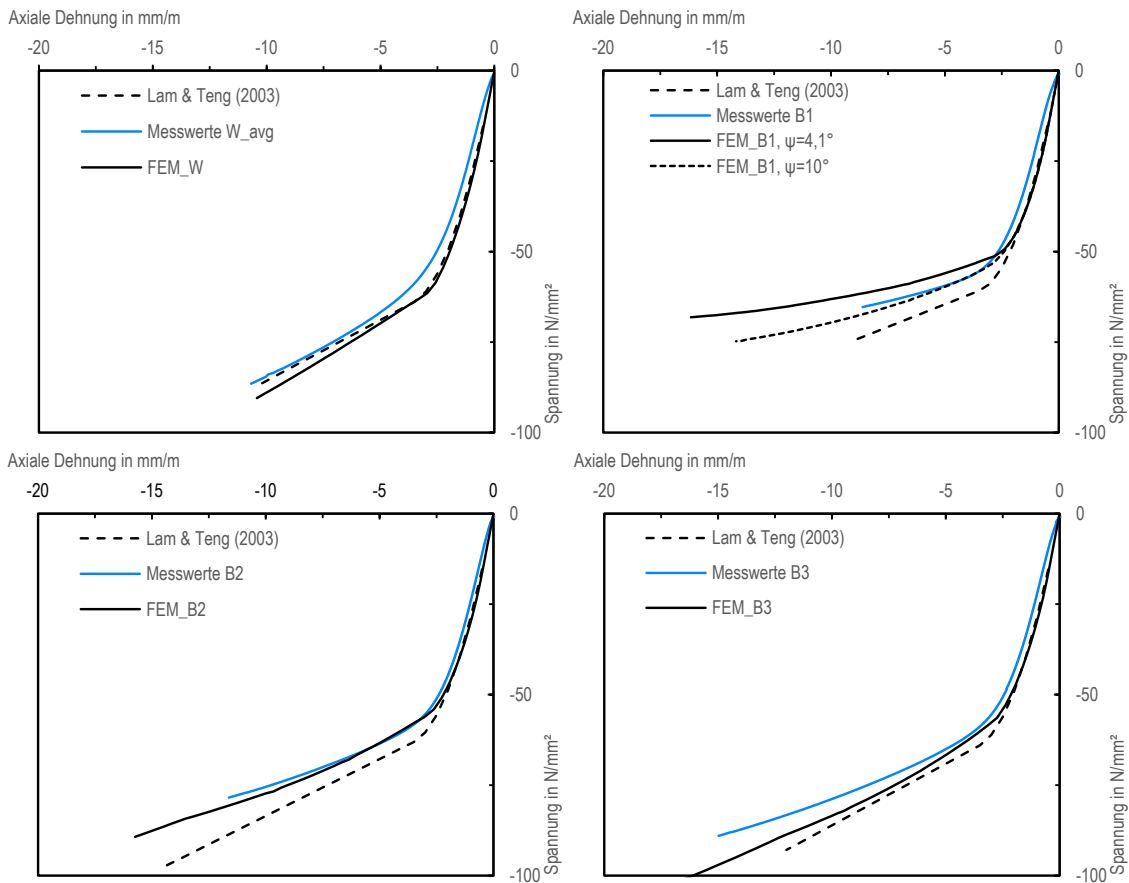


Bild 126: VR1: Vergleich von experimentell ermittelten und numerisch-mechanisch berechneten Spannungsdehnungslinien FKV-umschnürter Betonzylinder
W: Umschnürung durch Wickelrohr ($n = 3$), B1 – B3: Flechtrohr mit 4,6 und 7 Lagen

Zur weiteren Verbesserung der Übereinstimmung experimentell ermittelter Spannungsdehnungslinien mit numerisch-mechanischen könnten Sensitivitätsanalysen eingesetzt werden (Hokeš et al. 2016).

6.10. Zusammenfassung

Die Untersuchungen der ersten Versuchsreihe an FKV-umschnürten Betonzylindern zeigen, dass nicht nur gewickelte Rohre aus CF-EP zur Drucktragfähigkeitssteigerung eingesetzt werden können, sondern auch geflochtene.

Im Hinblick auf die Anwendung des FKV für verzweigte Knoten wird für die zweite Versuchsreihe ein Materialkonzept mit Carbon- und Glasfasern für die Steh- bzw. Flecht-fäden gewählt. Die Ergebnisse der Proben bleiben hinter denen mit analytischen Modellen prognostizierten Drucktragfähigkeitssteigerungen zurück. Zwar erhöhen die CF-GF-EP-Rohre die Biegetragfähigkeit deutlich, für eine Druckbeanspruchung bilden sie jedoch neben der erreichten größeren Duktilität keinen Vorteil.

Für FKV-umschnürte Betonzylinder mit annähernd in Umfangsrichtung ausgerichteten Fasern sind analytische Modelle aus der Literatur hoher Ergebnisgüte vorhanden. Allerdings ist das Verhalten von Probekörpern mit geflochtener Umschnürung mit diesen Modellen weniger genau zu prognostizieren. Auch in der numerisch-mechanischen Berechnung zeigt sich für die Ergebnisse der Proben mit Wickelrohren eine bessere Übereinstimmung als für die Proben mit

geflochtenen Rohren. Dementsprechend werden in weiteren Versuchen sowohl für Steh- als auch Flechtfäden Carbonfasern eingesetzt.

7. Untersuchung an betongefüllten CF-EP-Tragknoten

7.1. Ziel und Ausgangslage

Untersuchungsziel ist die experimentelle Überprüfung der Tragfähigkeit von verzweigten Hybrid-Tragknoten, die für typische Lasten eines Tragwerks ausgelegt werden. Die Untersuchungen an betongefüllten FKV-Verzweigungen sind auszugsweise veröffentlicht (Möhl et al. 2017; Jonas et al. 2018a).

Das Tragverhalten und die Tragfähigkeitssteigerung durch geflochtene FKV-umschnürte, betongefüllte Rohre wurde in zwei Versuchsreihen an Zylindern untersucht (Jonas und Knippers 2017, Jonas et al. 2019, Kapitel 6). Diese Ergebnisse dienen als Grundlage für ein Verständnis der Werkstoffe, der Dimensionierung, des Verbundverhaltens und der Versuchsdurchführung.

7.2. Experimentelle Untersuchung an Hybrid-Knoten

In dieser Versuchsreihe werden verzweigte Tragknoten, die im Vergleich zu den vorangegangenen Versuchen eine komplexe Geometrie aufweisen, in Beton-FKV-Konstruktionsart konzeptioniert, hergestellt und geprüft. Anhand mehrerer Probekörper in einem für das Bauwesen relevanten Maßstab werden die technische Umsetzung und Leistungsfähigkeit erprobt. Die Praktikabilität und die Grenzen der entwickelten Technik zum Beflechten mit kontinuierlicher Fadenanordnung, die Herstellung der FKV-Umschnürung und deren Reproduzierbarkeit sind neben dem Tragverhalten und der Ermittlung von Traglasten ebenfalls Versuchsziele.

Die verzweigten Bauteile werden hierzu mit unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und Belastungen in quasi-statischen Druckversuchen getestet. Durch die unterschiedliche Lagerung werden zwei Extreme der möglichen Beanspruchungskombinationen in den Probekörpern erzeugt und geprüft. Dies sind normalkraftdominierte beziehungsweise querkraft- und momentendominierte Beanspruchungen, welche bei in Bauwerken eingesetzten Tragknoten vorkommen können. Verzweigte Stützen, deren Stützenköpfe mit Zugbändern verbunden sind, werden häufig derart ausgelegt, dass sich für die maßgebende Lastkombination überwiegend eine Normalkraftbeanspruchung in den Tragknoten einstellt und die Beanspruchung aus Biegemomenten gering bleibt (vgl. Kapitel 4, Bild 49). Die zweite Beanspruchungskombination deckt Anwendungsfälle ab, bei denen resultierend aus ungünstiger Laststellung Biegemomente auftreten oder keine Zugglieder angeordnet sind beziehungsweise auskragende Verzweigungen geplant werden.

Die Serien unterscheiden sich neben der Belastungsart hinsichtlich der Untersuchungsparameter, der Lagenanzahl des FKV sowie der Fadenanordnung (Tabelle 32).

Tabelle 32: Übersicht der experimentellen Versuche an betongefüllten CF-EP-Verzweigungen mit drei Schenkeln

Reihe	d _c	Art	Textil	Belastung	Anzahl	Parameter
Nr.	mm	-	-	-	-	-
3_1	125	CF-EP	triax. Geflecht	Druck	7+3	Lagenanzahl
3_2	125	CF-EP	triax. Geflecht	Biegung	7+1	Fadenanordnung

Die Geometrie der Probekörper weist drei Schenkel mit einer Länge von 170 mm auf, deren Achsen in einer Ebene liegen. Die Winkel zwischen den Schenkeln betragen je 120° und die Durchmesser der Kreisquerschnitte an den Enden je 125 mm. Zwischen den Schenkeln werden die sich kreuzenden Zylinder ausgerundet.

In der Regel werden zwei Lagen Flechttextil bezogen auf die Enden der Schenkel angeordnet. Dazu wird die planare Verzweigung mit drei Schenkeln dreimal umflochten (Bild 79). Die Druckprobekörper sind mit zwei oder vier Lagen ausgestattet. Die Biegeproben werden mit unterschiedlicher Anordnung an Stehfäden ausgeführt, die in der Verteilung und Anzahl variiert werden (Bild 127).

Die Proben der Serien B_1 und D_1 sind identisch aufgebaut. Sie sind mit zwei Geflechtlagen ausgestattet, wobei die Stehfäden jeweils gleichmäßig über den Umfang verteilt sind (Bild 128). Die Proben gleicher Art werden unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt.

Die Serie B_2 enthält zu vier Bündeln zusammengefasste Stehfäden. Die zwischen den Schenkel liegenden Bündel im Zugbereich enthalten dreifach gefachte Rovings, die gegenüberliegenden einfach gefachte und die dazwischen angeordneten Bündel zweifach gefachte Rovings. Die Serie B_3 enthält ein Bündel an Stehfäden, das abgestuft gefacht in der Zugzone des Querschnitts angeordnet ist.

Die Serie D_2 ist mit vier Geflechtlagen ausgestattet. Das Textil der Serie D_3 besteht aus zwei Lagen biaxialem Geflecht ohne Stehfäden. Durch die Wahl der Probekörperkonfigurationen sollen die Widerstände gegenüber unterschiedlichen Beanspruchungen und die Auswirkung der variierten Stehfadenanordnung bei querkraft- und momentendominierter Beanspruchung untersucht werden. Ziel der Druckversuche ist es, die mögliche Tragfähigkeitssteigerung umschnürten Betons der komplexen Verzweigungsgeometrie zu untersuchen sowie den Einfluss der Stehfäden auf die Drucktragfähigkeit zu ermitteln.

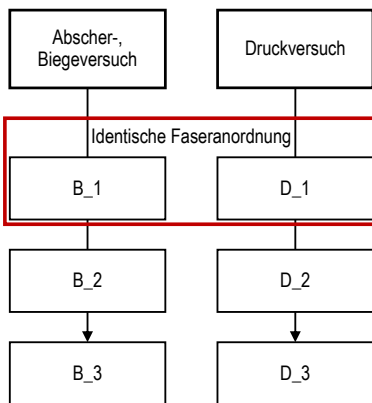


Bild 127: Probenserien für Versuchsreihe 3, Experimentelle Untersuchung an Hybrid-Verzweigungen

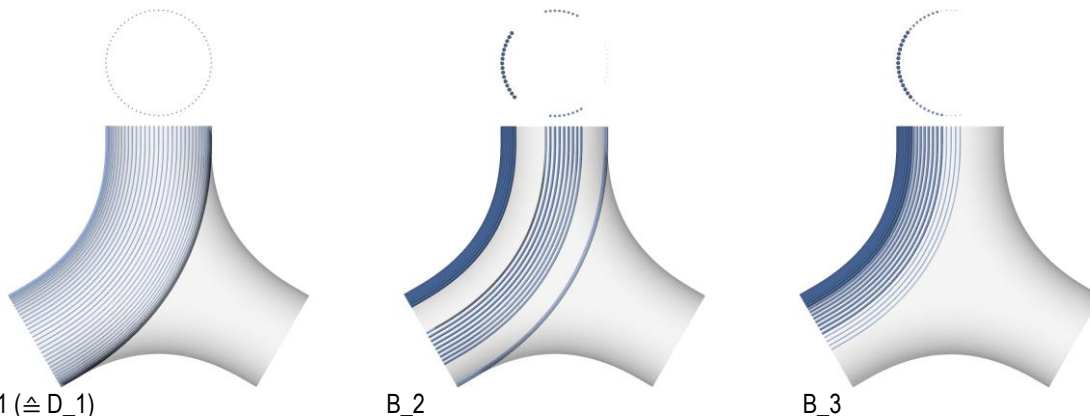


Bild 128: Schema der Stehfadenanordnung für die Verzweigungen der Biegeprüfung für eine Lage einer Umflechtung mit 1- bis 3-fach gefachten Rovings (vgl. triaxialer Geflechtaufbau Bild 78)

7.2.1. Herstellung

Die Herstellung eines Tragknotens (Bild 129) gliedert sich in vier Schritte: Das Fräsen eines formgebenden Flechtkerns, das Flechten des verzweigten Textils, die Imprägnierung zum FKV und das Füllen der FKV-Umschnürung mit Beton.

Basierend auf CAD-Daten der Verzweigung werden verzweigte Formstücke aus expandiertem Polystyrol Hartschaum der Druckfestigkeit 0,3 MPa (3035 CS WLG 039) mittels eines Roboters mit sechs Achsen gefräst. Die Platten werden hierzu stehend montiert und von beiden Seiten bearbeitet (Bild 129 A).

Anhand in den Stirnseiten der Verzweigungen eingeklebter Halterungen wird der Flechtkern in das Bohrfutter des Roboters eingespannt, der den Flechtkern durch das Flechtrad mit bis zu 144 Flechtfäden (24k 1600 tex, $E = 240$ GPa, $f_u = 4300$ MPa, $\epsilon_u = 1,8\%$, $\rho = 1,78$ g/cm³, aus Datenblatt) und 72 Stehfäden aus Kohlenstofffasern (48k 3200 tex, $E = 250$ GPa, $f_u = 4300$ MPa, $\epsilon_u = 1,7\%$, $\rho = 1,77$ g/cm³, aus Datenblatt) führt (zum Prozess s. Kapitel 5.3.4). Es stellt sich ein Flechtwinkel von circa $55^\circ \pm 5^\circ$ ein (Bild 129).

Obwohl die Druckfestigkeit des Kernmaterials deutlich über der durch die Vakuuminfusion erzeugten Beanspruchung liegt, wird es deformiert. Die Forminstabilität ist vermutlich auf chemische Prozesse oder deren Wärmeentwicklung zurückzuführen.

Zur Imprägnierung wird deshalb die Handlamination angewendet (Harz RIM 135 und Härter RIM 137 im Verhältnis 10:3, $E = 3,1$ GPa, $f_u = 70$ MPa, $\epsilon_u = 7 - 10\%$, $\rho = 1,19$ g/cm³, aus Datenblatt).

Nach der Imprägnierung ruhen die Proben circa einen Tag und werden anschließend 15 h bei 80 °C getempert. Der Flechtkern wird mit Aceton aufgelöst und aus dem FKV-Bauteil entfernt. Die Enden der steifen Hüllen werden zugeschnitten, bevor sie vermessen werden und eine Schalung zum Verschließen zweier Enden für das Betonieren angebracht wird. Die Proben werden in zwei Schritten mit Beton gefüllt und dieser mittels Innenrüttler verdichtet. An der oberliegenden Öffnung der Verzweigung wird der Beton glatt abgezogen. Nach einem Tag werden die Schalungen entfernt und die Bauteile (14 FKV-umhüllte Betonkörper sowie vier Referenzbetonprüfkörper) im Wasserbad eingelagert. Zur Probenvorbereitung werden die Enden der Bauteile trennschleifend mittels eines Nassschneiders auf eine Schenkellänge von 150 – 170 mm zugeschnitten. Die Referenzproben werden mittels einer Betonschalung, dem Negativ eines Fräskerns, hergestellt.

Tag 1: Betonage

Tag 2: Ausschalen, Transport, Lagerung im Wasserbad

Tag 14: Beginn Probenvorbereitung, Lagerung im Raum

Tag 29: Prüfung mit verschieblicher Lagerung

Tag 50: Prüfung mit eingespannter Lagerung

Es werden DMS mit einer Messgitterlänge von 30 mm auf einer Trägerfolie von 40 mm in Dreileitertechnik verwendet. Bei den Serien der Biegeprüfung werden für die Serie B_1 neun DMS und für die Serien B_2 und B_3 jeweils fünf DMS angeordnet (Bild 139).



A: Fräsen von Formteilen



B: Beflochtene Verzweigung (CF)



C: Imprägnierte CF-EP-Hülle



D: Tragknoten nach der Betonage

Bild 129:
Herstellung verzweigter betongefüllter
CF-EP-Tragknoten
nach Jonas et al. (2018a)

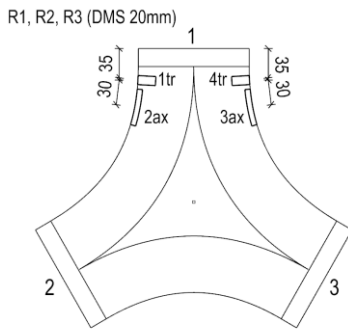


Bild 130:
Anordnung der DMS auf der Betonoberfläche der verzweigten Referenzprobekörper

Auf die Referenzproben R1 – R3 werden jeweils vier DMS geklebt (Bild 130). Die Serien der Druckprüfung D_1 und D_2 werden ebenfalls mit neun DMS ausgestattet, die Serie D_3 mit acht DMS, jedoch gegenüber den Biegeproben an überwiegend anderer Position, um die erwarteten maßgebenden Stellen der unterschiedlichen Belastungsarten erfassen zu können (Bild 143).

7.2.2. Eigenschaften des Festbetons

Die Eigenschaften des Festbetons werden von Seiten des Transportbetonwerks anhand insgesamt sechs Probewürfel nach DIN EN 12390-3 an den Tagen der Bauteilprüfungen bestimmt (Tabelle 33). Der Elastizitätsmodul wird dynamisch ermittelt.

Tabelle 33: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28, 49 Tage)

n=3	ρ_c	$f_{c,cube,28d}$	$f_{c,cube,49d}$	$E_{c,dyn}$
	t/m ³	N/mm ²	N/mm ²	GPa
\bar{x}	2,37	66,3	63,4	40,9
s	0,01	1,3	7,0	0,9
v	0,00	0,02	0,11	0,02

Die Würfeldruckfestigkeiten werden mit dem Faktor 0,82 (Loch 2014) in Zylinderdruckfestigkeiten zu $f_{c,cyl,28d} = 54,4 \text{ N/mm}^2$ und $f_{c,cyl,49d} = 51,0 \text{ N/mm}^2$ umgerechnet. Der später ermittelte Festigkeitswert ist kleiner und weist eine größere Streuung auf.

7.2.3. Ergebnisse der FKV-Materialprüfung

Ziel der Materialprüfung ist es, die mechanischen Eigenschaften der zwölf Flachproben (Tabelle 34) zu ermitteln, von denen je sechs in axialer und transversaler Laminatrichtung geprüft wurden. Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 527-4 (Probekörper Typ 3 mit Aufleimern aus GF-EP-Laminat), jedoch weicht die Breite und Dicke der Proben ab ($b = 30 \text{ mm}$, $t = \sim 4 \text{ mm}$). Die Breite wurde wegen der Einheitszelle des Geflechts der DMS ($l = 28 \text{ mm}$, $l_{Gitter} = 20 \text{ mm}$) vergrößert; die Dicke ergibt sich herstellungsbedingt aus dem gewählten Lagenaufbau des Laminats. Dem schlagartigen Versagen der Proben mit einem Flechtwinkel von $55^\circ \pm 5^\circ$ im Zugversuch geht ein hörbares, für FKV typisches Knistergeräusch voraus.

Tabelle 34: Experimentell an Flachproben (je n = 6) bestimmte Materialeigenschaften der CF-CF-EP-Verbunde, basierend auf triaxial geflochtenem Textil

S.	VR3 CC 55°							
	Axial				Transversal			
	$f_{ten,x}$	$\epsilon_{ten,x}$	E_x	ν_{xy}	$f_{ten,y}$	$\epsilon_{ten,y}$	E_y	ν_{yx}
	MPa	mm/m	GPa	-	MPa	mm/m	GPa	-
\bar{x}	368,7	12,11	33,87	0,43	127,7	15,97	15,85	0,24
s	35,2	0,76	2,94	0,10	7,6	4,82	1,71	0,04
v	0,10	0,06	0,09	0,22	0,06	0,30	0,11	0,16

Formelzeichen s. Tabelle 21. Indizes der Querdehnzahlen nach int. Notation.

Der Faservolumengehalt beprobt nach DIN ISO 1172 an je zwei Proben beträgt für die axialen Proben im Mittel 35,9 % und für die transversalen 36,7 %. Er liegt innerhalb des in Versuchsreihe 1 ermittelten Bereichs (Tabelle 10).

Der Mittelwert der Festigkeit der transversalen Proben (127,7 MPa) liegt im Vergleich mit den Festigkeiten aus VR1: B1, B2, B3 (Tabelle 10) an der unteren Grenze des Bereichs der drei Werte. Eine konkrete Einordnung ist wegen der unterschiedlichen Textile und Faserwinkel nur bedingt möglich.

7.2.4. Versuchsaufbau der Belastungsversuche

Der Versuchsstand wird so entworfen, dass sich Belastungssituationen für verzweigte Tragknoten herstellen lassen, die sich entweder durch eine überwiegende Beanspruchung aus Normalkräften oder einer Kombination aus Querkraften und Momenten auszeichnen. Der Versuchsstand eignet sich zum Einstellen in konventionell verwendeten Druckprüfanlagen (Bild 131).

Der Versuchsstand für ebene Verzweigungen mit drei Schenkeln ist so konzipiert, dass er einer maximalen Prüfkraft von 3500 kN widersteht und symmetrische Probekörper mit unterschiedlichen Schenkellängen, Winkeln zwischen den Schenkeln sowie Durchmessern aufnehmen kann. Für die Probe ist entweder eine verschiebliche oder eine eingespannte Lagerung konfigurierbar (Bild 132, Bild 133). Maximal können Proben mit Schenkeldurchmessern von 200 mm geprüft werden. Dies entspricht bei $f_{cc}/f_c \sim 2$ circa einem Beton mit $f_c = 50 \text{ N/mm}^2$. Das lichte Maß im Inneren des Trogs beträgt $690 \times 270 \text{ mm}$. Bei einem Winkel zwischen den Schenkeln von 120° können Proben mit Schenkellängen bis zu 290 mm geprüft werden.

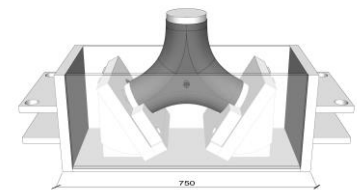
Bei verdreh-verschieblicher Lagerung (Bild 132) können die zusammen montierten Komponenten, die Platte mit halbkreisförmiger Aussparung, die aufgekantete L-förmige Platte und die abgerundeten Keile um den Auflagerpunkt der Probe, dem Mittelpunkt des stirnseitigen Querschnitts, rotieren (Bild 134). Drehungen sind dadurch zwängungsfrei für die Probe. Verschiebungen finden statt, indem sich die Auflager samt Auflagerbank auf dem Trog bewegen.

Bei Proben mit 120° Schenkelwinkel und fester Lagerung stellt sich ein Verhältnis der Auflagerkräfte von circa $F_V / F_H = 1,31$ ein.

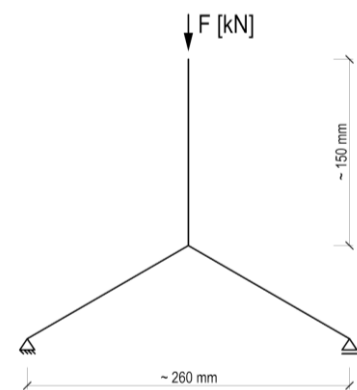
Das Verhältnis der Reibungskraft der Stahlteile zur vertikalen Auflagerkraft hingegen ist $F_R / F_V = 0,2$. Somit wird sich ohne Festhaltung eine Verschiebung in Längsrichtung des Trogs einstellen. Der Betrag liegt jedoch unter der freien Verschiebung, da er um den Reibungskraftanteil gemindert wird. Die Reibungskraft an einem Auflager ist maximal $1750 \text{ kN} \cdot 0,2 = 350 \text{ kN}$. Dadurch kommt es zu einer zusätzlichen Normalkraftbeanspruchung des Probekörpers. Um deren Einfluss zu untersuchen, wird die Reibkraft in einem separat durchgeführten Versuch durch eine Rollenlagerung herabgesetzt (D_1_2).



Bild 131:
VR3: Setup Druck und Biegeversuche

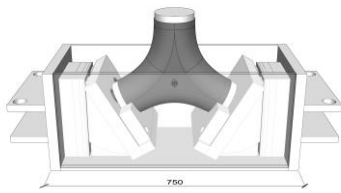


Versuchsstand

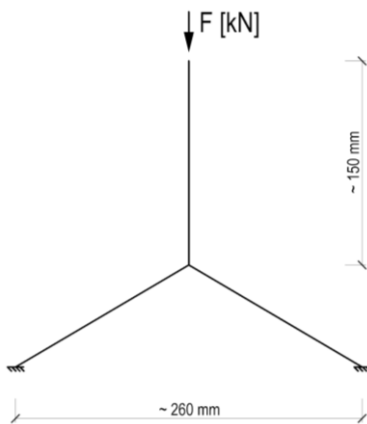


Statisches System

Bild 132:
Versuchsstand zum Belastungstest von Verzweigungen mit verdreh-verschieblicher Lagerung



Versuchsstand



Statisches System

Bild 133:
Versuchsstand zum Belastungstest von Verzweigungen mit eingespannter Lagerung

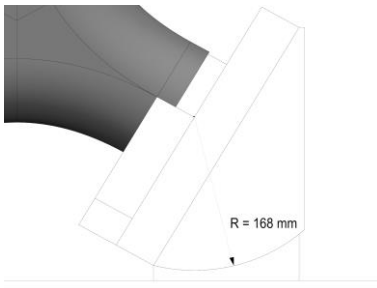


Bild 134:
Auflagerdetail des Versuchsstands der verdreh-verschieblichen Konfiguration

Bei der eingespannten Lagerung werden hinter die Auflager Futterplatten gesetzt, die durch Druckkontakt zwischen den Auflagerkeilen einen Kraftübertrag der Probe zu den stirnseitigen, versteiften Wänden des Trogs gewährleisten. Ein Verdrehen und Verschieben der Auflager wird dadurch blockiert. Der horizontale Anteil der Auflagerkraft der drucknormalkraftbeanspruchten Probe wird von den stirnseitigen Trogwänden aufgenommen und als Zugkraft in die Längswände sowie den Boden des Trogs eingeleitet.

Die Auflager (Bild 134) bestehen aus einer L-förmigen Platte mit Aufkantung, in die je nach Durchmesser des Probekörpers ein Stahlteil mit halbkreisförmiger Aussparung eingelegt wird. Die L-förmigen Auflager sind auf zwei Keile montiert, deren Unterkante einen Radius aufweist. Die Gegenstücke, die Auflagerbänke, weisen auf der Oberseite ebenfalls einen Radius auf, wobei die Unterseite gerade ist.

Belastungen auf die Probekörper werden an allen drei Schenkeln stirnseitig auf die Betonfläche ($d_{c,soll} = 125 \text{ mm}$) anhand je einer Lastplatte aus Stahl ($d_s = 120 \text{ mm} \times t_s = 20 \text{ mm}$) aufgebracht. Die unteren beiden Schenkel sind zusätzlich radial durch eine Platte mit halbkreisförmiger Aussparung gehalten. Die Kontaktfläche zwischen Stahlaufleger und FKV besteht je auf der Länge eines halben Umfangs und auf einer Breite von 20 mm (Bild 134).

Bei den zerstörenden Prüfungen handelt es sich um quasi-statische Belastungsversuche von Tragknoten. Versuchsziele sind die Ermittlung von Lastverformungskurven, das Detektieren von Dehnungen sowie Erkenntnisse über die Versagensart. Die Prüfung erfolgt an einer hydraulischen Prüfanlage mit 6000 kN Höchstdruckkraft, in Anlehnung an DIN EN 12390-13.

Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 1 mm/min und die Vorkraft 5 kN. Die Sensoren werden bei Erreichen der Vorkraft genullt. Drei Messdatenerfassungsgeräte werden zur Aufzeichnung von insgesamt bis zu neun Dehnmessstreifen und sechs induktiven Wegaufnehmern eingesetzt.

Die Messgrößen sind die Prüfkraft, die Dehnungen an verschiedenen Stellen der Oberfläche der FKV-Hülle sowie die seitlichen Verformungen im Zentrum der Verzweigung zu beiden Seiten. Die obere Lastplatte ist verdrehbar gelagert, deshalb wird der Abstand der Lastplatten anhand von vier Wegaufnehmern gemessen, wobei die mittlere Verschiebung bereits aus drei Messstellen bestimmt werden kann.

7.2.5. Ergebnisse der Belastungsversuche

Abscher-, Biegeversuch

Bei verdreh-verschieblicher Lagerung ist ein Versagen der Probekörper durch Abscheren eines oder der beiden unteren Schenkel festzustellen. Die Auflagerkante beansprucht die Fasern in Querrichtung und schert die Hülle aus FKV ab. Die Proben werden durch die radiale Auflagerung deutlich deformiert.

Weiterhin ist ein Riss im FKV emittierend von dieser Kante festzustellen. Die Risse verlaufen jeweils seitlich eines unteren Schenkels und schließen sich oberhalb dessen (Bild 135).

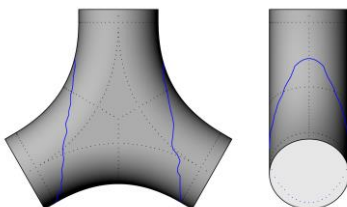


Bild 135
VR3: Abscher- und Biegeversuch:
Beobachtete Rissverläufe (Prinzip)

In der Seitenansicht des Knotens setzt der Riss seitlich des oberen Schenkels an und verläuft schräg bis zur unteren Auflagerkante (Bild 136).

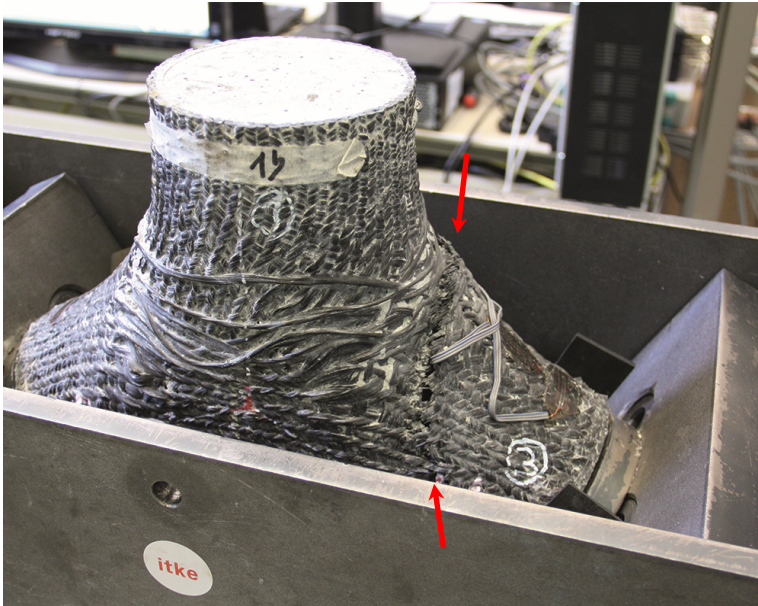


Bild 136: VR3: Probe B_1_2 nach dem Abscher- und Biegeversuch: Schenkel 3 abgesichert (obere Platte zur Lasteinleitung bereits entfernt)

Bei Probe B_1_1 scheren zwei Schenkel ab, bei allen anderen Proben jeweils einer. Akustisch wahrnehmbar ist mit voranschreitender Rissbildung mehrfaches Knistern, nicht jedoch ein Knall, wie bei dem schlagartigen Versagen der Zylinderdruckproben.

Die Mittelwerte der maximalen Widerstände der sieben Proben der Serien B_1, B_2 und B_3 mit verdreh-verschieblicher Auflagerkonfiguration des Versuchsstands liegen mit Werten zwischen 693 kN und 776 kN in einem ähnlichen Bereich (Bild 137). Im Vergleich zu einem Prüfling (Ref.) ohne FKV-Umhüllung zeigt sich die Beteiligung des FKV-Verbunds beim Lastabtrag. Die Referenzprobe kann wegen der geringen Zugfestigkeit nur vergleichsweise geringen Lasten von 56 kN standhalten. Der Widerstand der Serie B_1 mit verdreh-verschieblicher Auflagerung ist geringer als der mit eingespannter Lagerung ermittelte Widerstand der baugleichen Serie D_1.

Um den Einfluss der Erhöhung der Traglast durch eine Bogentragwirkung resultierend aus Horizontalkräften, die durch Reibung verursacht werden, zu untersuchen und einzuordnen, wird zusätzlich ein Probekörper (D_1_2) mit Rollen anstatt mit der oben beschriebenen verdreh-verschieblichen Auflagerung geprüft. Die Höchstkraft weist entsprechend einen kleineren Wert ($D_{1,2} = 597 \text{ kN}$) als der kleinste Einzelwert ($B_{2,2}$: 675 kN) der sieben anderen Prüfkörper auf.

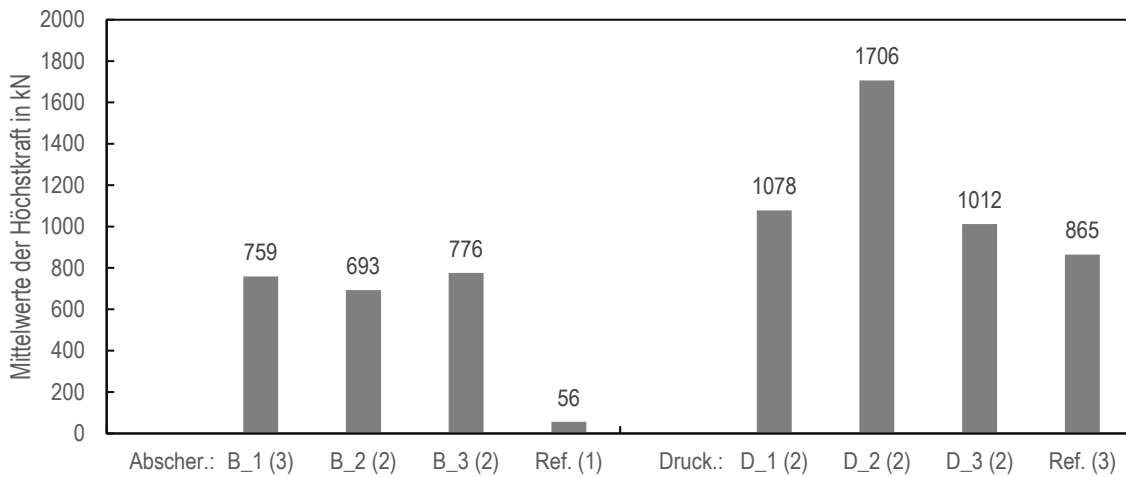


Bild 137: VR3: Mittelwerte der Tragfähigkeiten aller Serien der geprüften Hybrid-Tragknoten

B_1: FKV bestehend aus zwei Lagen Flechttextil mit gleichmäßig verteilten Stehfäden, B_2: zwei Lagen, mehrere Stehfadenbündel, B_3: zwei Lagen, je ein abgestuftes Stehfadenbündel, Ref: nur Beton ohne FKV

D_1: FKV bestehend aus zwei Lagen Flechttextil mit gleichmäßig verteilten Stehfäden (wie B_1), D_2: vier Lagen, gleichmäßig verteilte Stehfäden, D_3: zwei Lagen, keine Stehfäden

Die Lastverschiebungskurven der Proben stellen den gemittelten Abstand der Lastplatten als Mittelwert der Messungen von vier Wegaufnehmern und die zugehörigen Kraftwerte dar (Bild 138). Unterscheidbar sind mindestens drei Bereiche: Während bei Belastungsbeginn die Prüfkraft überproportional ansteigt, ist sie im mittleren Bereich nahezu proportional. Nach Erreichen der Höchstkraft zeigt sich in allen Fällen mit zunehmender Verformung eine voranschreitende Schädigung mit sich verringerndem Bauteilwiderstand.

Die Deformationen des Versuchsstands sind im angegebenen Wert der vertikalen Verformung enthalten. Die Kurve der Probe B_1_1 ist im Vergleich zu den anderen nach rechts verschoben. Dies und die Sprungstelle bei 5 mm Verformung kann auf Effekte der Erstprüfung, wie erstmaliges Setzen der Bauteile des Versuchsstands, zurückzuführen sein.

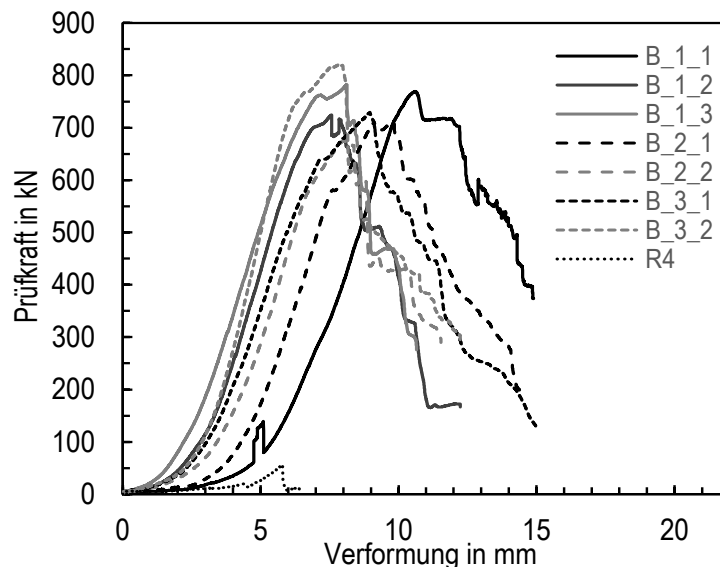


Bild 138: VR3: Abscher- und Biegeversuch: Kraft-Weg-Diagramm (Bezeichner s. Bild 137)

Die Auswertung der Dehnmessstreifen exemplarisch für Probe B_1_3 zeigt Bild 140. Einander gegenüberliegende DMS-Paare (1,9; 2,8; 3,7; 4,6) zeigen Tendenzen ähnlicher Kurvenverläufe, jedoch keine Kongruenz. Lediglich die DMS 1 und 9 weisen auf Stauchungen hin. Die an ähnlicher Stelle, aber in transversaler Richtung angeordneten DMS 2 und 8 zeigen Zugdehnungen an. DMS 3 und 7 zeigen im Mittel überwiegend geringere Dehnungswerte als der in der Mitte des Bauteils angebrachte DMS 5.

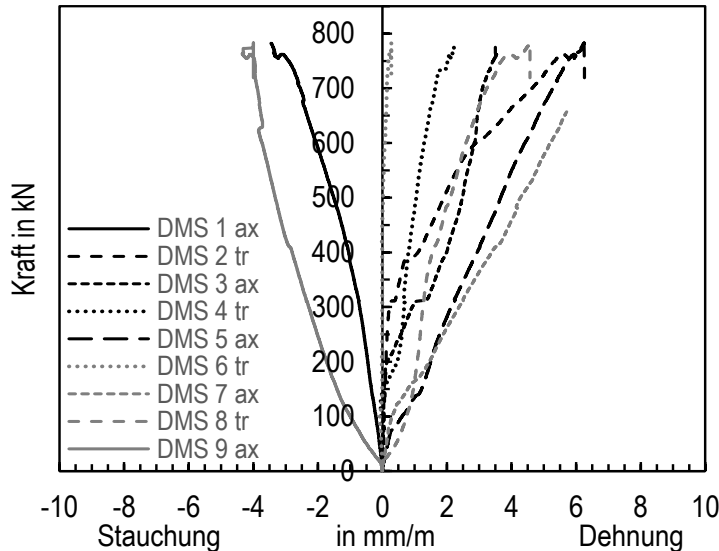


Bild 140: Kraft-Dehnungsdiagramm der Probe B_1_3

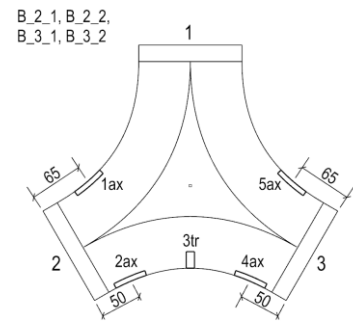
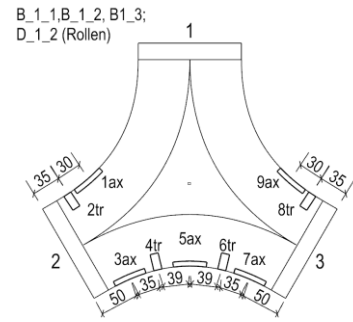


Bild 139: Anordnung der DMS auf der FKV-Hülle für die verzweigten Probekörper der Biegeprüfung

Fazit Abscher-, Biegeversuche

Der Widerstand der ummantelten Proben ist gegenüber den Referenzproben deutlich erhöht. Die unterschiedliche Stehfadenanordnung in den auf Biegung geprüften Proben führt nur zu geringfügig unterschiedlichen Widerständen.

Druckversuche

Kennzeichnend für das Versagen der Druckprobekörper ist ein Reißen der Hülle seitlich zwischen den Schenkeln (Bild 141). Die Rissbildung beginnt stets bei einem Schenkel und schreitet teilweise bis zum nächsten voran. Teilweise verlagert sich der Riss zur Vorder- oder Rückseite bzw. verläuft gezackt zur gegenüberliegenden Seite (D_2_1), wobei er der Struktur der Faserorientierung der Einzellagen des mehrlagigen FKV folgt. Im Bereich der aufnehmbaren Höchstkraft ist ein knisterndes Geräusch zu vernehmen, ein schlagartiger lauter Knall ist häufig erst zum späteren Zeitpunkt nach einem Kraftabfall zu hören. Im Nachbruchbereich bilden sich im weggesteuerten Versuch weitere Kraftplateaus aus, aber auch plötzliche Kraftabfälle (Bild 142, D_2_2).

Die Kraft-Verformungskurven der zweilagig umschnürten Probekörper ähneln sich in ihrem tendenziellen Verlauf. Sie können näherungsweise in drei Bereiche mit fließenden Übergängen eingeteilt werden. Im Anfangsbereich nimmt die Kraft im Verhältnis zur Verformung überproportional zu, es folgt ein näherungsweise linearer Bereich, der zunehmend in einen nichtlinearen Bereich bis zum Schädigungsbeginn übergeht. Nach Überschreiten des Scheitels wechselt die Steigung sprunghaft und die Fähigkeit zur Kraftaufnahme ist rückläufig.

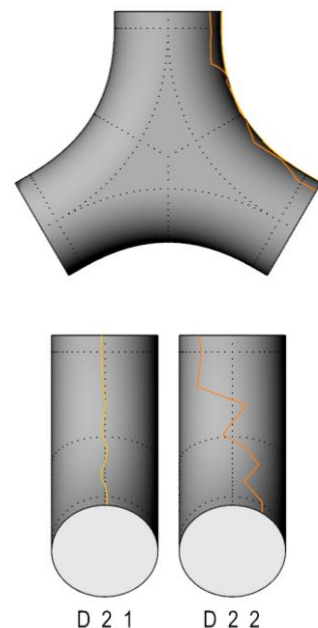


Bild 141: VR3 Druckversuche: Beobachtete Rissverläufe durch den FKV (Prinzip)

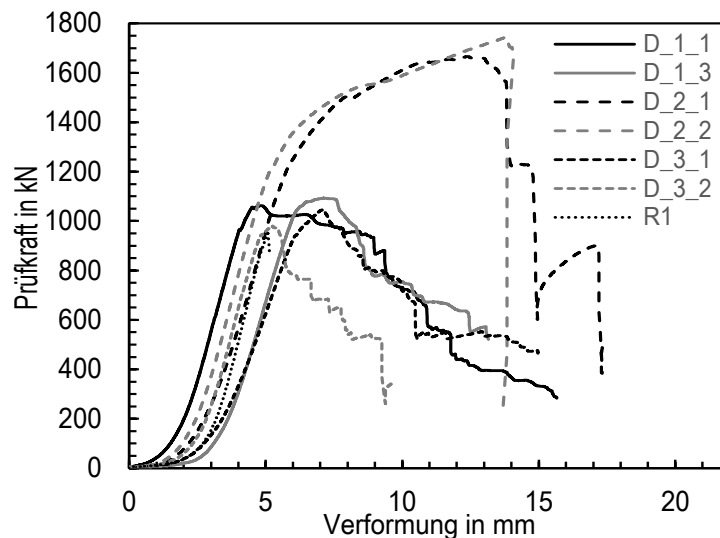


Bild 142: VR3: Druckversuche: Kraft-Weg-Diagramm

Die Kraft-Verformungskurven der vierlagig umschnürten Probekörper unterscheiden sich sowohl in Bezug auf die Höchstkraft, die deutlich höher liegt, als auch durch einen weiteren näherungsweise linearen Bereich und eine geringere Energieaufnahme nach dem Kraftmaximum. Der zweite lineare Bereich markiert eine Ähnlichkeit zum Tragverhalten effektiv umschnürter Betonzylinder oberhalb der einaxialen Betondruckfestigkeit.

Die Kraft-Dehnungslinien zeigen nichtlineare Verläufe. Die Dehnung nimmt mit steigender Prüfkraft verstärkt überproportional zu. Nahe dem Kraftmaximum sind im Vergleich zum restlichen Verlauf besonders große Dehnungen festzustellen (D_1_3). Sprunghafte oder gezackte Verläufe in der Nähe der Höchstkraft sind vermutlich während des Versagens der Hülle gemessen worden, bei dem sich durch dynamische Prozesse und plötzlichem Faserversagen in der Hülle Dehnungen schlagartig vergrößern und verkleinern können.

Die Lage der DMS an den Probekörpern zeigt Bild 143. Mit dem Erreichen der Höchstkraft werden auch die maximalen Dehnungswerte registriert (Bild 144). DMS 2 und 8, die gegenüberliegend in Längsrichtung angeordnet sind, werden gestaucht, alle anderen werden gezogen. An der Probe D_1_3 werden Dehnungswerte im Bereich von circa $-6 - 6$ mm/m registriert. Hier zeigen DMS 4, 5 und 6 geringe Werte an, DMS 7 registriert Werte nahe Null. DMS 1 und 9 weisen auf Umfangsdehnungen im Lasteinleitungsbereich hin und dokumentieren bei Probe D_2_2 überwiegend in Relation zu den anderen DMS die größten Dehnungen, bevor sie ausfallen.

Bei Probe D_2_2 (Bild 145) sind die Kraftwerte gegenüber der Hülle mit zwei Lagen um circa 800 kN größer, die registrierten gültigen Dehnungen liegen im Bereich von circa $-8 - 8$ mm/m. Im Unterschied zu Probe D_1_3 ist die Abweichung an den gegenüberliegenden DMS-Paaren zueinander geringer. Ferner werden für die DMS 4 und 6 Werte registriert, die näher an den DMS 3 und 7 liegen als an dem nahezu nicht gezogenen DMS 5 in der Mitte der Probe.

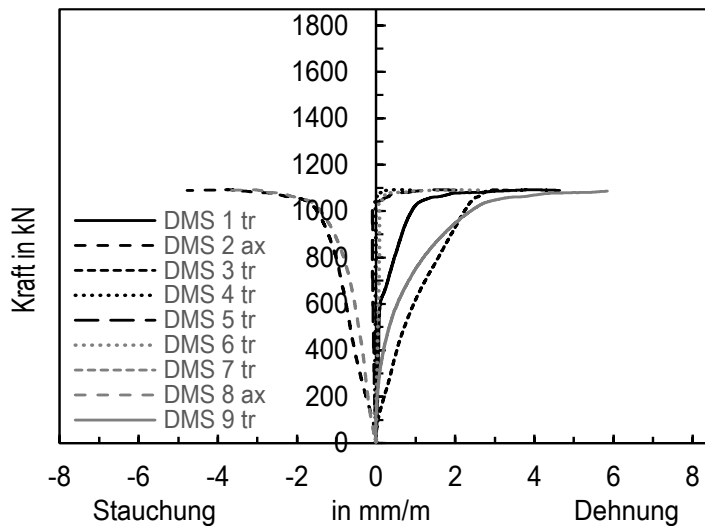


Bild 144: Kraft-Dehnungsdiagramm (DMS) der Probe D_1_3

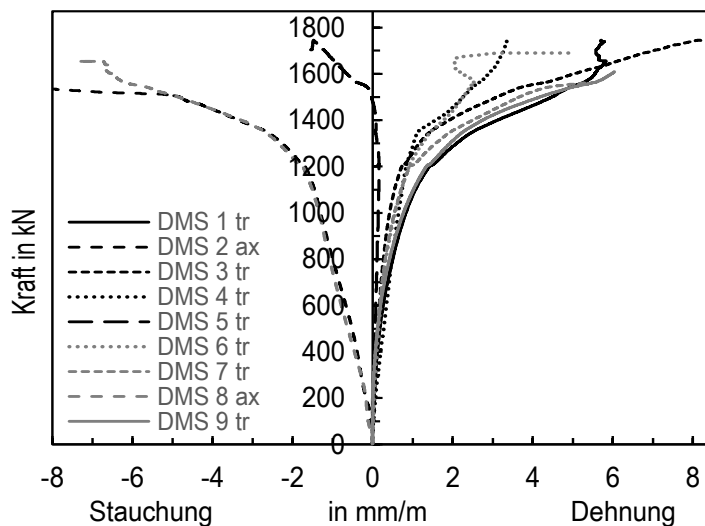


Bild 145: Kraft-Dehnungsdiagramm (DMS) der Probe D_2_2

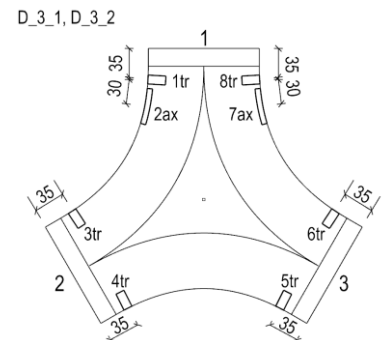
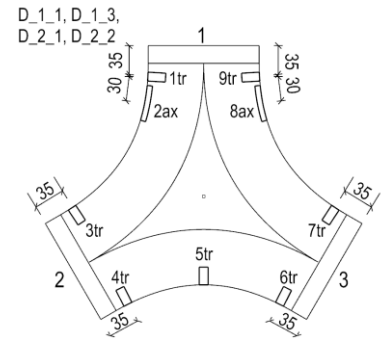


Bild 143: Anordnung der DMS auf der FKV-Hülle der verzweigten Probekörper der Druckprüfung

Tabelle 35 listet die im Versuch erreichten maximalen Prüfkraft der neun Probekörper. Zum Vergleich der Proben untereinander werden näherungsweise Normalspannungen für den ersten Schenkel, der sich unmittelbar unter der Lastplatte befindet, berechnet. Nicht berücksichtigt werden in diesem Vergleich etwaige Effekte des Mitwirkens des FKV für Drucknormalkräfte (die Lasteinleitung erfolgt ausschließlich auf den Beton) sowie Spannungen in andere Richtungen im Einflussbereich der Lasteinleitung. Der Vergleich zeigt erhöhte erreichbare rechnerische Spannungen für die Proben mit FKV-Ummantelung gegenüber den Betonreferenzproben.

Die erreichbaren Widerstände steigen in Abhängigkeit der Art der Ummantelung in der Reihenfolge: biaxiales Geflecht (D_1), triaxiales Geflecht (D_1) und dem triaxialen Geflecht mit doppelter Lagenanzahl (D_2). Bezogen auf den Mittelwert der erreichten rechnerischen Spannungen der drei Betonreferenzproben weisen die Proben der Serie (D_2) mehr als den doppelten Widerstand auf (Faktor 2,17). Der Unterschied der Mittelwerte der Serien D_1 (1,37) und D_3 (1,26) zum Höchstwert der Betonreferenzproben R1 (1,10) ist geringer.

Tabelle 35: Experimentell bestimmte Widerstände der Druckproben

	d_{S1}	$t_{fkv,S1}$	F_{max}	$A_{c,S1}$	$f_{calc,S1}$	$f_{calc,S1}/f_{c,ref}$
	mm	mm	kN	mm ²	MPa	-
D_1_1	132,1	3,6	1063,1	12242	86,8	1,37
D_1_3	134,1	3,7	1092,9	12618	86,6	1,37
D_2_1	141,3	8,0	1665,9	12321	135,2	2,13
D_2_2	142,3	7,6	1746,6	12698	137,6	2,17
D_3_1	132,3	2,4	1045,8	12758	82,0	1,29
D_3_2	133,0	3,1	979,0	12638	77,5	1,22
R1	131,5	-	949,2	13581	69,9	1,10
R2	134,0	-	777,6	14103	55,1	0,87
R3	130,3	-	867,4	13324	65,1	1,03

d_{S1} Mittelwert des Außendurchmessers am Schenkel 1

$t_{fkv,S1}$ Wanddicke des FKV am Schenkel 1

F_{max} Maximal erreichte Prüfkraft

$A_{c,S1}$ Querschnittsfläche des Betons am Schenkel 1

$f_{calc,S1}$ Berechnete maximale Spannung aus $F_{max}/A_{c,S1}$

$f_{c,ref}$ Berechneter Mittelwert der Referenzproben (63,4 N/mm²)
(Bezeichner s. Bild 137)

Eine Aufnahme von Drucknormalkräften der FKV-Hülle, die in axialer Richtung eine Steifigkeit in ähnlicher Höhe des Festbetons aufweist, kann trotz Lasteinleitung auf den Betonquerschnitt nicht vollständig ausgeschlossen werden. Inwiefern die CF-EP-Hülle theoretisch am Lastabtrag beteiligt sein kann, wird anhand einer Betrachtung auf Querschnittsebene abgeschätzt, indem die maximal aufnehmbare Drucknormalkraft für die Serien R, D_1 und D_2 mit nichtlinearer Materialdefinition (PR) und dem mittleren Wert der rechnerischen Festigkeit von 63,4 N/mm² berechnet wird. Die Serie R kann eine Drucknormalkraft von 841 kN aufnehmen ($d_c = 130$ mm), die Serie D_1 950 kN ($d_c = 125$ mm, $t_{FRP} = 4$ mm) und die Serie D_2 1134 kN ($d_c = 125$ mm, $t_{FRP} = 8$ mm). Bezogen auf den Mittelwert der Prüfkraft der Referenzproben von 864,7 kN ergeben sich Werte der rechnerischen Tragfähigkeitssteigerung von 1,13 (D_1) und 1,35 (D_2). In der Berechnung unter der Annahme des Ebenbleibens der Querschnitte für Normalspannungen werden Effekte der Tragfähigkeitssteigerung durch einen mehraxialen Spannungszustand nicht berücksichtigt. Es wird angenommen, dass eine verschieden große Differenz der Faktoren der Tragfähigkeitssteigerung zwischen den rechnerisch ermittelten Faktoren, gebildet mit den experimentell ermittelten Werten auf den Effekt der Umschnürungswirkung zurückzuführen ist. Die Differenz der Faktoren beträgt für D_1 = 0,2 und für D_2 = 0,8 bzw. liegen die experimentell ermittelten Werte der Tragfähigkeitssteigerung um das 1,2- bzw. 1,6-Fache höher als die rechnerisch ermittelten.

Fazit Druckversuche

Widerstand in Umfangsrichtung bieten vor allem die Flechtäden. Die Dehnungsbehinderung soll zu einem mehraxialen Spannungszustand führen, der die Beanspruchbarkeit gegenüber nicht-umschnürtem Beton steigert. Das Aufreißen in Längsrichtung zwischen den Schenkeln kann ein erstes Indiz für das Wirken eines Innendrucks induziert durch eine Dehnungsbehinderung sein.

Die registrierten Dehnungen der paarweise angeordneten DMS sind jeweils nicht deckungsgleich. Gründe hierfür können die trotz sorgfältiger Oberflächenbehandlung im Verhältnis zur Länge des DMS grobe Struktur der Faserlagen

des FKV sein sowie die unterschiedliche Anordnung der Fasern unter den Applikationsflächen an den Messstellen zweier Schenkel.

Gegenüber nicht umschnürten Betonreferenzproben erreichen die Serie D_1 und D_3 im Mittel die 1,21-fache Traglast, die Serie D_2 die 1,97-fache.

Der geringe Unterschied der erreichten Höchstkräfte der Serien mit triaxialem (D_1) und biaxialem (D_3) Geflecht deutet auf eine untergeordnete Beteiligung der Stehfäden zum Lastabtrag in dieser Prüfanordnung hin.

Der Unterschied bzw. die Zunahme der experimentell ermittelten Faktoren zur Steigerung der Tragfähigkeit zwischen einem FKV basierend auf zweilagigem Flechttextil und einem vierlagigen bestärkt die Annahme eines Umschnürungseffekts und der wirksamen Ausbildung eines mehraxialen Spannungszustands im Beton. Ein Vergleich mit rechnerisch ermittelten Faktoren ohne Tragfähigkeitssteigerung stützt diese Annahme, da die Differenz zur Serie (D_2), ausgelegt mit der Wanddicke zur Erzielung einer effektiven Umschnürung, viermal höher ist als die der geringfügiger umschnürten Serie D_1.

7.3. Numerisch-mechanische Untersuchung an Hybrid-Tragknoten

Ziel der Untersuchung ist es, die Tragfähigkeit der im Druckversuch geprüften Knoten zu prognostizieren. Der Fokus liegt speziell auf dem Vergleich der simulierten und experimentell ermittelten Ergebnisse der Druckversuche. Diese Simulation ist aufgrund der Dehnungsbehinderung des Betons durch den FKV im Vergleich zur anderen, oben beschriebenen Belastungsart mechanisch komplexer. Es werden verschiedene Parameter, wie der Dilatanzwinkel und der Kontakt zwischen Kern und Hülle, variiert. Eingesetzt wird kommerzielle Software (ANSYS).

Elementierung und Vernetzung

Für die Komponenten, Kern und Hülle, des symmetrischen Bauteils (Schenkellänge 170 mm, davon zylindrisch 20 mm, $d_c = 125$ mm, Ausrundungsradius ~ 182 mm) werden Elemente mit quadratischer Ansatzfunktion verwendet (vgl. Kapitel 6.9.3). Schalenelemente mit 8 Knoten (SHELL 281) repräsentieren die FKV-Hülle und Volumenelemente mit 20 Knoten (SOLID 186) den Betonkern. Die Knoten der Hülle werden kongruent zu den Knoten auf der Betonoberfläche erzeugt. Anhand von Kontaktelementen (CONTA 174) werden unterschiedliche Freiheitsgrade modelliert. In den Berechnungen werden die Kontaktbedingungen zwischen „fest“, „keine Trennung“ und „reibungsbefahet“ (Reibkoeffizient: 0,4 oder 0,6) variiert.

Die FKV-Hülle ist das Resultat dreier Flechtvorgänge, bei denen jeweils ein Schenkel ausgespart wird. Dementsprechend werden die einzelnen textilen Lagen, die zwischen den Schenkeln dreifach überlappen, separat modelliert. Die mittlere Dicke einer Geflechtlage beträgt für die Serie D_1 1,8 mm für die Serie D_2 4 mm.

Inhärent für den auf Flächen mit Krümmungswechseln angewandten Flechtprozess sind die variierenden Flechtwinkel und eine unregelmäßige Faseranordnung. Versuchs-

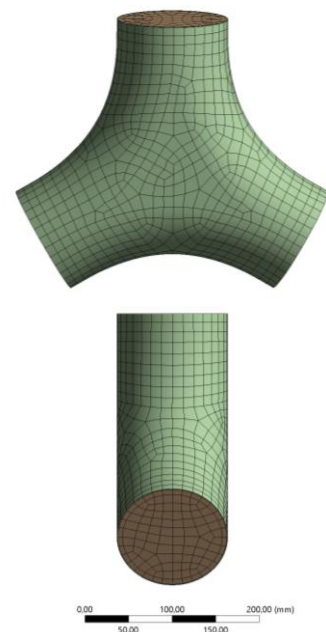


Bild 146:
Netz mit Schalen- und Volumenelementen der verzweigten Probekörper

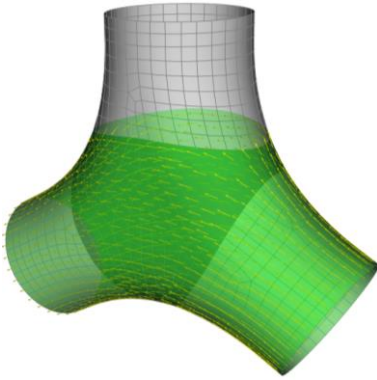


Bild 147:
Ausrichten der Elementkoordinatensysteme entlang einer Leitlinie von einer von drei geflochtenen Lagen, Pfeile markieren die resultierende x-Richtung des Laminats

gestützte Materialparameter liegen vereinfacht für einen Flechtwinkel vor.

Näherungsweise wird jedes Element der Schale anhand der Leitlinie der Kurve zwischen zwei Schenkeln ausgerichtet (Bild 147, vgl. mit Bild 129). Die drei Leitkurven werden aus dem Schnitt der Ebene, in der die Achsen der Schenkel liegen, mit der Betonoberfläche erzeugt. Sie repräsentieren gleichzeitig die geodätischen Kurven, welche die kürzesten Verbindungen zwischen den Schenkeln entlang der Oberfläche des Körpers sind.

Materialeigenschaften

Für beide Materialien fließen die Parameter aus den Werkstoffprüfungen ein (Tabelle 33, Tabelle 34). Wie für die zylindrischen Probekörper (vgl. Kapitel 6.9.3) wird für den Beton ein Werkstoffgesetz nach Menétrey-William (ANSYS®) gewählt (Tabelle 36). In diesem Modell führt eine exponentielle oder lineare Entfestigung trotz großer Lastschrittanzahl zu schlechter Konvergenz. Im plastischen Bereich wird das Materialverhalten deshalb als konstante Funktion angenommen. Für den FKV wird ein orthotropes, linear-elastisches Werkstoffgesetz verwendet (Tabelle 37). Experimentell nicht bestimmte Werte des FKV werden mit Hilfe der CLT berechnet und nach Erfahrungswerten ermittelt (Schürmann 2007).

Tabelle 36: Parameter für den Beton

Menétrey-William		
Linear-elastisch:		
E_c	MPa	40870
ν	-	0,21
Basiswerte:		
R_c	MPa	54,4
R_t	MPa	5,4
R_b	MPa	65,3
ψ	°	8
Entfestigung:		konstant
K_{cm}	-	0,001219
K_{cr}	-	0,01
Ω_{ci}	-	0,33
Ω_{cr}	-	1

Tabelle 37: VR3: Verwendete Parameter für den FKV

Linear-elastisch, orthotrop		
E_x	MPa	33900
E_y	MPa	15900
E_z	MPa	15900
ν_{xy}	-	0,44
ν_{yz}	-	0,24
ν_{xz}	-	0,44
G_{xy}	MPa	14000
G_{yz}	MPa	2940
G_{xz}	MPa	14000

Versagensindikator sind die Festigkeiten des Flechtlaminats in axialer und transversaler Richtung (Tabelle 34).

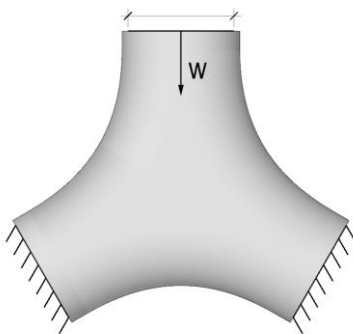


Bild 148:
Randbedingungen

Randbedingungen

Die Knoten der stirnseitigen, freien Betonoberfläche werden an zwei der drei Schenkel in alle Raumrichtungen gehalten. Der dritte Schenkel wird in mehreren Lastschritten vertikal verschoben (Bild 148). Die Schritte entsprechen Dehnungsincrementen von $\Delta\varepsilon \sim 0,005$ bis $0,05 \text{ ‰}$. Alle Randbedingungen wirken jeweils auf die stirnseitigen Betonoberflächen. Zusätzlich wird ein Abstand zum Rand des FKV vorgesehen. Dies bildet die tatsächliche Lastaufbringung durch die Stahlplatten im Versuchsaufbau ab.

Ergebnisse

Die Tragfähigkeit der Verzweigungen wird bestimmt, indem die Beanspruchung gesteigert wird, bis die FKV-Hülle erste Spannungsüberschreitungen zeigt. Maßgeblich ist die Beanspruchung in transversaler Richtung der einzelnen Flechtlaminats aufgrund der Umschnürungswirkung. In Tabelle 38 ist zusätzlich ein zweiter, höherer Wert für die Traglast angegeben, der bei weiteren Spannungsüberschreitungen der Hülle auftritt. Die Angabe des höheren Wertes erfolgt, um

Spannungsüberschreitungen an dem im Versuch beobachteten Versagensort, nachzuvollziehen. Zugleich kompensiert dies modellierungsbedingte Einschränkungen der streuenden Faseranordnung.

Die simulierten Traglasten (Tabelle 38) betragen das 0,89 und bzw. 0,99-Fache der in den Versuchen ermittelten für die Serie D_1 und das 1,05 bzw. 1,14-Fache für die Serie D_2. Wird der Kern ohne Hülle modelliert, so ergibt sich eine Traglast von 829 kN, die das 1,04-Fache der Werte der geprüften Betonreferenzproben beträgt.

Tabelle 38: Simulierte Traglasten der verzweigten Probekörper

Nr	t_{Lage}	ψ	C_{Art}	F_1	F_2	F_{exp}	i_1	i_2
-	mm	°	-	kN	kN	kN	-	-
D_1_3	1,8	5	rk = 0,6	1109	1233	1093	0,99	0,89
D_2_1	4	8	rk = 0,6	1460	1588	1666	1,14	1,05

mit:

t_{Lage} Mittlere Wanddicke einer Lage

ψ Dilatanzwinkel

C_{Art} Art der Kontaktdefinition (rk: Reibkoeffizient)

F_1 Kraft bei der ersten Spannungsüberschreitung

F_2 Kraft bei deutlichen Spannungsüberschreitungen

F_{exp} im Versuch ermittelte Traglast einer Probe

i_1, i_2 Quotient aus rechnerisch u. experimentell ermittelter Kraft

Die Hülle der Serie D_2 erreicht an den Oberseiten der beiden aufgelagerten Schenkel zunächst die maximale Zugspannung in transversaler Richtung (Bild 149 A). Dies entspricht dem beobachteten Aufreißen der Hülle im Bereich zwischen den Schenkeln (vgl. Bild 141). Bei weiterer Laststeigerung treten zunehmend Spannungsüberschreitungen auf.

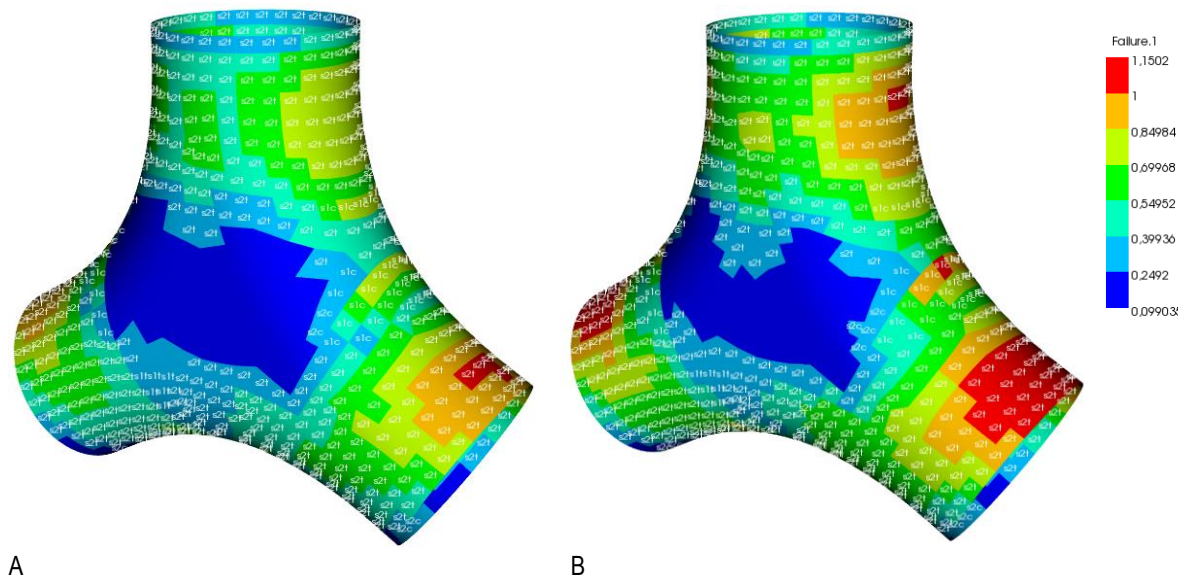


Bild 149: Darstellung linearisierter Ausnutzungsgrade für das Bruchkriterium der maximalen Spannung (Tabelle 38 D_2)
A: Lastniveau F_1 (erstmalige Spannungsüberschreitung), B: F_2 (zusätzliche Überschreitung am oberen Schenkel)

Die Beanspruchung der Hülle entsteht durch den Eintrag von Kräften parallel und senkrecht zur Kontaktfläche. Im Vergleich zu den zylindrischen Versuchskörpern ist die steifere Laminatrichtung hier in Richtung der Leitkurven orientiert

und nicht in Umfangsrichtung. Dadurch ist das Laminat in dieser Richtung stärker am Lastabtrag beteiligt.

Die Modellierung mit festem Kontakt führt ohne Berücksichtigung des Versatzes der Lastplatten zu einer nicht plausiblen Druckbeanspruchung der Hülle. Mit der Kontaktdefinition „keine Trennung“ wird die Hülle zwar zugbeansprucht, zeigt aber zunächst ein Versagen im Bereich zwischen den beiden unteren Schenkeln. Die Auswirkung der reibungsbehafteten Annahme des Verbunds zeigt hingegen realistischere Ergebnisse.

Diskussion

Die Faseranordnung ist entscheidend für die Tragfähigkeit der Hülle. In den Probekörpern variieren diese sowie der Flechtwinkel stark. Das Modell ordnet die x-Richtung des Laminats entlang der Stehfäden pro Element zu, bildet den Flechtwinkel jedoch nur näherungsweise ab.

Der Grenzzustand wird anhand der Festigkeit der Flechtlamine prognostiziert. Es handelt sich hierbei nicht um eine Spannungsanalyse der Matrix und der Fasern, sondern um eine Analyse auf Laminebene pro Flechtlaminat. Das Kriterium der maximalen Spannung stellt eventuell eine konservative Annahme dar. Rechnerisch werden diese Flechtlamine in drei sich überlappende Bereiche eingeteilt. In den Versuchskörpern liegen die Textilien direkt übereinander und werden in einem Vorgang mit der Matrix imprägniert.

Die Lastverformungskurven der Berechnung sind wesentlich steifer als die gemessenen. Die exakte Auflagersituation wird vermutlich nicht hinreichend genau erfasst, da die Lagerung mit den Futterplatten eine Nachgiebigkeit erzeugt.

Es wird vermutet, dass Ergebnisse mit geringeren Abweichungen vor allem durch eine genauere Erfassung der Faserverläufe erzielt werden können.

7.4. Zusammenfassung

Die experimentellen und numerisch-mechanischen Untersuchungen an dreischenkligem, planarem Verzweigungen anhand von 14 Probekörpern mit unterschiedlichen, carbonfaserverstärkten Hüllen zeigen die Tragfähigkeiten der neuen Knoten. Eine Variation des Aufbaus der Flechtlamine, in Form von über den Querschnitt regelmäßig oder bündelweise angeordneten Stehfäden, erhöht den Bauteilwiderstand der auf Abscheren und Biegung belasteten Knoten unwesentlich. Stehfäden führen bei den Proben im Druckversuch, gegenüber eines biaxialen Geflechts, nur zu geringfügig höheren Beanspruchbarkeiten. Wie auch die Versuchsergebnisse zylindrischer Proben zeigen, sind vor allem die Flechtfäden relevant für die tragfähigkeitssteigernde Umschnürungswirkung. Wesentlichen Einfluss auf die Traglast der Proben im Druckversuch hat die Wanddicke der Flechtlamine. Eine Verdopplung dieser führt beispielsweise zur 1,6-fachen Prüflast mit 1700 kN.

8. Entwicklungsmöglichkeiten, Anwendungspotential

8.1. Mehrschenklige FKV-Beton-Tragknoten

In Zusammenarbeit mit dem ITFT Denkendorf konnte ein vierschenkliges FKV-Beton-Hybrid-Tragknoten hergestellt werden (Bild 150).



Bild 150: Vierschenkliges Hybrid-Tragknoten aus FKV (CF-EP) und Beton, Prototyp hergestellt am ITFT, Bild: Larissa Born, ITFT, Universität Stuttgart

Ziel ist es, die technische Machbarkeit der Herstellung von Knoten mit vier Schenkeln in Hybrid-Bauweise aufzuzeigen und anhand eines Beispiels zu belegen. Hierzu wird eine asymmetrische Geometrie gewählt, die sich durch unterschiedliche Durchmesser in den Hierarchieebenen auszeichnet und deren Winkel zwischen den Schenkeln möglichst verschiedene Beträge aufweisen (Bild 151). Die Abmaße werden im Rahmen der technischen Ausrüstung der Flechtanlage – limitierend ist vor allem der Flechtringdurchmesser von 400 mm – möglichst groß gewählt (Tabelle 39).

Die Schenkelachsen sind räumlich angeordnet und nicht in einer Ebene, wie bei den mechanisch geprüften planaren Knoten aus der dritten Versuchsreihe (vgl. Kapitel 6.6).

Tabelle 39: Geometrie der hergestellten Verzweigung mit vier Schenkeln

Schenkel	d mm	l mm	Schenkelpaar	Winkel °
1	90	200	4-1	110
2	90	200	4-2	125
3	90	200	4-3	140
4	120	200	3-2	78,9
			3-1	92,3
			2-1	100,9

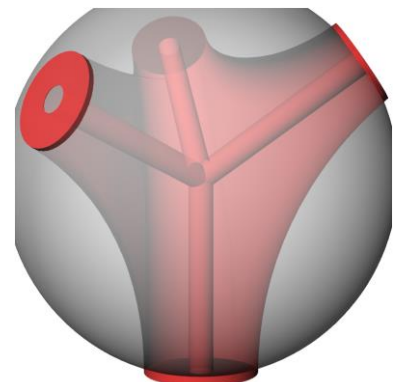


Bild 151: Kollisionskontrolle einer Verzweigung mit vier Schenkeln

Zur Überprüfung der Führung durch das Flechtrad ist es zweckmäßig, eine Kollisionskontrolle mit einer Kugel mit dem Radius des Flechtrings durchzuführen (Bild 150) und den Herstellungsprozess, insbesondere die Bewegung des Flechtkeims durch den Flechtring, digital vorzuplanen (vgl. Kapitel 5.3.5). Durch exzentrische Führung des verzweigten

Flechtkerns (Bild 80) lässt sich ein geringer Überstand über die Kugelgeometrie in der Regel kompensieren.

Die Fadenanordnung und Faserrichtung der verzweigten textilen Flechtschläuche sind sehr heterogen. Die Übergänge zwischen den Bereichen unterschiedlicher Fadenanordnung sind kontinuierlich und in Bild 152 schematisch eingezeichnet.

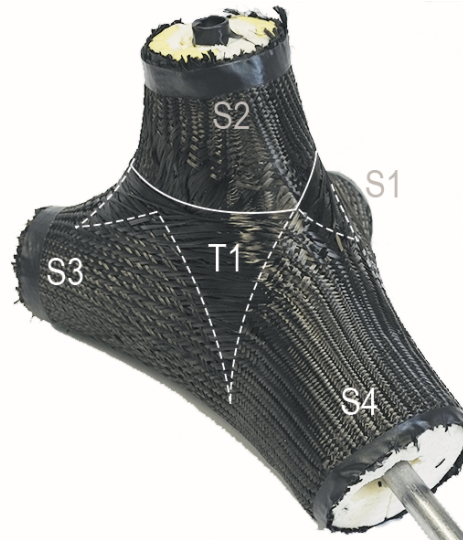


Bild 152: Ansicht einer beflochtenen, vierschenkigen Verzweigung
T1: Übergangsbereich mit Fadenanordnung überwiegend einer Hauptrichtung
T2: Übergangsbereich mit überwiegend sich kreuzenden Rovings in zwei oder drei Hauptrichtungen, S1 – S4: Überwiegend triaxiales Geflecht

8.2. Zukünftige Entwicklungen und Ausblick

Die Funktionsfähigkeit der Bauteile aus betongefüllten FKV für Tragkonstruktionen wurde durch die Entwicklung eines Herstellverfahrens, der experimentellen Beprobung und Berechnung durch sondierende Grundlagenforschung, nachgewiesen. Zur Produktentwicklung und für die Anwendung in Gebäuden sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Dies betrifft sowohl die bautechnische Regelung als auch die technische Ausführung der Knoten.



Bild 153:
Durch das ITFT und ITKE hergestellter Funktionsdemonstrator mit nachbehandelter Oberfläche in der Ausstellung „Baubionik“ des Naturkundemuseums Stuttgart, Schloss Rosenstein

Das Herstellverfahren sollte bezüglich folgender Aspekte weiterentwickelt werden, um die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu verbessern: Der Verwendung eines Flechtkerns aus wiederverwendbaren, fräsbaren, wasserlöslichen Sandkörpern, Systematisierung, Automatisierung, Monitoring der tatsächlichen Faserablage und Steigerung der Oberflächenqualität der Knoten, die derzeit lediglich durch manuelle Nachbehandlung hochwertig erreicht wird (Bild 153, vgl. Bild 150). Auch die Vergrößerung des beflochtenen Durchmessers zur Fertigung von größeren Bauteilen, wie sie für eine breite Anwendung aus Gründen der Tragfähigkeit im Bauwesen benötigt werden, etwa durch ein flexibles Flechtauge, sollte im Fokus stehen.

Künftig könnte zur Vorplanung der Fadenanordnung eine Flechtsimulation dienen, wie sie beispielsweise Birkefeld (2013) entwickelt. Die Simulation müsste für Verzweigungen allerdings erweitert werden.

Zur Kontrolle der gefertigten textilen Hüllen könnten automatisierte, zerstörungsfreie Analyseverfahren zum Messen von Faserwinkeln eingesetzt werden, wie optische Untersuchungsmethoden (Reimer et al. 2016) oder auf der Hochfrequenz-Wirbelstromtechnik basierende Verfahren (Mersch et al. 2018), die auch für mehrere räumlich angeordnete Lagen CF-EP anwendbar sind.

Des Weiteren sollte untersucht werden, welche Maßnahmen erforderlich sind, um die Anforderung einer Heißbemessung zu bestehen bzw. längere Feuerwiderstandzeiten zu erreichen. Dies kann sowohl den Einsatz von Harzen mit einer höheren Glasübergangstemperatur betreffen, den Einsatz keramischer Matrix oder zusätzliche Bewehrung für den Brandfall.

Zur Komplettierung zu einem Tragsystem ist die Verbindung zu angrenzenden Bauteilen zu behandeln, deren konzeptionelle Lösungen durch geklebte Steckverbindungen noch nicht praktisch überprüft sind (Bild 154).

Weiterhin kann der Planungsprozess für die verzweigten Hybrid-Knoten durch Erweiterung des Programms zur Erzeugung der lokalen Knotengeometrien für mehrschenklige Verzweigungen und durch eine automatisierte CAD-FEM-Anbindung verbessert werden.

Zur Erhöhung der Effizienz im Lastabtrag kann eine Optimierung der Geometrien hinsichtlich der äußeren Kontur und der Faserablage erfolgen und der Einsatz von hochfestem Beton erforscht werden.

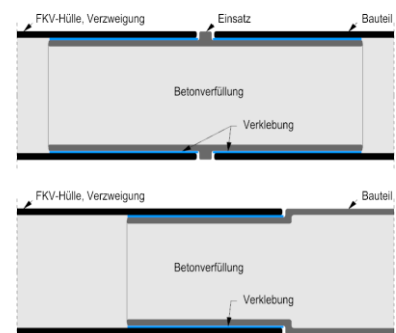


Bild 154:
Konzepte zum Anschluss eines
Tragknotens mit einem Bauteil

9. Zusammenfassung

Diese Dissertation beschreibt die bioinspirierte Entwicklung von Knoten aus Beton und Faser-Kunststoff-Verbund für verzweigte Tragkonstruktionen in der Architektur und im Bauwesen.

Konventionelle Tragknoten bestehen meist aus Stahl. Ihre Herstellung ist häufig aufwendig und kostenintensiv. Anstatt bestehende Konstruktionsweisen weiter zu optimieren, ist es Zielsetzung dieser Arbeit, Alternativen zu entwickeln. Neben dem Erkenntnisinteresse an biomechanischen Eigenschaften motiviert der bionische Forschungsansatz die Untersuchung ausgewählter pflanzlicher Verzweigungen und ihrer verholzten, faserartigen Strukturen, die Lasten sehr effizient abtragen können. Inspiriert von diesem Funktionsprinzip werden die Grundlagen für Tragknoten erforscht, die auf der Konstruktion mit technischen Fasern basieren. Diese neuartigen Hybrid-Tragknoten sollen als Verbindungselemente von verzweigten Tragwerken eingesetzt werden können.

Nicht nur in der Technik sind verzweigte Tragsysteme ein effektives Prinzip, um verteilte Lasten zu sammeln und punktuell weiterzuleiten, sondern auch in der pflanzlichen Natur. Da Pflanzen der Selektion unterliegen, wird angenommen, dass sich besonders ressourcenschonende biomechanische Prinzipien zum Lastabtrag eingestellt haben, wenn diese bisweilen auch mit anderen Funktionen konkurrieren (Kapitel 2).

Deshalb liegt im ersten Teil in Zusammenarbeit mit der *plant biomimetics group* der Universität Freiburg der Fokus auf biomechanischen Untersuchungen pflanzlicher Verzweigungen, insbesondere auf die der Araliaceae Familie, die eine aus Ingenieurssicht kontraintuitive, verholzte Stamm-Ast-Verbindung mit aufgelösten Einzelsträngen aufweist (Kapitel 3). Anhand von numerisch-mechanischen Simulationen werden Verformungen und Spannungen der pflanzlichen Verzweigungsbereiche im Detail nachvollzogen. Grundlage für die Berechnungsmodelle bilden hierbei die Geometrien konkreter biologischer Verzweigungen. Dies wird durch die Verarbeitung von Laserscan- und Mikro-CT-Daten zu FE-Modellen erreicht.

Durch die Entwicklung einer Methode zur Extraktion der Faserorientierungen, basierend auf 3D-Bilddaten, können die gerichteten Strukturen pflanzlicher verholzter Gewebe analysiert werden. Diese Richtungsinformation ermöglicht die Verwendung eines transversal isotropen Werkstoffmodells. Ein Vergleich der Simulation unter Berücksichtigung von Schädigungen mit experimentellen Ergebnissen zeigt übereinstimmende Versagensmechanismen. Des Weiteren erlaubt die Implementierung der Richtungsinformation im Berechnungsmodell den Vergleich der Tragwirkung mit Ergebnissen von Modellen, in denen Faserorientierungen systematisch optimiert wurden (CAIO). Anhand einer statistischen Auswertung der elementweisen Winkeldifferenzen wird die Eignung der in den pflanzlichen Verzweigungen vorgefundenen Ausrichtungen für bestimmte Lastfälle beurteilt.

Anhand weiterer Untersuchungen mit parametrisierten Stabwerkmodellen werden Indizien zur Beantwortung von Fragestellungen zum Tragverhalten von Verzweigungen der Familie der Araliaceae durchgeführt. Beurteilt wird der

Einfluss der Parameter der Umgreifung der Einzelstränge um den Stamm, der Neigung des Astes und der Krümmung der Einzelstränge für vertikale und horizontale Belastungen. Nicht zuletzt wird ein geometrisches Prinzip zur Erzeugung der in den Stamm-Ast-Verbindungen vorgefundenen Achsverläufe der Einzelstränge dargelegt.

Nach der detaillierten Analyse lokaler Verzweigungsgeometrien zeigt eine Gegenüberstellung auf Systemebene von pflanzlichen und gebäudetypischen verzweigten Tragwerken wesentliche Unterschiede auf, wie etwa in den dominierenden Schnittgrößen (Kapitel 4).

Die pflanzlichen Funktionsprinzipien der faserbasierten Konstruktion und der lastangepassten Anordnung von Fasern, die nicht nur für die untersuchten Arten spezifisch sind, werden in der bioinspirierten technischen Umsetzung angestrebt und durch einen faserbasierten Materialansatz erreicht. Entwicklungsziel ist ein hybrider Tragknoten, der sowohl die Vorteile der faserartigen Materialien, wie den sparsamen Materialeinsatz durch lastgerechte Verteilung und Anordnung, als auch der in den verzweigten Tragwerken vorherrschenden normalkraftdominierten Beanspruchung gerecht wird, indem, für Druckkräfte günstig, Beton eingesetzt wird (Bild 155). Ebenso sollen Synergieeffekte durch die Steigerung der Drucktragfähigkeit durch das Ausbilden einer Umschnürungswirkung der FKV-Hülle auf den Beton genutzt werden.

Zur Herstellung der verzweigten Hüllen aus Textilien wird die Flechttechnik ausgewählt, da diese eine endkonturnahe Fertigung von dreidimensionalen Bauteilen mit durchgängigem Faserverlauf anhand von Stehfäden ermöglicht (Kapitel 5). Gemeinsam mit KooperationspartnerInnen, des *Instituts für Textil- und Fasertechnologien* der Universität Stuttgart wird der Flechtprozess durchgeführt und auf die speziellen Bedürfnisse des Verzweigungsflechtens anhand einer kraftgesteuerten Stehfadenzuführung angepasst. Die Prozessgrenzen und die Praktikabilität des Verfahrens werden anhand eines verzweigten textilen Demonstrators für die Baubionik-Ausstellung im Schloss Rosenstein des Naturkundemuseums Stuttgart erprobt.

Während Umschnürungen mit CF-EP in der Baupraxis üblich und eingehend erforscht sind, liegen zum Einsatz geflochtener Textilien keine Untersuchungen vor. Deshalb wird die Eignung von biaxial geflochtenen CF-EP-Rohren als Umschnürung und triaxialen GF-CF-EP-Rohren zunächst experimentell geprüft (Kapitel 6). Gegenüber analytischen Modellen aus der Literatur ergeben sich erwartungsgemäß Unterschiede im Verlauf der Spannungsdehnungslinien der zylindrischen Druckprobekörper, da die dort verwendeten Umschnürungsmaterialien im Gegensatz zu den geflochtenen FKV sehr hohe Steifigkeiten und Festigkeiten in Umfangsrichtung und geringe in Längsrichtung aufweisen. FKV mit geflochtenem Textil und großem Flechtwinkel ($\sim 70^\circ$) besitzt zwar die gleiche Vorzugsrichtung entlang des Umfangs, aber ein weniger extremes Verhältnis der orthotropen Elastizitätskenngrößen.

Wie exemplarische Versuchsergebnisse zeigen, sind 1,8-fache Tragfähigkeitssteigerungen von Betondruckproben, die mit geflochtenem FKV umschnürt sind, im Vergleich zu nicht umschnürten Proben möglich. Mit gewickelten FKV-Rohren können die 1,7-fachen Werte erreicht werden (Versuchsreihe 1). Wegen des geringeren Wirkungsgrads der



Bild 155:
Verzweigte Demonstratoren und biologisches Vorbild in der Ausstellung „Baubionik“ des Naturkundemuseums Stuttgart, Schloss Rosenstein

geflochtenen Umschnürungen ist allerdings eine größere Wanddicke als bei gewickelten Umschnürungen notwendig. Die Tragfähigkeitssteigerungen bleiben bei GF-CF-EP-Umschnürungen deutlich unter den erwarteten, so dass eine Verwendung des experimentell geprüften Geflechts als nicht geeignet erscheint (Versuchsreihe 2). Für die verzweigten Hybrid-Bauteile werden deshalb ausschließlich Carbonrovings verwendet.

Traglastversuche an planaren, symmetrischen Verzweigungen zeigen, dass eine Umschnürung mit Carbonfasern auch bei diesen komplexeren Geometrien zu einer deutlichen Tragfähigkeitssteigerung (Faktor 2,0 bzw. 1,6 bereinigt um die Mitwirkung der Hülle) gegenüber nicht verstärkten Proben führen kann (Kapitel 7). Hierzu wird ein spezieller Versuchsstand für Verzweigungen entwickelt, der durch unterschiedliche Lagerungsbedingungen Prüfungen mit verschiedenen Beanspruchungen ermöglicht. Unter dominierender Normalkraftbelastung erreichen die Tragknoten mit 125 mm Querschnittsdurchmesser eine Widerstandskraft von bis zu 1700 kN, mit verschieblichen Lagern Werte bis zu circa 770 kN.

Schließlich zeigen die Versuchsergebnisse, dass hybride FKV-Beton-Knoten Traglasten widerstehen, die typischerweise in Gebäuden auftreten.

Die Anwendbarkeit der Methode des Verzweigungsflechtens wird durch die Herstellung der Probekörper für die Belastungsversuche und der textilen Verzweigungen für einen Großdemonstrator zur Ausstellung „Baubionik“ des Naturkundemuseums Stuttgart aufgezeigt. Mit der Anfertigung eines Prototyps eines vierschenkigen Tragknotens und weiterer Automatisierungen wie der digitalen Flechtpfadplanung wird das Herstellverfahren weiterentwickelt, um dem Ziel der geometrischen Gestaltungsfreiheit verstärkt gerecht zu werden (Kapitel 8).

Ergebnis dieser Arbeit ist die Entwicklung von Hybrid-Knoten für Tragkonstruktionen. Die erworbenen Erkenntnisse konstituieren das Potential dieser Bauweise und qualifizieren für deren weiterführende Anwendungsentwicklung.

Die Untersuchung zeigt erstmals umfassend die technische Umsetzung dieser neuen Konstruktionsweise für betonverfüllte, verzweigte FKV-Rohre. Vorrangige Kriterien, die zur Anwendung im Bauwesen und in der Architektur Voraussetzung sind, werden von den neuen Tragknoten erfüllt. So weisen Belastungsversuche und strukturmechanische Analysen deren Tragfähigkeit nach und der gewählte Flechtprozess mit effizienter Faserablage ermöglicht geometrische Gestaltungsfreiheit im Entwurf.

Charakteristikum der aus der Sicht der Tragwerksplanung beschriebenen Untersuchung ist der Einbezug der Aspekte anderer Fachdisziplinen wie der Biologie, Biomechanik und des Textilingenieurwesens. Voraussetzung ist die Präzisierung von gemeinsam verwendeten Begrifflichkeiten und deren Konzepten.

Die Ergebnisse dieser Dissertation, die im Kontext interdisziplinärer Zusammenarbeit erzielt werden, bilden die Grundlage für zukünftige Forschung und Anwendung faserbasierter Knoten für Tragkonstruktionen.



Verzeichnisse

Literatur

ANSYS®: *Academic Research Mechanical, Release 19.1, Help System, Material Reference: 4.9. Geomechanics*. ANSYS, Inc.

Ascione, L.; Godonou, P.; Caron, J.-F.; van IJselmuiden, K.; Knippers, J.; Mottram, T.; Oppe, M. et al. (2016): *Prospect for new guidance in the design of FRP. Support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes*. Luxembourg: Publications Office (EUR, Scientific and technical research series, 27666).

ASTM D2290 (2019): *Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe*.

Ayadi, A.; Nouri, H.; Guessasma, S.; Roger, F. (2016): *Determination of orthotropic properties of glass fibre reinforced thermoplastics using X-ray tomography and multiscale finite element computation*. In: *Composite Structures* 136, S. 635–649. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.10.041.

Baumgartner, A.; Harzheim, L.; Mattheck, C. (1992): *SKO (soft kill option). The biological way to find an optimum structure topology*. In: *International Journal of Fatigue* 14 (6), S. 387–393. DOI: 10.1016/0142-1123(92)90226-3.

Bau-Überwachungsverein (Hg.) (2014): *Tragende Kunststoffbauteile. Entwurf – Bemessung – Konstruktion*. Bau-Überwachungsverein. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Bergmeister, K. (2003): *Kohlenstofffasern im konstruktiven Ingenieurbau*. Berlin: Ernst & Sohn (Bauingenieur-Praxis).

Bergmeister, K. (2005): *Verstärkung mit Kohlenstofffasern - Teil 2. Verstärkung von Stützen*. In: *BUST 100 (S1)*, S. 69–73. DOI: 10.1002/best.200590172.

Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. (2013): *Beton-Kalender 2013. Lebensdauer und Instandsetzung - Brandschutz*. 1. von 2. Berlin: Ernst & Sohn (Beton-Kalender, 102).

Beyse, G. (1881): *Untersuchungen über den anatomischen Bau und das mechanische Princip im Aufbau einiger Arten der Gattung Impatiens. Mit 4 Tafeln Nr. V-VIII*. Halle, Leipzig: Blochmann; Engelmann (Nova Acta Academiae Caesareae Leopoldino-Carolinae Germanicae naturae curiosorum, 43,2).

Birkefeld, K. (2013): *Virtuelle Optimierung von Geflecht-Preforms unter Berücksichtigung von Fertigungsaspekten*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2013. 1. Aufl. München: Verl. Dr. Hut (IFB Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart).

Bletzinger, K.-U. (1990): *Formoptimierung von Flächentragwerken*. Stuttgart: Universität Stuttgart, Institut für Baustatik (11).

Born, L.; Jonas, F. A.; Bunk, K.; Masselter, T.; Speck, T.; Knippers, J.; Gresser, G. T. (2016): *Branched Structures in Plants and Architecture. Biological Design and Integrative Structures*. In: Jan Knippers, Klaus G. Nickel und Thomas Speck (Hg.): *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures*, v.8. Cham: Beuth (Biologically-Inspired Systems, 9).

Bradley, D.; Roth, G. (2011): *Adaptive Thresholding using the Integral Image*. In: *Journal of Graphics Tools* 12 (2), S. 13–21. DOI: 10.1080/2151237X.2007.10129236.

Bunk, K.; Fink, S.; Speck, T.; Masselter, T. (2017): *Branching morphology, vascular bundle arrangement and ontogenetic development in leaf insertion zones and ramifications of three*

-
- arborescent Araliaceae species*. In: *Trees* 31 (6), S. 1793–1809. DOI: 10.1007/s00468-017-1585-8.
- Clarke, A. R.; Eberhardt, C. N. (2002): *Microscopy techniques for materials science*. Boca Raton, FL, Cambridge, England: CRC Press.
- Cosgrove, D. J. (2005): *Growth of the plant cell wall*. In: *Nature reviews. Molecular cell biology* 6 (11), S. 850–861. DOI: 10.1038/nrm1746.
- Cui, C.; Sheikh, S. A. (2010): *Analytical Model for Circular Normal- and High-Strength Concrete Columns Confined with FRP*. In: *J. Compos. Constr.* 14 (5), S. 562–572. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000115.
- DAfStb (2012): *Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung. Teil 1: Bemessung und Konstruktion - Teil 2: Produkte und Systeme für das Verstärken - Teil 3: Ausführung - Teil 4: Ergänzende Regelungen zur Planung von Verstärkungsmaßnahmen*. Richtlinie. Ausg. März 2012. Berlin, Köln: Beuth.
- DAfStb (2013): *Erläuterungen und Beispiele zur DAfStb-Richtlinie "Verstärken von Betonbauteilen mit geklebter Bewehrung"*. 1. Aufl. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 595).
- DIN 60000 (Januar 1969): *Textilien, Grundbegriffe*.
- DIN EN ISO 527-4 (Juli 1997): *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 4: Prüfbedingungen für isotrop und anisotrop faserverstärkte Kunststoffverbundwerkstoffe*.
- DIN ISO 1172 (Dezember 1998): *Textilglasverstärkte Kunststoffe - Prepregs, Formmassen und Laminate - Bestimmung des Textilglas- und Mineralfüllstoffgehalts; Kalzinierungsverfahren*.
- DIN 1259-1 (September 2001): *Glas, Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen*.
- DIN EN 12390-5 (Juli 2009): *Prüfung von Festbeton - Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-5:2009*.
- DIN EN ISO 527-1 (Juni 2012): *Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze (ISO 527-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 527-1:2012*.
- DIN EN 12390-13 (Juni 2014): *Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013*.
- DIN EN 206 (Juli 2014): *Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013*.
- DIN ISO 18458 (August 2016): *Bionik - Terminologie, Konzepte und Methodik*.
- DIN SPEC 25714 (September 2017): *Basaltfasern – Technische Lieferbedingungen*.
- DIN EN 12350-5 (Mai 2019): *Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß*.
- DIN EN 12390-3 (Oktober 2019): *Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*.
- Dobrovolskij, D.; Godehardt, M.; Heieck, F.; Rack, A.; Schladitz, K.; Zabler, S. (2017): *Improved local fiber orientation from μ CT scans of fiber reinforced composites*. In: 7th Conference on Industrial Computed Tomography, Leuven, Belgium (iCT 2017).
- Dong, C. X.; Kwan, A.K.H.; Ho, J.C.M. (2015a): *A constitutive model for predicting the lateral strain of confined concrete*. In: *Engineering Structures* 91, S. 155–166. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.014.

- Dong, C. X.; Kwan, A.K.H.; Ho, J.C.M. (2015b): *A constitutive model for predicting the lateral strain of confined concrete*. In: Engineering Structures 91, S. 155–166. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.02.014.
- Dörstelmann, M.; Knippers, J.; Koslowski, V.; Menges, A.; Prado, M.; Schieber, G.; Vasey, L. (2015a): *ICD/ITKE Research Pavilion 2014-15. Fibre Placement on a Pneumatic Body Based on a Water Spider Web*. In: Archit. Design 85 (5), S. 60–65. DOI: 10.1002/ad.1955.
- Dörstelmann, M.; Knippers, J.; Menges, A.; Parascho, S.; Prado, M.; Schwinn, T. (2015b): *ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14. Modular Coreless Filament Winding Based on Beetle Elytra*. In: Archit. Design 85 (5), S. 54–59. DOI: 10.1002/ad.1954.
- Ehlig, D.; Schladitz, F.; Frenzel, M.; Curbach, M. (2012): *Textilbeton - Ausgeführte Projekte im Überblick*. In: Beton- und Stahlbetonbau 107 (11), S. 777–785. DOI: 10.1002/best.201200034.
- Eickenbusch, H.; Krauss, O. (2013): *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologie*. VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3 (3).
- Eid, R.; Paultre, P. (2007): *Plasticity-based model for circular concrete columns confined with fibre-composite sheets*. In: Engineering Structures 29 (12), S. 3301–3311. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.09.005.
- Eid, R.; Paultre, P. (2008): *Analytical Model for FRP-Confined Circular Reinforced Concrete Columns*. In: J. Compos. Constr. 12 (5), S. 541–552. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(541).
- Eid, R.; Paultre, P. (2017): *Compressive behavior of FRP-confined reinforced concrete columns*. In: Engineering Structures 132, S. 518–530. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.11.052.
- Enns-Bray, W. S.; Owoc, J. S.; Nishiyama, K. K.; Boyd, S. K. (2014): *Mapping anisotropy of the proximal femur for enhanced image based finite element analysis*. In: Journal of biomechanics 47 (13), S. 3272–3278. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2014.08.020.
- Fazeli, M.; Hübner, M.; Lehmann, T.; Gebhardt, U.; Hoffmann, G.; Cherif, C. (2017): *Development of spatially branched woven node structures on the conventional weaving loom*. In: Textile Research Journal 88 (13), S. 1453–1465. DOI: 10.1177/0040517516683746.
- Flemming, M.; Roth, S. (2003): *Faserverbundbauweisen. Eigenschaften: mechanische, konstruktive, thermische, elektrische, ökologische, wirtschaftliche Aspekte*. Berlin: Springer (Engineering online library).
- Flindt, R. (2002): *Biologie in Zahlen. Eine Datensammlung in Tabellen mit über 10.000 Einzelwerten*. 6., durchges. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl.
- Forest Products Laboratory (2010): *Wood Handbook - Wood as an Engineering Material (Centennial Edition)*. Madison, Wisconsin: U.S. Department of Agriculture.
- Gambarelli, S.; Nisticò, N.; Özbolt, J. (2014): *Numerical analysis of compressed concrete columns confined with CFRP. Microplane-based approach*. In: Composites Part B: Engineering 67, S. 303–312. DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.06.026.
- Genenz, V.; Speck, T.; Brüchert, F.; Becker, G. (1997): *Astbruch bei Pappeln – biomechanische und morphometrische Untersuchungen an Populus x canadensis*. In: Dirk Dujesiefken und Petra Kockerbeck (Hg.): Jahrbuch der Baumpflege 1997: das aktuelle Nachschlagewerk für die Baumpflege. Themenschwerpunkte: Wertermittlung von Gehölzen, Ökologie, Baumkrankheiten, Baumpflege, Parkpflege. Beitr. d. 5. Augsburger Baumpflegetage. Braunschweig: Thalacker Medien, S. 204–210.
- Gholampour, A.; Ozbakkaloglu, T. (2017): *Finite Element Analysis of Constitutive Behavior of FRP-Confined Steel Fiber Reinforced Concrete*. In: KEM 737, S. 511–516. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.737.511.

-
- Goldsmith, G. R.; Zahawi, R. A. (2007): *The function of stilt roots in the growth strategy of Socratea exorrhiza (Arecaceae) at two neotropical sites*. In: *Revista de Biología Tropical* 55 (3-4). DOI: 10.15517/rbt.v55i3-4.5955.
- Grassl, P.; Jirásek, M. (2006): *Damage-plastic model for concrete failure*. In: *International Journal of Solids and Structures* 43 (22-23), S. 7166–7196. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.032.
- Gross, D.; Seelig, T.; Seeliger, T. (2016): *Bruchmechanik. Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Lehrbuch).
- Gruber, G.; Maltz, N.; Wartzack, S. (2011): *Berücksichtigung anisotroper Materialeigenschaften crashbelasteter Leichtbaustrukturen im Kontext früher Entwicklungsphasen*. In: Dieter Krause, Kristin Paetzold und Sandro Wartzack (Hg.): *Design for X. Beiträge zum 22. DfX-Symposium, Oktober 2011*. [Elektronische Ressource]. Hamburg-Harburg: TuTech Verl., S. 217–228.
- Grun, T. B.; Scheven, M. von; Bischoff, M.; Nebelsick, J. H. (2018): *Structural stress response of segmented natural shells. A numerical case study on the clypeasteroid echinoid Echinocyamus pusillus*. In: *Journal of the Royal Society, Interface* 15 (143). DOI: 10.1098/rsif.2018.0164.
- Hallé, F.; Oldeman, R. A. A.; Tomlinson, P. B. (1978): *Tropical Trees and Forests*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Haller, S. (2013): *Gestaltfindung. Untersuchungen zur Kraftkegelmethode*. Zugl.: Karlsruher Institut für Technologie, KIT, Diss., 2013. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing (Schriftenreihe des Instituts für Angewandte Materialien, Karlsruher Institut für Technologie, 27).
- Hamm, C. (2018): *ELiSE Verfahren*. In: Alexander Sauer (Hg.): *Bionik in der Strukturoptimierung. Praxishandbuch für ressourceneffizienten Leichtbau*. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Communications Group (Konstruktionspraxis).
- Hammoud, R.; Boukhili, R.; Yahia, A. (2013): *Unified Formulation for a Triaxial Elastoplastic Constitutive Law for Concrete*. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 6 (9), S. 4226–4248. DOI: 10.3390/ma6094226.
- Hany, N. F.; Hantouche, E. G.; Harajli, M. H. (2015): *Axial Stress-Strain Model of CFRP-Confined Concrete under Monotonic and Cyclic Loading*. In: *J. Compos. Constr.* 19 (6), S. 4015004. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000557.
- Hany, N. F.; Hantouche, E. G.; Harajli, M. H. (2016): *Finite element modeling of FRP-confined concrete using modified concrete damaged plasticity*. In: *Engineering Structures* 125, S. 1–14. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.06.047.
- Haushahn, T.; Schwager, H.; Neinhuis, C.; Speck, T.; Masselter, T. (2012): *Plant ramifications inspire branched lightweight composites*. In: *Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials* 1 (2), S. 77–81. DOI: 10.1680/bbn.11.00011.
- Hegger, J.; Goralski, C.; Kulas, C. (2011a): *Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2), S. 64–71. DOI: 10.1002/best.201000081.
- Hegger, J.; Kulas, C.; Raupach, M.; Büttner, T. (2011b): *Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (2), S. 72–80. DOI: 10.1002/best.201000082.
- Helbig, T.; Unterer, K.; Kulas, C.; Rempel, S.; Hegger, J. (2016): *Fuß- und Radwegbrücke aus Carbonbeton in Albstadt-Ebingen*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 111 (10), S. 676–685. DOI: 10.1002/best.201600058.
- Herrmann, H.; Schnell, J. (Hg.) (2019): *Short Fibre Reinforced Cementitious Composites and Ceramics*. Cham: Springer International Publishing (Advanced Structured Materials, 95). Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-030-00868-0>.

- Hesse, L.; Leupold, J.; Speck, T.; Masselter, T. (2018): *A qualitative analysis of the bud ontogeny of Dracaena marginata using high-resolution magnetic resonance imaging*. In: Scientific reports 8 (1), S. 9881. DOI: 10.1038/s41598-018-27823-1.
- Hesse, L.; Masselter, T.; Leupold, J.; Spengler, N.; Speck, T.; Korvink, J. G. (2016): *Magnetic resonance imaging reveals functional anatomy and biomechanics of a living dragon tree*. In: Scientific reports 6, S. 32685. DOI: 10.1038/srep32685.
- Hokeš, F.; Kala, J.; Hušek, M.; Král, P. (2016): *Parameter Identification for a Multivariable Nonlinear Constitutive Model inside ANSYS Workbench*. In: Procedia Engineering 161, S. 892–897. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.743.
- Hu, B. (2013): *An improved criterion for sufficiently/insufficiently FRP-confined concrete derived from ultimate axial stress*. In: Engineering Structures 46, S. 431–446. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.08.001.
- Hu, H.-T.; Huang, C.-S.; Wu, M.-H.; Wu, Y.-M. (2003): *Nonlinear Analysis of Axially Loaded Concrete-Filled Tube Columns with Confinement Effect*. In: J. Struct. Eng. 129 (10), S. 1322–1329. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322).
- Hufenbach, W. A.; Böhm, R.; Thieme, M.; Winkler, A.; Mäder, E.; Rausch, J.; Schade, M. (2011a): *Polypropylene/glass fibre 3D-textile reinforced composites for automotive applications*. In: Materials & Design 32 (3), S. 1468–1476. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.049.
- Hufenbach, W. A.; Gude, M.; Cichy, F.; Danczak, M.; Neinhuis Christoph; Schwager, H. (2011b): *Simulation of branched biological structures for bionic inspired fibre-reinforced components*. In: Kompozyty 11 (4), S. 304–309.
- Hussein Abdallah, M.; Shazly, M.; Mohamed, H. M.; Masmoudi, R.; Mousa, A. (2017): *Nonlinear finite element analysis of short and long reinforced concrete columns confined with GFRP tubes*. In: Journal of Reinforced Plastics and Composites 36 (13), S. 972–987. DOI: 10.1177/0731684417698758.
- Jaffee, M. J. (1973): *Thigmomorphogenesis: The response of plant growth and development to mechanical stimulation*. In: Planta 114, S. 143–157.
- James, K. R.; Moore, J. R.; Slater, D.; Dahle, G. A. (2017): *Tree biomechanics*. In: CAB Reviews 12 (038), S. 1–11. DOI: 10.1079/PAVSNNR201712038.
- Jian, L. C.; Ozbakkaloglu, T.; Lim, J. C. (2015): *Hoop strains in FRP-confined concrete columns: experimental observations*. In: Mater Struct 48 (9), S. 2839–2854. DOI: 10.1617/s11527-014-0358-8.
- Jiang, J.; Wu, Y.; Zhao, X. (2011): *Application of Drucker-Prager Plasticity Model for Stress-Strain Modeling of FRP Confined Concrete Columns*. In: Procedia Engineering 14, S. 687–694. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.07.088.
- Jiang, J.-F.; Wu, Y.-F. (2012): *Identification of material parameters for Drucker-Prager plasticity model for FRP confined circular concrete columns*. In: International Journal of Solids and Structures 49 (3-4), S. 445–456. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2011.10.002.
- Jiang, T.; Teng, J. G. (2007): *Analysis-oriented stress-strain models for FRP-confined concrete*. In: Engineering Structures 29 (11), S. 2968–2986. DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.01.010.
- Jonas, F. A.; Born, L.; Möhl, C.; Gresser, G. T.; Knippers, J. (2018a): *Towards branched supporting structures out of concrete-FRP composites inspired from natural branchings*. In: Caitlin Mueller und Sigrid Adriaenssens (Hg.): Proceedings of the IASS Symposium 2018. Creativity in Structural Design. MIT, Boston, USA, 16.-20. Juli 2018.

Jonas, F. A.; Knippers, J. (2017): *Tragverhalten von Betondruckgliedern mit Umschnürung durch geflochtene und gewickelte Carbonrohre*. In: Beton- und Stahlbetonbau 112 (8), S. 517–529. DOI: 10.1002/best.201700023.

Jonas, F. A.; Knippers, J.; Gresser, G. T.; Born, L.; Milwich, M. (2018b): *Faserverbundstruktur, Verzweigungsknoten zum Gebäudebau sowie Verfahren zur Herstellung des Verzweigungsknotens zum Gebäudebau*. Angemeldet durch Universität Stuttgart, Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf am 28.08.2018. Anmeldenr: EP 3 460 114 A2. Prioritätsdaten: 15.09.2017 DE 102017008661.

Jonas, F. A.; Soni, S.; Matsagar, V.; Knippers, J. (2019): *Experimental and analytical studies on concrete-filled triaxially-braided FRP structures under static loading. (in Vorbereitung)*.

Käseberg, S.; Holschemacher, K.; Curbach, M. (2018): *Zum Tragverhalten CFK-umschnürter Stahlbetonstützen mit Kreisquerschnitt*. In: Beton- und Stahlbetonbau 113 (7), S. 505–514. DOI: 10.1002/best.201800008.

Kastner, J.; Pfeifer, F.; Heinzl, C.; Freytag, R. (Hg.) (2008): *Pipeline zur dreidimensionalen Auswertung und Visualisierung der Faserverteilung in glasfaserverstärkten Kunststoffteilen aus μ -Röntgen-Computertomografiedaten*. DACH Jahrestagung 2008 DGZFP. St. Gallen, Schweiz.

Knippers, J.; Cremers, J.; Gabler, M.; Lienhard, J. (2010): *Atlas Kunststoffe + Membranen. Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion*. Unter Mitarbeit von Judith Faltermeier. 1. Aufl. München: Ed. Detail - Inst. für Internat. Architektur-Dokumentation (Edition Detail).

Knippers, J.; Gabler, M.; La Magna, R.; Waimer, F.; Menges, A.; Reichert, S.; Schwinn, T. (2013): *From Nature to Fabrication. Biomimetic Design Principles for the Production of Complex Spatial Structures*. In: Lars Hesselgren, Shrikant Sharma, Johannes Wallner, Niccolo Baldassini, Philippe Bompas und Jacques Raynaud (Hg.): *Advances in Architectural Geometry 2012*. Vienna: Springer, S. 107–122.

Knippers, J.; La Magna, R.; Menges, A.; Reichert, S.; Schwinn, T.; Waimer, F. (2015): *ICD/ITKE Research Pavilion 2012. Coreless Filament Winding Based on the Morphological Principles of an Arthropod Exoskeleton*. In: *Archit. Design* 85 (5), S. 48–53. DOI: 10.1002/ad.1953.

Knippers, J.; Speck, T. (2012): *Design and construction principles in nature and architecture*. In: *Bioinspiration & Biomimetics* 7 (1), S. 15002. DOI: 10.1088/1748-3182/7/1/015002.

Kriechbaum, R. (1992): *CAIO (computer aided internal optimization). A powerful method to optimize fiber arrangement in composite materials*. In: *First European Conference on Smart Structures and Materials*. First European Conference on Smart Structures and Materials. Glasgow, United Kingdom, 12.05.1992 - 14.05.1992: SPIE, S. 56.

Kupfer, H. (1973): *Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung*. Berlin: Ernst & Sohn (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 229).

Kwan, A.K.H.; Dong, C. X.; Ho, J.C.M. (2015): *Axial and lateral stress-strain model for FRP confined concrete*. In: *Engineering Structures* 99, S. 285–295. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.04.046.

Lam, L.; Teng, J. G. (2002): *Strength Models for Fiber-Reinforced Plastic-Confined Concrete*. In: *Journal of Structural Engineering* 128 (5), S. 612–623. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:5(612).

Lam, L.; Teng, J. G. (2003): *Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete*. In: *Construction and Building Materials* 17 (6-7), S. 471–489. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00045-X.

- Lee, J.; Fenves, G. L. (1998): *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*. In: Journal of Engineering Mechanics 124 (8), S. 892–900. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1998)124:8(892).
- Lehmberg, S.; Mainka, J.; Ledderhose, L.; Budelmann, H.; Kloft, H. (2014): *Neuartige Verbindungen für geometrisch komplexe Flächen- und Stabwerkelemente aus UHPFRC*. In: Silke Scheerer und Manfred Curbach (Hg.): *Leicht Bauen mit Beton. Forschung im Schwerpunktprogramm 1542 Förderphase 1*, S. 122–139.
- Lehnebach, R.; Beyer, R.; Letort, V.; Heuret, P. (2018): *The pipe model theory half a century on. A review*. In: Annals of botany 121 (5), S. 773–795. DOI: 10.1093/aob/mcx194.
- Li, B.-b.; Xiong, H.-b.; Jiang, J.-F.; Zhan, Y.; Li, H.; Ashraf, M.; Corbi, O. et al. (2019): *Damage plasticity model for passively confined concrete*. In: MATEC Web Conf. 275 (3-4), S. 2016. DOI: 10.1051/mateconf/201927502016.
- Lienhard, J. (2014): *Bending-active structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein*. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014. Stuttgart: ITKE (Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart, 36). Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:93-opus-94838>.
- Lim, J. C.; Ozbakkaloglu, T. (2014a): *Confinement Model for FRP-Confined High-Strength Concrete*. In: J. Compos. Constr. 18 (4), S. 4013058. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000376.
- Lim, J. C.; Ozbakkaloglu, T. (2014b): *Factors Influencing Hoop Rupture Strains of FRP-Confined Concrete*. In: AMM 501-504, S. 949–953. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.501-504.949.
- Lim, J. C.; Ozbakkaloglu, T. (2015a): *Lateral Strain-to-Axial Strain Relationship of Confined Concrete*. In: J. Struct. Eng. 141 (5), S. 4014141. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001094.
- Lim, J. C.; Ozbakkaloglu, T. (2015b): *Unified Stress-Strain Model for FRP and Actively Confined Normal-Strength and High-Strength Concrete*. In: J. Compos. Constr. 19 (4), 04014072:1-14. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000536.
- Loch, M. (2014): *Beitrag zur Bestimmung von charakteristischen Werkstofffestigkeiten in Bestandtragwerken aus Stahlbeton*. Kaiserslautern, Technische Universität Kaiserslautern, Diss., 2014. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:hbz:386-kluedo-37669>.
- Lubliner, J.; Oliver, J.; Oller, S.; Oñate, E. (1989): *A plastic-damage model for concrete*. In: International Journal of Solids and Structures 25 (3), S. 299–326. DOI: 10.1016/0020-7683(89)90050-4.
- Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; Park, R. (1988): *Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete*. In: J. Struct. Eng. 114 (8), S. 1804–1826. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1988)114:8(1804).
- Marijn R. Spoelstra; Giorgio Monti (1999): *FRP-Confined Concrete Model*. In: Journal of composites for construction 3 (3), S. 143–150. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0268(1999)3:3(143).
- Marques, O. (Hg.) (2011): *Practical Image and Video Processing Using MATLAB®*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons.
- Masselter, T.; Hesse, L.; Böhm, H.; Gruhl, A.; Schwager, H.; Leupold, J.; Gude, M. et al. (2016): *Biomimetic optimisation of branched fibre-reinforced composites in engineering by detailed analyses of biological concept generators*. In: Bioinspiration & Biomimetics 11 (5), 055005:1-19. DOI: 10.1088/1748-3190/11/5/055005.

-
- Masselter, T.; Speck, T. (2011): *Biomimetic Fiber-Reinforced Compound Materials*. In: Anne George (Hg.): *Advances in Biomimetics*. Rijeka: InTech, S. 185–210.
- Mattheck, C. (1992): *Bäume*. In: *Physik in unserer Zeit* 23 (1), S. 29–33.
- Mattheck, C. (2006): *Design in der Natur. Der Baum als Lehrmeister*. 4., überarb. und erw. Neuaufl. Freiburg im Breisgau: Rombach (Rombach Wissenschaften Reihe Ökologie, Band 1).
- Mattheck, C. (2010): *Denkwerkzeuge nach der Natur*. 1. Aufl. Karlsruhe: Karlsruher Inst. für Technologie - Campus Nord.
- Mattheck, C.; Bethge, K. (2007): *Ein Denkwerkzeug - Die Methode der Schubvierecke*. In: *Konstruktionspraxis* (3), S. 32–34.
- Mattheck, C.; Bethge, K.; Schäfer, J. (1993): *Safety factors in trees*. In: *J. theor. Biol.* 165 (2), S. 185–189. DOI: 10.1006/jtbi.1993.1184.
- Mattheck, C.; Burkhardt, S. (1990): *A new method of structural shape optimization based on biological growth*. In: *International Journal of Fatigue* 12 (3), S. 185–190. DOI: 10.1016/0142-1123(90)90094-U.
- Mattheck, C.; Kubler, H. (1997): *Wood. The internal optimization of trees*. 1. ed, 2. print. Berlin: Springer (Springer series in wood science).
- Mattheck, C.; Reuschel, D. (1999): *Design nach der Natur*. In: *Physik in unserer Zeit* 30 (6), S. 253–258.
- McCulloh, K. A.; Sperry, J. S.; Adler, F. R. (2003): *Water transport in plants obeys Murray's law*. In: *Nature* 421 (6926), S. 939–942. DOI: 10.1038/nature01438.
- Md Rian, I.; Sassone, M. (2014): *Tree-inspired dendriforms and fractal-like branching structures in architecture. A brief historical overview*. In: *Frontiers of Architectural Research* 3 (3), S. 298–323. DOI: 10.1016/j.foar.2014.03.006.
- Méndez Echenagucia, T.; Pigram, D.; Liew, A.; van Mele, T.; Block, P. (2019): *A Cable-Net and Fabric Formwork System for the Construction of Concrete Shells. Design, Fabrication and Construction of a Full Scale Prototype*. In: *Structures* 18, S. 72–82. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.10.004.
- Menétrey, P. (1994): *Numerical analysis of punching failure in reinforced concrete structures*. Lausanne: Lausanne, EPFL (1279).
- Mersch, J.; Bardl, G.; Nocke, A.; Cherif, C.; Schulze, M.; Heuer, H. (2018): *Development of a method for the non-destructive evaluation of fiber orientation in multilayer 3D carbon fiber preforms and CFRP with robot-guided high-frequency eddy current testing technology*. In: *AeroNDT 2018, 10th International Symposium on NDT in Aerospace, Oct 2018, Dresden, Germany* 24 (03, Ausgabe 2019-03-01, ISSN 1435-4934).
- Metzger, K. (1893): *Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume*. In: *Mündener Forstliche Hefte* (5), S. 35–86.
- Milwich, M.; Speck, T. (2010): *Learning from nature. Lightweight constructions using the 'technical plant stem'*. In: *Textiles, polymers and composites for buildings*, S. 290–309. DOI: 10.1533/9780845699994.2.290.
- Mirmiran, A.; Shahawy, M. (1996): *A new concrete-filled hollow FRP composite column*. In: *Composites Part B: Engineering* 27 (3-4), S. 263–268. DOI: 10.1016/1359-8368(95)00019-4.
- Mirmiran, A.; Shahawy, M. (1997): *Dilation characteristics of confined concrete*. In: *Mech. Cohes.-Frict. Mater.* 2 (3), S. 237–249. DOI: 10.1002/(SICI)1099-1484(199707)2:3<237::AID-CFM32>3.0.CO;2-2.

- Möhl, C.; Born, L.; Küppers, S.; Jonas, F. A.; Knippers, J.; Milwich, M.; Gresser, G. T. (2017): *Manufacturing of branched structures for fibre-reinforced plastic-concrete-hybrid composites*. In: Joachim M Hausmann, Marc Siebert und Axel von Hehl (Hg.): *Hybrid Materials and Structures 2018*, S. 165–170.
- Mönnich, S.; Glöckner, R.; Becker, F. (2011): *Analysis of Fibre Orientation using μ CT Data*. In: 8th European LS-Dyna User Conference Strassbourg.
- Mörsch (1904): *Schub- und Scherfestigkeit des Betons*. In: Schweizerische Bauzeitung 43/44. DOI: 10.5169/SEALS-24828.
- Mortazavi, A. A.; Pilakoutas, K.; Son, K. S. (2003): *RC column strengthening by lateral pre-tensioning of FRP*. In: *Construction and Building Materials* 17 (6-7), S. 491–497. DOI: 10.1016/S0950-0618(03)00046-1.
- Müller, L.; Milwich, M.; Gruhl, A.; Böhm, R.; Gude, M.; Haushahn, T.; Masselter, T. et al. (2013): *Biomimetisch optimierte verzweigte Faserverbundstrukturen mit hoher Tragfähigkeit*. In: *Melliand Textilberichte* 2, S. 88–93.
- Murray, C. D. (1926): *The Physiological Principle of Minimum Work. I. The Vascular System and the Cost of Blood Volume*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 12 (3), S. 207–214. DOI: 10.1073/pnas.12.3.207.
- Nachtigall, W.; Pohl, G. (2013): *Bau-Bionik. Natur Analogien Technik*. Heidelberg: Springer Vieweg.
- Naik, R. A.; Ifju, P. G.; Masters, J. E. (1994): *Effect of fiber architecture parameters on deformation fields and elastic moduli of 2-D braided composites*. In: *Journal of Composite Materials* 28 (7), S. 656–681.
- Nazemi, S. M.; Cooper, D. M. L.; Johnston, J. D. (2016): *Quantifying trabecular bone material anisotropy and orientation using low resolution clinical CT images. A feasibility study*. In: *Medical engineering & physics* 38 (9), S. 978–987. DOI: 10.1016/j.medengphy.2016.06.011.
- Niebaum, A.; Seitz, H. (2017): *Ressourceneffizienz durch Bionik*. Paderborn: Bonifatius (VDI ZRE Publikation: Kurzanalyse, 19).
- Niedermeier, R. (2009): *Verstärkung von Stahlbetondruckgliedern durch Umschnürung*. Habilitationsschrift: Technische Universität München.
- Niklas, K. J. (1992): *Plant biomechanics. An engineering approach to plant form and function*. Chicago, Ill: Univ. of Chicago Press.
- Niklas, K. J.; Spatz, H.-C. (2012): *Plant Physics*. Chicago: University of Chicago Press. Online verfügbar unter <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10537820>.
- Niklas, K. J.; Spatz, H.-C.; Vincent, J. (2006): *Plant biomechanics. An overview and prospectus*. In: *American journal of botany* 93 (10), S. 1369–1378. DOI: 10.3732/ajb.93.10.1369.
- Ortlepp, R.; Lorenz, A.; Curbach, M. (2011): *Umschnürungswirkung textildewehrter Verstärkungen im Lasteinleitungsbereich von Stützen in Abhängigkeit von der Geometrie*. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 106 (7), S. 490–500. DOI: 10.1002/best.201100018.
- Otsu, N. (1979): *A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms*. In: *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.* 9 (1), S. 62–66. DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- Otto, F. (1995): *Verzweigungen*. SFB 230. Stuttgart: Institut für Leichte Flächentragwerke (Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke, IL, Universität Stuttgart, 46).

-
- Ozbakkaloglu, T.; Lim, J. C. (2013): *Axial compressive behavior of FRP-confined concrete. Experimental test database and a new design-oriented model*. In: Composites Part B: Engineering 55, S. 607–634. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.07.025.
- Ozbakkaloglu, T.; Lim, J. C.; Vincent, T. J. (2013): *FRP-confined concrete in circular sections. Review and assessment of stress–strain models*. In: Engineering Structures 49, S. 1068–1088. DOI: 10.1016/j.engstruct.2012.06.010.
- Panshin, A. J.; Zeeuw, C. d. (1980): *Textbook of wood technology. Structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada*. 4. ed. New York: McGraw-Hill (McGraw-Hill series in forest resources).
- Papanikolaou, V. K.; Kappos, A. J. (2007): *Confinement-sensitive plasticity constitutive model for concrete in triaxial compression*. In: International Journal of Solids and Structures 44 (21), S. 7021–7048. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2007.03.022.
- Paul, D.; Koochi Fayegh Dehkordi, L.; Scheven, M. von; Bischoff, M.; Radde, N. (2016): *Structural Design with Biological Methods: Optimality, Multi-functionality and Robustness*. In: Jan Knippers, Klaus G. Nickel und Thomas Speck (Hg.): Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biological Design and Integrative Structures. Cham: Beuth (Biologically-Inspired Systems, 9), S. 341–360.
- Pellegrino, C.; Modena, C. (2010): *Analytical Model for FRP Confinement of Concrete Columns with and without Internal Steel Reinforcement*. In: J. Compos. Constr. 14 (6), S. 693–705. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000127.
- Perillo, G.; Vacher, R.; Grytten, F.; Sørbø, S.; Delhayé, V. (2014): *Material characterisation and failure envelope evaluation of filament wound GFRP and CFRP composite tubes*. In: Polymer Testing 40, S. 54–62. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2014.08.009.
- Piscesa, B.; Attard, M. M.; Samani, A. K. (2016): *A lateral strain plasticity model for FRP confined concrete*. In: Composite Structures 158, S. 160–174. DOI: 10.1016/j.compstruct.2016.09.028.
- Popovics, S. (1973): *A numerical approach to the complete stress-strain curves for concrete*. In: Cement and Concrete Research 5 (3), S. 583–599.
- Pour, A. F.; Ozbakkaloglu, T.; Vincent, T. J. (2018): *Simplified design-oriented axial stress-strain model for FRP-confined normal- and high-strength concrete*. In: Engineering Structures 175, S. 501–516. DOI: 10.1016/j.engstruct.2018.07.099.
- Prado, M.; Dörstelmann, M.; Solly, J.; Menges, A.; Knippers, J. (2017): *Elytra Filament Pavilion: Robotic Filament Winding for Structural Composite Building Systems*. In: Fabricate 2017: Rethinking Design and Construction, S. 224–231. Online verfügbar unter <https://www.jstor.org/stable/j.ctt1n7qkg7.35>.
- Puck, A. (1965): *Zum Deformationsverhalten und Bruchmechanismus von unidirektionalem und orthogonalem Glasfaser/Kunststoff*. In: Kunststoffe 55 (12), S. 913–922.
- Ranz, T. (2007): *Ein feuchte- und temperaturabhängiger anisotroper Werkstoff: Holz*. In: Beiträge zur Materialtheorie (2), S. 1–49.
- Reimer, V.; Alptekin, S.; Gries, T. (2016): *Investigation of the Relations Between the Parameters in the Radial Braiding Process*. In: Yordan Kyosev (Hg.): Recent developments in braiding and narrow weaving. Cham: Springer, S. 111–120.
- Richart, F. E.; Brandtzæg, A.; Brown, R. L. (1928): *A study of the failure of concrete under combined compressive stresses*. Urbana, Ill.: University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin; no. 185 (University of Illinois bulletin, v. 26, no. 12).
- Richter, J. P.; Bell, R. C. (Hg.) (1970): *The notebooks of Leonardo da Vinci // The Notebooks of Leonardo da Vinci, Vol. 1*. New York: Dover Publications (Dover Fine Art, History of Art, v.1).

- Rogge, A. (2002): *Materialverhalten von Beton unter mehrachsiger Beanspruchung*. Dissertation. München: Lehrstuhl für Massivbau (Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, 4/2003).
- Rosenbaum, J. U. (1991): *Flechten. Rationelle Fertigung faserverstärkter Kunststoffbauteile*. Dissertation. Köln: TÜV Rheinland (Ingenieurwissen Kunststoffverarbeitung).
- Roth-Nebelsick, A. (2006): *Die Prinzipien der pflanzlichen Wasserleitung. Nach oben gezogen*. In: Biologie in unserer Zeit 36 (2), S. 110–118. DOI: 10.1002/biuz.200610305.
- Rousakis, T. C.; Karabinis, A. I.; Kioussis, P. D.; Tepfers, R. (2008): *Analytical modelling of plastic behaviour of uniformly FRP confined concrete members*. In: Composites Part B: Engineering 39 (7-8), S. 1104–1113. DOI: 10.1016/j.compositesb.2008.05.001.
- Saadatmanesh, H.; Ehsani, M. R.; Li, M.-W. (1994): *Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps*. In: ACT Structural Journal 91 (4), S. 434–447.
- Samaan, M. S. (1997): *An analytical and experimental investigation of concrete-filled fiber reinforced plastics (FRP) tubes*. Dissertation. University of Central Florida, Orlando, Florida.
- Sandhaas, C. (2012): *Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates*. Zutphen: Wöhrmann.
- Scherrer, M. (2004): *Kerbspannung und Kerbformoptimierung*. Dissertation. Karlsruhe: Institut für Materialforschung (Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7021).
- Schindelin, J.; Arganda-Carreras, I.; Frise, E.; Kaynig, V.; Longair, M.; Pietzsch, T.; Preibisch, S. et al. (2012): *Fiji. An open-source platform for biological-image analysis*. In: Nature methods 9 (7), S. 676–682. DOI: 10.1038/nmeth.2019.
- Schlaich, J.; Schober, H. (1999): *Rohrknoten aus Stahlguß*. In: Stahlbau 68 (8), S. 652–665.
- Schlegel, R. (2006): *Materialmodelle für das Bauwesen und die Geotechnik in ANSYS*. Stuttgart/Fellbach.
- Schulitz, Helmut C., et al. (2001): *Stahlbau-Atlas*. 1., unveränd. Nachdr. Basel: Birkhäuser.
- Schürmann, H. (2007): *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. Mit 39 Tabellen*. 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer (VDI).
- Schwager, H.; Haushahn, T.; Neinhuis, C.; Speck, T.; Masselter, T. (2010): *Principles of Branching Morphology and Anatomy in Arborescent Monocotyledons and Columnar Cacti as Concept Generators for Branched Fiber-Reinforced Composites*. In: Adv. Eng. Mater. 12 (12), B695-B698. DOI: 10.1002/adem.201080057.
- Schwager, H.; Masselter, T.; Speck, T.; Neinhuis, C. (2013): *Functional morphology and biomechanics of branch-stem junctions in columnar cacti*. In: Proceedings of the Royal Society B: Biological sciences 280 (1772), S. 20132244. DOI: 10.1098/rspb.2013.2244.
- Schwager, H.; Neinhuis, C. (2016): *Biomimetic fiber-reinforced composite structures based on natural plant ramifications serving as models*. In: Mat.-wiss. u. Werkstofftech. 47 (11), S. 1087–1098. DOI: 10.1002/mawe.201600633.
- Schwendener, S. (1874): *Das Mechanische Princip im anatomischen Bau der Monocotylen mit vergleichenden Ausblicken auf die übrigen Pflanzenklassen. Mit 13 Holzschnitten und 14 lithogr. Tafeln in Farbendruck*. Leipzig: Engelmann.
- Shahawy, M.; Mirmiran, A.; Beitelman, T. (2000): *Tests and modeling of carbon-wrapped concrete columns*. In: Composites Part B: Engineering 31 (6-7), S. 471–480. DOI: 10.1016/S1359-8368(00)00021-4.

-
- Shinozaki, K.; Yoda, K.; Hozumi, K.; Kira, T. (1964): *A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory*. In: JAPANESE JOURNAL OF ECOLOGY 14 (3), S. 97–105. DOI: 10.18960/seitai.14.3_97.
- Slater, D. (2016): *An argument against the axiom of uniform stress being applicable to trees*. In: Arboricultural Journal 38 (3), S. 143–164. DOI: 10.1080/03071375.2016.1202699.
- Slater, D.; Ennos, R. (2015a): *Interlocking wood grain patterns provide improved wood strength properties in forks of hazel (Corylus avellana L.)*. In: Arboricultural Journal 37 (1), S. 21–32. DOI: 10.1080/03071375.2015.1012876.
- Slater, D.; Ennos, R. (2015b): *The Level of Occlusion of Included Bark Affects the Strength of Bifurcations in Hazel (Corylus avellana L.)*. In: Arboriculture & Urban Forestry 41 (4), S. 194–207.
- Slater, D.; Harbinson, C. (2010): *Towards a new model of branch attachment*. In: Arboricultural Journal 33 (2), S. 95–105. DOI: 10.1080/03071375.2010.9747599.
- Sörensen, J. (2008): *Untersuchungen zur Vereinfachung der Kerbformoptimierung*. Dissertation. Karlsruhe: Institut für Materialforschung (Wissenschaftliche Berichte, FZKA 7397).
- Speck, K. (2008): *Beton unter mehraxialer Beanspruchung. Ein Materialgesetz für Hochleistungsbetone unter Kurzzeitbelastung*. Dissertation. Dresden: Institut für Massivbau (Schriftenreihe Konstruktiver Ingenieurbau Dresden, 16).
- Speck, K.; Curbach, M. (2010): *Ein einheitliches dreiaxiales Bruchkriterium für alle Betone*. In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (4), S. 233–243. DOI: 10.1002/best.200900077.
- Speck, T.; Burgert, I. (2011): *Plant Stems. Functional Design and Mechanics*. In: Annu. Rev. Mater. Res. 41 (1), S. 169–193. DOI: 10.1146/annurev-matsci-062910-100425.
- Speck, T.; Rowe, N. P. (2006): *How to become a successful climber-mechanical, anatomical, ultra-structural and biochemical variations during ontogeny in plants with different climbing strategies*. In: Proc. 5th Int. Plant Biomechanics Conf, Bd. 1, S. 103–108.
- SPP 1420: *Biomimetic Materials Research: Functionality by Hierarchical Structuring of Materials, Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) - Projekt Nummer 73847914*.
- Stewart, M. G.; O’Callaghan, D.; Hartley, M. (2013): *Review of QTRA and Risk-based Cost-benefit Assessment of Tree Management*. In: Arboriculture & Urban Forestry 39 (4), S. 165–172.
- Stubbs, C. J.; Cook, D. D.; Niklas, K. J. (2019): *A general review of the biomechanics of root anchorage*. In: Journal of experimental botany 70 (14), S. 3439–3451. DOI: 10.1093/jxb/ery451.
- Szwed, A.; Kamińska, I. (2017): *Modification of Concrete Damaged Plasticity model. Part I. Modified plastic potential*. In: MATEC Web Conf. 117 (3), S. 160. DOI: 10.1051/mateconf/201711700160.
- Teng, J. G.; Jiang, T.; Lam, L.; Luo, Y. Z. (2009): *Refinement of a Design-Oriented Stress Strain Model for FRP-Confined Concrete*. In: J. Compos. Constr. 13 (4), S. 269–278. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000012.
- Teng, J. G.; Xiao, Q. G.; Yu, T.; Lam, L. (2015): *Three-dimensional finite element analysis of reinforced concrete columns with FRP and/or steel confinement*. In: Engineering Structures 97, S. 15–28. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.03.030.
- Teng, J., Huang, Y., Lam, L., Ye, L. (2007): *Theoretical Model for Fiber-Reinforced Polymer-Confined Concrete*. In: Journal of composites for construction 11 (2), S. 201–210. DOI: 10.1061/(ASCE)10900268(2007)11:2(201).

- Teschner, R. (2013): *Glasfasern*. 1. Aufl (2. Aufl.: 2019). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Tomlinson, P. B.; Fisher, J. B.; Hallé, F.; Villalobos, R. (2005): *Development of Woody Branch Attachments in Schefflera (Araliaceae or Apiaceae)*. In: American journal of botany 92 (11), S. 1765–1773.
- van den Berg, S. (2010): *A new experiment procedure to predict the mechanical properties of composites reinforced by braided fiber bundles. Part 1: Model description and experiment definition*. NLR-TP-2009-244-PT-1: National Aerospace Laboratory NLR.
- Vandiver, R.; Goriely, A. (2008): *Tissue tension and axial growth of cylindrical structures in plants and elastic tissues*. In: Europhys. Lett. 84 (5), 58004:1-6. DOI: 10.1209/0295-5075/84/58004.
- VDI 6220 (Dezember 2012): *Bionik - Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten*.
- Wetjen, D. (2016): *Wechselwirkung von Carbonfasern, Schlichte und epoxidbasierter polymerer Matrix in carbonfaserverstärkten Kunststoffen*. Dissertation. Augsburg: Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:384-opus4-39180>.
- William, K. J.; Warnke, E. P. (1974): *Constitutive model for the triaxial behaviour of concrete*. In: Proceedings of the Seminar on: Concrete Structures Subjected to Triaxial Stresses, Bergamo, Italy, 19.05.1974, 19, S. 1–30. DOI: 10.5169/seals-17526.
- Wirjadi, O. (2007): *Survey of 3d image segmentation methods*. Kaiserslautern: ITWM (Berichte des Fraunhofer ITWM, 123).
- Witten, E. (Hg.) (2014): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites. Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. Unter Mitarbeit von Volker Mathes. AVK, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe. 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=601673>.
- Xiao, Q. G.; Teng, J. G.; Yu, T. (2010): *Behavior and Modeling of Confined High-Strength Concrete*. In: J. Compos. Constr. 14 (3), S. 249–259. DOI: 10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000070.
- Xiao, Y.; Wu, H. (2000): *Compressive Behavior of Concrete Confined by Carbon Fiber Composite Jackets*. In: Journal of Materials in Civil Engineering 12 (2), S. 139–146.
- Xiao, Y.; Wu, H. (2003): *Compressive Behavior of Concrete Confined by Various Types of FRP Composite Jackets*. In: Journal of Reinforced Plastics and Composites 22 (13), S. 1187–1201. DOI: 10.1177/0731684403035430.
- Yoon, S.-H.; Cho, W.-M.; Kim, C.-G. (1997): *Measurement of modulus in filament wound ring specimen using split disk test*. In: Experimental Techniques 21 (1), S. 25–28. DOI: 10.1111/j.1747-1567.1997.tb00488.x.
- Yu, T.; Teng, J. G.; Wong, Y. L.; Dong, S. L. (2010a): *Finite element modeling of confined concrete-I. Drucker-Prager type plasticity model*. In: Engineering Structures 32 (3), S. 665–679. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.11.014.
- Yu, T.; Teng, J. G.; Wong, Y. L.; Dong, S. L. (2010b): *Finite element modeling of confined concrete-II. Plastic-damage model*. In: Engineering Structures 32 (3), S. 680–691. DOI: 10.1016/j.engstruct.2009.11.013.
- Zheng, X.; Shen, G.; Wang, C.; Li, Y.; Dunphy, D.; Hasan, T.; Brinker, C. J.; Su, B.-L. (2017): *Bio-inspired Murray materials for mass transfer and activity*. In: Nature communications 8, S. 14921. DOI: 10.1038/ncomms14921.

Zilch, K.; Zehetmaier, G. (2010): *Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 (Fassung 2008) und EN 1992-1-1 (Eurocode 2)*. 2., neu bearb. und erw. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-70638-0>.

Zimmermann, M. H. (1978): *Hydraulic architecture of some diffuse-porous trees*. In: Can. J. Bot. 56, S. 2286–2295.

Zimmermann, M. H.; Brown, C. L. (1971): *Trees. Structure and function*. Unter Mitarbeit von Melvin T. Tyree. Berlin, Heidelberg, New York: Springer.

Lizenzen von Veröffentlichungen:

License by RightsLink, Ordernumber: 4467101499841
Born L. et al. (2016) *Branched Structures in Plants and Architecture*. In: Knippers J., Nickel K., Speck T. (eds) *Biomimetic Research for Architecture and Building Construction. Biologically-Inspired Systems*, vol 8. Springer, Cham
DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-46374-2_10

Abbildungen

Bild 1: Interdisziplinärer Kontext	1
Bild 2: Hierarchische Ebenen von Holz (Pinie)	6
Bild 3: Verteilung der Hauptbestandteile der Zellwände von Koniferen (Nadelhölzern) für verschiedene Lagen nach Panshin und Zeeuw (1980)	7
Bild 4: Prinzip der Reduktion von Druckspannungen und Erhöhung der Zugspannungen eines Baumstammquerschnitts durch Wachstumsspannungen für eine Biegebeanspruchung aus Wind nach Mattheck und Kubler (1997)	8
Bild 5: Vorspannung bei Pflanzen: Rhabarber zeigt unterschiedliche Längen nach Querschnittsseparation	8
Bild 6: Konventionell hergestellte Tragknoten aus Stahl	10
Bild 7: Verzweigte Stütze in FKV-Beton-Hybrid-Bauweise (Quelle: ITKE)	12
Bild 8: Verzweigte Strukturen mit beispielhafter Benennung von Elementen	12
Bild 9: Auswahl möglicher „Faserverläufe“ für Verzweigungen	13
Bild 10: <i>Schefflera arboricola</i> : Zimmerpflanze	19
Bild 11: <i>S. arboricola</i> : Abgeschnittener Stamm zur Provokation einer Verzweigungsausbildung	19
Bild 12: <i>S. arboricola</i> : decortifizierte und getrocknete Verzweigung mit aufgelösten Einzelsträngen im Stamm-Ast-Anschlussbereich	20
Bild 13: <i>S. arboricola</i> : Belastungsversuch und zugehöriges vereinfachtes statisches Modell zur Überprüfung des Versuchsaufbaus	21
Bild 14: Oberflächennetz ermittelt aus rekonstruierten μ CT Bilddaten	21
Bild 15: Maßdefinition an einer Verzweigung	23
Bild 16: Aus rekonstruierten μ CT Bilddaten erzeugtes Oberflächennetz und extrahierte Achsverläufe	24
Bild 17: <i>S. arboricola</i> : Parametrisiertes Modell auf Basis von Geometriedaten einer abstrahierten Verzweigung	25
Bild 18: <i>S. arboricola</i> : Statisches System und Lastfälle des parametrisierten Modells	25
Bild 19: Biomechanische Simulation einer pflanzlichen Verzweigung (hier: <i>Schefflera arboricola</i>)	26
Bild 20: Prozess zur Analyse der Biomechanik pflanzlicher Vorbilder basierend auf digitalen Geometriedaten	27
Bild 21: <i>S. arboricola</i> : statisches System und ein Lastfall des Volumenmodells	28
Bild 22: Analyse am Mikro-CT-Bild des Verzweigungsbereichs von <i>S. arboricola</i>	29
Bild 23: Ablauf des Programms zur Analyse von Faserorientierungen, Schritt „Orientierungstensoranalyse“ in Bild 20	30
Bild 24: Separation zusammenhängender flächiger Bereiche nahe der Oberfläche durch Modifikation und Erosion als Input für die Orientierungsanalyse	31

Bild 25: Effekt der Erosion zur Trennung von Objekten	31
Bild 26: Analyseergebnisse mit unterschiedlichen Rastergrößen eines binären Bildes mit 500 x 500 Pixel	31
Bild 27: Histogramme der ersten Eigenwerte der Orientierungsvektoren	33
Bild 28: Ergebnisse der Orientierungstensoranalyse am Beispiel von <i>S. arboricola</i>	34
Bild 29: Orientierungsergebnis (2D) eines theoretischen Beispiels	34
Bild 30: Verformungen des Parametermodells für eine vertikale Belastung von $F_v = 170$ N	36
Bild 31: Verformungen des Parametermodells für eine horizontale Belastung von $F_h = 350$ N	36
Bild 32: Normalkräfte des Parametermodells für eine vertikale Belastung von $F_v = 170$ N	36
Bild 33: Normalkräfte des Parametermodells für eine horizontale Belastung von $F_h = 350$ N	36
Bild 34: Lastverformungsdiagramm für eine vertikale Einzellast am Astende mit eingespannter Lagerung der Einzelstränge am Ansatzpunkt am Stamm	38
Bild 35: Lastverformungsdiagramm für eine horizontale Einzellast am Astende mit eingespannter Lagerung der einzelnen Einzelstränge am Ansatzpunkt	39
Bild 36: Normalkraft und Momentenverlauf des fünften Einzelstranges für eine vertikale Einzelkraft	40
Bild 37: Gegenüber Verbindungen konstanter Krümmung erzeugte Verläufe von Einzelsträngen in Annäherung an das Prinzip der Araliaceae anhand von Endtangente, deren Schnittpunkt jenseits der Ansatzpunkte liegt	40
Bild 38: Ergebnis des Mappings der analysierten Faserverläufe auf die Volumenelemente des FE-Netzes	41
Bild 39: Hauptspannungstrajektorien für eine vertikale Einzelkraft am Astende	42
Bild 40: Simulation für vertikale Belastung am Astende ($z = 2$)	43
Bild 41: Winkeldifferenzen der Ergebnisse aus der OT-Analyse und der CAIO sowie maximale Schubspannungen im Stamm-Ast-Anschlussbereich, vertikale Last	44
Bild 42: Relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen der Richtungsvektoren der ersten Hauptspannung aus der Orientierungstensoranalyse (a_{11}) und aus der CAIO für eine <i>vertikale Belastung</i> im ‚fingerartigen‘ Anschlussbereich	44
Bild 43: Relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen der Richtungsvektoren der ersten Hauptspannung aus der Orientierungstensoranalyse (a_{11}) und aus der CAIO für eine <i>horizontale Belastung</i> im ‚fingerartigen‘ Anschlussbereich	44
Bild 44: Gewichtete relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen für eine <i>vertikale Belastung</i>	45
Bild 45: Gewichtete relative Häufigkeiten der Winkeldifferenzen für eine <i>horizontale Belastung</i>	45
Bild 46: Offene und geschlossene Verzweigungen in der Architektur, Modell Frei Otto, ZKM Zentrum für Kunst und Medien Karlsruhe	47
Bild 47: Verzweigungen nach Bildungsregeln	48
Bild 48: Pflanzliche Verzweigungen	49

Bild 49: Qualitative Schnittkraftverläufe von Bäumen und verzweigten Stützen, aus Born et al. (2016)	49
Bild 50: Vergleich von statischen Systemen pflanzlicher Verzweigungen und derer von Tragkonstruktionen	50
Bild 51: Deckenuntersicht östliches Langhaus Westminster Abbey, London (1269): Mauerwerk	53
Bild 52: Verzweigte Pfeiler einer Fußgängerbrücke, Untertürkheim (1991): Stahlgussknoten	53
Bild 53: Vergleich der Biegemomente in kNm von vier Tragsystemen mit 40 m Länge unter einer vertikalen Linienlast von 10 kN/m	53
Bild 54: Verzweigte Tragstruktur mit triaxial geflochtenem Textil, Ausstellung „Baubionik“ im Schloss Rosenstein (PBG,ITKE, ITFT)	55
Bild 55: Globale Tragstruktur – Lokale Verzweigung – Parametrisierung: Modell des Großdemonstrators zur Ausstellung „Baubionik“ im Schloss Rosenstein	56
Bild 56: Verzweigte Stütze am Stuttgarter Flughafen	57
Bild 57: Feder-Kraft-Modell zur Topologiefindung	58
Bild 58: Formoptimierung einer verzweigten Stütze in Anlehnung an Bletzinger (1990)	59
Bild 59: Formoptimierung einer verzweigten Stütze mit 16 vertikal beanspruchten Stützenkopfpunkten	60
Bild 60: Topologieoptimierung ebener Strukturen	60
Bild 61: Einwirkende Normalkraft N und aufnehmbare Knicklast N_k in kN	62
Bild 62: Durchmesser Verhältnis des Nachfolgers bei räumlicher Anordnung im Verhältnis zum Durchmesser des Vorgängers für unterschiedliche Anzahl angeschlossener Stäben	62
Bild 63: Mögliche Verarbeitungsformen von Filamenten nach Knippers et al. (2010)	63
Bild 64: Rovings aus Carbon in schwarz und Glasfasern in weiß	63
Bild 65: Gitteraufbau eines Kohlenstoff-Einkristalls und schematische Darstellung der Bandstruktur von grafitierten Kohlenstofffasern nach Flemming und Roth (2003), S. 557	64
Bild 66: Prozessweg zur Herstellung von Kohlenstofffasern basierend auf Polyacrylnitril nach Eickenbusch und Krauss (2013) und Witten (2014)	65
Bild 67: Reißlängen ausgewählter Stähle und Chemiefasern	65
Bild 68: Spannungsdehnungslinien von CF-EP (CFK), GF-EP (GFK), Betonstahl und Beton im Vergleich	67
Bild 69: Einfluss des Faserwinkels auf die mechanischen Eigenschaften einer UD-Schicht (CF-EP)	68
Bild 70: Lagenaufbau Vakuuminfusionsverfahren (VRI©)	69
Bild 71: Schematischer Aufbau einer Vakuuminfusion	69
Bild 72: Konzeptstudie einer vierschenkligen Verzweigung hergestellt im Wickelverfahren (GF/CF-EP, $d = 150$ mm, studentische Arbeit)	70
Bild 73: Roboter und Flechtrad ($d \sim 4$ m) der DITF Denkendorf	71

Bild 74: Prinzipieller Aufbau von Flechtrad und Flechtroboter zum Flechten einer Verzweigung	71
Bild 75: Bewegung dreier ausgewählter Spulenträger während des Flechtvorgangs	72
Bild 76: Zweiflechtiges (biaxiales) Schlauchtextil aus Carbon-Rovings	72
Bild 77: Einfluss des Flechtwinkels auf die Länge einer Umschlingung	73
Bild 78: Einheitszelle des Geflechts (diamond binding, schematisch und ohne volle Flächenabdeckung)	73
Bild 79: Flechtprinzipien für Verzweigungen	74
Bild 80: Prinzip der Flecht kernbewegung	75
Bild 81: Umflechtungen von Verzweigungen	76
Bild 82: Schritte zur Herstellung verzweigter Tragknoten	77
Bild 83: Digitale Flechtplanung zur Generierung des Steuerungs codes	78
Bild 84: Hybrider Tragknoten mit drei Schenkeln, in Kooperation mit dem ITFT hergestellter Funktionsdemonstrator mit nachbehandelter, geschliffener Oberfläche in der Ausstellung „Baubionik“, Naturkundemuseum Stuttgart	78
Bild 85: Parametrisierte Geometrie einer ebenen Verzweigung	79
Bild 86: Mehrfachverzweigung mit konkaven und für die Flecht ablage verbesserten Flächen	79
Bild 87: Gegenseitige Beeinflussung von Anforderungen an Tragfähigkeit und Randbedingungen der Herstellung	80
Bild 88: Betonfestigkeit im rotationssymmetrischen Spannungszustand bei axialer Belastung aus Jonas und Knippers (2017)	83
Bild 89: Kräfte und Spannungen am umschnürten Betonzylinder	84
Bild 90: Mögliche Verläufe der Spannungsdehnungslinien von FKV-umschnürten Betonzylindern mit unterschiedlich großen Steifigkeiten der Hülle in Anlehnung an Teng et al. (2009) und Kwan et al. (2015)	86
Bild 91: Mindestens erforderliche Steifigkeiten von FKV-Umschnürungen für eine effektive Umschnürung in Anlehnung an Jonas und Knippers (2017)	86
Bild 92: Potential von FKV-Umschnürungen zur Steigerung der Betondruckfestigkeit, ausgewertet anhand zweier Modelle (Jiang und Teng 2007; Kwan et al. 2015) nach Jonas und Knippers (2017)	87
Bild 93: Entwurf von umschnürten Druckzylindern zur Steigerung der Drucktragfähigkeit durch Ausbilden eines mehraxialen Spannungszustands anhand von FKV-Umschnürungen	90
Bild 94: Polardiagramm eines triaxialen CF-EP-Geflechts Verhältnis des Flächengewichts der Flecht fäden zu Stehfäden 2 : 1,36	92
Bild 95: Bruchbilder GF-EP-Versuchskörper von links nach rechts: Probe P02, P06, P11 (Dr.-Ing. Hub)	93
Bild 96: Spannungsdehnungslinien der betongefüllten GF-EP-Druckproben, A: P02-P09 (B25), B: P11-P17 (B55)	94
Bild 97: Herstellung von Geflechtrohren im VRI-Verfahren	96

Bild 98: Aufbau des „split disc test“, Halbscheiben-Zugversuch	97
Bild 99: Exemplarischer Verlauf von Spannung und Dehnung einer Ringprobe (Wickelrohr) im „split disc test“ unter mehrfach gesteigerter zyklischer Belastung bis zum Bruch	99
Bild 100: Spannungsdehnungsdiagramm der in Bild 99 gezeigten Probe im Bereich des vierten Peaks (380 s – 490 s) mit einer an- und absteigenden Kurve sowie einem linearen Trend	99
Bild 101: Versuchsanordnung der Druckprüfung von umschnürten Betonzylindern, ausgestattet mit paarweise gegenüberliegenden Dehnmessstreifen in Längs- und Umfangsrichtung sowie Wegaufnehmern, nach Jonas und Knippers (2017)	102
Bild 102: VR1: Probe B2 und Probe W3 nach dem Belastungsversuch mit aufgerissenen Umschnürungen	103
Bild 103: Experimentell ermittelte Spannungsdehnungslinien von Betonzylindern (Rm: Referenzbetonzylinder, Mittelwert von n = 3) und umschnürten Betonzylindern (B: geflochtene Hülle, in Klammern die Lagenanzahl, Wm: gewickelte Umschnürung, Mittelwert von n = 3)	103
Bild 104: Details triaxialer Geflechte mit Stehfäden aus Carbonfasern und Flechtfäden aus Glasfasern in unterschiedlichen Flechtwinkeln	105
Bild 105: Belegung und Schnittmuster hergestellter FKV-Rohre, Maße in cm	106
Bild 106: Hergestellte FKV-Rohre, links; Details der innenliegenden Struktur: Flechtwinkel 30°, rechts oben; Flechtwinkel 70°, rechts unten	107
Bild 107: Versuchsaufbau Vier-Punkt-Biegeprüfung	113
Bild 108: Versuchsreihe 2: Getestete Proben der Serie C_CG_2: Probe (1), (2) und (3) nach dem Versuch	114
Bild 109: Versuchsreihe 2: Getestete Proben der Serie C_CG_4: Probe (1), (2) und (3) nach dem Versuch	114
Bild 110: Spannungsdehnungslinien umschnürter C-G-EP-Betonzylinder	115
Bild 111: Versuchsreihe 2: Biegeversuch: Probe B_CG_70	117
Bild 112: Vier-Punkt-Biegeprüfung: Lastverformungskurve dreier Biegeproben	118
Bild 113: Geometrie der Probekörper mit Tufting-Pins für den Ausdrückversuch	119
Bild 114: Probe CU1 im Ausdrückversuch	121
Bild 115: Mittelwerte der maximalen Schubspannung der Verbundprobekörper	121
Bild 116: Schubspannungs-Verformungskurven der betongefüllten Rohrproben im Ausdrückversuch	122
Bild 117: VR1: Vergleich von experimentell ermittelten und berechneten Spannungsdehnungslinien FKV-umschnürter Betonzylinder	124
Bild 118: Grafische Darstellung der Fließbedingung nach Menétrey-William, enthalten in ANSYS®	128
Bild 119: Modell des Elementtests für triaxiale Belastungen	128
Bild 120: Spannungsdehnungslinien im Elementtest mit unterschiedlichen Seitendrücken	129
Bild 121: Druckfestigkeitssteigerung im rotationssymmetrischen Spannungszustand nach verschiedenen Quellen im Vergleich	130

Bild 122: Auswertung des Modells MW: Einfluss des Dilatanzwinkels (8° , 35°) auf die seitliche Dehnung für verschiedene seitliche Spannungen (5 MPa, 15 MPa, 25 MPa) unter axialer Verschiebung, A: $\Omega_{cr} = 0,1$ und B: $\Omega_{cr} = 1,0$	131
Bild 123: Randbedingungen	131
Bild 124: Netz mit Schalen- und Volumenelementen der Zylinderproben	131
Bild 125: Exemplarische Ergebnisse für Probe VR1_W	132
Bild 126: VR1: Vergleich von experimentell ermittelten und numerisch-mechanisch berechneten Spannungsdehnungslinien FKV-umschnürter Betonzylinder	133
Bild 127: Probenserien für Versuchsreihe 3, Experimentelle Untersuchung an Hybrid-Verzweigungen	136
Bild 128: Schema der Stehfadenanordnung für die Verzweigungen der Biegeprüfung für eine Lage einer Umflechtung mit 1- bis 3-fach gefachten Rovings (vgl. triaxialer Geflechtaufbau Bild 78)	136
Bild 129: Herstellung verzweigter betongefüllter CF-EP-Tragknoten	137
Bild 130: Anordnung der DMS auf der Betonoberfläche der verzweigten Referenzprobekörper	138
Bild 131: VR3: Setup Druck und Biegeversuche	139
Bild 132: Versuchsstand zum Belastungstest von Verzweigungen mit verdreh-verschieblicher Lagerung	139
Bild 133: Versuchsstand zum Belastungstest von Verzweigungen mit eingespannter Lagerung	140
Bild 134: Auflagerdetail des Versuchsstands der verdreh-verschieblichen Konfiguration	140
Bild 135 VR3: Abscher- und Biegeversuch: Beobachtete Rissverläufe (Prinzip)	140
Bild 136: VR3: Probe B_1_2 nach dem Abscher- und Biegeversuch: Schenkel 3 abgesichert (obere Platte zur Lasteinleitung bereits entfernt)	141
Bild 137: VR3: Mittelwerte der Tragfähigkeiten aller Serien der geprüften Hybrid-Tragknoten	142
Bild 138: VR3: Abscher- und Biegeversuch: Kraft-Weg-Diagramm	142
Bild 139: Anordnung der DMS auf der FKV-Hülle für die verzweigten Probekörper der Biegeprüfung	143
Bild 140: Kraft-Dehnungsdiagramm der Probe B_1_3	143
Bild 141: VR3 Druckversuche: Beobachtete Rissverläufe durch den FKV (Prinzip)	143
Bild 142: VR3: Druckversuche: Kraft-Weg-Diagramm	144
Bild 143: Anordnung der DMS auf der FKV-Hülle der verzweigten Probekörper der Druckprüfung	145
Bild 144: Kraft-Dehnungsdiagramm (DMS) der Probe D_1_3	145
Bild 145: Kraft-Dehnungsdiagramm (DMS) der Probe D_2_2	145
Bild 146: Netz mit Schalen- und Volumenelementen der verzweigten Probekörper	147
Bild 147: Ausrichten der Elementkoordinatensysteme entlang einer Leitlinie von einer von drei geflochtenen Lagen, Pfeile markieren die resultierende x-Richtung des Laminats	148

Bild 148: Randbedingungen	148
Bild 149: Darstellung linearisierter Ausnutzungsgrade für das Bruchkriterium der maximalen Spannung (Tabelle 38 D_2)	149
Bild 150: Vierschenkliger Hybrid-Tragknoten aus FKV (CF-EP) und Beton, Prototyp hergestellt am ITFT, Bild: Larissa Born, ITFT, Universität Stuttgart	151
Bild 151: Kollisionskontrolle einer Verzweigung mit vier Schenkeln	151
Bild 152: Ansicht einer beflochtenen, vierschenkligen Verzweigung	152
Bild 153: Durch das ITFT und ITKE hergestellter Funktionsdemonstrator mit nachbehandelter Oberfläche in der Ausstellung „Baubionik“ des Naturkundemuseums Stuttgart, Schloss Rosenstein	152
Bild 154: Konzepte zum Anschluss eines Tragknotens mit einem Bauteil	153
Bild 155: Verzweigte Demonstratoren und biologisches Vorbild in der Ausstellung „Baubionik“ des Naturkundemuseums Stuttgart, Schloss Rosenstein	155

Umschlagbild:

Edgeworthia Chrysantha (PBG, Katharina Bunk), FE-Modell mit angepasster Faserorientierung, Verzweigter textiler Demonstrator des Projekts A06 des Transregio 141 in der Ausstellung „Baubionik“ im Schloss Rosenstein des Naturkundemuseums Stuttgart, (ITKE, Nikolas Früh)

Bild hier sinngemäß verwendet wie Abbildung.

Termini bei der Verwendung von Abbildungen:

Abbildung aus [...]	Diese Abbildung wurde ohne Änderungen von der Quelle übernommen.
Abbildung nach [...]	Diese Abbildung wurde ohne wesentliche Änderungen von der Quelle abgezeichnet.
in Anlehnung an [...]	Diese Abbildung wurde mit Information aus der Quelle [...] erstellt, ergänzt, erweitert oder abgeändert.

Tabellen

Tabelle 1: Parameterkombinationen in Anlehnung der von Bunk et al. (2017) untersuchten Arten der Familie Araliaceae	25
Tabelle 2: Annahme der Materialparameter für getrocknetes Holz von <i>S. arboricola</i> in Anlehnung an Schwager und Neinhuis (2016)	28
Tabelle 3: Angenommene Schädigungsparameter für das CDM in Anlehnung an Sandhaas (2012).	28
Tabelle 4: Theoretische Durchmesseränderungen bei dreischenkigen Verzweigungen unterschiedlicher Annahmen für Belastungen und Durchströmungen	51
Tabelle 5: Anforderungen an Kern und Hülle gemäß Funktion	54
Tabelle 6: Physikalische und mechanische Eigenschaften ausgewählter mineralischer Fasern	66
Tabelle 7: Verbindungen der Schenkelendpunkte von Verzweigungen	77
Tabelle 8: Übersicht der experimentellen Versuche an umschnürten Betonzylindern	82
Tabelle 9: Betoneigenschaften der untersuchten Proben (VR0)	93
Tabelle 10: FKV-Eigenschaften der untersuchten Proben (VR0)	93
Tabelle 11: Bezogene Betonfestigkeiten f_c bzw. f_{ccu} ermittelt in Druckversuchen (VR0)	94
Tabelle 12: Versuchsreihe 1, Übersicht Prüfungen	94
Tabelle 13: Versuchsreihe 1, CF-GF-EP-Betonzylinder, FKV-Prüfungen	95
Tabelle 14: Eigenschaften der FKV-Rohre, Mittelwerte aus Jonas und Knippers (2017)	100
Tabelle 15: Steifigkeiten der Umschnürung, Mithilfe CLT ermittelte Werte der FKV-Rohre aus Jonas und Knippers (2017)	101
Tabelle 16: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28 Tage) aus Jonas und Knippers (2017)	102
Tabelle 17: Mechanische Eigenschaften der umschnürten Betonzylinder (28 Tage) aus Jonas und Knippers (2017)	103
Tabelle 18: Versuchsreihe 2, Übersicht der Prüfungen	105
Tabelle 19: Versuchsreihe 2, CF-GF-EP-Betonzylinder, FKV-Prüfungen	105
Tabelle 20: Eigenschaften der Druckprobekörper mit triaxial geflochtenen CF-GF-EP-Umschnürungen	108
Tabelle 21: Experimentell an Flachproben (je $n = 5$) bestimmte Materialeigenschaften der CF-GF-EP-Verbunde basierend auf triaxial geflochtenem Textil	109
Tabelle 22: Experimentell an Ringproben im Zugversuch bestimmte Materialeigenschaften der CF-GF-EP-Verbunde basierend auf dreiflechtigem Textil	110
Tabelle 23: Faserwinkel und Faservolumenanteile (φ_f) der Flach- und Ringzugproben im Vergleich	112
Tabelle 24: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28 Tage)	114
Tabelle 25: Mechanische Eigenschaften der umschnürten Betonzylinder (28 Tage)	115
	179

Tabelle 26: Versuchsreihe 2: Ergebnisse der Vier-Punkt-Biegeprüfung	118
Tabelle 27: Maße der Ausdrückprobekörper	120
Tabelle 28: Eigenschaften des verwendeten Mörtels nach DIN EN 196-1 (28Tage)	121
Tabelle 29: Betoneigenschaften für den Elementtest	129
Tabelle 30: Parameter für den Beton	132
Tabelle 31: VR1: Verwendete Parameter für den FKV	132
Tabelle 32: Übersicht der experimentellen Versuche an betongefüllten CF-EP-Verzweigungen mit drei Schenkeln	136
Tabelle 33: Physikalische und mechanische Eigenschaften des Festbetons (28, 49 Tage)	138
Tabelle 34: Experimentell an Flachproben (je n = 6) bestimmte Materialeigenschaften der CF-CF-EP-Verbunde, basierend auf triaxial geflochtenem Textil	138
Tabelle 35: Experimentell bestimmte Widerstände der Druckproben	146
Tabelle 36: Parameter für den Beton	148
Tabelle 37: VR3: Verwendete Parameter für den FKV	148
Tabelle 38: Simulierte Traglasten der verzweigten Probekörper	149
Tabelle 39: Geometrie der hergestellten Verzweigung mit vier Schenkeln	151

Curriculum Vitae

Florian A. Jonas

- 2019 – 2015 Research associate and doctoral candidate, Institute of Building structures and Structural Design (ITKE), University of Stuttgart
Thesis Advisor: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers
- 2016 – 2012 Software developer and consultant, EUROPOLES, Neumarkt
Program for nonlinear structural analysis of spun-concrete poles
- 2014, since Freelance engineer
- 2012 – 2006 Student, Technical university of applied science (OTH), Regensburg
Dipl.-Ing.(FH), M. Eng, Structural Engineering
- 2008 Intern, Dywidag international, Jubail, Saudi Arabia
- 1987 Born in Passau, Germany

Herausgeber: Professor Dr.-Ing. Jan Knippers