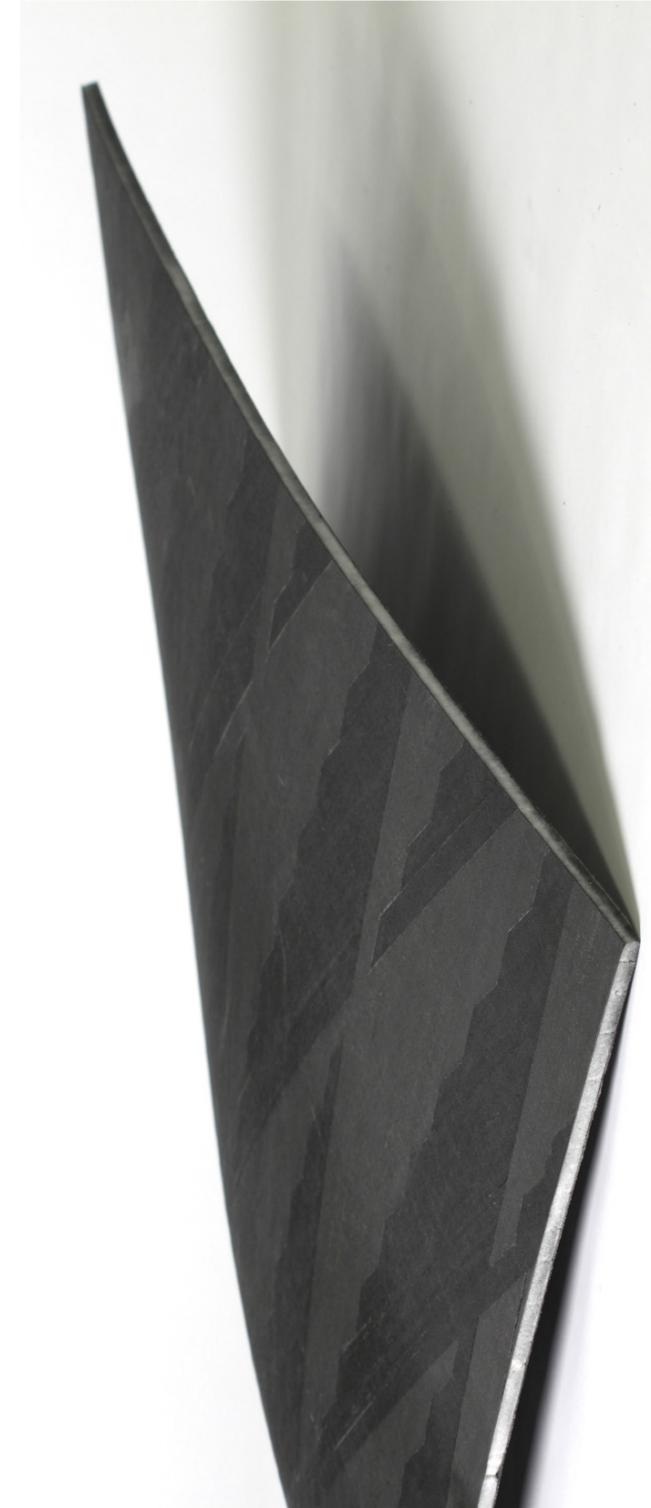


Frédéric Waimer

Integrative Planung
und Herstellung
von freigeformten
Verbundtragwerken
aus CFK 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 41

Frédéric Waimer:
Integrative Planung und Herstellung von freigeformten
Verbundtragwerken aus CFK und Beton

Stuttgart, Februar 2017

ISBN 978-3-922302-41-4

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.

Integrative Planung und Herstellung von freigeformten Verbundtragwerken aus CFK und Beton

Von der Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart

Zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

(Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Frédéric Waimer

aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Mike Schlaich

Tag der mündlichen Prüfung 22. Dezember 2016

Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der

Universität Stuttgart, 2017

Kurzfassung

Die geometrische Komplexität von freigeformten Flächentragwerken in der gegenwärtigen Architektur lässt sich kaum noch wirtschaftlich umsetzen. Die Realisierung ist mit hohen Fertigungs- und Planungskosten verbunden und daher nur wenigen Bauvorhaben vorbehalten. Die herkömmlichen Bautechniken, Bauweisen, Materialien und Planungsprozesse sind Ursache für die hohen Kosten. Faserverstärkte Kunststoffe, automatisierte Fertigungsverfahren und digitale Planungsmöglichkeiten scheinen ein hohes Potential zu besitzen, dieser Problematik entgegenzuwirken.

In der vorliegenden Arbeit wird eine neue Flächenverbundbauweise, bestehend aus einer verlorenen karbonfaserverstärkten Kunststoffschalung (CFK) und Beton, vorgestellt, die es ermöglicht freigeformte Flächentragwerke effizienter umzusetzen. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung des Tragverhaltens, der Herstellung der freigeformten verlorenen Schalung und der Planung der Bauweise.

Die ermittelten mechanischen Eigenschaften der entwickelten kraftschlüssigen Verbindung zwischen Schalung und Beton zeigen, dass auf eine Stahlzugbewehrung verzichtet werden kann. Dies erlaubt es einerseits aufwendige Bewehrungsarbeiten zu vermeiden und andererseits die Schalendicke zu verringern. Die Korrosionsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit der CFK-Verbundschalung ermöglicht es dabei, die Bauteile mit einem schlankeren Querschnitt auszuführen.

Die Herstellung der Verbundschalung erfolgt durch einen neuen Ansatz in der Faserwickeltechnik. Der Schwerpunkt der Entwicklung liegt dabei auf der geometrischen Ausbildung des Wickelkerns und der Simulation des Wickelvorgangs mittels computergestützter Berechnungsverfahren. Die Integration von zusätzlichen Fertigungsschritten ermöglicht ein Verfahren, das es

erlaubt, freigeformte flächige Bauteile zu fertigen. Das Faserwickelverfahren beschränkt sich bisher auf die Herstellung von Bauteilen mit geschlossenen Querschnittsformen. Die Vorteile des klassischen Verfahrens, wie hoher Faservolumengehalt, geringe Fertigungskosten, kurze Prozesszeiten und hohe Ausführungsqualität, sind dabei weiterhin gegeben.

Aufgrund der festgestellten starken Wechselwirkung bei der Planung von Geometrie, Tragwerk und Fertigung, ist für die entwickelte Bauweise eine üblicherweise getrennte und in Reihe geschaltete Bearbeitung der Planungsaufgaben nicht zielführend. Um die Vorteile der Flächenverbundbauweise voll auszuschöpfen, wird in dieser Arbeit abschließend eine integrative Planungs- und Optimierungsstrategie vorgestellt. Diese ermöglicht es, die Eigenschaften von Geometrie, Herstellung und Tragverhalten in ein optimales Verhältnis zu bringen. Die verfolgte Strategie führt zusätzlich zu einer Verkürzung der Planungszeit, einer Reduzierung der Kosten für Planung und Fertigung, sowie einer ästhetischen und ressourcenschonenden Konstruktion. Zur Bestimmung der optimalen Lösung wird ein stochastisches, metaheuristisches Optimierungsverfahren entwickelt, dessen Funktionsweise auf der Nahrungssuche der E-Coli Bakterien beruht.

Abstract

The geometric complexity of freeform structures in today's architecture can hardly be implemented economically. The realization is associated with high production and planning costs and is therefore reserved for only a few construction projects. Conventional construction techniques, construction methods, materials and planning processes are the reason for the high costs. Fibre-reinforced polymers, automated production processes and digital planning possibilities seem to have a high potential to counteract this problem.

This thesis presents a new composite design consisting of a stay-in-place carbon fibre reinforced polymer formwork and concrete, which enables to build freeform structures more efficiently. Thereby the focus lies on the investigation of the load-bearing behaviour, the production of the formwork and the design of the construction principle.

The determined mechanical properties of the rigid connection between the stay-in-place formwork and concrete show that a steel tensile reinforcement is not required. On the one hand this makes it possible to avoid expensive reinforcement work and on the other it reduces the thickness of the formwork. The corrosion resistance and durability of the CFRP formwork allows the components to be designed with small cross sections.

The formwork is produced by a new approach in the filament winding technique. The main focus of the development lies on the geometrical design of the winding core and the simulation of the winding process by means of computer-aided calculation methods. The integration of additional production steps makes it possible to produce double-curved components. Hitherto, the filament winding process was restricted to produce components with closed cross-sectional shapes. The advantages of the classical method, such as high fibre volume, low production costs, short process times and high execution quality, are still present.

Due to the identified strong reciprocity in the planning of geometry, load-bearing structure and manufacturing, a separated and serial processing of the planning tasks for the developed construction method is not suitable. In order to fully exploit the advantages of the composite design, an integrative planning and optimization strategy is presented with this work. This makes it possible to bring the characteristics of geometry, production and load-bearing behaviour into an ideal relationship. The pursued strategy also leads to a reduction of planning time, production costs, as well as an aesthetic and resource-conserving design. To determine the best solution, a stochastic, metaheuristic optimization method is developed whose mode of operation is based on the foraging of the E-coli bacteria.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE) der Universität Stuttgart.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Knippers für die Förderung und Unterstützung meiner Arbeit sowie für die wertvollen Gespräche. Er gab die Anregung zu dieser Arbeit und unterstützte mich jederzeit durch seine tiefgehende fachliche Betreuung während der Bearbeitung. Insbesondere bedanke ich mich auch für die Motivation und das entgegengebrachte Vertrauen.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Mike Schlaich herzlichst für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Mitberichts.

Meine Zeit am ITKE war geprägt von einem zutiefst kollegialen und inspirativen Umfeld, bei allen Kolleginnen und Kollegen bedanke ich mich für diese interessanten und angenehmen Jahre. Nicht zuletzt danke ich allen Freunden und insbesondere meiner Familie für die unendliche Geduld und den stetigen Rückhalt in dieser Zeit.

Stuttgart, im Dezember 2016

Frédéric Waimer

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	II
Abstract	IV
Vorwort.....	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	2
1.1 Motivation	2
1.2 Problemstellung.....	3
1.3 Ziel der vorliegenden Arbeit	3
1.4 Gliederung	4
2 Freigeformte Flächentragwerke	6
2.1 Bauweisen und Bauverfahren.....	7
2.1.1 Stand der Technik.....	7
2.1.2 Stand der Wissenschaft	11
2.2 Planung von komplexen Tragwerken.....	13
3 Bau- und Herstellungsverfahren.....	18
3.1 Beschreibung des Faserwickelverfahrens	18
3.2 Potential der Wickeltechnik als Fertigungsverfahren	21
3.3 Konzept des zusammengesetzten Kerns.....	23
3.3.1 Einteilung der Bauteile	24
3.3.2 Anordnung der Bauteile	25
3.3.3 Generierung der Füllflächen.....	26
3.3.4 Generierung der Polkappen	27
3.4 Analyseverfahren zur Wickelbarkeit von freigeformten Kernen	29

3.4.1	Erläuterung der geometrischen Grundlagen	30
3.4.2	Vereinfachtes Analyseverfahren	31
3.5	Generierung der Fabrikationsdaten	33
3.6	Betonierverfahren.....	35
3.6.1	Trockenspritzverfahren	35
3.6.2	Nassspritzverfahren.....	36
3.6.3	Automatisierung.....	36
4	Bauweise und Tragverhalten	38
4.1	Konzepte	39
4.2	Verbundschalung mit bolzenartigen Schubverbindungsmiteln (Konzept I)	40
4.2.1	Tragprinzip, Herstellung und Versuche	40
4.2.2	Ergebnisse	42
4.2.3	Fazit.....	44
4.3	Zahnleistenverbundschalung (Konzept II).....	45
4.3.1	Erläuterungen zum Tragprinzip	45
4.3.2	Integration in den Fertigungsprozess	46
4.4	Sandwichverbundschalung (Konzept III)	47
4.4.1	Erläuterung zum Tragprinzip	48
4.4.2	Integration in den Fertigungsprozess	49
4.5	Ermittlung der mechanischen Materialeigenschaften	50
4.5.1	Trockenspritzbeton.....	51
4.5.2	CFK-Wickellaminat	51
4.5.3	Verbindung.....	53
4.6	Versuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit.....	55
4.6.1	Versuchsergebnisse der Zahnleistenverbundschalung.....	57
4.6.2	Versuchsergebnisse der Sandwichverbundschalung.....	59
4.7	Vergleich und Fazit.....	61
5	Integrative Planungsstrategie	64
5.1	Ablauf der integrativen Planung	64
5.2	Wechselwirkungen zwischen den Planungsaufgaben.....	67
5.2.1	Wechselwirkung zw. Geometrie- und Herstellungsplanung.....	68
5.2.2	Wechselwirkung zw. Herstellungs- und Tragwerksplanung	74
5.2.3	Wechselwirkung zw. Tragwerks- und Geometrieplanung.....	74

6	Multidisziplinäre Optimierungsstrategie	76
6.1	Verfolgte Optimierungsstrategie	76
6.1.1	Grundlagen der Optimierung.....	79
6.1.2	Soziale und intelligente Strategien bei der Nahrungssuche	80
6.1.3	Beschreibung der Nahrungssuche von E. coli Bakterien	81
6.1.4	Entwickelter Optimierungsalgorithmus	82
6.1.5	Validierung des OA anhand der Rastrigin-Funktion.....	85
6.2	Digitaler Framework	87
6.3	Modell der Herstellungssimulation	87
6.3.1	Implementierung	87
6.3.2	Optimierungsvariablen	89
6.4	Modell der Struktursimulation	90
6.4.1	Mechanische Grundlagen	90
6.4.2	FE-Modellierung der Sandwichverbundschalung	95
6.4.3	Implementierung	96
6.4.4	Optimierungsvariablen	98
6.5	Allgemeine Zielfunktion	99
7	Anwendung der integrativen Planungs- und Optimierungsstrategie.....	102
7.1	Beispiel 1	102
7.2	Beispiel 2	107
7.2.1	Ergebnis der multidisziplinären Optimierung	109
7.2.2	Validierung der Ergebnisse	115
7.3	Beispiel 3	122
7.3.1	Ergebnis der multidisziplinären Optimierung	123
7.3.2	Validierung der Ergebnisse	127
8	Zusammenfassung und Ausblick	132
8.1	Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse	132
8.2	Anregungen für weiterführende Arbeiten	134
	Literaturverzeichnis	136
	Lebenslauf	142

Abkürzungsverzeichnis

CFK	Karbonfaserverstärkter Kunststoff
FVK	Faserverstärkter Kunststoffe
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
NC	Numerical Control
RTM	Rapid-Transfer-Molding
CAD	Computer-Aided Design
NURBS	Non-Uniform Rational B-Splines
CAW	Computer-Aided Winding
BV	Bolzenartige Verbindungsmittel
ZVS	Zahnleistenverbundschalung
SVS	Sandwichverbundschalung
DMS	Dehnmessstreifen
OA	Optimierungsalgorithmus
MDO	Multidisziplinären Design Optimierung
BFO	Bacterial Foraging Optimisation Algorithm
EO	Evolutionären Optimierungsalgorithmus
MSV	Mehrschichtenverbund
CLT	klassische Laminattheorie
FE	Finite Elemente
CAE	Computer-Aided Engineering

1 Einleitung

Das rechnergestützte Arbeiten stellt für Ingenieure ein immer wichtigeres Hilfsmittel im Planungsprozess dar. Zwar ermöglichen 3d-Programme geometrische Formen mathematisch beschreibbar zu machen, jedoch führt die Geometrie zu planerischen und bautechnischen Herausforderungen. Die Komplexität der Bauaufgabe spaltet dadurch die Planung in immer stärkere Einzelaufgaben. Dies betrifft sowohl die planerischen Aspekte, als auch die Fertigung des Bauwerks. Zwar sind die grundlegenden Programme zur Planung von freigeformten Flächentragwerken vorhanden, allerdings mangelt es an Werkzeugen um die Modelle effizient zu bearbeiten. Die Komplexität des Bauwerks erschwert nicht nur die Aufgaben der Planer, sondern ebenfalls die der ausführenden Baufirmen. Sowohl bei der Bauausführung, als auch bei der Arbeitsvorbereitung ist ein hoher Aufwand notwendig.

1.1 Motivation

Die Realisierung von freigeformten Flächentragwerken ist mit hohen Fertigungs- und Planungskosten verbunden. Die herkömmlichen Bauweisen, Bautechniken, Materialien und Planungsprozesse scheinen als Ursache für die hohen Kosten zu stehen. Die Verwendung von karbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) soll an dieser Stelle neue Innovations- und Entwicklungspotentiale für eine neue Flächenverbundbauweise freisetzen um dieser Problematik entgegenzuwirken. Faserverstärkte Kunststoffe (FVK) bieten dem Ingenieur die Möglichkeit, die Werkstoffeigenschaften an die Gegebenheiten anzupassen. Weitere Vorteile sind die unterschiedlichen Verarbeitungstechniken und die gute Formbarkeit des Materials, welche sich bei der Herstellung von freigeformten Bauteilen positiv auswirken [1].

1.2 Problemstellung

Beton erscheint aufgrund seiner viskosen Eigenschaften für freigeformte Schalenträgerwerke geeignet zu sein. Doch die Herstellung der benötigten Schalung stellt einen erheblichen Aufwand dar. Sie erfolgt überwiegend in Handarbeit. Die freigeformte Geometrie führt ebenso zu einer erheblichen Komplexität bei der Planung und Herstellung der notwendigen Bewehrung. Verlorene Schalungssysteme wie beispielsweise die Holorib-Verbunddecke, sind seit Jahren wegen ihrer wirtschaftlichen Vorteile fester Bestandteil im Geschossbau. Die Verwendung solcher Systeme ist jedoch auf ebene Decken beschränkt. Auch die wirtschaftliche Herstellung von faserverstärkten Kunststoffbauteilen der „Losgröße 1“ ist in der Faserverbundtechnik nur durch händische Verfahren möglich, mit Ausnahme des Wickelverfahrens. Dieses ist allerdings auf die Herstellung von zylindrischen und konischen Querschnittsgeometrien beschränkt. Neben dem Problem einer adäquaten Bauweise, erweist sich der Planungsprozess von freigeformten Flächenträgerwerken oft als ungeeignet. Hierbei zeigt sich die Notwendigkeit eines integrativen Planungsansatzes, der in Kapitel 2 ausführlicher beschrieben wird.

1.3 Ziel der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel durch eine neue Flächenverbundbauweise, bestehend aus einer verlorenen karbonfaserverstärkten Kunststoffschalung und Beton, freigeformte Flächenträgerwerke effizienter planen und herstellen zu können. Zur Bestimmung einer geeigneten formschlüssigen Verbindung zwischen freigeformtem CFK-Laminat und Beton, werden drei Ansätze näher untersucht. Mithilfe von Orientierungsversuchen werden an dieser Stelle die grundlegenden mechanischen Eigenschaften der neuen Bauweise bestimmt. Eine individuelle Faserauslegung der Schalung soll dem planenden Ingenieur erlauben, einen gezielten Einfluss auf das Tragverhalten zu nehmen.

Die Fertigung der freigeformten CFK-Lamine erfolgt dabei durch einen neuen Ansatz in der Faserwickeltechnik. Bisherige Verfahren sind auf Bauteilgeometrien mit geschlossenem Querschnitt begrenzt. Zusätzlich soll die

formschlüssige Verbindung in den Herstellungsprozess integriert werden, um eine wirtschaftliche Fertigung zu gewährleisten. Anhand von numerischen Simulationen werden die Grenzen des Verfahrens untersucht.

Letzten besteht das Ziel dieser Arbeit darin, ein geeignetes Konzept für einen integrativen Planungsprozess bereitzustellen. Dabei sollen durch Simulation von Geometrie, Tragwerk und Herstellung, nicht realisierbare Systeme aufgedeckt werden. So besteht frühzeitig die Möglichkeit, planerisch auf Probleme reagieren zu können. Dies soll dazu beitragen, den Planungsprozess zu vereinfachen. Zudem soll die Möglichkeit bestehen, mithilfe eines Algorithmus die optimale Schnittmenge aus Geometrie, Tragwerk und Herstellung zu finden.

1.4 Gliederung

In Kapitel 2 werden die grundlegenden Eigenschaften zum Tragverhalten und zur Herstellung von freigeformten Flächentragwerken dargestellt. Der in diesem Zusammenhang aufgezeigte Stand der Technik und Wissenschaft dient zur Verdeutlichung der vorliegenden Problemstellungen.

Im Anschluss wird in Kapitel 3 das entwickelte Fertigungsverfahren für die Herstellung der freigeformten Verbundschalung vorgestellt. Dabei werden die entwickelten geometrischen Methoden und numerischen Ansätze beschrieben.

In Kapitel 4 werden drei entwickelte Konzepte für eine Flächenverbundbauweise vorgestellt und durch Orientierungsversuche auf ihr Tragverhalten hin untersucht. Außerdem werden die jeweils notwendigen Fertigungsschritte erläutert. Neben den Untersuchungen zum Verbundverhalten, wird in diesem Kapitel der Einfluss des Wickelverfahrens und des alkalischen Milieus auf die mechanischen Eigenschaften der Schalung behandelt. Zudem wird ein erstes Konzept zur Fügung der Schalungselemente vorgeschlagen. Abschließend werden die drei Konzepte der Flächenverbundbauweise miteinander verglichen.

Für das geeignetste Konzept wird in Kapitel 5 ein integrativer Planungsprozess vorgestellt. Dazu werden die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen

Planungsaufgaben aufgezeigt. In Kapitel 6 wird eine Optimierungsstrategie vorgestellt. Hierzu werden neben dem Optimierungsverfahren, die implementierten Simulationsmodelle, die Optimierungsvariablen und die allgemeine Zielfunktion erläutert.

In Kapitel 7 wird an drei Beispielen die in Kapitel 5 und 6 vorgestellte integrative Planungs- und Optimierungsstrategie angewendet, woraufhin Kapitel 8 die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit zusammenfasst und Anregungen für weiterführende Untersuchungen bietet.

2 Freigeformte Flächentragwerke

Das Planen und Bauen von leichten und weitgespannten Flächentragwerken, stellt Ingenieure immer wieder vor Herausforderungen. Um große Spannweiten zu erzielen und dabei einen minimalen Verbrauch an Ressourcen zu garantieren, werden klassischerweise formoptimierte Strukturen verwendet. Bekannte Beispiele hierfür sind Schalen und Faltwerke aus Beton von Eduardo Torroja, Felix Candela oder Heinz Isler, die trotz großer Spannweiten mit geringen Bauteildicken umgesetzt werden konnten (Abbildung 1).

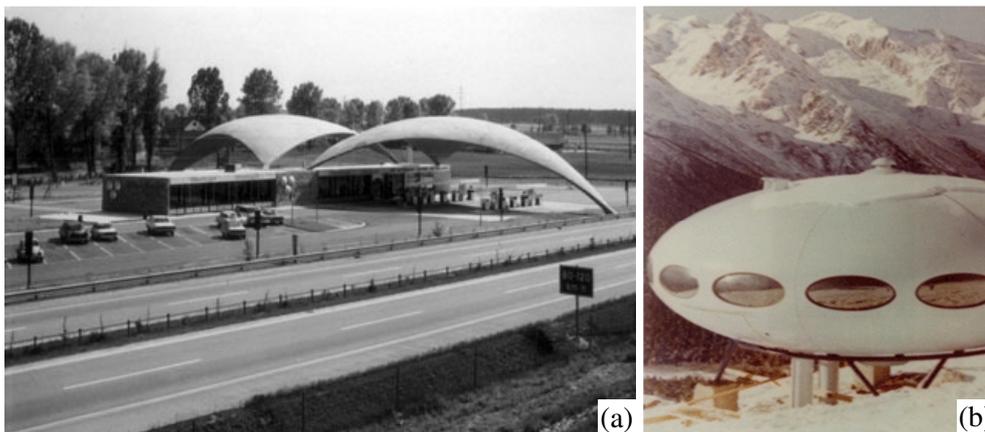


Abbildung 1: (a) Autobahnraststätte Deitingen Süd (Heinz Isler) [www.baunetz.de]; (b) Futuro (Matti Suuronen) [www.futurohouse.co.uk]

Die formoptimierten Tragwerke, die das Ziel eines reinen Membranzustands verfolgen, schränken jedoch die architektonische Formenfreiheit stark ein, da sich deren Morphologie auf wenige Typen begrenzt [2]. Um die Leistungsfähigkeit von Flächentragwerken zu steigern, spielt neben dem Strukturleichtbau, zu dem die Formoptimierung zählt, auch der Materialleichtbau eine wichtige Rolle. Zu Beginn der 60iger Jahre wurde hierzu mit Materialien wie glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), experimentiert [3]. Dabei stand das geringe spezifische Gewicht des Materials im Vordergrund und weniger des-

sen Festigkeitseigenschaften. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bauteile überwiegend mit isotropen Eigenschaften ausgeführt wurden.

2.1 Bauweisen und Bauverfahren

Die Geometrien heutiger Flächentragwerke sind im Vergleich zu den damaligen Betonschalen von Heinz Isler nicht durch das Tragverhalten, sondern überwiegend durch ihre Funktion geprägt. Je stärker die freigeformte Fläche von der rein membranbeanspruchten Form abweicht, umso größer ist die Biegebeanspruchung und umso mehr Bewehrung ist erforderlich. Je nach geometrischer Ausbildung der freigeformten Fläche, zum Beispiel durch sehr geringe Krümmungen, folgt ein entsprechend hoher Bewehrungsgrad. Neben den statischen Schwierigkeiten, führt die Komplexität heutiger Geometrien ebenso zu einem hohen Aufwand in der Bauausführung, denn die Herstellung einer freigeformten Stahlbetonkonstruktion ist mit einem erheblichen manuellen Arbeitsanteil verbunden. Die Lohnsteigerung in den vergangenen 40 Jahren hat gerade bei Freiformflächen zu einem drastischen Anstieg der Herstellungskosten geführt. Konstruktionen wie beispielsweise die EPLF Lausanne (Abbildung 2) sind daher in der Architektur selten vorzufinden [4].

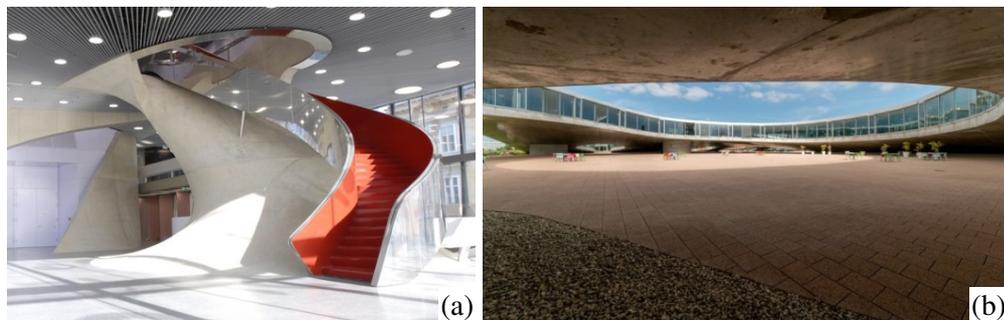


Abbildung 2: Freigeformte Betonflächentragwerke: (a) Theater Haus Graz [www.kug.ac.at]; (b) EPFL Lausanne [www.divisare.com]

2.1.1 Stand der Technik

Im Folgenden werden die Stahlbetonbauweise und die in der Praxis verwendeten Bauverfahren im Hinblick auf freigeformte Flächentragwerke be-

schrieben. Dabei werden ebenso die Schwierigkeiten, die in der Praxis auftreten, erörtert.

Stahlbetonbauweise

Die Bewehrungsplanung, die Herstellung der Bewehrung im Biegebetrieb und das Verlegen der Bewehrung auf der Baustelle für ein Bauteil mit wechselnden Krümmungseigenschaften, stellen wesentliche Schwierigkeiten bei der Umsetzung freigeformter Betonstrukturen dar. So zeigt sich, dass bereits die Definition eines geeigneten Verlegeprinzips (hiermit ist die Anordnung der einzelnen Bewehrungspositionen gemeint) für die obere und untere Lage, eine komplexe geometrische Aufgabe darstellt [5]. Hinzu kommt, dass aufgrund der fertigungstechnischen Restriktionen der Biegemaschinen, der herzustellende Bewehrungsstab nur eine Annäherung darstellen kann. Dies und die in der Norm geltenden Konstruktionsregeln, wie beispielsweise Stababstände oder minimale Biegeradien, müssen ebenso beim Entwickeln eines Verlegeprinzips berücksichtigt werden. Gleichermaßen gilt es, die Baubarkeit und die Einbaubarkeit des Verlegeprinzips auf der Baustelle zu gewährleisten. Ein erheblicher zeitlicher Aufwand bei der Bewehrungsplanung besteht ebenfalls darin, die komplexe dreidimensionale Bewehrungsführung in zweidimensionalen Plänen, darzustellen. Im Vergleich zu klassischen Hochbauprojekten sind hierzu deutlich mehr technische Zeichnungen (Pläne) notwendig. Je nach Komplexität der Geometrie und der Bewehrungsführung, ist unter Umständen die Bewehrungsplanung durch eine zweidimensionale Plandarstellung kaum mehr eindeutig darstellbar.

Schalungsbau

Die Schalungstechniken für Bauteile mit einem einfachen Herstellungsaufwand wie beispielsweise für Decken oder Wände, haben sich in den letzten Jahrzehnten stark weiterentwickelt. Durch eine Rationalisierung und die Verwendung von industrialisierten Schalungssystemen, konnten die Herstellungskosten stark gesenkt werden. Einfache Decken lassen sich bereits mit einem Kostenaufwand von 100 €/m² herstellen [6].



Abbildung 3: Schalung für Betontragwerke (a) klassische Schalung [www.doka.com]; (b) Mercedes-Benz Museum [www.designtoproduction.ch]

Die Kosten für geometrisch komplexe Bauwerke hingegen liegen deutlich darüber, denn die Fertigung einer Sonderschalung findet überwiegend in Handarbeit statt. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass es sich bei einer freigeformten Schalung aus Holz nur um eine Annäherung einer doppelt gekrümmten Fläche handelt. Eine Vereinfachung der Geometrie wirkt sich daher auf die Oberflächenqualität des Bauteils aus. Dies hängt damit zusammen, dass die Geometrie durch eine Linearisierung von einzelnen Latten (Abbildung 3) nur angenähert werden kann. Die Latten werden dabei auf querliegende Schotten fixiert, anschließend werden planare Schalhauttafeln in Form gebogen und auf die Lattung angebracht. Umso kleiner dabei die Krümmungen der Fläche sind, umso kleiner müssen die Tafeln sein. Ähnlich wie beim Zuschnitt einer Membran, wird die doppelt gekrümmte Fläche nur angenähert. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Fugen der Schalhauttafeln sich auf die spätere Oberflächenbeschaffenheit auswirken können, falls diese nicht nachbearbeitet wird. In Abhängigkeit des Krüm-

mungsverhaltens der Fläche, sind aufgrund des hohen Aufwands bei der Herstellung Kosten von 500-2000 €/m² für den reinen Schalungsbau zu berechnen. Hinzu kommt, dass der Materialverbrauch durch den aufkommenden Verschnitt entsprechend hoch ist.

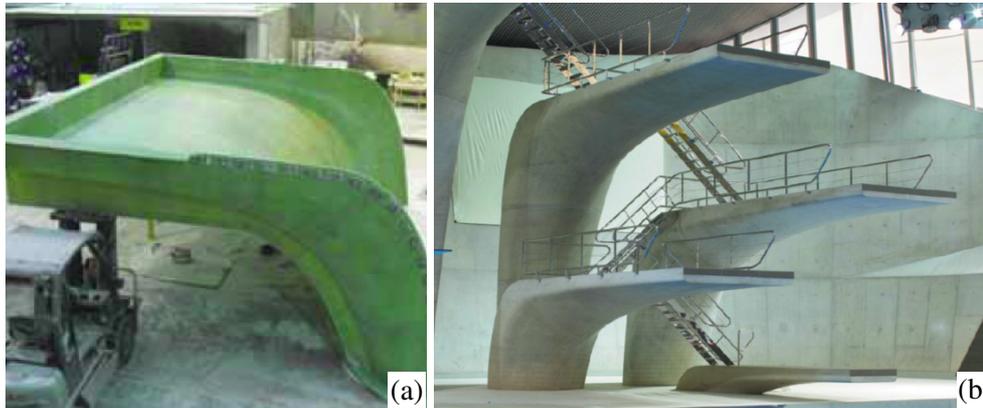


Abbildung 4: (a) GFK-Schalung hergestellt im Handlaminatverfahren [www.cordek.com]; (b) ausgeschalte Springtürme aus Beton [www.detail.de]

Statt einer Herstellung in klassischer Holzbauweise wird vereinzelt glasfaserverstärkter Kunststoff als Schalungsmaterial eingesetzt. Gründe hierfür sind kleiner herstellbare Radien der Schalung und die bessere Oberflächenqualität des ausgeschalteten Betons. Ein Beispiel bei dem faserverstärkter Kunststoff als Schalungsmaterial angewendet wurde, sind die Springtürme für das *Olymp Aquatic Centre* in London, für die Olympischen Sommerspiele 2012. In Abbildung 4 ist eines der GFK-Schalungskörper und vier der fünf ausgeschalteten Türme dargestellt. Die monolithische Schalung mit integrierten Seitenwangen und Aussteifungsrippen wurde im Handlaminatverfahren hergestellt. Die Rippen befanden sich dabei unterhalb der Schalhautfläche. So dienten sie einerseits zur Aussteifung und boten andererseits die nötige Biegefestigkeit gegenüber den Einwirkungen im Bauzustand.

Deckenverbundbauweise

Bei der Deckenverbundbauweise wird durch eine Betondecke und ein Verbundblech ein gemeinsames Tragverhalten erzeugt. In der Praxis wird dieser Deckenverbund häufig mit einem Trägerverbund kombiniert [7]. Dabei wird zusätzlich ein Zusammenwirken der Betonverbunddecke und einem Stahlträger durch Kopfbolzen erzeugt.

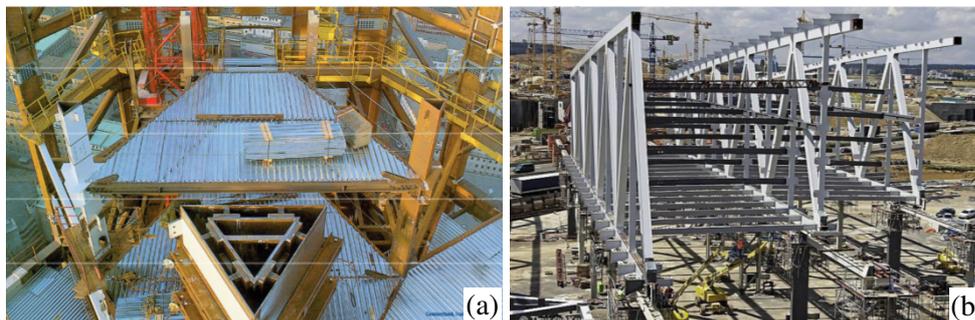


Abbildung 5: Verlorene Schalung im Hochbau: (a) Commerzbanktower in Frankfurt [www.montana-ag.ch]; (b) Messe Stuttgart [www.montana-ag.ch]

Die leichten Profilbleche werden dazu ohne Kraneinsatz ausgelegt und an den Stahlträgern befestigt. Nach der Verlegung der Stahlbewehrung erfolgt das Aufbringen des Ortbetons, indem das Verbundblech als Schalung verwendet wird. Nach dem Aushärten des Betons verbleibt das Blech im Beton und durch die hinterschnittene Profilierung (zum Beispiel durch ein Schwalbenschwanzprofil) wird das Verbundblech als mittragende Bewehrung angesetzt. Die Verbundbleche werden aus diesem Grund auch als verlorene Schalung bezeichnet. Die Vorteile dieser Bauweise liegen in der industriellen Vorfertigung, der kompakten Anlieferung und der schnellen Montage auf der Baustelle [8]. Sie haben sich deshalb im Hochbau als eine sehr wirtschaftliche Alternative zum klassischen Verfahren abgezeichnet und werden beispielsweise bei Hochhäusern und Parkgaragen häufig verwendet (Abbildung 5). Die auf dem Markt erhältlichen Schalungssysteme beschränken sich jedoch auf horizontale Deckenanwendungen.

2.1.2 Stand der Wissenschaft

Die bisherigen Entwicklungs- und Forschungsarbeiten im Bereich der freigeformten Betonbauteile konzentrieren sich überwiegend auf den Schalungsbau. Ein interessantes Beispiel für einen wirtschaftlichen Schalungsbau ist das entwickelte „flexible formwork“, bei dem textile Membrane als Schalung genutzt werden [9]. Die Form der Membran wird dabei durch das Eigengewicht des Betons bestimmt. Die Formfindung erfolgt analog zu der einer pneumatisch vorgespannten Membran. Da diese Art des Fertigungsverfahrens

durch physikalische Gesetze geprägt ist, sind die herstellbaren Geometrien stark eingeschränkt.

Ein anderer Forschungsansatz ermöglicht die Wiederverwendung von Schalungselementen, indem Wachsböcke in Form gefräst werden [10]. Die massiven Wachsschalungen werden anschließend auf die Baustelle transportiert und dort durch eine Stahlunterkonstruktion gestützt. Nach der Herstellung der Bauteile können die zuvor genutzten Wachselemente durch Energiezufuhr wieder zu Blöcken umgeformt und wiederverwendet werden.

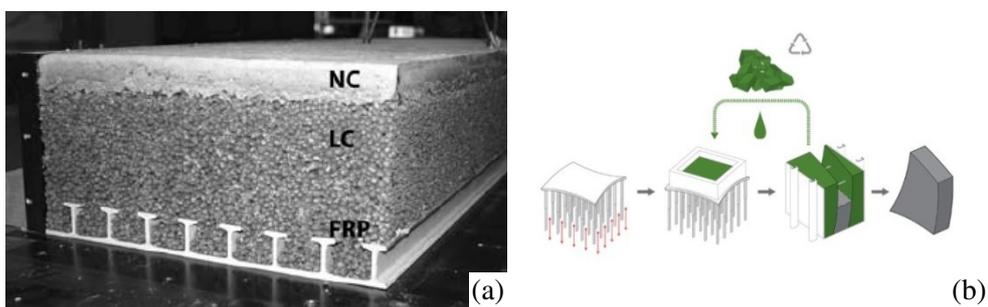


Abbildung 6: (a) verlorene pultrudierte GFK-Profile [11]; (b) Tailorcreate FP7 Projekt [12]

Eine Reihe an Forschungsarbeiten befasst sich mit der Entwicklung von Deckenverbundsystemen aus FVK [13]. Statt einem üblichen Stahlblechprofil werden standardisierte Halbzeugen verwendet. Dabei werden Profile genutzt, die durch das Pultrusionsverfahren hergestellt werden. Die entwickelten Systeme sind jedoch auf freigeformte Flächentragwerke nicht übertragbar, da sich mit dem verwendeten Herstellungsverfahren keine freigeformten Profile herstellen lassen. Außerdem ist eine wirtschaftliche Herstellung mit diesem Verfahren nur bei hohen Stückzahlen gegeben. Schließlich muss noch erwähnt werden, dass eine individuelle Materialauslegung einzelner Bauteile nicht möglich ist. Für freigeformte verlorene Schalungen ist diese Fertigungstechnik daher ungeeignet.

2.2 Planung von komplexen Tragwerken

Am Planungsprozess eines Bauwerks ist eine Reihe von Planungsbeteiligten involviert. Die Rolle und die Arbeit des Tragwerksplaners werden dabei maßgeblich durch die Planungsinteraktion mit dem Architekten und der Bau-firma beeinflusst. Die Funktionsbereiche und die Wechselbeziehungen der Fachplaner und der auszuführenden Unternehmen ist in Abbildung 7 graphisch dargestellt.

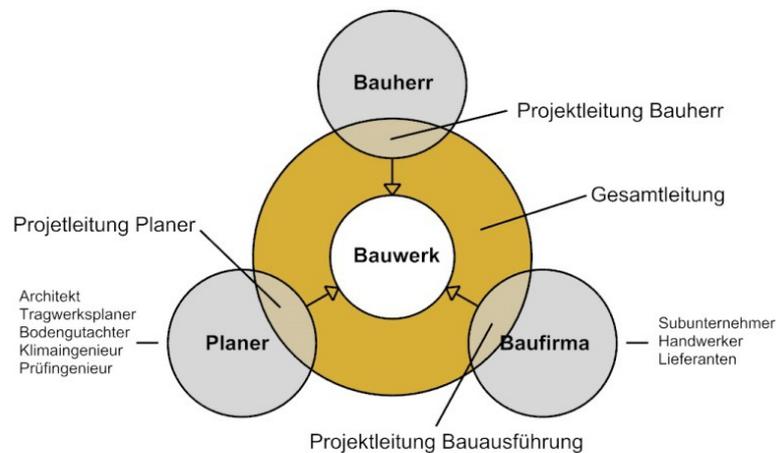


Abbildung 7: Beteiligte an der Planung und am Bauprozess

Der Planungsprozess eines Bauwerks und die Planungsaufgaben von Architekten und Ingenieuren, werden in Deutschland durch die HOAI (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure) geregelt. Der Planungsablauf wird in 7 sequentielle Leistungsphasen unterteilt (Abbildung 8). Diese Aufteilung hat zur Folge, dass es dem Bauherrn möglich gemacht wird, verschiedene Leistungsphasen an verschiedene Planer zu vergeben. So ist es in der Praxis üblich, die Leistungsphasen 1 bis 3 (also bis zur Entwurfsplanung) an einen Planer, die Phasen 4 bis 7 (Genehmigungsplanung bis Vergabe) an einen anderen Planer zu vergeben. Bei komplexen Bauvorhaben hat die Beauftragung der wesentlichen Leistungsphasen an nur einen Planer deutlich mehr Vorteile. Es ermöglicht zum einen auf Erkenntnisse aus vorangegangenen Phasen zurückzugreifen, zum anderen ermöglicht es flexiblere Gestaltungsmöglichkeiten bei der Bearbeitung der Planungsaufgaben. Zum Beispiel können intensi-

ve Planungsaufgaben die üblicherweise in einer späteren Phase zu bearbeiten sind, vorgezogen werden. Des Weiteren stellt die Entwicklung von aufwendigen Modellen zu Beginn der Planung ein geringeres wirtschaftliches Risiko dar, da diese im späteren Planungsprozess wiederverwendet werden können. Dadurch wird es möglich, bestehende Modelle während des Planungsprozesses zu verfeinern. Dies trifft beispielsweise auf parametrische Simulationsmodelle oder auf die Entwicklung von projektspezifischen digitalen Werkzeugen zu, die je nach Bedarf in späteren Planungsphasen wiederverwendet oder weiterentwickelt werden können.



Abbildung 8: Leistungsbild (Gestaltungsplanung) nach der HOAI

Eine weitere Schwierigkeit im Planungsprozess liegt darin, dass eine Beteiligung der auszuführenden Firmen in den frühen Planungsphasen in der HOAI nicht vorgesehen ist. Erst in Phase 5 werden die Baufirmen in den Planungsprozess miteinbezogen. Aus Sicht der Bauunternehmen stellt eine Beratung in den frühen Leistungsphasen ein ökonomisches Wagnis dar, denn die Vergabe der Bauleistungen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt. Das Offenlegen von Firmenwissen und die Entwicklung von Sonderlösungen birgt die Gefahr, bestehende Wettbewerbsvorteile zu verlieren.

Eine frühe Einbindung der ausführenden Unternehmen in die Wettbewerbsphase und in den Planungsprozess könnte also für eine effiziente und wirt-

schaftliche Planung von anspruchsvollen Bauvorhaben von wesentlichem Vorteil sein, doch aufgrund der vertraglichen und rechtlichen Bestimmungen der HOAI ist dies in der Praxis nur schwer umzusetzen. Zwar hat die HOAI für private Bauherren keinen bindenden Charakter, dient aber in den meisten Fällen zumindest als Grundlage.



Abbildung 9: ICD/ITKE Forschungspavillon 2011 und 2012: Beispiel eines integrativen Planungsprozess [14][15]

Dass die frühe Integration des Fertigungsverfahrens wesentliche Vorteile sowohl für den Planungsprozess als auch für die architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten mit sich bringt, zeigt sich anhand der Pavillons, die jährlich in einer Kooperation zwischen dem *Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen* und dem *Institut für computerbasiertes Entwerfen* der Universität Stuttgart gebaut werden. Das Ziel des *ICD/ITKE Forschungspavillon 2011* war neben der Entwicklung, Untersuchung und Anwendung eines integrativen Planungsprozesses, das biologische Strukturbildungsprinzip der Plattenskelette von Seeigeln in ein statisches Konstruktionsprinzip zu übertragen, bei dem drei Plattensegmente stets an einem Punkt zusammenlaufen. Dieses Tragprinzip ermöglicht eine biegetragfähige Struktur, obwohl an den Fugen nur Normal-, Quer- und Schubkräfte übertragen werden müssen

[16]. Voraussetzung für die integrative Planung und Realisierung der komplexen Morphologie des Pavillons war eine geschlossene digitale Kette vom Entwurfsmodell über Finite-Elemente-Simulationen bis hin zur Maschinensteuerung. Durch einen optimierten Datenaustausch war es möglich, die komplexe Geometrie wiederholt in ein Finite-Elemente-Programm einzulesen (Abbildung 10 (a)), mechanisch zu analysieren, geometrisch zu modifizieren und auf die Herstellbarkeit der Bauteile zu untersuchen.

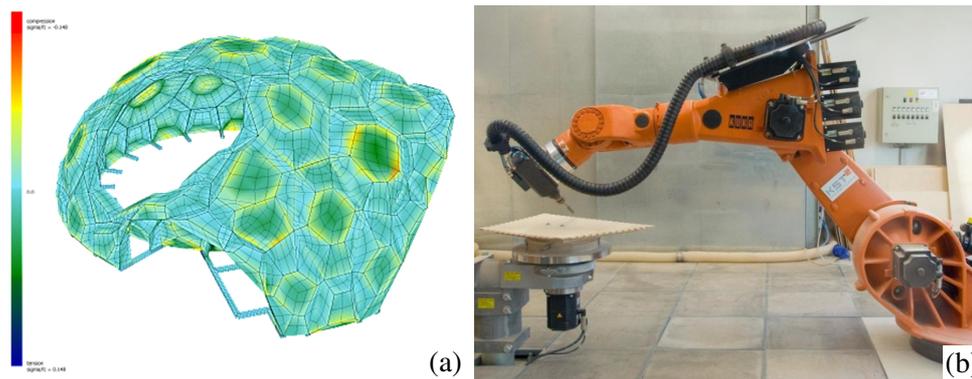


Abbildung 10: (a) FE-Berechnungsmodell; (b) Bearbeitung der Sperrholzplatten

Schließlich erfolgte die Fertigung der 6,5 mm dünnen Sperrholzplatten mithilfe eines Industrieroboters (Abbildung 10 (b)). Dazu wurde auf der Grundlage des Geometriemodells der Maschinensteuerungscodes (NC-Code) erzeugt. Dies ermöglichte es mehr als 850 geometrisch unterschiedliche Bauteile, sowie die komplexe Zinkverbindung, herzustellen. Im Anschluss an die automatisierte Fertigung wurden die Sperrholzplatten an den Fingerzinkverbindungen zu Zellen gefügt, grundiert und lasiert.

3 Bau- und Herstellungsverfahren

Das folgende Kapitel befasst sich mit der Herstellung von freigeformten CFK-Laminaten durch das Faserwickelverfahren. Zu Beginn dieses Kapitels wird das allgemeine Faserwickelverfahren beschrieben und die Voraussetzungen die dieses Verfahren für die Herstellung der Flächenverbundbauweise zu erfüllen hat. Danach wird das Konzept des *zusammengesetzten Kerns* und die dazu notwendigen digitalen Werkzeuge vorgestellt. Die Herstellung von doppelt gekrümmten CFK-Laminaten durch das Wickelverfahren, kann dabei zu allererst als grundlegende Bedingung für die spätere Herstellung der verlorenen Schalungselemente gesehen werden. Die notwendigen Schubverbindungsmittel und die zusätzlichen Fertigungsschritte werden später in Kapitel 4 vorgestellt. Abschließend wird in diesem Kapitel näher auf das Betonierverfahren eingegangen und die Eignung des gewählten Verfahrens diskutiert.

3.1 Beschreibung des Faserwickelverfahrens

Die Abbildung 11 gibt einen Überblick der Urformverfahren von FVK. Für das Bauwesen stellen das Handlaminieren, das Wickeln, das Strangziehen (Pultrusion) und das Rapid-Transfer-Molding (RTM) die relevantesten Herstellungsverfahren dar.

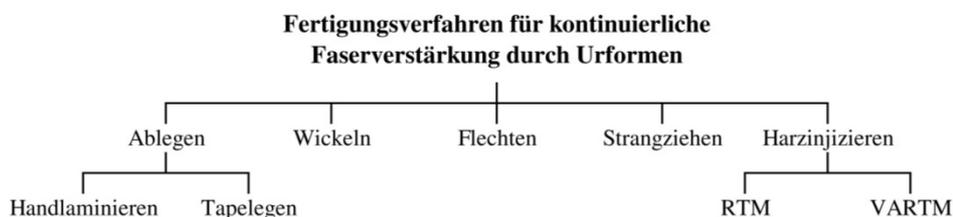


Abbildung 11: Einordnung des Wickelverfahrens in der Faserverbundfertigungstechnik durch Urformen

Als automatisiertes Herstellungsverfahren konnte sich im Hochbau bislang nur die Pultrusion durchsetzen. Die Herstellung von doppelt gekrümmten Bauteilen ist in diesem Verfahren hingegen nicht möglich. Für freigeformte Bauteile wird üblicherweise das Handlaminatverfahren eingesetzt. Nachteile dieses Verfahrens liegen hingegen einerseits in den hohen Lohnkosten und andererseits in den zu erreichenden Materialeigenschaften. Im Vergleich zu anderen Verfahren basiert die Wickeltechnik auf einem schichtweisen Auftragen einzelner Faserbündel, was ein großes Potential für eine individuelle Herstellung darstellt. Das Wickelverfahren ist in der Faserverbundtechnik eines der ersten automatisierten Herstellungsverfahren gewesen. Prozessgrundlage dieses rechnerunterstützten Verfahrens ist eine kontinuierliche Ablage von Rovingen in einer vorgegebenen Geschwindigkeit um einen rotierenden positiven Kern. Der Roving durchläuft dabei unmittelbar vor dem Ablegeprozess ein Bad in dem er mit einer duroplastischen Matrix imprägniert wird. Das Faserwickelverfahren wird für konische und zylindrische Bauteile mit geschlossenem Querschnitt genutzt. Klassischerweise werden mit diesem Verfahren Rohre oder GFK-Tanks gefertigt, der Kern wird bei großen Stückzahlen dabei aus Stahl ausgeführt. Dies ermöglicht eine wiederholte Verwendung. Für kleinere Stückzahlen oder Einzelanfertigungen wird auf Hartschaum zurückgegriffen. Das Verfahren zeichnet sich durch die hohe Laminatqualitäten, die Genauigkeit im Faservolumengehalt (60-70 %) und die Präzision in der Faserablage aus. Die hohen Steifigkeiten und Festigkeiten des Laminats werden dadurch erreicht, dass durch die Rotation des Kerns und durch den Fadenspanner des Führungssystems, eine Vorspannung im Roving erzeugt wird.

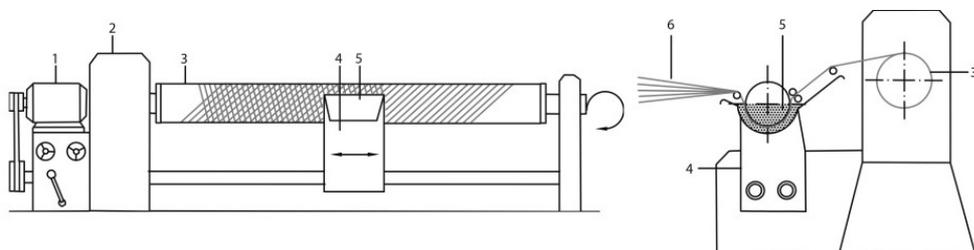


Abbildung 12: Klassisches Wickelverfahren mit Drehbank und Führungseinheit mit vier Freiheitsgraden: 1 Antrieb; 2 Getriebe, 3 Wickeldorn; 4 verfahrbare Lagerung der Tränkwanne; 5 Tränkwanne mit Harz; 6 Rovinge [17]

Das Verfahren ist durch eine hohe Automatisierung gekennzeichnet. In Abbildung 12 ist exemplarisch eine Standard-Wickelmaschine dargestellt. In den meisten Fällen kommen bei der Wickeltechnik CNC-bahngesteuerte Maschinen zum Einsatz. Die Prozessor-Steuerung hat den Vorteil, dass das Wickelmuster rasch geändert und abgespeichert werden kann. Somit kann eine exakte Faserablage und eine Übertragung von umfangreichen Daten für die Herstellung von komplexen Geometrien garantiert werden [18] [19].

Die Geometrie des Kerns hat einen erheblichen Einfluss auf die Herstellbarkeit und den Laminataufbau eines Bauteils. Die Definition der Faserorientierung kann nicht beliebig erfolgen, denn das Haften des Rovings auf dem Kern wird durch mathematische und physikalische Bedingungen wie Faser-rutschen und Faserabheben bestimmt. Um die Herstellbarkeit unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten zu garantieren und die späteren CNC-Maschinendaten zu generieren, ist eine rechnergestützte Simulation des gesamten Wickelvorgangs erforderlich. Ein Postprocessing ist nötig, da der Roving im Fertigungsverlauf nicht auf dem Kern fixiert wird und die Matrix nicht unmittelbar nach dem Ablageprozess aushärtet. Der Roving wird nur durch die Fadenspannung und die Krümmung in der abgelegten Position gehalten. Nach dem Wickelprozess wird das Bauteil getempert und vom Kern abgezogen. Bauteile mit einer antiklastischen Geometrie oder einer Hinterschneidung können daher nicht hergestellt werden.

Für das Wickelverfahren wird in die folgenden drei grundlegenden Wickelmuster unterschieden: Kreuz-, Polar- und Radialwickelmuster. Die verschiedenen Muster und die daraus resultierenden Faserorientierungen sind in Abbildung 13 dargestellt.

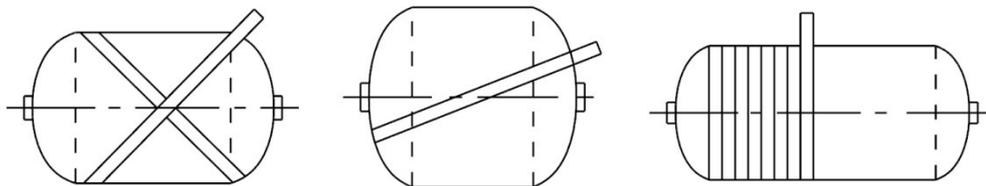


Abbildung 13: Darstellung der drei grundlegenden Wickelmuster (v.l.n.r.): Kreuz-, Polar- und Radialwickelmuster

Im Kreuzwickelverfahren werden die Faserbündel in mehreren Durchläufen bzw. Doppelhüben auf einer Schraubenlinie um den Kern abgelegt. Nach dem ersten Hub wird im Rücklauf die nachfolgende Bandspur nicht neben der ersten abgelegt, sondern überkreuzt diese. Erst nach einer bestimmten Anzahl von Doppelhüben, die auch als Musterkennzahl bezeichnet wird, legt sich die nachfolgende Ablegespur neben die Erste, sodass sich das Wickelmuster flächendeckend aufbaut. So entstehen die typischen gleichmäßig verteilten Kreuzungspunkte der Rovinge. Der Laminataufbau eines gewickelten Bauteils besteht somit immer aus mindestens zwei Lagen. Die Musterkennzahlen sind für die Bewicklung von komplex geformten Kernen sehr wichtig, da sich ein Kern nur unter bestimmten Musterkennzahlen bewickeln lässt. Beeinflusst wird die Musterkennzahl hauptsächlich durch den Durchmesser und die Länge des Kerns. In Abhängigkeit des Verhältnisses von Durchmesser und Länge lässt sich ein Kompromiss mit dem gewünschten Wickelwinkel, der Musterkennzahl und der Anzahl von Durchläufen finden und eine flächendeckende Wickellogik bestimmen. Eine ausführliche Definition und eine genauere Beschreibung der Musterkennzahlen kann der Literatur entnommen werden [20]. Auf das Polar- und Radialwickelmuster wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da sie für die Bewicklung von freigeformten Kernen keine Rolle spielen.

3.2 Potential der Wickeltechnik als Fertigungsverfahren

Die Faserwickeltechnik eignet sich aus mehreren Gründen zur Herstellung der freigeformten verlorenen Verbundschalung. Sie erlaubt es zum Beispiel große Bauteile mit einem hohen Faservolumengehalt herzustellen. Dabei lassen sich die Faserorientierungen und der Faseraufbau des Laminats auf die äußeren Beanspruchungen hin auslegen. Zusätzlich kann durch die Änderung des Wickelwinkels die Faserorientierung im Bauteil der Länge nach variieren. Das Faserwickelverfahren ist im Vergleich zu anderen Herstellungsprozessen in der Faserverbundtechnik ein kostengünstiges Verfahren, da die Rohmaterialien Fasern und Harz verwendet werden. Beim Tapelegeverfahren hingegen muss auf Halbzeuge, den sogenannten Prepegs, zurückgegriffen

werden. Die Herstellung von Prepegs erfordert eine Vorfertigung die zeit-
aufwendig und entsprechend kostenintensiv ist. Aufgrund der Verwendung
der Rohmaterialien bei der Faserwickeltechnik lassen sich die niedrigen Her-
stellungskosten gegenüber anderen Verfahren erklären [21]. Die relativen Her-
stellungskosten einer Kreuzwicklung liegt im Vergleich zum Handlami-
natverfahren bei etwa nur 30 % [18]. Ein allgemeiner Vergleich der relativen
Herstellungskosten verschiedener Fertigungstechniken kann der Abbildung
14 entnommen werden. Der Graphik ist ebenfalls zu entnehmen, dass ein
weiterer wirtschaftlicher Vorteil des Verfahrens in der hohen Faserablegerate
liegt.

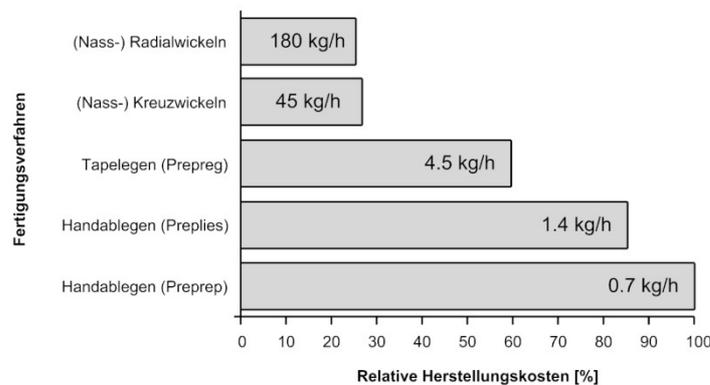


Abbildung 14: Kostenvergleich des Wickelverfahrens zu anderen Fertigungstechniken [18]

Ein weiterer Vorteil der Faserwickeltechnik liegt in der Verwendung des Kernmaterials. Wie zuvor erwähnt, lässt sich für kleine Stückzahlen Polystyrol als Kernmaterial verwenden, was komplett recycelfähig ist. Wird also für den Polystyrolkern keine Verwendung mehr gefunden, kann dieser gemahlen, entstaubt und als Recyclingmaterial wieder in den Produktionskreislauf beigefügt werden. Neben dem Recycling besteht die Möglichkeit, Teile des Kerns wiederzuverwenden, indem auf einen Trägerkern zurückgegriffen wird. Der Trägerkern kann dann beispielsweise aus einem einfachen wiederverwendbarem Stahlrahmen ausgeführt werden. Auf diesen lassen sich dann einzelne Polystyrolblöcke befestigen. Durch die modulare Eigenschaft die sich daraus ergibt, muss der Kern nicht aus einem Vollmaterial gefräst werden. Dadurch lassen sich Material und Kosten einsparen. Um zusätzliches Material wiederzuverwenden, besteht ebenso die Möglichkeit, durch weiteres

abfräsen von Polyesterolelementen das Material für einen neuen Kern zu nutzen. Der neue zu bewickelnde Kern muss dabei kleiner sein als der zuvor genutzte Kern.



Abbildung 15: Faserwickelmaschine der Firma Carbon Großbauteile GmbH

3.3 Konzept des zusammengesetzten Kerns

Um die Herstellung von freigeformten und flächigen Bauteile durch das Faserwickelverfahren zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit das Konzept des *zusammengesetzten Kerns* vorgestellt. Die grundlegende Idee ist, eine globale Geometrie so in einzelne Komponenten zu zerlegen, dass diese in anders kombinierter Form einen gemeinsamen Wickelkern bilden. Die Zusammensetzung der Bauteile muss dabei so erfolgen, dass die Kriterien einer Bewickelung des Kerns erfüllt sind. Abbildung 16 zeigt den schematischen Ablauf der Kerngenerierung. Ausgangspunkt ist dabei eine freigeformte Geometrie, die in einzelne Bauteile unterteilt ist. Der anschließende Kerngenerierungsprozess lässt sich in die vier folgenden Schritte gliedern:

1. Einteilung der Bauteile
2. Anordnung der Bauteile
3. Generierung der Füllfläche
4. Generierung der Polkappen

Bevor in den nächsten Kapiteln auf die einzelnen Teilschritte näher eingegangen wird, soll zuvor dargestellt werden zu welchem Zeitpunkt der Prozess in der Fertigungsplanung ansetzt.

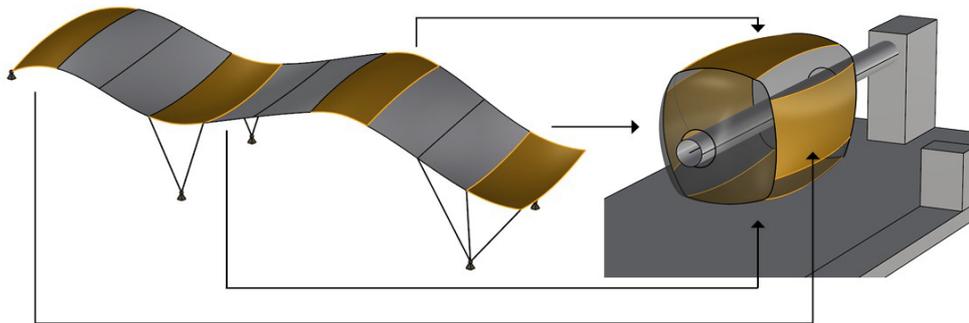


Abbildung 16: Konzept der Kerngenerierung

In Abbildung 17 ist dargestellt, wie das Konzept in den klassischen Prozess integriert wird. Die rechnerunterstützte Generierung und Voranalyse des zusammengesetzten Kerns ist dem üblichen Ablauf vorgeschaltet. Ist diese abgeschlossen, wird durch ein geeignetes CAW¹-Programm eine passende Musterkennzahl bestimmt und diese in CNC-Daten übertragen. Die abschließende Fertigung findet im klassischen Verfahren statt, wie sie beim Faserwickeln Stand der Technik ist. Der letzte Prozessschritt, die Besäumung und das Lösen der Bauteile vom Kern, kommen an dieser Stelle neu hinzu.

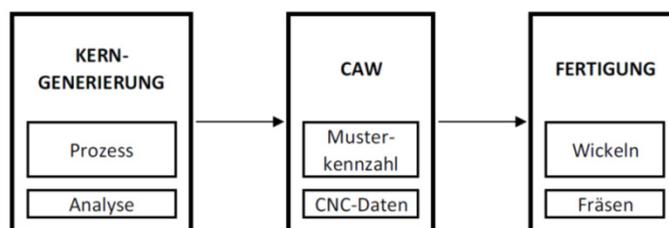


Abbildung 17: Ablauf des Herstellungsprozesses und Einordnung der entwickelten digitalen Kerngenerierung

3.3.1 Einteilung der Bauteile

Initiiert wird der gesamte Prozess durch eine global definierte Geometrie, die wie in Abbildung 16 eine freigeformte Fläche darstellen kann. Diese wird nach den Krümmungen hin analysiert, um eine Einteilung der Fläche in ein-

¹ Computer Aided Winding

zelne Bauteile zu ermöglichen. Anschließend werden die Bauteile je nach ihrem Krümmungsverhalten unterschieden. Innerhalb dieser beiden Gruppen kann eine weitere Einteilung der Bauteile nach Abhängigkeit des Faseraufbaus stattfinden. Der jeweilige Laminataufbau der Bauteile kann durch eine zuvor geführte Strukturberechnung ermittelt werden. Anhand dieser Kriterien können beispielsweise 4 „ähnliche“ Bauteile zu einem Kern zusammengesetzt werden. Das Vorgehen und die Kriterien die bei der Teilung der globalen Geometrie eine Rolle spielen und die Auswirkungen der Bauteileigenschaften auf die Herstellung des zusammengesetzten Kerns werden in Kapitel 5 dargestellt.

3.3.2 Anordnung der Bauteile

Nachdem die Bauteile ihren spezifischen Eigenschaften nach kategorisiert werden, müssen diese von ihrer Ausgangslage in die *Kernpositionslage* mittels einer Starrkörpertransformation neu ausgerichtet werden. Für eine überschaubare Anzahl von Bauteilen lässt sich dies durch händisches Vorgehen in einem CAD-Programm bewerkstelligen. Bei einer größeren Anzahl von Bauteilen jedoch ist eine solche Handhabung mit einem erheblichen Zeitaufwand verbunden. Ohne entsprechende Werkzeuge ist eine wirtschaftliche Produktionsplanung so nicht durchzuführen. Um also die wiederkehrenden Abläufe zu automatisieren, müssen für jedes Bauteil die entsprechenden 6 Freiheitsgrade (3 Rotationen und 3 Translationen) berechnet werden. Dies findet mithilfe einer Koordinatentransformation statt.

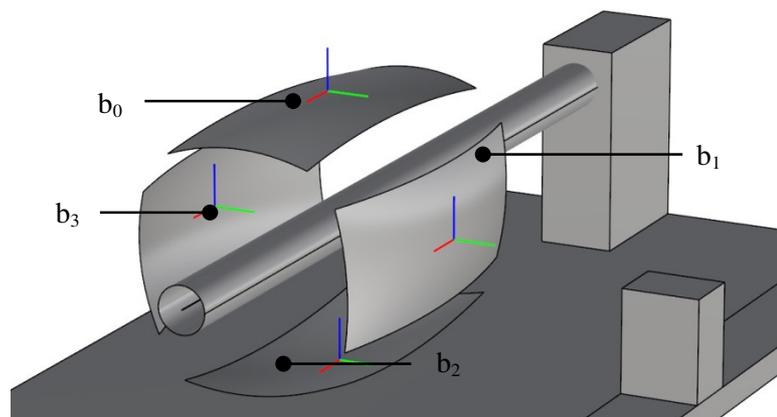


Abbildung 18: Freiheitsgrade bei der Kerngenerierung von einem zusammengesetzten Kern mit 4 Bauteilen

Bei der Starrkörpertransformation müssen ebenfalls die Krümmungen des jeweiligen Bauteils berücksichtigt werden. Dabei muss die kleinere Krümmung in Querrichtung und die größere Krümmung in Längsrichtung angeordnet werden. Somit ist für die spätere Bewickelung des Kerns eine freiere Faserorientierung gegeben.

3.3.3 Generierung der Füllflächen

Nach der Anordnung der Bauteile steht noch kein geschlossener Volumenkörper zur Verfügung. Dieser ist aber einerseits für die Simulation des Fertigungsprozesses und andererseits für die Generierung der Fräspfade des Wickelkerns nötig. Um also eine Kerngeometrie zu generieren, müssen die Bauteile erst durch eine sogenannte *Füllfläche* geschlossen werden.

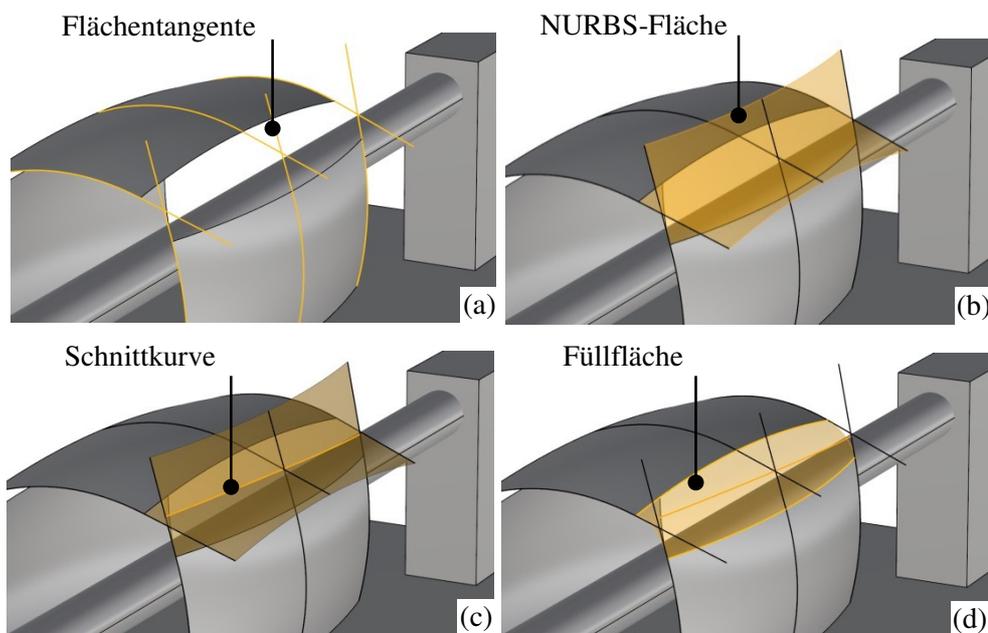


Abbildung 19: Ablauf bei der Generierung einer Füllfläche (v. l. n. r.): (a) tangentielle Verlängerung der Fläche in u-Richtung; (b) Generierung der NURBS-Flächen; (c) Bestimmung der Schnittkurve; (d) Generierung der NURBS-Fläche (Füllfläche)

In Abbildung 19 lässt sich der Ablauf der Generierung exemplarisch für die rechts oben liegende Füllfläche näher erläutern. Das obere und rechte Bauteil

sind durch jeweils eine NURBS²-Fläche beschrieben. Zu allererst müssen die Bauteile quer zur Wickelachse verlängert werden. Um eine tangentielle Verlängerung dieser Bauteile zu ermöglichen, werden mehrere auf der NURBS-Fläche befindlichen Kurven quer zur Wickelachse extrahiert. An deren Enden wird anschließend die Kurvenkrümmung bestimmt. Mithilfe der Kurvenkrümmung werden die Tangenten an den Enden der Kurven erzeugt. Diese Tangenten dienen schließlich zur Erzeugung einer Fläche, die die tangentielle Streckung des oberen und rechten Bauteils darstellt. Die aus den beiden Flächen entstehende Schnittkurve dient zur Generierung der Kontrollpunkte zur Erzeugung einer NURBS-Fläche aus der rechten Bauteilkante des oberen Bauteils und der oberen Bauteilkante des rechten Bauteils. Die daraus generierte Fläche stellt letztlich die Füllfläche zwischen dem oberen und dem unteren Bauteil dar. Durch diese Generierung kann garantiert werden, dass eine stetige Krümmung bei den Übergängen von Bauteil zu Füllfläche entsteht und somit kein Krümmungswechsel auftritt.

Die Füllfläche, wie sie beispielsweise in Abbildung 19 zwischen zwei Bauteilen in orange zu sehen ist, stellt für die Beurteilung zur Wirtschaftlichkeit der Produktion eine entscheidende Größe dar. Dieser Bereich wird nämlich während des Wickelvorgangs ebenfalls mit Fasern bedeckt und ist somit faktisch Verschnittmaterial. Je „besser“ also die Bauteile zu einem Kern zusammengesetzt werden, umso geringer ist der Verschnitt bei der Herstellung. Welche beeinflussenden Parameter dabei eine Rolle spielen, wird in Kapitel 5 näher dargestellt.

3.3.4 Generierung der Polkappen

Das Wickelverfahren stellt einen kontinuierlichen Prozess dar, der durch die Wickellogik und die Musterkennzahl definiert wird. Bevor die Musterkennzahl zur Bewickelung eines Kerns bestimmt werden kann, müssen die Polkappen erzeugt werden.

² Non-uniform rational B-Splines

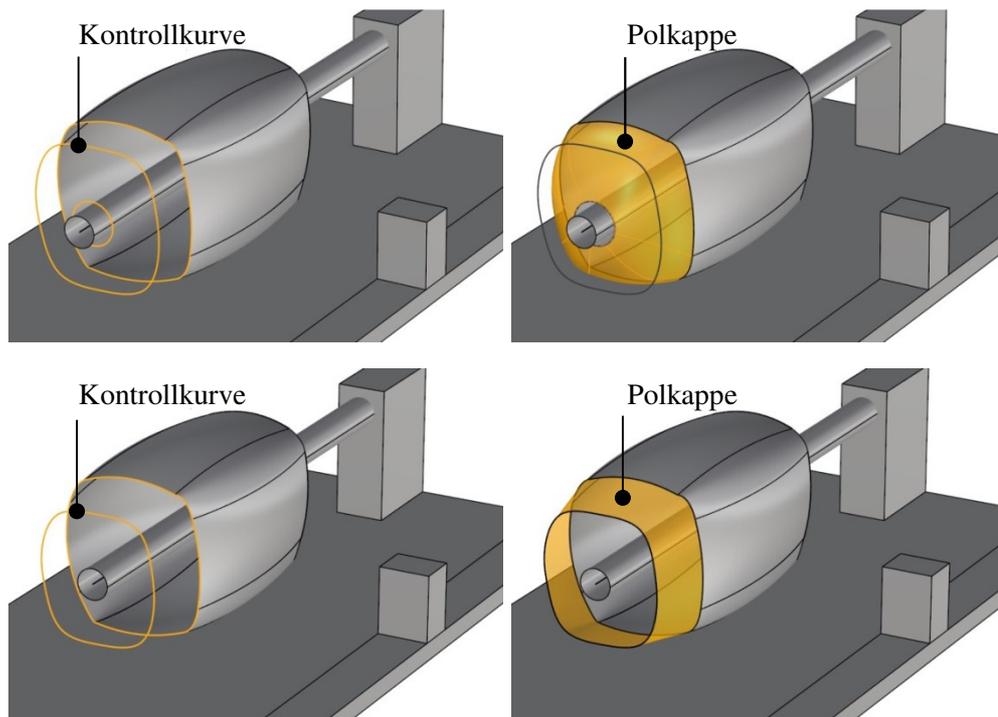


Abbildung 20: Generierung der vorderen Polkappe: (l.) Erzeugung der NURBS-Kurven; (r.) Erzeugung der NURBS-Fläche

Die Geometrieausbildung der Polkappen unterscheidet sich in Abhängigkeit des Faserwickelwinkels in zwei Formen. Bei einem flachen Winkel (von $\sim \alpha < 45$) ist eine halbkugelförmige Polkappe von Vorteil, weil dies die Umlenkung der Fasern begünstigt. Handelt es sich hingegen um einen steilen Winkel (von $\sim \alpha \geq 45$) ist eine kegelstumpfförmige Polkappe von Vorteil. Der Generierungsprozess der beiden Polkappen unterscheidet sich nur durch die Wahl der Parameter (Abbildung 20). Für eine halbkugelförmige Polkappe sind drei NURBS-Kurven nötig. Die Erste wird aus den Kanten der Bauteile und dessen Füllflächen erzeugt, die zweite ist eine skalierte, abgerundete und verschobene der Ersten und die letzte ist ein Kreis. Durch diese Parameter lässt sich die Polkappe nach den entsprechenden Anforderungen derart beeinflussen, dass eine geeignete Musterkennzahl ermittelt werden kann. Ähnlich wie die Erstellung der halbkugelförmigen Polkappe, lässt sich die kegelstumpfförmige Polkappe generieren. Für die Erzeugung der NURBS-Fläche sind in diesem Fall nur zwei Kurven nötig. Die Erste stellt sich wieder aus den Kanten der Bauteile und dessen Füllflächen zusammen, die Zweite ist

wieder eine skalierte, abgerundete und verschobene der Ersten. Die Parameter zur Skalierung, Abrundung und Translation sind aber nicht die gleichen. Diese stellen sich bei beiden Arten von Polkappen durch die Geometrie der Bauteile und der Füllflächen ein, mit dem Ziel eine synklastische Krümmung zu erzeugen. Wie bei der Generierung der Füllfläche ist es von Vorteil, wenn die Flächen des zusammengesetzten Kerns das gleiche Krümmungsverhalten aufweisen.

3.4 Analyseverfahren zur Wickelbarkeit von freigeformten Kernen

Die Simulation und Analyse des Wickelvorgangs ist für die Beurteilung einer wirtschaftlichen Produktion von großer Bedeutung. Sie dient einerseits dazu, eine geeignete Wickellogik zu bestimmen und andererseits die einwandfreie Bewickelung des Kerns zu gewährleisten. Die Bewickelung wird maßgeblich durch den sogenannten *Bridging*-Effekt charakterisiert. Bridging tritt auf, wenn beim Wickelprozess der Roving aufgrund der Geometrie des Kerns den Kontakt zu diesem verliert. Die Folgen sind ein Verlust an Vorspannung im Roving, der Roving weicht von der gewünschten Position ab und der Querschnitt des Rovings schnürt sich kreisförmig zusammen. Für die Materialeigenschaften des herzustellenden Bauteils bedeutet dies, dass die Festigkeit und Steifigkeit des Laminats geschwächt werden, da sich die Kontaktfläche der einzelnen Rovinge zueinander deutlich reduziert. Der Effekt des Bridging sollte daher stets vermieden werden. Die Wickelbarkeit eines zusammengesetzten Kerns hängt folglich von der Geometrie der einzelnen Bauteile und deren Konstellation ab. Ohne eine Analyse der geometrischen Eigenschaften des zusammengesetzten Wickelkerns, kann keine Aussage über die Herstellbarkeit der Bauteile getroffen werden. Die in diesem Kapitel dargestellten Simulationsprozesse bilden die wesentlichen Grundlagen für den später vorgestellten integrativen Planungsansatz in Kapitel 5 und für die multidisziplinäre Optimierungsstrategie in Kapitel 6.

3.4.1 Erläuterung der geometrischen Grundlagen

Die mathematische Einteilung von Flächen wird durch die Gauß'sche Krümmung beschrieben:

Für antiklastische Flächen gilt $K < 0$,

für einfach gekrümmte Flächen $K = 0$

und für synklastische Flächen $K > 0$.

Das Gauß'sche Krümmungsmaß errechnet sich durch die beiden Hauptkrümmungen eines Punktes auf der Fläche mit: $K = \frac{1}{r_1 + r_2}$

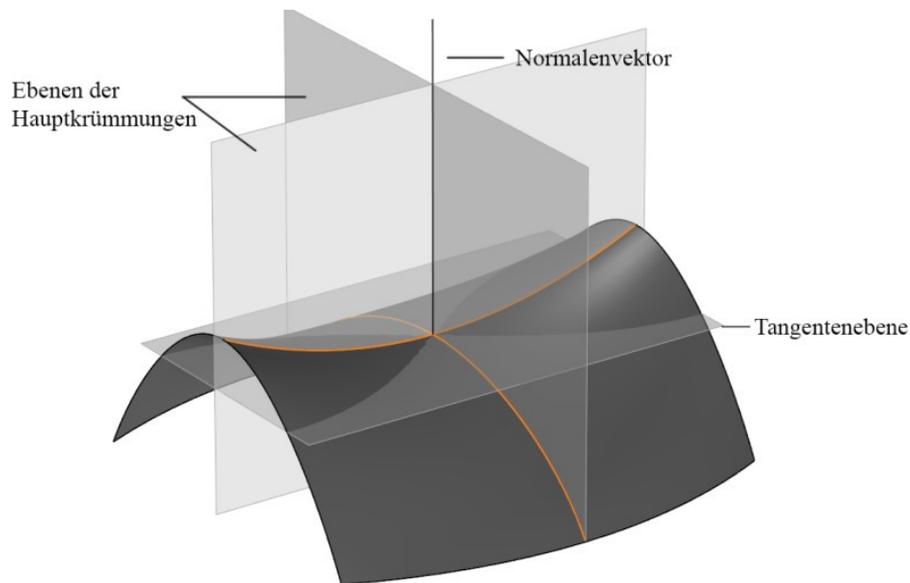


Abbildung 21: mathematische Definition der Hauptkrümmungen einer synklastischen Fläche

Das Krümmungsverhalten der Schnittkurve zwischen einer Ebene und der synklastischen Fläche lässt sich durch folgenden Zusammenhang bestimmen:

Ist die Schnittkurve durch die Funktion

$$f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, y = f(x)$$

gegeben, dann gilt für den Anstiegswinkel φ der Kurve

$$\frac{dy}{dx} = \tan\varphi,$$

also mit der Kettenregel

$$\frac{d^2y}{dx^2} = (1 + \tan^2\varphi) \frac{dy}{dx} = \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) \frac{dy}{dx}$$

Für die Bogenlänge s gilt somit

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \text{ bzw. } \frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

und damit folgt für die Krümmung:

$$k = \frac{d\varphi}{ds} = \frac{d\varphi/dx}{ds/dx} = \frac{\frac{d^2x}{dx^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right)^{\frac{3}{2}}}$$

Hierbei kann die Krümmung positiv oder negativ sein, abhängig ob der Anstiegswinkel φ der Kurve bei zunehmender Abszisse x wachsend oder fallend ist, d.h. ob die Funktion konvex oder konkav ist.

3.4.2 Vereinfachtes Analyseverfahren

Im Gegensatz zu kommerziellen Programmen, die mit diskretisierten Oberflächenmodellen arbeiten [18], wird in dieser Arbeit ein vereinfachtes Analyseverfahren auf Basis der Differentialgeometrie verfolgt. Der Roving wird dabei durch eine NURBS-Kurve abstrahiert. Durch die Formeln aus Abschnitt 3.4.1 kann so an jedem Punkt der Kurve die exakte Krümmung bestimmt werden. Findet ein Krümmungswechsel statt, bedeutet dies, dass der Roving abhebt und Bridging auftritt. Trotz des vereinfachten Ansatzes, ermöglicht diese Methode eine genauere Analyse aufgrund der exakten Beschreibung des Krümmungsverlaufs im Vergleich zu einem diskretisierten Ansatz. In Abbildung 22 ist für einen abgelegten Roving unter verschiedenen Wickelwinkeln der entsprechende Krümmungsverlauf dargestellt. Zwischen 90° und 45° ist Bridging nicht zu beobachten, bei 30° jedoch ist ein Wechsel im Krümmungsverlauf zu erkennen. Der Roving besitzt also an dieser Stelle keinen Kontakt mehr zum Kern und schlechte Materialeigenschaften des Laminats wären die Folge. Bei einem Wickelwinkel von 25° ist Bridging nicht nur ein lokales Problem, sondern betrifft das ganze Bauteil. Die Wickelbarkeit hängt dabei stark von der antiklastischen Krümmung ab. Ist die

Krümmung entsprechend klein, lassen sich nur große Wickelwinkel einstellen.

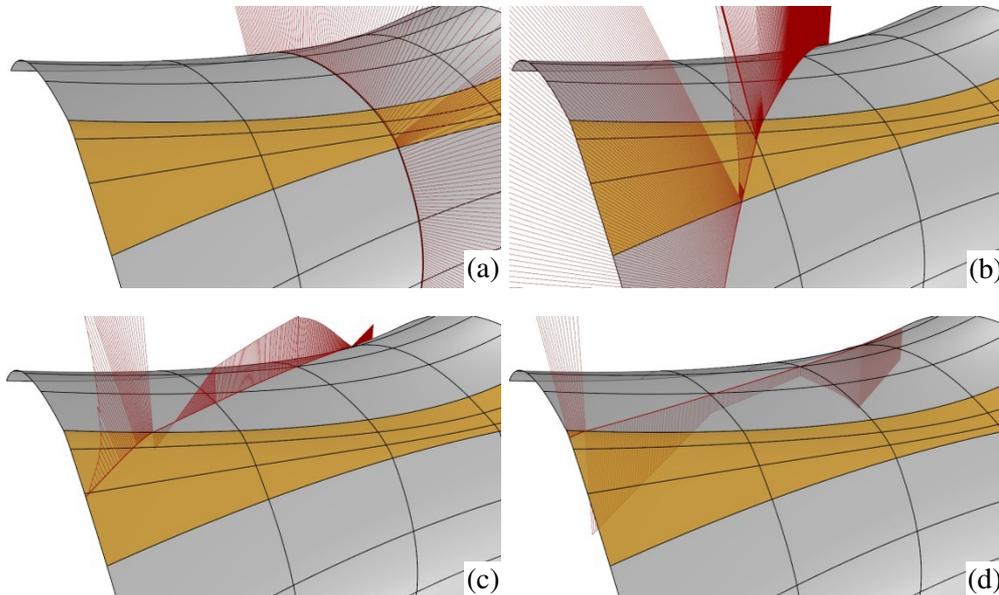


Abbildung 22: Wickelbarer Faserwinkel in einem antiklastischen Bauteil bei 90° (a), 45° (b), 30° (c) und 25° (d)

Synklastische Kerne hingegen lassen sich nahezu unter jedem Winkel bewickeln. Einschränkungen sind dann nicht durch die Bauteile bedingt, sondern durch die Füllflächen. Durch entsprechende Anpassung der kernbildenden Bauteile beispielsweise durch Translationen, lässt sich das Bridging-Problem vermeiden aber unter Umständen auf Kosten der Verschnittfläche.

In Abbildung 23 ist der Krümmungsverlauf des Kerns aus Kapitel 3.3 für eine Kreuzwicklung von $\pm 55^\circ$ dargestellt. Die Kurven stellen dabei die abstrahierten Rovinge dar. Um den Rechenaufwand zu minimieren, wird vereinfachend der Kern nur alle 200 mm untersucht. Jede NURBS-Kurve auf dem Kern stellt dabei die Schnittkurve von Kern und Winkelebene dar. Findet im Verlauf der Kurve ein Krümmungswechsel statt, so tritt das Problem des Bridging auf. Da es sich bei dem Kern nicht um eine rotationssymmetrische oder spiegelsymmetrische Geometrie handelt, müssen beide Faserrichtungen untersucht werden.

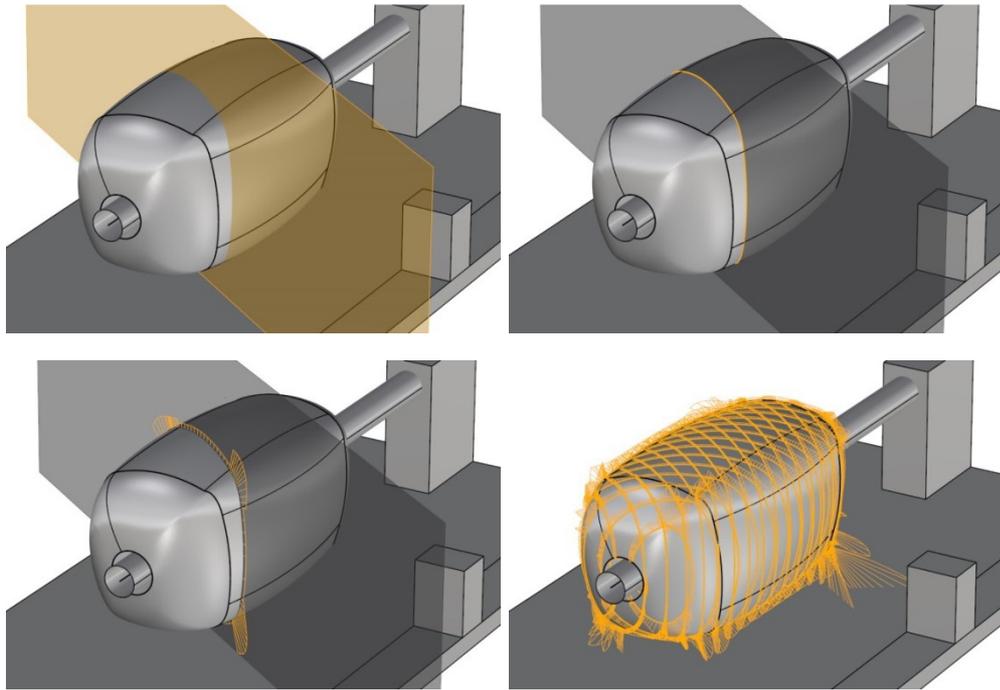


Abbildung 23: Krümmungsanalyse eines zusammengesetzten Kernes

3.5 Generierung der Fabrikationsdaten

Im Folgenden wird auf die Erzeugung der CNC-Daten und die physische Fertigung eingegangen. Um einen reibungsfreien Ablauf mit der Fertigung zu ermöglichen, ist eine Export-Schnittstelle in Rhino zum CAW-Programm CADWIND[®] entwickelt worden (Abbildung 24 (a)).

Das entwickelte Plug-In ermöglicht es, aus dem zusammengesetzten Kern, also dem Brep³-Volumenmodell, ein Polygonnetz zu erzeugen. Die Definition der Knotenliste erfolgt dabei nach dem von CADWIND definierten *.mdr*-Format. Das Plug-In ermöglicht es, beliebige zusammengesetzte Kerne zu exportieren und diese dann in CADWIND zu importieren. Dort lässt sich dann ein geeignetes Wickelmuster bestimmen. In Abbildung 24 (b) ist beispielsweise für einen Wickelwinkel von $\pm 10^\circ$ das entsprechende Muster dargestellt.

³ Boundary Representation

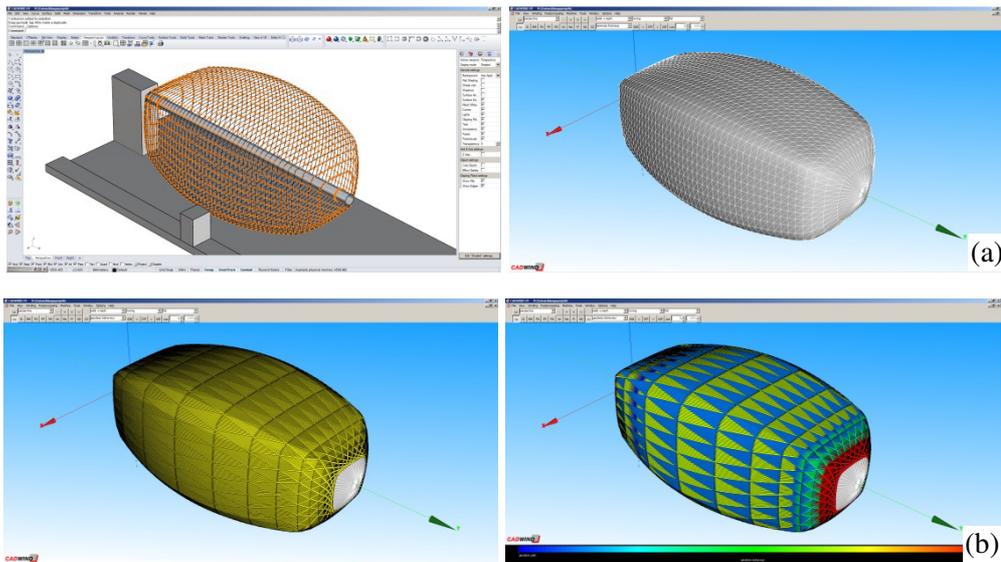


Abbildung 24: (a) Datenaustausch zwischen Rhino und CADWIND; (b) Erstellung der Wickellogik und der Kernanalyse im CAW-Programm CADWIND

Das Wickelmuster wird dann in CNC⁴-Daten übertragen, um die Bewicklung durch eine Wickelmaschine zu ermöglichen (Abbildung 25 (a)). Der zusammengesetzte Kern lässt sich schließlich im klassischen Simulationsverfahren durch eine geeignete Musterkennzahl bewickeln, bis ein geschlossenes Laminat entsteht. Abschließend lassen sich die Bauteile nach dem Aushärten des Laminats vom Kern besäumen und entnehmen (Abbildung 25 (b)).

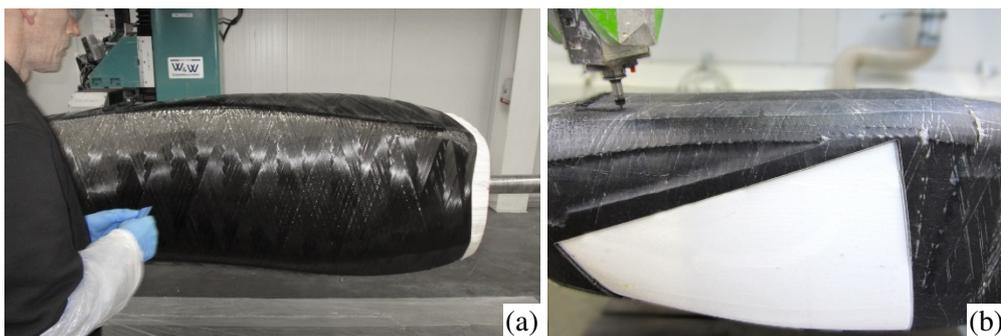


Abbildung 25: (a) Gewickelter zusammengesetzter Testkern vor dem Tempern und aufbringen des Abreisgewebes; (b) Besäumung der Bauteile

⁴ Computerized Numerical Control

Das entwickelte Vorgehen beim Preprocessing für den Wickelkern ermöglicht es, mit der Faserwickeltechnik freigeformte flächige Bauteile herzustellen. Dies erlaubt eine kosteneffiziente und materialsparende Herstellung von kleinen Losgrößen in der Faserverbundtechnologie. Abbildung 26 zeigt zwei Bauteile die durch einen zusammengesetzten Kern hergestellt wurden.

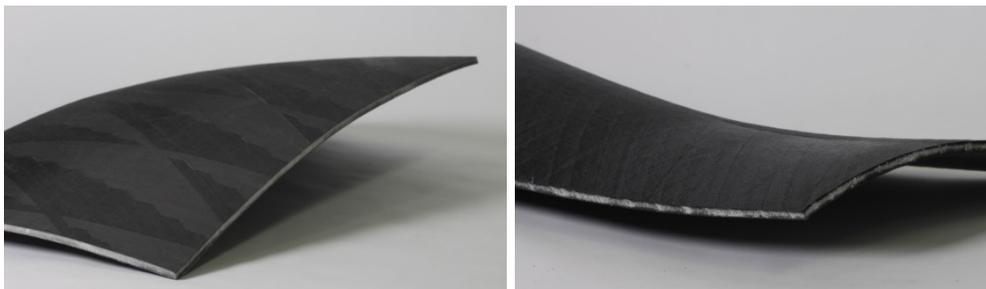


Abbildung 26: freigeformtes Sandwichbauteil aus CFK mit unterschiedlichen Krümmungen und Maßen, hergestellt durch das Wickelverfahren

3.6 Betonierverfahren

Der Aufwand des Betonierens und die Schalungstechnik hängen unter anderem von der Neigung und Krümmung der zu betonierenden Fläche ab. So ist beispielsweise bei einer in Ortbeton ausgeführten Fläche mit einer Neigung von über 10° eine Deckschalung notwendig. Die Fließ- und Herstellungseigenschaften eines klassischen Betons sind für das Konzept der verlorenen Schalung ungeeignet, wohingegen Spritzbeton unabhängig vom Neigungswinkel mit nur einer einseitigen Schalung auskommt. So wird zum Beispiel im Tunnelbau der Spritzeton selbst Überkopf aufgetragen.

3.6.1 Trockenspritzverfahren

Im Trockenspritzverfahren findet die Vermischung von Zement und Zuschlagstoffen im trockenen Zustand statt. Dieses Gemisch wird in einem Druckluftstrom freischwimmend durch eine Rohr- oder Schlauchleitung zu einer Mischdüse befördert. Im Düsenbereich wird dem Trockengemisch Wasser zugeführt, um die Mischung mit dem nötigen Anmachwasser zu versehen und anschließend in einem durchgehenden Strahl aufzutragen. Die

Vorteile dieses Verfahrens liegen in den geringen Unterhaltskosten, der geringen Wartung und der hohen Flexibilität bei der Anwendung.

3.6.2 Nassspritzverfahren

Beim Nassspritzverfahren werden Zement, Zuschlagstoffe und Wasser zusammengemischt und mittels einer Mörtelpumpe zu einer Spritzdüse befördert. Dort wird die Mischung mittels der in der Düse zugegebenen Druckluft zerstäubt und aufgetragen. Die am Ende der Schlauchleitung angebrachte Düse stellt eine Verengung dar, durch welche die hindurchströmende Mischung beschleunigt und damit die Verdichtungsenergie erhöht wird. Mit dem Nassspritzverfahren kann während des gesamten Spritzvorgangs im Vergleich zum Trockenspritzverfahren eine gleichmäßige Qualität erreicht werden. Die fertige Mischung wird in eine Pumpe eingefüllt und mit einer Kolbenpumpe oder einer Schneckenpumpe durch den Schlauch gefördert. An der Düse erfolgt die Luftzugabe mit etwa sieben bis neun Kubikmeter pro Minute bei einem Druck von sieben bis neun Bar. Die Luft wird zugegeben, um die Förderung des Spritzmörtels zu beschleunigen, so dass es zu einer guten Verdichtung und Haftung auf der Oberfläche kommt.

3.6.3 Automatisierung

Um in der Praxis eine gleichbleibende Qualität bei der Verarbeitung des Betons zu garantieren, werden häufig automatisierte Prozesse verwendet. Im Tunnelbau werden solche Systeme bereits erfolgreich eingesetzt. Außerdem findet eine Reihe von Forschungsansätzen in diesem Bereich statt (Abbildung 27).

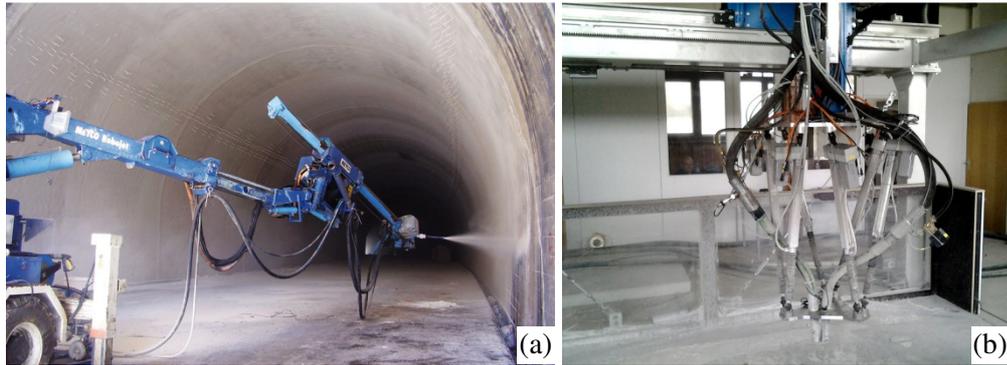


Abbildung 27: Automatisierte Herstellverfahren: (a) Robojet von Metco für den Einsatz im Tunnelbau; (b) Automatisierung bei der Herstellung von gradierten Betonfertigteilen [22].

Die Automatisierung ermöglicht es, gleichbleibende mechanische Eigenschaften des Spritzbetons zu erzielen. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die Betoneigenschaften durch Gradierung lokalen Beanspruchungen anzupassen [23].

4 Bauweise und Tragverhalten

In Kapitel 2 wurden die Schwierigkeiten der in der Praxis verwendeten Bauweisen für freigeformte Flächentragwerke aus Beton dargestellt. Um diesen Problemen entgegenzuwirken, verfolgt diese Arbeit das Ziel eine neue Flächenverbundbauweise aus CFK und Beton bereitzustellen. Eine ausreichende Verbundwirkung zwischen den beiden Materialien stellt für diese Bauweise eine der wichtigsten Eigenschaften dar. Im folgenden Kapitel werden hierzu drei Konzepte untersucht. Diese unterscheiden sich jeweils in ihrem Verbundprinzip und in ihren mechanischen Eigenschaften. Basierend auf den Erkenntnissen in Kapitel 3, werden die notwendigen Herstellungsschritte vorgestellt. Die Zielsetzung bei der Fertigung liegt dabei darin, eine größtmögliche Automatisierung zu gewährleisten und manuelle Arbeitsschritte auf ein Minimum zu reduzieren.

Die experimentellen Untersuchungen befassen sich neben der Beurteilung der Schubeigenschaften ebenso mit den Folgen der Alkalibelastung durch den Beton auf das Laminat. Außerdem wird der Einfluss der Wickelsequenz auf die Lamineigenschaften untersucht. Im Zusammenhang der Bewertung der Lamineigenschaften werden zwei Konzepte zur Fügung der dünnwandigen Schalungselemente erprobt. Dabei handelt es sich um eine Blindniet- und eine Klebeverbindung. Zur Einschätzung der Konzepte erfolgen hierzu ebenfalls Orientierungsversuche, die den Einfluss auf die Kraftübertragung im Hinblick auf das Fertigungsverfahren untersuchen.

Anhand der ermittelten Ergebnisse werden in diesem Kapitel die vorgestellten Konzepte zur Eignung einer Flächenverbundbauweise abschließend diskutiert.

4.1 Konzepte

Das **Konzept I** verfolgt den Ansatz einer punktuellen Schubübertragung zwischen Beton und CFK-Schalung. Dabei werden durch bolzenartige Verbindungsmittel die Kräfte aus der Druckzone in die Zugzone eingeleitet. Die Herstellung der Schalung erfolgt durch das im vorangegangenen Kapitel beschriebene Wickelverfahren mit zusammengesetztem Kern. Die Herstellung der Verbindungsmittel soll hingegen durch das Pressverfahren stattfinden, da diese in ihrer Geometrie stets gleich sind. Dies ermöglicht es, die Verbindungsmittel industriell und in großen Stückzahlen herzustellen. Im Anschluss werden die Schubbolzen auf die Schalung positioniert und auflaminiert.

Tabelle 1: Entwicklungsansätze der Verbundbauweise

Entwicklungskonzepte	I	II	III
Bezeichnung	Bolzenartige Verbindungsmittel (BV)	Zahnleisten-verbundschalung (ZVS)	Sandwich-verbundschalung (SVS)
Herstellung			
CFK	Sequentielle Fertigung mit Herstellung der Verbindungsmittel durch das Pressverfahren	Integration innerhalb des Wickelverfahrens	Integration innerhalb des Wickelverfahrens
Beton	Manuelles Spritzbetonverfahren (Probekörper in Ortbeton)	Manuelles Spritzbetonverfahren	Manuelles Spritzbetonverfahren
Materialien			
CFK	Gelege	Wickellaminat	Wickellaminat
Beton	Spritzbeton (Probekörper in Ortbeton)	Spritzbeton	Spritzbeton
Verbundbauweise			
	punktuell	flächig und gerichtet	flächig und ungerichtet
Versuche			
Im Verbund	Schubträger	Schubträger	Schubträger
Nur Beton	Druck	Druck	Druck
Nur CFK	Zug	Zug unter verschiedenen Wickelwinkeln	Zug unter verschiedenen Wickelwinkeln

Die **Konzepte II und III** basieren auf der Idee, den Verbund zwischen den Materialien nicht durch einzelne lokale Verbindungselemente zu erzeugen, sondern die Schubkräfte zwischen Beton und CFK über die gesamte Kontaktfläche zu übertragen. Somit sollen lokale Spannungsspitzen vermieden und die Rissverteilung im Beton begünstigt werden. Außerdem soll so ein frühzeitiges Abheben der Schalung verhindert werden. Ziel ist es dabei, die Herstellung der Verbindungsmittel in den bestehenden Wickelprozess zu integrieren und nicht wie etwa bei Konzept I durch ein zusätzliches Fertigungsverfahren. In Tabelle 1 sind die Herstellungsverfahren und Versuchsdurchführungen der drei Konzepte zusammengefasst.

4.2 Verbundschalung mit bolzenartigen Schubverbindungsmitteln (Konzept I)

Die gute Formbarkeit von CFK soll es ermöglichen, ein kraft- und formschlüssiges Verbindungsmittel zwischen dem Beton und der CFK-Schale auszubilden. Zur Herstellung der Verbindungsmittel eignet sich das Pressverfahren, denn es ermöglicht eine wirtschaftliche Fertigung von Bauteilen mit hohen Stückzahlen. Auf der anderen Seite schränkt das Verfahren die Formenfreiheit bei der Entwicklung des Verbindungsmittels ein. Die Geometrie des Verbindungsmittels muss dabei so gestaltet sein, dass sich einerseits das Bauteil nach dem Aushärten aus der Form wieder entnehmen lässt und andererseits der Druckstempel und die Negativform ineinander greifen können. Dies hat zur Folge, dass Hinterschneidungen nicht herzustellen sind.

4.2.1 Tragprinzip, Herstellung und Versuche

Entwickelt und untersucht werden zwei unterschiedliche Verbindungsmittel, deren Form auf eine axiale oder biaxiale Schubbeanspruchung in der Fuge reagiert. In beiden Fällen sollen jedoch durch ein biegebeanspruchtes Element die Kräfte im Beton in die CFK-Schalung eingeleitet werden. Für einen ungerichteten Lastabtrag eignet sich eine rotationssymmetrische Form. Das für eine axiale Beanspruchung ausgerichtete Verbindungsmittel verfügt über eine größere Kontaktfläche zur Aufnahme der diagonalen Druckkräfte aus

dem Beton. Die Druckkraftkomponente soll dabei durch einen leicht abfallenden (diagonaler) Steg in den dahinterliegenden Bereich der Schalung eingeleitet werden. Im Vergleich zum axialen Verbindungsmittel soll somit das Biegemoment nicht nur durch eine vertikale Kraftkomponente aufgenommen werden, sondern auch durch einen horizontalen Anteil.

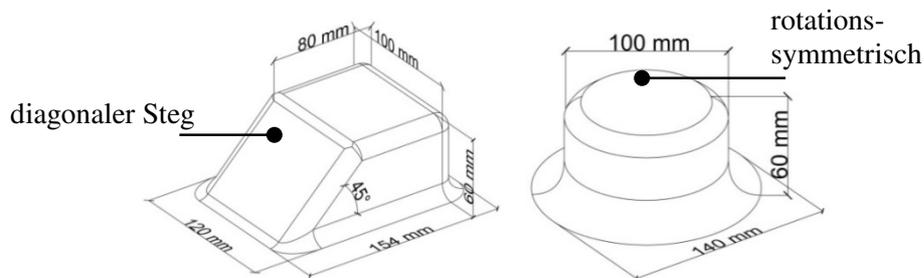


Abbildung 28: Verbindungsmittel für axiale und biaxiale Kraftübertragung

In Abbildung 28 sind die entwickelten bolzenartigen Schubverbindungssysteme dargestellt. Für die Orientierungsversuche erfolgt die Herstellung der Proben im Labormaßstab durch das Vakuuminjektionsverfahren (Abbildung 29) [24].



Abbildung 29: Negativform der Schubverbindungsmittel aus CFK

Bei der Fertigung durch das Pressverfahren spielen neben der Form des Bauteils auch der Laminataufbau und der Zuschnitt der Textilien eine Rolle. In Abbildung 30 ist für beide Verbindungsmittel der Zuschnitt der Matten dargestellt. Er ist so ausgelegt, dass eine minimale Anzahl von Matten benötigt wird, um die Fläche abzubilden. Außerdem besitzt der dargestellte Zuschnitt eine minimale Anzahl an Überlappungsstößen, um Schwächungen im Material zu reduzieren.

Bei den Versuchsergebnissen ist der Einfluss der unterschiedlichen Laminataufbauten zwischen L-1 und L-2 auf die Steifigkeit und Festigkeit deutlich zu erkennen. Die Steifigkeit des Laminats L-1 ist im Vergleich zum Laminat L-2 um 55% und die Festigkeit um 62% höher.

Tabelle 2: Versuchsergebnisse

Versuchsserie	Axiales Schubverbindungsmittel			Biaxiales Schubverbindungsmittel		
	A 1	A 2	A 3	B 1	B 2	B 3
Probe						
Prüflast [kN]	36.5	42.9	42.1	57.6	59.8	51.8
Mittl. Schub [kN]		20,25			28.2	
Versagensart	CFK	Beton	Beton	Beton	Beton	Beton
Mittl. Betonfestigkeit	44.86 N/mm ²					
Laminate	L-1 (Fuß)		L-2 (Seite)		L-3 (Oben)	
Aufbau	[[0/90] ₁₂]		[[0/90), (+45/-45) ₅ , (0/90)]		[[0/90) ₂ , (+45/-45) ₅] ₂	
Laminatsteifigkeit	66391 N/mm ²		30334 N/mm ²		31513 N/mm ²	
Laminatfestigkeit	865.92 N/mm ²		331.17 N/mm ²		269.14 N/mm ²	

Die Ergebnisse der Schubversuche zeigen, dass eine mittlere Querkraft von 28.2 kN durch das biaxiale Schubverbindungsmittel in das Laminat eingeleitet wird. Die Schubtragfähigkeit des axialen Systems ist im Vergleich zum biaxialen Verbindungsmittel hingegen niedriger und liegt bei 20,25 kN. Dies ist auf die hohe Steifigkeit des axialen Verbindungsmittels zurückzuführen. Die Nachgiebigkeit des biaxialen Bolzens zeigt sich durch das Versagen des Laminats auf Zug und auf Druck am Fuße des Verbindungsmittels (Abbildung 32). Aus den Versuchen geht ebenfalls hervor, dass ein frühes Lösen des Betons von der CFK-Schale zu beobachten ist. Des Weiteren kann, aufgrund der unzureichenden Rissverteilung im Beton, auf eine Stahlbewehrung in der Zugzone nicht verzichtet werden. In Tabelle 2 sind zusammenfassend die ermittelten Prüflasten angegeben. Die Kraft-Verformungskurven der jeweiligen Proben und die Versagensmechanismen sind in [24] detailliert dargestellt.

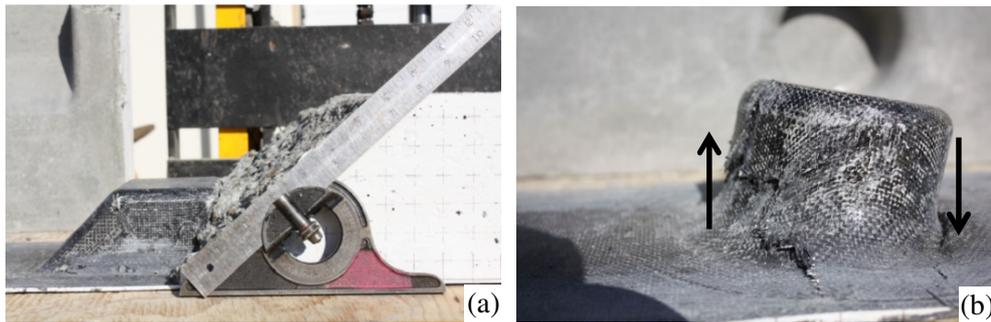


Abbildung 32: (a) Versagen des axialen Schubverbindungsmittels; (b) Versagen des biaxialen Schubverbindungsmittels

4.2.3 Fazit

Die Untersuchungen zeigen, dass eine punktuelle Kraftübertragung zwischen CFK und Beton zu einem tragfähigen Verbund führt. Die Verbundwirkung zwischen CFK und Beton kann an dieser Stelle durch die Anbringung einer Schubbewehrung erhöht werden. Diese ist im Bereich der Verbindungsmittel anzuordnen, da hier ein Betonschubversagen zu beobachten ist (Abbildung 32 (a)). Des Weiteren ist eine Zugbewehrung aufgrund der Entstehung von Rissen im Beton zwischen den Schubverbindungsmitteln erforderlich. Der geringe Verbund zwischen der glatten Oberfläche des CFK-Laminats und dem Beton führt dazu, dass keine Rissverteilung im Beton stattfindet. Die Folge ist, dass sich nur ein einzelner Riss im Beton einstellt. Dies könnte durch eine Mindestzugbewehrung verhindert werden.

In Bezug auf die Herstellung zeigt sich, dass die Formbarkeit des Materials für eine formschlüssige Kraftverbindung zwischen CFK und Beton aufgrund der Restriktionen des Herstellungsverfahrens nur eingeschränkt genutzt werden kann. Außerdem lässt sich die Herstellung der Verbindungsmittel in die Herstellung der Verbundschalung nicht integrieren, da zwei unabhängige Fertigungsprozesse verwendet werden müssen. Dies führt dazu, dass die Anbringung jedes einzelnen Verbindungsmittels nur händisch zu bewerkstelligen ist, was zu hohen Produktionskosten führt. Ein Nachteil des Verbundschalungssystems mit lokalen Verbindungsmitteln liegt in der geringen Biegesteifigkeit im Bauzustand, da das Laminat nur eine Dicke von 2-3 mm besitzt. Demzufolge ist eine aufwendige Unterkonstruktion während der Bau-phase notwendig.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die punktuellen Verbindungsmittel für eine Flächenverbundbauweise nur in Kombination mit einer Zugbewehrung geeignet sind. Um die Tragfähigkeit eines solchen Verbindungsmittels genauer Vorhersagen zu können, sind weitere Untersuchungen mit größeren Versuchsreihen notwendig. Der Einfluss einer Schub- und Zugbewehrung, einer anderen Belastungs- und Auflagersituation, der einzelnen Materialparametern (zum Beispiel Laminataufbau oder Betonsorte) und der Bauteilabmessungen gilt es hierbei zu bestimmen.

4.3 Zahnleistenverbundschalung (Konzept II)

Im Vergleich zu der Flächenverbundschalung mit bolzenartigen Verbindungsmitteln, verfolgt das Konzept der Zahnleistenverbundschalung, die Schubkräfte zwischen CFK und Beton über einen größeren Bereich in der Kontaktfläche zu übertragen. Die mechanische Krafteinleitung erfolgt dabei durch eine zahnleistenförmige Profilierung der Schalung. Inspiriert ist diese Entwicklung durch ein im Brückenbau häufig verwendetes Einbauteil zur Einleitung von hohen und konzentrierten Lasten [25].

4.3.1 Erläuterungen zum Tragprinzip

Der Aufbau der Zahnleistenverbundschalung besteht aus einem unteren und oberen Laminat. Das obere Laminat, das im Schnitt der Form eines Sägezahns ähnelt, sorgt dafür, dass die diagonalen Druckkräfte im Beton in das untere Laminat eingeleitet werden. Das untere Laminat nimmt dabei die Zugkräfte auf und leitet diese bis an die Auflager. Neben der Funktion der Schubübertragung im eingebauten Endzustand, erfüllt das obere Laminat ebenfalls im Bauzustand eine wichtige Funktion: durch die Aufkantung erzeugt die Schalung die Steifigkeit die sie benötigt, um das Verformungsmaß durch die einwirkenden Kräfte im Bauzustand einzuhalten. Der Lastabtrag im Bauzustand erfolgt im Vergleich zum Endzustand in Querrichtung.

Die Zahnleiste ist für den Idealfall rechtwinklig zur Tragwirkung anzuordnen. Der Lastabtrag erfolgt dann wie durch das in Abbildung 33 (a) dargestellte Stabwerksmodell. Die diagonale Betondruckkraft teilt sich im Bereich

der Zahnleiste in eine horizontale und eine vertikale Komponente. Die horizontale Kraftkomponente wird dabei durch die Zahnleiste in die Schalung eingeleitet, wobei die vertikale Zugkraftkomponente durch eine vorhandene Schubbewehrung aufgenommen und in die Betondruckzone hochgehängt wird.

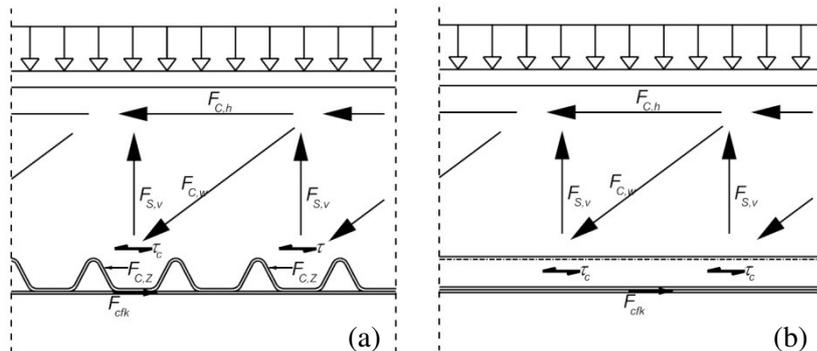


Abbildung 33: Tragwirkung der Zahnleistenverbundschalung: (a) in Querrichtung angeordnet; (b) in Längsrichtung angeordnet

Liegt die Zahnleiste parallel zum Lastabtrag, so kann die Tragwirkung mit dem in Abbildung 33 (b) dargestellten Stabwerksmodell beschrieben werden. Die Einleitung des horizontalen Anteils der diagonalen Druckkraft im Beton wird in diesem Fall durch Reibung im Bereich der Zahnleiste in das untere Laminat eingeleitet. Die vertikale Komponente wird wiederum durch die Schubbewehrung aufgenommen und in die Betondruckzone hochgehängt.

4.3.2 Integration in den Fertigungsprozess

Die Fertigung der Zahnleiste und dessen Integration in den bestehenden Prozess erfolgt durch eine Reihe von zusätzlichen Fertigungsschritten. Diese setzen sich wie folgt zusammen: Nachdem ein wickelbarer zusammengesetzter Kern und ein Wickelwinkel mit entsprechendem Wickelmuster definiert wurden, wird der Kern ein erstes Mal bewickelt. Im Anschluss wird der bewickelte Kern getempert und die Bauteile werden vom Kern genommen. Anschließend wird der Kern ein zweites Mal bewickelt. Im Gegensatz zum ersten Laminat wird das nasse Laminat aufgeschnitten und neben der Wickelmaschine ausgerollt. Es besteht nun die Möglichkeit, den freigelegten Kern

zu bearbeiten, um die Nut für die Zahnleisten zu fräsen. Der Kern mit den gefrästen Nuten ist in Abbildung 34 (a) dargestellt. An dieser Abbildung wird deutlich, wie die Verwendung eines Trägerkerns und einzelner Hartschaumblöcke es ermöglicht, den Materialverbrauch zu reduzieren. Das neben dem Kern ausgerollte Laminat wird im Anschluss wieder auf den Kern gewickelt, danach wird durch gezielt abgelegte Rovinge an der jeweiligen Nut das Laminat in die Vertiefungen gezogen. Die zuvor getemperten Laminare werden dann auf den Kern fixiert und mittels eines Vakuumsacks auf das noch nasse Laminat gepresst. Abschließend wird der Kern nochmals getempert und die Bauteile werden nach dem Konturfräsen vom Kern entfernt (Abbildung 34 (b)).

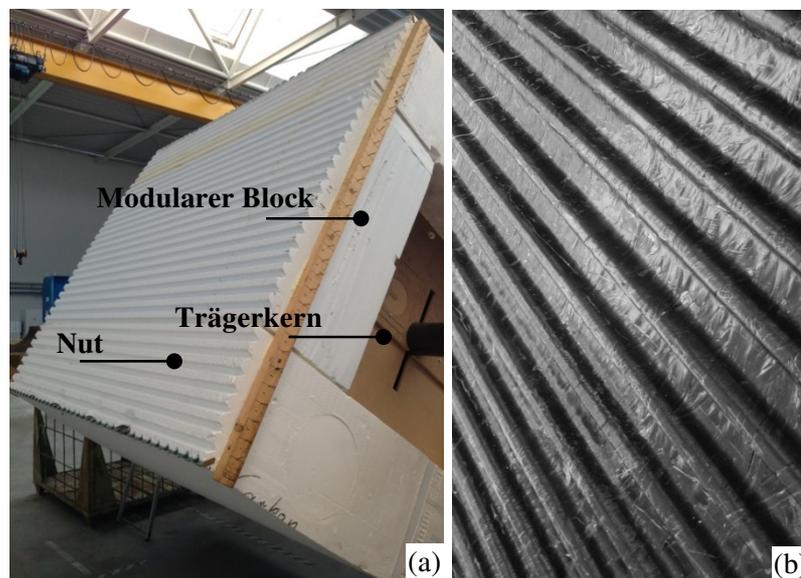


Abbildung 34: (a) gefräste Nutoberflächen in Längs- und Querrichtung der Modularen Elemente und Trägerkern; (b) Zahnleistenverbundschalung (Oberseite)

4.4 Sandwichverbundschalung (Konzept III)

Sandwichstrukturen stellen für Bauteile aus faserverstärktem Kunststoff eine häufige Konstruktionsbauweise dar, da sie einen effizienten Materialeinsatz ermöglichen [17]. Sandwichbauteile in der Faserverbundtechnologie werden

üblicherweise durch das Vakuuminfusionsverfahren hergestellt, können aber auch durch das Wickelverfahren gefertigt werden. Für die Herstellung von freigeformten Sandwichbauteilen spielt die Formbarkeit des Kernmaterials eine wesentliche Rolle. Bei der Entwicklung der Sandwichverbundschalung auf Basis einer Sandwichbauweise, liegt ein wesentliches Ziel darin, die Einschränkungen auf die herstellbaren Geometrien so gering wie möglich zu halten. Die Ausbildung der Schubfuge ist daher so gestaltet, dass sie den bisherigen Herstellungsprozess nicht beeinflusst.

4.4.1 Erläuterung zum Tragprinzip

Die Sandwichverbundschalung besteht aus einem drapierfähigen Schaumkern (Abbildung 35 (a)) und einer beidseitigen Deckschicht aus CFK. Die Sandwichstruktur bietet eine ausreichende Steifigkeit für die Einwirkungen im Bauzustand. Um nach dem Erhärten des Betons einen kraftschlüssigen Verbund zwischen den Materialien zu gewährleisten, ist das Sandwichsystem mit Sacklöchern versehen (Abbildung 35 (b)). Dies ermöglicht es, dass der Beton beim Spritzbetonieren in die Vertiefungen eindringen und sich nach dem Erhärten im Sandwich verankern kann. Die Oberfläche des Sandwichs ist dabei nicht durchgehend mit Sacklöchern versehen, um eine ausreichende Biegesteifigkeit im Bauzustand zu garantieren. Die Anordnung der Sacklöcher ist so gewählt, dass sich ein durchgehender Streifen im oberen Laminat ergibt. Die Anzahl und der Durchmesser der Sacklöcher sind im Hinblick auf die resultierende Schubfläche und auf eine wirtschaftliche Fertigung (Bohrungen/Stunde) gewählt.

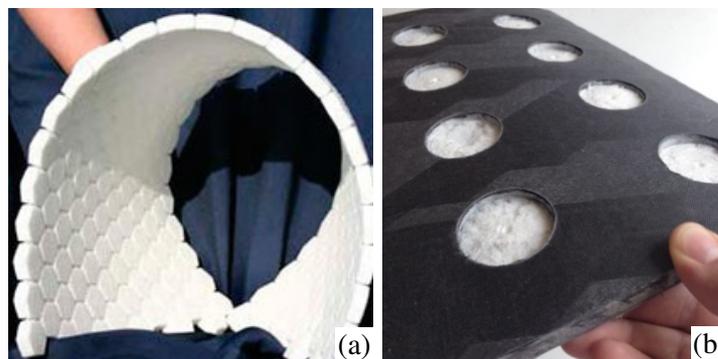


Abbildung 35: (a) Kernmaterial 3D-Core[™] [26]; (b) Sacklöcher der Sandwichverbundschalung

Mithilfe des Stabwerkmodells in Abbildung 36 wird die Tragwirkung des Systems näher erläutert. Die vertikale Komponente der diagonalen Druckkraft $F_{c,w}$ wird durch eine Schubbewehrung aufgenommen und entspricht der Kraft $F_{s,v}$. Die horizontale Komponente wird über den Betonschub τ_c im Bereich der Sacklöcher in das Sandwich, bzw. in die obere Deckschicht durch die Kraft $F_{cfrp,1}$ und der Kraft in der unteren Deckschicht $F_{cfrp,2}$, eingeleitet. Durch das Kernmaterial findet eine Schubinteraktion τ_{foam} zwischen den beiden Deckschichten statt.

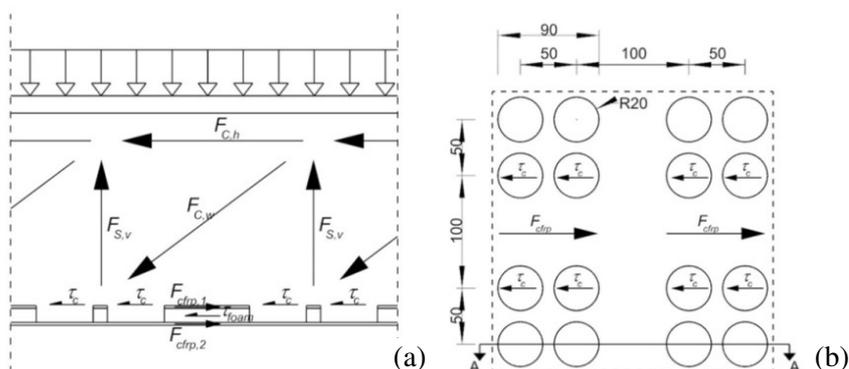


Abbildung 36: Stabwerkmodell des Tragprinzips: (a) vertikaler Schnitt, (b) horizontaler Schnitt

Die beiden Zugkraftkomponenten der unteren und oberen Deckschicht können durch eine gemeinsame Kraft F_{cfrp} beschrieben werden. So ergibt sich im Sandwich für die Zugkraft folgender Zusammenhang:

$$F_{cfrp} = F_{cfrp,1} + F_{cfrp,2}$$

Für F_{cfrp} ergibt sich mit τ_c und den benachbarten Sacklöchern (Abbildung 36 (b)) der Zusammenhang:

$$F_{cfrp} = 4 \cdot \pi \cdot R_{blind\ hole}^2 \cdot \tau_c$$

Die Reibung zwischen der CFK-Deckschicht und dem Beton wird dabei nicht berücksichtigt und wird an dieser Stelle vernachlässigt.

4.4.2 Integration in den Fertigungsprozess

Die Ausbildung der Schubfuge der Sandwichverbundschalung wirkt sich im Gegensatz zur Zahnleistenverbundschalung geringer auf den Prozess aus und

benötigt weniger Fertigungsschritte. Die Herstellung der Sandwichverbundschalung findet folgendermaßen statt: Nachdem ein wickelbarer zusammengesetzter Kern und ein Wickelmuster definiert wurden, wird der Kern ein erstes Mal bewickelt. Im Anschluss daran wird das Kernmaterial zugeschnitten und auf das Laminat fixiert (Abbildung 37 (a)). Der Kern wird daraufhin ein zweites Mal bewickelt. Um die Lamineigenschaften an dieser Stelle noch zu verbessern, besteht die Möglichkeit durch Anbringen einer Vakuumfolie einen Unterdruck zu erzeugen. Dadurch wird dem Laminat überschüssiges Harz und eventuelle Lufteinschlüsse entzogen. Ist dieser Prozess abgeschlossen, wird der gesamte bewickelte Kern getempert. Bevor die Bauteile vom Kern genommen werden, erfolgt das Bohren der Sacklöcher und das Fräsen der Konturlinien der Bauteile (Abbildung 37 (b)).

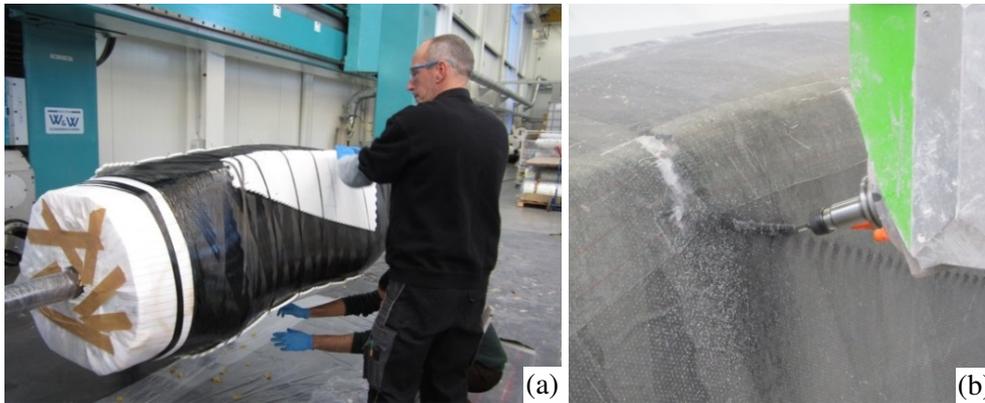


Abbildung 37: (a) Anbringen des Kernmaterials; (b) Fräsen der Kontur und der Sacklöcher

4.5 Ermittlung der mechanischen Materialeigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften von CFK und Beton haben einen wesentlichen Einfluss auf die späteren gemeinsamen Eigenschaften im Verbund. Zur Bestimmung der Materialeigenschaften des CFKs werden daher in diesem Abschnitt eine Reihe an Untersuchungen vorgestellt, die sich mit dem Einfluss des Laminataufbaus, den Materialkomponenten, dem Wickelverfahren und der Dauerhaftigkeit des Laminats im alkalischen Milieu befassen. Für den Beton beschränken sich die Versuche hingegen auf die Ermittlung der

Druckfestigkeit und der Steifigkeit. Die Proben wurden hierzu parallel zur Herstellung der Schubträger produziert.

4.5.1 Trockenspritzbeton

Als Trockenspritzbeton kommt SSB8P[®] des Herstellers Sakret[®] zum Einsatz, der üblicherweise im Tunnelbau und in der Instandsetzung von Bauwerken verwendet wird. Er zeichnet sich speziell darin aus, eine gute Haftung mit einem Untergrund einzugehen und einen geringen Rückprall zu besitzen. Die Versuche zur Ermittlung der Materialeigenschaften des Betons erfolgen nach EN 12390-1. Die Ergebnisse in Tabelle 3 dargestellt sind.

Tabelle 3: Versuchsergebnisse der Betondruckversuche aus der Produktion der Schubträgerversuche

Probe		A1	A2	A3	A4
F _{max}	kN	218,3	195,5	206,8	299,4
Max. Spannung	N/mm ²	31,46	28,17	29,63	43,14
E-Modul	N/mm ²	34898,56	-	-	43425,99
f _{c, mean}	N/mm ²	33,5			
E _{mean}	N/mm ²	39162,27			

Die mittlere Druckfestigkeit der vier Proben liegt bei 33,5 N/mm². Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse eine gewisse Streuung aufweisen, die sich aber nach EN 14487-1 noch im zulässigen Rahmen befinden. Die Streuung ist in der Regel auf das Trockenspritzverfahren zurückzuführen [27]. Die manuelle Düsenführung, eventuelle Lufteinschlüsse während des Sprühens oder auch wechselnde Mischungsverhältnisse der Betonzuschlagstoffe, sind die wesentlichen Parameter, die die Qualität des Spritzbetons beeinflussen.

4.5.2 CFK-Wickellaminat

Als Werkstoffkomponenten werden die Rovinge UTS50 F24 24K 1600tex D des Herstellers von Tenax[®] und das Matrixsystem Biresin CR84 des Herstellers Sika[®] verwendet. In einer ersten Versuchsreihe werden die Material-

kennwerte der gewickelten CFK Laminats ermittelt. Für die Wickelwinkel $\pm 2^\circ$, $\pm 10^\circ$, $\pm 45^\circ$ und $\pm 80^\circ$, werden jeweils bei Raumtemperatur (20°C) drei Proben getestet (Abbildung 38 (b)). Sowohl die Wahl der Abmessungen der Probekörper, als auch die Versuchsdurchführung erfolgt nach EN ISO 527. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zusammenfassend dargestellt. Dabei sind für die jeweiligen Wickelwinkel die Mittelwerte angegeben. Die angegebenen charakteristischen Werte wurden nach EN 14358 mit einer Annahme einer 5 %-Quantile berechnet. Eine ausführliche Darstellung und Auswertung der einzelnen Versuchsergebnisse ist in [28] zu finden.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse des Wickellaminats

Faserorientierung		$\pm 2^\circ$	$\pm 2^\circ$ (1g/l)	$\pm 2^\circ$ (10g/l)	$\pm 10^\circ$	$\pm 45^\circ$	$\pm 80^\circ$
Mittelwert F_{\max}	kN	51,041	48,9	39,64	15,682	2,340	0,593
Mittl. Festigkeit	N/mm ²	1957	1756	1411	624	78	27
Chara. Festigkeit	N/mm ²	1676	1430	1389	443	67	20
E_{mean}	N/mm ²	175090	177539	157775	114263	11503	9015

Zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit der beiden Materialien im Verbund, wird im Folgenden der Einfluss des basischen Milieus auf die Eigenschaften des CFK-Wickellaminats untersucht. Um diesen Effekt nachzubilden, werden zehn Probekörper in einer Konzentration aus Wasser und Natronlauge (NaOH) im Labor eingelagert (Abbildung 38 (a)). Natronlauge mit einem pH-Wert von 14 entspricht in etwa der alkalischen Konzentration von Beton. Jeweils fünf Probekörper wurden in eine Lösung A mit einer Konzentration von $1\text{g}_{(\text{NaOH})}/\text{Liter}_{(\text{H}_2\text{O})}$ und in eine Lösung B mit einer Konzentration von $10\text{g}_{(\text{NaOH})}/\text{Liter}_{(\text{H}_2\text{O})}$ acht Wochen bei einer Reaktionstemperatur von 60°C in einer Wärmekammer eingelagert. Die untersuchten Proben besitzen eine Laminatdicke von 2 mm und einen Wickelwinkel von $\pm 2^\circ$. Durch einen anschließenden Versuch werden die Steifigkeit und Festigkeit ermittelt (Abbildung 38 (b)).

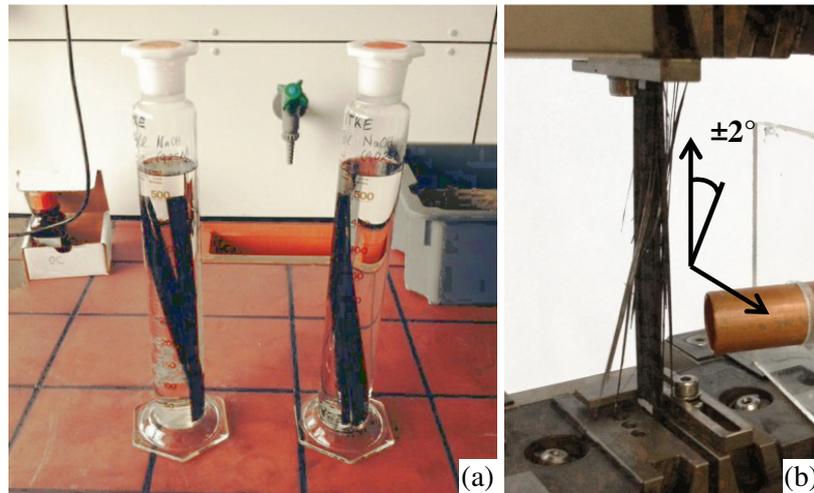


Abbildung 38: (a) Eingelagerte Probekörper am Institut für physikalische Chemie (IPC) der Universität Stuttgart; (b) Zugversuch eines Probekörpers mit einem Winkelwinkel von $\pm 2^\circ$

Die ausgewerteten Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt. Bei Lösung A ist im Vergleich zu den unbehandelten Probekörpern ein Unterschied bei der Festigkeit zu beobachten. Die mittlere Festigkeit nimmt um etwa 10 % ab, der E-Modul hingegen bleibt nahezu gleich. Bei Lösung B ist im Vergleich zu den unbehandelten Probekörpern eine Abnahme der mittleren Festigkeit und der mittleren Steifigkeit zu erkennen. Die Zugfestigkeit verringert sich um 28 % und der E-Modul um etwa 10 %. Die jeweiligen Messwerte der einzelnen Versuchsreihen sind in [28] dokumentiert.

4.5.3 Verbindung

Für die Nietverbindung werden A2-Edelstahlblindnieten des Herstellers Gesipa[®] verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgt dabei auf Grundlage der DIN EN ISO 14589, welche die mechanische Prüfung von Blindnieten für die Fügung von metallischen Werkstoffen regelt.

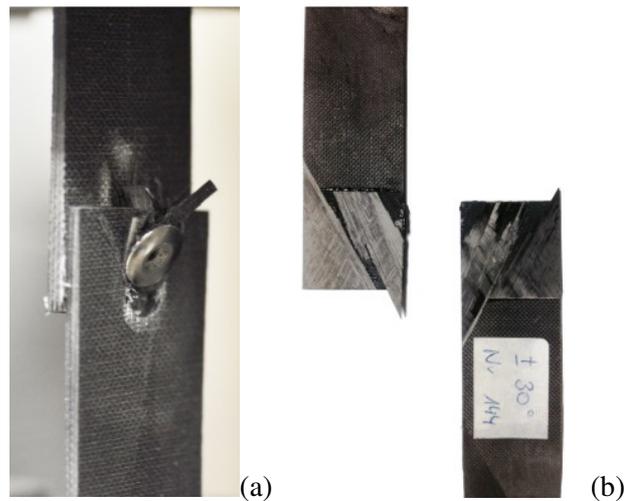


Abbildung 39: Durchgeführte Orientierungsversuche: (a) Blindnietverbindung; (b) Klebeverbindung [28]

Die Bestimmung der Scherfestigkeit der einschnittigen überlappenden Klebung erfolgt durch das in der DIN EN 6060 vorgeschlagene Prüfverfahren, die Bruchanalyse hingegen mithilfe der DIN EN ISO 10365. Ziel der Untersuchungen ist es, eine erste Einschätzung des Einflusses des Herstellungsverfahrens auf die Kraftübertragung beider Verbindungstypen zu erlangen. Dazu werden Proben mit einem Wickelwinkel von $\pm 10^\circ$, $\pm 30^\circ$ und $\pm 60^\circ$ bei Raumtemperatur (20°C) auf die Kraftübertragung geprüft (Abbildung 39). Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengefasst, eine ausführliche Beschreibung ist in [28] dargestellt.

Tabelle 5: Versuchsergebnisse der Verbindungsmittel

Typ	Blindnietverbindung			Klebeverbindung			
		$\pm 10^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$	$\pm 10^\circ$	$\pm 30^\circ$	$\pm 60^\circ$
Mittelwert F_{\max}	kN	2,20	2,86	1,72	10,8	11,4	3,0
Chara. Scherspannung	N/mm ²	3,1	4,2	2,4	12,9	16,7	1,3
Chara. Festigkeit	N/mm ²	77,7	106,1	60,0	380,3	406,0	79,9

Die Versuche zeigen, dass die Klebeverbindung im Vergleich zur Blindnietverbindung höhere Kräfte überträgt. Bei einem Faserwinkel von $\pm 30^\circ$ beträgt

die charakteristische Kraftübertragung der Klebeverbindung 406 N/mm, die der Blindnietverbindung nur 106 N/mm. Ein wichtiger Vorteil der Blindnietverbindung gegenüber der Klebeverbindung liegt jedoch in ihrer Praktikabilität, da eine leichte Montage der Schalung auf der Baustelle mit ihr möglich ist. Die Ausführung bedarf keines Fachwissens und ist mit einfachen Hilfsmitteln umzusetzen. Eine Verbesserung der Kraftübertragung durch die sonst üblichen Lösungen für faserverstärkte Kunststoffe, lassen sich nur schwer mit dem Faserwickelverfahren kombinieren. So ist beispielsweise eine lokale Aufdickung des Materials oder eine differenzierte lokale Auslegung des Faserverlaufs beim Faserwickelverfahren mit einem hohen Aufwand verbunden und daher aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten schwer zu vertreten. Auch das Einlegen von zusätzlichen Fasermatten oder Inserts ist nur mit manuellen Zwischenschritten zu bewerkstelligen und führt ebenfalls zu höheren Fertigungskosten.

4.6 Versuche zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit

Die Durchführungen der Versuche erfolgen auf Grundlage der Regelungen von Verbunddecken nach EN 1994 Annex B. Herstellungsbedingt besitzen die Probekörper der Zahnleistenverbundschalung eine Länge von 160 cm, eine Breite von 60 cm und eine Höhe von 15 cm. Die Probekörper der Sandwichverbundschalung sind in der Breite und Höhe identisch, haben aber eine Länge von 200 cm. In Abbildung 40 ist exemplarisch der Versuchsaufbau für die Sandwichverbundschalung dargestellt. Der Abstand der Lasteinleitung zum Auflager beträgt bei allen Probekörpern 45 cm.

Die Versuche werden weggesteuert bei einer Geschwindigkeit von 0,03 mm/s durchgeführt. Wie in Abbildung 40 dargestellt, befindet sich in Feldmitte ein Wegaufnehmer. An der CFK-Unterseite sind jeweils zwei Dehnmessstreifen (DMS) und am Betonquerschnitt drei DMS angebracht. Wie in Feldmitte sind auch hier zwei DMS an der CFK-Unterseite und drei DMS am Beton angebracht.

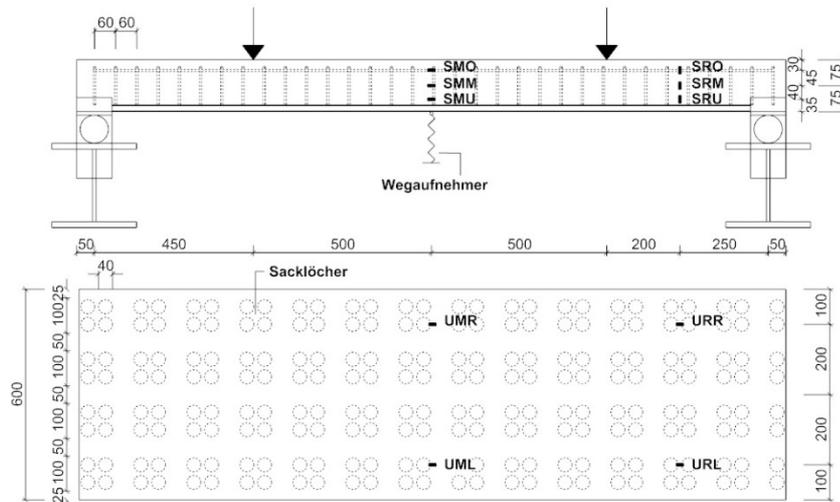


Abbildung 40: Exemplarischer Versuchsaufbau und Messplan zur Durchführung der Schubversuche anhand der Sandwichverbundschalung

Beide Schalungssysteme sind mithilfe der jeweiligen Stabwerksmodelle aus Kapitel 4.3.1 und 4.4.1 vordimensioniert, um ein Versagen des Betons zu bewirken und die Schubkraft τ_c zu bestimmen. Für die Schubbewehrung folgt ein Bewehrungsgrad von $83 \text{ cm}^2/\text{m}^2$. Dieser wird durch die Anordnung von sechs Bewehrungseisen mit einem Durchmesser von 8 mm alle 6 cm in Bauteillängsrichtung abgedeckt (Abbildung 40). Der Abstand in Querrichtung beträgt dabei 8,5 cm. Das Spritzbetonieren der Proben erfolgte auf dem Gelände der Firma Torkret (Abbildung 41). Im Anschluss wurden die Proben normgerecht nachbehandelt und für 28 Tage gelagert.



Abbildung 41: Herstellung der Probekörper

4.6.1 Versuchsergebnisse der Zahnleistenverbundschalung

Das untere Laminat und die Zahnleiste sind jeweils 3 mm stark. Die Einzelschichten des unteren Laminats sind in $\pm 10^\circ$ in Richtung der Bauteilachse angeordnet. Bei den Versuchen zur Bestimmung der Schubkrafteinleitung für die Zahnleistenverbundschalung wird der Parameter der Orientierung der Zahnleisten berücksichtigt. Es wird daher bei der Versuchsdurchführung in die Längs- und Querorientierung unterschieden. Bei der Längsorientierung verläuft die Zahnleiste in Richtung der Auflager, bei der Querorientierung hingegen rechtwinklig zur Lastabtragrichtung (siehe Abbildung 42).



Abbildung 42: Versuchsdurchführung der Zahnleistenverbundschalung (ZVS) mit der Zahnleiste in Querrichtung orientiert.

Bei der Versuchsdurchführung der ZVS mit querorientierter Zahnleiste, ist die erste Rissbildung in dem Bereich unterhalb der Lasteinleitung zu beobachten. Die Risse setzen dabei an der Spitze der Zahnleiste an. Bei weiterer Laststeigerung wandern die Risse in Richtung der Lasteinleitung und es folgen erste Risse in Feldmitte. Bei allen drei Probekörpern ist ein annähernd linearer Verformungsanstieg bis zum schlagartigen Versagen des Betons zu beobachten. Wie in Abbildung 43 dargestellt, erfolgt dies über einen Schubbruch.



Abbildung 43: Versagensmechanismus der ZVS-Probe Q2

In Tabelle 6 sind die Prüflasten und die entsprechenden Biegemomente der jeweiligen Probekörper angegeben. Dabei erreichen Probe 2 und Probe 3 eine Versagenslast von über 200 kN. Die mittlere Prüflast liegt bei 177 kN.

Tabelle 6: Ergebnisse der Schubversuche

Versuchsserie	ZVS-Q			Stahlbeton
	ZVS-Q1	ZVS-Q2	ZVS-Q3	rechn. Vergleich
Faserorientierung	±10	±10	±10	20 cm ² /m
Laminatdicke		Zahnleiste: 4mm Laminat: 4mm		
Prüflast [kN]	114.0	212.1	203.2	178
Prüfmoment [kNm]	25.7	47.7	45.7	40,1
Versagensart	Betonschub	Betonschub	Betonschub	Verankerungslänge

Um die Ergebnisse der Schubversuche qualitativ zu beurteilen, wird zum Vergleich in Tabelle 6 die benötigte Stahlbewehrung für eine Prüflast von 178 kN angegeben. Die erforderliche Flächenbewehrung A_s aus der resultierenden Biegebemessung⁵ nach DIN EN 1992-1-1 entspricht 20 cm²/m. Dies führt bei einer wirtschaftlichen Bewehrungswahl in etwa zu einem Durchmesser $d_s = 20$ mm mit einem Stababstand von 15 cm. Bei der Bewehrungswahl ist die vorhandene Verankerungslänge von 45 cm berücksichtigt. Die Bemessung erfolgt auf Basis der charakteristischen Materialeigenschaften. Die Betondeckung wird mit 4 cm angenommen.

⁵ Die Ermittlung erfolgt dabei auf Basis der rein charakteristischen Werte

Die Proben der ZVS mit einer Längsorientierung versagen im Vergleich zu denen in Querrichtung unter einer geringeren Last. Diese liegt im Mittel bei 120 kN. In Tabelle 7 sind die Eigenschaften der Probekörper und die Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 7: Versuchsergebnisse des ZVS mit Orientierung in Längsrichtung

Versuchsserie	ZVS-L			Stahlbeton
	ZVS-L1	ZVS-L2	ZVS-L3	rechn. Vergleich
Faserorientierung	±10	±10	±10	12 cm ² /m
Laminatdicke		Zahnleiste: 4mm Laminat: 4mm		
Prüflast [kN]	118.3	127.2	115.7	120
Prüfmoment [kNm]	26.6	28.6	26.0	27
Versagensart	Betonschub	Betonschub	Betonschub	-

Bei den Versuchen ist ein schlagartiges Versagen der Probekörper zu beobachten. Die Kraftübertragung erfolgt bis zur maximalen Reibkraftübertragung zwischen Beton und der verlorenen CFK-Schalung. In Abbildung 44 (a) ist das abgeschlossene Rissbild unterhalb der Lasteinleitung dargestellt. In Abbildung 44 (b) zeigt sich, wie sich nach der Überschreitung der Reibkraft der Beton von der Schalung löst und über die Schalung hinweg abgleitet.

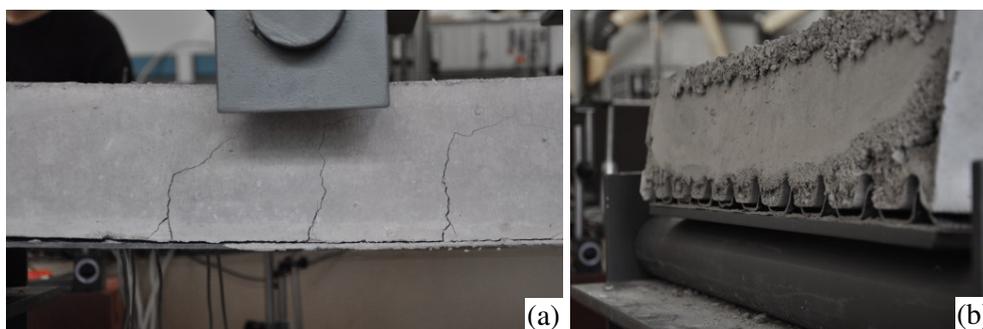


Abbildung 44: Versagen der Zahnleistenverbundschalung mit Anordnung der Zahnleiste in Längsrichtung: (a) Rissbildung; (b) Abgleiten des Betons am Probenende

4.6.2 Versuchsergebnisse der Sandwichverbundschalung

Für die Untersuchung der Schubtragfähigkeit der Sandwichverbundschalung gibt es keine Vorzugsrichtung die es zu berücksichtigen gilt, da die Sacklöcher in Längs- und Querrichtung gleich angeordnet sind. Im Vergleich zur

Zahnleistenverbundschalung reicht daher eine Versuchsreihe aus. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 45 dargestellt.



Abbildung 45: Versuchsdurchführung zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit der Verbundschalung

Die obere und untere Deckschicht des Sandwichs sind jeweils 2 mm stark und haben einen Laminataufbau von $\pm 10^\circ$. Bei etwa 70-80 % der Versagenslast sind erste Risse im Beton zu beobachten. Nach weiterer Laststeigerung wandern die Risse unter dem Laststempel weiter nach oben. Es folgen je nach Probe vier bis sechs weitere Risse und zusätzliche diagonale Risse in Richtung des Auflagers (Abbildung 46 (a)).

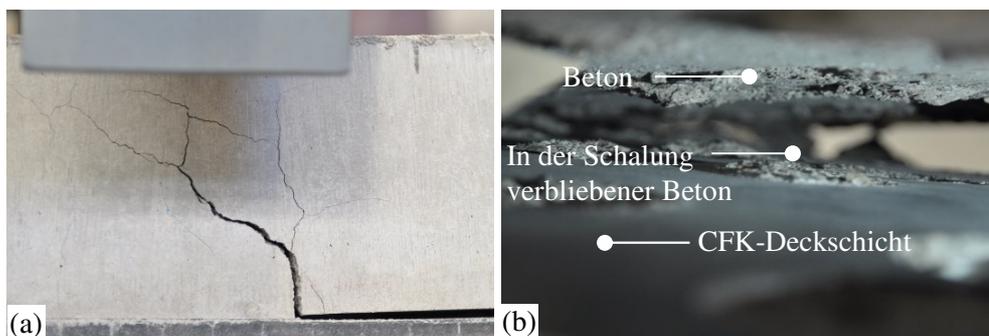


Abbildung 46: Versagensmechanismus der Probekörper durch Betonschub: (a) abgeschlossenes Rissbild unterhalb der Lasteinleitung; (b) Nahaufnahme zwischen Beton und SVS

Bei allen Probekörpern wird ein schlagartiges Versagen beobachtet. Dies führt unmittelbar zu einem Delaminieren zwischen CFK und Beton, das durch das Schubversagen des Betons im Bereich der Sacklöcher erfolgt (Abbildung 46 (b)).

Tabelle 8: Versuchsergebnisse der Sandwichverbundschalung

Versuchsserie	SVS			Stahlbeton
	SVS-1	SVS-2	SVS-3	rechn. Vergleich
Faserorientierung	±10	±10	±10	14 cm ² /m
Laminatdicke		Oben: 2mm Unten: 2mm		
Prüflast [kN]	53,5	156,3	206,8	139
Prüfmoment [kNm]	12,0	35,2	46,5	31,3
Versagensart	Betonschub	Betonschub	Betonschub	-

In Tabelle 8 sind die Eigenschaften der Probekörper und die ermittelten Prüflasten zusammengefasst. Die mittlere Prüflast liegt bei 139 kN. Dies entspricht nach EC 2 in etwa einer Stahlzugbewehrung von 14 cm²/m. Auf die Streuung der Ergebnisse wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

4.7 Vergleich und Fazit

Die in Tabelle 9 dargestellten mittleren Prüflasten der Zahnleistenverbund- und der Sandwichverbundschalung zeigen, dass die Schubübertragung der SVS im Vergleich zur ZVS um 22 % geringer ist. Dies gilt jedoch nur für den Fall, dass die Zahnleisten in Querrichtung zur Lastabtragsrichtung orientiert sind. Liegen die Zahnleisten in Richtung des Lastabtrags, so liegt die übertragbare Querkraft unter der SVS.

Tabelle 9: Vergleich der Ergebnisse

Versuchsserie	SVS	ZVS-Q	ZVS-L
Anzahl	je 3	je 3	je 3
Beton	Spritzbeton	Spritzbeton	Spritzbeton
Schubbewehrungsgrad	83 cm ² /m ²	83 cm ² /m ²	83 cm ² /m ²
Faserorientierung	±10	±10	±10
Laminatdicke	obere Lage: 2mm untere Lage: 2mm	Leiste: 4mm Laminat: 4mm	Leiste: 4mm Laminat: 4mm
Ø Prüflast [kN]	139	178	120
Ø Prüfmoment [kNm]	31	40	27
Querkraft [kN/m/m]	115,8	148,3	100,0
Versagensart	Betonschub	Betondruck	Haftreibung

Die Versuche zur Bestimmung der Schubeigenschaften (SVS und ZVS-Q) weisen eine nicht unerhebliche Streuung in den Ergebnissen auf. Als Ursache hierfür werden die Streuung der in 4.5.1 beobachteten Materialkennwerte des Spritzbetons und die geringe Redundanz der Schubübertragung vermutet. Eine solche Streuung ist nicht nur bei Spritzbeton, sondern auch bei Ortbeton zu beobachten [29]. Eine Lastumlagerung der Schubkrafteinleitung, wie es bei der Stahlbetonbauweise möglich ist, ist bei der Verbundbauweise nicht gegeben. Lokale Materialschwächungen im Beton führen somit zu einem frühzeitigen Versagen der gesamten Struktur. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, könnte die Redundanz bei der Sandwichverbundschalung einerseits durch eine größere Anzahl an Sacklöchern verbessert werden und andererseits durch kleinere Durchmesser. Dies hätte den positiven Effekt, dass die umzulagernden Kräfte kleiner wären und die Kräfte durch den Beton in den benachbarten Sacklöchern aufgenommen werden können.

Im Hinblick auf die Fertigung, erweist sich die Herstellung der Zahnleiste als aufwendig und kostenintensiv. Hinzu kommt, dass eine freie Wahl der Orientierung der Zahnleisten nicht möglich ist. Eine gleichbleibende Herstellungsqualität ist nur für Bauteile mit einer einfachen Krümmung gewährleistet, da für die Herstellung der Zahnleisten eine Drapierfähigkeit des Laminats notwendig ist. Zwar lässt das vorgewickelte Laminat im nassen Zustand eine gewisse Verzerrung zu, diese ist aber für große gauß'sche Krümmungen nicht ausreichend. Des Weiteren lässt sich eine akkurate Fertigung nur gewährleisten, wenn die Zahnleiste bei der Herstellung quer zur Wickelachse angeordnet wird. Aufgrund der starken Restriktionen bei der Fertigung der ZVS, lassen sich die besseren mechanischen Eigenschaften bei der Planung

einer freigeformten Struktur nicht nutzen. Aus den soeben dargestellten Gründen wird daher im weiteren Verlauf dieser Arbeit das Konzept der Sandwichverbundschalung für die Untersuchung einer integrativen Planungs- und Optimierungsstrategie weiterverfolgt.

Die Untersuchung des Fügekonzepts hat gezeigt, dass aus mechanischer Sicht die Klebeverbindung eine deutlich bessere Kraftübertragung liefert. Die Nietverbindung stellt zwar im Hinblick auf die Ausführbarkeit auf der Baustelle die bessere Lösung dar, dennoch wird die Klebeverbindung als das geeignetste Konzept erachtet. Die Eigenschaften im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit beider Verbindungen bleiben bei dieser Betrachtung außen vor.

5 Integrative Planungsstrategie

In den vorherigen Kapiteln wurden die grundlegenden Konzepte zur Herstellung und zum Tragverhalten der Flächenverbundbauweise diskutiert. Das folgende Kapitel beschäftigt sich nun mit der Frage, wie die Randbedingungen der einzelnen Planungsaufgaben aussehen und wie sich die Planungsaufgaben gegenseitig beeinflussen. Die in diesem Kapitel dargestellten grundlegenden Prinzipien und Abläufe dienen dazu, ein Flächentragwerk in der Sandwichverbundbauweise mithilfe eines integrativen Ansatzes zu planen. Dies soll es ermöglichen, die Abhängigkeiten frühzeitig in den Planungsprozess miteinzubinden, um die Qualität des Planungsergebnisses zu steigern. Der Planungsprozess kann dadurch effektiver gestaltet und es kann auf die Herstellungskosten Einfluss genommen werden. Dies liegt daran, dass die Herstellungsplanung relativ weit und die Herstellbarkeit bereits geprüft sind.

5.1 Ablauf der integrativen Planung

Die Idee der verfolgten Strategie besteht darin, dass zu Beginn der Planung neben den strukturellen Eigenschaften ebenso die fertigungsrelevanten Eigenschaften der Sandwichverbundschalung berücksichtigt werden. Die Bearbeitung aller Planungsaufgaben erfolgt dabei in einem iterativen Prozess. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass durch die starken Planungsabhängigkeiten eine unabhängige und in sich abgeschlossene Bearbeitung der Aufgaben nicht möglich ist.

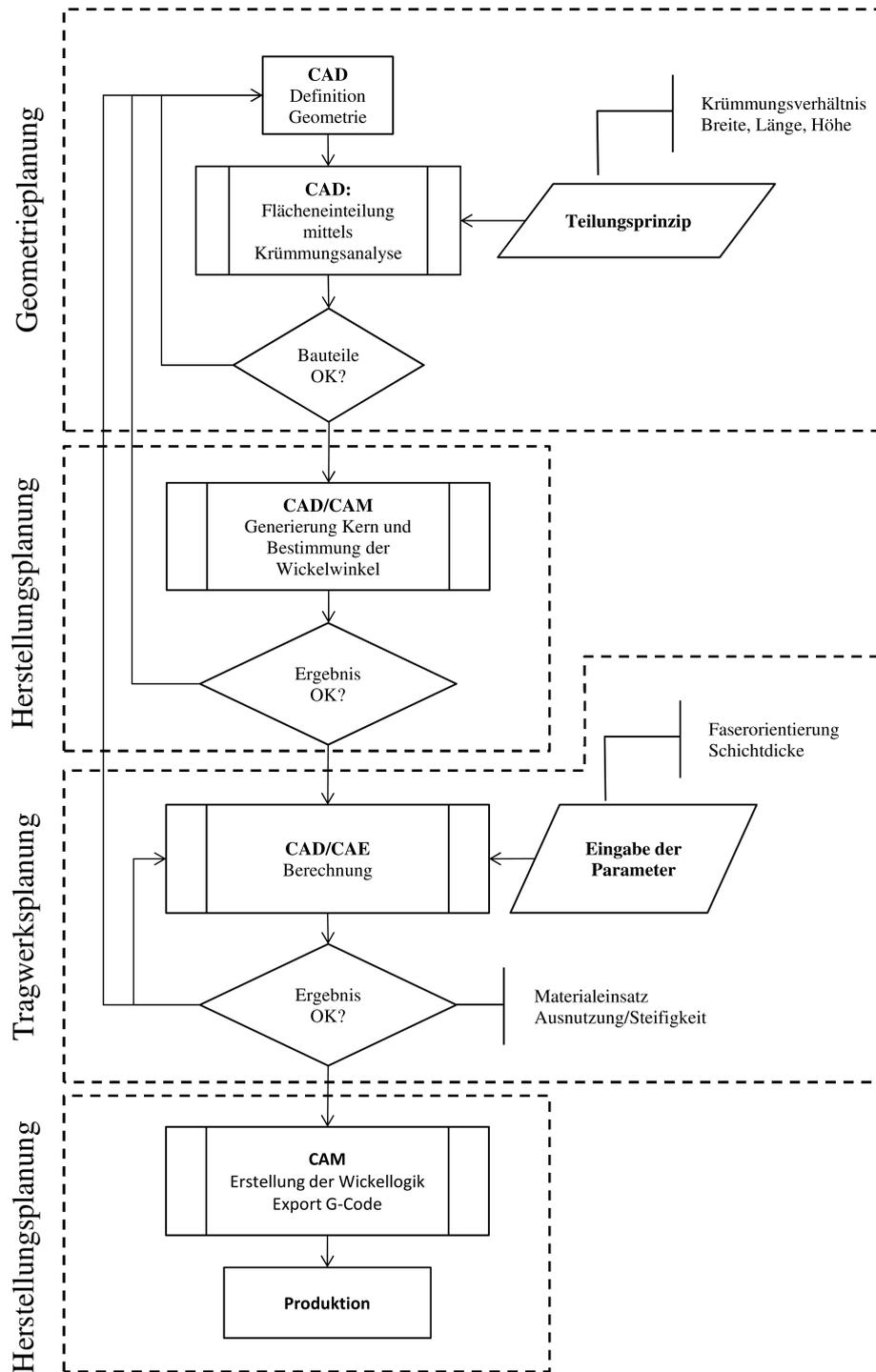


Abbildung 47: Integrativer und iterativer Planungsablauf

Anhand des in Abbildung 47 dargestellten Planungsablaufs wird die verfolgte integrative Planungsstrategie näher erläutert. Der Planungsprozess wird durch die Geometrieplanung eingeleitet. Grundlage bildet hierzu entweder eine „beliebig“ entworfene Geometrie oder eine „bestimmte“ Geometrie, welche die wesentlichen Prinzipien, die für den weiteren Verlauf der Planung von Vorteil sind, berücksichtigt. Beide Geometrien müssen in einzelne Bauteile geteilt werden, wobei der dazu notwendige Fugenverlauf sich an dem Krümmungsverhalten der globalen Geometrie orientiert (siehe hierzu 5.2.1). Zeigt sich nach einer ersten Bauteilanalyse, dass ein Bauteil aufgrund seines Krümmungsverhaltens nicht herzustellen ist, muss entweder durch die globale Geometrie oder durch das Teilungsmuster auf dieses Problem reagiert werden. Für eine bestimmte Geometrie entfällt dieser Vorgang in der Regel, da ein geeigneter Fugenverlauf bereits vorliegt.

Im Anschluss erfolgt aus den zur Verfügung stehenden Bauteilen die Generierung und Untersuchung der zusammengesetzten Kerne. Wird dabei festgestellt, dass sich einer der zusammengesetzten Kerne nicht bewickeln lässt oder die Herstellung unwirtschaftlich ist, muss die globale Geometrie oder das Teilungsmuster angepasst werden. Bei der Untersuchung der Wickelbarkeit der Kerne werden zu diesem Zeitpunkt auch die herstellbaren Wickelwinkel ermittelt.

Nachdem die Herstellungsplanung der Sandwichverbundbauteile abgeschlossen ist, erfolgt die Untersuchung zum Tragverhalten. Bei der Planung des Laminataufbaus unter statischen Gesichtspunkten, spielen die zuvor ermittelten Wickelwinkel eine entscheidende Randbedingung. Dabei muss zusätzlich berücksichtigt werden, welche Bauteile einen gemeinsamen Kern bilden. Ist aufgrund der Tragwerkseigenschaften bei den vorgegebenen Randbedingungen ein unwirtschaftlicher Materialverbrauch die Folge, muss die Geometrie entsprechend verändert werden. Die Anpassung der Geometrie erfolgt dahingehend, dass entweder die geometrische Steifigkeit des Tragwerks erhöht wird oder dass der Herstellungsprozess eine größere Bandbreite an Wickelwinkeln zulässt.

Nachdem die Tragfähigkeit nachgewiesen und die wirtschaftliche Herstellung des Flächenverbundtragwerks gegeben ist, kann die Planung abge-

geschlossen werden. Daraufhin werden die CNC-Daten zur Bewickelung des Kerns generiert und es kann mit der Herstellung begonnen werden.

5.2 Wechselwirkungen zwischen den Planungsaufgaben

Bei dem in Abbildung 47 erläuterten Ablauf wird deutlich, dass es zu einer Wechselwirkung zwischen Geometrie- und Herstellungsplanung, Herstellungs- und Tragwerksplanung und Tragwerks- und Geometrieplanung kommt. Die Wechselwirkung zwischen den drei Planungsaufgaben lässt sich schematisch wie in Abbildung 48, darstellen. Dabei spielen verschiedene Parameter wie geometrische Steifigkeit des Tragwerks, Krümmungsverhalten der Kerne, Einteilung der globalen Geometrie, Anzahl der Bauteile, die gewählten Bauteile die ein zusammengesetzten Kern bilden oder auch der gewünschte Faseraufbau der jeweiligen Bauteile eine wesentliche Rolle.

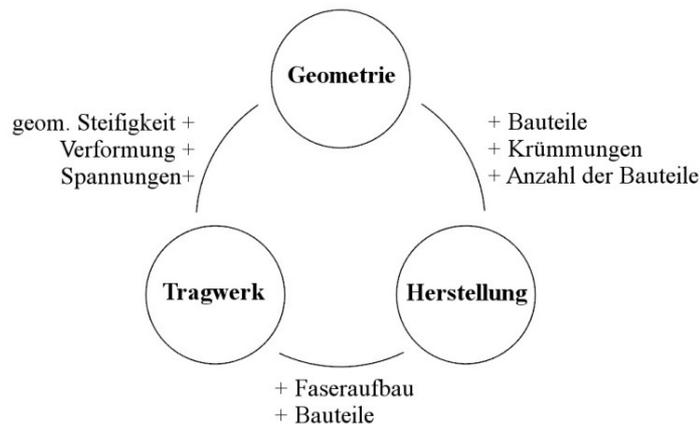


Abbildung 48: Wechselwirkungen in der Planung

Im Folgenden werden die allgemein geltenden Entwurfsprinzipien anhand der wechselwirkenden Parameter näher dargestellt.

5.2.1 Wechselwirkung zwischen Geometrie- und Herstellungsplanung

In Kapitel 3 wird bereits erkennbar, dass die globale Geometrie die Herstellungseigenschaften eines zusammengesetzten Kerns stark beeinflusst. Hervorgerufen wird dies einerseits durch die Krümmungseigenschaften der globalen Geometrie und andererseits durch den Fugenverlauf. Diese beiden geometrischen Einflüsse wirken sich maßgebend auf die kernbildenden Bauteile und somit auf die Eigenschaften des zusammengesetzten Kerns aus. Grundsätzlich lässt sich durch dieses Konzept jede freigeformte Geometrie herstellen, die Teilung der Geometrie spielt dabei eine wichtige Rolle im Hinblick auf eine wirtschaftliche Fertigung.

Einfluss der Teilung der globalen Geometrie

Die Teilung bzw. der Fugenverlauf muss gewährleisten, dass bei den einzelnen Bauteilen ein synklastisches oder antiklastisches Krümmungsverhalten überwiegt. Die freigeformte Geometrie in Abbildung 49 (a) zeigt, wie die Teilung im Hinblick auf die spätere Herstellung der Schalungselemente idealerweise aussieht. In Abbildung 49 (b) sind die Krümmungsverläufe der Fugen in Querrichtung, in (c) derer in Längsrichtung dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Fugen in Längsrichtung im Krümmungswechsel der Fugen in Querrichtung liegen. Umgekehrt gilt für die Fugen in Querrichtung, dass diese im Krümmungswechsel der Längsfugen verlaufen. Die Krümmung der Bauteile in Längsrichtung ist dabei größer als die in Querrichtung. Ein solches Krümmungsverhältnis hat den Vorteil, dass bei der späteren Herstellung größere Bauteile einen zusammengesetzten Kern bilden können. Dies liegt daran, dass maschinenbedingt die kleinere Krümmung stets in Querrichtung der Drehachse positioniert werden sollte. Die Teilung der globalen Geometrie unter Berücksichtigung des Krümmungsverlaufs bringt bei der Zusammensetzung des Kerns den Vorteil mit sich, dass im Hinblick auf die Wickelbarkeit des Kerns Bridging nahezu verhindert wird. Ob Bridging auftritt und der Roving unter Umständen keinen Kontakt zum Kern besitzt, hängt dann nur noch vom Winkel ab, mit welchem der Kern bewickelt werden soll.

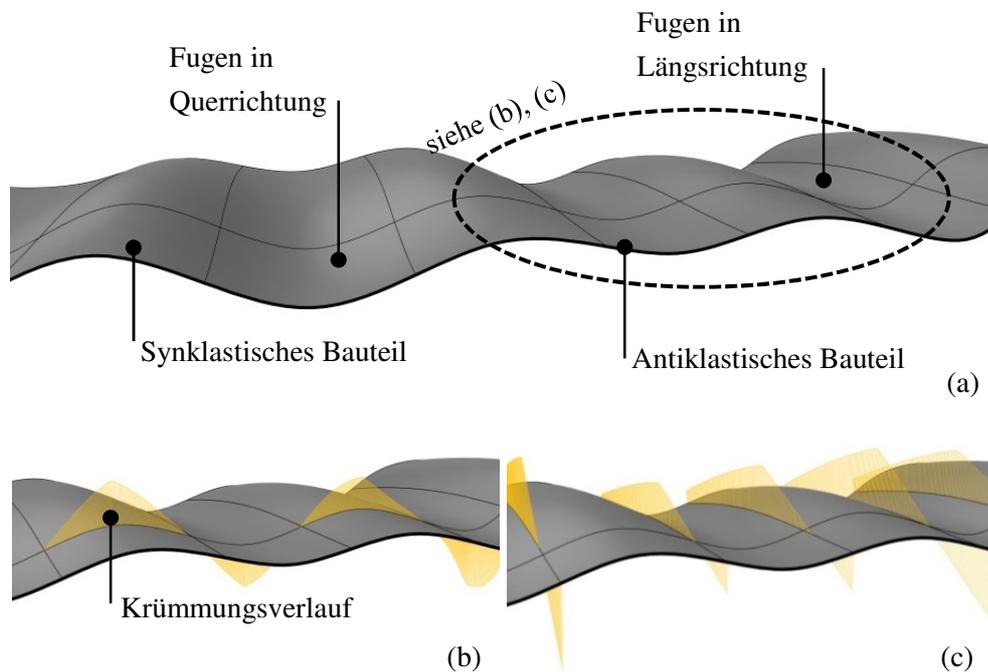


Abbildung 49: (a) Teilung einer globalen Geometrie in einzelne Bauteile nach ihren Krümmungen; (b) Krümmungsverlauf der Fuge in Querrichtung; (c) Krümmungsverlauf der Fuge in Längsrichtung

Neben dem Einfluss der Teilung auf die Eigenschaften des zusammengesetzten Kerns, spielen die einzelnen Geometrien der Bauteile eine wesentliche Rolle. Ihre Unterscheidung erfolgt dabei durch ihre Größe, Abmessung oder Krümmung. Die Kombinationsmöglichkeiten der Anordnung der Bauteile zu einem Wickelkern sind dabei ebenso entscheidend. Die Entscheidungskriterien, Bildungsmechanismen und Auswirkungen auf die Eigenschaften des zusammengesetzten Kerns sind in dem Prinzipienkatalog in Abbildung 50 und Abbildung 51 zusammengestellt. Der Prinzipienkatalog umfasst dabei vier wesentliche Punkte, die im Folgenden näher beschrieben werden.

Einfluss der Breite der Bauteile

Die Abmessungen der einzelnen kernbildenden Bauteile haben einen Einfluss auf den Flächeninhalt der Füllfläche. Sind die Breiten und die Längen der Bauteile gleich, reduziert sich der benötigte Anteil der Füllfläche (Abbildung

50 (a)). Bestehen starke Unterschiede bei den Abmessungen, sind große Füllflächen die Folge.

Einfluss der Anzahl der kernbildenden Bauteile

Für die Generierung eines Wickelkerns sind mindestens zwei Bauteile erforderlich. Wie in Abbildung 50 (b) dargestellt, lässt sich der Kern durch drei, vier oder mehr Bauteile zusammensetzen. Der Durchmesser des Kerns wird dabei entsprechend groß und die maschinenbedingten Restriktionen lassen eine Herstellung unter Umständen nicht zu.

Einfluss der Krümmung der kernbildenden Bauteile

Einen wichtigen Einfluss auf den Herstellungsprozess haben die Bauteilkrümmungen. Es wird an dieser Stelle zwischen einfach und doppelt gekrümmten Bauteilen unterschieden, da sich für beide Kategorien die Krümmungen unterschiedlich auswirken.

Kernbildende Bauteile mit nur einer Krümmung, bei der die Krümmung quer zur Wickelachse verläuft, können in der Regel bündig angeordnet werden (Abbildung 50 (c)). Bei sehr großen Krümmungsradien ist es unter Umständen sinnvoll, einen Versatz zwischen den Bauteilen zu generieren und diesen mit einer Füllfläche zu schließen. So kann ein fließender Krümmungswechsel und der Kontakt des Rovings zum Kern gewährleistet werden. Bei einfachgekrümmten Bauteilen, bei denen die Krümmung in Längsrichtung angeordnet ist, ist die Erzeugung einer Füllfläche notwendig.

Für kernbildende Bauteile mit einer doppelten Krümmung wird in synklastische und antiklastische Bauteile unterschieden. Im Allgemeinen gilt dabei, dass für jedes Bauteil ein Krümmungsverhalten „überwiegen“ sollte, da sonst die Wickelbarkeit des Kerns nur bedingt gewährleistet ist. Damit ist gemeint, dass Bauteile mit einer synklastischen Krümmung auch Anteile mit einer leichten antiklastischen oder einfachen Krümmung aufweisen können.

Für einen zusammengesetzten Kern bestehend aus synklastischen Bauteilen, entsteht in Kernmitte der größte Abstand (Abbildung 50 (c)). Durch die Generierung der Füllfläche (orange) kann an dieser Stelle eine kontinuierliche Faserablage garantiert werden. Beeinflusst wird die Füllfläche durch den Krümmungsradius in Längsrichtung und in Querrichtung. Ein kleiner Krüm-

mungsradius in Längsrichtung führt zu einer Zunahme der Füllfläche und ein großer Krümmungsradius in Querrichtung zu einer Abnahme der Füllfläche.

Bei einem zusammengesetzten Kern, bestehend aus antiklastischen Bauteilen, müssen die negativen Krümmungsanteile senkrecht zur Kerndrehachse verlaufen. Andernfalls ist eine Herstellbarkeit nicht gewährleistet. Im Gegensatz zu den synklastischen Bauteilen, befindet sich der minimale Abstand der benachbarten Bauteile in Bauteilmitte.

Einen weiteren Einfluss auf die Eigenschaften der Füllfläche hat ein wechselndes Krümmungsmaß, was in der Regel für alle freigeformten Flächen gilt, die nicht durch eine Translationsfläche beschrieben werden können. Variiert beispielsweise das Krümmungsmaß des Bauteils in Querrichtung, führt dies zu einer größeren oder einer kleineren Füllfläche. Außerdem lässt sich dadurch die Füllfläche schwieriger beschreiben (Abbildung 50 (d)). Allgemein gilt für alle Kerntypen, dass ein großer Krümmungsradius in Längsrichtung von Vorteil ist, da ein kleiner Radius die Füllfläche vergrößert und bei antiklastischen Bauteilen nur große Wickelwinkel zulässt. Die kleinere Krümmung eines Bauteils sollte daher in Querrichtung positioniert werden.

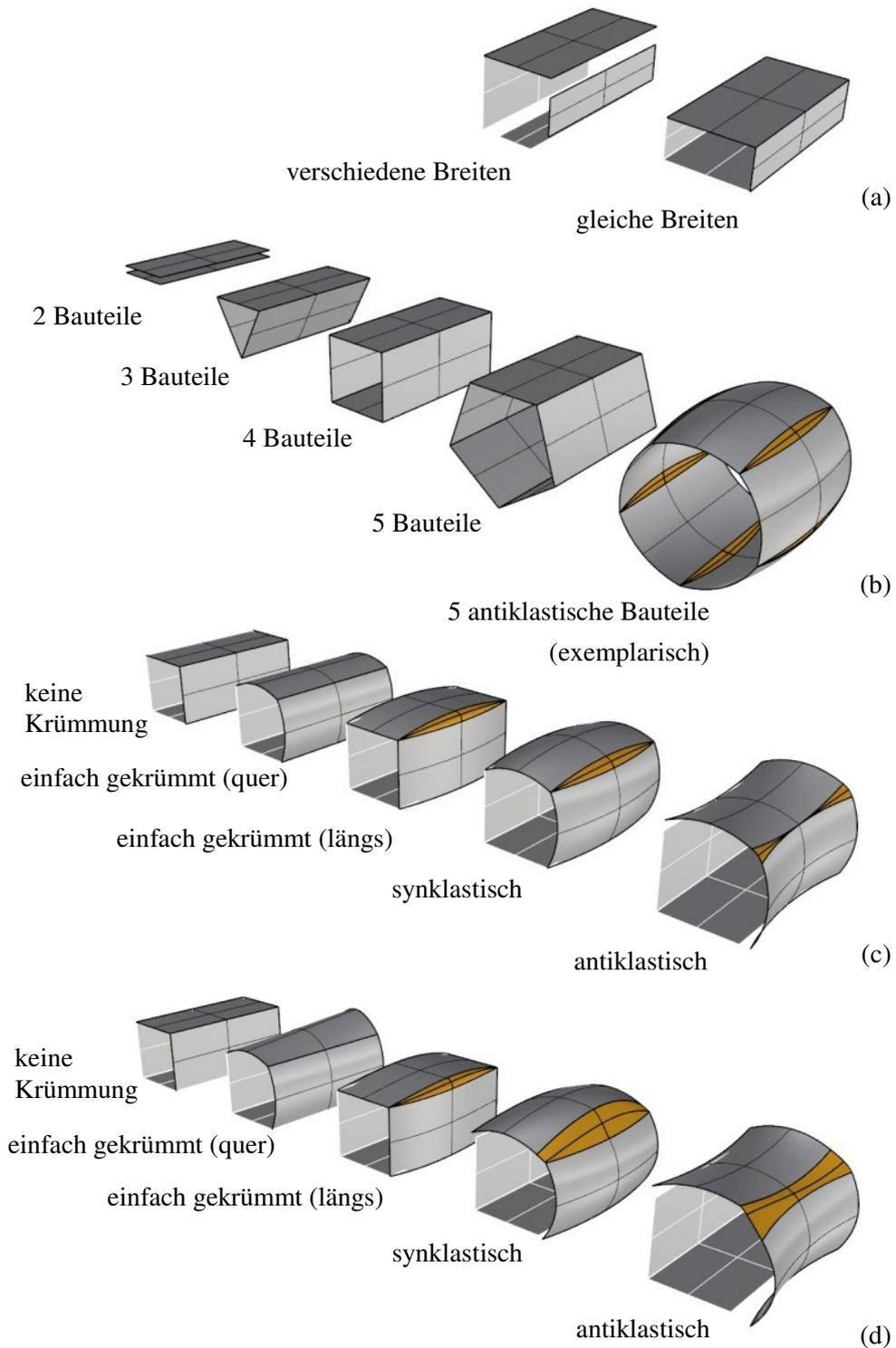


Abbildung 50: Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und der Verschnittfläche: Füllfläche gelb; herzustellenden Bauteile grau. (a) Breite der Bauteile; (b) Anzahl der kernbildenden Bauteile; (c) und (d) Krümmungen der kernbildenden Bauteile

Ränder und Bauteillänge der kernbildenden Bauteile

Für die Größe der Füllfläche sind ebenfalls die Ränder der kernbildenden Bauteile relevant. Da die Fugen der globalen Geometrie gekrümmt verlaufen können, weisen die Bauteilkanten folglich einen gekrümmten Randabschluss auf. In Abbildung 51 (a) ist der Einfluss der Bauteilränder auf die Füllfläche dargestellt. Es zeigt sich, dass stark gekrümmte Bauteilränder zu größeren Füllflächen führen. Eine lineare Scheibenteilung der globalen Geometrie ist daher vorteilhafter. Neben der Bauteilbreite übt die Bauteillänge einen Einfluss auf die benötigte Füllfläche aus, da durch die Bauteillänge sich die Füllfläche in Längsrichtung vergrößert (Abbildung 51 (b)).

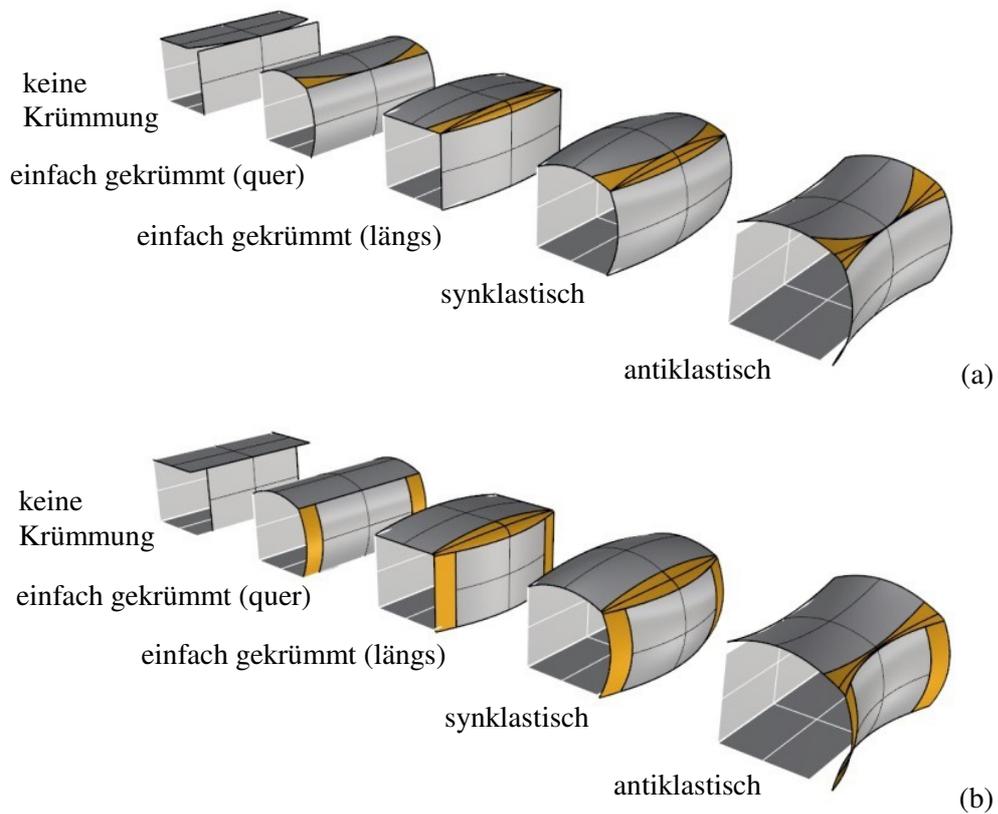


Abbildung 51: Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und der Verschnittfläche: Füllfläche (orange); (a) Einfluss der Bauteilränder der kernbildenden Bauteile; (b) Einfluss der Bauteillänge der kernbildenden Bauteile

5.2.2 Wechselwirkung zwischen Herstellungs- und Tragwerksplanung

Eine wichtige planerische Wechselwirkung, die es zwischen der Herstellung und dem Tragverhalten zu berücksichtigen gilt, liegt im Laminataufbau der einzelnen Bauteile, denn ein zusammengesetzter Kern lässt sich unter Umständen nicht mit dem aus statischer Sicht optimalen Faseraufbau bewickeln. Diese Schwierigkeit tritt häufig bei antiklastischen Kernen auf, da sie in der Regel mit einem kleinen Wickelwinkel schwierig zu bewickeln sind. Des Weiteren muss bei der Planung berücksichtigt werden, dass die Bauteile die gemeinsam einen zusammengesetzten Kern bilden, den gleichen Laminataufbau besitzen müssen. Daher ist es bei der Herstellungsplanung wichtig, die Randbedingungen der Tragwerksplanung zu berücksichtigen.

5.2.3 Wechselwirkung zwischen Tragwerks- und Geometrieplanung

Die wesentliche Wechselwirkung zwischen der Tragwerks- und Geometrieplanung liegt beim Einfluss der Geometrie auf das Tragverhalten. Durch die richtige Gestaltung der Krümmungen kann auf das Strukturverhalten Einfluss genommen werden. Die Krümmungen müssen dabei so definiert werden, dass sich eine Schalen- bzw. Bogentragwirkung oder eine Faltragwirkung einstellt.

6 Multidisziplinäre Optimierungsstrategie

In Kapitel 5 wurden die wichtigsten Parameter für eine integrative Planung der Sandwichverbundbauweise identifiziert. Um bei der Planung die bestmögliche Lösung zu definieren, wird in diesem Kapitel eine multidisziplinäre Optimierungsstrategie vorgestellt. Diese hat zum Ziel, die Tragfähigkeit und die Herstellung der vorgestellten Flächenverbundbauweise für einen konkreten Anwendungsfall zu optimieren. Daher wird im Folgenden auf die Optimierungsaufgabe und das entwickelte Optimierungsverfahren näher eingegangen. Neben der Vorstellung des Optimierungsalgorithmus (OA), werden die notwendigen Simulationsmodelle erläutert. Abschließend werden die Zielfunktion und die Optimierungsvariablen des Optimierungsmodells vorgestellt.

6.1 Verfolgte Optimierungsstrategie

Im Bauwesen werden Optimierungsalgorithmen für Problemstellungen einzelner Planungsaufgaben verwendet. Bei der Optimierung des Tragwerks wird dabei grundsätzlich zwischen der Formoptimierung, Topologieoptimierung und Querschnittsoptimierung unterschieden [30]. Bei der **Formoptimierung** werden die geometrischen Parameter eines Stab- oder Flächentragwerks dahingehend variiert, dass sich die strukturellen Eigenschaften des Systems verbessern. Die Parametrisierung des Geometriemodells erfolgt dabei zum Beispiel durch die Krümmungsradien oder durch die Koordinaten einzelner Punkte.

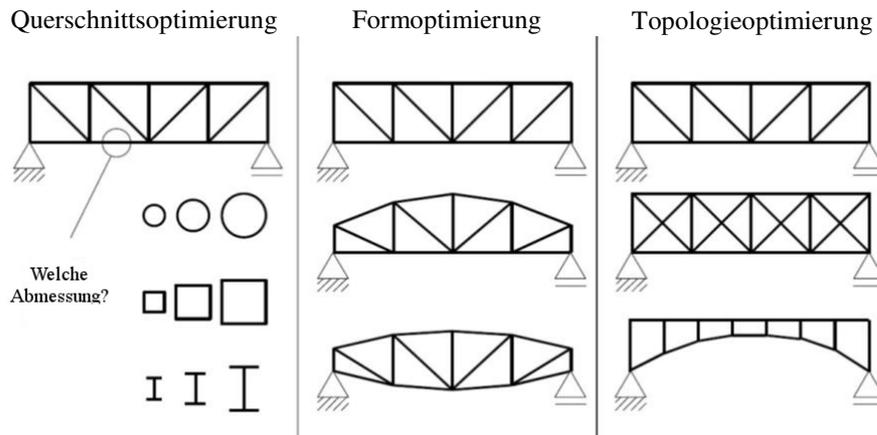


Abbildung 52: Kategorisierung bei der Strukturoptimierung [30]

Bei der **Topologieoptimierung** ist der optimale Materialverbrauch bei einem vorgegebenen Entwurfsraum gesucht. Dabei werden nicht benötigte Materialbereiche, meist finite Elemente, mit einer sehr kleinen Materialdichte versehen und graphisch ausgeblendet. Bei der **Querschnittsoptimierung** werden ausschließlich Querschnittswerte wie Bauteildicke, Querschnittsfläche oder Steifigkeit als Optimierungsvariablen verwendet um die Tragfähigkeit zu verbessern oder den Materialverbrauch zu reduzieren. Bei einem Fachwerksystem stellt dies beispielsweise die optimale Querschnittsfläche der einzelnen Stäbe dar, bei einem Schalentragwerk die Bauteildicke.

Die Verwendung einer solchen Optimierungsstrategie ist für die vorliegende Bauweise aufgrund der komplexen Wechselwirkungen zwischen Geometrie, Fertigung und Tragwerkverhalten, nicht sinnvoll. Wie bereits in Kapitel 5 dargestellt, beeinflussen geometrische Parameter die Herstellung der Bauteile anders als die Tragfähigkeit der Struktur. Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Strategie verfolgt den Ansatz der **multidisziplinären Design Optimierung** (MDO). Der Grundgedanke liegt darin, mehrere Aufgaben in einem Optimierungsprozess zu berücksichtigen um damit eine einseitige Betrachtung der zu lösenden Planungsaufgabe zu verhindern. In der Luft- und Raumfahrt [31] oder in der Automobilindustrie [32] wird diese Art der Optimierung vereinzelt angewendet.

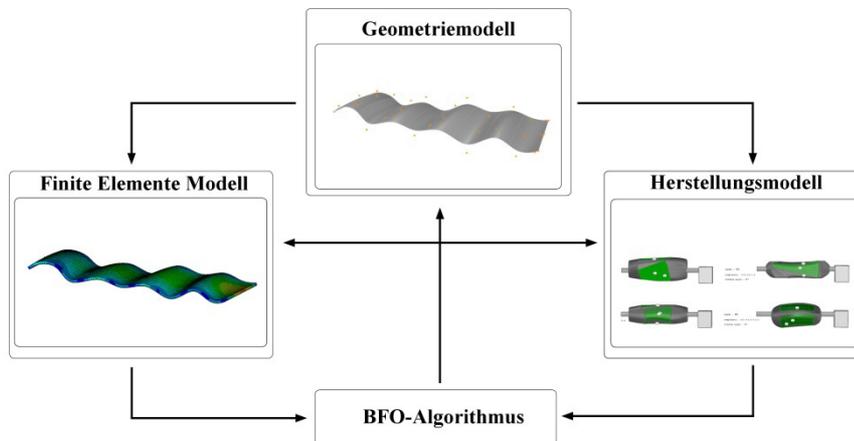


Abbildung 53: Multidisziplinärer Optimierungsprozess: simultane FE- und Herstellungssimulation

In Abbildung 53 ist der allgemeine Aufbau der MDO dargestellt. Eine wichtige Rolle spielt dabei das geometrische Modell, da auf diesem aufbauend das FE- und Herstellungsmodell generiert werden. Die Variablen der drei Modelle werden dabei durch den Optimierungsalgorithmus gesteuert und die Modelle von Geometrie, Struktur und Herstellung müssen parametrisch aufgebaut sein. Die Analyseergebnisse des FE- und Herstellungsmodells werden durch den Optimierungsalgorithmus ausgewertet. Im Anschluss daran, werden auf dieser Grundlage die Variablen durch den Algorithmus neu definiert. Der größte Aufwand bei dieser Optimierungsstrategie besteht darin, die Modelle robust zu programmieren und die einzelnen Modelle zu koordinieren.

Da eine große Anzahl an Parametern vorhanden und eine eindeutige mathematische Formulierung des Problems nicht definierbar ist, wird ein metaheuristisches und bio-inspiriertes Optimierungsverfahren als am geeignetsten erachtet. Zur Lösung des vorliegenden Optimierungsproblems wird ein Algorithmus vorgestellt, der auf der Nahrungssuche von Bakterien beruht, dem *Bacterial Foraging Optimisation Algorithm* (BFO). Bevor auf diesen näher eingegangen wird, werden die Grundlagen einer Optimierung erläutert.

6.1.1 Grundlagen der Optimierung

In der allgemeinen mathematischen Darstellung eines Optimierungsproblems

$$\min_x f(x)$$

mit

$$x \in \mathbb{R}^n,$$

$$g(x) \leq 0,$$

$$h(x) = 0,$$

$$x^u \leq x \leq x^o$$

wird die Zielfunktion minimiert. Der Vektor x stellt dabei die Optimierungsvariablen dar. Je nach Optimierungsaufgabe beschreiben die Variablen mechanische oder geometrische Größen des Optimierungsmodells. Für den Vektor x wird eine untere Grenze x^u und eine Obere x^o für die Variablen festgelegt. Dabei wird durch die Funktion $g(x)$ die Ungleichheitsnebenbedingung und durch $h(x)$ die Gleichheitsnebenbedingung definiert. Diese Nebenbedingungen, auch Restriktionen genannt, können beliebige, nichtlineare Funktionen der Entwurfsvariablen und der Zustandsvariablen sein. Die in dieser Arbeit involvierten Funktionen der Entwurfsvariablen sind hochgradig implizite Funktionen. Gemeint ist damit, dass die Funktionsverläufe nicht bekannt sind und dass für jede Auswertung eine Systemanalyse erforderlich ist, was zeit- und ressourcenintensiv sein kann.

Kompakt lässt sich die allgemeine Formulierung folgendermaßen beschreiben:

$$\min_{x \in X} f(x) \text{ mit } X = \{x^u \leq x \leq x^o \wedge g(x) \leq 0; h(x) = 0\}.$$

X aus der Teilmenge \mathbb{R}^n stellt den zulässigen Bereich aller Werte für x dar. Die Funktion $f(x)$ wird auch als Zielfunktion bezeichnet. Bei jeder Optimierungsaufgabe geht es dabei um die Minimierung oder Maximierung von $f(x)$. In dieser Arbeit wird immer von einer Minimierung ausgegangen, was keine Einschränkung der Allgemeingültigkeit darstellt, denn jede Minimierungsaufgabe kann durch einen Vorzeichenwechsel in eine Maximierung umgewandelt werden.

6.1.2 Soziale und intelligente Strategien bei der Nahrungssuche

Die Effektivität der Nahrungssuche von Lebewesen spielt bei der evolutionären Selektion eine wichtige Rolle. Lebewesen mit einer schlechten Nahrungsausbeute haben eine geringe Überlebenschance, die von Lebewesen mit einer effektiven Strategie hingegen ist deutlich höher. Organismen haben für eine effektive Ausbeute unterschiedliche Nahrungssuchstrategien entwickelt, die an ihre Umgebung angepasst sind. Dabei wird hauptsächlich in die aktive und passive Strategie unterschieden. Die aktiven Jäger, wie zum Beispiel der Hai, sind stets in Bewegung und auf der Suche nach Nahrung. Der passive Jäger, wie etwa die Klapperschlange, lauert und wartet auf seine Beute. Die Strategie der meisten Lebewesen jedoch wechselt zwischen aktiver und passiver Suche. Aus diesem Grund wird diese als sprunghafte Nahrungssuche bezeichnet [33].



Abbildung 54: Strategien zur Nahrungssuche von Lebewesen: a) Löwin [www.kruger-2-kalahari.com]; b) Ameisenkolonie [www.brunalab.org]

Die Strategien bei der Nahrungssuche unterscheiden sich zusätzlich darin, ob die Suche alleine oder in einer Gruppe stattfindet. Eine soziale Strategie stellt in der Regel einen Vorteil dar. Organismen die in einem Kollektiv nach Nahrung suchen, haben hierzu Kommunikationsmechanismen entwickelt, die es ihnen ermöglicht Informationen untereinander auszutauschen. Somit können sie ihre Effizienz bei der Suche steigern und in kürzerer Zeit eine größere Menge an Nahrung sammeln. Die bekanntesten Lebensformen hierfür sind

Bienen, Ameisen oder Termiten, die durch Ausschüttung von Pheromonen miteinander kommunizieren (Abbildung 54). Die Vorteile welche aus einer sozialen Strategie hervorgehen, sind folgende:

- Umso mehr Tiere suchen, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit Nahrung zu finden
- Findet ein Tier Nahrung, kann es andere darüber informieren
- Es können weitere Futterorte schneller gefunden werden
- Es kann mehr Nahrung in kürzerer Zeit gesammelt werden
- Kleinere Lebewesen können auch größere Beute erlegen

Die Abstraktion sozialer Suchstrategien und dessen Transfer in mathematische Optimierungsmodelle haben ihre Anfänge in den 90iger Jahren. Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Ameisenalgorithmus, der in verschiedenen technischen Bereichen Verwendung findet [34].

6.1.3 Beschreibung der Nahrungssuche von E. coli Bakterien

Die Art der Nahrungsaufnahme und die richtige Verwertung sind für das Überleben eines Individuums von entscheidender Bedeutung. Die Escheria coli (E. coli) Bakterie gehört zu einer der ältesten Lebewesen auf der Erde und hat im Laufe der Jahrtausende ihre Nahrungssuche stetig verfeinern können. Die Bakterie besteht aus einer Plasmamembran, einer Zellwand und einer Kapsel, die aus Zytoplasma und Nuklide aufgebaut ist. Der Pilus wird als Gentransfer und die Flagella zur Fortbewegung genutzt.

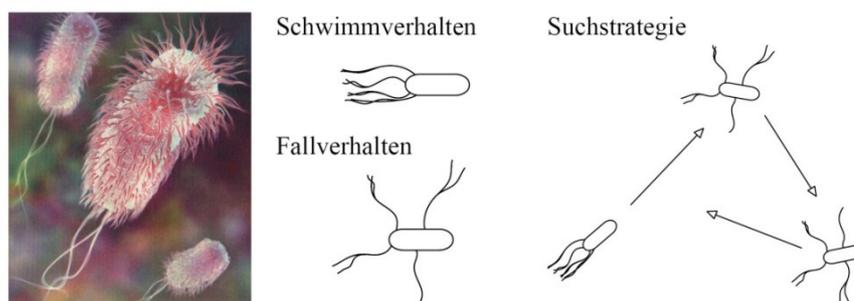


Abbildung 55: Verhalten der E-Coli Bakterie bei der Nahrungssuche [35]

Die Nahrungssuche der Bakterie erfolgt in einem Kollektiv, deren einzelnes Verhalten in Abbildung 55 (b) dargestellt ist. Jede Bakterie hat die Möglich-

keit sich zu bewegen oder zu fallen. Die gerade Bewegung erlaubt der Bakterie einem Pfad mit mehr Nahrung zu folgen. Befindet sich die Bakterie hingegen in einer Umgebung mit einer geringen Nahrungskonzentration oder ist diese aufgebraucht, lässt sie sich fallen. Dabei rotiert sie um die eigene Achse, um anschließend wieder durch eine Vorwärtsschwimmbewegung in einer neuen Richtung und Umgebung nach Nahrung zu suchen. Befindet sich eine Bakterie für einen längeren Zeitraum in einer Umgebung mit wenig Nahrung, so stirbt sie. Ist sie hingegen in einer Umgebung mit viel Nahrung, vermehrt sie sich. Außerdem besitzt die Bakterie die Möglichkeit, durch Ausschüttung eines Lockstoffs, andere Bakterien darüber zu informieren, dass sie sich in einem Bereich mit einer hohen Nahrungskonzentration befindet. Eine solche Form der Zusammenarbeit kann als Schwarmintelligenz bezeichnet werden, da die Leistungsfähigkeit der gesamten Kolonie dadurch gesteigert wird. Eine ausführliche Beschreibung des biologischen Aufbaus der Bakterie und dessen Suchverhalten ist in [36] dargestellt.

6.1.4 Entwickelter Optimierungsalgorithmus

Die numerische Implementierung des bakteriellen Suchverhaltens wird im Folgenden anhand eines dreidimensionalen Lösungsraums mit einem globalen Minimum erläutert (Abbildung 56).

Der Lösungsraum ist durch die Funktion

$$J(\theta), \theta \in \mathbb{R}^p,$$

gegeben. θ stellt dabei die Position der Bakterie dar, somit ergibt sich für

$J(\theta) < 0$ eine Steigerung,

$J(\theta) = 0$ ein Gleichbleiben und

$J(\theta) > 0$ eine Abnahme der Konzentration.

Im vorliegenden vereinfachten Fall besteht die Kolonie S zur Lösung dieses Problems aus vier Bakterien. Die Kolonie ist dabei in zwei Gruppen von Bakterien N_g unterteilt. Die Schrittweite N_w jeder Bakterie erfolgt in Abhängigkeit der Konzentration adaptiv. Je höher die Nahrungskonzentration, bzw. je besser das Ergebnis, umso kleiner stellt sich die Schrittweite ein. Ist die Konzentration hingegen schwach ausgeprägt, ist die Schrittweite der Bakterie

entsprechend groß. Der chemotaktische Schritt N_C , der in diesem Beispiel mit 2 festgelegt ist, beschreibt die Lebensdauer einer Bakterie. Wie oft und wie viele Schritte innerhalb der Chemotaxis auftreten, wird durch die Anzahl der Schwimmschritte N_S definiert. Die Reproduktion N_{re} repräsentiert die äußerste Schleife und findet hier einmal statt. Die Reproduktion definiert, wie oft das Absterben von schlechten Bakterien, bzw. die Zellteilung von besseren Bakterien stattfindet. Das Verhalten des Algorithmus lässt sich bei Bakterie 3 (b_3) am deutlichsten erkennen. Nachdem b_3 zwei Schwimmschritte durchlaufen hat, springt sie zurück zur Position mit dem besten Ergebnis. Nach der darauffolgenden Chemotaxis findet die Reproduktion der Bakterie statt. Die Bakterie 3 befindet sich im Vergleich zur Bakterie 2 (b_2) in einer Umgebung mit einer geringeren Konzentration, sodass diese abstirbt. Bei b_2 hingegen findet eine Zellteilung statt. Im Anschluss durchlaufen die Bakterie 2 und die neue Bakterie (wieder als b_3 bezeichnet) die typische Fall- und Schwimmbewegung.

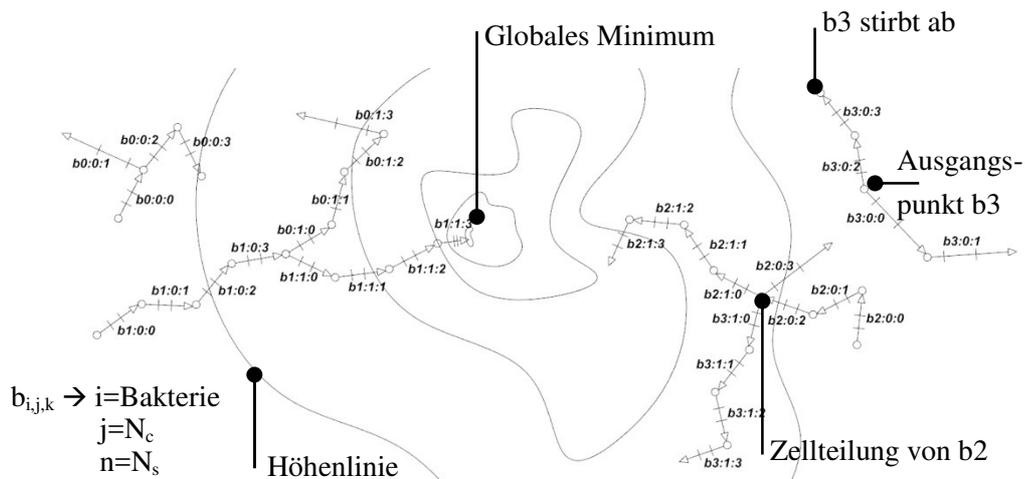


Abbildung 56 : Darstellung des Optimierungsalgorithmus auf das zu lösende Problem (mit $N_g=2$ $N_c=2$; $N_s=4$; $N_{re}=1$)

Die in dieser Arbeit implementierte bakterielle Suchstrategie unterscheidet sich zu der in [36] in mehreren Punkten. Zum einen wird bei dem oben vorgestellten Ansatz auf die Verwendung einer zufälligen Verteilung von Bakterien verzichtet, zum anderen erfolgt die Messung der Konzentration nicht über die gesamte Lebenszeit einer Bakterie. Zudem verfügt die Bakterie über die Möglichkeit, sich den Ort mit der höchsten Konzentration zu merken und

auf diesen zurückzuspringen. Die Schrittweite bei der Schwimmbewegung ist nicht konstant, sondern wie zuvor erwähnt adaptiv. Die Vektoränderung passt sich an die Höhe der Konzentration an und wird durch das jeweilige vorherige Ergebnis bestimmt. Je kleiner dabei der Zielwert wird, umso kleiner wird die Schrittweite. Ebenso liegt ein entscheidender Unterschied durch die Einführung von Gruppen innerhalb der Kolonien vor. Die Gruppierung hat den Vorteil, die Berechnungen der Gruppen durch *Parallel Programming* [37] auf getrennte CPU-Kerne laufen zu lassen. Die benötigte Rechenzeit des Algorithmus kann dadurch deutlich reduziert werden. Der Aufbau und Ablauf des Algorithmus lässt sich durch den folgenden Pseudo-Code beschreiben:

Größe der Kolonie S : Anzahl der Bakterien

Gruppen von Bakterien N_g : Anzahl von Gruppen innerhalb der Kolonie

Chemotaktische Schritte N_c : Anzahl der Schritte einer Bakterie pro Lebensdauer

Schwimmschritte N_s : Maximale Anzahl der Schritte innerhalb eines N_c

Schrittweiten N_w : Adaptive Schrittweite je nach Größe von $J(\theta)$

Reproduktionsschritte N_{re} : Anzahl der Eliminierung und Zellteilung

- 1) Reproduktionsschleife: $k = k + 1$
- 2) Parallelisierung der Gruppen, für die gilt:
 - a. Chemotaxis Schleife: $j = j + 1$
 - b. Nehme für alle $i = 1, 2, \dots, \frac{S}{N_g}$ einen chemotaktischen Schritt vor.
 - c. Berechne $J(i, j, k)$
 - d. $J_{last} = J(i, j, k)$ stellt dabei die beste Lösung in einem Durchlauf dar.
 - e. Fallen: Generiere einen beliebigen Vektor $\Delta(i) \in \mathbb{R}^\rho$ für jedes Element mit $\Delta_m(i), m = 1, 2, \dots, \rho \in \mathbb{R}^\rho$ mit einer zufälligen Zahl von $[-1, +1]$.
 - f. Bewegung: Die Bakterie bewegt sich mit der Schrittweite C_i . Für die Position der Bakterie folgt: $\theta^i(j + 1, k) = \theta^i(j, k) + C(i) \cdot N_w$
 - g. Berechne $J(i, j + 1, k)$

- h. Schwimmen: Berechne für die Bakterie solange $J(i, j + 1, k)$ mit einer weiteren Schrittweite C_i für $\theta^i(j + 1, k) = \theta^i(j + 1, k) + C(i) \cdot N_w$
 - i. Gehe zur nächsten Bakterie
- 3) Wiederhole den Vorgang 2) so lange, bis die chemotaktische Schrittweite erreicht ist.
 - 4) Reproduktion: Für k und alle $i = 1, 2, \dots, S$ sei J_{health}^i die beste Position der Bakterie i . Diese werden ihrem Ergebnis nach sortiert. Die Schlechtesten sterben ab und die Positionen der Besten werden dupliziert.
- Vorgang 1) wird wiederholt bis N_{re} erreicht ist.

6.1.5 Validierung des OA anhand der Rastrigin-Funktion

Anhand der Rastrigin-Testfunktion mit einem Lösungsraum von $R=4$ und einer Vielzahl von lokalen Minima, wird die Effizienz des entwickelten Optimierungsalgorithmus validiert. Diese nicht-konvexe Testfunktion wird üblicherweise zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von mathematischen Optimierungsalgorithmen herangezogen. Sie wird durch folgenden allgemeinen Zusammenhang definiert:

$$f(X) = An + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - A \cos(2\pi x_i)]$$

Der Optimierungsalgorithmus soll mit einer Rastrigin-Funktion von $n=3$ Freiheitsgraden untersucht werden. Für die Testfunktion folgt somit:

$$f(w, x, y) = 30 + (w^2 - 10 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot w)) + (x^2 - 10 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot x)) + (y^2 - 10 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot y))$$

Das globale Minimum liegt bei $X(0,0,0)$.

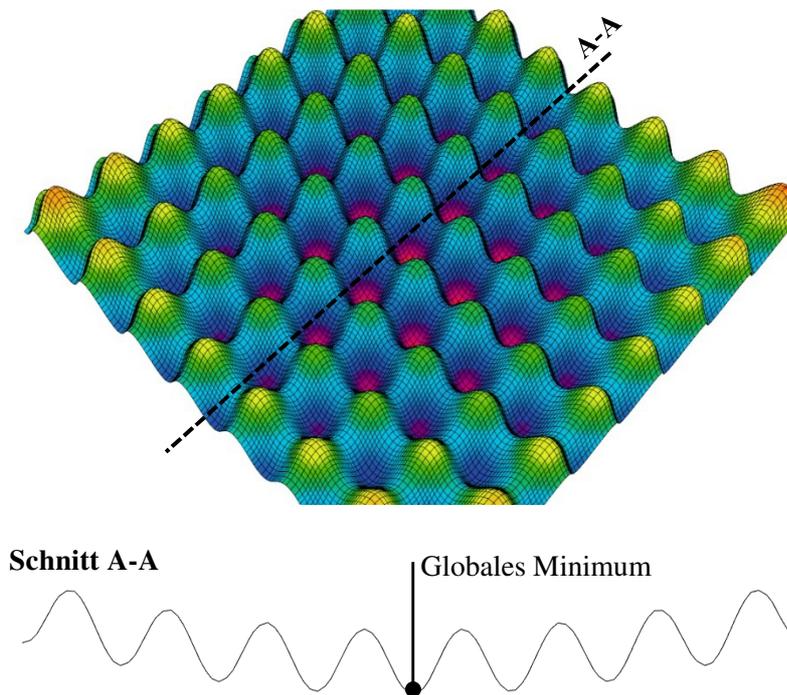


Abbildung 57: Rastrigin-Funktion mit drei Freiheitsgraden und mit $y=0$

Eine entscheidende Verbesserung bei der Konvergenzgeschwindigkeit konnte durch die Gruppierung der Bakterien und durch die Parallelisierung der Berechnungen erreicht werden. Diese und die zuvor erwähnten Änderungen führten zu einer Steigerung der Konvergenzgeschwindigkeit um bis zu 75 %. Anhand der Testfunktionen wurden ebenso Vergleichsuntersuchungen mit einem *evolutionären Optimierungsalgorithmus* (EA) durchgeführt. Die Geschwindigkeit des eigenen Algorithmus war dabei 11-mal schneller. Andere Untersuchungen zeigen, dass bereits der klassische BFOA im Vergleich zu evolutionären Algorithmen und *Particle Swarm Algorithmen* weniger Rechenzeit benötigt, um die gleiche Lösung zu ermitteln [38]. Die Vielzahl an Bakterien und die Möglichkeit große Schwimmschritte auszuführen, erlaubt dem Algorithmus nicht in einem lokalen Minimum festzustecken, bzw. aus diesem herauszukommen. Die bessere Konvergenzeigenschaft des BFO-Algorithmus ist dabei auf die Bakterien (Suchoperatoren) zurückzuführen, die durch ihr Schwimmverhalten die Richtung zum Minimum erkennen. Das Vorgehen ähnelt dabei den Gradientenverfahren [39]. Der Suchoperator des

EA agiert hingegen schwerfälliger, da die Mutation und die Rekombination nicht von der aktuell ermittelten Lösung abhängen [40].

6.2 Digitaler Framework

Der entwickelte Framework für die multidisziplinäre Optimierung ist in der Programmiersprache C# geschrieben. *Rhino3d* bietet eine Open Source Plattform für C# Entwickler. Sowohl der Optimierungsalgorithmus, als auch die Simulation des Fertigungsverfahrens, sind dort als C#-Klassen definiert. Zur Berechnung des Strukturverhaltens wird das FE-Programm *Ansys* als Batch-Solver verwendet. Die Ansteuerung und Koordination der Simulationsprozesse, sowie die Verwaltung der Modellparameter, erfolgt ebenfalls in C#.

6.3 Modell der Herstellungssimulation

Die Beschreibung der notwendigen Schritte zur Modellerstellung und die der entwickelten Analysewerkzeuge, erfolgte bereits in Kapitel 3 und 5. Im Folgenden wird nun dargestellt, wie der Simulationsprozess und die einzelnen Schritte ineinander greifen. Die Implementierung der Herstellungssimulation erfolgt objektorientiert in Form von Klassen. Dies ermöglicht es, den Ablauf auf beliebig viele Kerne anzuwenden, ohne damit einen zusätzlichen Programmieraufwand zu erzeugen.

6.3.1 Implementierung

Der Ablauf der Kerngenerierung und der Wickelanalyse ist exemplarisch für zwei Kerne in Abbildung 58 dargestellt. In einem ersten Schritt wird die globale Geometrie in einzelne Bauteile unterteilt. Bauteile mit ähnlichen geometrischen Eigenschaften, bilden im Anschluss daran einen zusammengesetzten Kern. Durch die Permutation wird festgelegt, an welcher Position des Kerns das jeweilige Bauteil anzuordnen ist.

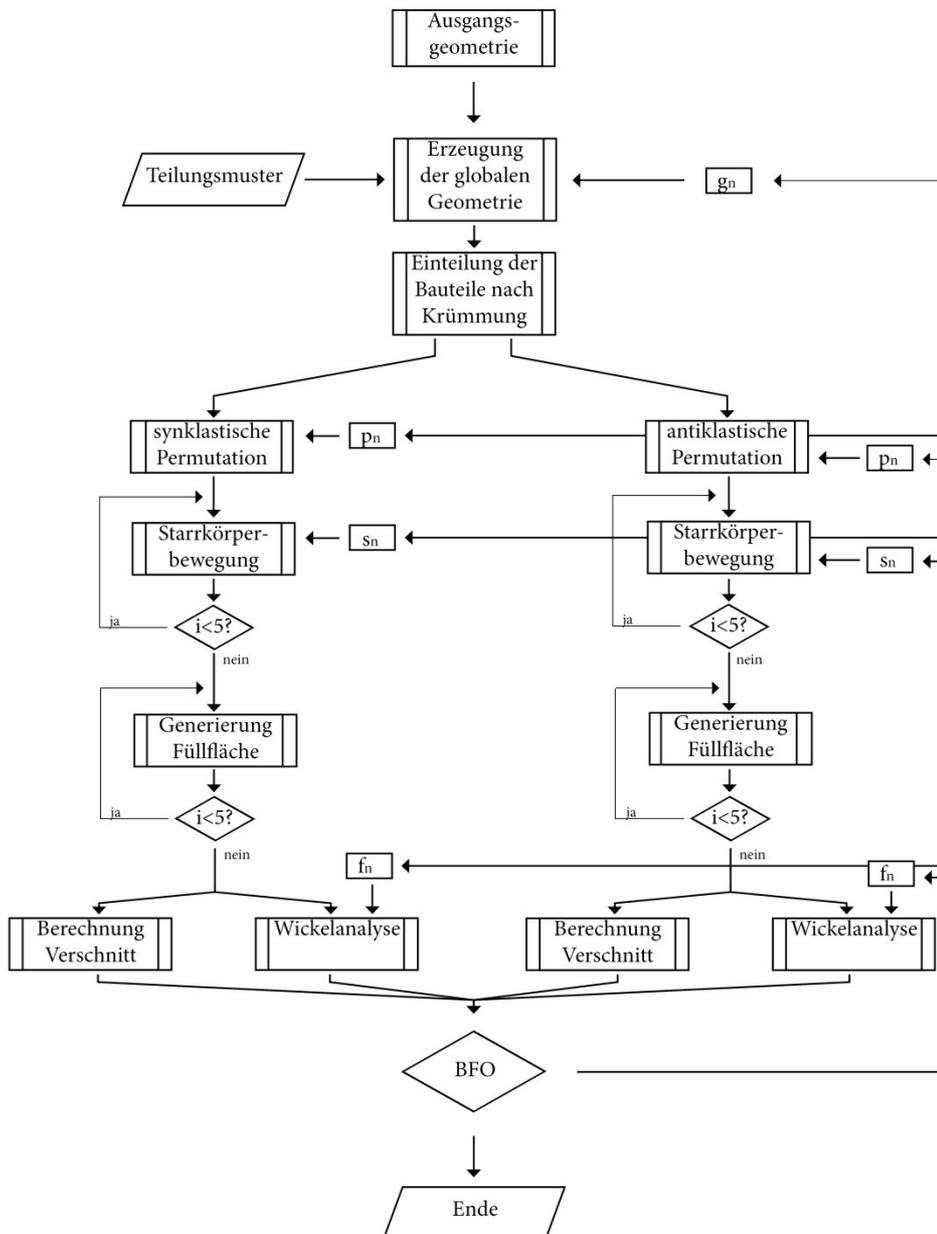


Abbildung 58: Exemplarischer Programmablaufplan für einen synklastischen und einen antiklastischen Wickelkerne

Nachdem jedes Bauteil durch eine Starrkörperbewegung aus der globalen Position in die lokale Position des Kerns bewegt wurde, werden die Füllflächen zwischen den Bauteilen generiert. Erst auf Basis des Volumenmodells können die Eigenschaften des Kerns bestimmt werden. Der entstehende Ver-

schnitt berechnet sich aus der Addition der Flächeninhalte der Füllflächen. Wird bei der Kerngenerierung keine bewickelbare Füllfläche erzeugt, wird dies durch eine *Penalty-Funktion* abgefangen. Nach der Bestimmung des prozentualen Anteils der Verschnittfläche zur herzustellenden Bauteilfläche, erfolgt die Wickelanalyse. Dabei wird die Bewicklung des Kerns unter einem definierten Wickelwinkel auf Bridging untersucht.

6.3.2 Optimierungsvariablen

Die Herstellung wird durch eine Reihe von Variablen beeinflusst. Anhand der Abbildung 58 folgen diese zu:

Parameter g der globalen Geometrie

Die globale Geometrie wird durch die Parameter g_1 bis g_n beschrieben. Diese beeinflussen in erster Linie die Krümmungsradien der einzelnen Bauteile. Die globalen Geometrieparameter G beeinflussen ebenso das Tragverhalten und stehen in einer starken Wechselwirkung zur Fabrikation.

Parameter p der Permutation

Der Parameter der Permutation p bestimmt für jeden Kern die Anordnung der Bauteile. In Abbildung 59 sind exemplarisch die vier Kombinationsmöglichkeiten (Permutationen) die für einen zusammengesetzten Kern mit vier Bauteilen möglich sind, dargestellt. Theoretisch sind mehr Kombinationsmöglichkeiten vorhanden, diese vier decken aber alle weiteren Kombinationen ab. Bei der späteren Optimierungsaufgabe kann die Permutation durch einen einzelnen Parameter abgebildet werden.

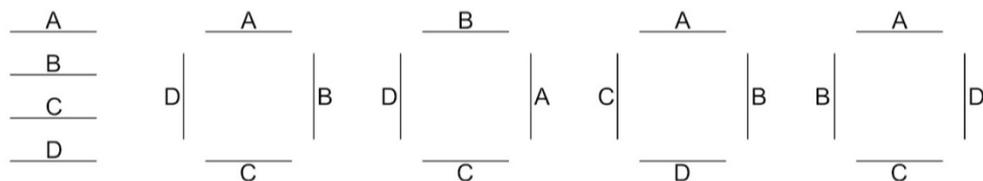


Abbildung 59: Permutationsmöglichkeiten von vier Bauteilen

Parameter s der Starrkörperbewegung

Die Parameter der Starrkörperbewegung s bestimmen die Position jedes einzelnen Bauteils im Kern. Für jedes Bauteil eines Kerns gibt es jeweils 6 Parameter, 3 Rotationen und 3 Translationen. Dies bedeutet also, dass für jeden Kern maximal 24 Freiheitsgrade vorhanden sind. Die Starrkörperbewegung und die Füllfläche geschehen objektorientiert. Die Bauteile werden in einer Schleife iterativ mit den entsprechenden Parametern p und s in die Position im 3d Raum angeordnet. Ebenso die Erzeugung der Füllfläche verläuft iterativ.

Parameter f des Faserwinkels

Der Parameter f ist entscheidend für die Wickelanalyse des Kerns. Im Gegensatz zu den Parametern s und p beeinflusst der Parameter f ebenso das Tragverhalten der globalen Struktur.

6.4 Modell der Struktursimulation

Bevor näher auf die Implementierung des FE-Modells und dessen Optimierungsvariablen eingegangen wird, werden die mechanischen Grundlagen der faserverstärkten Kunststoffe erläutert.

6.4.1 Mechanische Grundlagen

In den seltensten Fällen werden faserverstärkte Kunststoffbauteile ausschließlich einachsig belastet, sodass der Laminataufbau mit nur einer Faserichtung auskommen kann. Aufgrund der zumeist vorliegenden mehrachsigen Belastung, muss der Ingenieur daher mehrere Faserorientierungen zu einem Mehrschichtenverbund (MSV) zusammenführen. Für die statische Berechnung eines MSV ist es dabei nicht zwingend erforderlich, die Materialeigenschaften des gesamten MSV durch Versuche zu bestimmen. Hierzu ist es ausreichend, die mechanischen Einzelschichten zu kennen. Dies erlaubt es, mechanische Versuche zur Ermittlung der Steifigkeiten auf ein Minimum zu reduzieren und dennoch jegliche Kombinationen eines Schichtaufbaus zuzulassen. Durch die Gesetzmäßigkeiten der Elastizitätstheorie ist es möglich, nur durch die Steifigkeit der Einzelschichten, die Eigenschaften des gesamten

Laminats zu bestimmen. Der Beitrag der einzelnen Schicht zur Gesamtsteifigkeit und daraus resultierend der Traganteil an der Aufnahme der Gesamtbelastung, folgt aus der Steifigkeit der Einzelschicht und ihrer Schichtdicke. Mechanisch betrachtet liegt also eine Parallelschaltung der Scheibensteifigkeit der Einzelschichten vor. Da die Steifigkeiten richtungsabhängig sind, können die Schichtsteifigkeiten jedoch nur aufsummiert werden, wenn sich alle auf das gleiche Koordinatensystem beziehen.

Makromechanik – klassische Laminattheorie (CLT)

Zur Ermittlung der Steifigkeit eines Mehrschichtenverbunds oder einer Sandwichstruktur wird üblicherweise die klassische Laminattheorie verwendet [41]. Dabei werden die Dicke und die Eigenschaft der UD-Schichten berücksichtigt, indem mithilfe einer Polartransformation die Gesamtsteifigkeit errechnet wird. Eine wesentliche Rolle in Bezug auf die Gesamtsteifigkeit des MSV spielen daher die Orientierung und die Steifigkeit der Einzelschichten. Durch diese beiden Parameter lässt sich der E-Modul des Mehrschichtenverbunds gezielt steuern. Jedoch darf an dieser Stelle nicht vergessen werden, dass durch eine Erhöhung des Faserwinkels in Querrichtung zwar die Steifigkeit E_{\perp} sich erhöht aber gleichzeitig die Steifigkeit $E_{//}$ sich reduziert.

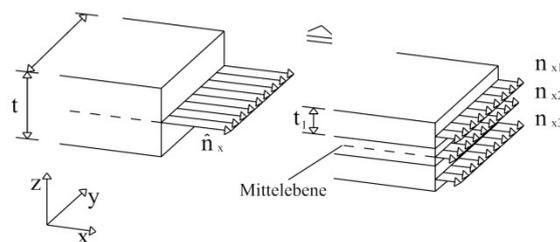


Abbildung 60: Kräfteäquivalenz am MSV[41]

Beim MSV gilt im Allgemeinen das Gesetz der Kräfteäquivalenz. Die Kräfte am gesamten Laminat sind demnach gleich groß wie die Summe der Kräfte der Einzelschichten (siehe Abbildung 60).

Daraus lassen sich folgende Gleichgewichtsbetrachtungen ableiten:

$$\hat{n}_x = \hat{\sigma}_x \cdot t = \sum_{k=1}^n n_{xk} = \sum_{k=1}^n \sigma_{xk} \cdot t_k$$

$$\hat{n}_y = \hat{\sigma}_y \cdot t = \sum_{k=1}^n n_{yk} = \sum_{k=1}^n \sigma_{yk} \cdot t_k$$

$$\hat{n}_{xy} = \hat{\sigma}_{xy} \cdot t = \sum_{k=1}^n n_{xyk} = \sum_{k=1}^n \sigma_{xyk} \cdot t_k$$

Dabei ist:

\hat{n}_i : Membrankräfte des Mehrschichtenverbundes [N/mm]

$\hat{\sigma}_i$: Spannungen des Mehrschichtenverbundes

t : Dicke der Gesamtschichten

n_{xi} : Membrankräfte der Einzelschicht [N/mm]

σ_{ik} : Spannungen der Einzelschichten

t_k : Schichtdicke der Einzelschicht

Die kinematische Verbund-Bedingung, d.h. die Annahme des idealen Haftens der Einzelschichten lautet:

$$\sigma_{xk} = \hat{\varepsilon}_x \quad \varepsilon_{yk} = \hat{\varepsilon}_y \quad \varepsilon_{xyk} = \hat{\varepsilon}_{xy}$$

ε_i : Verzerrungen der Einzelschichten

$\hat{\varepsilon}_i$: Verzerrungen des Mehrschichtenverbundes

Mechanisch betrachtet liegt demnach eine Parallelschaltung der Scheibensteifigkeiten der Einzelschichten vor. Die Dehnsteifigkeiten werden auf die Breite b bezogen $(E \cdot t)_k$. Da die Steifigkeiten richtungsabhängig sind, müssen vor dem Aufsummieren die Steifigkeiten der Einzelschichten in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert werden. Das Elastizitätsgesetz für den MSV lautet somit:

$$\begin{bmatrix} \hat{n}_x \\ \hat{n}_y \\ \hat{n}_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^n \bar{E}_{11k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{12k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{16k} \cdot t_k \\ \sum_{k=1}^n \bar{E}_{12k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{22k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{26k} \cdot t_k \\ \sum_{k=1}^n \bar{E}_{16k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{26k} \cdot t_k & \sum_{k=1}^n \bar{E}_{66k} \cdot t_k \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{\epsilon}_x \\ \hat{\epsilon}_y \\ \hat{\epsilon}_{xy} \end{bmatrix}$$

\bar{E}_{ij} : in das x,y-MSV-Koordinatensystem transformierte Schichtsteifigkeiten [N/mm]

Versagenskriterium nach Tsai-Wu

In der Festigkeitsanalyse wird anhand von werkstoffspezifischen Festigkeits-hypothesen das Versagen infolge der makromechanisch ermittelten Verformungen und Spannungen die heterogene Einzelschicht des Laminats geprüft. Dabei hängt sowohl das Versagensverhalten, als auch die Versagensart (Faser- oder Matrixbruch) stark von den äußeren Belastungsbedingungen und der Faserorientierung ab. Grundsätzlich wird dabei zwischen Zug- oder Druckbelastung längs oder quer zur Faser unterschieden. Die Versagensmechanismen einer Einzelschicht werden im Folgenden anhand des *Puck-Kriteriums* erläutert.

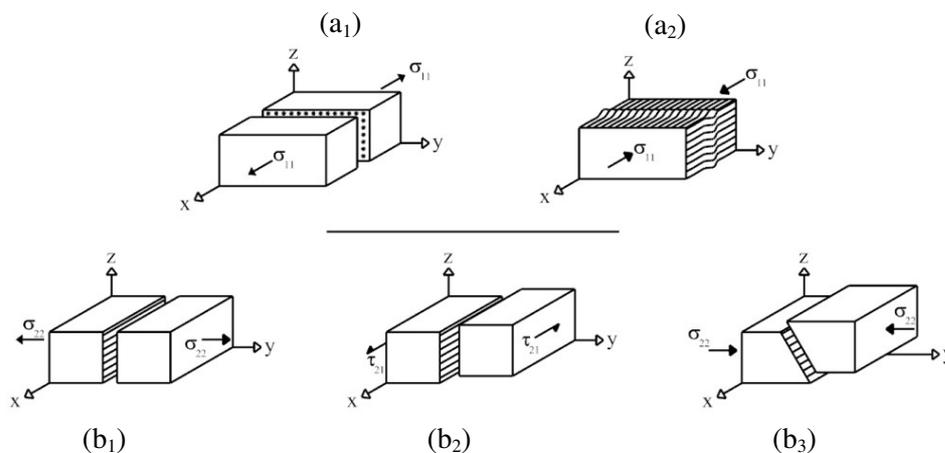


Abbildung 61: Versagensarten einer unidirektionalen Schicht nach Puck: a₁) Bruch infolge von Zug in Faserrichtung; a₂) Bruch infolge von Druck in Faserrichtung; b₁) Zwischenfaserbruch infolge von Querzug; b₂) Zwischenfaserbruch infolge von Schub und Querzug; b₃) Zwischenfaserbruch infolge von Querdruck

Bei einer Zugbeanspruchung in Faserrichtung ist das Verhältnis der Faserbruchdehnung zur Matrixbruchdehnung ein entscheidender Faktor. Für den Fall, dass die Faserbruchdehnung größer ist als die Matrixbruchdehnung,

kann ein Matrixbruch erwartet werden. Bei $\sigma_{R,m} > \sigma_{R,f}$ tritt hingegen ein Faserbruch auf. Bei einer Druckbeanspruchung längs zur Faser hängt das Versagensverhalten stark vom Faservolumengehalt (Verhältnis des Faservolumens zum Gesamtvolumen) und von den Matrixeigenschaften ab. So kann bei einem kleinen Faservolumengehalt ein sogenanntes ‘out-of-phase’-Mikrobeulen der Fasern stattfinden. Bei einem großen Faservolumengehalt tritt in der Regel ein ‘in-phase’-Mikrobeulen auf. Beiden Versagensarten liegt die Annahme zugrunde, dass die Zugfestigkeit des Matrixmaterials ausreichend groß ist und somit noch kein Matrixversagen in Folge von Zugspannungen aufgetreten ist. Eine weitere Versagensart bei einer Längsdruckbeanspruchung ist das Schubversagen in einem schmalen Versagensband, bei dem die Fasern ausknicken und abscheren. Unter einer Querkzugbelastung sind Grenzschichtversagen zwischen Faser und Matrix und Matrixbruch die häufigsten Versagensarten. Ein Zugversagen der Fasern quer zur Faserrichtung tritt nur bei sehr exakt ausgerichteten Fasern und sehr geringen Querkzugfestigkeiten der Faser auf. Eine Querdrukbeanspruchung löst häufig ein Schubversagen des Matrixmaterials aus, welches von Faserbrüchen und Grenzschichtversagen begleitet wird.

Für die Implementierung des Materialversagens beim Modell zur Struktursimulation wird statt dem Puck-Kriterium das Tsai-Wu-Kriterium verwendet. Es ist im Vergleich zum Puck-Kriterium international anerkannt und lässt sich numerisch leichter implementieren. Der wesentliche Nachteil dieses Kriteriums liegt hingegen darin, dass die Versagensart nicht nachzuvollziehen ist. Somit ist es für den Planer nicht möglich zu erfahren, wie das Laminat versagt. Für die Verwendung bei einer Optimierung stellt dies aber keinen relevanten Nachteil dar, da hier eine allgemeine Aussage genügt.

Das Tsai-Wu-Kriterium lautet wie folgt:

$$1 = F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + 2 \cdot F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{66} \cdot \tau_{21}^2$$

Dabei ist:

$$F_1 = \frac{1}{R_x^{(+)}} - \frac{1}{R_x^{(-)}} \text{ und } F_2 = \frac{1}{R_y^{(+)}} - \frac{1}{R_y^{(-)}} \\ F_{11} = \frac{1}{R_x^{(+)} \cdot R_x^{(-)}}, F_{22} = \frac{1}{R_y^{(+)} \cdot R_y^{(-)}} \text{ und } F_{66} = \frac{1}{R_{xy}^2}$$

$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma_{biax}^2} \left[1 - \sigma_{biax} \left(\frac{1}{R_x^{(+)}} - \frac{1}{R_x^{(-)}} + \frac{1}{R_y^{(+)}} - \frac{1}{R_y^{(-)}} \right) - \sigma_{biax}^2 \left(\frac{1}{R_x^{(+)} \cdot R_x^{(-)}} + \frac{1}{R_y^{(+)} \cdot R_y^{(-)}} \right) \right]$$

F_i : Festigkeitskoeffizient in Abhängigkeit der Druck- und Zugfestigkeiten

F_{ij} : Festigkeitskoeffizient unter Berücksichtigung der Spannungsinteraktion

σ_i : Normalspannungen

τ_{ij} : Schubspannungen

$R_i^{(+)}, R_i^{(-)}, R_{ij}$: Basisfestigkeit

Da die Bestimmung von F_{12} mit einem aufwendigen biaxialen Versuch verbunden ist, wird Näherungsweise der Schätzwert F_{12}^* eingeführt.

$$F_{12} = F_{12}^* \sqrt{F_{11} \cdot F_{22}} \quad \text{für } -1 < F_{12}^* < 1$$

6.4.2 FE-Modellierung der Sandwichverbundschalung

Im Allgemeinen findet die Modellierung von faserverstärkten Kunststoffen auf der Mikro- oder Makroebene statt. Die Modellierung auf der Mikroebene ist sehr aufwendig, da hier die Fasern und die Matrix einzeln modelliert werden. Sie spielt bei der Berechnung auf Bauteilebene in der Praxis daher keine Rolle. Grundlage für die Modellierung auf der Makroebene ist die zuvor beschriebene klassische Laminattheorie. Die FE-Modellierung und die Steifigkeitsberechnung der Sandwichverbundschalung, bzw. die des Flächenverbundtragwerks, erfolgt in Ansys durch die Schalenelemente SHELL 181 [42]. Für die Berechnung der Steifigkeiten werden zuvor die zugehörigen Koordinatensysteme der Einzelschichten in die korrekte Lage gebracht. Die Modellierung eines Bauteils mit komplexem Laminataufbau ist somit deutlich aufwendiger als die für isotrope Materialien. Ein effizientes Planen ohne entsprechend entwickelte Werkzeuge ist an dieser Stelle nicht möglich [43] [44]. Die Materialsteifigkeit und die Dicke des Betons werden dabei durch einen weiteren Layer berücksichtigt.

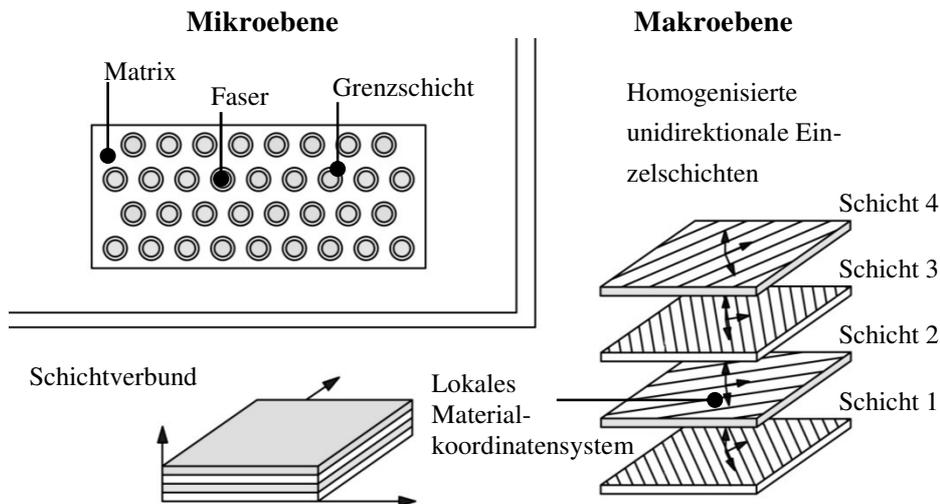


Abbildung 62: Modellierungsebenen von Faserverbundwerkstoffen

6.4.3 Implementierung

Das Vorgehen bei der Kopplung des Optimierungsalgorithmus mit der Material- und Strukturanalyse ist in Abbildung 63 schematisch dargestellt. Die Eingabe der Modellparameter, wie Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften der Einzelschicht, Schichtdicken und Schichtorientierung, erfolgen über die C#-Plattform in *Rhino*. *Ansys* wird dabei als Batch-Solver für die Strukturberechnung verwendet. Die Parametrisierung der Geometrie erfolgt dabei in der CAD-Umgebung. Gegenüber einer FE-Parametrisierung [30] hat eine CAD-Parametrisierung den Vorteil, dass sich die Verknüpfung zum Herstellungsmodell effizienter programmieren lässt.

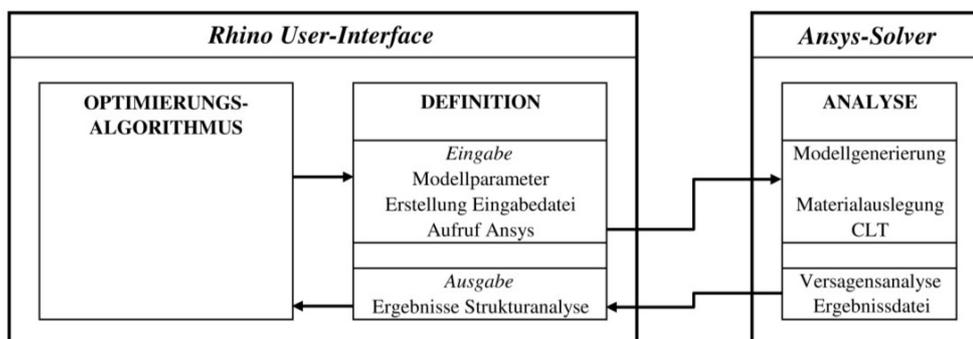


Abbildung 63: Konzept der Kopplung von CAD zu CAE

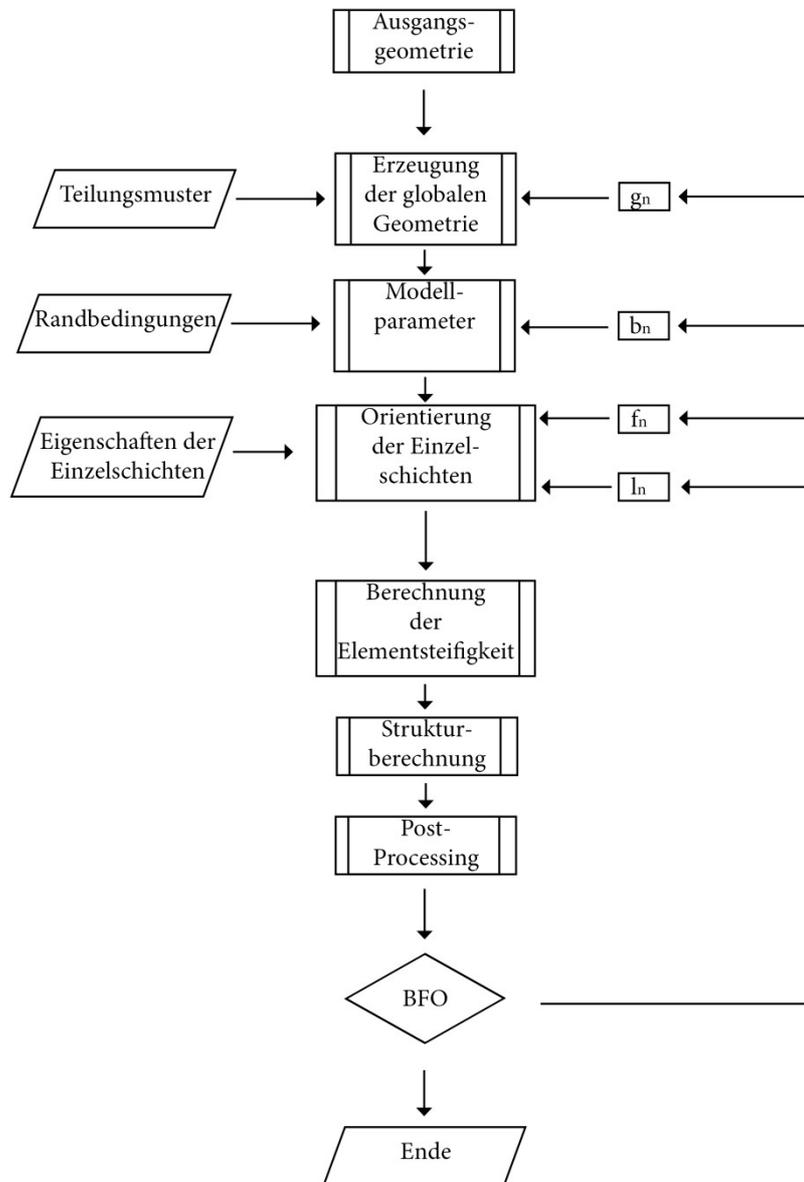


Abbildung 64: Implementierter Berechnungsablauf in der FE-Umgebung

In Abbildung 64 ist der Ablauf dargestellt, der bei einem Optimierungsschritt für die Struktursimulation stattfindet. Wie beim Herstellungssimulation, wird im ersten Schritt die globale Geometrie in einzelne Bauteile unterteilt. Aus den CAD-Daten wird ein FE-Netz erzeugt und es werden die Randbedingungen an das FE-Modell übergeben. Bei den Randbedingungen handelt es sich

neben der Auflagerung und der Lasteinwirkung ebenfalls um die Optimierungsvariablen wie Schichtanzahl, Schichtdicke und Faserorientierung der Einzelschichten. Daraufhin werden für jedes Element, mithilfe einer iterativen Schleife, die Koordinatensysteme der Einzelschichten in die richtige Lage gebracht. Im Anschluss daran wird durch die klassische Laminattheorie die Steifigkeit für jedes Element berechnet. Nach der Strukturberechnung wird für jede Einzelschicht die Materialausnutzung nach dem Tsai-Wu-Kriterium errechnet. Abschließend werden die Simulationsergebnisse an die Zielfunktion übermittelt, durch den Optimierungsalgorithmus weiter verarbeitet und der Prozess beginnt von neuem.

6.4.4 Optimierungsvariablen

Die Eigenschaften des Strukturverhaltens werden durch folgende Variablen, die in Abbildung 64 wiederzufinden sind, beeinflusst:

Parameter g der globalen Geometrie

Die Geometrie hat einen Einfluss auf die globale Steifigkeit des Tragwerks, was die Verformung und ebenso den Spannungszustand der Struktur beeinflusst. Durch eine günstige Veränderung der Geometrie kann ein Membranzustand erreicht oder ein höherer Hebelarm geschaffen werden, was zu einer Reduzierung der Biegespannungen führt.

Parameter f des Faserwinkels

Für das Tragwerkverhalten hat die Faserorientierung einen wesentlichen Einfluss auf die Steifigkeit und Festigkeit der Sandwichverbundschalung. Wie bereits zuvor erläutert, beeinflusst die Variable des Faserwinkels ebenso die Fertigung.

Parameter l der Einzelschichtdicke des Laminats

Durch die Dicke der Einzelschichten lassen sich einerseits die Steifigkeit und andererseits die aufnehmbare Zugspannung des Laminats steuern.

Parameter b der Betonhöhe

Über den Parameter der Betonhöhe, lässt sich die Biegesteifigkeit des Bauteils erhöhen. Die Bauteildicke wirkt sich ebenfalls auf den inneren statischen

Hebelarm aus, was sich wiederum auf die Druckspannung im Beton und die Zugspannung in der Sandwichverbundschalung auswirkt.

6.5 Allgemeine Zielfunktion

Abschließend wird in diesem Kapitel auf die allgemeine Zielfunktion der multidisziplinären Optimierung für die entwickelte Flächenverbundbauweise eingegangen. Im Hinblick auf das Tragwerkverhalten besteht das Ziel darin, eine ressourcenschonende Konstruktion zu bestimmen, bei der ein Minimum an Material benötigt wird. Die Zielfunktion stellt sich daher unter anderem aus der Höhe der Schubspannung zwischen CFK und Beton, der Verformung der globalen Struktur und der Materialausnutzung von CFK und Beton zusammen. Für den Herstellungsprozess besteht die Optimierungsaufgabe in erster Linie darin, die einzelnen Bauteile der globalen Geometrie herstellen zu können. Bei der Zielfunktion wird dies einerseits durch den ermittelten Verschnitt und andererseits aus den Eigenschaften der Wickelbarkeit des Kerns abgebildet. Durch die Wichtung der Simulationsergebnisse der Herstellung und des Tragverhaltens ist es möglich, gezielt die Eigenschaften des Systems zu beeinflussen. Bei der Wichtung des Tragverhaltens besteht zusätzlich die Möglichkeit, die Struktureigenschaften differenziert zu gewichten.

Die allgemeine Zielfunktion lautet:

$$f(g, f, s, l, b) = \alpha \cdot (\alpha_1 \times d_{max} + \alpha_2 \times \eta_S + \alpha_3 \times \eta_{CFK} + \alpha_4 \times \eta_{Beton}) + \beta \cdot \sum_{i=1}^n v_i + a_i$$

Dabei sind die Parameter:

g : Globale Geometrie

f : Faserwinkel der Bauteile

s : Starrkörperbewegungen der Bauteile

l : Schichtdicke der Einzelschichten

b : Betonhöhe

Für das Modell der Struktursimulation sind:

α : Wichtung der Tragwerkeigenschaften

α_n : Wichtung der Einzelkriterien

d_{max} : Maximale Verformung in der Struktur

η_S : Ausnutzungsgrad der Schubspannung zwischen CFK und Beton

η_{CFK} : Ausnutzungsgrad des Spannungsnachweises des CFKs

η_{Beton} : Ausnutzungsgrad des Druckspannungsnachweises des Betons

Für das Modell der Herstellungssimulation sind:

β : Wichtung der Produktionseigenschaften

v_i : Verschnittfläche des jeweiligen Kernes

a_i : Eigenschaft der Wickelbarkeit (Bridging)

Für die Verschnittfläche V_i gilt dabei beispielsweise für vier Bauteile:

$$v_i(b_1, b_2, b_3, b_4) = f_1(b_1, b_2) + f_2(b_2, b_3) + f_3(b_3, b_4) + f_4(b_4, b_1)$$

Dabei ist:

v_i : Verschnittfläche des jeweiligen Kernes

b_i : Bauteile aus der globalen Geometrie

f_i : Füllfläche zwischen zwei benachbarten Bauteilen

7 Anwendung der integrativen Planungs- und Optimierungsstrategie

Im folgenden Kapitel werden anhand von drei Beispielen die entwickelte Flächenverbundbauweise unter Anwendung der integrativen Planungs- und Optimierungsstrategie vorgestellt. Die Beispiele verdeutlichen, dass ohne die digitalen Planungstools und ohne die multidisziplinäre Optimierungsstrategie, das Planungsergebnis aufgrund der Komplexität der Planungsaufgabe, nicht optimal gelöst werden kann.

7.1 Beispiel 1

In diesem Beispiel wird die Planung, Herstellung und der Aufbau eines Demonstrators - einer Parkbank am Campus der Universität Stuttgart - vorgestellt (Abbildung 65). Die Vorfertigung der Sandwichverbundschalungselemente erfolgte im Werk der Firma CGB. Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kam für die Fertigung der Bauteile eine Wickelmaschine zum Einsatz, bei der die Kerngröße auf einen maximalen Durchmesser von 75 cm begrenzt war. Eine weitere Randbindung, die es aus wirtschaftlichen Gründen einzuhalten galt, war, dass maximal vier Kerne bewickelt werden konnten. Aus ökologischen und ökonomischen Gründen, sollte dabei das Material des Kerns wiederverwendet werden. Zwei der vier Kerne mussten daher so gestaltet werden, dass sie aus den anderen beiden Kernen herausgefräst werden konnten. Aus ökologischer Sicht hatte dies den Vorteil, dass das Material wiederverwendet und der Materialverbrauch für die Kerne reduziert werden konnte. Wirtschaftlich gesehen hatte dies den Vorteil, dass die Materialkosten und die Prozesszeiten für die Kernvorbereitung sich reduzierten.



Abbildung 65: Freigeformte Parkbank am Campus der Universität Stuttgart

Zu guter Letzt spielten statische Aspekte für den Entwurf der Parkbank eine wichtige Rolle, die sich im Laminataufbau der einzelnen Bauteile wieder spiegeln. Der Lastabtrag der Struktur wurde so konzipiert, dass die Kräfte von der Bankmitte in den linken und rechten Rand abgetragen werden. Im Randbereich werden die Kräfte an die vorderen und hinteren Auflager verteilt. Für den Laminataufbau der Sandwichverbundschalungselemente wurde daher für die Bauteile in der Mitte ein kleiner Wickelwinkel und für die im Randbereich ein großer Wickelwinkel definiert.

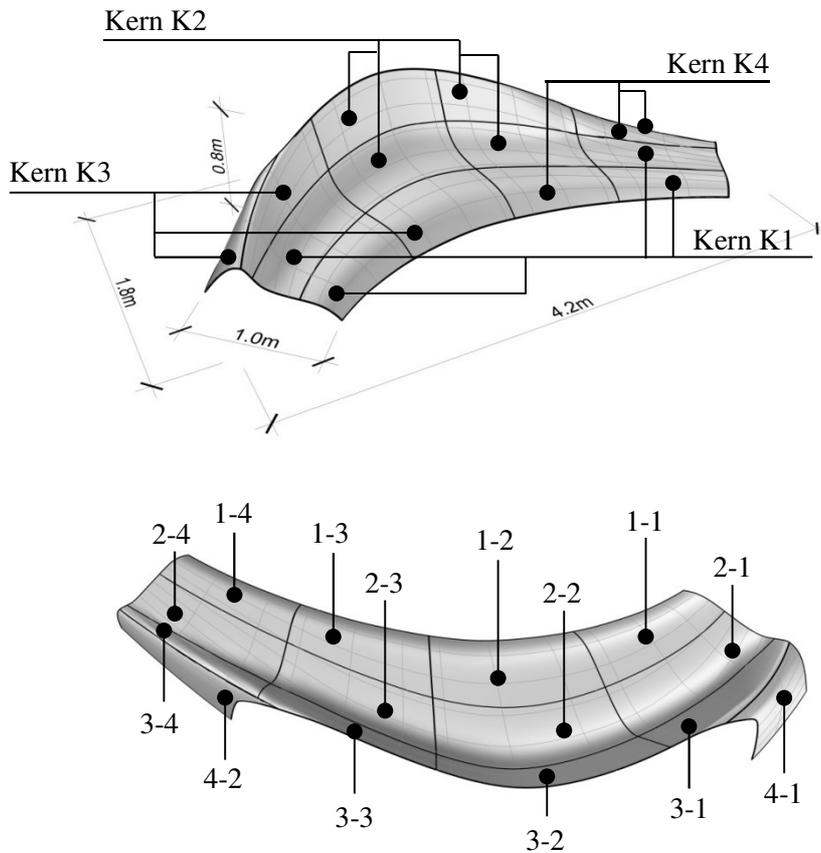


Abbildung 66: (a) Definition der Kerne nach Faserorientierung und Bauteilgeometrie; (b) Definition der Bauteile

Der Demonstrator besaß eine Gesamtlänge von 4,2 m und eine maximale Breite von 1,8 m. Er war insgesamt in 14 Bauteile unterteilt, die sich jeweils in Länge, Breite und Krümmung unterschieden. Die Teilung der Fläche in einzelne Bauteile erfolgte derart, dass sich die Fugen der Bauteile in Längs- und Querrichtung im Krümmungswechsel der Fläche befanden. Abbildung 66 zeigt neben den Abmessungen der Elemente ebenfalls, welche einen zusammengesetzten Kern bildeten. Bei der Wahl der Bauteile spielte neben der Geometrie ebenso der Faseraufbau der einzelnen Bauteile eine wesentliche Rolle. Bei der Definition des Fugenbilds und bei der Bestimmung der Bauteile, die einen Kern bildeten, wurden die Prinzipien aus Kapitel 5 angewendet.

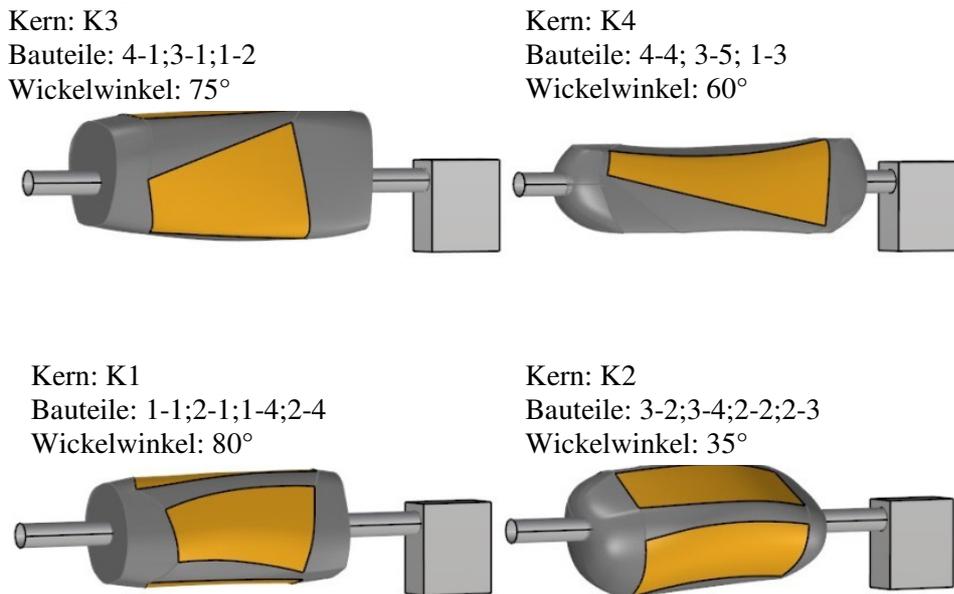


Abbildung 67: Kerne zur Herstellung des Demonstrators

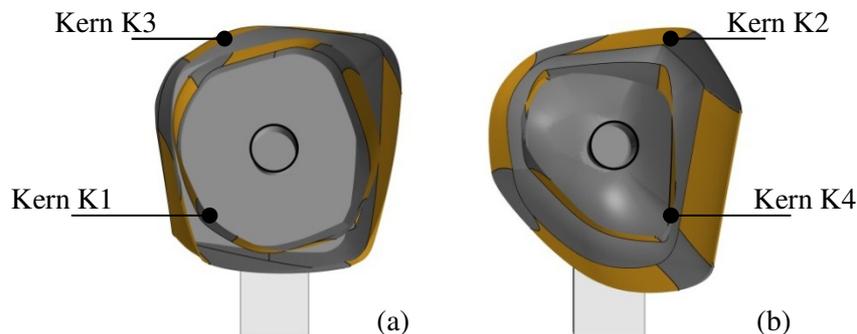


Abbildung 68: Schnitt durch die Kerne: (a) K3 und K1; (b) K2 und K4

Die 14 Bauteile wurden durch vier Kerne hergestellt. Die Kerne K1 und K2 bestanden aus vier Bauteilen, die Kerne K3 und K4 hingegen aus jeweils drei Bauteilen (Abbildung 67). Alle vier Kerne wurden unter einem anderen Wickelwinkel produziert. So wurde beispielsweise der Kern K2 mit einem Wickelwinkel von 35° und der Kern K4 mit einem Wickelwinkel von 60° hergestellt. Um das Kernmaterial möglichst effizient zu nutzen, wurde jeweils ein Kern aus einem anderen herausgefräst. Voraussetzung hierfür war, dass die Geometrien der Kerne nicht kollidierten. In Abbildung 68 ist ein Schnitt durch die jeweiligen Kerne dargestellt. Der Kern K1 wurde aus dem Kern K3

und der Kern K4 aus dem Kern K2 gefräst. Die Herstellung der Sandwichverbundschalung erfolgte mit den in Kapitel 4.4 beschriebenen Fertigungsschritten. In Abbildung 69 (a) ist der Fertigungsschritt, in dem die erste Deckschicht der Schalung hergestellt wurde, dargestellt. Wie bei den Versuchen in Kapitel 4, betrug die Laminatdicke der Deckschichten jeweils 3 mm und die Höhe des Kernmaterials 10 mm. In Abbildung 69 (b) sind die 14 Sandwichverbundschalungsbauteile dargestellt.

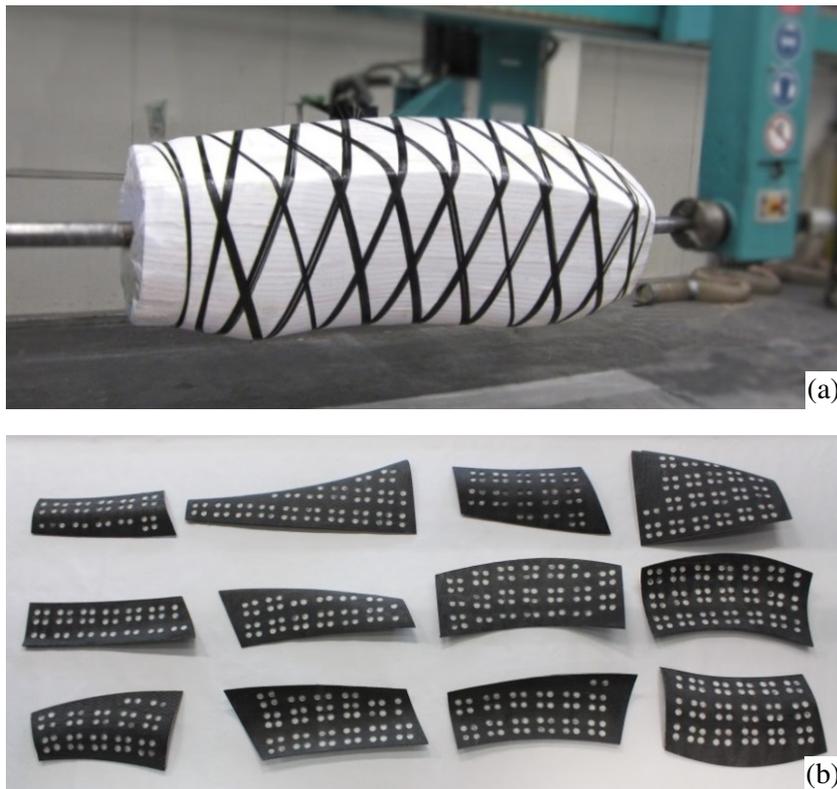


Abbildung 69: (a) Wickelprozess eines zusammengesetzten Freiformkernes; (b) Elemente der Verbundschalung

Die Fügung der Schalungselemente erfolgte mittels einer Klebeverbindung (Abbildung 70). Die Verbindung wurde so konzipiert, dass sie einerseits für den Bauzustand eine biegesteife Kraftübertragung ermöglichte und andererseits im späteren Verbund mit dem Beton die vorhandenen Zugkräfte in die obere und untere Lage übertragen konnte. Da die aufgeklebten Laschen der unteren Deckschicht im Endzustand nicht zu sehen sein sollten, wurde das Sandwich im Abstand von 70 mm von der zum Beton zugewandten Seite bis

zur unteren Laminatlage abgefräst (analog zu den Sacklöchern). Die CFK-Laschen der oberen Deckschicht wurden im Versatz von 35 mm zu den unteren Laschen angebracht.

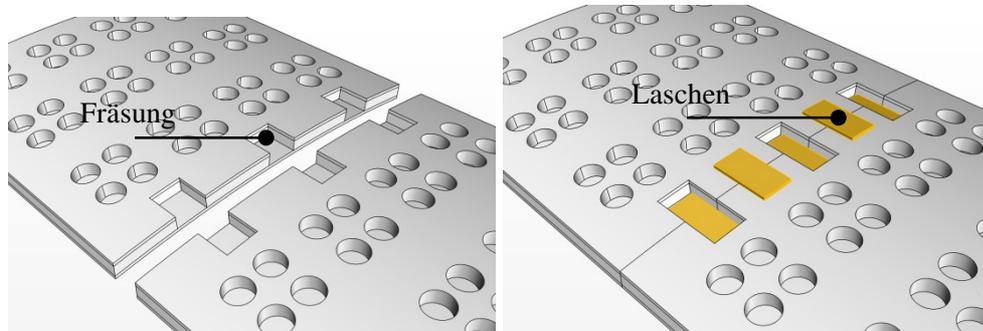


Abbildung 70: Klebeverbindung der Sandwichbauteile auf Stoß

Nachdem die Sandwichverbundschalungselemente gefügt wurden, wurde eine 4 cm dicke Betonschicht auf die Schalung von Hand aufgetragen. Die Abbildung 71 zeigt das Ergebnis nach dem Aushärten des Betons und die architektonische Qualität, welche die neue Flächenverbundbauweise mit sich bringt.



Abbildung 71: Nahaufnahmen der verlorenen Sandwichverbundschalung und der Betonoberfläche

7.2 Beispiel 2

Beispiel 2 stellt im Gegensatz zum vorherigen Beispiel, die in Kapitel 6 vorgestellte multidisziplinäre Optimierungsstrategie, im Kontext eines praktischen Anwendungsfalls vor. Hierzu werden das Vorgehen, die gewählten Parameter der jeweiligen Modelle und die gewählten Variablen bei der Opti-

mierungsstrategie beschrieben. Im Anschluss daran wird die ermittelte Lösung der multidisziplinären Optimierungsstrategie mit den Ergebnissen einer Herstellungsoptimierung und einer Form- und Materialoptimierung verglichen. Auf Basis der Ergebnisse werden abschließend die jeweils ermittelten Parameter und Zielvariablen der drei Ansätze diskutiert.

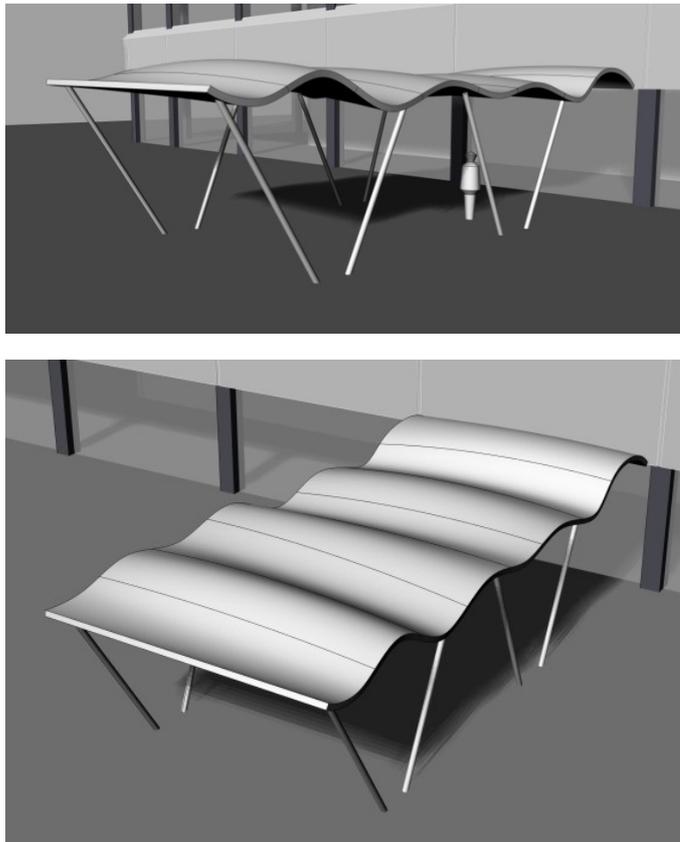


Abbildung 72: Beispiel 2: Vordach eines Bestandsgebäudes

Bei dem gewählten Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein freigeformtes Vordach für ein Bestandsgebäude (Abbildung 72). Die Fläche hat eine Abmessung von 8 m x 5 m und ist in acht Bauteile unterteilt (Abbildung 73). Die Breite jedes Bauteils beträgt ca. 1,5 m und die Länge ca. 5 m. Das Dach spannt einachsrig über die 5 m und wird an den Eckpunkten der Bauteile vertikal und horizontal gehalten. Aus statischen Gründen ist die Krümmung in Querrichtung so gewählt, dass sie die Biegetragfähigkeit durch die Vergrößerung des statischen Hebelarms begünstigt (ähnlich wie bei einem Falwerk). Die Krümmung in Längsrichtung hingegen erzeugt an dieser Stelle eine Bo-

gentragwirkung. Die Betondicke bleibt während der Optimierung konstant und beträgt 13 cm. Die einwirkende Flächenlast beträgt 3 kN/m^2 und entspricht in etwa dem Eigengewicht der Konstruktion.

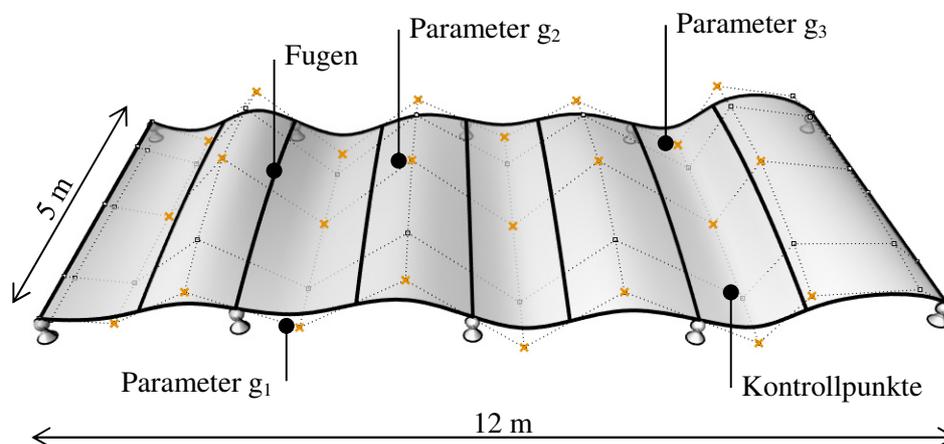


Abbildung 73: Geometriemodell: Parametrisierte Kontrollpunkte der Nurbsfläche und Parameter g (orange)

Im Hinblick auf die Fertigungseigenschaften der Bauteile, sind die Einteilung und die Krümmungen der Fläche so gewählt, dass sie eine Herstellung der Sandwichverbundschalungselemente ermöglicht. Vier der Bauteile besitzen eine synklastische Geometrie und bilden einen zusammengesetzten Kern. Die vier anderen Bauteile besitzen eine antiklastische Form und bilden einen weiteren zusammengesetzten Kern.

7.2.1 Ergebnis der multidisziplinären Optimierung

Bevor die Ergebnisse der multidisziplinären Optimierung erörtert werden, wird zuvor auf den BFO-Algorithmus, die Optimierungsvariablen und die Zielfunktion näher eingegangen. Die gewählte Kolonie besteht aus insgesamt 40 Bakterien, die in vier Gruppen unterteilt ist. Dies bedeutet, dass maximal vier Bakterien zur gleichen Zeit den Lösungsraum untersuchen. Demnach werden simultan vier FE-Simulationsmodelle und acht Kerngeometrien generiert, berechnet und analysiert. Jede Bakterie führt dabei zehn Schritte während ihrer Lebensdauer aus. Innerhalb dieser führt sie maximal acht weitere Schritte aus. Die Schrittweite N_W wird für jeden Schritt adaptiv festgelegt

und ist abhängig von den Parametern und der letzten ermittelten Lösung. Die Zellteilung N_{re} der Bakterien findet insgesamt 120-mal statt.

Das Ziel der Optimierung liegt darin, die Parameter so zu bestimmen, dass ein ideales Verhältnis zwischen der Geometrie, dem Tragverhalten und der Fertigung gegeben ist. Wie diese zueinander in Verhältnis gebracht werden können, liegt einerseits an den vorgegebenen Wertebereichen der Parameter und andererseits an der Gewichtung der ermittelten Zielparameter innerhalb der definierten Zielfunktion. Das Optimierungsproblem stellt sich aus insgesamt 25 Parametern zusammen. Die globale Geometrie wird durch die Parameter g_1 - g_3 definiert. Diese beeinflussen die Kontrollpunkte der parametrisierten NURBS-Fläche (Abbildung 73), wobei der Wertebereich von g in Z-Richtung zwischen 0 bis 500 mm und deren Schrittweite bei 10 mm liegt (Abbildung 74). Die Schrittweite passt sich dabei, in Abhängigkeit der Eigenschaften des Fertigungsverfahrens, an. Liegt für einen der beiden Kerne ein prozentualer Verschnitt unter 25 % vor, so wird die Schrittweite um 5 mm reduziert. Wird für beide Kerne ein prozentualer Verschnitt von unter 20 % erreicht, verringert sich die Schrittweite auf nur 2 mm.

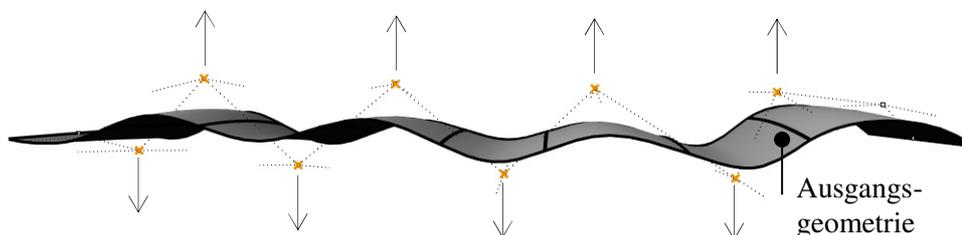


Abbildung 74: Wertebereich der Parameter g_2 der globalen Geometrie (in Z-Richtung)

Die Parameter der Starrkörperbewegung s der Bauteile, stellen die größte Anzahl an Unbekannten dar. Bei jedem Kern stellt sich s aus neun Parametern zusammen, wobei die Anzahl bereits auf die wesentlichen Freiheitsgrade reduziert ist. Das obere kernbildende Bauteil kommt nur mit den Rotationen um die X- und Y-Achse aus. Dessen Translationen in X-, Y- und Z-Richtung sind nicht erforderlich, da diese durch die benachbarten Bauteile abgedeckt sind. Für das rechte und linke Bauteil hingegen sind die

Rotationen nicht erforderlich, da deren Einfluss auf die Verschnittfläche durch die Rotationen des oberen und unteren Bauteils abgedeckt ist. Der Wertebereich für die Translationen liegt zwischen -3000 mm und +3000 mm und für die Rotationen zwischen -10° und $+10^\circ$. Die Schrittweite stellt sich wieder individuell in Abhängigkeit des prozentualen Verschnitts ein. Liegt der prozentuale Verschnitt beispielsweise unter 30 %, reduzieren sich die Schrittweiten der Parameter s um 30 %. Der Wickelwinkel und der Laminataufbau der antiklastischen und synklastischen Bauteile werden durch die Parameter f_1 und f_2 abgebildet. Der Wertebereich liegt dabei zwischen einem minimalen Wickelwinkel von $\pm 15^\circ$ und einem maximalen Wickelwinkel von $\pm 55^\circ$. Die Dicke der Laminatschichten wird durch die Parameter l_1 für den antiklastischen Kern und l_2 für den synklastischen Kern abgebildet.

Die Zielfunktion ist dabei folgendermaßen definiert: Die Gewichtung der Fabrikation liegt bei 55 %, demnach liegt die Gewichtung des Tragverhaltens bei 45 %. Innerhalb der Fabrikation findet keine Gewichtung zwischen den beiden Kernen statt. Beim Strukturverhalten hingegen liegt die Gewichtung bei der Reduzierung der Schichtdicken bei 55 %, bei der Verformung bei 25 % und bei der Materialausnutzung bei 20 %. Um den zeitlichen Rechenaufwand effizienter zu gestalten, findet eine FE-Berechnung erst statt, wenn der prozentuale Verschnitt der Kerne unter 30 % liegt. Ist dieser größer, wird für die fehlenden Zielwerte ein entsprechend hoher Ersatzwert vergeben. Somit wird gewährleistet, dass der strukturelle Einfluss bei der Optimierung beibehalten wird.

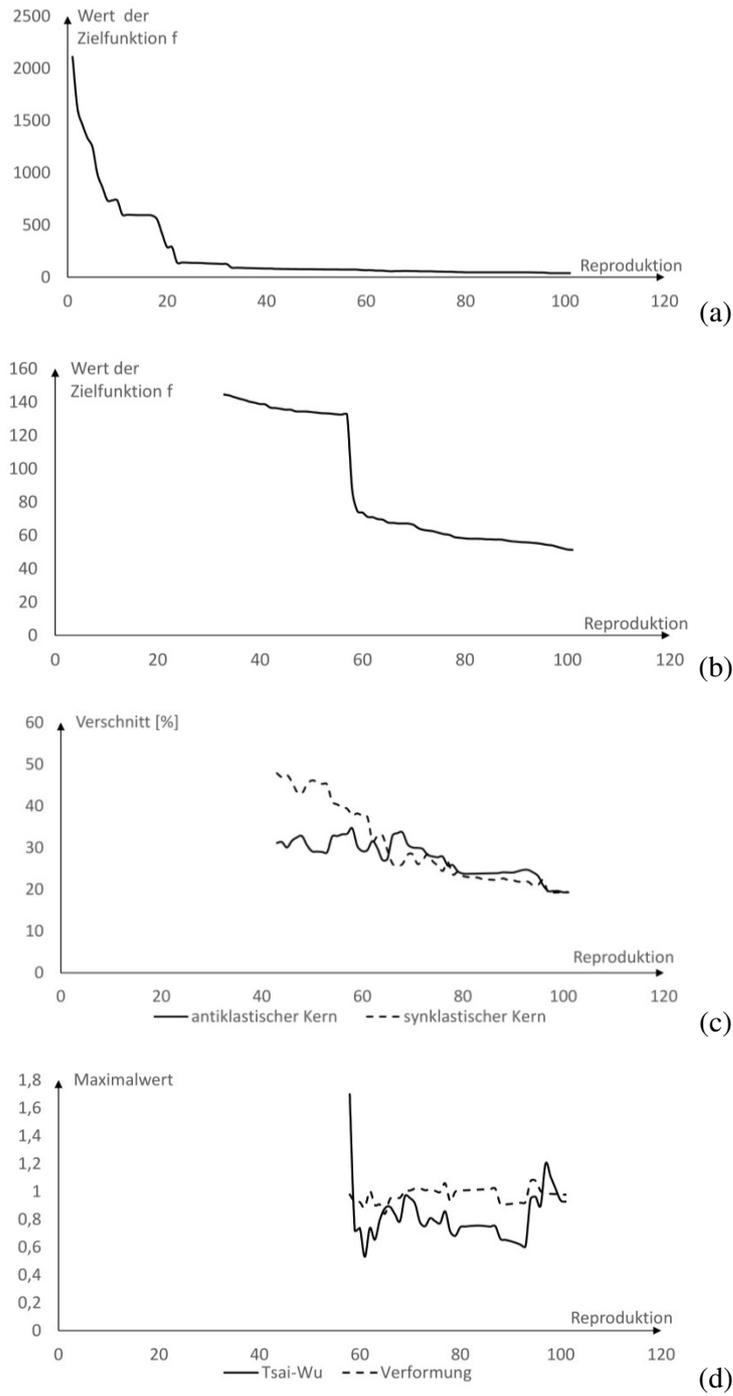


Abbildung 75: Verlauf der Zielfunktion f und der Eigenschaften der Herstellung und des Tragverhaltens: (a) Gesamter Verlauf; (b) Ausschnitt des Verlaufs ab etwa der 30igsten Reproduktion; (c) Verlauf der Verschnittfläche; (d) Verlauf der Materialausnutzung und des Verformungsnachweis

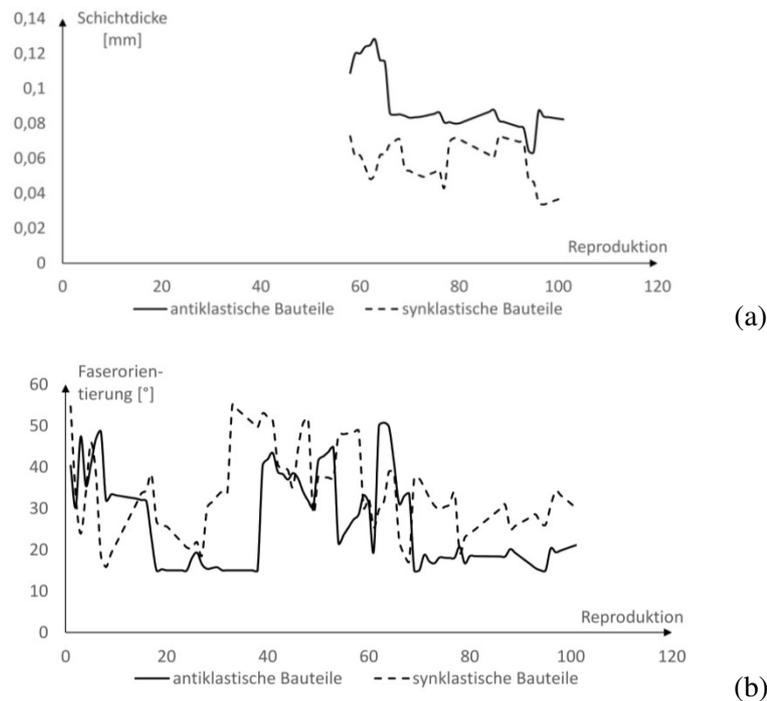


Abbildung 76: Verlauf der Optimierungsparameter: (a) Verlauf der Schichtdicke; (b) Verlauf der Faserorientierung der Bauteile

In Abbildung 75 (a) und (b) ist die Verbesserung des Systems durch die multidisziplinäre Optimierung am Verlauf der Zielfunktion und des Zielwerts f erkennbar. Für eine differenzierte Betrachtung sind die Verläufe der einzelnen Werte innerhalb der Zielfunktion ebenfalls dargestellt. In der Abbildung 75 (c) ist zu erkennen, dass sich die Verschnittfläche der beiden Kerne verkleinert. Im Hinblick auf die Dicke der oberen und unteren Laminatschichten der antiklastischen und synklastischen Sandwichverbundbauteile, ist ebenso eine Reduzierung zu beobachten (Abbildung 76 (a)). Das obere und das untere Laminate bestehen jeweils aus 4 Schichten, somit beträgt die Dicke der Decklaminare nach der Optimierung für die antiklastischen Bauteile 0.32 mm und für die synklastischen Bauteile 0.16 mm.

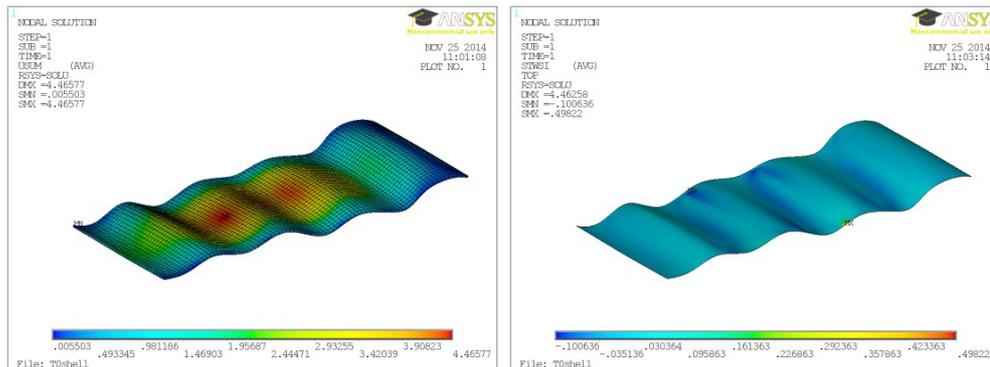


Abbildung 77: Berechnung der strukturellen Eigenschaften bei der 60igsten Reproduktion

Die Begrenzung der Verformung des Daches und die Materialausnutzung der verlorenen CFK-Schalung, welche während der Optimierung ermittelt wurden (Abbildung 77), überschreiten dabei schlussendlich nicht die vorgegebenen 100 % (Abbildung 75 (d)). Die zulässige Verformung wird dabei auf $L/500$ begrenzt. Die Materialausnutzung wird durch das Tsai-Wu-Kriterium bestimmt. Der Ort der maßgebenden Beanspruchung und Verformung kann sich während der Optimierung ändern. Dies wird berücksichtigt, indem nach jedem Berechnungsschritt der maßgebende FE-Wert bei der Zielfunktion gewählt wird. Die Parameter, welche die Faserorientierung der Laminatschichten der Bauteile und den Wickelwinkel der Kerne abbilden, pendeln sich im Verlauf der Optimierung ein und nähern sich dem optimalen Wert an. Das Ergebnis der zusammengesetzten Kerne der synklastischen und antiklastischen Bauteile ist in Abbildung 78 dargestellt. Der Parameter der Faserorientierung f_1 der antiklastischen Bauteile konvergiert zu $\pm 21^\circ$, der Parameter f_2 der synklastischen Bauteile hingegen zu $\pm 30^\circ$ (Abbildung 76 (b)).

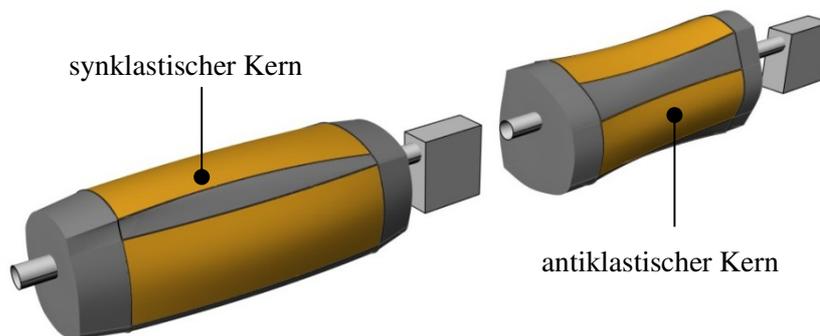


Abbildung 78: Ergebnis der zusammengesetzten Kerne

7.2.2 Validierung der Ergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse, die mithilfe der multidisziplinären Optimierung ermittelt wurden, an zwei Optimierungsmodellen validiert. Das erste Optimierungsmodell, bei dem nur die **Optimierung von Form und Fertigung** betrachtet wird, hat zum Ziel durch die Formänderung einen positiven Einfluss auf die Wickeleigenschaften bei der Herstellung zu bekommen und dabei die Verschnittfläche auf ein Minimum zu reduzieren. Die Frage der nötigen Standfestigkeit des Tragwerks spielt dabei keine Rolle. Das zweite Optimierungsmodell, bei dem nur die **Optimierung von Form und Material** betrachtet wird, beinhaltet eine Form- und Querschnittsoptimierung. Ziel dabei ist es, den Materialverbrauch der CFK- Sandwichverbundschalung auf ein Minimum zu reduzieren sowie den idealen Laminataufbau und die minimale Schichtdicke zu bestimmen. Die Herstellbarkeit der Bauteile wird dabei nicht berücksichtigt.

Optimierung von Form und Fertigung

Die Einstellung des Optimierungsalgorithmus ergibt sich wie folgt: Die Koloniegröße besteht aus 40 Bakterien und verteilt sich auf 4 Gruppen. Die Reproduktion der Bakterien findet 120-mal statt, die Chemotaxis und die maximalen Schwimmschritte insgesamt 10-mal. Die Optimierungsverläufe der Verschnittfläche des synklastischen und antiklastischen Kerns sind in Abbildung 80 dargestellt. Nach der 20-ten Reproduktion der Bakterien sind für beide Kerne erstmals die Parameter so definiert, dass die Herstellbarkeit der

Bauteile gewährleistet ist. Ab diesem Zeitpunkt ist eine weitere stetige Reduzierung der Verschnittfläche zu beobachten.

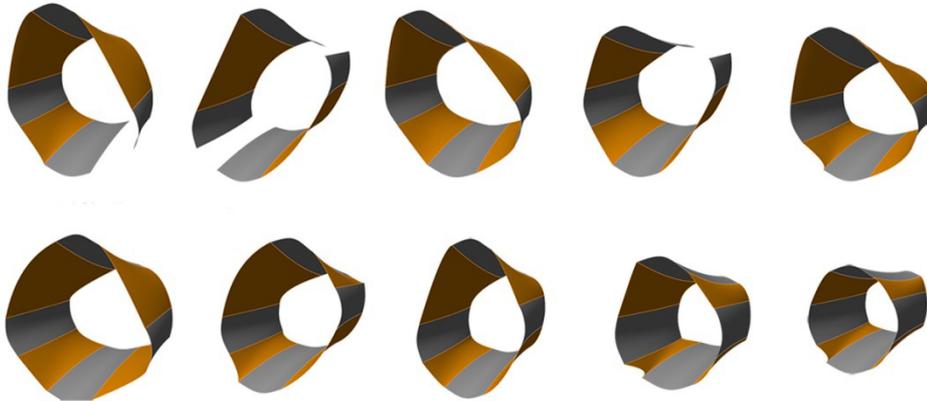


Abbildung 79: Reduzierung der Verschnittfläche (orange) des antiklastischen Kerns während des Verlaufs der Optimierung bis hin zum Optimum (von links oben nach rechts unten)

In Abbildung 79 ist der Verlauf der Generierung des antiklastischen Kerns graphisch dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Füllfläche in einigen Iterationsschritten vergrößert. Dieser Effekt ist auch in Abbildung 80 (b) zu erkennen. Es ist durchaus möglich, dass während der Optimierung die prozentuale Verschnittfläche des antiklastischen Kerns zunimmt, die Verschnittfläche des synklastischen Kerns aber zur gleichen Zeit stärker abnimmt. In der Gesamtbetrachtung jedoch reduziert sich die Verschnittfläche. Es handelt sich dabei um ein lokales Minimum. Jedoch zeigt die implementierte adaptive Schrittweite an dieser Stelle ihre Wirkung, da in diesem Fall die Parameter des besser werdenden Kerns sich weniger vom lokalen Minimum entfernen. Die Schrittweiten der Parameter des Kerns bei dem sich der Verschnitt vergrößert, bleiben hingegen gleich.

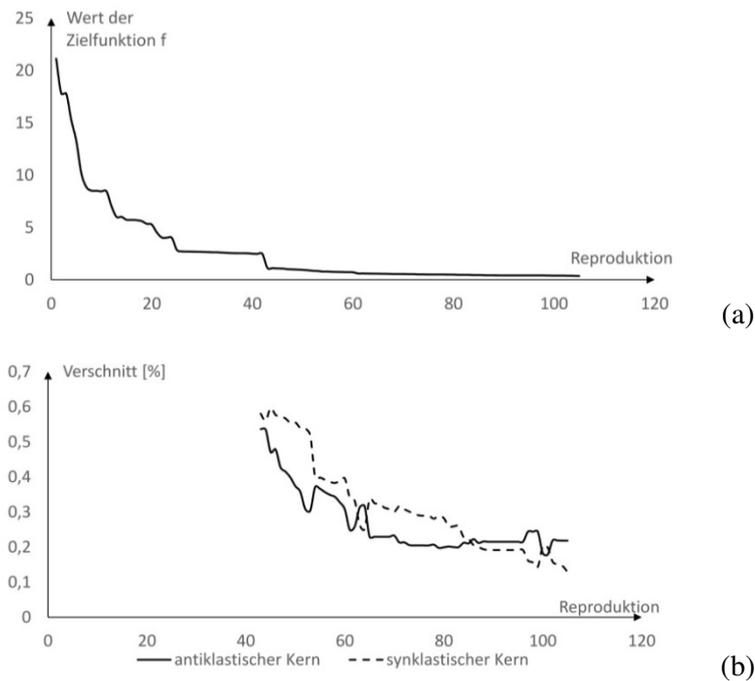


Abbildung 80: (a) Optimierungsverlauf; (b) Minimierung der Verschnittfläche des synklastischen und antiklastischen Kerns während der Optimierung

In Abbildung 81 (a) sind jeweils die Verläufe der Parameter f der Wickelwinkel des synklastischen und des antiklastischen Kerns dargestellt. Zu Beginn der Optimierung ist ein sprunghaftes Verhalten der Wickelwinkel zu beobachten, gegen Ende der Optimierung hingegen nimmt dies ab und die Optimierungsvariable konvergiert. Ein ähnliches Verhalten ist für die Parameter g der Geometrie zu beobachten. Ab etwa der Hälfte des Optimierungsverlaufs nimmt das sprunghafte Verhalten ab und die Parameter nähern sich einem Wert an (Abbildung 81 (b)).

Das Verhalten der Parameter s der Starrkörperbewegung und Rotation während der Optimierung sind in Abbildung 81 (c) und (d) dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass am Anfang der Optimierung die Parameter stark schwanken und sich erst im Verlauf der Optimierung einem bestimmten Wert annähern.

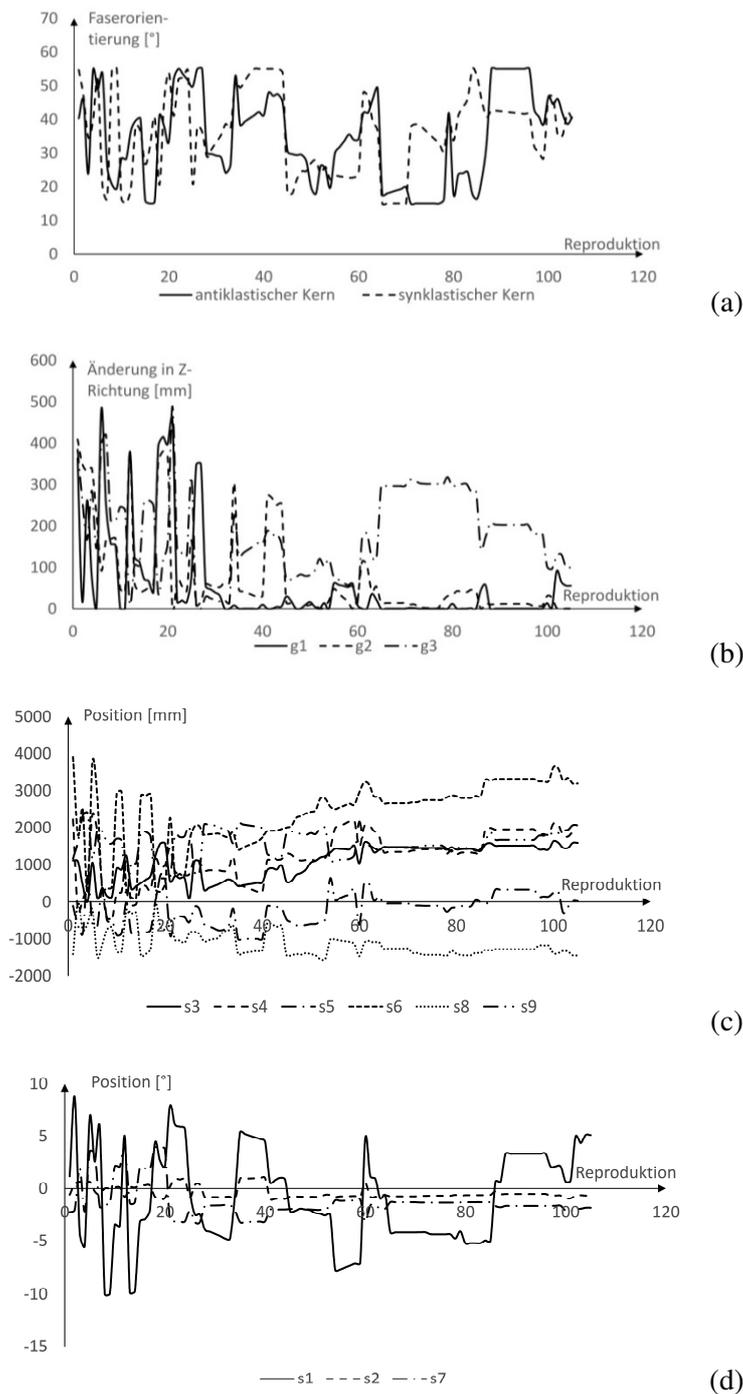
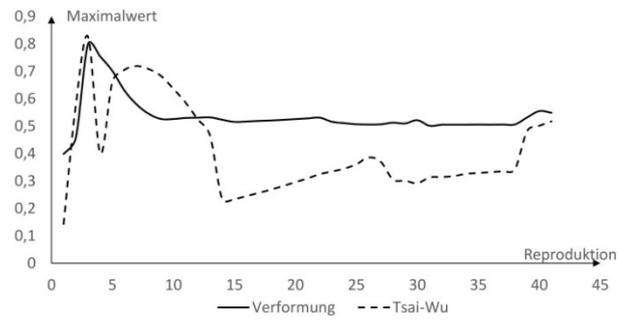


Abbildung 81: (a) Verlauf des Laminataufbaus für die antiklastischen und synklastischen Bauteile; (b) Verlauf der Parameter g; (c) Parameter der Starrkörperbewegung für Antiklastischer Kern; (d) Parameter der Rotation für Antiklastischer Kern

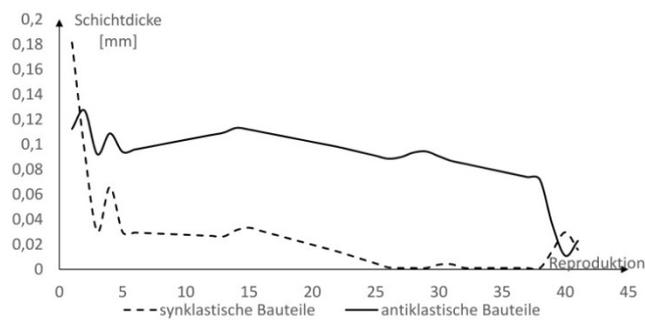
Optimierung von Form und Material

Die Einstellung des Optimierungsalgorithmus ergibt sich für die Form- und Materialoptimierung aufgrund der geringeren Anzahl an Unbekannten wie folgt: Die Kolonie besteht aus insgesamt 12 Bakterien, dessen Reproduktion insgesamt 40-mal stattfindet. Die Lebensdauer jeder Bakterie beträgt vier Iterationen und die Schwimmschritte eine maximale Iteration von acht. Im Vergleich zur multidisziplinären Optimierung, fallen die Parameter der Starrkörperbewegung weg. Somit setzt sich das Optimierungsproblem aus sieben Parametern zusammen. Diese sind die drei Parameter der globalen Geometrie g_1 - g_3 , die zwei Wickelwinkel f_1 - f_2 und die jeweiligen Schichtdicken l_1 - l_2 für die synklastischen und antiklastischen Bauteile. Die Wertebereiche der Parameter sind identisch zu den Wertebereichen der multidisziplinären Optimierung. Die Zielfunktion ist so gewichtet, dass die Reduzierung der Verformung, der Materialausnutzung und die der Schichtdicke in gleichem Maße erfolgt.

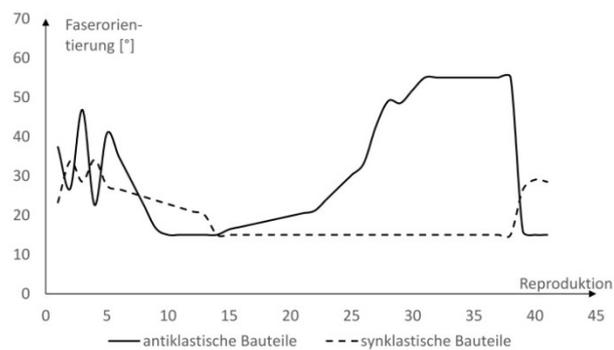
In Abbildung 82 sind die Verläufe der Zielfunktion und die Aufschlüsselung der Funktionswerte dargestellt. Zu Beginn der Optimierung ist der Zusammenhang zwischen Schichtdicke, Materialausnutzung und Verformung deutlich zu erkennen. Die Reduzierung dieser drei Zielvariablen erfolgt im Verlauf der Optimierung durch die Faserorientierung der Bauteile (Parameter f) und die Geometrie (Parameter g). Aufgrund der Erhöhung der geometrischen Steifigkeit, können einerseits die Verformungen reduziert werden und andererseits die Spannungen im Laminat. Die immer bessere Ausrichtung der Fasern während der Optimierung ermöglicht es hingegen, die Verformung aufgrund der Erhöhung der Steifigkeit zu reduzieren und die Materialausnutzung zu verbessern (Abbildung 82 (a)).



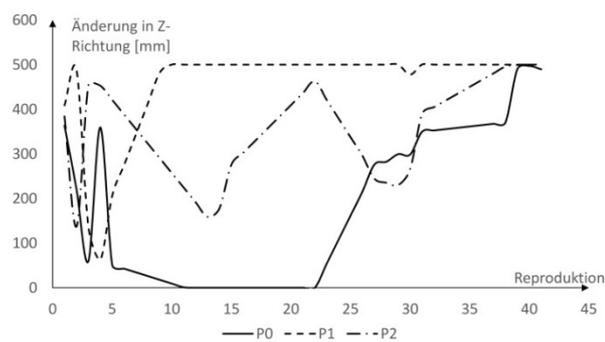
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 82: Ergebnisse der Form- und Materialoptimierung: (a) Verlauf der Materialausnutzung und der Verformung; (b) Verlauf der Parameter der Schichtdicke l_1 und l_2 ; (c) Verlauf der Parameter f_1 und f_2 der Faserorientierung; (d) Verlauf der Parameter g_1 - g_3 der Geometrie

Die Materialausnutzung des CFKs, welche durch das Tsai-Wu-Kriterium errechnet wurde, liegt bei etwa 60 %. Für die Materialeigenschaften der Einzelschichten wurden die in den Versuchen ermittelten Zugfestigkeiten und Steifigkeiten verwendet. Im Verlauf der Optimierung variiert der Ort der maximalen Beanspruchung, so dass bei jedem Berechnungsschritt der jeweilige maßgebende Wert berücksichtigt wird. Zur gleichen Zeit wird die Schichtdicke des Laminats reduziert (Abbildung 82 (b)). In Abbildung 82 (c) ist der Verlauf der Parameter für die Faserorientierung der Einzelschichten dargestellt, in Abbildung 82 (d) der Verlauf der Parameter g_1 , g_2 und g_3 . Die Parameter g streben den maximalen möglichen Wert an und vergrößern somit in erster Linie die Krümmung der Fläche in Querrichtung. Dies hat zur Folge, dass sich der Hebelarm vergrößert und damit die Biegebeanspruchung in der Struktur reduziert. Der Parameter f strebt einen Winkel von $\pm 15^\circ$ für die anti-klastischen Bauteile und $\pm 28^\circ$ für die synklastischen Bauteile an.

Ein Vergleich der Ergebnisse zwischen der multidisziplinären Optimierung und den beiden alternativen Optimierungsmodellen zeigt deutliche Unterschiede. In Tabelle 10 sind die wesentlichen Ergebnisse der drei Optimierungsmodelle dargestellt. Ein erster wesentlicher Unterschied ist die benötigte Rechenzeit, die stark von der Anzahl der Parameter beeinflusst ist. So benötigt die multidisziplinäre Optimierung bis zu 51 Stunden, die der Form- und Materialoptimierung hingegen knapp die Hälfte. Die Rechenzeit der Herstellungsoptimierung liegt jedoch in derselben Größenordnung wie die der multidisziplinären Optimierung, was auf die fast gleiche Anzahl an Parametern zurückzuführen ist. Ein weiterer Unterschied ist bei den ermittelten Ergebnissen der Zielfunktion zu erkennen. So liegt die Materialausnutzung der Lösung der multidisziplinären Optimierung bei 92%, die der Form- und Materialoptimierung lediglich bei 51%. Ein ähnliches Verhältnis ist bei den Verformungsergebnissen zu beobachten. Die benötigten Schichtdicken der Lamine bei der Form- und Materialoptimierung liegen dabei deutlich unter denen der MDO. Die benötigte Schichtdicke liegt im Vergleich zu den erzielten Schichtdicken durch die MDO nur bei 26 % für die synklastischen Bauteile. Vergleicht man den Lösungswert des prozentualen Verschnitts der Herstellungsoptimierung zur MDO, so ist dieser nur um 10% besser.

Tabelle 10: Vergleich der Ergebnisse zwischen den Optimierungen

Ergebnisse	Herstellungs- optimierung	Form- und Material- optimierung	Multidisziplinäre Optimierung
Anzahl der Parameter	23	7	25
Zeit in [h]	49.5	24	51
Nachweis Tsai-Wu		0.51	0.92
Verformung [L/200]		0.55	0.92
Verschnitt [%]	35	-	39
Laminatdicke [mm]	-	0.022 und 0.016	0.082 und 0.038
Faserorientierungen K1	$\pm 41^\circ$	$\pm 15^\circ$	$\pm 21^\circ$
Faserorientierungen K2	$\pm 40^\circ$	$\pm 28^\circ$	$\pm 30^\circ$

Es zeigt sich, dass die Krümmungen in Bezug auf das Tragverhalten einerseits die Schalen- und Bogentragwirkung und andererseits die statische Höhe des faltwerks begünstigen. Für die Herstellung hingegen sind die Krümmungen von Nachteil, da sich bei kleinen Krümmungsradien der Anteil der Verschnittfläche erhöht. Die geometrischen Parameter reduzieren sich an dieser Stelle entsprechend. Bei der multidisziplinären Optimierung hingegen, herrscht ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen den Eigenschaften der Herstellung und denen des Tragverhaltens. Die geometrischen Parameter oder die des Faseraufbaus liegen entsprechend zwischen diesen beiden Extremen.

7.3 Beispiel 3

Bei dem dritten Anwendungsbeispiel handelt es sich um ein Dachtragwerk mit einer Länge von 34 m und einer maximalen Breite von 18 m. Die SVS-Elemente sind dabei nicht breiter als 4 m und zur Herstellung der Bauteile werden maximal vier Kerne verwendet. Zwei der Kerne bestehen aus synklastischen Bauteilen, die beiden anderen aus antiklastischen Bauteilen. Die definierten Randbedingungen führen somit zu 16 Bauteilen, von denen acht eine synklastische und acht eine antiklastische Geometrie aufweisen.

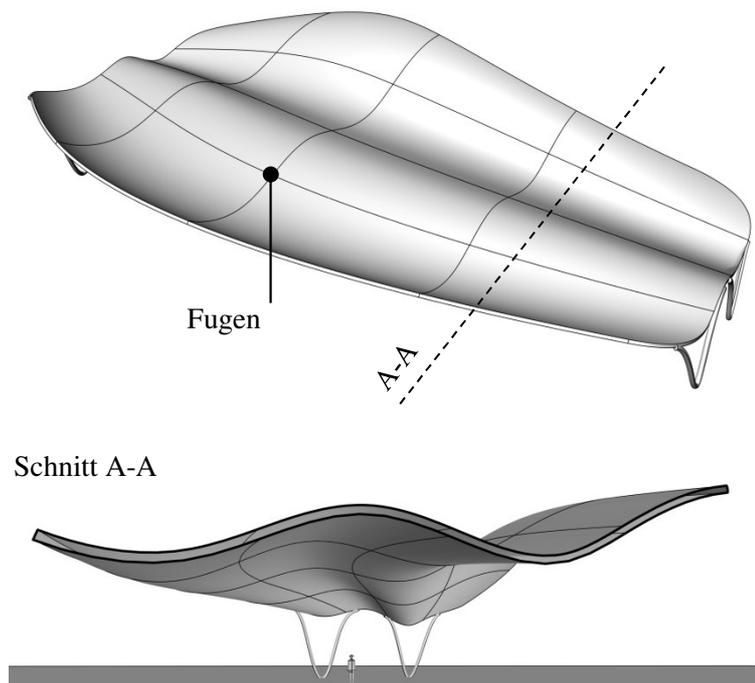


Abbildung 83: Entwurf: Geometrie und Einteilung der Fläche (Fugen)

In Abbildung 83 ist die definierte Geometrie und das entsprechende Fugenbild dargestellt. Der Verlauf der Fugen und das Krümmungsverhalten der Fläche sind dabei aufeinander abgestimmt. Das Dach spannt einachsrig über insgesamt 34 m und ist an den Rändern horizontal und vertikal gehalten (Abbildung 84 (a)). Die einwirkende Flächenlast beträgt 3 kN/m^2 und entspricht in etwa dem Eigengewicht der Konstruktion.

7.3.1 Ergebnis der multidisziplinären Optimierung

Die Einstellung des Optimierungsalgorithmus setzt sich wie folgt zusammen: Die Kolonie besteht aus insgesamt 40 Bakterien, die wiederum in vier Gruppen unterteilt ist. Die Zellteilung N_{re} findet dabei 60-mal statt. Jede Bakterie führt dabei zehn Schritte während ihrer Lebensdauer aus. Innerhalb dieser führt sie maximal acht weitere Schritte aus. Die Schrittweite N_W wird für jeden Schritt adaptiv festgelegt und ist abhängig von den Parametern und der letzten ermittelten Lösung.

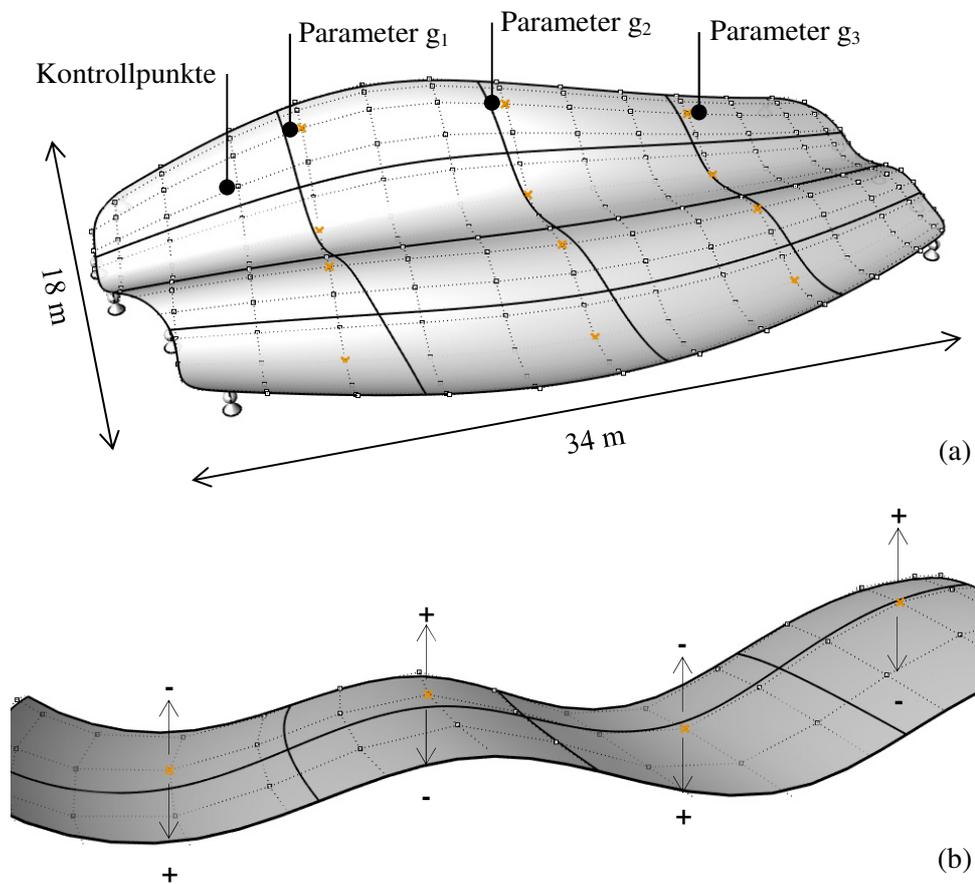


Abbildung 84: (a) Darstellung des statischen Systems und der Parameter g_1 bis g_3 (in orange); (b) Definition des Wertebereichs in Z-Richtung (exemplarisch anhand des Parameter g)

Das Optimierungsproblem stellt sich aus insgesamt 35 Parametern zusammen. Die NURBS-Fläche wird durch drei Parameter g gesteuert. Jeder Parameter beeinflusst dabei mehrere Kontrollpunkte, indem er die Z-Koordinate verändert (Abbildung 84 (b)). Der Wertebereich in Z-Richtung liegt bei -500 bis +500 mm und die Schrittweite bei 15 mm. Die Orientierung der Z-Ordinate der jeweiligen Kontrollpunkte ist unterschiedlich definiert. Die Parameter der Starrkörperbewegungen s stellen wieder den größten Anteil an Unbekannten dar. Jeder Kern wird durch sechs Parameter definiert, bei vier Kernen führt dies zu insgesamt 24 Parametern. Der Wertebereich der Translationen liegt zwischen -1000 mm und +1000 mm. Aufgrund der vier Kerne ergeben sich für f und l jeweils vier Parameter.

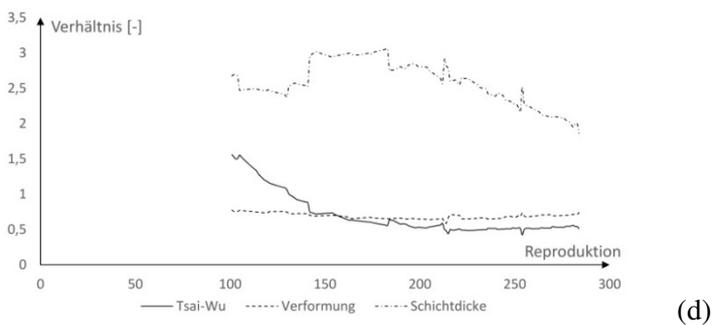
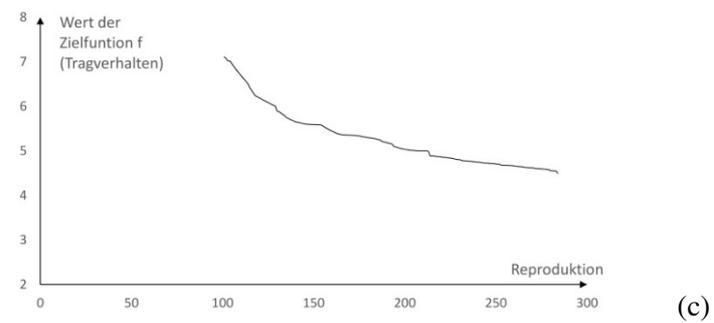
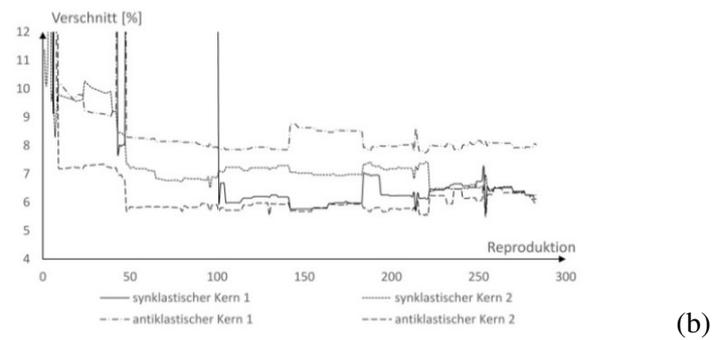
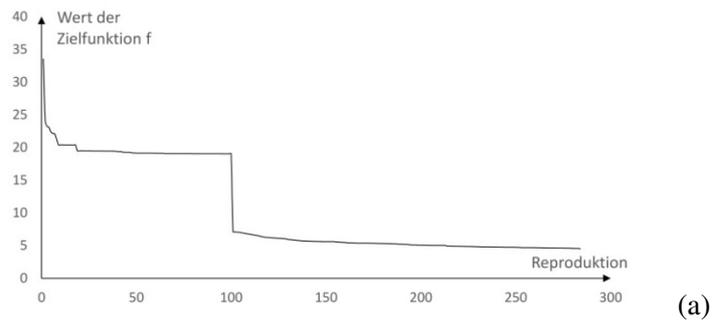
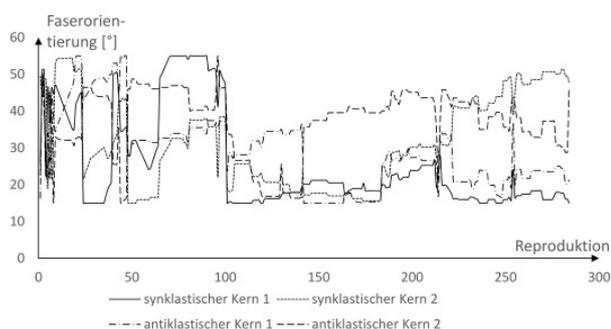
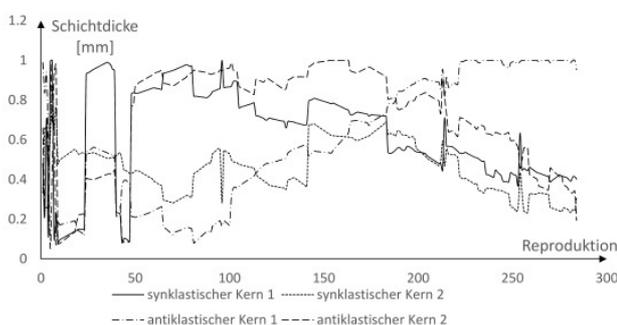


Abbildung 85: Ergebnis der MO: (a) Verlauf der Zielfunktion; (b) Verlauf der prozentualen Verschnittfläche; (c) Verlauf der Tragwerkseigenschaften; (d) Verlauf der Materialausnutzung, der Verformung und der aufsummierten Einzelschichtdicke aller Lamine



(a)



(b)

Abbildung 86: Verlauf der Variablen während der Optimierung: (a) der Faserorientierung f ; (b) der Schichtdicke l

Der Wertebereich des Wickelwinkels liegt zwischen einem minimalen Wert von $\pm 15^\circ$ und einem maximalen Wert von $\pm 55^\circ$. Die Dicke der Betonschicht beträgt 13 cm und bleibt während der Optimierung konstant. Das obere und untere Laminat der Sandwichverbundschalung besteht aus 4 Einzelschichten. Die Schichtdicke der Einzelschicht kann dabei zwischen 0.05 mm und 1.0 mm liegen. Um die parallele Berechnung effizienter zu gestalten, findet eine Berechnung des statischen Modells erst statt, nachdem der Verschnitt einen prozentualen Anteil von 40 % erreicht hat.

Der Verlauf der Zielfunktion ist in Abbildung 85 (a) dargestellt. Die rechte Grafik zeigt dabei den Verlauf ab dem 100-ten Iterationsschritt. In (b) ist dargestellt, wie sich die prozentuale Verschnittfläche der einzelnen Kerne um 40 % reduziert, gleichzeitig wird auch die Leistungsfähigkeit der Tragstruktur verbessert. Der Tragfähigkeitsnachweis der Sandwichverbundschalung wird eingehalten und zur selben Zeit wird die Schichtdicke der Lamine reduziert. Der Verlauf der Parameter für die Faserorientierung und der Laminatschichtdicken der vier Kerne ist in Abbildung 85 (c) dargestellt. Der Mate-

rialverbrauch des CFKs konnte im Vergleich zum Startwert um fast 50 % verringert werden. Dabei ist gewährleistet, dass mit den ermittelten Faserwinkeln auch die Kerne bewickelt werden können. In Abbildung 87 sind die ermittelte Endgeometrie (orange) und die Startgeometrie dargestellt. Die für die Herstellung der 16 Sandwichverbundbauteile benötigten zusammengesetzten Kerne sind in Abbildung 88 dargestellt.

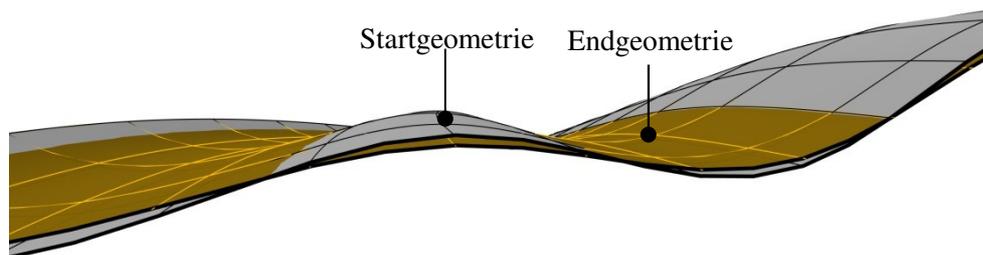


Abbildung 87: Schnitt durch die Geometrie: Änderung der Startgeometrie zur Endgeometrie

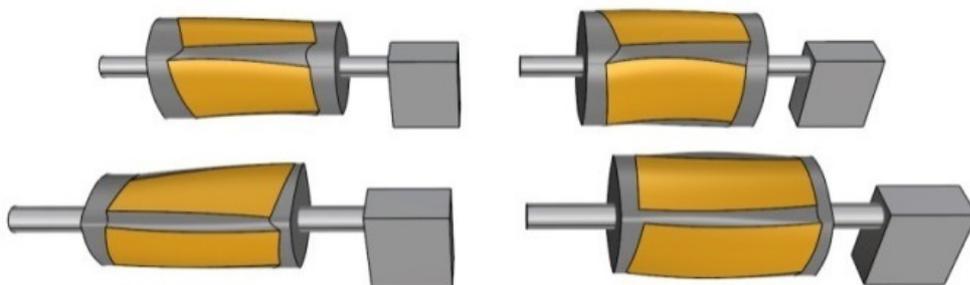


Abbildung 88: Zusammengesetzte Kerne

7.3.2 Validierung der Ergebnisse

Abschließend werden die Ergebnisse der multidisziplinären Optimierung mit denen einer Form- und Materialoptimierung und der einer Herstellungsoptimierung verglichen. Auf eine ausführliche Beschreibung des OA und der Modelle wird an dieser Stelle verzichtet.

Optimierung von Form und Fertigung

In Abbildung 89 (a) ist der Optimierungsverlauf und die prozentuale Verschnittfläche der vier Kerne dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der prozen-

tuale Anteil der Verschnittfläche bereits ab dem 20igsten Reproduktionsschritt deutlich reduziert wird. Ab etwa der 150igsten Reproduktion nimmt das Konvergenzverhalten zu. In Abbildung 89 (b) sind die Verläufe der vier zusammengesetzten Kerne aufgeschlüsselt dargestellt. Der jeweilige Anteil der Verschnittfläche der einzelnen Kerne variiert dabei zwischen 5 bis 7 %.

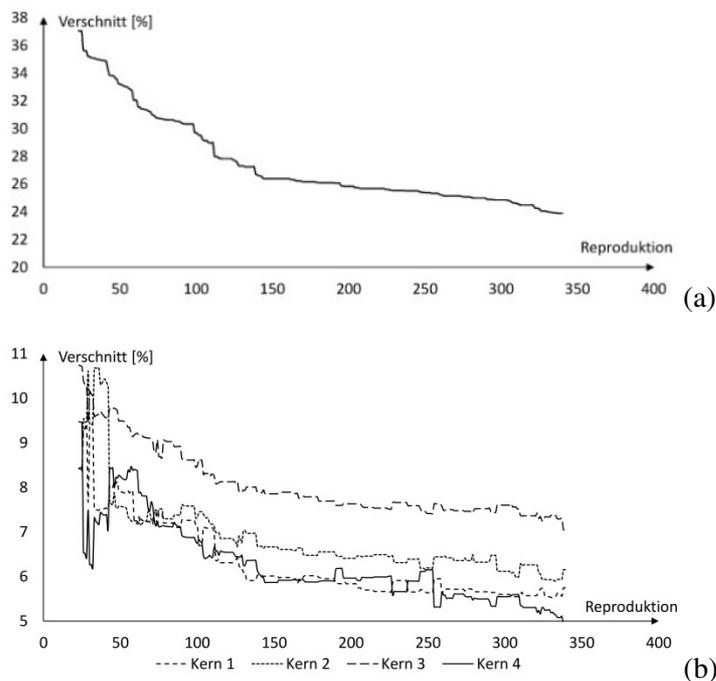


Abbildung 89: Optimierung von Form und Fertigung: (a) prozentualer Verschnitt aller Kerne; (b) prozentualer Verschnitt der einzelnen Kerne

Optimierung von Form und Material

In Abbildung 90 ist der Verlauf des allgemeinen Zielwerts der Form- und Materialoptimierung dargestellt. Die ermittelte Laminatdicke der Bauteile liegt bei 0.29 mm. Die Materialausnutzung des Laminats liegt bei 32 % und die der Verformung bei 69 %.

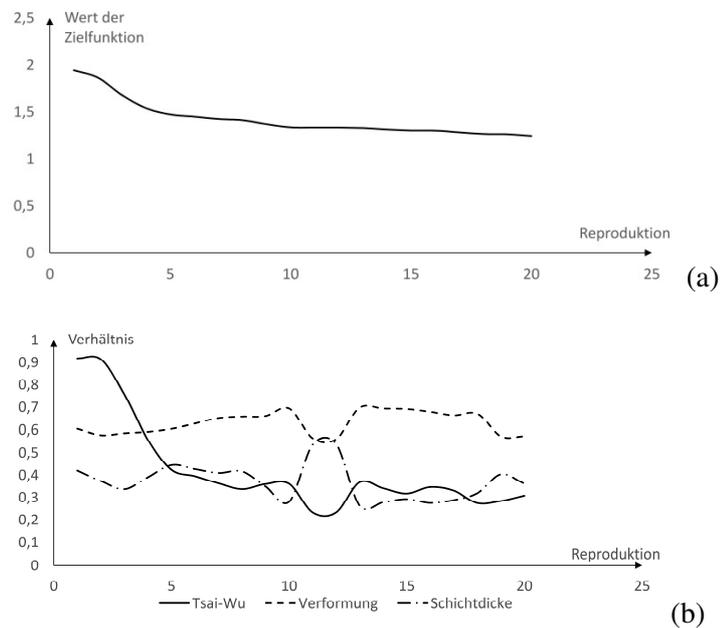


Abbildung 90: Optimierung von Form und Material: (a) Verlauf der Zielfunktion; (b) Verlauf der Ergebnisse der Materialausnutzung, der Verformung und der aufsummierten Einzelschichtdicke aller Lamine

In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Zielvariablen aus den einzelnen Optimierungsverfahren dargestellt. Vergleicht man die Ergebnisse der multidisziplinären Optimierung mit denen der Form- und Materialoptimierung, sowie der Herstellungsoptimierung, so zeigt sich, dass beide schlechter sind. So ist beispielsweise die Materialausnutzung der Sandwichverbundschalung bei der MDO höher als bei der Form- und Materialoptimierung. Um einen Vergleichswert an dieser Stelle für die Herstellungsoptimierung zu generieren, wird die Materialausnutzung mit den ermittelten Parameter der Geometrie durch eine separate FE-Analyse bestimmt. Als Laminatdicke wird an dieser Stelle die ermittelte Laminatdicke durch die MDO gewählt. Für die Herstellungsoptimierung ergibt sich somit eine Materialausnutzung von 505 %. Die ermittelte Materialausnutzung der Form- und Materialoptimierung beträgt im Vergleich dazu nur 30 %.

Die Verschnittfläche, welche durch die multidisziplinäre Optimierung erzielt wird, liegt im Vergleich zur Herstellungsoptimierung geringfügig darüber. Für die Form- und Materialoptimierung liegt hierzu kein Wert vor. Eine Bewickelung der antiklastischen Kerne unter einem Wickelwinkel von $\pm 5^\circ$ wäre an dieser Stelle nicht möglich.

Tabelle 11: Vergleich der Optimierungsergebnisse

Ergebnisse	Herstellungs- optimierung	Form.- und Material- optimierung	Multidisziplinäre Optimierung
Anzahl der Parameter	31	5	35
Tsai-Wu	(5.05)	0.32	0.54
Verformung [L/200]	(1.16)	0.69	0.71
Verschnitt [%]	23	-	26
Laminatdicke [mm]	-	0.29	0.4, 0.2, 1, 0.34
Faserorientierungen K1	$\pm 34^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 16^\circ$
Faserorientierungen K2	$\pm 18^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 50^\circ$
Faserorientierungen K3	$\pm 53^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 20^\circ$
Faserorientierungen K4	$\pm 48^\circ$	$\pm 5^\circ$	$\pm 29^\circ$

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Fertigung der Verbundschalung. Um die Herstellung der freigeformten Bauteile durch das Wickelverfahren zu ermöglichen, wird das Konzept des zusammengesetzten Kerns vorgestellt. Das Vorgehen und die notwendigen digitalen Werkzeuge, wie die zur Kerngenerierung und zur Analyse der Wickelbarkeit eines Kerns, werden hierzu aufgezeigt. Im Vergleich zum bisherigen Verfahren können mit diesem Konzept mehrere unterschiedliche Bauteile in einem Wickelvorgang hergestellt werden. Außerdem ist die Herstellung nicht mehr auf Bauteile mit geschlossenem Querschnitt und mit synklastischer Geometrie beschränkt. Die zusätzlichen Fertigungsschritte tragen letztlich dazu bei, die formschlüssige Schubverbindung in den Herstellungsprozess zu integrieren. Dadurch kann eine wirtschaftliche Herstellung der Sandwichverbundschalung gewährleistet werden.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird das Tragverhalten der Flächenverbundbauweise untersucht. Die vorgestellte Flächenverbundbauweise, bestehend aus einer verlorenen CFK-Sandwichverbundschalung und Beton, stellt dabei einen neuen und unerforschten Ansatz für freigeformte Flächentragwerke dar. Neben der Sandwichverbundschalung werden zusätzlich zwei weitere Konzepte vorgestellt. Im Hinblick auf die Trag- und Herstellungseigenschaften, zeichnet sich die Sandwichverbundschalung im Vergleich zu den beiden anderen Verbundsystemen jedoch als das bessere System ab. So geht aus den Orientierungsversuchen zum Verbundverhalten hervor, dass eine ausreichende Schubübertragung zwischen CFK-Sandwichverbundschalung und Beton vorhanden ist und die Zugfestigkeiten des CFKs erreicht werden. Für die Tragfähigkeit der Flächenverbundbauweise ist daher keine Stahlzugbeweh-

rung in der unteren Lage erforderlich. Im Vergleich zur Stahlbetonbauweise entfallen somit eine zeitaufwendige Bewehrungsplanung und eine kostenintensive Herstellung. Neben den Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit der Flächenverbundbauweise wird der Einfluss des Wickelwinkels und des alkalischen Milieus auf die Eigenschaften des CFK-Materials bestimmt. Dabei ist eine Reduzierung der Materialeigenschaften des Laminats infolge der Alkalireaktion zu beobachten. Im Zusammenhang mit der Ermittlung der mechanischen Eigenschaften des CFKs werden zwei Konzepte zur Fügung der Schalungselemente untersucht. Hierzu werden für die vorgeschlagene Niet- und Klebeverbindung mechanische Orientierungsversuche in Abhängigkeit des Wickelwinkels durchgeführt. Aufgrund der besseren Kraftübertragung der Klebeverbindung im Vergleich zur Nietverbindung, wird die Klebeverbindung als das geeignetere Konzept erachtet.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird für die Flächenverbundbauweise eine integrative Planungsstrategie vorgestellt. Der notwendige Planungsablauf und die dargestellten Entwurfsprinzipien sind hierzu allgemein anwendbar. Anhand von praxisnahen Beispielen werden zudem die identifizierten Parameter, die eine Wechselwirkung der Planungsaufgaben verursachen, und die Anwendung der integrativen Planungsstrategie dargestellt. Um im Planungsprozess die bestmögliche Lösung zwischen Geometrie, Herstellung und Tragverhalten zu definieren, wird abschließend eine multidisziplinäre Optimierungsstrategie vorgestellt. Der entwickelte Framework, bestehend aus dem Optimierungsverfahren und der Herstellungs- und der FEM-Analyse, ist dabei für die Planung verschiedener Geometrien anwendbar. Die durchgeführten Vergleichsuntersuchungen der multidisziplinären Optimierung mit einer Herstellungsoptimierung, sowie mit einer Form- und Materialoptimierung beweisen, dass durch die verfolgte Strategie das beste Zusammenspiel zwischen Geometrie, Tragverhalten und Fertigung bestimmt werden kann. Dies zeigt sich darin, dass die beiden verglichenen Optimierungsmodelle Ergebnisse liefern, die entweder nicht baubar oder aus statischen Gründen nicht zu vertreten sind. Die Tragwerks- und die Herstellungseigenschaften der freigeformten Flächenverbundbauweise können demnach nur mithilfe einer multidisziplinären Optimierungsstrategie verbessert werden. Der entwickelte Optimierungsalgorithmus lässt sich darüber hinaus nicht nur für die

Planung der Flächenverbundbauweise verwenden, sondern ist auch auf andere Optimierungsprobleme übertragbar.

8.2 Anregungen für weiterführende Arbeiten

Das in dieser Arbeit vorgestellte Wickelverfahren mit zusammengesetztem Kern ist im Hinblick auf die Herstellung der Verbundschalung entwickelt worden. Grundsätzlich erlaubt das Wickelverfahren nun freigeformte faserverstärkte Kunststoffbauteile herzustellen. Dies führt zu der Frage, ob das Verfahren für andere Anwendungen genutzt werden kann und was zu verbessern gilt. Ein denkbarer Ansatz liegt hierbei in der Verwendung eines neuen Kernmaterials. Dies kann, wie bei der Herstellung von Stahlgussteilen, beispielsweise 3d-gedruckter Sand sein. Ein Vorteil von Sand liegt darin, dass das Material unmittelbar nach seiner Verwendung recycelt und in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden kann. Neben den ökologischen und wirtschaftlichen Vorteilen sind aufgrund der Auswaschbarkeit des Materials außerdem komplexere Bauteile herstellbar. Ein Forschungsprojekt am *Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen* beschäftigt sich aktuell mit diesem Ansatz.

Aufbauend auf den mechanischen Versuchen in dieser Arbeit, lassen sich eine Reihe an Themen für weitere Untersuchungen erkennen. Dabei liegt ein Interesse darin, die Schubeigenschaften der Sandwichverbundschalung anhand großer Versuchsreihen zu betrachten. Einen wesentlichen Einfluss auf die Verbundtragwirkung haben dabei die Größe und die Anzahl des Sacklochdurchmessers, da der Beton maßgebend für die Schubübertragung verantwortlich ist. Des Weiteren spielen Faktoren wie die Lasteinleitungslänge und die Bauteilhöhe eine wichtige Rolle. Neben den Verbundeigenschaften zwischen CFK-Sandwichverbundschalung und Beton, ist auch das Tragverhalten der Sandwichverbundschalung an sich von Interesse. Relevante Parameter stellen dabei die Schichtdicke, der Laminataufbau oder die Sandwichkerndicke dar. Neben dem Einfluss der Materialparameter stellt sich ebenso die Frage zum Einfluss der Laststellung auf das Tragverhalten. Durch weitere Arbeiten muss an dieser Stelle untersucht werden, ob das Schubverhalten der Sandwichverbundschalung durch einen zweiachsigen Lastabtrag, wie bei

einer Plattenwirkung einer klassischen Stahlbetondecke, begünstigt wird. Dies würde es unter Umständen erlauben, teilweise oder sogar ganz auf eine Schubbewehrung zu verzichten. Auch eine Untersuchung des Tragverhaltens der Flächenverbundbauweise infolge einer negativen Momentenbeanspruchung wäre aufschlussreich, da die hieraus entstehenden Druckkräfte in den Sandwichdeckschichten zu einem Beulversagen führen können. An dieser Stelle ist auch zu erwähnen, dass es sich bei den Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit um Kurzzeitversuche handelt, Fragestellungen zum Langzeitverhalten bleiben daher unberücksichtigt. Im Hinblick auf die Untersuchung des mechanischen Fügekonzepts der Schalungselemente, beschränkt sich diese Arbeit auf eine erste Beurteilung zweier Konzepte. Hierzu zeichnen sich eine Reihe an Fragestellungen ab. Bei der Klebeverbindung betrifft dies, neben der Wahl des Klebers, bzw. der Matrix, auch die Anordnung der gefügten Bauteile. Neben den geometrischen Aspekten wie Niet- und Randabständen oder die Möglichkeit einer zweireihigen Anordnung, bleiben bei der Nietverbindung auch Fragen des Nietentyps unbeantwortet.

Bei der integrativen Planungs- und Optimierungsstrategie der Flächenverbundbauweise lassen sich ebenso eine Reihe an Forschungsthemen erkennen. So wird zum Beispiel der Einfluss des Fugenverlaufs bei der Optimierung kaum berücksichtigt. Im Hinblick auf die Tragwerks- und Herstellungseigenschaften wäre an dieser Stelle jedoch von Interesse, inwieweit die Eigenschaften durch eine gezielte Änderung des Fugenverlaufs verbessert werden können. Außerdem lässt sich das Modell durch weitere Variablen, wie beispielsweise die Permutation oder die Betondicke, erweitern. Anhand von Parameterstudien müsste der Einfluss dieser Variablen auf das Optimierungsergebnis weiter untersucht werden. Im Hinblick auf die multidisziplinäre Optimierungsstrategie stellt sich die Frage, ob dieser Ansatz auch bei der Planung von anderen Bauweisen hilfreich sein könnte. Dabei müssen die berücksichtigten Modelle nicht nur auf das Tragverhalten und die Herstellung beschränkt sein, sondern könnten durch energetische Simulationsmodelle ergänzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Knippers, J., Waimer, F., Oppe, M. (2015). Faserverbundwerkstoffe im Bauwesen. *Stahlbau Kalender 2015*, 455-498.
- [2] Engel, H. (2009). Tragsysteme - Structure systems. 4. Aufl. Ostfildern: Hatje Cantz Verlag.
- [3] Voigt, P. (2007). Die Pionierphase des Bauens mit glasfaserverstärkten Kunststoffen (GFK) 1942 bis 1980.
- [4] Weilandt, A., Grohmann, M., Bollinger, K., & Wagner, M. (2009). ROLEX LEARNING CENTER in Lausanne: From conceptual design to execution. In *Symposium of the IASS (50th. 2009. Valencia). Evolution and Trends in Design, Analysis and Construction of Shell and Spatial Structures: Proceedings*. Editorial Universitat Politècnica de València.
- [5] Blandini, L., Schuster, A., & Sobek, W. (2012). The Railway Station “Stuttgart 21” Structural Modelling and Fabrication of Double Curved Concrete Surfaces. In *Computational Design Modelling* (pp. 217-224). Springer Berlin Heidelberg.
- [6] Hoffmann, F., Motzko, C., Corsten, B. (2012). Aufwand und Kosten zeitgemäßer Schalverfahren. 3. Aufl., Neu-Isenburg: Zeittechnik Verlag.
- [7] Möller, R., Pöter, H., & Schwarze, K. (2011). *Planen und Bauen mit Trapezprofilen und Sandwichelementen (Vol. 2)*. John Wiley & Sons.
- [8] Dokumentation 614 Stahlgeschossbau – Deckensysteme, Bauen mit Stahl eV, Düsseldorf, 2005.

-
- [9] West, M. (2001). Fabric-formed concrete structures. In *Proceedings First International Conference on Concrete and Development, Tehran, Iran, April* (pp. 133-142).
- [10] Oesterle, S., Vansteenkiste, A., & Mirjan, A. (2012). Zero Waste Free-Form Formwork. In *Proceedings of second international conference on flexible formwork*.
- [11] Schaumann, E. (2008). Hybrid FRP-lightweight concrete sandwich system for engineering structures.
- [12] <http://gramaziokohler.arch.ethz.ch/>
- [13] Cheng, L., & Karbhari, V. M. (2006). New bridge systems using FRP composites and concrete: a state-of-the-art review. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 8(4), 143-154.
- [14] La Magna, R., Gabler, M., Reichert, S., Schwinn, T., Waimer, F., Menges, A., & Knippers, J. (2013). From nature to fabrication: biomimetic design principles for the production of complex spatial structures. *International Journal of Space Structures*, 28(1), 27-40.
- [15] Waimer, F., La Magna, R., Reichert, S., Schwinn, T., Menges, A. and Knippers, J. (2013), Bionisch-inspirierte Faserverbundstrukturen. *Bautechnik*, 90: 766–771.
- [16] La Magna, R., Waimer, F., & Knippers, J. (2012). Nature-inspired generation scheme for shell structures. *Proceedings of the International Symposium of the IASS-APCS Symposium, Seoul, South Korea, 2012*
- [17] Knippers, J., Cremers, J., Gabler, M., Lienhard, J. (2010): *Atlas Kunststoffe + Membranen: Werkstoffe und Halbzeuge, Formfindung und Konstruktion*, Edition Detail
- [18] Flemming, M., Ziegmann, G., & Roth, S. (1998). *Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix*. Springer Verlag.

- [19] Romagna, J. H. (1997). *Neue Strategien in der Faserwickeltechnik* (Doctoral dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich).
- [20] *CADWIND V9 User Manual*, MATERIAL S. A. Brussels, Belgium.
- [21] Bader, M. G. (2002). Selection of composite materials and manufacturing routes for cost-effective performance. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*, 33(7), 913-934.
- [22] Wörner, M., Sawodny, O.: Automatisierte Herstellung funktional gradierter Betonbauteile. *Leicht Bauen mit Beton SPP 1542*
- [23] Herrmann, M. (2015). Gradientenbeton - Untersuchungen zur Gewichtsoptimierung einachsiger biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile.
- [24] Hasselhoff, J., Cheng, L., Waimer, F., Gabler, M., & Knippers, J. (2015). Design, manufacturing and testing of shear-cone connectors between CFRP stay-in-place formwork and concrete. *Composite Structures*, 129, 47-54.
- [25] Schlaich, J., et al. "Die Brücke über das Nesenbachtal im Zuge der Ostumfahrung Stuttgart-Vaihingen." *Beton-und Stahlbetonbau* 95.11 (2000): 678-687.
- [26] <http://www.3d-core.com>
- [27] Thewes, M., & Vollmann, G. (2007). Applications of a shotcrete robot for creating an immediate comparability of mix designs.
- [28] Fritsch, B. (2014) Experimentelle Studie zu Materialeigenschaften und Füge-techniken von CFK: Einfluss von Temperatur, Faserwinkel und basischem Milieu. Diplomarbeit, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen
- [29] Rüschi, H. (1969). Die Streuung der Eigenschaften von Schwerbeton. Vorbericht zum IBVH-Symposium: *Über neue Aspekte der Tragwerkssicherheit und ihre Berücksichtigung in der Bemessung*.

-
- [30] Bletzinger, K.-U., Firl, M. & Daoud, F. (2005). Techniken der Formoptimierung. *Proceedings 2. Weimarer Optimierungs- und Stochastiktag 2005*
- [31] Sobieszczanski-Sobieski, J., & Haftka, R. T. (1997). Multidisciplinary aerospace design optimization: survey of recent developments. *Structural optimization*, 14(1), 1-23.
- [32] Duddeck, F. (2005). Multidisziplinäre Optimierung im Produktentwicklungsprozess der Automobilindustrie. *Proceedings 2. Weimarer Optimierung-und Stochastiktag 2005*.
- [33] O'brien, W. J., Browman, H. I., & Evans, B. I. (1990). Search strategies of foraging animals. *American Scientist*, 78(2), 152-160.
- [34] Bonabeau, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). Swarm intelligence: from natural to artificial systems (No. 1). *Oxford university press*.
- [35] <http://www.foodpoisonjournal.com>
- [36] Passino, K. M. (2002). Biomimicry of bacterial foraging for distributed optimization and control. *Control Systems, IEEE*, 22(3), 52-67.
- [37] Freeman, A., 2010: Pro. NET 4 parallel programming in C#. Apress.
- [38] Majhi, Ritanjali, et al. "Efficient prediction of stock market indices using adaptive bacterial foraging optimization (ABFO) and BFO based techniques." *Expert Systems with Applications* 36.6 (2009): 10097-10104.
- [39] Meister, A. (2011). Numerik linearer Gleichungssysteme. Vieweg+Teubner Verlag S.
- [40] Pohlheim, H. (2013). Evolutionäre Algorithmen: Verfahren, Operatoren und Hinweise für die Praxis. Springer-Verlag.
- [41] Schürmann, H. (2005). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin: Springer.
- [42] ANSYS® Academic Research, Release 13.0, Help System, Mechanical APDL, ANSYS, Inc. (2010).

[43] Waimer, F., La Magna, R., & Knippers, J. (2013). Integrative numerical techniques for fibre reinforced polymers - forming process and analysis of differentiated anisotropy. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, .Vol. 54 (2013) N. 178, S. 301 - 309.

[44] Waimer, F., La Magna, R., Reichert, S., Schwinn, T., Menges, A., & Knippers, J. (2013). Integrated design methods for the simulation of fibre-based structures. *4th Design Modelling Symposium Berlin "Rethinking Prototyping"*, Germany

Lebenslauf

seit 2015	Projektingenieur bei Werner Sobek Stuttgart
2013	Verleihung des IASS Hangai Preis
seit 2012	Mitglied des BÜV Arbeitskreis: Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen
2012	Verleihung des Best Paper Awards beim Advances in Architectural Geometry Symposium 2012
seit 2011	Mitglied des CEN/TC 250/WG4 Arbeitskreis: Einführung eines ECs für faserverstärkte Kunststoffbauteile
2010 – 2015	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen der Universität Stuttgart
2010 – 2015	Promotionsstudent an der Universität Stuttgart
2008 – 2010	Projektmitarbeiter bei Werner Sobek Stuttgart
2005 – 2009	Bauingenieurstudium an der Universität Stuttgart
1985	Geboren in Stuttgart