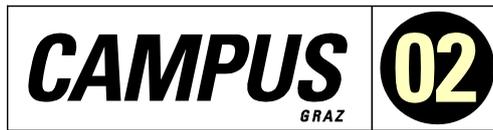


Masterarbeit

ENTWICKLUNG UND FERTIGUNG EINER STRASSENBELEUCHTUNG AUS VERBUNDMATERIALIEN

ausgeführt am



FACHHOCHSCHULE DER WIRTSCHAFT

Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Ing. Georg Hochegger, BSc

1510322002

betreut und begutachtet von

DI(FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger

Graz, im Dezember 2016

Hochegger Georg

Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

A handwritten signature in black ink that reads "Hodegger Georg". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal dotted line.

Unterschrift

DANKSAGUNG

Zu Beginn möchte ich den Geschäftsführern der Firma Geislinger, Herrn Dipl.-Ing. Cornelius Geislinger und Herrn Dipl.-Ing. Matthias Geislinger für die Möglichkeit zur Durchführung dieser interessanten Arbeit danken.

Ein weiterer besonderer Dank gilt auch meinem Vorgesetzten, Herrn Dipl.-Ing Franz Rößler, dem Entwicklungsleiter, Herrn Dr.-Ing. Christof Sigle sowie meinem Betreuer, Herrn DI(FH) Dr. techn. Vinzenz Sattinger für die Unterstützung und die Hilfe bei auftretenden Fragen.

Auch bei meinen Kollegen und allen an dem Projekt beteiligten Mitarbeitern der Firma Geislinger möchte ich mich für Rat und Tat bedanken.

Ein letztes Dankeschön ist meiner Familie und meinem gesamten Umfeld, das mich moralisch unterstützt und für Motivation gesorgt hat, zuzusprechen.

KURZFASSUNG

Im Zuge von baulichen Erweiterungen des Firmenstandorts der Geislinger GmbH wurde die Idee zur Entwicklung einer innovativen, die Produkte widerspiegelnden Beleuchtungslösung geboren. Ein außergewöhnliches Flächenmodell des Architekten (Dipl.-Ing. Dr. Volkmar Burgstaller) liefert hierbei das Design und somit die Basis für die Entwicklung der Verbundbauteile. Die besondere Form und Größe des Modells sind hier gemeinsam mit den gewünschten Materialien die herausfordernden Kriterien.

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich zur Realisierung dieses Projekts mit den Grundlagen der Faserverbundtechnik, beginnend bei den Materialien, über die Bauteildimensionierung, bis hin zu den in Frage kommenden Fertigungsverfahren. Die Ergebnisse werden hierbei auf die vorhandenen Ressourcen und Möglichkeiten angepasst. Der Wiedererkennungswert der bestehenden Produkte ist durch den richtigen Einsatz von Kohlenstoff- und Glasfasern gegeben. Die Straßenbeleuchtung wird dabei in zwei Hauptteile aus Verbundmaterialien, den Mast und Laternenkopf, aufgeteilt. Zur Herstellung dieser Bauteile wird das Wickelverfahren und Handlaminierverfahren eingesetzt. Die Entwicklung der Vorrichtungen für diese Verfahren ist mitunter Thema dieser Arbeit. Durch die praktische Umsetzung wird dabei auf Probleme und Lösungsvarianten eingegangen. Die Arbeit liefert somit kein mögliches Konzept, sondern vielmehr das Ergebnis des realisierten Projektes. Mit der erfolgreichen Montage und Inbetriebnahme der innovativen Straßenbeleuchtung findet das Projekt einen positiven Abschluss.

Das Resultat wird zurzeit firmenintern an einigen Standorten eingesetzt. Einer Vermarktung der im Rahmen dieser Arbeit realisierten außergewöhnlichen Straßenbeleuchtung und dadurch die Erschließung einer neuen Produktparte steht aber nichts im Wege. Durch die modulare zweiteilige Ausführung sind zudem Freiheiten bezüglich Gestaltung von anderen Kopfdesigns gegeben und auf Kundenwünsche könnte eingegangen werden.

ABSTRACT

In the course of structural expansion of the company headquarter of Geislinger GmbH, the idea of developing an innovative and the product portfolio reflecting lighting solution was born. A revolutionary surface model designed by architect Dipl.-Ing. Dr. Volkmar Burgstaller provided the design and thus the basis for the development of the composite parts. The special shape and size of this model are challenging criteria especially in combination with the required materials.

For the realization of this project this master thesis deals with the basics of fiber composite technology, starting with the materials, the steps for component dimensioning and the necessary production processes. The results are adjusted to the available resources and capabilities. The acknowledgement of existing products is provided by the proper mixtures of carbon and glass fibers. Therefore, the street light is split into two main parts consisting of composite materials: the mast and the lantern head. For the production of these components, the filament winding process and a hand lay-up process is used. The development of the equipment to manufacture all parts is also a subject of this thesis. During the actual implementation, problems and solutions are discussed. Thus, this thesis does not provide a possible idea, but rather the result of the realized project. The project finds a positive conclusion with the successful installation and operation of the innovative street light.

This result is currently in use internally at the company site. A future outlook is provided by a possible marketing of this extraordinary street light. Thereby, a new product line may be created. The developed modular design provides some variance. Therefore, possible customer requirements could easily be met.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Unternehmensbeschreibung.....	1
1.2	Ausgangssituation	2
1.3	Aufgabenstellung	2
1.4	Zielsetzung.....	3
2	Faser-Verbund-Kunststoffe	4
2.1	Grundlagen	4
2.2	Fasern.....	6
2.2.1	Wirksamkeit der Faserform.....	6
2.2.2	Einteilung der Fasern.....	7
2.2.3	Faserhalbzeuge	9
2.2.4	Faserauswahl.....	14
2.3	Umwelteinflüsse.....	14
2.3.1	Temperatur	15
2.3.2	Feuchtigkeit.....	15
2.3.3	Strahlung.....	16
2.4	Matrixsysteme.....	16
2.4.1	Duroplastische Matrix	16
2.4.2	Thermoplastische Matrix.....	17
2.4.3	Auswahl von Matrixsystemen	17
2.5	Auslegung und Berechnung	18
2.5.1	Ablauf zur Bauteildimensionierung	19
2.5.2	Ablauf zur Berechnung	20
3	Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen.....	23
3.1	Verfahren zur Herstellung von Rohren	23
3.1.1	Pultrusionsverfahren	23
3.1.2	Wickelverfahren	24
3.1.3	Schleuderverfahren	25
3.1.4	Schlauchblasverfahren	26
3.2	Verfahren zur Herstellung von Freiformbauteilen.....	26
3.2.1	Handlaminieren.....	26
3.2.2	Verlegen von Prepreg.....	27
3.2.3	Harzinjektionsverfahren	28
3.2.4	Harzinfusionsverfahren.....	30
3.3	Auswahl der Fertigungsverfahren.....	31
4	Auslegung der Verbundbauteile.....	34
4.1	Modellierung der Geometrie	34
4.2	Bestimmung des Lagenaufbaus	35
4.2.1	Lagenaufbau des Mastes	35

4.2.2	Lagenaufbau des Laternenkopfes	37
4.2.3	Lagenaufbau des Reflektors und der Konsolen	38
4.3	Berechnung der Komponenten	39
4.4	Dimensionierung der Schnittstellen	39
5	Entwicklung der Vorrichtung zur Mastherstellung	43
5.1	Variante 1: Einteiliger Wickeldorn	44
5.2	Variante 2: 10-teiliger Wickeldorn	48
5.3	Variante 3: 3-teiliger Wickeldorn	54
5.4	Variante 4: Hohler Wickeldorn	57
6	Entwicklung der Vorrichtungen zur Herstellung des Laternenkopfes	60
6.1	Entwicklung der Vorrichtung des Reflektors	61
6.2	Entwicklung der Vorrichtung der Konsolen	62
6.3	Entwicklung der Vorrichtung des Laternenkopfes	64
6.3.1	Konstruktion der Legevorrichtung	64
6.3.2	Konstruktion der Positioniervorrichtung	66
7	Herstellung des Mastes	67
7.1	Herstellung und Montage der Wickelvorrichtung	67
7.2	Wickeln des Mastes	68
7.3	Abziehen des Mastes	71
8	Herstellung des Laternenkopfes	73
8.1	Herstellung der Legevorrichtungen	73
8.2	Anfertigung des Reflektors und der LED – Konsolen	74
8.3	Laminieren des Laternenkopfes	75
9	Montage der Straßenbeleuchtung	78
9.1	Verklebung des Mastes mit dem Laternenkopf	78
9.2	Lackieren der Straßenbeleuchtung	79
9.3	Endmontage der Straßenbeleuchtung	82
10	Resümee und Ausblick	83
	Literaturverzeichnis	84
	Abbildungsverzeichnis	85
	Tabellenverzeichnis	88
	Anhang 1: Datenblatt Kleber Araldite® 2014-1	89
	Anhang 2: Datenblatt Harzsystem EP 127	95
	Anhang 3: Datenblatt Harzsystem Araldite® LY 5085 / Hardener HY 5046-U	99
	Anhang 4: Datenblatt Harzsystem Araldite® LY556 / Aradur® 917 / Accelerator DY 070	105
	Anhang 5: Datenblatt Harzsystem Araldite® LY556 / Hardener XB 3473	111
	Anhang 6: Datenblatt Gewindefestiger Loctite® 275	116

1 EINLEITUNG

Im Zuge von geplanten baulichen Erweiterungen bzw. Umbaumaßnahmen im Jahr 2016 wurde die Idee zur firmeninternen Herstellung von Straßenbeleuchtungen laut. Die Firma Geislinger ist unter anderem Hersteller von Verlagerungskupplungen aus Faserverbundmaterialien, wodurch langjährige Erfahrung auf diesem Gebiet vorhanden ist. Aus diesen Umständen leitet sich auch die Idee zu dieser Masterarbeit ab. Die Arbeit befasst sich mit der Umsetzung und Ausgestaltung der genannten Straßenbeleuchtung, wobei hierzu die Techniken der Faserverbundkunststoffverarbeitung zum Einsatz kommen. Das Knowhow in diesem Bereich ist zwar gegeben, die Firma Geislinger betritt mit der Herstellung der außergewöhnlichen Bauteile jedoch Neuland. Um die Entstehung des Unternehmens sowie die Aufgabenbereiche darzustellen wird im Folgenden kurz die Firma Geislinger beschrieben.

1.1 Unternehmensbeschreibung

Der Firmengründer, Herr Dr.-Ing. Leonhard Geislinger widmete sich zunächst in Dieselmotor-Unternehmen in Deutschland und Frankreich der Entwicklung von Motoren. Um sich seinen eigenen Entwicklungen widmen zu können gründete er 1958 ein Ingenieurbüro.

Anfänglichen Beratungsaufträgen auf dem Gebiet der Thermodynamik und der Drehschwingungen folgten schnell Produktionsaufträge für die eigenentwickelte drehelastische Geislinger Kupplung. Auf dem Funktions-Prinzip der Kupplung beruhend entsteht der Geislinger Schwingungsdämpfer (1962) und als Ergänzung des Produktprogrammes wird noch die biegeelastische Kupplung Flexlink (1971) entwickelt.

Inzwischen wird die Firma in der dritten Generation von Herrn Dipl.-Ing. Cornelius Geislinger gemeinsam mit Herrn Dipl.-Ing. Matthias Geislinger geführt und beschäftigt an zwei Standorten (Hallwang bei Salzburg und Bad St. Leonhard im Lavanttal) bereits über 500 Mitarbeiter. Mit Standorten in Japan, China, Amerika und Süd-Korea ist Geislinger mittlerweile international vertreten.

Die Firma Geislinger GmbH gilt als hochspezialisierter Problemlöser im Bereich der Drehschwingungen. Die Anwendungsgebiete für die Geislinger Produkte liegen vor allem im Bereich von Großdieselmotoren, welche dem Antrieb von Schiffen und Dieselkraftwerken dienen. Weitere Anwendungen betreffen den Antrieb von dieselbetriebenen Zügen, Fahrzeugen und schweren Baggern.

Die weltweite Marktführerschaft erreichte die Firma Geislinger vor allem durch die hohe Lebensdauer und den geringen Wartungsbedarf Ihrer Produkte. So waren schon viele Kupplungen, ohne Austausch der Hauptteile, bis zur Verschrottung der Schiffe im Einsatz.

Geislinger investiert stetig in rationellere Produktion, in Verbesserung der Produkte hinsichtlich Gewicht- und Kosteneinsparung sowie in Neuentwicklungen. Einer dieser Neuentwicklungen, die Glasfaserverbundkupplung konnte inzwischen erfolgreich in den Markt eingeführt werden. Die Entwicklungen auf diesem Gebiet sind in den letzten Jahren stetig vorangeschritten, was zum Neubau einer eigens für Faserverbundverarbeitung ausgelegten Fertigungshalle führte. Ein weiteres Ergebnis dieses Wachstums ist die Tochtergesellschaft Levitaz, die sich mit der Herstellung von Kitefoils aus Faserverbundmaterialien befasst.

1.2 Ausgangssituation

Ein Flächenmodell (siehe Abb. 1) mit der gewünschten Gestaltung des Architekten (Hr. Dipl.-Ing. Dr. Volkmar Burgstaller) stellt die Ausgangssituation dieser Arbeit dar. Dabei ist das äußere Erscheinungsbild der herzustellenden Straßenbeleuchtung definiert. Die Firma Geislinger verfügt über langjährige Erfahrung in der Herstellung und Bearbeitung von Faserverbundbauteilen (vorwiegend Verlagerungskupplungen) und soll daher die Bauteile selbst fertigen. Die Ausgangssituation wird daher durch die bestehenden Fertigungstechniken, sowie vorhandenen Anlagen dargestellt. Vor allem die Gestaltung und Größe der zu entwickelnden Bauteile stellt jedoch eine Herausforderung dar. Die Straßenbeleuchtung ist mit einer Höhe von 8,5 m und der eigenwilligen Geometrie eine Sonderkonstruktion.

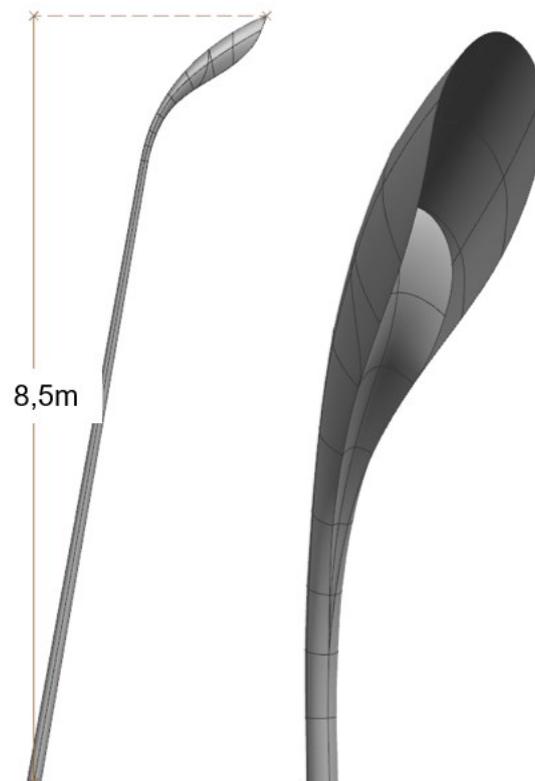


Abb. 1: Flächenmodell der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.

1.3 Aufgabenstellung

Für die bauliche Erweiterung bzw. Umgestaltung der Firmenstandorte in Salzburg (SBG) und Bad St. Leonhard (BSL) sollen repräsentative Straßenbeleuchtungen unter Einsatz der vorhandenen Fertigungstechniken im Bereich der Faserverbundkunststoffverarbeitung entwickelt und gefertigt werden.

Die Auslegung der Bauteile bzw. Auswahl geeigneter Materialien und Fertigungsverfahren, sowie die Konstruktion der zur Herstellung notwendigen Vorrichtungen sind hierbei große Herausforderungen. Bei der Umsetzung des Projektes soll insbesondere ein Augenmerk auf die hausinterne Herstellung der Bauteile gelegt werden. Zugleich soll die Straßenbeleuchtung derart gestaltet werden, dass die Fertigungstechniken, welche sich in den Produkten der Firma Geislinger wiederfinden lassen, optisch zur Geltung kommen. Die komplette Straßenbeleuchtung soll zumindest äußerlich aus Kohlenstofffasern

bestehen. Ein weiterer Aspekt ist auf die Konservierung der Bauteile zu legen. Das Unternehmen ist durch langlebige Produkte bekannt geworden. Dies soll auch bei diesem Projekt berücksichtigt werden, wodurch besonders auf Witterungseinflüsse in Zusammenspiel mit den verwendeten Materialien zu achten ist.

Eine weitere zeitliche Aufgabe ist die Durchführung aller Arbeiten um bis Herbst 2016 die baulichen Maßnahmen an den Firmenstandorten abschließen zu können.



Abb. 2: Bürogebäude BSL (links), Bürogebäude SBG (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

1.4 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Auswahl geeigneter Materialien und die Auslegung der Faserverbundbauteile unter Rücksichtnahme auf die gegebenen Rahmenbedingungen laut Aufgabenstellung. Die wissenschaftliche Fragestellung hierbei ist folgende: Wie muss die Straßenbeleuchtung dimensioniert werden und welche Materialien müssen eingesetzt werden um die Beständigkeit gewährleisten zu können?

Des Weiteren sollen die möglichen Produktionsverfahren zur Herstellung der Bauteile betrachtet werden, wobei hier vorhandene Technologien zum Einsatz kommen sollen. Ein nicht-Ziel ist indes die Umsetzung neuer Technologien, wobei diese bei der Auswahl des geeigneten Verfahrens berücksichtigt werden sollen. Dies dient insbesondere zum Wissensaufbau für möglicherweise folgende Projekte. Nach Auswahl der Fertigungsverfahren sind die notwendigen Vorrichtungen zu entwickeln. Die konstruierten Vorrichtungen dienen als Grundlage für die Fertigung der Faserverbundbauteile. Die Fragestellung dazu lautet wie folgt: Welche Produktionsverfahren eignen sich zur Herstellung der Bauteile einer Straßenbeleuchtung aus Faserverbundmaterialien, und wie müssen die dazu notwendigen Vorrichtungen ausgeführt und dimensioniert werden?

Das endgültige Ziel ist die Herstellung der Verbundbauteile dieser Straßenbeleuchtung durch die Firma Geislinger um diese an den Firmenstandorten in Salzburg und Bad St. Leonhard in Betrieb nehmen zu können.

2 FASER-VERBUND-KUNSTSTOFFE

In den folgenden Kapiteln werden die relevanten Grundlagen und Techniken zur Auswahl der Materialien und Auslegung der Faserverbundbauteile erarbeitet. Die zu entwickelnde Straßenbeleuchtung wird gänzlich aus Faserverbundmaterialien bestehen. Wichtige Faktoren zur Erstellung sind daher die Auswahl der richtigen Faserarten, der Matrix sowie die Berücksichtigung von Umwelteinflüssen. Zudem ist die Berechnung von Faserverbundbauteilen ein wichtiger Aspekt.

2.1 Grundlagen

Faserverbundkunststoffe (FVK), oder auch Composites genannt, nutzen die Eigenschaften verschiedenen Komponenten die als Gesamtsystem miteinander kombiniert werden. Durch die Vielzahl von Verarbeitungsmethoden lässt sich diese moderne Werkstoff-Klasse in vielen Anwendungsbereichen wiederfinden. Faserverbundkunststoffe nutzen die Faserorientierung um den gegebenen Belastungen bestehen zu können. Die Fasern alleine können jedoch vor allem Zugkräfte aufnehmen. Erst das Zusammenwirken mit der Matrix macht den faserverstärkten Kunststoff zu einem hochbelastbaren Bauteil. Kunststoffe ohne Verstärkungsfasern werden zwar auch eingesetzt, sind zum Teil jedoch spröde oder zu flexibel. Die Eigenschaften von faserverstärkten Bauteilen variieren je nach Faserart und Orientierung. Gerichtete Endlosfasern bieten hierbei das größte Potenzial, jedoch kommen auch endliche und ungerichtete Fasern, zum Beispiel beim Spritzgießverfahren, zum Einsatz. Je nach Material der verwendeten Verstärkungsfasern unterscheidet man zwischen GFK (glasfaserverstärkter Kunststoff) oder CFK (kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff).¹

Faserverbundwerkstoffe werden schon seit langer Zeit eingesetzt. Eine nachweisliche Verwendung geht bis 1340 v.Chr. zurück, wobei hier bei Bauten Tiersehnen und Horn zur Verstärkung der Struktur verwendet wurden. Die Verbreitung der modernen Faser-Werkstoffe im 20. Jahrhundert hängt besonders mit der Entwicklung von Kunststoffen und Kunstharzen zusammen, die in Verbindung mit Fasern deutlich bessere Eigenschaften als natürliche Faserverbunde ausweisen.²

Bei der Entwicklung von Verbundbauteilen werden die Vorteile von faserverstärkten Kunststoffen verwendet. Die damit verbundenen Nachteile werden entweder kompensiert oder können hingenommen werden. Vorteile von FVK sind wie folgt:³

- Hohe Festigkeit und Steifigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte
- Möglichkeit zur Freiformgestaltung
- Korrosionsbeständigkeit
- Elektrische Eigenschaften (vom Isolator bis hin zum Leiter einstellbar)
- Geringe Wärmeleitfähigkeit

¹ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 33 f.

² Vgl. Schürmann (2007), S. 2 ff.

³ Vgl. Schürmann (2007), S 4 f.

Als Nachteil ist insbesondere der hohe Materialpreis im Vergleich mit Metallen zu sehen. Dies ist vor allem bei Bauteilen mit Kohlenstoffasern sehr ausgeprägt. Die hohen Herstellkosten können jedoch durch eine günstige Energiebilanz gegenüber z.B. Stahl (siehe Abb. 3) kompensiert werden. Durch die Möglichkeit zum Leichtbau wird besonders im Betrieb in den meisten Fällen Energie eingespart. Der Gesamtbedarf wirkt sich daher positiv aus.⁴

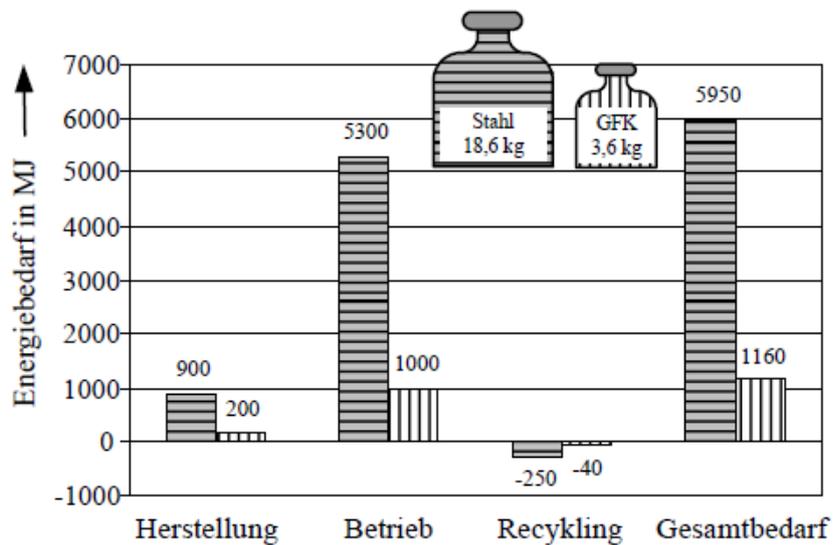


Abb. 3: Vergleich der Energiebilanz zwischen Stahl und GFK, Quelle: Schürmann (2007), S. 5.

Die Einsatzgebiete sind durch die vielen Vorteile stetig gewachsen. Faserverstärkte Kunststoffe werden besonders durch die Möglichkeit zum Leichtbau bei hoher Festigkeit vor allem in den folgenden Bereichen eingesetzt:⁵

- Luft- und Raumfahrt
- Fahrzeugbau
- Boots- und Schiffsbau
- Maschinenbau
- Apparate- und Rohrleitungsbau
- Elektrotechnik
- Bauwesen
- Sportgeräte

Das Gebiet der Faserverbundkunststoffe ist ein ständig wachsender Zweig. Durch die Entwicklung neuer Materialien aber auch Fertigungstechnologien lässt sich dieser Werkstoff in immer mehr Anwendungen wiederfinden. Der hohe Rohstoffpreis ist mittlerweile kein Abschreckungsgrund mehr für neue Projekte auf diesem Gebiet.

⁴ Vgl. Schürmann (2007), S. 5.

⁵ Vgl. Schürmann (2007), S. 5 ff.

2.2 Fasern

In diesem Kapitel werden die verschiedenen Faserarten sowie Faserhalbzeuge betrachtet um einen Überblick zu erhalten und schlussendlich die richtigen Materialien zur Umsetzung auswählen zu können. Vorweg sei genommen, dass die Straßenbeleuchtung äußerlich rein aus Kohlenfasern bestehen soll. Der Aufbau selbst wird jedoch auch aus anderen Faserarten bestehen um Kosten einzusparen. Die Auswahl der Fasern bzw. Faserhalbzeuge schränkt jedoch zum Teil auch die relevanten Fertigungstechniken ein.

2.2.1 Wirksamkeit der Faserform

Für die Wirksamkeit von Fasern sind einige Mechanismen verantwortlich. Die typischen Fasermaterialien wie Glas und Kohlenstoff haben zwar eine geringe Dichte, können aber eigentlich nicht als Konstruktionsmaterial verwendet werden. Im Wesentlichen beschreibt Schürmann vier Mechanismen die Fasern erst zu Konstruktionswerkstoffen machen:⁶

- **Einfluss des Größeneffekts:** Festigkeitsreduzierende Fehlstellen nehmen mit kleinerem Volumen ab. Das heißt die einzelnen Fasern erzielen durch ihr geringes Volumen deutlich höhere Festigkeitswerte. Zudem lassen sich Materialien mit kleinen Faserdurchmessern bedingt durch eine niedrigere Biegesteifigkeit einfacher verarbeiten.
- **Einfluss von Orientierung:** Die stärkste Atomare Bindung liegt in Faserlängsrichtung vor. Dadurch sind aber Festigkeitswerte quer zur Faser reduziert.
- **Verminderung von Fehlstellen und Kerben:** Fehlstellen führen zu einer Verminderung des tragenden Querschnittes. Kerben reduzieren die Festigkeit enorm. Durch Ausziehen bei der Faserherstellung werden Fehlstellen längs ausgerichtet und die Spannungen werden abgeschwächt.

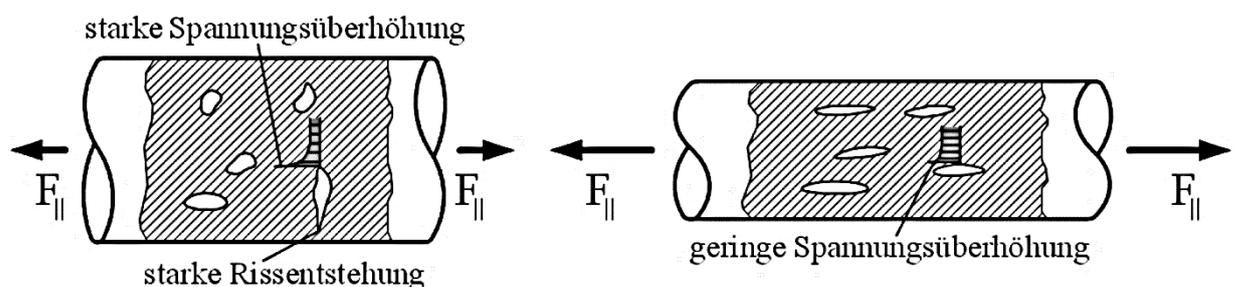


Abb. 4: Einfluss der Faserherstellung auf Kerben (links vor, rechts nach dem Ziehen), Quelle: Schürmann (2007), S. 24.

- **Eigenspannungen:** Festigkeitswerte von Fasern können ebenso durch Einbringung von Eigenspannungen erhöht werden. Der Effekt wird jedoch nur bei Glas vermutet. Das schnellere Abkühlen an der Oberfläche der Fasern führt hier zu günstigen Druckeigenspannungen, die den Einfluss von Kerben vermindern.

⁶ Vgl. Schürmann (2007), S. 21 ff.

2.2.2 Einteilung der Fasern

Es gibt eine Vielzahl von lasttragenden Faserelementen. Die anwendbaren Fasern lassen sich dabei grob in natürliche und künstliche Fasern unterscheiden:⁷

- **Naturfasern:** Harre, Wolle, Seide, Baumwolle, Flachs, Sisal, Hanf, Jute, Ramie, Bananenfaser
- **Organische Fasern:** Polyethylen, Polypropylen, Polyamid, Polyester, Aramid, Kohlenstoff
- **Anorganische Fasern:** Glas, Basalt, Quarz, SiC, Bor, Asbest
- **Metallfasern:** Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel, Beryllium, Wolfram

Für hoch beanspruchte Verbundbauteile werden vor allem Glas-, Kohlenstoff- und Aramidfasern verwendet. Die restlichen Fasern finden ihren Einsatz nur bei besonderen Anforderungen. Im Folgenden wird auf die gebräuchlichsten Fasern bezüglich derer mechanischen Eigenschaften bzw. Vor- und Nachteile eingegangen um für die Auswahl geeignete Kriterien zu finden.⁸

Glasfasern:

Der größte Vorteil dieser Fasern ist der vergleichsweise niedrige Preis. Sie besitzen zudem sehr hohe Längs-Zug- sowie Längs-Druckfestigkeiten. Glasfasern lassen sich einfach formen, bedingt durch ihre geringe Biegesteifigkeit. Sie wirken außerdem elektrisch wie auch thermisch isolierend, sind nicht brennbar und haben eine gute chemische Widerstandsfähigkeit (z.B. gegen Pilze, Bakterien und Insekten). Als Nachteil lässt sich der für viele Anwendungsbereiche zu geringe Elastizitätsmodul nennen der in Verbindung mit der Matrix noch weiter absinkt. Durch diesen Nachteil lassen sich Glasfasern in bestimmten Fällen jedoch sehr gut als Federwerkstoff einsetzen. Eine weitere unerwünschte Eigenschaft der Glasfasern ist ihr Bruchverhalten. Sie sind spröde und brechen deshalb abrupt. Das Verhalten ist jedoch bei glasfaserverstärkten Bauteilen nicht so zu sehen, da die einzelnen Filamente nicht gleichzeitig, sondern vielmehr nacheinander brechen.⁹

In der nachfolgenden Tabelle sind die Daten der verschiedenen Glasfasertypen zu sehen. Dabei handelt es sich um Herstellerangaben. Die Buchstaben vor der Bezeichnung stehen dabei für die speziellen Eigenschaften der Glasfaser (E = Electric, R = Resistance, S = Strength, C = Chemical, D = Dielectric).

	E-Glas	R-Glas	S-Glas	C-Glas	D-Glas
E-Modul E_f in N/mm^2	73 000	86 000	86 810	71 000	55 000
G-Modul G_f in N/mm^2	29 920		35 578		
Querkontraktionszahl ν_f	0,22		0,22		
Therm. Ausdehnungsk. α_{Tf} in $10^{-6}/^\circ C$	5,1	4,1	5,58	7,2	3,5
Wärmeleitfähigkeit λ_f in $Wm^{-1}K^{-1}$	1				
Zugfestigkeit R_{fll}^+ in N/mm^2	2 400	3 600	4 500	2 400	1 650
Eigenschaftsverluste ab	300°C	350°C			
Dichte ρ_f in g/cm^3	2,54	2,55	2,49	2,51	2,14

Tab. 1: Daten verschiedener Glasfasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 30.

⁷ Vgl. Schürmann (2007), S. 26.

⁸ Vgl. Schürmann (2007), S. 26 f.

⁹ Vgl. Schürmann (2007), S. 28 ff.

Kohlenstofffasern:

Kohlenstoff- oder auch Carbonfasern bieten dem Konstrukteur die besten Eigenschaften und werden deshalb besonders für Strukturbauteile eingesetzt. Die Fasern haben eine sehr geringe Dichte ($1,8 \text{ g/cm}^3$) aber gleichzeitig extrem hohe Festigkeits- und Elastizitätsmodulwerte. Die hohen Festigkeitswerte sind nicht nur statisch von Vorteil, die Kohlenstofffaser weist auch gute Eigenschaften bezüglich Ermüdungsfestigkeit auf. Zudem zeigen die Fasern anisotropes Verhalten. Dies kann auch bei der thermischen Ausdehnung beobachtet werden. So ist der Ausdehnungskoeffizient quer zur Faser positiv, in Längsrichtung jedoch negativ. Diese Eigenschaft kann bei Bedarf eingesetzt werden um Längenänderungen im Verbund bei Temperaturunterschieden auszugleichen. Ein Nachteil der Kohlenstofffaser ist ihr sprödes Bruchverhalten. Außerdem sind Brüche innerhalb des Laminats (z.B. durch Schlageinwirkung) nicht einfach ersichtlich. Durch die höhere Steifigkeit der Faser lässt sich diese zudem nicht einfach formen. Der wohl größte Nachteil der Kohlenstofffasern ist ihr hoher Preis. Dies ist der Grund warum viele Strukturbauteile weiterhin konventionell aus Stahl bzw. Aluminium gefertigt werden.¹⁰

Von den Kohlenstofffasern wurden wie auch bei den Glasfasern verschieden Varianten mit unterschiedlichen Festigkeiten entwickelt:¹¹

- **HT-Fasern:** High Tenacity (Standardtyp)
- **ST-Fasern:** Super Tenacity (höherfest als HT-Fasern)
- **IM-Fasern:** Intermediate Modulus (höherer Modul als HT-Fasern)
- **HM-Fasern:** High Modulus (Hochmodulfasern)
- **UHM-Fasern:** Ultra High Modulus

In der nachfolgenden Tabelle werden wiederum die Daten der verschiedenen Fasertypen veranschaulicht.

	HT- Faser	ST- Faser	IM- Faser	HM- Faser	UHM- Faser
E-Modul längs $E_{f }$ in N/mm^2	230 000	245 000	294 000	392 000	450 000
E-Modul quer $E_{f\perp}$ in N/mm^2	28 000			15 200	
G-Modul $G_{f }$ in N/mm^2	50 000			28 600	
Querkontraktionszahl $\nu_{f }$	0,23			0,2	
Therm. Ausdehnungskoeff. längs $\alpha_{Tf }$ [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	-0,455			-1,08	
Therm. Ausdehnungskoeff. quer $\alpha_{Tf\perp}$ [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	12,5			31	
Zugfestigkeit $R_{f }^+$ in N/mm^2	3 430	4 510	4 210	2 450	2 150
Dichte ρ_f in g/cm^3	1,74	1,8	1,74	1,81	1,9

Tab. 2: Daten verschiedener Kohlenstofffasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 41.

¹⁰ Vgl. Schürmann (2007), S. 35 ff.

¹¹ Vgl. Schürmann (2007), S. 41.

Aramidfasern:

Diese Fasertypen werden eher weniger für Verbundbauteile eingesetzt. Die Fasern können zwar mit guten Festigkeitseigenschaften hergestellt werden, jedoch sind die Gesamteigenschaften meist nicht hinreichend. Die Dichte liegt mit $1,45 \text{ g/cm}^3$ noch unter jener der Kohlenstofffasern. Darum wird die Aramidfaser gerne für besondere Leichtbauanforderungen eingesetzt. Werte für Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul liegen über denen der Glasfaser. Das thermische Verhalten ist jenem der Kohlenstofffasern ähnlich. Der größte Vorteil dieser Faser ist ihre hohe Zähigkeit. Sie wird deshalb auch vor allem für schlagbeanspruchte Bauteile eingesetzt, bzw. um die Schlagfestigkeit reiner CFK-Bauteile zu erhöhen. Nachteilig wirkt sich die geringe Druckfestigkeit parallel zur Faserrichtung aus. Die Faser hat zudem schlechte Eigenschaften bezüglich Umwelteinflüsse. Sie nimmt Wasser auf, was zu Problemen bei der Verbindung mit der Matrix führen kann, und wird außerdem von UV-Licht abgebaut. Ein weiterer Nachteil ist durch den Vorteil der hohen Zähigkeit bedingt. Die Verbundbauteile lassen sich dadurch nur schwer bearbeiten. Preislich befinden sich Aramidfasern zwischen Glas- und Kohlenstofffasern.¹²

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Daten der Aramidfasertypen aufgelistet.

	Standardtyp hochzäh	Hochmodultyp hochsteif
E-Modul längs $E_{f }$ in N/mm^2	67 000	130 000
E-Modul quer $E_{f\perp}$ in N/mm^2		5 400 ^a
G-Modul $G_{f }$ in N/mm^2		1 450 ^a
Querkontraktionszahl $\nu_{f\perp }$		0,32 ^a
Therm. Ausdehnungskoeff. längs $\alpha_{Tf }$ [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	-2	-2
Therm. Ausdehnungskoeff. quer $\alpha_{Tf\perp}$ [$10^{-6}/^\circ\text{C}$]	12,5	17
Zugfestigkeit $R_{f }^+$ in N/mm^2	2 800	2 800
Dichte ρ_f in g/cm^3	1,44	1,45

^a aus Laminatdaten rückgerechnet.

Tab. 3: Daten verschiedener Aramidfasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 45.

2.2.3 Faserhalbzeuge

Unter Faserhalbzeugen versteht man Flächengebilde oder dreidimensionale Strukturen welche aus Filamenten, meist in Form von Rovings (Strängen), angefertigt werden. Je nach Herstellungsart bzw. Aufbau unterscheidet man zwischen Geweben, Geflechtem, Gelegen, Matten oder Vliesen. Eine weitere Art stellen mit Harz vorimprägnierte Fasern, sogenannte Prepregs, dar. Zudem gibt es Sonderformen wie Gestricke, Abstandsgewebe oder Gesticke. Die verschiedenen Faserhalbzeuge sind meist sowohl aus Glas-, Aramid- oder Kohlenstofffasern erhältlich. Durch den Einsatz von Halbzeugen lässt sich der Verarbeitungsprozess deutlich vereinfachen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Halbzeuge bereits vor dem Verarbeiten zu Vorformlingen zusammengefügt werden.¹³

¹² Vgl. Schürmann (2007), S. 43 ff.

¹³ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 224.

Im Anschluss werden die verschiedenen Faserhalbzeuge und deren Aufbau näher betrachtet.

Gewebe:

Als Gewebe bezeichnet man Flächengebilde, wobei hier zwei rechtwinkelig zueinander gekreuzte Fäden (Kette und Schuss) miteinander verbunden werden. Die Herstellung von Geweben erfolgt mit speziell dazu angefertigten Webmaschinen. Die Art der Verkreuzung beider Fäden wird als Bindung bezeichnet. Sie bestimmt, wie oft sich die Fäden auf einer bestimmten Länge kreuzen.¹⁴

Diese Art von Halbzeugen eignet sich durch ihre einfache Handhabung besonders zur Herstellung flächiger Bauteile. Dabei entstehen durch eine Lage bereits zwei Faserrichtungen, welche wiederum Belastungen aufnehmen können. Um sich den Lastverhältnissen anzupassen, können auch Gewebe mit unterschiedlichen Faseranteilen in Kette und Schuss verwendet werden. Man spricht dann beispielweise von einem kettstarken Gewebe. Neben der Bindungsart werden Gewebe durch ihr Faserflächengewicht unterschieden. Die gängigsten Bindungsarten sind die Leinwand-, Köper- bzw. Atlasbindung wie in Abb. 5 ersichtlich. Die Leinwandbindung zeichnet sich durch die enge Verkreuzung besonders durch ihre Schiebefestigkeit aus. Zugleich ist dies aber auch ein Nachteil für stark gewölbte Bauteile, da diese Gewebeart hier Falten wirft. Hierbei kommt deshalb in den meisten Anwendungsfällen die Köper- oder Atlasbindung zum Einsatz. Des Weiteren können Gewebe auch aus drei Faserrichtungen aufgebaut werden. Man spricht dabei von dreiaxialen Geweben. Eine Sonderform stellen zudem Mischgewebe bzw. Hybridgewebe dar, welche verschiedene Fasertypen (z.B. Glas gemischt mit Kohlenstofffasern) beinhalten. Gewebe werden im Allgemeinen als Rollen bis etwa 3,5m Breite oder als Gewebebänder angefertigt.¹⁵

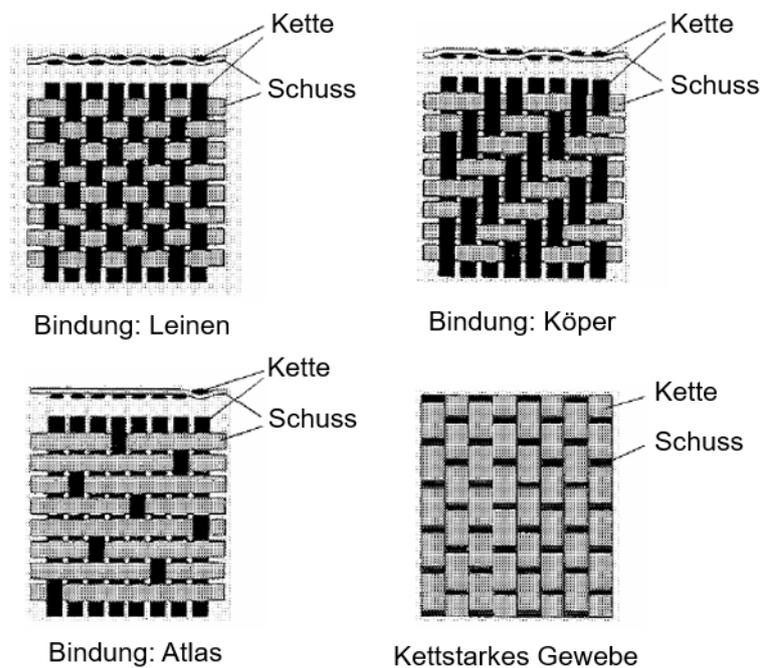


Abb. 5: Bindungsarten von Geweben, Quelle: Schürmann (2007), S. 60 (leicht modifiziert).

¹⁴ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 225 f.

¹⁵ Vgl. Schürmann (2007), S. 60 ff.

Geflechte:

Diese Art von Faserhalbzeugen beschreibt Körper- oder Flächengebilde mit konstanter Fadendichte. Die Fäden werden hierbei schräg zur Warenkante verflochten. Die Herstellung erfolgt in einem automatisierten Prozess mit Flechtmaschinen. Der Kreuzungswinkel kann dabei eingestellt werden, wodurch die Eigenschaften des Laminats verändert werden können. Prinzipiell unterscheidet man drei Flechttypen, das Litzengeflecht, das Rundgeflecht und das 3D-Geflecht. Diese Typen werden wiederum für verschiedene Anwendungsgebiete eingesetzt. So eignet sich das Rundgeflecht besonders zur Verstärkung von runden Bauteilen. Das Litzengeflecht lässt sich hingegen sehr gut formen. Die größte Flexibilität bieten 3D-Geflechte, jedoch ist auch der Aufwand zur Herstellung dementsprechend hoch.¹⁶

Gelege:

Unter Gelegen versteht man textile Strukturen, die aus einer oder mehrerer gestreckter Lagen parallel verlaufender Fäden bestehen. Zudem können auch Vliese oder Matten miteingearbeitet werden. Die einzelnen Lagen können dabei unterschiedliche Orientierungen aufzeigen (siehe Abb. 6). Die Verbindung erfolgt nicht wie bei Geweben durch die Faser selbst, sondern durch ein Maschensystem aus Wirkfäden oder durch chemische Bindung der einzelnen Lagen. Der Vorteil dieser Bindungsart besteht in der Streckung der Fasern im Vergleich zu den wellenförmig vorliegenden Fasern von Geweben. Die Verstärkungsfasern können daher optimal zur Belastungsrichtung abgelegt werden. Der fertige Verbund der einzelnen Lagen wird als Multiaxialgelege (MAG) bezeichnet.¹⁷

Ein weiterer Vorteil von Gelegen besteht in der einfachen Verarbeitung. Durch die enge Verbindung der einzelnen Lagen mit den Wirkfäden verformen sich Gelege nur schwer. Dadurch lassen sich die Faserorientierungen genau einhalten. Des Weiteren kann der Verschnitt von $\pm 45^\circ$ -Lagen reduziert werden, da Gelege bereits in diese Orientierung hergestellt werden können. Gewebe müssten hier beispielweise diagonal mit hohem Verschnitt ausgeschnitten werden. Für feinschichtige Lagenaufbauten werden jedoch bevorzugt Gewebe eingesetzt, da Gelege hier oft zu grob in ihrer Struktur sind.¹⁸

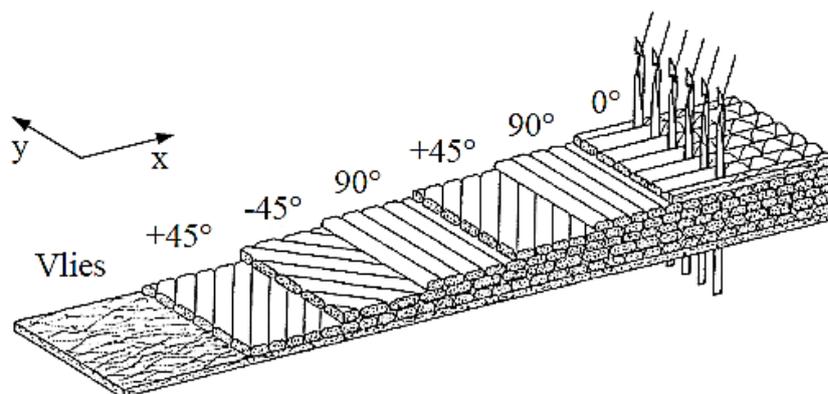


Abb. 6: Gelege aus Schichten gezielter Orientierung, Quelle: Schürmann (2007), S. 63.

¹⁶ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 226 ff.

¹⁷ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 228 f.

¹⁸ Vgl. Schürmann (2007), S. 63.

Matten und Vliese:

Diese Typen werden besonders für Bauteile mit geringen Beanspruchungen eingesetzt. Unterschieden werden die Varianten der Endlosmatte und der Schnittmatte. Der Unterschied ist in der Form der Spinnfäden zu finden. Bei der Endlosmatte liegen diese ungeschnitten, bei der Schnittmatte geschnitten vor. Beide Varianten zeigen keine eindeutige Faserorientierung, was zu isotropen Eigenschaften führt. Im Regelfall werden Matten aus Glasfasern hergestellt, eher selten aus Kohlenstofffasern. Die Bindung der wirt vorliegenden Fasern erfolgt meist durch Verklebung. Wobei sich der Binder durch das Matrixharz wieder löst und die Matte dadurch verformbar wird. Die Vorteile von Matten sind ihr niedriger Preis, die große Saugkraft sowie die hohe Flexibilität. Sie werden deshalb auch oft als Fließhilfe eingesetzt. Die hohe Saugkraft ist allerdings zugleich ein Nachteil. Sie nehmen dadurch sehr viel Harz auf, was zu einem geringen Faservolumenanteil führt.¹⁹

Im Gegensatz zu Matten sind Vliese feiner strukturiert und unterscheiden sich im Aufbau. Sie werden nicht aus Spinnfäden, sondern aus Einzelfilamenten aufgebaut. Der Hauptverwendungszweck von Vliesen dient der Verbesserung der Oberflächenqualität von Laminaten. Grobe Gewebestrukturen können dadurch ausgeglichen und die Oberfläche geglättet werden.²⁰

Prepregs:

Als Prepregs bezeichnet man vorimprägnierte Faserhalbzeuge, bei denen Fasern und Matrix bereits vom Hersteller durchtränkt wurden. Verwendet werden hierbei thermoplastische wie auch duroplastische Matrixmaterialien. Die Herstellung von Prepregs erfolgt kontinuierlich. Die Fasern werden mit Harz imprägniert und mit Schutzpapier abgedeckt (siehe Abb. 7). Der Auslieferungszustand ist hier in Rollenform gegeben. Der Vorteil dieser Variante ist die genaue Faserausrichtung, wodurch Prepregs besonders für hochbelastete Bauteile eingesetzt werden. Nachteilig ist die erforderliche Kühlung während der Lagerung.²¹

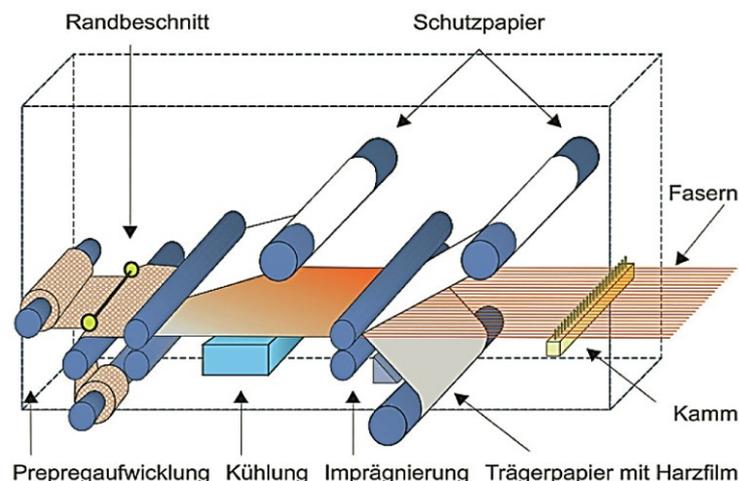


Abb. 7: Anlagenschema zur Herstellung von Prepregs, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 234.

¹⁹ Vgl. Schürmann (2007), S. 64 ff.

²⁰ Vgl. Schürmann (2007), S. 66.

²¹ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 233 ff.

Sonderformen:

In einigen Anwendungsfällen kommen die folgenden Sonderformen zur Anwendung, da die Eigenschaften der Standardhalbzeuge nicht hinreichend sind:²²

- **Gestricke und Gewirke:** Sie bestehen aus Maschen und werden für hochkomplexe Geometrien eingesetzt. Angewendet werden sie durch ihre gute Formbarkeit vor allem für räumliche Strukturen. Da die Faser aber nicht gestreckt verlaufen, sondern als Maschen vorliegen, kann nur etwa ein Viertel der Festigkeit von Geweben erreicht werden. Gestricke bzw. Gewirke sind jedoch sehr schlagfest.
- **Abstandsgewebe:** Sie bestehen aus zwei Gewebe-Decklagen die über Stegfäden verbunden werden (siehe Abb. 8). Sie dienen vor allem zur Herstellung von leichten Sandwichkonturen. Dabei kann die Dicke der Kontur durch variieren der Stegfäden verändert werden. Vorteilhaft gegenüber Konstruktionen mit Schaumkern ist, dass der Kern nicht vorab aufwendig hergestellt werden muss.

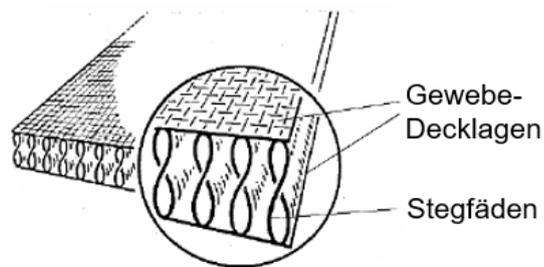


Abb. 8: Abstandsgewebe, Quelle: Schürmann (2007), S. 69 (leicht modifiziert)

- **Gestricke:** Da die Belastungen nicht immer in definierten Faserorientierung der Halbzeuge vorliegen wurde das Stickverfahren eingeführt. Die Faser besitzt ihre höchste Festigkeit in Längsrichtung. Um dies auszunutzen werden bei Gestricken die Fasern in einer definierten Richtung (z.B. mit CNC-gesteuerten Maschinen) auf ein Trägermaterial abgelegt und mit einem Faden gebunden. (siehe Abb. 9). Verarbeitet werden im Allgemeinen sowohl Rovings aus Glas als auch Kohlenstofffasern. Der Nachteil dieser Variante ist, dass die Fasern durch den Nähfaden leicht gekrümmt werden und somit nicht mehr optimal gestreckt vorliegen.

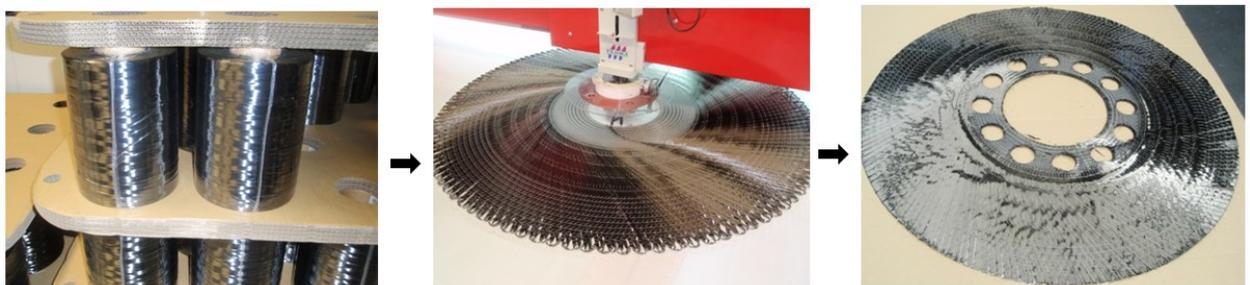


Abb. 9: Gestickerstellung, Quelle: Eigene Darstellung.

²² Vgl. Schürmann (2007), S. 68 ff.

2.2.4 Faserauswahl

Zuerst erfolgt die Auswahl nach den notwendigen mechanischen Eigenschaften der Fasern. Die erste Wahl fällt hier auf Glasfasern, sofern ihre Steifigkeit ausreichend und die Dichte nicht zu hoch ist. Sie stellen die preisgünstigste Faserart dar. Wird eine erhöhte Steifigkeit gewünscht so wechselt man zu Kohlenstofffaser. In erster Linie wird versucht mit dem Standardtyp auszukommen. In manchen Anwendungsfällen reichen oft Glasfasern aus, jedoch soll der Bauteil optisch aus CFK bestehen. Hier ist es zweckdienlich für den Aufbau Glasfasern zu verwenden und die Optik durch eine Kohlefaserdeckschicht darzustellen. Für besonders leichte Bauteile lässt sich die Glasfaser durch die teurere Aramidfaser ersetzen. Aramidfasern werden auch besonders bei schlagbeanspruchten Bauteilen wie beispielweise Flugzeugcockpits oder Rennsport-Monocoques eingesetzt. Sie verhindern ein sprödes Brechen der Bauteile. In schwierigen Fällen empfiehlt die Literatur die Kontaktaufnahme mit dem Hersteller um genau Informationen zu den Halbzeugen und Einsatzgebieten zu erhalten.²³

Die Auswahl der richtigen Faser für die Straßenbeleuchtung kann nun anhand der erarbeiteten Daten erfolgen. Durch die Vorgabe der gewünschten CFK-Optik fällt die erste Wahl bereits auf Kohlenstofffasern um die Oberfläche dementsprechend gestalten zu können. Da diese Fasertypen aber zugleich auch die teuerste Variante ist wird für den Aufbau der Bauteile auf die preisgünstigere Glasfaser zurückgegriffen, sofern dies aus Festigkeitsgründen möglich ist. Die höhere Dichte der Glasfaser spielt in diesem Anwendungsfall keine Rolle. Ein Einsatz von Aramidfasern wird nicht in Betracht gezogen, da ihre hohe Zähigkeit und Schlagfestigkeit hier nicht notwendig ist.

Um eine Aussage zu den richtigen Faserhalbzeugen treffen zu können müssen die einzelnen Bauteile der Straßenbeleuchtung im Detail betrachtet werden. Sie lässt sich grob in den konischen Mast und den gewölbten Laternenkopf aufteilen. Die Wahl der Halbzeuge wird insbesondere auch von dem verwendeten Fertigungsverfahren mitbestimmt. Für den Mast kommt hier das Wickelverfahren, Pultrusionsverfahren, Schleuderverfahren oder auch Schlauchblasverfahren in Frage. Der aus Freiformflächen bestehende Laternenkopf kann durch Handlaminieren oder Prepreglegen bzw. durch das Harzinjektionsverfahren oder Harzinfusionsverfahren hergestellt werden. Die einzelnen Fertigungsverfahren werden im Zuge dieser Arbeit noch genauer betrachtet um schlussendlich eine Wahl zu treffen. Die Auswahl der Faserhalbzeuge kann erst nach Festlegung der Fertigungsverfahren erfolgen.

2.3 Umwelteinflüsse

In den anschließenden Abschnitten wird auf die Beeinflussbarkeit von Faserverbundbauteilen durch Umwelteinflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit oder Strahlung näher eingegangen. Dies ist notwendig, da die zu entwickelnde Straßenbeleuchtung im Freien steht und deshalb diesen Einflüssen ausgesetzt wird. Um die Langlebigkeit der Bauteile zu gewährleisten sind diese Faktoren besonders zu berücksichtigen. Vorweg sei genommen, dass diese Faktoren die stärksten Einflüsse auf die Matrix (die zur Verbindung der Fasern verwendete Komponente von Verbundbauteilen) hat. Auf die verschiedenen Matrixsysteme bzw. die Kriterien zur Auswahl des richtigen Systems wird in dieser Arbeit noch explizit eingegangen.

²³ Vgl. Schürmann (2007), S.75 f.

2.3.1 Temperatur

Die Temperatur hat den größten Einfluss auf die Matrix. Die Reaktion ist deutlich höher als jene der Fasern. Die Einsatzgrenzen von Verbundbauteilen werden deshalb von der Matrix bestimmt. Bei Polymeren wird diese Grenze durch die sogenannte Glasübergangstemperatur bestimmt.²⁴

Auf die Wärmedehnung infolge von Temperaturunterschieden wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Geometrische Änderungen der Straßenbeleuchtung durch Temperaturdifferenzen können vernachlässigt werden. Kritischer hierbei ist die Temperatureinwirkung durch Sonnenstrahlung bzw. die Erwärmung der Bauteile durch die Leuchtkörper. Diese Faktoren müssen im Zuge der Arbeit näher betrachtet werden. Darum werden nun Temperatureinsatzgrenzen von Faserverbundbauteilen näher erörtert.

Wie bereits erwähnt ist die Glasübergangstemperatur eine aussagekräftige Größe für die Einsatzgrenze eines Verbundbauteiles. Diese Temperatur beschreibt dabei den Glasübergangsbereich von Kunststoffen der in einem sehr kurzen Intervall stattfindet. Beim Überschreiten dieses Bereichs ändern sich die Eigenschaften (z.B. E-Modul) enorm. Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften kann man eine starke Reduktion der Steifigkeit und eine sinkende Festigkeit sehen. Die etwas irreführende Bezeichnung der Glasübergangstemperatur stammt dabei noch aus der Entwicklungszeit. Der Effekt wurde vor allem bei glasförmig erstarrenden Materialien beobachtet und führte daher zu dieser Bezeichnung. Bei den meisten verwendeten Polymeren sollte die Einsatztemperatur unter der Glasübergangstemperatur liegen. Eine Ausnahme hierfür sind teilkristalline Thermoplaste, welche bis hin zum Schmelzbereich eingesetzt werden. Des Weiteren liegt der Einsatzbereich von Elastomeren oberhalb der Glasübergangstemperatur.²⁵

2.3.2 Feuchtigkeit

Auch in Bezug auf Feuchtigkeit ist die Matrix der Baustein eines Verbundbauteiles der betrachtet werden muss. Die Feuchtigkeitsaufnahme von Fasern kann im Vergleich dazu vernachlässigt werden. Im Folgenden wird nur die Aufnahme von Wasser betrachtet. Es gibt dabei zwei Möglichkeiten zur Einlagerung. Entweder das Wasser lagert sich an die Molekülketten der Polymere oder in Mikroporen ab, welche sich häufig an der Grenze zwischen Matrix und Faser befinden. Die Aufnahme von Feuchtigkeit hat wie auch die Änderung der Temperatur Einfluss auf die Eigenschaften der Bauteile. Neben der Zunahme der Masse und dem Aufquellen der Matrix lassen sich noch eine zunehmende Wärmeleitfähigkeit und ein sinkender elektrischer Widerstand beobachten.²⁶

Im Hinblick auf die Umsetzung dieses Projektes werden die Einflüsse von Feuchtigkeit als unkritisch angesehen und müssen daher nicht berücksichtigt werden. Dieser Faktor hat daher keinen Einfluss bei der Auswahl der Matrix.

²⁴ Vgl. Schürmann (2007), S. 247.

²⁵ Vgl. Schürmann (2007), S. 99 f.

²⁶ Vgl. Schürmann (2007), S. 275 f.

2.3.3 Strahlung

Wärme kann sowohl durch Wärmeleitung, Konvektion oder auch Strahlung übertragen werden. Bei der Entwicklung ist deshalb auch auf die Energieaufnahme durch Sonnenstrahlung zu achten. Die dadurch erhöhte Temperatur ist abhängig von der Jahres- und Tageszeit, der Farbe der Oberfläche sowie der Neigung zur Sonne.²⁷

Bei ungeschützten Anwendungen im Freien ist ein wichtiger Faktor die UV-Strahlung durch Sonnenlicht. Wiederum wird die Matrix am ehesten davon beeinflusst. Die UV-Strahlung führt zur Vergilbung bzw. zur Versprödung von Kunststoffen. Eine gewisse Stabilität kann durch Hinzufügen von Additiven oder durch einen Oberflächenschutz (z.B. Lackierung) erzielt werden.²⁸

Auf den Einfluss der Ionisierende Strahlung (Gamma- oder Röntgenstrahlung) wird in diesem Punkt nicht eingegangen. Da die Straßenbeleuchtung gänzlich im Freien steht und somit der UV-Strahlung und der Wärmeeintragung durch Sonnenlicht ausgesetzt ist, müssen diese Faktoren besonders berücksichtigt werden. Das gilt für die Auswahl der Matrix und die Oberflächenbehandlung der fertigen Bauteile.

2.4 Matrixsysteme

Die Matrix stellt die Verbindung der einzelnen Fasern dar. Sie hat die Aufgabe die Fasern in der vorgegebenen geometrischen Position zu halten und die auftretenden Kräfte einzuleiten. Zudem übernimmt sie besonders Lasten quer zur Faserrichtung. Die Matrix hat außerdem eine schützende Wirkung gegen Umwelteinflüsse. Da sie ein Teil des Faserverbundbauteiles ist, hat die Matrix auch einen entscheidenden Einfluss auf die Dichte, Steifigkeits- und Festigkeitswerte, Temperatur-Einsatzgrenzen sowie vieler weiterer Eigenschaften. Auf die Auswahl des richtigen Matrixsystems ist besonders Wert zu legen, da sie den schwächsten Bestandteil eines Verbundbauteiles darstellt.²⁹

In den folgenden Abschnitten wird näher auf zwei verschiedene Matrixsysteme, die thermoplastische und die duroplastische Matrix eingegangen. Systeme auf Basis von Elastomeren sind für diese Arbeit nicht relevant und werden deshalb nicht näher betrachtet.

2.4.1 Duroplastische Matrix

Duroplaste sind am weitesten verbreitet in der Faserverbundtechnik. Sie bestehen aus Makromolekülen und erreichen ihre endgültige Form erst durch eine Vernetzungsreaktion. Für diese Reaktion wird neben dem eigentlichen Harz noch ein Härter benötigt. Die Vernetzung selbst startet nach Einbringung von Wärme, Strahlung oder von Katalysatoren. Besonders durch hohe Temperaturen wird die Vernetzungsreaktion beschleunigt. Zum Einsatz kommen größtenteils Epoxid-Harze, Polyester-Harze und Vinylester-Harze. Duroplaste zeigen folgende Vor- bzw. Nachteile:³⁰

²⁷ Vgl. Schürmann (2007), S. 97.

²⁸ Vgl. Ensinger GmbH (2016), Online-Quelle [06.07.2016].

²⁹ Vgl. Schürmann (2007), S. 83.

³⁰ Vgl. Schürmann (2007), S. 84 f.

Vorteile:

- hoher Elastizitätsmodul
- geringe Kriechneigung
- gute thermische und chemische Beständigkeit

Nachteile:

- nicht schweißbar; ein aufschmelzen ist nicht mehr möglich
- sprödes Bruchverhalten
- nur bedingt wiederverwertbar

2.4.2 Thermoplastische Matrix

Im Unterschied zu den Duroplasten sind die Makromoleküle von Thermoplasten räumlich nicht vernetzt (siehe Abb. 10). Ihre Kriechneigung ist deshalb größer als jene der Duroplaste. Thermoplaste werden bei zunehmender Temperatur wieder verformbar. Ihr Vorteil liegt daher in der Schweißbarkeit, wie auch der einfachen Wiederverwendung durch Aufschmelzen. Sie lassen sich in teilkristalline Thermoplaste (z.B. Polypropylen) und amorphe Thermoplaste (z.B. Polystyrol) unterscheiden. Teilkristalline Thermoplaste haben im Vergleich zu den amorphen höhere Schwindungswerte und Temperaturabhängigkeiten.³¹

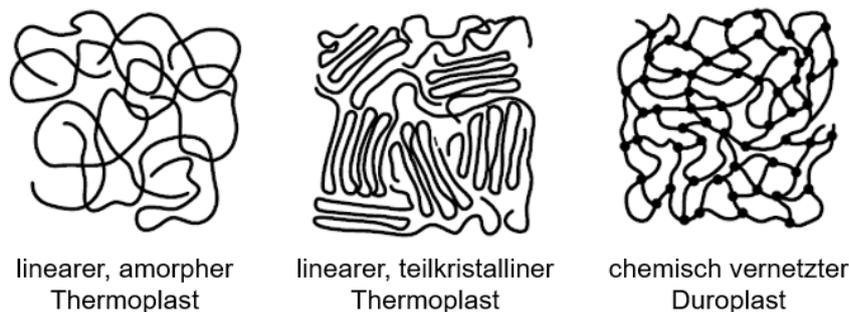


Abb. 10: Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren, Quelle: Schürmann (2007), S. 85 (leicht modifiziert).

2.4.3 Auswahl von Matrixsystemen

Die Auswahl gestaltet sich schon Anhand der Anzahl an verschiedenen Matrixsystemen schwierig. Für neue Bauteile wird in der Literatur folgender Ablauf beschrieben:³²

1. In erster Linie wird versucht bereits im Betrieb vorhandene Matrixsysteme einzusetzen, sofern diese den Anforderungen genügen. Dies dient einerseits um die Vielzahl an verschiedenen Typen zu begrenzen, bzw. andererseits um zu vermeiden, dass die einzelnen Gebinde nicht nur angebraucht werden. Zudem kann auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden.
2. Wird ein neues Matrixsystem notwendig, so sollte man ein bereits weitläufig eingesetztes bzw. qualifiziertes System verwenden. Dies spart wiederum Qualifizierungskosten und bringt Erfahrungswerte mit sich.

³¹ Vgl. Schürmann (2007), S. 85 f.

³² Vgl. Schürmann (2007), S. 91 f.

3. Ist keine der ersten zwei Möglichkeiten zweckdienlich, so muss ein neues Matrixsystem qualifiziert werden. Dies erfolgt meist unter Berücksichtigung der folgenden Kriterien:
 - a. Preis
 - b. Werkstoffeigenschaften (mechanisch, Temperatur, Beständigkeit, ...)
 - c. Fertigungseigenschaften (Viskosität, Verarbeitungszeit, Härtungstemperatur, ...)

Für diese Arbeit wird nicht in Betracht gezogen ein neues Matrixsystem zu qualifizieren. Es wird vielmehr auf bereits verwendete Systeme zurückgegriffen, die für diese Anwendung hinreichende Eigenschaften zeigen. Je nach dem ausgewählten Fertigungsverfahren können hier die Systeme laut nachfolgender Tabelle zum Einsatz kommen. Angewendet werden vor allem Duroplaste auf Epoxidharzbasis die mittels eines Härter zur Reaktion gebracht werden. In erste Linie kann man die verschiedenen Systeme anhand der Glasübergangstemperatur T_G betrachten. Die Werte wurden den Datenblättern der Harzsysteme entnommen (siehe Anhang 2 bis 5). Hierbei zeigen alle eingesetzten Varianten hinreichende Eigenschaften für die geplante Anwendung. Nur bei Harzsystem Nr. 1 sollten die Temperatureinsatzgrenzen näher betrachtet werden. Festigkeitstechnisch werden alle angeführten Systeme für Struktur bzw. auch hochbeanspruchte Bauteile eingesetzt. Das ausgewählte Harzsystem ist damit vor allem auch vom gewählten Fertigungsverfahren abhängig.

Nr.	Harzsystem	Charakterisierung	$T_G / ^\circ\text{C}$	Fertigungsverfahren	Einsatzbereich
1	Araldite® LY 5085 Hardener HY 5046	Epoxidharz Härter	63 - 95	Handlaminieren Pressverfahren	Strukturbauteile Freizeitprodukte
2	Araldite® LY 556 Aradur® 917 Accelerator DY 070	Epoxidharz Härter Beschleuniger	140 - 155	Wickelverfahren Pultrusionsverfahren Pressverfahren	hochbeanspruchte Bauteile
3	Araldite® LY 556 Hardener XB 3473	Epoxidharz Härter	162 - 195	Wickelverfahren Injektionsverfahren Pressverfahren Pultrusionsverfahren	Strukturbauteile
4	EP 127	Epoxidharzsystem	145 - 230	Prepreglegen	hochbeanspruchte Bauteile

Tab. 4: Harzsysteme und Einsatzbereiche, Quelle: Eigene Darstellung.

2.5 Auslegung und Berechnung

In den folgenden Abschnitten werden die wichtigsten Punkte zur Auslegung von Faserverbundbauteilen erarbeitet. Die Erkenntnisse dienen als Grundlage für die Berechnung und Dimensionierung der Einzelteile der Straßenbeleuchtung. Da die Literatur zu diesem Gebiet sehr viel Inhalt bietet wird versucht nur auf die wichtigsten, für diese Arbeit relevanten Bestandteile, einzugehen.

2.5.1 Ablauf zur Bauteildimensionierung

Die Gestaltung eines Produktes ist von der Wahl der Faser und Matrix, wie auch von der gewählten Faserorientierung, dem Faservolumengehalt und insbesondere auch vom Fertigungsverfahren abhängig. Das mechanische Verhalten faserverstärkter Bauteile unterscheidet sich von isotropen und homogenen Werkstoffen. Es existiert daher eine Vielzahl von Berechnungsverfahren zur Auslegung von Verbundbauteilen. Die Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe hat daher eine Strategie entwickelt, welche mit überschaubarem Aufwand zu einem Ergebnis führt (siehe Abb. 11). Wie im nachfolgenden Diagramm ersichtlich, ist die Auslegung von der Bauteilgeometrie, dem Fertigungsverfahren und auch den Werkstoffeigenschaften abhängig.³³

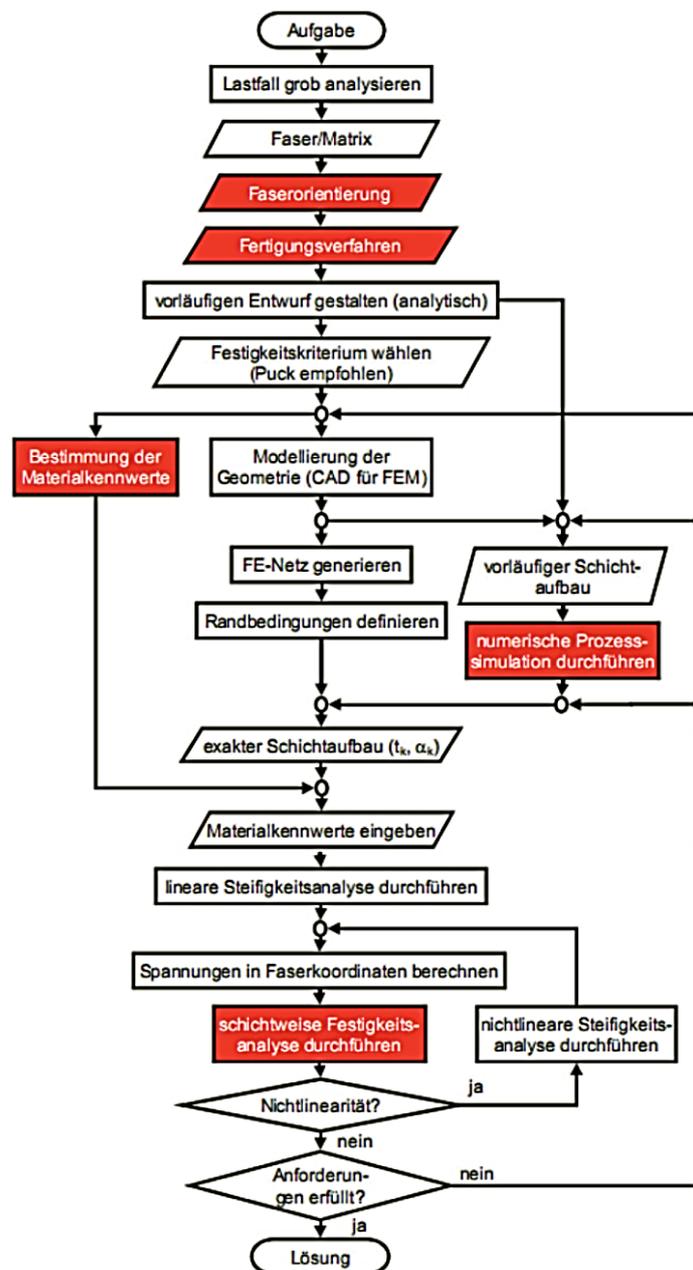


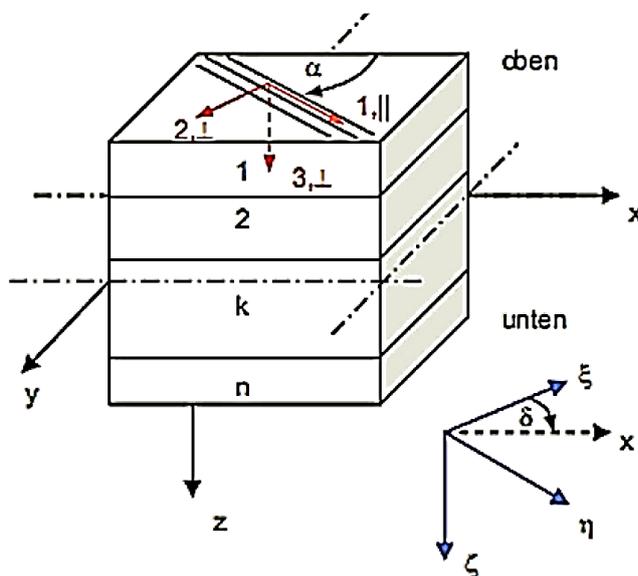
Abb. 11: Ablaufdiagramm zur Dimensionierung von Verbundbauteilen, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 296.

³³ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 295.

Auf die möglichen Fertigungsverfahren bzw. die Auswahlkriterien zur Findung des richtigen Verfahrens wird in den nachfolgenden Kapiteln noch näher eingegangen. Die Fasertypen wurden bereits in Kapitel 2.2.4 vorgewählt.

2.5.2 Ablauf zur Berechnung

Durch die Richtungsabhängigkeit (Anisotropie) von Verbundbauteilen müssen andere Berechnungsmethoden angewendet werden als bei isotropen Materialien. Im Gegensatz zu konventionellen Bauteilen gestaltet der Konstrukteur bei Verbundbauteilen nicht nur das Bauteil, sondern gewissermaßen auch den Werkstoff selbst. Faserverstärkte Bauteile sind aus Schichten mit unterschiedlicher Orientierung oder auch Material aufgebaut. Bei der Berechnung muss darum schichtweise vorgegangen werden. Zur Betrachtung der Schichten werden daher mehrere Koordinatensysteme, wie in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich, eingeführt.³⁴



Koordinatensysteme und Winkel:

- 1,2,3: Faserkoordinaten
- ||, \perp , \perp : Faserkoordinaten
- x,y,z: Laminatkoordinaten
- ξ, η, ζ : globale Koordinaten
- α : mathematisch positiv um z von x nach 1
- δ : mathematisch positiv um ζ/z von ξ nach x

Abb. 12: Koordinatensysteme eines Verbundbauteiles, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 300.

Betrachtet man eine unidirektionale Einzelschicht so ist ersichtlich, dass die mechanischen Eigenschaften der Schicht sehr von der Belastungsrichtung abhängen. In Tabelle 5 sind die unterschiedlichen Kennwerte für GFK bzw. CFK dargestellt. Es wurde dabei eine Einzelschicht mit 60% Faservolumengehalt untersucht. Die Werte wurden durch Prüfungen festgestellt.³⁵

³⁴ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 299 f.

³⁵ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 302 f.

			GFK	CFK
Dichte	ρ	[g/cm ³]	2,0	1,6
faserparalleler Elastizitätsmodul	$E_{ }$	[MPa]	45.000	140.000
fasersenkrechter Elastizitätsmodul	E_{\perp}	[MPa]	14.000	12.000
fasersenkrechter/-paralleler Schubmodul	$G_{\perp }$	[MPa]	5.000	6.000
fasersenkrechte/-parallele Querkontraktionszahl	$\nu_{\perp }$	[-]	0,27	0,26
faserparallele Zugfestigkeit	$R_{ }^t$	[MPa]	1.300	2.000
faserparallele Druckfestigkeit	$R_{ }^c$	[MPa]	800	1.400
fasersenkrechte Zugfestigkeit	R_{\perp}^t	[MPa]	35	50
fasersenkrechte Druckfestigkeit	R_{\perp}^c	[MPa]	140	200
fasersenkrechte/-parallele Schubfestigkeit	$R_{\perp }$	[MPa]	75	80

Tab. 5: Kennwerte einer unidirektionalen Einzelschicht, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 303.

Eine andere Möglichkeit zur Ermittlung der Kennwerte einer Einzelschicht folgt aus der Mikromechanik. Dabei werden die Eigenschaften der Fasern bzw. der Matrix kombiniert und somit wird auf die Schichteigenschaften geschlossen. Folgend dazu die halbempirischen Gleichungen:³⁶

$$E_{||} = \varphi E_{F||} + (1 - \varphi)E_M \quad (2.1)$$

$E_{||}$ /Pa faserparalleler Elastizitätsmodul
 φ /% Faservolumengehalt
 $E_{F||}$ /Pa Elastizitätsmodul der Faser (parallel)
 E_M /Pa Elastizitätsmodul der Matrix

$$E_{\perp} = \frac{E_M(1 + 0,85\varphi^2)}{\varphi \frac{E_M}{E_{F\perp}} + (1 - \varphi)^{1,25}} \quad (2.2)$$

E_{\perp} /Pa fasersenkrechter Elastizitätsmodul
 $E_{F\perp}$ /Pa Elastizitätsmodul der Faser (senkrecht)

$$G_{\perp||} = \frac{G_M(1 + 0,6\varphi^{0,5})}{\varphi \frac{G_M}{G_{F\perp||}} + (1 - \varphi)^{1,25}} \quad (2.3)$$

$G_{\perp||}$ /Pa fasersenkrechter/-paralleler Schubmodul
 G_M /Pa Schubmodul der Matrix
 $G_{F\perp||}$ /Pa Schubmodul der Faser

$$\nu_{\perp||} = \varphi \nu_{F\perp||} + (1 - \varphi)\nu_M \quad (2.4)$$

$\nu_{\perp||}$ fasersenkrechte/-parallele Querkontraktionszahl
 $\nu_{F\perp||}$ Querkontraktionszahl der Faser
 ν_M Querkontraktionszahl der Matrix

$$\nu_{||\perp} = \nu_{\perp||} \frac{E_{\perp}}{E_{||}} \quad (2.5)$$

$\nu_{||\perp}$ faserparallele/-senkrechte Querkontraktionszahl

³⁶ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 303 f.

Der Unterschied bei den Querkontraktionszahlen ist die Wirkrichtung der Kraft bzw. Kontraktion. Der erste Index gilt für die Richtung der Kontraktion, der zweite für die Richtung der Kraft. Rein rechnerisch können dadurch zwar Werte gewonnen werden, für den praktischen Einsatz wird jedoch meist auf Messwerte zurückgegriffen. Dies ist durch den hohen Einfluss des Fertigungsverfahrens bedingt. Mit den ermittelten Werten können nun Festigkeits- bzw. Steifigkeitsberechnungen durchgeführt werden. Das Vorgehen dazu wird durch die klassische Laminatschichttheorie beschrieben. Die einzelnen Arbeitsschritte dazu (siehe Abb. 13) werden heutzutage meist mit analytischen Programmen oder FEM-Programmen durchgeführt. Dabei wird die Steifigkeitsmatrix jeder Einzelschicht berechnet, diese ins Laminatkoordinatensystem transformiert und anschließend die Gesamtsteifigkeitsmatrix des Laminats ermittelt. Anschließend kann die Beanspruchung des Laminats berechnet werden und auf die Spannungen in den Einzelschichten zurückgerechnet werden.³⁷

Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Schritte inkl. aller Formeln wird im Zuge dieser Arbeit verzichtet. Die Informationen sind bei Bedarf der Fachliteratur zu entnehmen.

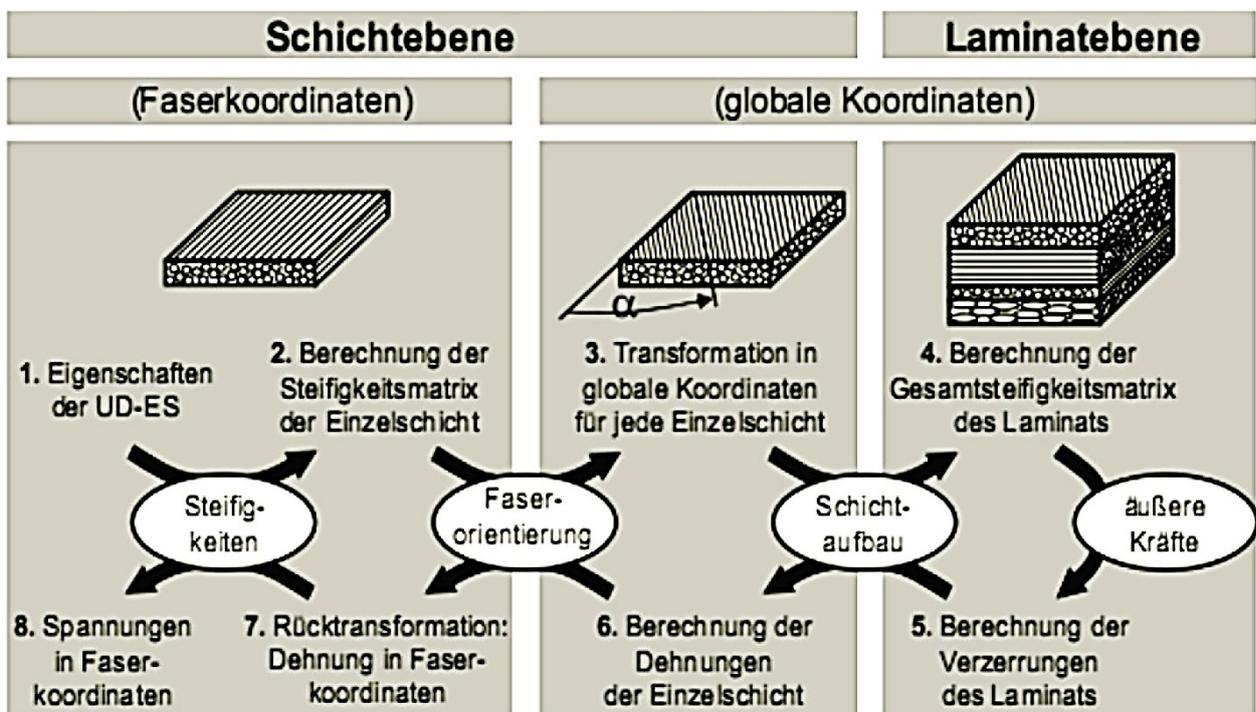


Abb. 13: Schritte der klassischen Laminatschichttheorie, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 306.

³⁷ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 304 ff.

3 FERTIGUNGSVERFAHREN ZUR HERSTELLUNG VON FASERVERBUNDBAUTEILEN

Es gibt eine Vielzahl an Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen. Das Verarbeitungsverfahren beeinflusst insbesondere den Faservolumengehalt wie auch die Faserorientierung. Je nach Geometrie des zu erstellenden Bauteiles, der gewählten Faser und der Matrix stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung.³⁸

In den folgenden Kapiteln werden nur die zur Umsetzung dieser Arbeit in Frage kommenden Verfahren betrachtet. Neben diesen würde es noch einige andere Methoden geben die sich jedoch durch die Aufgabenstellung bereits ausschließen lassen. Grundlegend wird hier in Verfahren zur Herstellung von Rohren bzw. zur Herstellung von Freiformbauteilen unterschieden.

3.1 Verfahren zur Herstellung von Rohren

Zur Herstellung des rohrförmigen Mastes kommen vier Fertigungsverfahren in Frage. Diese sind das Pultrusionsverfahren, das Wickelverfahren, das Schleuderverfahren und das Schlauchblasverfahren. Im Anschluss wird auf die einzelnen Verfahren näher eingegangen um schlussendlich eine passende Auswahl zur Umsetzung treffen zu können. Das gewählte Fertigungsverfahren wird sich auch auf die Gestaltung der notwendigen Vorrichtungen auswirken.

3.1.1 Pultrusionsverfahren

Mit dem Pultrusionsverfahren lassen sich vor allem Profile herstellen. Dabei können verschiedene Verstärkungsmaterialien (z.B. Rovings, Matten, Gewebe, ...) eingesetzt werden. Diese Materialien werden hierbei durch ein Werkzeug mit der gewünschten Profilkontur gezogen. Die Durchtränkung mit der Matrix erfolgt dabei bereits vor dem Werkzeug. Die Aushärtung der Profile erfolgt beim Durchlaufen des Werkzeuges unter Zufuhr von Wärme (siehe Abb. 14). Verstärkungsmaterialien sind je nach Anforderung an das Profil wählbar. Meist werden Oberflächenvliese eingesetzt um ein hochwertiges Erscheinungsbild zu erreichen, oder um eine gewisse Wetter- bzw. UV-Beständigkeit zu gewährleisten. Folgende Parameter sollten bei Verwendung dieses Verfahren eingehalten werden:³⁹

- Maximale Länge bis 12 m (transportbedingt)
- Wanddicke mindesten 1,5 mm, maximal 60 mm (große Wanddickenunterschiede sind zu vermeiden)
- Hinterschnitte möglich
- Unterschiedliche Wanddicken möglich
- Hohlkammern möglich
- Farbgebung durch Einfärbung der Oberflächenvliese möglich (Glasfasern sind nur bedingt färbbar)

³⁸ Vgl. Michaeli (2010), S. 153.

³⁹ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 378 ff.

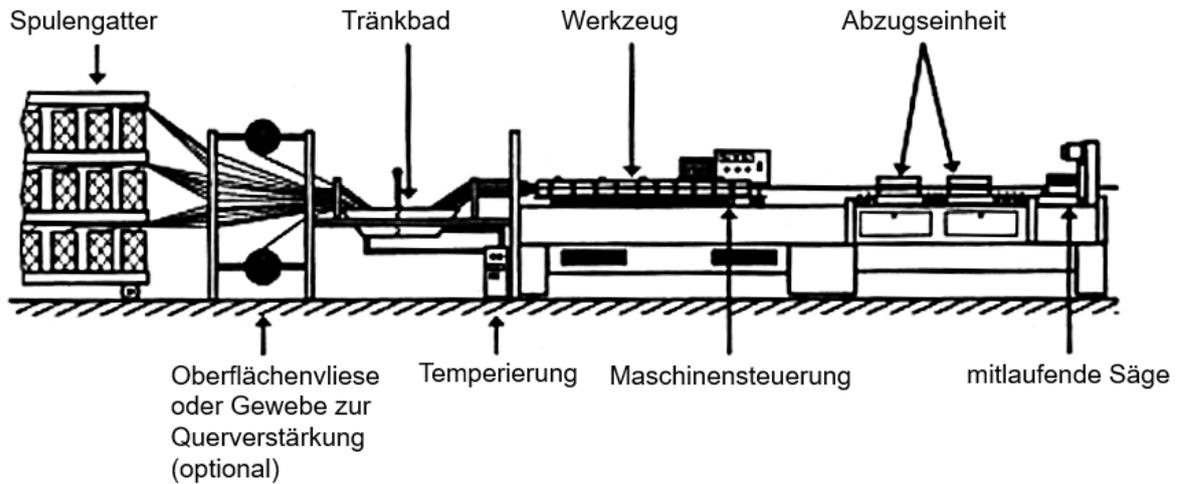


Abb. 14: Aufbau des Pultrusionsverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 157 (leicht modifiziert).

3.1.2 Wickelverfahren

Dieses Verfahren dient zur Herstellung von rotationssymmetrischen Körpern. Der Einsatzbereich des Wickelverfahrens reicht von Behältern über Rohre bis hin zu Boostern von Raketen. Die Geometrie des Bauteiles wird bei dieser Technik durch den Wickelkern vorgegeben. Auf diesen Kern werden die mit Harz getränkten Fasern abgelegt. Der Kern kann bei zylindrischen oder konischen Bauteilen entformt und somit wiederverwendet werden. Es ist jedoch auch möglich den Kern im Bauteil zu belassen. Man spricht hierbei von einem verlorenen Kern oder Liner. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von ausschmelzbaren Kernen.⁴⁰

In der folgenden Abbildung ist der Aufbau einer Drehbankwickelanlage dargestellt.

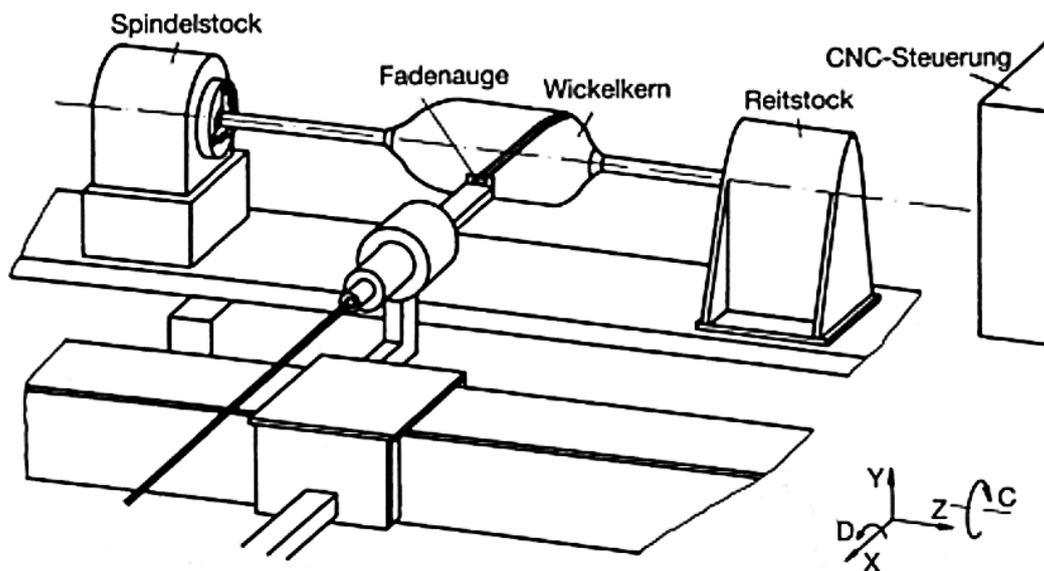


Abb. 15: Drehbankwickelanlage mit Kern, Quelle: Michaeli (2010), S. 156.

⁴⁰ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 361 ff.

Bei dieser Anlage werden die Fasern von Spulenständern abgezogen, durch ein Tränkbad geführt und anschließend durch das Fadenaug auf dem sich drehenden Kern abgelegt. Die Faserorientierung kann dabei durch Steuerung des Fadenauges eingestellt werden. Komplexe Geometrien führen bei diesem Verfahren zu Problemen da die Rutschsicherheit oft überschritten wird. Um den Prozess zu beschleunigen wird meist die Wickelgeschwindigkeit oder die Faseranzahl erhöht. Eine andere Methode ist die Verwendung eines Ringfadenauges oder das Wickeln mit Bändern.⁴¹

Die Wickeltechnik wird üblicherweise für Bauteile mit Durchmessern von 0,1 bis 10 m und Längen von 1 bis 12 m angewendet. Sollten längere Bauteile benötigt werden, so können einzeln gewickelte Abschnitte später durch Verkleben oder verschrauben verbunden werden.⁴²

3.1.3 Schleuderverfahren

Das Schleuderverfahren wird zur Herstellung von zylindrischen Teilen, vor allem von Rohren eingesetzt. In der Metallindustrie ist es auch als Schleuderguss-Verfahren bekannt. Maßgebend für dieses Verfahren ist die glatte Außenfläche die durch die Form entsteht. Die Technologie basiert auf dem Prinzip der Fliehkraft die durch rotierende Massen entsteht. Die Form wird durch eine drehbare und beheizbare Schleudertrommel dargestellt. Die Einbringung des Materials erfolgt durch eine Injektionslanze, welche sich in der Trommel bewegen lässt (siehe Abb. 16). Als Material wird hierbei ein Harz/Füllstoffgemisch verwendet das durch diese Lanze gleichmäßig verteilt wird. Als Füllstoff werden üblicherweise Glasfasern eingesetzt. Ebenso können zuvor Verstärkungstoffe (Matten, Gelege, oder Gewebe) mittels eines Hilfsdorns eingebracht werden. Eine Verwendung von Rovings ist nicht möglich, da sich diese nicht vom Hilfsdorn lösen. Nachdem genügend Material in die sich drehende Trommel eingebracht und der Härtungsvorgang abgeschlossen wurde, kann der Bauteil entformt werden. Durch die Rotation erfolgt zudem eine Verdichtung der eingebrachten Materialien. Der erreichbare Faservolumengehalt dieses Verfahrens liegt dadurch bei ca. 50 - 55%.⁴³

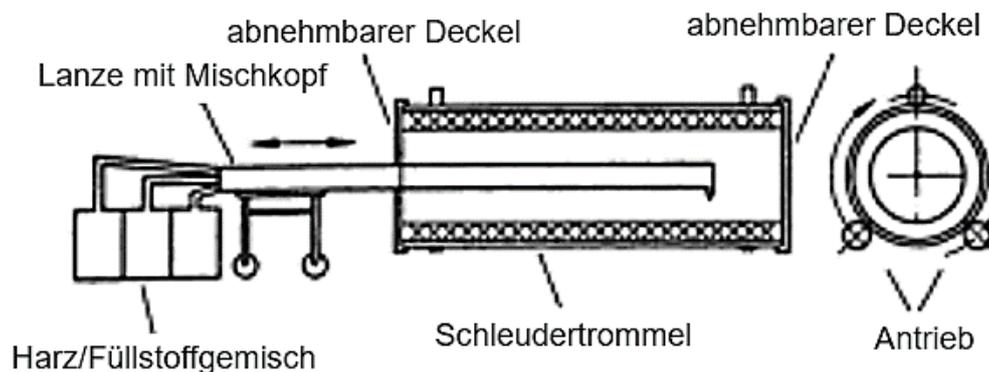


Abb. 16: Prinzip des Schleuderverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 176 (leicht modifiziert).

⁴¹ Vgl. Michaeli (2010), S. 155 ff.

⁴² Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 362.

⁴³ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 480 ff.

3.1.4 Schlauchblasverfahren

Das Schlauchblasverfahren ist eine Sonderform des Harzinjektionsverfahrens und wird vor allem für Leichtbauanwendungen eingesetzt. Dabei werden unter Zuhilfenahme von expandierenden Kernen hohle Strukturen erzeugt. Der Kern kann hierbei im Bauteil verbleiben oder wird nachträglich entfernt. Einsatzgebiete liegen in der Herstellung von Rohren, Krümmern oder Krafteinleitungselemente. Die dadurch erzeugten Bauteile haben zugleich eine sehr hohe Laminatqualität unter Verwendung von günstigen Ausgangsmaterialien. Nachteilig für dieses Verfahren ist der hohe Aufwand im Vergleich zu anderen Verfahren.⁴⁴

3.2 Verfahren zur Herstellung von Freiformbauteilen

Der gewölbte Laternenkopf besteht zum Großteil aus Freiformflächen. Der Einsatz eines Fertigungsverfahrens für rotationssymmetrische Bauteile kommt daher nicht in Frage. Zur Herstellung solcher Bauteile können jedoch andere Verfahren, wie das Handlaminieren, das Prepreglegen, das Harzinjektionsverfahren oder das Harzinfusionsverfahren eingesetzt werden. In den folgenden Abschnitten werden die in Frage kommenden Verfahren zur Herstellung der Freiformbauteile betrachtet.

3.2.1 Handlaminieren

Dieses Verfahren ist das einfachste Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Bauteilen. Es wird vor allem für große und komplexe Bauteile eingesetzt, oder für Einzelanwendungen bzw. für Reihen mit niedrigen Stückzahlen. Grundlegend ist das Handlaminieren durch die Verwendung offener, meist gewölbter Vorrichtungen gekennzeichnet. Weitere Merkmale sind die Möglichkeit zur Gestaltung von schwierigen Geometrien sowie die einseitig glatte Oberfläche der fertigen Bauteile. Wirklich wirtschaftlich ist dieses Verfahren durch den hohen Personalaufwand nur für Einzelanfertigungen. Zudem ist die Wiederholbarkeit durch den hohen handwerklichen Anteil nicht einfach gegeben. Grundlage zur Herstellung von Bauteilen mit diesem Verfahren sind geeignete Vorrichtungen und insbesondere auch ein qualifiziertes Personal. Bei der Herstellung von handlaminieren Bauteilen werden die einzelnen Schichten auf eine meist polierte, mit Trennmittel behandelte Formfläche aufgetragen. Die Faserhalbzeuge werden hierbei in zugeschnittener Form aufgelegt und mit Harz durchtränkt. Zur Entlüftung und Verdichtung der Lagen werden Handrollen o.ä. Hilfsmittel verwendet (siehe Abb. 17). Nach erfolgter Aufbringung aller Lagen kann das Bauteil ausgehärtet und entformt werden.⁴⁵

Nachteile dieses Verfahren sind der relativ geringe erreichbare Faservolumengehalt von ca. 45%, sowie die Schwierigkeit zur Einhaltung der genauen Faserorientierung. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren selten zur Herstellung von Hochleistungsverbundbauteilen eingesetzt. Angewendet wird das Verfahren besonders für große Bauteile wie Boote, Behälter oder für den Formenbau. Für den Einsatz dieses Verfahrens sprechen die niedrigen Investitionskosten die zur Umsetzung notwendig sind.⁴⁶

⁴⁴ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 395.

⁴⁵ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 326 ff.

⁴⁶ Vgl. Michaeli (2010), S. 153.

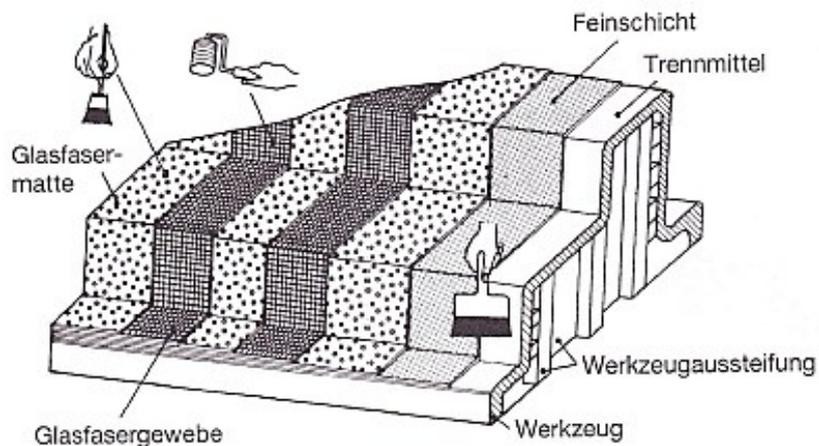


Abb. 17: Prinzip des Handlaminierverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 154.

Wie bereits erwähnt sind für das Handlaminieren Negativformen notwendig. Diese können je nach Anforderungen aus Stahl, Aluminium, Holz oder Harzen angefertigt werden. Bei Bedarf ist bei der Vorrichtungskonstruktion auch die Schrumpfung der Bauteile zu berücksichtigen um die Maßhaltigkeit zu gewährleisten. Die Werkstoffwahl folgt dabei meist unter Berücksichtigung der Geometrie bzw. der Anzahl der Entformungen. Metallformen sind hierbei um einiges teurer, jedoch sind sie in Punkto Oberflächenqualität und Wiederverwendbarkeit deutlich besser.⁴⁷

3.2.2 Verlegen von Prepreg

Dieses Verfahren wird besonders für hochbeanspruchte Verbundbauteile eingesetzt. Dabei werden mit Matrixmaterial vorimprägnierte Faserhalbzeuge verwendet, die manuell oder automatisiert zugeschnitten und in der Form abgelegt werden. Nach erfolgtem Aufbau der Laminatschichten wird die Form mit einer Folie bedeckt und in einem Autoklav unter Druck und Temperatur ausgehärtet. Ein dabei angelegtes Vakuum entzieht dabei die überschüssige Luft zwischen den einzelnen Lagen. Durch den herrschenden Überdruck wird das Laminat noch zusätzlich verdichtet (siehe Abb. 18).⁴⁸

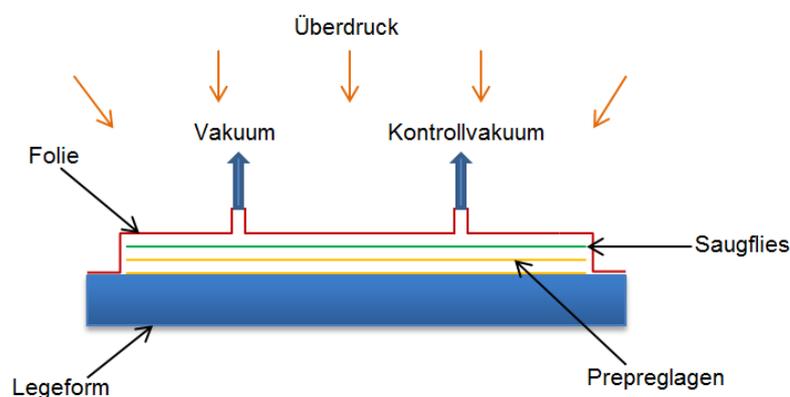


Abb. 18: Prinzip des Verlegens von Prepreg, Quelle: Eigene Darstellung.

⁴⁷ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 330 f.

⁴⁸ Vgl. Michaeli (2010), S. 155.

Der Vorteil der hohen Qualität dieses Verfahren hat jedoch auch einen wesentlichen Nachteil. Durch den Einsatz eines Autoklavs steigen auch die Kosten. Zudem sind die Faserhalbzeuge (Prepregs) wesentlich teurer als bei anderen Verfahren. Darum lassen sich zwar Bauteile mit höchster Qualität herstellen, aber auch zu einem dementsprechenden Preis.

Die Kriterien zur Gestaltung einer Vorrichtung für dieses Verfahren sind vergleichbar mit jenen des Handlaminierens. Die Vorrichtung liefert hierbei die Außenkontur des Bauteiles. Das fertige Produkt hat also auch nur eine einseitig glatte Oberfläche. Festigkeitstechnisch unterliegt sie keinen besonderen Anforderungen, da der Überdruck im Autoklaven allseitig wirkt. Sie kann deshalb, wie in Abb. 19 ersichtlich, besonders leicht gebaut werden. Dies begünstigt zudem eine gleichmäßige Temperaturverteilung.

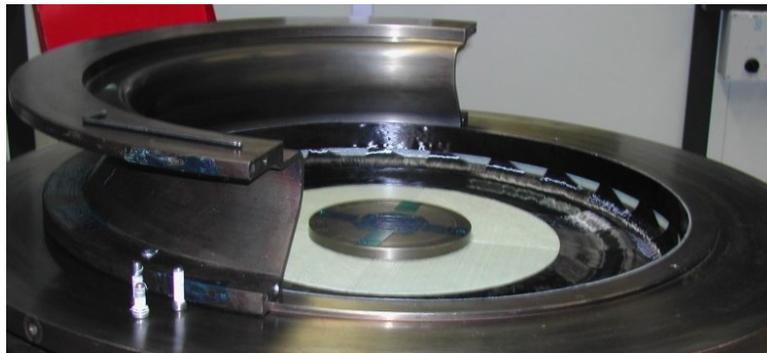


Abb. 19: Legevorrichtung zum Verlegen von Prepreg, Quelle: Eigene Darstellung.

3.2.3 Harzinjektionsverfahren

Das Harzinjektionsverfahren, oder auch RTM-Verfahren (Resin Transfer Moulding), wird eingesetzt zur Produktion von lang- und endlosfaserverstärkten Kunststoffen. Dabei wird unter Verwendung von trockenen Faserhalbzeugen die Matrix mit Hilfe eines Druckgefälles injiziert. Der Einsatzbereich liegt besonders in flächigen Bauteilen für kleine bis mittlere Serien. Der Verfahrensprozess lässt sich dabei wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen, in vier Schritte einteilen. Zuerst werden in ein, je nach Komplexität des Bauteiles, zwei- oder mehrgeteiltes Werkzeug die trockenen Faserhalbzeuge eingelegt. Das können Gelege, Gewebe, Vliesstoffe, Matten, Gestricke oder Geflechte, meist aus Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfaser sein. Diese Materialien werden in den meisten Fällen zu Vorformlingen vorkonfektioniert. Das Werkzeug selbst wurde zuvor bereits gereinigt und mit Trennmittel behandelt. Danach wird die Form geschlossen und das vorbereitete Harzsystem über eine Öffnung volumenstrom- oder druckkonstant injiziert. Dabei werden die Fasern durchströmt bis die Matrix an der Entlüftung wieder austritt. Als Harzsysteme für dieses Verfahren werden vorwiegend ungesättigte Polyester-, Vinylester, Epoxid- oder Phenolharze verwendet. Ist die Form komplett gefüllt so werden die Entlüftungsöffnungen verschlossen und der Bauteil wird unter Aufbringung eines Nachdruckes ausgehärtet. Im letzten Schritt wird das Werkzeug wieder geöffnet und der Bauteil entnommen. ⁴⁹

⁴⁹ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 390 ff.

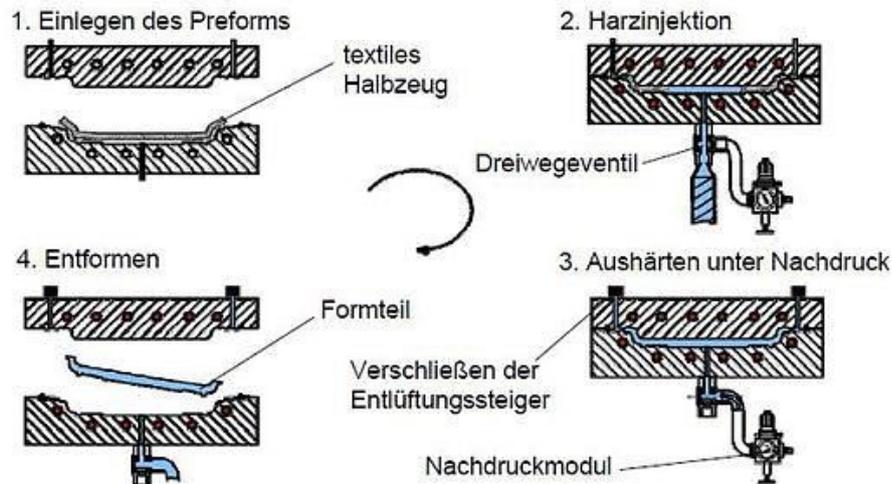


Abb. 20: Ablauf des Harzinjektionsverfahrens, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 391.

Ein Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Verwendung von trockenen Faserhalbzeugen und dem hohen Faservolumengehalt von $>60\%$. Zudem können damit Bauteile mit beidseitig guter Oberfläche erzeugt werden. Weitere Pluspunkte sind die gute Laminatqualität, die Einhaltung enger Fertigungstoleranzen sowie die Möglichkeit zur Automatisierung des Prozesses.⁵⁰

Um das Verfahren zu optimieren wurden in weiterer Folge Prozessvarianten bzw. Gestaltungsoptionen entwickelt. Diese führten zu den folgenden Sonderformen des Harzinjektionsverfahrens:⁵¹

- **Vacuum Assisted (VA)RTM-Verfahren:** Bei diesem Verfahren wird zusätzlich noch Vakuum bei den Entlüftungsöffnungen angelegt. Dadurch ist das Druckgefälle in der Form dementsprechend höher. Zudem werden Lufteinschlüsse mit dieser Methode weitestgehend vermieden.
- **Compression-RTM-Verfahren:** Hierbei wird die Form nicht gleich vollständig geschlossen. Dies führt zu geringeren Fließwiderständen und in der Folge zu einem schnelleren Befüllen der Form. Nach einer teilweisen Füllung wird die Vorrichtung geschlossen und die Fasern werden durch die Pressung vollständig durchtränkt. Vorteil dieser Methode sind die kurzen Zykluszeiten, nachteilig ist jedoch der Einsatz von teuren Tauchkantenwerkzeugen.
- **Schlauchblas-RTM-Verfahren (siehe 3.1.4)**
- **Differential Pressure (DP)RTM-Verfahren:** Für diese Variante wird nur eine starre Werkzeughälfte eingesetzt. Die zweite Hälfte wird durch eine flexible Platte oder Folie, welche Luftdicht mit der unteren Werkzeughälfte abschließt, gebildet. Unter Einsatz eines Autoklavs wird das Harz injiziert. Der dabei vorherrschende Überdruck im Autoklav erzeugt den benötigten Gegendruck um die flexible Werkzeughälfte in Position zu halten. Diese Methode wird vor allem für flächige Bauteile eingesetzt um Werkzeugkosten zu reduzieren. Ein Nachteil ist aber die Notwendigkeit eines Autoklavs. Die entstehenden Bauteile weisen einen sehr hohen Faservolumengehalt und eine ausgezeichnete Laminatqualität auf.

⁵⁰ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 396.

⁵¹ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 395.

3.2.4 Harzinfusionsverfahren

Das Harzinfusionsverfahren lässt sich, wie auch das Harzinjektionsverfahren, zu den Flüssigimprägnierverfahren zählen. Es wird vor allem zur kostengünstigen Produktion von größeren Verbundbauteilen mit komplexen Geometrien eingesetzt. Ein Merkmal dieses Verfahrens ist die Verwendung von nur einer Formenhälfte (ähnlich dem Handlaminieren). Die Tränkung der Trockenen Fasern erfolgt dabei in Dickenrichtung, wodurch ein kurzer Fließweg der Matrix gewährleistet wird (siehe Abb. 21). Dabei werden die Faserhalbzeuge zunächst auf die Form aufgelegt und mit einem Trenngewebe sowie Verteilmedium abgedeckt. Das Trenngewebe ist dabei notwendig um die Fertigungshilfsmittel nach dem Aushärten des Bauteils wieder lösen zu können. Das Verteilmedium dient zur Verteilung der Matrix über die komplette Form. Das fertige Konstrukt wird anschließend mit einer Vakuumfolie abgeschlossen und evakuiert. Die Befüllung der Form erfolgt schlussendlich über einen Angusskanal. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt besonders in der wirtschaftlichen Herstellung von großflächigen Bauteilen. Da kein Autoklav notwendig ist und auch die Vorrichtung recht einfach gehalten werden kann sind die Herstellkosten dementsprechend niedrig. Nachteilig wirkt sich jedoch der Einsatz der vielen Fertigungshilfsmittel aus, welche nach dem Aushärten des Bauteiles als Abfall entsorgt werden müssen. Des Weiteren können auch mit diesem Verfahren nur Bauteile mit einseitig glatter Oberfläche gefertigt werden. Typische Einsatzgebiete des Harzinfusionsverfahrens sind beispielweise Strukturbauteile für die Luft- und Raumfahrt, Bootsrümpfe sowie Rotorblätter für Windkraftanlagen.⁵²

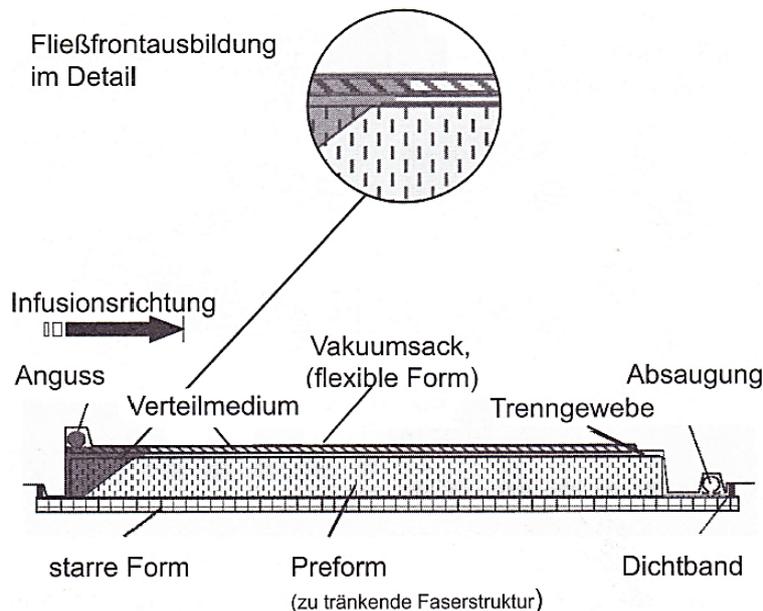


Abb. 21: Schematischer Infusionsaufbau und Fließfrontverlauf des Harzinfusionsverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 160.

Bauteile die im Harzinfusionsverfahren hergestellt werden erreichen meist einen Faservolumengehalt unter 50%. Für Bauteile die einen höheren Faservolumengehalt fordern, wie zum Beispiel in der Automobilindustrie, kommt dieses Verfahren nicht zum Einsatz.⁵³

⁵² Vgl. Michaeli (2010), S. 159 f.

⁵³ Vgl. AVK (Hrsg.) (2014), S. 398.

3.3 Auswahl der Fertigungsverfahren

Die Auswahl des Fertigungsverfahrens beeinflusst den Einsatz der jeweiligen Faserhalbzeuge und ebenso die Gestaltungsrichtlinien für die Vorrichtungskonstruktion. Deshalb werden anschließend die zuvor betrachteten Fertigungsverfahren verglichen um für die Anwendung die geeignete Methode zu finden.

In der Literatur werden zur Auswahl von Fertigungsverfahren folgende Abhängigkeiten beschrieben. Das gewählte Verfahren ist abhängig von:⁵⁴

- **den erforderlichen Werkstoffeigenschaften:** Prepreglegen liefert beispielweise Bauteile mit minimalen Fehlstellen. Der mögliche Faservolumengehalt variiert je nach Verfahren.
- **der gewünschten Geometrie:** Die Komplexität des geforderten Bauteiles ist zu berücksichtigen. Die einzelnen Verfahren sind teilweise in der herstellbaren Geometrie eingeschränkt (z.B. Wickelverfahren für rotationssymmetrische Bauteile)
- **den Stückzahlen und Kosten:** Für hohe Stückzahlen und Serienfertigung kommen andere Verfahren als für Einzelstücke oder Prototypen zum Einsatz. (z.B. Harzinjektionsverfahren statt Handlaminieren wegen Serienproduktion). Auch die Kosten schwanken stark zwischen den einzelnen Verfahren und sollten berücksichtigt werden.

Die Beurteilung der Geometrie, welche durch das Flächenmodell bereits gegeben ist, ist der erste Schritt zur Auswahl. Die Unterscheidung in den rotationssymmetrischen Hohlmasten und den aus Freiformflächen bestehenden Laternenkopf wurde bereits getroffen. Durch den Masten und den Laternenkopf werden zwei Fertigungsverfahren erforderlich. Im Folgenden werden die Verfahren anhand ihrer Vor- und Nachteile für dieses Projekt betrachtet. In der nachfolgenden Tabelle werden hierbei die Fertigungsverfahren zur Herstellung von Rohren bzw. des Hohlmastens aufgelistet.

Fertigungsverfahren	Vorteile	Nachteile
Pultrusionsverfahren	hohe Oberflächenqualität, Oberflächenvliese möglich, Längen bis 12 m möglich	nur Profilquerschnitte, teure Fertigungsanlage
Wickelverfahren	konische Bauteile möglich, Wiederverwendung des Kerns, Längen bis 12 m möglich	keine komplexen Geometrien, teure Fertigungsanlage, schlechtere Oberflächenqualität
Schleuderverfahren	glatte Oberfläche möglich, konische Bauteile möglich	Endlofasern nicht möglich, teure Fertigungsanlage
Schlauchblasverfahren	hohe Laminatqualität, günstige Ausgangsmaterialien	hoher Aufwand, fehlende Erfahrung

Tab. 6: Vergleich der Verfahren zur Herstellung von Rohren, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁴ AVK (Hrsg.) (2014), S. 297.

Aus der Auflistung ist ersichtlich, dass nicht alle Verfahren zur Herstellung des konischen Hohlmates geeignet sind. Das Pultrusionsverfahren würde zwar eine hohe Oberflächenqualität und die Einsetzbarkeit von Vliesen ermöglichen, jedoch können damit nur Profilquerschnitte erzeugt werden. Da eine Änderung der Geometrie nicht in Frage kommt fällt dieses Verfahren weg. Auch das Schlauchblasverfahren wird hier nicht in Betracht gezogen. Gründe sind der hohe Aufwand bzw. die fehlende Erfahrung mit den geforderten Geometrien. Das Wickelverfahren und Schleuderverfahren würde sich zur Herstellung der Geometrie eignen. Der ausschlaggebende Unterschied liegt schlussendlich in der Optik der fertigen Bauteile. Das Schleuderverfahren liefert hier die bessere Oberflächenqualität, jedoch ist eine Faserorientierung nicht erkennbar. Beim Wickelverfahren wird dieses Merkmal ersichtlich. Da diese Optik laut Aufgabenstellung vorgegeben ist fällt die Wahl auf das Wickelverfahren. Zudem ist eine Wickelanlage vorhanden, in eine Anlage zum Schleudern von Rohren müsste aber investiert werden.

Anschließend werden nun die möglichen Verfahren zur Herstellung des Laternenkopfes verglichen um auch hier das geeignete Verfahren auswählen zu können.

Fertigungsverfahren		Vorteile	Nachteile
Handlaminieren		geringe Formenkosten, komplexe Geometrie möglich, wirtschaftlich bei Einzelfertigung	hohe Lohnkosten, geringer Faservolumengehalt, einseitig raue Oberfläche
Prepreglegen		genaue Faserorientierung, sehr hoher Faservolumengehalt, leichte Vorrichtung	teurer Autoklav notwendig, einseitig raue Oberfläche, hohe Herstellungskosten
Harzinjektionsverfahren	RTM-Verfahren	hoher Faservolumengehalt, gute Oberflächenqualität	massive Vorrichtung, Injektionsanlage notwendig
	Vacuum-Assisted - RTM	keine Lufteinschlüsse im Teil, schnelle Tränkung, hoher Faservolumengehalt, gute Oberflächenqualität	massive Vorrichtung, Injektionsanlage notwendig, Vakuumanschluss notwendig
	Compression - RTM	geringe Durchlaufzeit, hoher Faservolumengehalt, gute Oberflächenqualität	massive Vorrichtung, teures Tauchkantenwerkzeug, notwendig
	Differential-Pressure - RTM	hoher Faservolumengehalt, hohe Laminatqualität, leichte Vorrichtung	teurer Autoklav notwendig, einseitig raue Oberfläche
Harzinfusionsverfahren		geringe Formenkosten, komplexe Geometrien möglich, kein Autoklav notwendig	großer Materialverbrauch, einseitig raue Oberfläche, geringer Faservolumengehalt

Tab. 7: Vergleich der Verfahren zur Herstellung von Freiformbauteilen, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Verfahren zur Herstellung von Freiformbauteilen sind sehr weit gestreut. Um hier zu einer Auswahl zu kommen werden im ersten Schritt die notwendigen Stückzahlen und Kosten betrachtet. Von der Straßenbeleuchtung sollen grob 20 – 30 Stück angefertigt werden. Der Einsatz eines teuren Injektionswerkzeuges kommt daher nicht in Frage. Auch der Einsatz eines Autoklavs wird aus Kostengründen ausgeschlossen. Somit fallen die Varianten des Harzinjektionsverfahrens weg. Der Einsatz dieser Verfahren würde sich nur bei höheren Stückzahlen lohnen. Auch das Prepreglegen kommt durch die hohen Herstellungskosten nicht in Frage. Zudem ist die hohe Laminatqualität dieses Verfahrens hier nicht notwendig. Damit fällt die Entscheidung zwischen dem Handlaminieren und dem Harzinfusionsverfahren. Der größte Aufwand fällt hierbei einerseits auf die hohen Lohnkosten des Handlaminierens, andererseits auf den großen Verbrauch von Fertigungshilfsmitteln beim Harzinfusionsverfahren. Die Wahl fällt hier auf das Handlaminieren, da dies die günstigere Variante darstellt.

Somit wird die Straßenbeleuchtung, bestehend aus dem Mast und dem Laternenkopf, unter Verwendung des Wickelverfahrens und des Handlaminierens hergestellt. Auf die Gestaltung der Vorrichtungen für dieses Verfahren wird in den nachfolgenden Kapiteln noch näher eingegangen.

Nach Auswahl der Fertigungsverfahren lässt sich auch die Wahl der Faserhalbzeuge und der Matrix konkretisieren. Als Faserhalbzeuge kommen Kohlefaserrovings zum Wickeln, und Kohle- bzw. Glasfasergewebe oder -gelege beim Handlaminieren zum Einsatz. Die Verwendung von Glasfaserrovings zum Wickeln wird nicht in Betracht gezogen, da die Optik dies nicht zulässt. Zudem ist ein Wechsel der Faserart während des Wickelvorganges nicht gewünscht. Auf die genaue Faserwahl wird bei der Bauteildimensionierung eingegangen.

Als Matrix werden die bereits vorhandenen Systeme eingesetzt (siehe Abschnitt 2.4.3 bzw. Tab. 4). Für das Handlaminieren kommt hierbei Harzsystem Nr. 1, bestehend aus dem Epoxidharz Araldite® LY 5085 und dem Härter HY 5046, zum Einsatz. Dieses System wird vom Hersteller für das Handlaminieren empfohlen. Die erreichbare Glasübergangstemperatur von bis zu 95°C sollte zudem auch hinreichend sein (siehe Anhang 3). Messungen der Einsatztemperatur sind jedoch anzuraten bzw. durchzuführen. Zum Wickeln werden momentan die Systeme Nr. 2 und 3 angewendet. Für Rohre mit kleinen Durchmessern wird das Harzsystem Nr. 2, bestehend aus dem Epoxidharz Araldite® LY 556, dem Härter Aradur® 917 und dem Beschleuniger DY 070, angewendet (siehe Anhang 4). Der Mast der Straßenbeleuchtung fällt in diese Kategorie und somit wird hierfür dieses System verwendet. Die Auswahl ist auch bedingt durch die große Erfahrung mit den genannten Systemen. Die Eigenschaften der Harzsysteme bezüglich Verarbeitung bzw. der fertigen Bauteile sind hier weitestgehend bekannt. Somit kann der Entwicklungsaufwand zur Einführung eines neuen Harzsystems vermieden werden.

4 AUSLEGUNG DER VERBUNDBAUTEILE

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Bauteile der Straßenbeleuchtung näher betrachtet und dimensioniert. Hierbei ist es dienlich sich am Ablaufdiagramm laut Abschnitt 2.5.1 zu orientieren. Zuerst wird dabei der Lastfall analysiert. Die Straßenbeleuchtung befindet sich im freien und unterliegt somit den Umgebungsbedingungen. Dazu lassen sich Windlasten und Schneelasten zählen. Weitere Randbedingungen sind durch das Eigengewicht der Verbundbauteile bzw. der notwendigen Anbauten, wie beispielweise der Leuchtkörper, gegeben. Die Wind- und Schneelasten wurden durch eine Standberechnung eines Ziviltechnikers ermittelt und sind damit bereits bestimmt. Zusammenfassend lassen sich die Randbedingungen wie folgt auflisten:

- Windlasten in Längsrichtung: 0,33 kN/m
- Schneelasten in vertikaler Richtung: 0,05 kN/m
- Masse der Anbauten: 5 kg (Annahme)
- Eigengewicht der Straßenbeleuchtung

Die weiteren Schritte zur Auswahl der Faser bzw. Matrix sowie des Fertigungsverfahrens wurden in den Kapiteln zuvor durchgeführt. Somit ist im nächsten Schritt die Geometrie der Bauteile zu erstellen. Nachfolgend kann ein erster Entwurf des Lagenaufbaus erstellt werden. Die Daten dienen anschließend als Grundlage für die Berechnung. Je nach Ergebnis sind hierbei meist mehrere Durchläufe dieser Vorgehensweise notwendig. Dabei können sich die Geometrie oder der Lagenaufbau ändern. Die gewählten Fertigungstechniken und Materialien könnten natürlich auch variiert werden. In erster Linie wird aber versucht mit den festgelegten Fertigungstechniken und Materialien ein positives Ergebnis zu erreichen.

4.1 Modellierung der Geometrie

Die Gestalt der Straßenbeleuchtung ist, wie bereits in der Ausgangssituation erwähnt, durch ein Flächenmodell gegeben. Folgend wird diese Geometrie kurz dargestellt um einen Überblick der Abmessungen zu bekommen (siehe Abb. 22). Bei der Dimensionierung wird die Straßenbeleuchtung wiederum in den konischen Hohlmasten und den gewölbten Laternenkopf unterteilt.

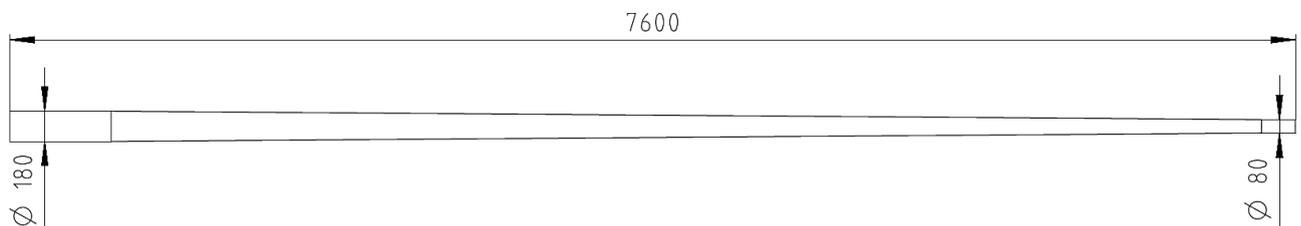


Abb. 22: Außenkontur des Hohlrohrs, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Hohlmast ist dabei auf dem Großteil der Länge konisch. Nur die Endabschnitte werden zylindrisch ausgeführt um die Schnittstelle einfacher gestalten zu können. Für die Berechnung ist hierbei ein Flächenmodell notwendig. Die notwendige Wandstärke des Hohlrohrs ergibt sich durch den Lagenaufbau.

Der Laternenkopf besteht aus Freiformflächen. Die Zusammenstellung der beiden Bauteile erfolgt durch eine Klebeverbindung auf die später eingegangen wird. Ebenso wie beim Mast wird hier zuerst mit dem Flächenmodell gearbeitet. Für die Berechnung wird anschließend ein gemeinsames Flächenmodell des Mastes und Laternenkopfes verwendet. Die zwei Bauteile werden sich jedoch in ihrem Lagenaufbau unterscheiden.

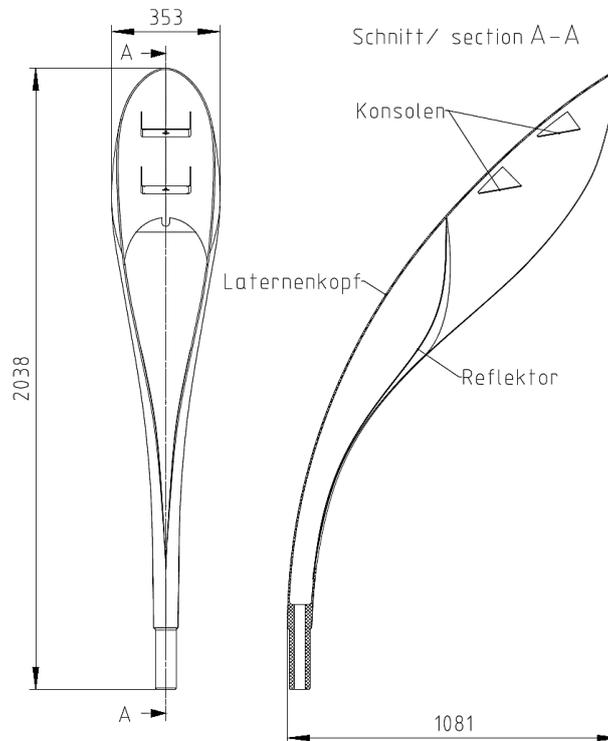


Abb. 23: Laternenkopf der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.

Neben dem Hauptteil des Laternenkopfes werden noch zusätzliche Teile benötigt (siehe Abb. 23). Dabei handelt es sich um den sogenannten Reflektor, welcher sich im Kopf befindet und diesen nach unten abschottet. Des Weiteren werden noch Konsolen zur Befestigung der Leuchtkörper eingesetzt. Diese Teile werden ebenso aus Verbundmaterialien hergestellt, sind jedoch weitaus geringer belastet.

4.2 Bestimmung des Lagenaufbaus

Im Anschluss wird der endgültige Lagenaufbau der Komponenten dargestellt. Die einzelnen Durchläufe und Abwandlungen werden nicht separat beschrieben. Grundsätzlich orientiert man sich bei der Erstellung des Aufbaus an bereits vorhandenen Konstruktionen, sofern vorhanden.

4.2.1 Lagenaufbau des Mastes

Für die grobe Bestimmung der Wandstärke des Mastes hinsichtlich seiner Festigkeit wurden GFK Rohre der Suter-Kunststoff AG herangezogen. Ein vergleichbares konisches Rohr wird hier bei einer Länge von 8 m mit einer Wandstärke von 5 mm angegeben. Zu beachten sei aber, dass diese Rohre laut Herstellerangabe aus Glasfasern im Schleuderverfahren mit Polyesterharz hergestellt werden.⁵⁵

⁵⁵ Vgl. Suter Kunststoffe AG (2016), Online-Quelle [01.08.2016]

Zudem sind die angegebenen Durchmesser größer als die vorgegebene Geometrie. Für eine erste Betrachtung wird eine Wandstärke von 6 mm aber als Richtwert genommen. Der Wert dient zur Ermittlung der Lagenanzahl. Die Stärke einer Lage ist hierbei sowohl Abhängig vom Wickelwinkel, vom verwendeten Material und auch vom Durchmesser des Rohres. Da sich der Durchmesser durch den vorgegebenen Konus ändert ist es schwierig einen konstanten Wandstärkenverlauf zu erzielen. Die entstehende Wandstärke kann hierbei entweder durch Wickelversuche oder durch eine Berechnung ermittelt werden. Der verwendete Berechnungsablauf kann in dieser Arbeit aus Gründen der Geheimhaltung nicht näher beschrieben werden. Als Material wird hierbei ein Kohlefaserrovings mit 24000 Filamenten und 1600 tex verwendet. Die Bezeichnung steht für die längenbezogene Masse von Rovings (tex = g/1000m). Mit diesen Randbedingungen und der vorgegebenen Geometrie wurde schlussendlich folgender Lagenaufbau nach Durchführung der Festigkeitsnachweise festgelegt. Wie aus Tabelle 8 ersichtlich, wird der unterschiedliche Wandstärkenverlauf durch Änderung des Wickelwinkels innerhalb einer Lage ausgeglichen. Um eine vollständige Bedeckung zu erreichen ist es notwendig mehrere Zyklen pro Lage aufzuwickeln. Ein Zyklus entspricht dabei dem Verfahrensweg über die komplette Wickeldornlänge. Somit ergibt sich eine theoretische Wandstärke und Lagenanzahl welche für die Berechnung verwendet und in einem iterativen Prozess angepasst wurde. Der zugrundeliegende Wickeldorndurchmesser ergibt sich dabei aus dem Richtwert der Wanddicke abzüglich des geforderten Außendurchmessers.

Lage Nr.	Wickeldorndurchmesser an den beiden Enden des Hohlmastes / mm	Wickelwinkel / Grad	Zyklenanzahl	Wandstärke / mm
1	168	85	4	0,86
	68	15	4	0,23
2	168	85	4	1,04
	68	15	4	0,23
3	168	85	4	1,04
	68	15	4	0,23
4	168	85	4	1,04
	68	15	4	0,23
5	168	15	50	1,17
	68	15	50	2,79
6	168	15	50	1,17
	68	15	50	2,79
Σ	168	-	-	6,5
	68	-	-	6,5

Tab. 8: Lagenaufbau der Wanddicke des Hohlmastes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die bei entsprechendem Wickelwinkel und Lagenanzahl entstehende Wandstärke liegt, trotz der Verwendung von höherfesten Kohlefasern, etwas über dem vergleichbaren Glasfasermast. Dies ist jedoch auf die doch leicht unterschiedliche Geometrie zurückzuführen.

Der tatsächliche Außendurchmesser des Hohlmastes würde mit einer Wandstärke von 6,5 mm und den angegebenen Wickeldorndurchmessern um 1 mm über dem Vorgabewert liegen. Da dies jedoch nur ein rechnerischer Wert ist und der Außendurchmesser nicht maßhaltig sein muss wird dieser Umstand vernachlässigt. Zudem ist der Innendurchmesser für das Fügen der Bauteile relevant. Somit sind die Hauptabmessungen für den notwendigen Wickeldorn (Kern des Mastes) vorhanden. Die Ausführung dieser Vorrichtung wird in einem separaten Kapitel behandelt.

4.2.2 Lagenaufbau des Laternenkopfes

Der Laternenkopf unterliegt durch seine Position nicht denselben Beanspruchungen wie der Mast. Hier kann deshalb auf preiswertere Glasfaserhalbzeuge zur Erreichung der Wandstärke zurückgegriffen werden. Zudem kann durch das Verfahren des Handlaminierens ein einfacher Wechsel zwischen den Materialien gewährleistet werden. So kommt lediglich eine Kohlefaserdeckschicht zur optischen Gestaltung zum Einsatz. Als Glasfaserhalbzeug wurde darum ein dreiaxiales Gelege mit einem Faserflächengewicht von 750 g/m² gewählt. Durch den dreilagigen Aufbau kann relativ schnell eine hohe Wandstärke erzielt werden. Als Deckschicht kommt ein Kohlegeebe in Leinwandbindung mit einem Faserflächengewicht von 200 g/m² zum Einsatz. Die fertige Laminatdicke ist hierbei vom Hersteller gegeben. So kann recht einfach ein Lagenaufbau mit der gewünschten Wandstärke ermittelt werden. Diese wurde für den Laternenkopf mit 5 mm festgelegt. Der Lagenaufbau lässt sich nun wie folgt darstellen.

<i>Lage Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Faserhalbzeug</i>	<i>Faserorientierung zur Mittelachse / Grad</i>	<i>Laminatdicke / mm</i>
1	Deckschicht	Kohlefasergewebe	0/90	0,32
2	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
3	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
4	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
5	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
6	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
7	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
8	Deckschicht	Kohlefasergewebe	0/90	0,32
Σ	-	-	-	4,96

Tab. 9: Lagenaufbau der Wanddicke des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie aus dem Lagenaufbau ersichtlich, kann durch die Verwendung des dreiaxialen Geleges bereits durch 8 Lagen die fertige Bauteildicke erreicht werden. Dadurch kann die Fertigungszeit reduziert und somit

Kosten eingespart werden. Der Lagenaufbau ist neben der Geometrie die Grundlage für die Berechnung des Bauteiles. Das Ergebnis kann hierbei durch Änderung des Aufbaus, der Faserhalbzeuge oder der verwendeten Matrix beeinflusst werden. Im vorliegenden Fall wurden Faserhalbzeuge und Matrix gewählt und das Ergebnis anhand des Aufbaus angepasst.

Auf die Ausführung der Vorrichtung hat die festgelegte Wandstärke keinen Einfluss, da diese nur die Außenkontur des Bauteiles abbildet. Die Größe des Bauteiles stellt hier vielmehr eine Herausforderung dar. Die Ausführung der Vorrichtung wird in einem späteren Kapitel, wie auch beim Mast, näher betrachtet.

4.2.3 Lagenaufbau des Reflektors und der Konsolen

Der Reflektor und die Konsolen sind die am wenigsten beanspruchten Bauteile. Die Konsolen müssen nur das Gewicht der Leuchtkörper tragen. Der Reflektor unterliegt hier keinen nennenswerten Beanspruchungen. Sie sollen jedoch wie auch der Laternenkopf aus Verbundmaterialien in Kohlefaseroptik hergestellt werden. Für den Lagenaufbau wurde deshalb für beide Bauteile eine reduzierte Version des Laternenkopfes gewählt. Die verwendeten Faserhalbzeuge sind die gleichen wie beim Laternenkopf.

Prinzipiell sollte der Lagenaufbau immer möglichst symmetrisch ausgeführt werden, da der Verzug der Bauteile dadurch minimal wird. Beim dreiaxialen Gelege ist dies nicht zwingend notwendig. Da der Reflektor und die Konsolen jedoch nur aus zwei Lagen dieser Gelege bestehen wurde die zweite Lage umgedreht. Dadurch ist sowohl der Aufbau der Faserhalbzeuge, wie auch jener der Faserorientierung symmetrisch bezüglich der Wandstärke.

<i>Lage Nr.</i>	<i>Bezeichnung</i>	<i>Faserhalbzeug</i>	<i>Faserorientierung zur Mittelachse / Grad</i>	<i>Laminatdicke / mm</i>
1	Deckschicht	Kohlefasergewebe	0/90	0,32
2	Füllschicht	Glasfasergelege	0/+45/-45	0,72
3	Füllschicht	Glasfasergelege	-45/+45/0	0,72
4	Deckschicht	Kohlefasergewebe	0/90	0,32
Σ	-	-	-	2,08

Tab. 10: Lagenaufbau Reflektor und Konsolen, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die Reduzierung auf nur mehr zwei Füllschichten wird die Wandstärke der fertigen Bauteile auf 2,08 mm herabgesetzt.

Wie auch beim Laternenkopf wird hier dasselbe Harzsystem mit einer maximalen Glasübergangstemperatur von 95°C eingesetzt. Da vor allem durch die Leuchtkörper zusätzliche Wärme eingebracht wird, ist die Einsatztemperatur der Konsolen im Betrieb zu überprüfen. Für die restlichen Bauteile sollte das Harzsystem den Anforderungen genügen, eine Überprüfung ist aber sicherlich sinnvoll.

4.3 Berechnung der Komponenten

Genauere Berechnungsinhalte zur Bestimmung des exakten Lagenaufbaues wurden seitens der Firma Geislinger nicht zur Darstellung in dieser Masterarbeit freigegeben. Im Folgenden wird daher nur grob auf die Herangehensweise zur Berechnung der Komponenten eingegangen.

Ausgangspunkt für die Berechnung der Bauteile ist ein erster Entwurf des Lagenaufbaues. Dieser kann zusammen mit der konstruierten Geometrie und den ausgewählten Materialien mittels einer geeigneten Software modelliert und simuliert werden. Hierbei bietet ANSYS® eine Umgebung zur Simulation von Composite-Werkstoffen namens ANSYS® Composite PrepPost.

Aufbauend auf der eingelesenen Flächengeometrie der Bauteile kann über diese Software der Lagenaufbau dargestellt werden. Nach Vorgabe der genannten Randbedingungen und der Kennwerte der ausgewählten Materialien können die Spannungen in den Faserkoordinaten berechnet werden. Die Software durchläuft hierbei die einzelnen Schritte der klassischen Laminatschichttheorie wie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben. Entspricht das Ergebnis den gewünschten Anforderungen so kann der Lagenaufbau wie dargestellt übernommen werden. Ist dies nicht der Fall, so wird zuerst versucht durch Änderungen der Schichten bzw. der Faserorientierung die Ziele zu erreichen. Sollte das keine Abhilfe bringen, so muss man entweder auf höherfeste Materialien zurückgreifen oder auch das Fertigungsverfahren überdenken. Die Änderung des Fertigungsverfahrens bringt hier meist auch eine Änderung der Faserhalbzeuge mit sich, da diese meist speziell für diverse Verfahren konstruiert wurden.

Im vorliegenden Fall konnte durch Variation des Lagenaufbaues ein erfolgreiches Berechnungsergebnis mit ausreichenden Sicherheiten erzielt werden. Der daraus resultierende Lagenaufbau der einzelnen Bauteile kann den Kapiteln zuvor entnommen werden.

4.4 Dimensionierung der Schnittstellen

Die Verbindung zwischen Hohlmast und Laternenkopf wird durch eine Steckverbindung realisiert. Diese ist zusätzlich durch eine Verklebung der Teile miteinander gesichert. Um die Kabel vom Boden in den Laternenkopf zu führen ist auch an der Schnittstelle ein Durchgang mit mindestens 35mm Durchmesser notwendig. Die Schnittstelle sollte in diesem Bereich bis zu diesem Durchmesser verstärkt werden. So ergibt sich hier eine höhere Wandstärke die durch Auffüllen mit Glasfasergelegen erreicht wird. Die Geometrie der Verbindung ist einerseits durch den Außen- und Innendurchmesser des Mastes am Ende, andererseits durch den verbleibenden Innendurchmesser im Laternenkopf bestimmt. Lediglich durch die Länge kann die Verbindung frei verändert werden. Die genauen Dimensionen können der nachfolgenden Abbildung entnommen werden. Um hier keine potenziellen Schwachstellen zu erzeugen, wurden die Übergänge abgerundet. Dadurch ist jedoch auch ein dementsprechendes Gegenstück notwendig um die Teile fügen zu können. Am Innendurchmesser des Mastes wurde deshalb eine 6 mm Fase unter einem Winkel von 45° vorgesehen. Diese kann jedoch nicht einfach durch den Wickelprozess angefertigt werden. Sie muss erst nachträglich hinzugefügt werden. Weiteres müssen die Vorrichtungen dementsprechende Abmessungen aufweisen, damit sich die Teile auch bei schwankenden Toleranzen fügen lassen.

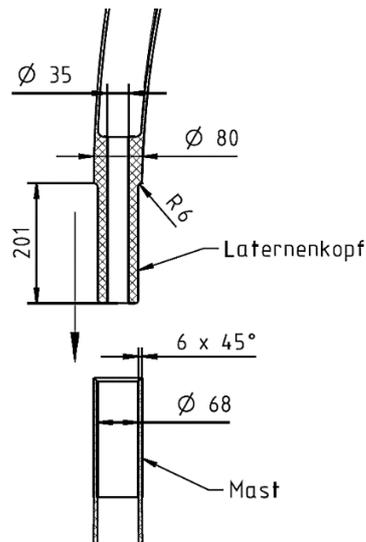


Abb. 24: Schnittstelle zwischen Mast und Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Laternenkopf hat hierbei einen reduzierten Durchmesser um schlussendlich einen Klebespalt von 0,3 mm erreichen zu können. Dieser kann je nach den tatsächlichen Abmessungen der gefertigten Bauteile zwischen 0,1 und 0,5 mm variieren.

Gerd Habenicht beschreibt dabei eine abnehmende Festigkeit bei zunehmender Klebeschichtdicke von rohrförmigen Klebeverbindungen wie nachfolgend ersichtlich. Dabei wird jedoch von einer auf Zug belasteten Verbindung ausgegangen. Des Weiteren ist bei solchen Verbindungen auf die Viskosität des verwendeten Klebstoffes zu achten. Diese spielt für die Ausbildung einer gleichmäßigen Schicht eine Rolle. So kommt es bei einer hohen Viskosität und gleichzeitig kleinen Klebespalten meist zu einem Herausschieben des Klebers und dadurch zu keiner vollständigen Benetzung der Verbindung. Um dem entgegen zu wirken, sollten solche Teile in einer drehenden Bewegung gefügt werden. Zugleich ist für diese Art von Verbindung ein Klebstoff einzusetzen, welcher ohne Anpressdruck aushärtet.⁵⁶

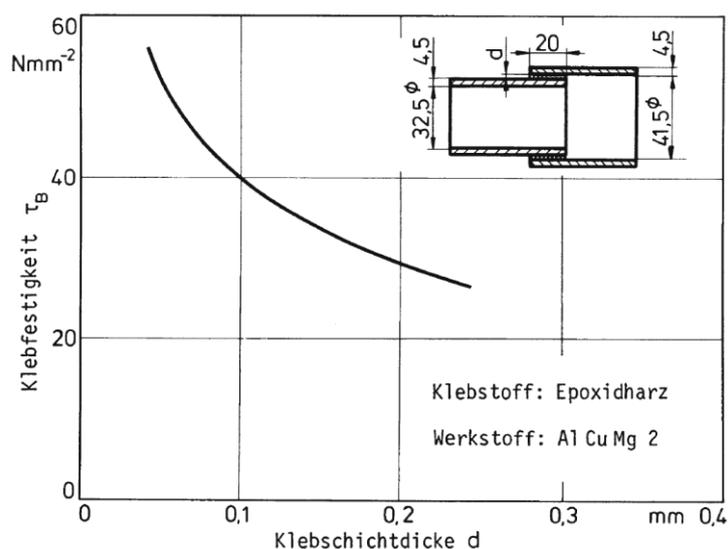


Abb. 25: Abhängigkeit der Festigkeit einer Rohrklebung von der Klebeschichtdicke, Quelle: Habenicht (2006), S. 507.

⁵⁶ Vgl. Habenicht (2006), S. 506 f.

Weitere Einflüsse auf die Klebefestigkeit von Rohrverbindungen sind durch die Überlappungslänge und die Dicke der Einzelteile gegeben. Die Festigkeit des Klebers nimmt hierbei mit zunehmender Überlappungslänge ab. Hingegen steigt die Festigkeit mit zunehmender Wanddicke der Fügeteile. Dieser Zustand ist auf die ungleichmäßige Spannungsverteilung im Klebspalt bei höheren Überlappungslängen zurückzuführen. Hohe Wandstärken begünstigen dabei eine gleichmäßige Spannungsverteilung.⁵⁷

Da die Schnittstelle der Straßenbeleuchtung nicht auf Zug belastet und zudem auch nicht hoch beansprucht wird, ist der Einfluss der Klebeschichtdicke zu vernachlässigen. Dies begünstigt wiederum die Tolerierung der Teile, da hier keine genauen Abmessungen notwendig sind. Die Teile sollten daher direkt nach dem Entformen ohne eine weitere Bearbeitung auf ein Soll-Maß verwendbar sein. Als Kleber wird hierbei Araldite® 2014, ein Zweikomponentenklebstoff auf Epoxidharzbasis, eingesetzt. Er wird vor allem zur Verbindung von Metall und auch faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt. Dieser Kleber ist einerseits durch seine hohe Viskosität fugenfüllend und nicht ablaufend, andererseits weist er eine geringe Schrumpfung und hohe Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse auf. Die Glasübergangstemperatur des ausgehärteten Klebers liegt laut Datenblatt bei ca. 85°C und ist somit auch in einem sicheren Bereich (siehe Anhang 1). Mit einer Biegefestigkeit von 61 MPa und einer Zugfestigkeit von 26 MPa ist die Verbindung zudem mit ausreichender Sicherheit ausgelegt. Die dargestellte Verbindung zeigt hier unter den bereits genannten Randbedingungen (siehe Kapitel 4) minimale Belastungen in diesem Bereich wie nachfolgend in Abb. 26 ersichtlich. Anzumerken sei hierbei, dass zur Betrachtung die Mises-Vergleichsspannung herangezogen wurde. Dies ist für Faserverbundwerkstoffe nicht ganz korrekt, für eine grobe Abschätzung jedoch ausreichend. Die maximale Spannung in der Klebefuge beträgt dabei 16,9 MPa. Wobei der Maximalwert nur in einem sehr kurzen Bereich nahe der Trennstelle auftritt. Die Ergebnisse liegen somit in einem sicheren Bereich. Die reduzierte Klebefestigkeit durch eine erhöhte Klebeschichtdicke und die Überlappungslänge führt somit zu keinerlei Problemen.

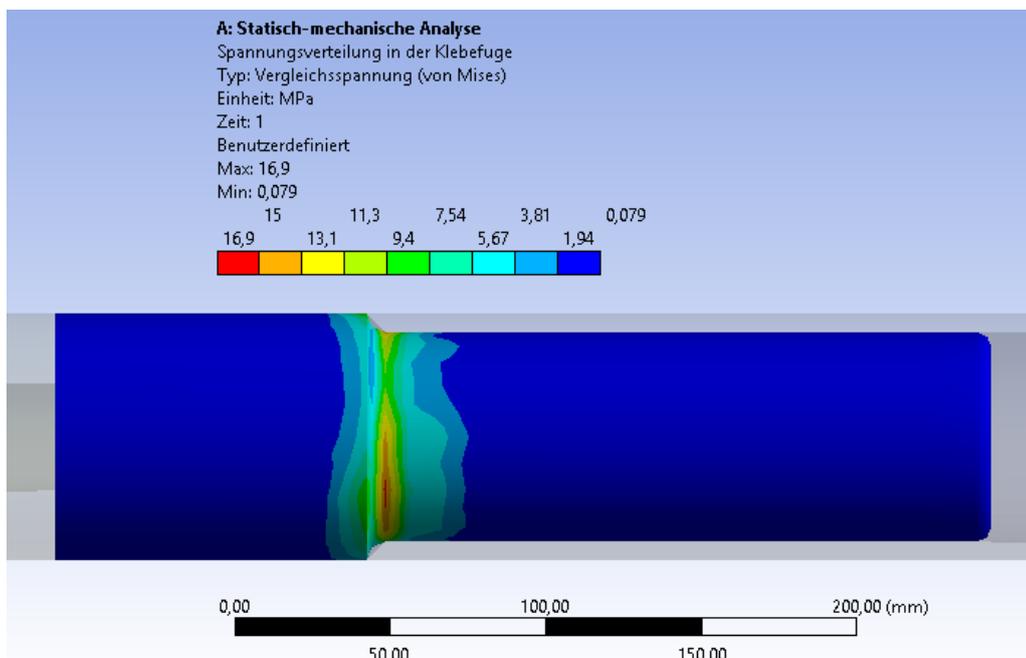


Abb. 26: Spannungsverteilung in der Klebefuge zwischen Laternenkopf und Mast, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁷ Vgl. Habenicht (2006), S. 507 f.

Die ausgeführte Wandstärke begünstigt dabei die Spannungsverteilung und erhöht hierbei wieder die Klebefestigkeit. Aus den genannten Gründen eignet sich dieser Klebstoff bestens für den Einsatz zur Verbindung dieser Schnittstelle.

Anzumerken ist, dass bei der durchgeführten Berechnung der Schnittstelle einige Vereinfachungen getroffen wurden. Grund dafür sind Probleme die meist bei der Berechnung mit Körpern aus Freiformflächen entstehen. Da dies auch hier der Fall war wurde der Laternenkopf vereinfacht als Rohr dargestellt. Die Geometrie der Schnittstelle bleibt dabei unverändert. Dadurch konnte ein vereinfachtes FE-Modell erstellt werden. Die Ergebnisse dieser Analyse sollten hinreichend genau sein. Lediglich durch das leicht unterschiedliche Gewicht des realen Kopfes im Vergleich zu dem der vereinfachten Geometrie wird hier ein Unterschied sichtbar. In Abbildung 27 ist die vereinfachte Geometrie mitsamt den Randbedingungen dargestellt.

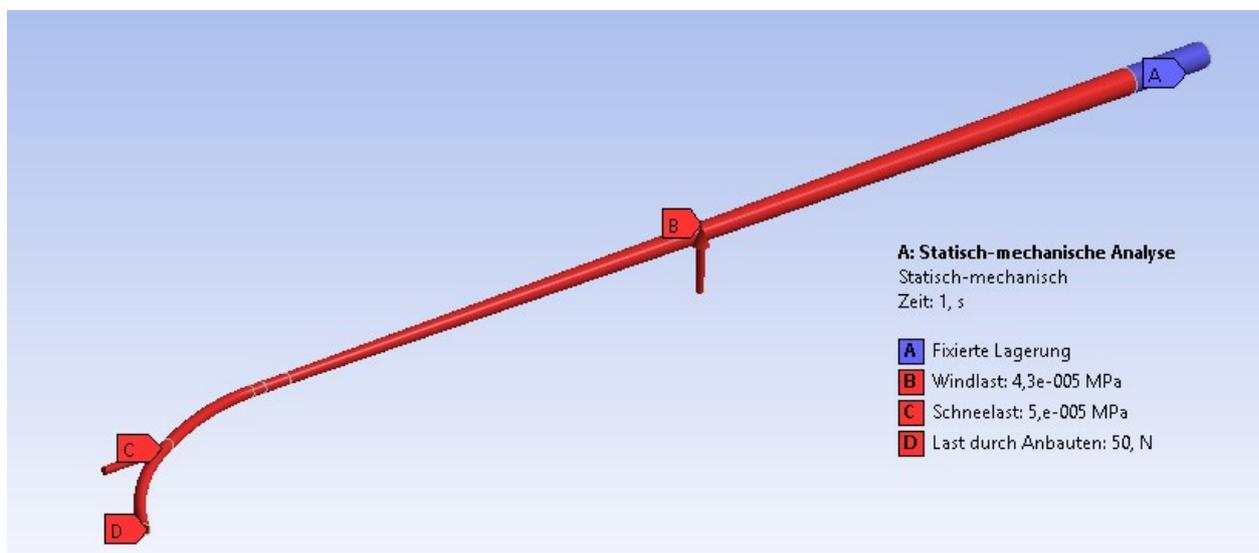


Abb. 27: Vereinfachtes Modell der Straßenbeleuchtung mit Randbedingungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Auf die notwendige Oberflächenvorbehandlung, welche zur Verbindung von Faserverbundkomponenten mittels Klebstoffen notwendig ist, in Kapitel 9.1 eingegangen. Auf die richtige Handhabung und Vorbereitung bei der Verwendung von Klebstoffen sollte insbesondere Wert gelegt werden. Fehler während der Verarbeitung können sehr schnell zum Versagen der Verbindung führen.

5 ENTWICKLUNG DER VORRICHTUNG ZUR MASTHERSTELLUNG

Zur Herstellung des Mastes wurde wie bereits beschrieben das Wickelverfahren ausgewählt. Daher ist ein Wickelkern, oder auch Wickeldorn genannt, zur Formgebung notwendig. Der Wickeldorn gibt hierbei die Innenkontur des zu wickelnden Rohres vor. Die Außenkontur entsteht durch das Aufwickeln der Fasern und die sich dadurch einstellende Wandstärke. Diese wurde im Lagenaufbau definiert. Somit sind die grundlegenden Dimensionen des Wickeldornes bekannt. Zusätzlich zu dem Wickeldorn werden noch abschließende Formelemente benötigt um den Abschluss des Mastes gestalten zu können. Die gesamte Konstruktion stellt schlussendlich die Wickelvorrichtung dar. Das Hauptaugenmerk ist jedoch auf die Konstruktion des Dornes zu legen, da dieser durch die große Länge und den im Verhältnis dazu kleinen Durchmesser eine besondere Herausforderung darstellt.

Im Folgenden werden darum mögliche Versionen zur Ausführung des Wickeldornes betrachtet. Vorweg sei genommen, dass der Mast in einem Stück gewickelt werden soll. Eine Aufteilung auf Teilstücke und die spätere Verklebung sind nicht gewünscht, da dadurch das Wickelmuster unterbrochen wird. Die einfachste Lösung zum Wickeln stellt daher ein einteiliger Dorn dar. Es ist jedoch insbesondere auf die Herstellbarkeit der Teile zu achten. Die Anfertigung eines einteiligen Dornes ist hierbei im Vorhinein schon fragwürdig. Darum werden des Weiteren noch geteilte Wickeldornausführungen betrachtet.

Die fertige Wickelvorrichtung wird schlussendlich in die Drehbankwickelanlage (siehe Abb. 28) eingespannt. Um den Wickeldorn in der Maschine aufnehmen zu können müssen dessen Enden dementsprechend gestaltet werden. Zudem wird ein gewisser Bereich der Dornlänge zum Umkehren der Fasern zwischen den einzelnen Lagen benötigt. Auf die genaue Ausführung dieser Aspekte und der verschiedenen Versionen wird nun anschließend eingegangen.

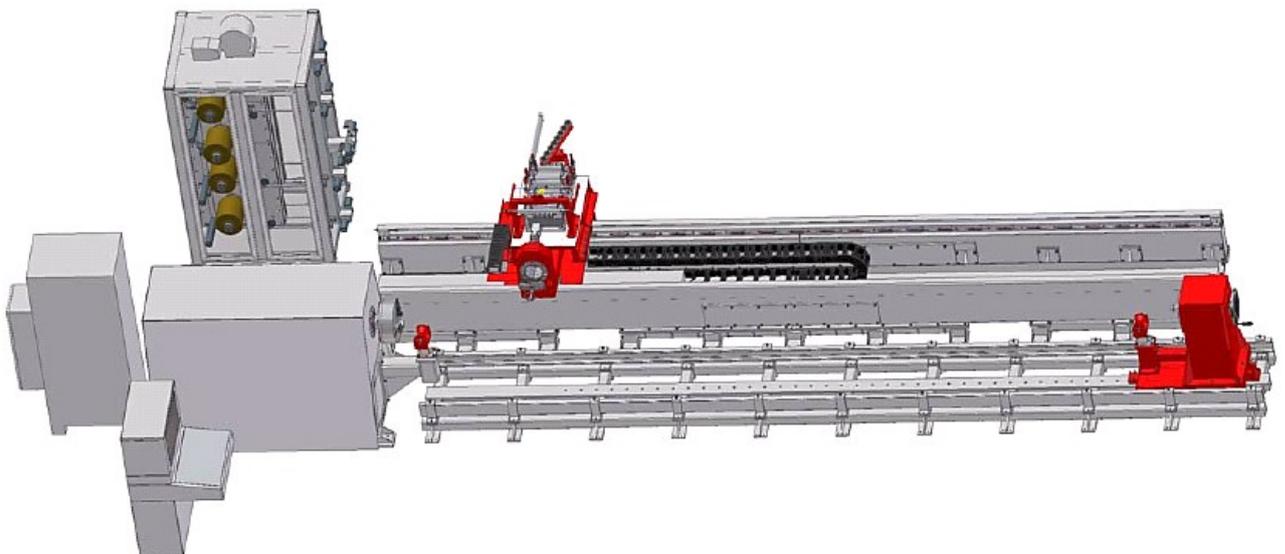


Abb. 28: Drehbankwickelanlage der Fa. Geislinger, Quelle: Eigene Darstellung.

Um die optimale Lösung zu finden wird folgende Herangehensweise bei der Betrachtung der verschiedenen Varianten herangezogen:

1. Konstruktion der Variante
2. Machbarkeitsanalyse
3. Festigkeitsanalyse und Ermittlung der Verformungen
4. Bewertung der Ergebnisse

5.1 Variante 1: Einteiliger Wickeldorn

Diese Variante ist wie zuvor erwähnt die wohl beste Lösung für den Wickelprozess. Einerseits muss der Dorn nicht zuvor zusammengebaut werden, andererseits fallen Schnittstellen die eine mehrteilige Ausführung mit sich bringt weg. Jedoch ist die Machbarkeit bereits im Vorhinein fraglich. Die genauen Ergebnisse werden jedoch erst nach Betrachtung der einzelnen Aspekte sichtbar.

Konstruktion:

Zuerst ist die Geometrie des Wickeldornes festzulegen. Der Bereich des fertigen Rohres ist hierbei bereits durch den Lagenaufbau bestimmt worden. Hier ist ein Dorn mit $\varnothing 168$ mm, der sich auf $\varnothing 68$ mm auf einer Länge von 7600 mm konisch verjüngt notwendig. Zum Wenden an den Enden des Dornes wird üblicherweise eine Länge von ca. 500 mm eingeplant. Dieser Bereich wird zugleich zur Aufnahme in der Wickelmaschine wie auch im Aushärteofen verwendet. Die Aufnahme an der Wickelmaschine erfolgt an einem Ende über ein Dreibackenfutter, welches auch die Drehbewegung einleitet. Am anderen Ende ist der Dorn mit einer Pinole und Reitstock fixiert und kann mitlaufen. Für diese zwei Aufnahmen werden daher Zentrierbohrungen und eine dreiseitige Abfräsung vorgesehen. Die Abfräsung dient zur exakten Fixierung im Dreibackenfutter, da ein Durchrutschen unbedingt vermieden werden muss. Des Weiteren wird eine Querbohrung benötigt, welche zum Abziehen des Dornes vorgesehen wird. Diese Querbohrung wird auch zugleich benutzt um die kontinuierliche Drehbewegung während des Aushärtens im Ofen bewerkstelligen zu können. Diese Geometrie lässt sich nun wie folgt darstellen.

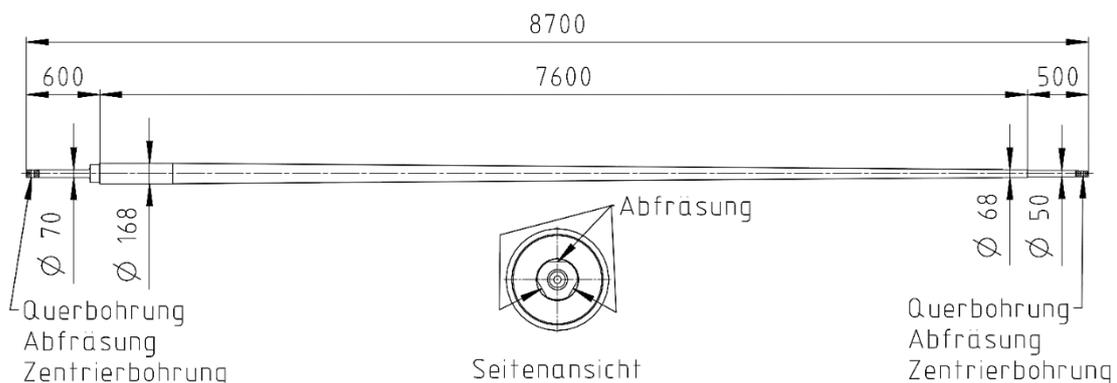


Abb. 29: Einteiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Bereich nach der gewünschten Rohrlänge ist hierbei mit einem Absatz und einem etwas kleineren Durchmesser versehen. Das dient zur Aufnahme der Wickelpins, welche zur Fixierung der Fasern am Dorn befestigt werden. Die Fasern werden dabei über diese Pins gewickelt und gewendet. Dieser Wendebereich wird nach Aufbringung aller Lagen vom Rest getrennt.

Um den Abschluss nach dem Trennen sauber gestalten zu können werden noch Formelemente benötigt. Diese werden durch Spannvorrichtungen mit konischen Spannelementen an den kleinen Durchmessern des Dorns befestigt. Der Vorteil solcher Spannelemente liegt in der einfachen Befestigung bzw. der axialen Verschiebbarkeit. Sie können während des Wickelns an den Rand geschoben werden und laufen dort mit. Nach dem Abtrennen der unnötigen Fasern und dem Entfernen der Wickelpins können sie an ihre notwendige Position geschoben werden.

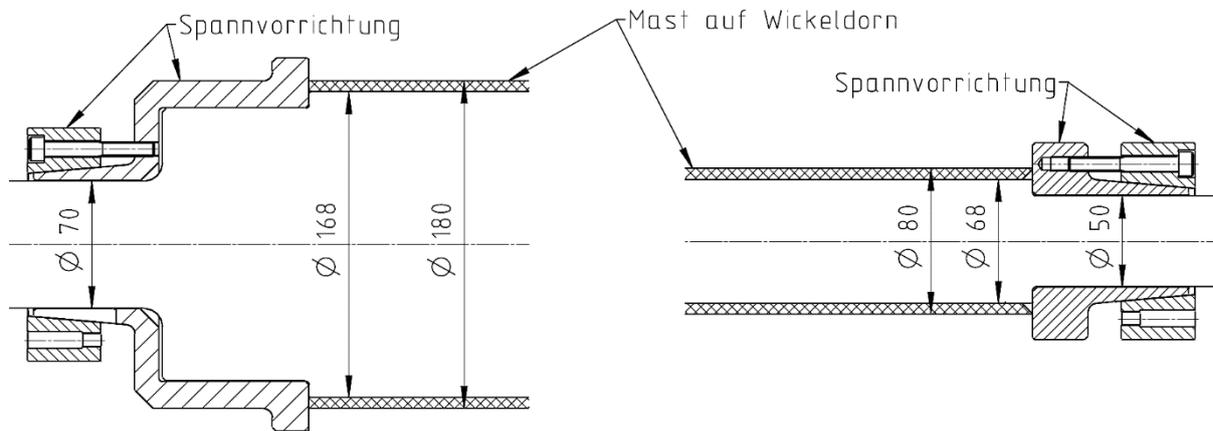


Abb. 30: Formelemente zur Gestaltung des Abschlusses, Quelle: Eigene Darstellung.

Machbarkeitsanalyse:

Ein wichtiger Aspekt ist die Machbarkeit der Vorrichtung durch die Firma Geislinger. Als Maschinenbauunternehmen ist eine Vielzahl an Bearbeitungsmaschinen vorhanden. So gibt es auch eine Flachbettdrehmaschine mit einer Länge von 12 m die auf den ersten Blick für die Herstellung des einteiligen Wickeldornes in Frage kommen würde. Um hier einen tieferen Einblick in die Herstellung von solchen Bauteilen zu bekommen folgt nun ein Auszug aus der Literatur.

Ein wichtiger Aspekt bei der Fertigung von lagen Bauteilen ist die Durchbiegung infolge des Eigengewichts und den Bearbeitungskraften. Um diesen entgegenzuwirken kommen sogenannte Lünetten (Setzstöcke) zum Einsatz. Ein Richtwert für die Verwendung von Lünetten ist ein Verhältnis von Bauteillänge zu Bauteildurchmesser von größer als 7. Bei solchen Werkstücken werden die Schwingungen durch Lünetten minimiert. Bei Flachbettmaschinen kommen üblicherweise manuell einstellbare Lünetten (siehe Abb. 31) in offener oder geschlossener Bauweise zum Einsatz. Es gibt jedoch auch selbstzentrierende Varianten, welche hydraulisch oder pneumatisch betätigt werden. Die Lünette kann an der Drehmaschine entweder feststehend, aber auch mitlaufend befestigt sein.⁵⁸

Die Flachbettdrehmaschine der Fa. Geislinger verfügt über solche Lünetten zur zusätzlichen Stabilisierung des Werkstückes. Mit einer Gesamtlänge von 8700 mm und dem gezeigten Durchmesser ist für den erforderlichen Wickeldorn mit Sicherheit eine Lünette zur Fertigung erforderlich. Bei der vorhandenen Maschine handelt es sich um eine manuelle, geschlossene Lünette. Diese müsste daher immer weiter verschoben werden. Da der Bauteil konisch ist, müsste man zudem die Lünette immer wieder neu einrichten.

⁵⁸ Vgl. Neugebauer (2012), S. 94 f.

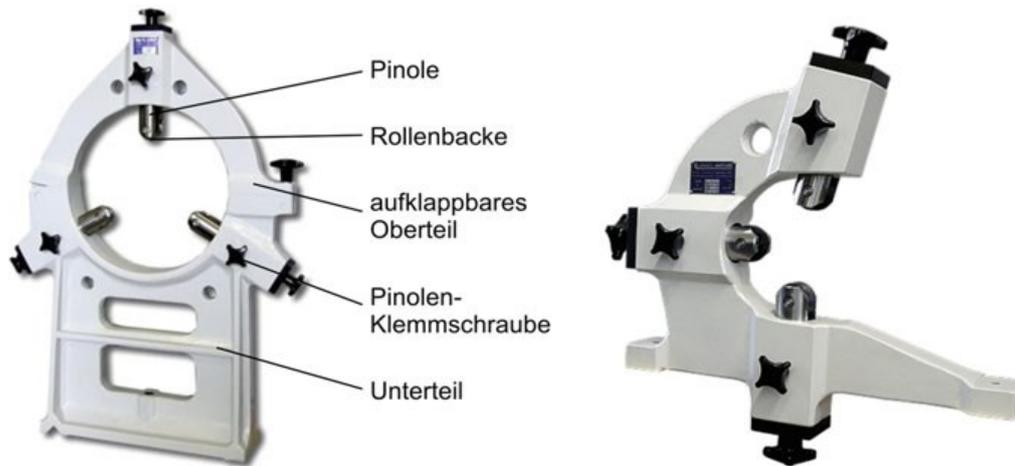


Abb. 31: Geschlossene und offene Lünette, Quelle: Neugebauer (2012), S. 95.

Ein weiterer Aspekt ist die erreichbare Oberflächengüte. Der Wickeldorn muss sich nach dem Aushärten des gewickelten Mastes aus diesem lösen lassen. Daher ist eine glatte Oberfläche notwendig. Bei der Herstellung mittels verschiebbarer Lünette könnte hier nur in Schritten gearbeitet werden. Die gewünschte Oberflächengüte ist hierbei nicht erreichbar. Nur durch manuelles Nachschleifen könnte eine dementsprechende Güte erreicht werden. Der Bearbeitungsvorgang wird aber an sich als unsicher eingestuft.

Ein weiteres Problem liegt in der Beschaffung eines geeigneten Ausgangsmaterials. Standardlängen bis 6 m sind hierbei ohne Probleme beschaffbar. Längere Rundmaterialien sind eine Sonderausführung und werden erst ab einer gewissen Mindesttonnage angefertigt, sofern nicht ein passender Restbestand verfügbar ist. Im gezeigten Fall konnte kein geeignetes Rundmaterial für die Fertigung des einteiligen Wickeldorns zur Verfügung gestellt werden. Es müsste daher eine Sonderausführung angefordert werden, was mit hohen Kosten verbunden ist.

Für den einteiligen Wickeldorn lässt sich somit folgendes zusammenfassen:

- Die Fertigung ist hausintern theoretisch möglich, jedoch sind die Durchführung und die resultierenden Ergebnisse fraglich.
- Ein geeignetes Rohmaterial kann nur mit erhöhtem Kosten- und auch Zeitaufwand beschafft werden.

Festigkeitsanalyse und Ermittlung der Durchbiegung:

Die konstruierte Geometrie wurde mittels ANSYS nachgerechnet. Grundlage für die Berechnung ist hierbei das erstellte CAD-Modell des Wickeldorns. In erster Linie werden die durch das Eigengewicht entstehenden Verformungen und die daraus resultierenden Spannungen analysiert. Beim Wickelvorgang ist es dabei nicht möglich den Dorn mit einer Lünette oder ähnlichem zu stützen. Dadurch könnte man die einzelnen Lagen nicht mehr durchgängig aufwickeln. Der Dorn ist hier nur an den beiden Endpunkten eingespannt und unterliegt vor allem der eigenen Gewichtskraft. Die Kraft die zusätzlich durch das Aufwickeln der Fasern eingebracht wird kann hierbei vernachlässigt werden. Eine Auswertung des Gewichtes anhand des 3D-Modelles ergibt ein Gewicht von 763 kg in der dargestellten einteiligen Ausführung.

Die Frage nach der Wahl des Material ist einerseits durch eine gewisse notwendige Verschleißfestigkeit, andererseits durch die entstehenden Kosten im ersten Ansatz auf einen Baustahl gefallen. Hier wird versucht mit einem Rundstahl aus S355 auszukommen. Ein Wickeldorn aus beispielweise Aluminium wäre zwar leichter, ist jedoch teurer und nicht verschleißfest genug.

Eine Auswertung der Berechnung bei eingespanntem Wickeldorn unter Eigenlast zeigt hierbei die Ergebnisse in Abb. 32. Die Analyse der resultierenden Verschiebung des ursprünglich geraden Wickeldorns unter Einwirkung der Gravitation, ergibt einen Maximalwert von 20,6 mm. Das scheint auf den ersten Blick sehr viel, ist jedoch durch die festgelegte Geometrie nicht einfach beeinflussbar. Eine Minderung könnte nur durch Gewichtsreduktion erzielt werden. Da sich der Wickeldorn jedoch während des Wickelprozesses (20-40 U/min) und dem nachfolgenden Aushärtezyklus (ca. 100 U/min) ständig langsam dreht, dürfte diese Verformung keinen großen Einfluss auf die Geradheit des Mastes haben. Wie sich dieser Umstand auf die aufgewickelten Fasern auswirkt ist jedoch schwierig vorherzusagen. Ein Verschieben oder Aufwerfen der Fasern könnte jedoch die Folge sein. Weiteres führt die Verformung zu einer wechselnden Beanspruchung des Wickeldorns. Diese wechselt bei jeder Umdrehung die Durchbiegung und somit wechseln auch die Spannungszustände ständig.

Die maximale Mises-Vergleichsspannung liegt bei 157 MPa. Die Spannungsspitzen sind hierbei in den Endbereichen, welche zur Aufnahme des Dorns dienen. Diese können nicht wirklich verändert werden. Der Wert ist jedoch unter der zulässigen Beanspruchung für den gewählten Baustahl und stellt somit kein Problem dar. Für den vorliegenden Belastungsfall wurde als Maximalwert die Wechselfestigkeit von S355 herangezogen. Diese liegt laut Tabellenbuch bei 255 MPa und somit über den simulierten Werten. Bei der Berechnung sei anzumerken, dass der Wickeldorn an den abgefrästen Enden eingespannt simuliert wurde. Wird der Dorn an der gezeigten Zentrierbohrung aufgenommen, so steigen die Spannungen im Bereich der Bohrung enorm. Diese Werte wurden jedoch nicht dargestellt, da sie in der Realität durch Setzungen so nicht auftreten werden. Eine Aufnahme des Wickeldorns über die Zentrierbohrungen wird aber nicht empfohlen.

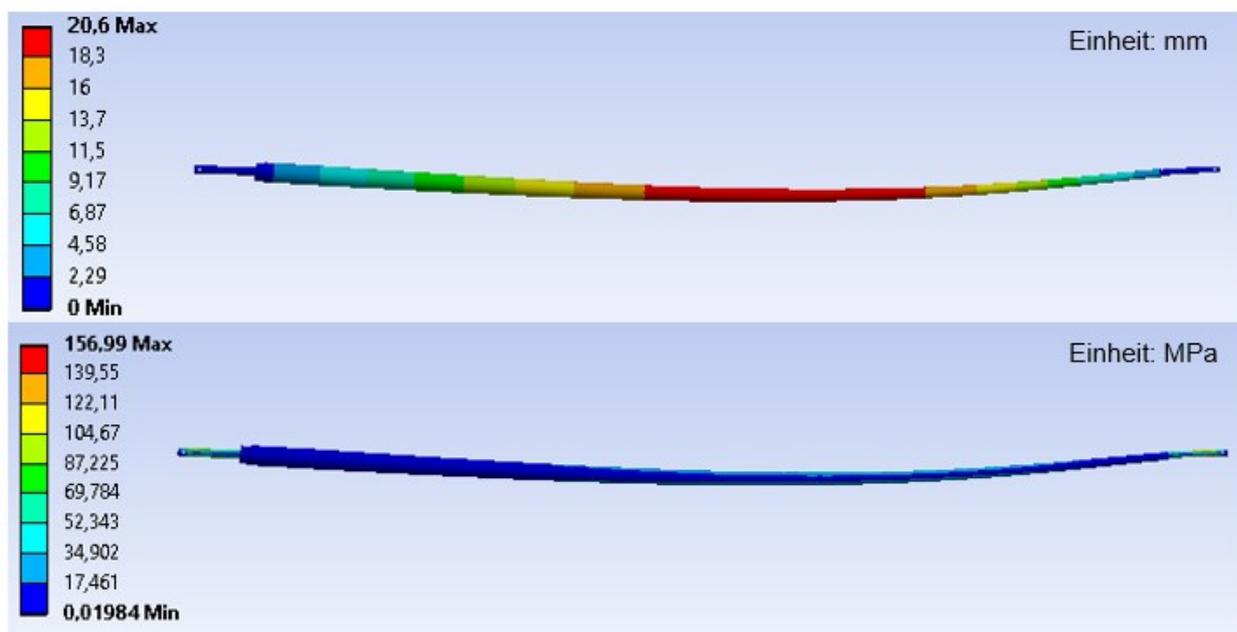


Abb. 32: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast, Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertung der Ergebnisse:

Die Variante des einteiligen Wickeldorns bringt einige Vorteile mit sich. Die Festigkeitsanalyse zeigt dabei keine großen Schwierigkeiten bei dieser Ausführung. Auch die ungeteilte Oberfläche ist von Vorteil in dieser Ausführung. Mit den Vorteilen sind jedoch einige Nachteile verbunden. Das Hauptproblem dieser Version ist die Herstellbarkeit. Schon bei der Beschaffung von geeigneten Rohmaterialien stößt man sehr schnell an Grenzen. Zudem ist die Fertigung der dargestellten Geometrie nicht einfach möglich und das Ergebnis fragwürdig. Durch die hohen Beschaffungskosten und die unsichere Realisierung der einteiligen Variante des Wickeldorns wurde von der Verfolgung dieses Lösungsweges Abstand genommen. Sehr wohl können aber die Ergebnisse der Konstruktion bezüglich der allgemeinen Gestaltung, der Spannvorrichtung und der Aufnahme an der Drehbankwickelanlage weiterverwendet werden. Diese Ausführungen werden auch bei anderen Varianten beibehalten.

5.2 Variante 2: 10-teiliger Wickeldorn

Die Variante der geteilten Ausführung soll vor allem die Machbarkeit des Wickeldorns begünstigen. Für den Wickelprozess selbst sind Übergänge am Außendurchmesser eher hinderlich. Sie führen zu Problemen beim Entformen und sollten daher so gering wie möglich ausfallen oder komplett vermieden werden. Aus dem gleichen Grund ist eine hohe Oberflächengüte anzustreben. Um dies zu erreichen wird der Wickeldorn in zehn Einzelteile zerlegt.

Konstruktion:

Die Außenkontur des gesamten Wickeldorns bleibt bei dieser Ausführung unverändert. Die Durchmesser und Längen, wie auch die Gestaltung zur Aufnahme an der Wickelanlage sind daher ident mit der einteiligen Variante. Die Unterteilung der Einzelteile erfolgt nach einem Verhältnis von Länge zu Durchmesser, welches für eine bestmögliche Oberfläche nach Rücksprache mit der Fertigung in etwa 10 zu 1 sein sollte. Aus dieser Vorgabe wurde die Aufteilung wie nachfolgend dargestellt abgeleitet. Die Einzelteile können damit mit bestmöglicher Oberflächenqualität angefertigt werden und werden im Nachhinein miteinander verbunden.

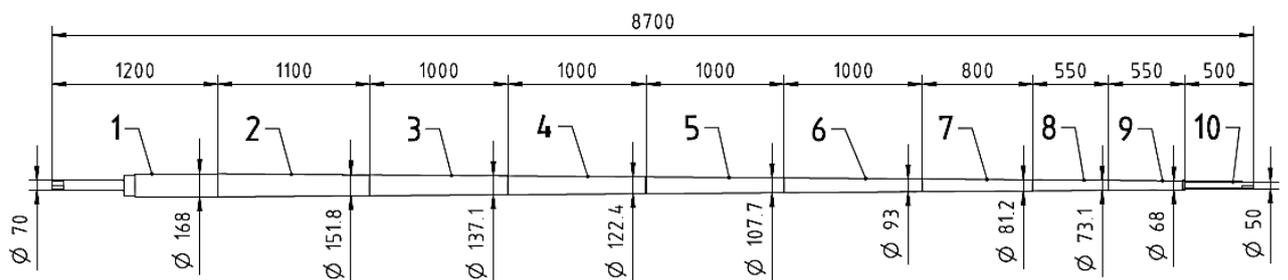


Abb. 33: 10-teiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Verbindung der Einzelteile ist hierbei die größte Herausforderung. Der Durchmesser an den Stoßpunkten sollte dabei möglichst gleich sein. Um das zu erreichen werden die Teile nacheinander gefertigt und der Durchmesser wird an das jeweils zuvor gedrehte Teil angepasst. Um die Teile miteinander zu verbinden wird eine Schraubverbindung konstruiert. Da der Durchmesser des Dorns stetig abnimmt werden hierbei zwei Gewindegrößen notwendig. Die Größe der Verbindungsgewinde ist dabei

durch die Abmessungen des Dorns selbst bestimmt. So werden, sofern es die Außenabmessungen zulassen, M60 Regelgewinde verwendet. Sobald der Durchmesser des Dorns zu klein für diese Größe ist, wird auf ein M36 Regelgewinde gewechselt. Um ein Lösen während des Wickelprozesses zu verhindern werden die Gewinde mit Schraubensicherung Loctite® 275 gesichert (siehe Anhang 6). Die Schraubensicherung hat eine hohe Festigkeit und verliert zudem auch bei höheren Temperaturen nicht ihre Wirkung. Genaue Werte können dem Datenblatt entnommen werden. Gleichzeitig wird das Gewinde rechtsdrehend ausgeführt. Da sich der Dorn während des Wickelns ebenfalls rechts dreht wird ein Lösen so vermieden. Um die zueinander angepassten Durchmesser auch zentrisch verschrauben zu können wird zusätzlich noch ein Zentrierabsatz vorgesehen. Die Durchmesser der Zentrierung variieren hierbei je nach Durchmesser des Wickeldorns an den Trennstellen. Nachfolgend sind die Verbindungen mit den zwei verschiedenen Gewindegrößen dargestellt. Der Wechsel von M60 auf M36 ist hierbei zwischen Teil 5 und 6. Die Gewinde werden fertigungsbedingt am Auslauf mit einem Gewindefreistich ähnlich ÖNORM M 1802 versehen. Der Querschnitt wird dabei bis auf den Kerndurchmesser des Gewindes freigedreht.

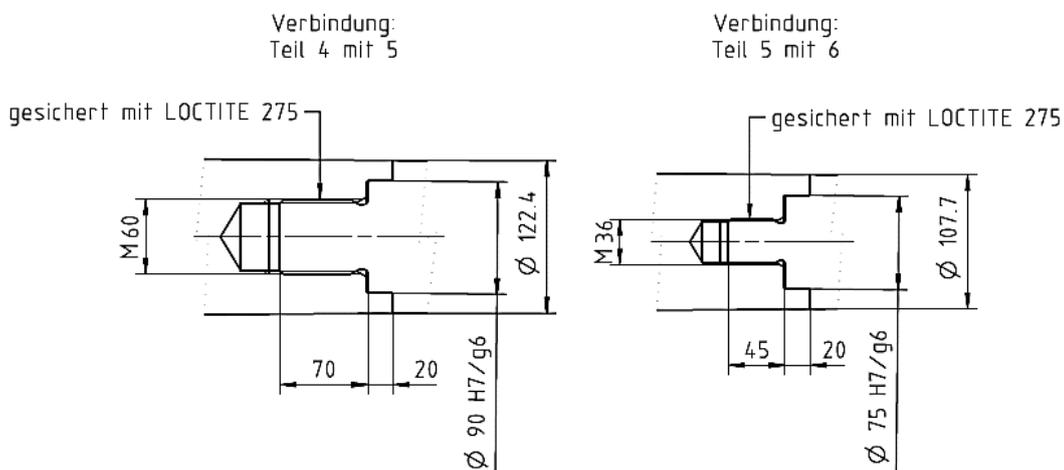


Abb. 34: Schraubverbindung des geteilten Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die Verbindung mittels Gewinde kann eine axiale Spannkraft in die Schnittstelle eingebracht werden. Je nachdem wieviel Drehmoment beim Fügen eingebracht werden kann, entsteht hierbei eine resultierende Spannkraft. Diese begünstigt die Durchbiegung des Wickeldorns. Einen detaillierten Einblick liefert dabei wiederum eine numerische Simulation der Bauteile.

Machbarkeitsanalyse:

Die Herstellung der Einzelteile ist bei dieser Ausführung kein Problem. Die Teile können dabei auf konventionellen CNC-Drehmaschinen angefertigt werden. Auch die Beschaffung von geeigneten Rohmaterialien in diesen Abmessungen ist unproblematisch. Eine hausinterne Fertigung ist daher ohne weiteres möglich.

Hingegen ist die Montage der einzelnen Teile als kritisch anzusehen. Diese sind durch ihr hohes Gewicht und die konische Geometrie eher unhandlich. Eine Beschädigung der Außenfläche sollte bei der Montage unbedingt vermieden werden. Um die Teile problemlos verschrauben zu können, müssen diese genau ausgerichtet werden. Eine ungenaue Ausrichtung könnte dabei zum Verreiben der Gewinde oder der Zentrierung führen. Da hier kein hochfester Stahl zum Einsatz kommt, könnte dies kritisch sein. Ein

weiteres Problem ist die Einbringung des Drehmomentes um die Spannkraft zu erzeugen. Gewinde in dieser Größe werden üblicherweise hydraulisch gespannt. Die Mittel dazu sind hierbei nicht vorhanden. Daher ist zu prüfen ob auch eine Verbindung ohne axiale Spannkraft ausreichende Resultate liefert.

Festigkeitsanalyse und Ermittlung der Durchbiegung:

Für die Berechnung der 10-teiligen Variante wurde das zuvor konstruierte CAD-Modell verwendet. Als Material kommt wiederum der bereits genannte Baustahl zum Einsatz. Bei der Berechnung werden zwei Varianten unterschieden. In erster Linie wird der verschraubte Wickeldorn ohne axiale Vorspannkraft betrachtet. Das heißt die Gewinde werden möglichst ohne Aufbringung eines Drehmomentes gefügt. Dadurch entsteht ein Verbund, jedoch wird der Kernquerschnitt der Gewinde nicht belastet. Die Verschiebung des ursprünglich geraden Wickeldorns unter Einwirkung des Eigengewichts zeigt dabei wie nachfolgend zu sehen einen erhöhten Maximalwert von 38,7 mm. Ebenso sind die Spannungswerte bei dieser Variante erhöht. Das Maximum tritt hierbei bei Teil 6 im Bereich des Gewindefreistiches auf. Die hier auftretenden Mises-Vergleichsspannungen in der Höhe von 585 MPa liegen dabei über den zulässigen Werten und würden somit zum Versagen der Verbindung führen. Eine reine Schraubverbindung ohne axiale Vorspannung ist daher nicht zielführend. Im Vorhinein ist jedoch auch klar, dass eine zusätzliche Vorspannkraft weiteres zu höheren Spannungswerten führen wird. Die Verschiebung sollte sich hingegen reduzieren.

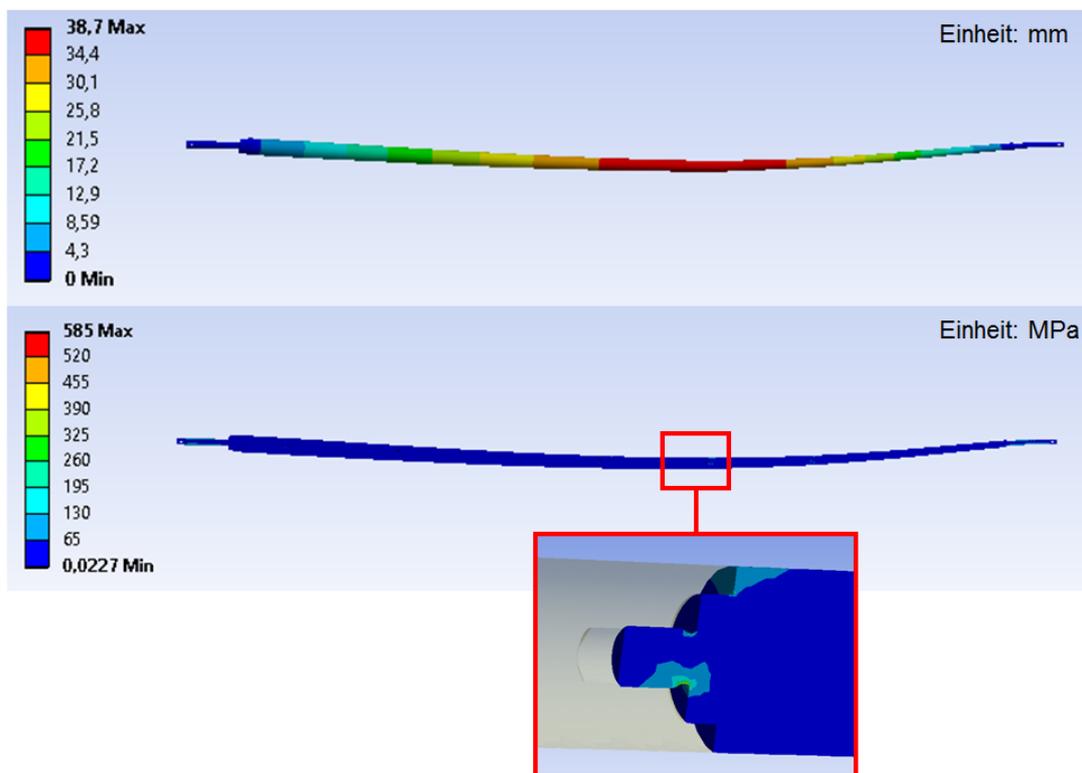


Abb. 35: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns ohne axiale Vorspannkraft, Quelle: Eigene Darstellung.

Im nächsten Schritt wird auch eine mögliche Spannkraft in den Schnittstellen berücksichtigt. Diese wird unter Annahme einer 50% Ausnutzung der Streckgrenze des Werkstoffes durch das Spannen der Gewinde errechnet. Für die Ermittlung der Kraft kann hierbei einfach die Formel zur Spannungsberechnung wie folgt umgeformt werden.

$$F = \sigma A \quad (5.1)$$

F/N	Kraft
σ/Pa	Spannung
A/m^2	Fläche

Wenn man nun den Spannungsquerschnitt der Gewinde (817 mm^2 für M36 und 2362 mm^2 für M60) als Fläche und 50% der Streckgrenze ($177,5 \text{ MPa}$ für S355) als Spannung einsetzt so ergeben sich folgende Spannkraften.

$$F_{M60} = 419255 \text{ N}$$

$$F_{M36} = 145017,5 \text{ N}$$

Die Simulation unter Berücksichtigung dieser Spannkraften zeigt nun folgende Ergebnisse. Zu beachten sei hierbei, dass der Querschnitt der Gewinde bereits vorgespannt und damit zu 50% belastet ist. Die zusätzliche Beanspruchung durch das Eigengewicht führt dabei zu erhöhten Spannungen. Diese erreichen wiederum in der Verbindung von Teil 5 zu 6 im Bereich des Freistiches ihren Maximalwert von 768 MPa . Weiteres wird die reduzierte Verschiebung ersichtlich, welche sich durch die zusätzliche Axialkraft auf $28,1 \text{ mm}$ reduzieren lässt. Die Spannungswerte liegen hier aber wie zu erwarten über den zulässigen Werten.

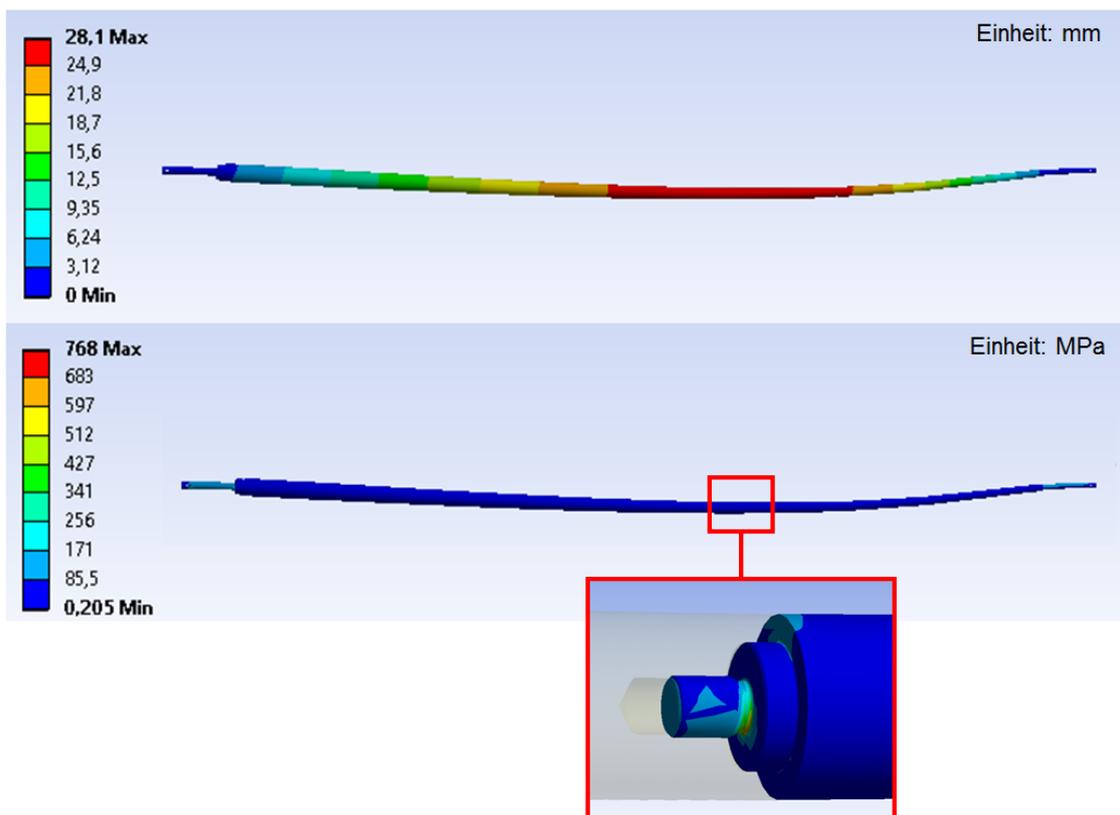


Abb. 36: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns mit axialer Vorspannkraft, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch die ermittelten Werte wird zwangsläufig eine Änderung der Verbindung notwendig. Ein Einsatz eines höherfesten Werkstoffes kommt dabei aus Kostengründen vorerst nicht in Frage. Die einfachste Lösung um sowohl die Verschiebungs-, als auch Spannungswerte zu reduzieren ist dabei wohl eine zusätzliche Schweißverbindung.

Durch Schweißen können die Einzelteile zusätzlich stoffschlüssig verbunden werden. Ein wichtiger Faktor ist dabei die Schweißbarkeit der Bauteile. Diese hängt hierbei von drei Einflussgrößen, dem Werkstoff, der Konstruktion und der Fertigung ab. Ob ein Werkstoff schweißbar ist hängt im Wesentlichen von dessen chemischer Zusammensetzung ab. Baustähle zeigen hierbei eine gute Schweißbeignung. Des Weiteren sind auch niedrig legierte Stähle gut schweißbar, sofern ihr Kohlenstoffgehalt unter 0,22% liegt. Elemente wie Chrom, Mangan und Nickel erschweren dabei die Schweißarbeit. Durch Vorwärmen und Spannungsarmglühen können auch hochlegierte Stähle verschweißt werden. Die Schweißmöglichkeit ist insbesondere nur dann gegeben, wenn die Schweißverbindung an der Konstruktion unter den gegebenen Fertigungsbedingungen fachgerecht ausgeführt werden kann.⁵⁹

Da für den Wickeldorn ein Baustahl zum Einsatz kommen soll, ist die Frage nach der Schweißbeignung somit schnell beantwortet. Der geplante Werkstoff (S355) zeigt hierbei eine gute Schweißbeignung. Ebenso sind die Bedingungen zur fachgerechten Ausführung gegeben, da der Wickeldorn im Werk montiert und geschweißt werden kann.

Bei der Ausführung der Schweißnaht ist auch auf Schweißeigenspannungen zu achten. Diese werden von den Spannungen durch äußere Einwirkungen überlagert. Um diese Spannungen gering zu halten wird empfohlen mit Wärmetechnologien zu arbeiten. Bei der Größe der Schweißnaht orientiert man sich an der geringsten Dicke der angrenzenden Materialien. Eine Schweißnaht mit einem größeren Querschnitt als die des angrenzenden Materials würde zu keinerlei Vorteilen führen. In einer Stumpfnahnt treten dabei dieselben Normal- und Schubspannungen als auch Nennspannungen wie im angrenzenden Material auf. Daher müssen bei der Berechnung keine weiteren Angaben berücksichtigt werden. Die Beanspruchung von Kehlnähten ist hingegen komplizierter. Hier liegt im Allgemeinen ein mehrachsiger Spannungszustand vor.⁶⁰

Für die Schweißverbindung des Wickeldorns wurde daher eine Stumpfnahnt mit 6 mm Querschnitt, welche rundum verläuft, gewählt. Die Ausführung ist nachfolgend zu sehen.

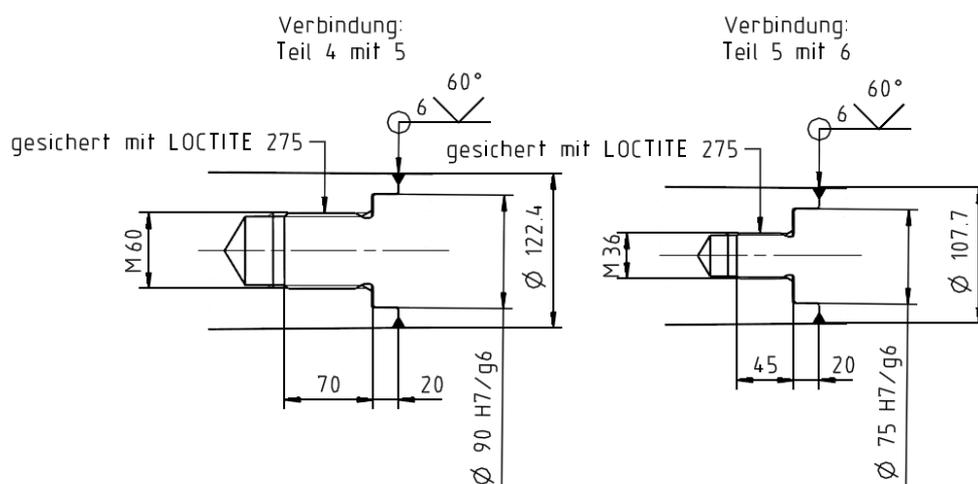


Abb. 37: Schweißverbindung des geteilten Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.

⁵⁹ Vgl. Westkämpfer/Warnecke (2010), S. 148 ff.

⁶⁰ Vgl. Petersen (2013), S. 446 ff.

Anschließend wird der zehnteilige Wickeldorn mitsamt Schweißverbindungen zwischen allen Einzelteilen nochmals simuliert. Die Berechnung wurde dabei ohne axiale Vorspannkraft durch die Gewinde durchgeführt. Die berechneten Spannungen und Verformungen liegen dabei in einem annehmbaren Bereich (siehe Kapitel 5.1) wie in der untenstehenden Abbildung ersichtlich. Die Maximalwerte treten wiederum zwischen Teil 5 und 6 im Gewindefreistich auf. Die Belastungen in der Schweißnaht sind dabei geringer.

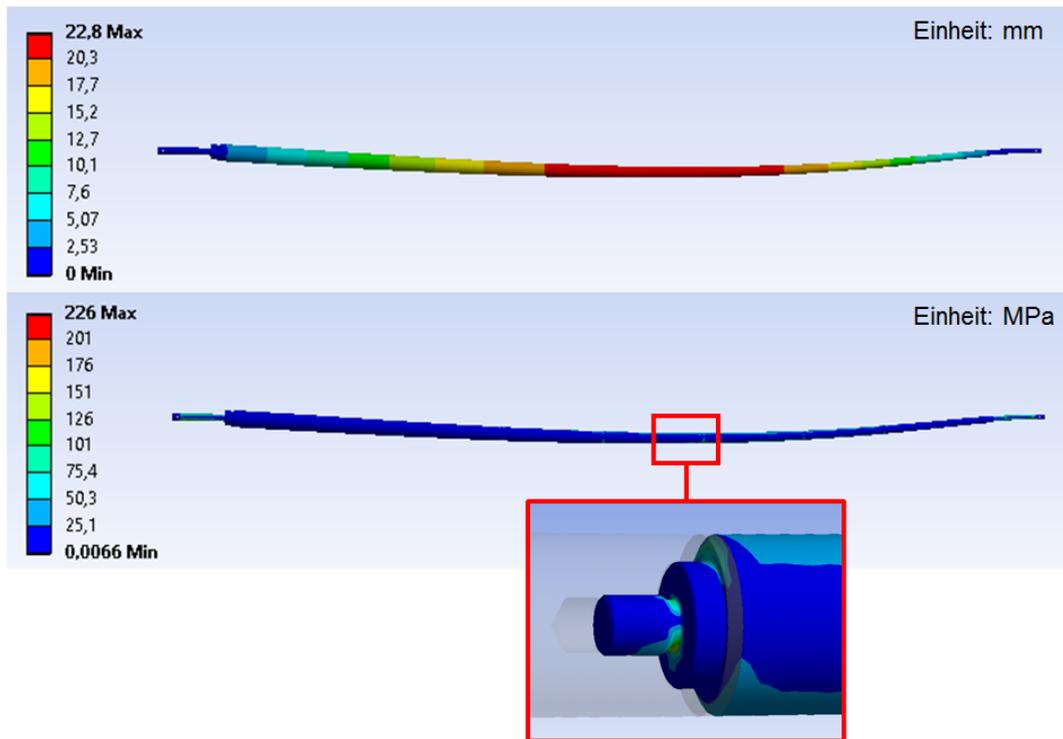


Abb. 38: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertung der Ergebnisse:

Die dargestellte Variante zeigt Vorteile bei der Machbarkeit der Einzelteile sowie den Anschaffungskosten der Rohmaterialien. Bezüglich der Anschaffungskosten für Materialien stellt die zehnteilige Version wohl die günstigste Lösung dar. Nachteilig wirkt sich die problematische Montage der verschiedenen Teile aus. Die konstruktive Lösung mittels vorgespannter Gewinde reduziert hierbei einerseits die Durchbiegung, andererseits werden die resultierenden Spannungen bei zu hohen Vorspannwerten zu groß. Daher sollte für diese Variante ein ungespannter aber verschweißter Wickeldorn ausgeführt werden. Die Möglichkeit zur Montage ohne Einbringung einer Spannkraft ist aber eher fragwürdig. In der Praxis wird daher eine Kraft entstehen die mangels fehlender Mittel nicht bewertet werden kann, sehr wohl aber zu einer Schwachstelle führen könnte. Die Durchbiegung des Wickeldorns wird, wie auch bei der einteiligen Variante, als unkritisch angesehen. Da diese Variante die kostengünstigste Lösung darstellt und ein Versuch zudem weitere Erkenntnisse bringt, wurde beschlossen die gezeigte Ausführung inklusive Schweißverbindung in der Praxis umzusetzen. Auf weitere Schritte und Resultate wird hierbei im Kapitel zur Herstellung der Wickelvorrichtung eingegangen. Vorweg sei genommen, dass die Umsetzung zu einigen Problemen führte. Darum werden noch weitere Lösungsmöglichkeiten zur Gestaltung des Wickeldorns erarbeitet.

5.3 Variante 3: 3-teiliger Wickeldorn

Die dreiteilige Version des Wickeldorns stellt einen Kompromiss zwischen erreichbarer Oberflächengüte und Machbarkeit des gesamten Wickeldornes dar. Durch Abstriche bei der Oberflächengüte entstehen damit Vorteile im Zusammenbau der Einzelteile. Die Anzahl der Schnittstellen wird dadurch reduziert und somit sink auch die Fehleranfälligkeit. Ebenso werden bei dieser Variante Erkenntnisse aus den bereits gezeigten Ergebnissen weiterentwickelt und somit mögliche Probleme und Fehlerursachen vermieden.

Konstruktion:

Wie auch bei den zuvor gezeigten Varianten bleibt die Außenkontur für diese Variante des Wickeldorns unverändert. Im Gegensatz zu der zehnteiligen Ausführung wird hier die Gesamtlänge auf drei Teile aufgeteilt. Zur Verbindung dieser Teile wurde dabei eine Steckverbindung mit Presspassung gewählt. Dadurch wird ein Durchhängen durch mögliche Spalte vermieden. Auf den Einsatz von Gewinden wurde bei dieser Variante verzichtet. Dadurch entfällt die Gefahr von erhöhten Spannungen durch ein ungewolltes Vorspannen der Gewinde. Um die Teile miteinander zu verbinden wird hier ebenso eine Schweißverbindung angedacht. Damit die überschüssige Luft beim Fügen der Teile entweichen kann wird an den Enden der Steckverbindung eine Entlüftungsbohrung angebracht. Diese ist nach der Montage wieder zu verschließen, um den Eintritt von Harz beim Wickeln auszuschließen. Bei Ausführung von Steckverbindungen mit 100 mm Länge ergeben sich somit Einzelteile mit einer Gesamtlänge von 3000 mm. Nachfolgend ist die Konstruktion mitsamt den einzelnen Verbindungen wie beschrieben dargestellt.

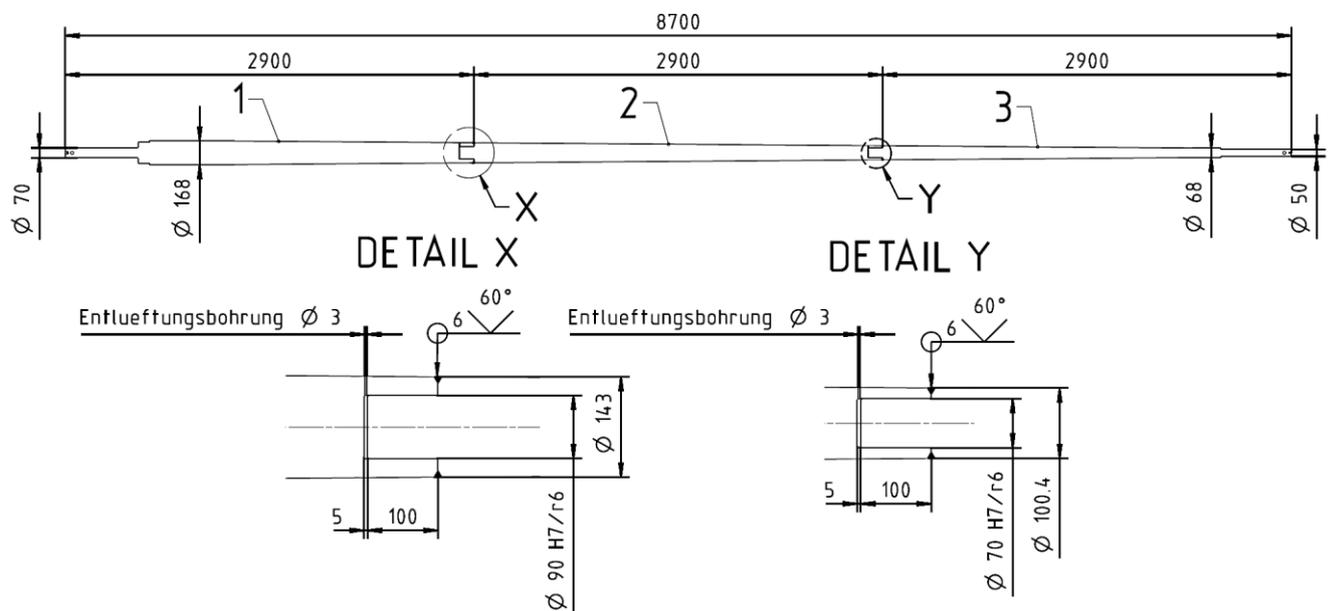


Abb. 39: 3-teiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch diese Variante entstehen schließlich nur mehr zwei Schnittstellen, was zu einer reduzierten Durchbiegung führen sollte. Ebenso erleichtert sich dadurch die Montage da hierfür nur mehr zwei Schweißnähte angebracht werden müssen. Auch ist die Fertigung von wenigen Einzelteilen einfacher als von vielen, die aneinander angepasst werden müssen.

Machbarkeitsanalyse:

Betrachtet man die Machbarkeit der Einzelteile so sind diese zwar problematischer als die kurzen Teile des zehnteiligen Wickeldorns, stellen aber keine großen Schwierigkeiten dar. Hausintern sind Maschinen welche mit Bauteilen bis 3 m Länge arbeiten können vorhanden. Einziges Manko ist das Verhältnis von Durchmesser zu Länge. Hier ist ein Einsatz von Lünetten als Zwischenlager sinnvoll. Dadurch kann auch bei dieser Variante eine dementsprechend gute Oberflächengüte erreicht werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Fertigung. Da hier nur mehr drei Teile aneinander angepasst werden müssen, wird auch der Aufwand entsprechend reduziert.

Der Zusammenbau des Wickeldorns ist in dieser Ausführung hingegen vorteilhafter und sollte keine großen Probleme verursachen. Zudem müssen hierfür nur drei Teile gefügt und mit zwei Schweißnähten verbunden werden. Der Arbeitsaufwand hierfür ist daher ein Bruchteil von dem des zehnteiligen Dornes. Durch diesen Vorteil kommt jedoch auch der Nachteil der größeren notwendigen Rohmaterialien zum Tragen. Die Beschaffbarkeit der Materialien in den genannten Längen ist dabei aber kein Problem. Sehr wohl ist aber ein erhöhter Materialabtrag notwendig, da der Durchmesserunterschied mit steigender Länge zunimmt. Diese erhöhten Kosten werden aber durch die Vorteile in Punkto Fertigung und Montage wieder reduziert. Eine genaue Betrachtung der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Varianten ist aber nicht vorgesehen.

Festigkeitsanalyse und Ermittlung der Durchbiegung:

Für die Festigkeitsanalyse wurde wiederum das zuvor erstellte 3D-CAD-Modell verwendet. Beim Material wurden dabei keine Änderungen vorgenommen. Es wurde der Baustahl (S355) als Werkstoff vorausgesetzt. Die konstruierte Variante wurde hierbei in mehreren Schritten angepasst um ein geeignetes Ergebnis erzielen zu können. Die Simulation unter Berücksichtigung der Randbedingungen, insbesondere des Eigengewichts, zeigt dabei eine Verschiebung gegenüber dem ursprünglich geraden Wickeldorn von 21,3 mm. Diese liegt zwischen den Ergebnissen der einteiligen bzw. der zehnteiligen Ausführung, ist aber nur minimal größer als jene der ungeteilten Variante. Der Maximalwert ist hierbei, wie auch bei allen anderen Versionen, im Bereich bei ca. 6 m, von der linken Seite aus betrachtet (siehe Abb. 40). In diesem Bereich ist die Verbindung zwischen Teil 2 und 3, welche dadurch die verhältnismäßig größten Beanspruchungen sieht.

Wie zu erwarten war, liegen auch die maximalen Spannungswerte in diesem Bereich. Die Steckverbindung zwischen Teil 2 und 3 ist dabei genauer zu betrachten. Der höchste Spannungswert in der Höhe von 196 MPa ist an der Außenfläche von Teil 2 zu finden. Dies ist durch das gesteckte Teil 3 und die dadurch reduzierte Wandstärke zu erklären. Der Wert wurde durch Anpassung der Geometrie und erneute Simulation optimiert. Die Spannungswerte in der Schweißnaht liegen bei dieser Variante auf einem ähnlichen Niveau wie auch bei der zehnteiligen Ausführung. Hier treten Werte bis zu 70 MPa auf, welche in einem akzeptablen Bereich liegen. Dennoch sind Spannungsspitzen durch das Schweißen bei dieser Verbindung unbedingt zu vermeiden.

Die beschriebenen Ergebnisse der Festigkeitsanalyse des dreiteiligen Wickeldorns sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

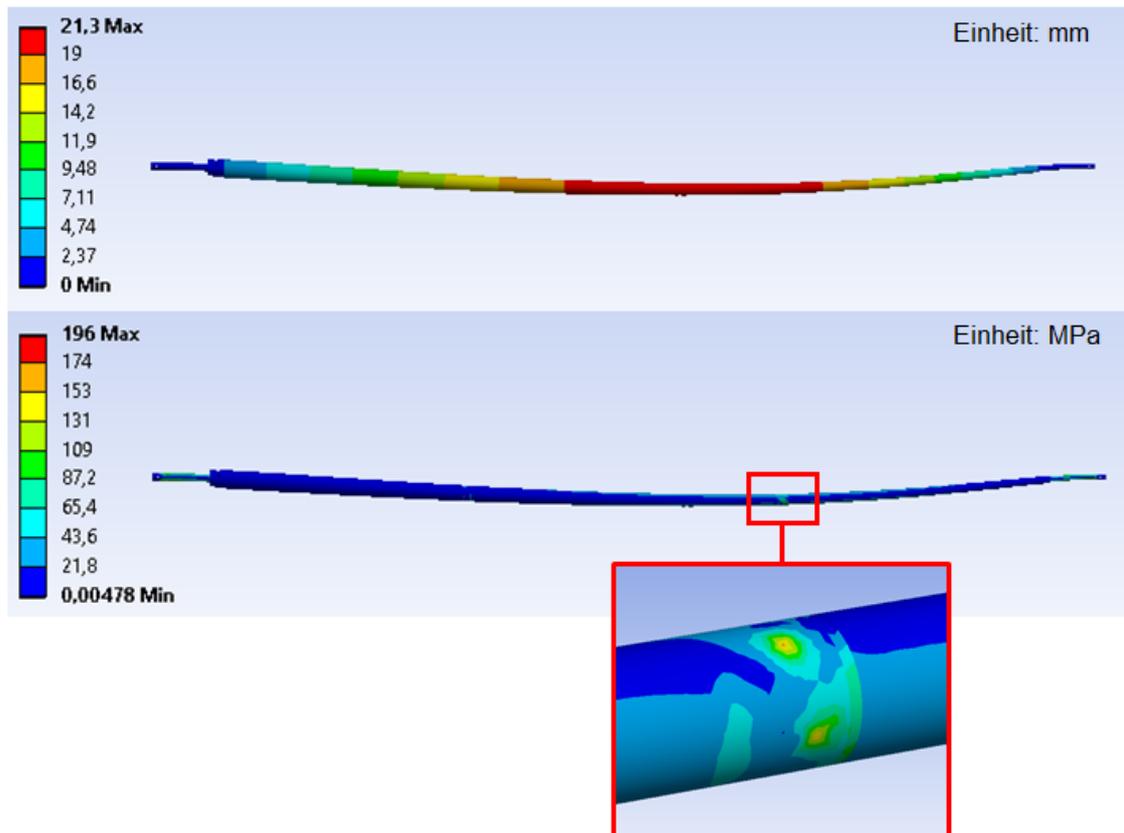


Abb. 40: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des dreiteiligen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertung der Ergebnisse:

Bei der dreiteiligen Variante wurde die Fehleranfälligkeit durch Weglassen der Gewinde bei der Verbindung der Einzelteile reduziert. Da die Teile ohnehin verschweißt werden müssen, kann das zusätzliche Gewinde entfallen. Dadurch werden mögliche Spannungsspitzen in den Gewindekernquerschnitten vermieden. Auch in Hinsicht auf die Montage und Fertigung der Einzelteile stellt diese Variante eine optimalere Lösung dar. Die Durchbiegung und Spannungswerte sind geringer als bei der zehnteiligen Ausführung und somit in einem akzeptablen Bereich. Gleichzeitig wird auch die Anzahl der Schnittstellen deutlich reduziert. Von Nachteil ist hingegen die erreichbare Oberflächenqualität aufgrund der längeren Einzelteile. Diese liegt bei dieser Ausführung hinter jener der zehnteiligen Variante, sollte aber zu keinerlei weiteren Problemen führen. Der gesamte Wickeldorn wird daher in der gezeigten Ausführung als geeignet für den Wickelprozess befunden.

Diese Konstruktion wurde nach der praktischen Umsetzung der zehnteiligen Variante erarbeitet. In der Praxis wurde dadurch auf die schon in der Berechnung ersichtlichen Problematiken bei der Verbindung mittels Gewinden eingegangen. Auf die Ergebnisse dieser Umsetzung und die daraufhin eingeleiteten Korrekturmaßnahmen wird im Kapitel 7 zur Herstellung des Wickeldorns eingegangen.

5.4 Variante 4: Hohler Wickeldorn

Die Variante des hohlen Wickeldorns folgt aus der Idee die Hauptbeanspruchung zu reduzieren. Diese ist durch das Eigengewicht gegeben und kann durch Materialwegnahme vermindert werden. Da der Einsatz von Aluminium oder ähnlichen leichteren Materialien aus Verschleiß- bzw. Kostengründen nicht in Frage kommt und die Außenkontur vorgegeben ist, kommt nur mehr eine hohle Ausführung in Frage. Um dies zu realisieren werden daher Rohrquerschnitte angedacht.

Konstruktion:

Bei der Konstruktion der hohlen Variante wurde der Wickeldorn in insgesamt 7 Einzelteile aufgeteilt. Die Teile 2 bis 6 sind hierbei komplett als Rohre ausgeführt. Teil 1 wird, so weit möglich, hohl gedreht um auch hier Gewicht einzusparen. Der Durchmesser des letzten Teiles ist dabei bereits so klein, dass sich eine hohle Ausführung nicht realisieren lässt. Die Anschlussdimensionen wurden wiederum unverändert von den bereits gezeigten Varianten übernommen.

Für die Verbindung der Einzelteile wird auch hierfür eine Steckverbindung mit Presspassung vorgesehen. Um eine axiale Verbindung zu erreichen werden die Teile ebenfalls mit Rundumschweißnähten an den Trennstellen verbunden. Die Wandstärke der einzelnen Rohre ist dabei, wie in Abbildung 41 in Detail X zu sehen ist, immer mit 14 mm am äußeren Teil und mit 8 mm am inneren Teil ausgeführt. Durch den Konus am Außendurchmesser ergibt sich dadurch bei gleichbleibendem Innendurchmesser wieder die Wandstärke für die nächste Verbindung. Lediglich bei den Verbindungen zwischen Teil 4 bis hin zu 7 wurden die Wandstärken anders ausgeführt. Hier weist der Innenteil eine Wandstärke von 12 mm und eine erhöhte Länge von 120 mm auf. Demzufolge haben die Teile rechts davon auch eine erhöhte Wandstärke. Die genauen Abmessungen können dem Detail Y und Z entnommen werden. Die Geometrie wurde hierbei nach der Festigkeitsanalyse angepasst um akzeptable Werte erreichen zu können. Auf die Ergebnisse der Berechnungen wird im Folgenden noch genauer eingegangen.

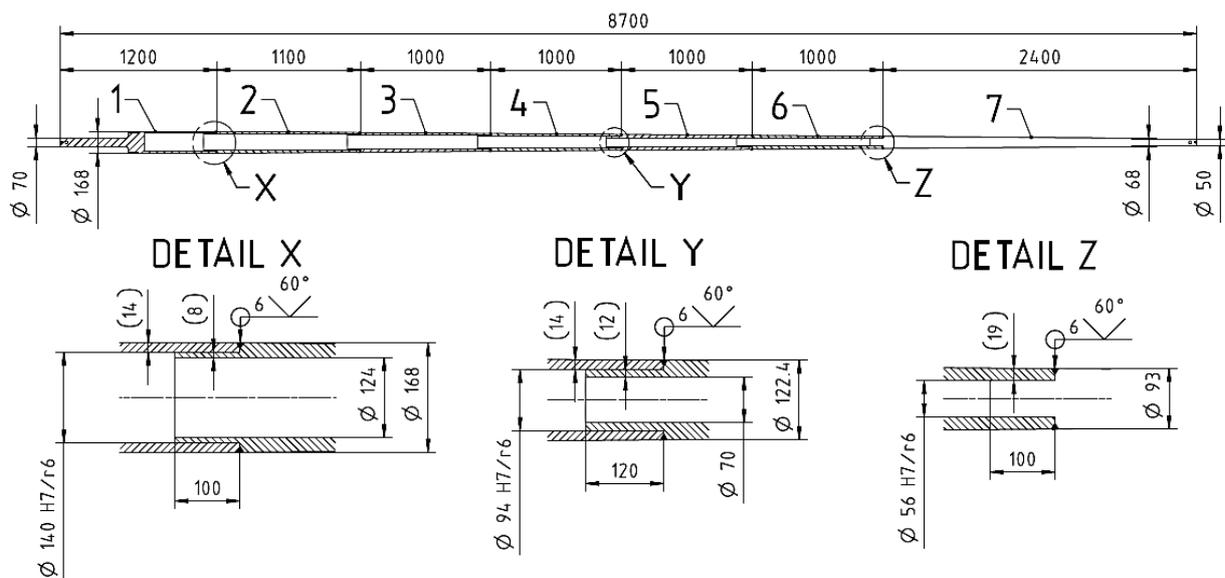


Abb. 41: Hohler Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.

Machbarkeitsanalyse:

In Anbetracht der Machbarkeit ist einerseits die Beschaffbarkeit der Rohteile, andererseits die Machbarkeit der Einzelteile bzw. der Montage zu betrachten. Im Hinblick auf die Rohteilabmessungen stellen diese auf den ersten Blick keine großen Probleme dar. Die Längen sind hierbei kein Problem, die Anschaffung von geeigneten Rohren ist jedoch eher fragwürdig. Diese sollten, wenn möglich, bereits einen ähnlichen Innendurchmesser wie die dargestellten Fertigteile aufweisen. Eine komplette Bearbeitung der Inneren Geometrie ist mit hohem Aufwand verbunden. Dazu müsste man mit Sonderwerkzeugen arbeiten und die Teile von beiden Seiten freidrehen. Die Anschaffung der Teile an sich ist bereits mit hohem Aufwand und auch Kosten verbunden, da jedes Teil andere Abmessungen aufweist und daher nur Einzelstücke benötigt werden. Eine genaue Kostenanalyse ist auch hier nicht vorgesehen.

Auf die Herstellung der Einzelteile wurde bereits kurz eingegangen. Diese ist je nach erhältlichem Ausgangsmaterial mehr oder weniger aufwendig. Bezüglich Machbarkeit stellt sie aber keine großen Probleme dar. Die Montage des Wickeldorns ist ähnlich wie die dreiteilige Variante zu betrachten. Die Verbindung selbst sollte hier keine Probleme verursachen. Jedoch ist die Anzahl der Schnittstellen höher. Der Aufwand ist daher mit der zehnteiligen Ausführung zu vergleichen.

Schlussendlich kann für die Machbarkeit dieser Variante ein positives Ergebnis gefunden werden. Jedoch liegen Aufwand und Kosten über den anderen gezeigten Varianten.

Festigkeitsanalyse und Ermittlung der Durchbiegung:

Zur Simulation der Durchbiegung und Mises-Vergleichsspannungen kam hier wieder das zuvor erstellte Modell zum Einsatz. Dieses wurde in mehreren Schritten angepasst um vernünftige Ergebnisse zu erreichen. Probleme machte hier vor allem die Verbindung zwischen Teil 4 bis 7. Hier treten die maximalen Belastungen und Verformungen infolge des Eigengewichts auf. Das Gewicht konnte durch die hohle Gestaltung um 337 kg auf schlussendlich 426 kg (zuvor 763 kg) reduziert werden. Das entspricht einer Gewichtsreduktion von 44,2%. Dadurch wurde auch die Belastung dementsprechend vermindert.

Blickt man nun auf die berechneten Verschiebungen dieser Ausführung, so kann ebenfalls ein reduzierter Wert mit maximal 13,9 mm gesehen werden. Der Maximalwert liegt hierbei an der gleichen Stelle wie auch bei den restlichen Varianten. Der Wert wird als sehr gut angesehen und sollte sich beim Aushärten der Masten nicht negativ auswirken.

Die ermittelten Mises-Vergleichsspannungen konnten hierbei erst nach mehreren Umläufen auf akzeptable Werte reduziert werden. Dabei konnte ein extremer Spannungsanstieg in den höher belasteten Verbindungen, welche auch die maximale Verschiebung zeigen, beobachtet werden. Erst durch das mehrmalige Anpassen der Geometrie dieser Schnittstellen (siehe Punkt zur Konstruktion) konnten die Spannungen auf ein ausreichendes Niveau herabgesetzt werden. Der Maximalwert beläuft sich hierbei auf 155 MPa und tritt in der Verbindung zwischen Teil 6 und 7 auf.

Die Belastungen der Schweißnähte sind auch bei dieser Variante in einem geeigneten Bereich. Für die Ausführung der Schweißverbindung gelten aber auch hier dieselben Empfehlungen wie bei den restlichen Varianten. Durch die wechselnde Belastung beim Wickeln sollten Spannungsspitzen, welche durch das Schweißen eingebracht werden, unbedingt vermieden werden.

In der anschließenden Abbildung sind wiederum die endgültigen Werte zur Berechnung der hohlen Variante des Wickeldorns ersichtlich. Dargestellt ist hier auch der Bereich, wo die maximalen Spannungswerte auftreten.

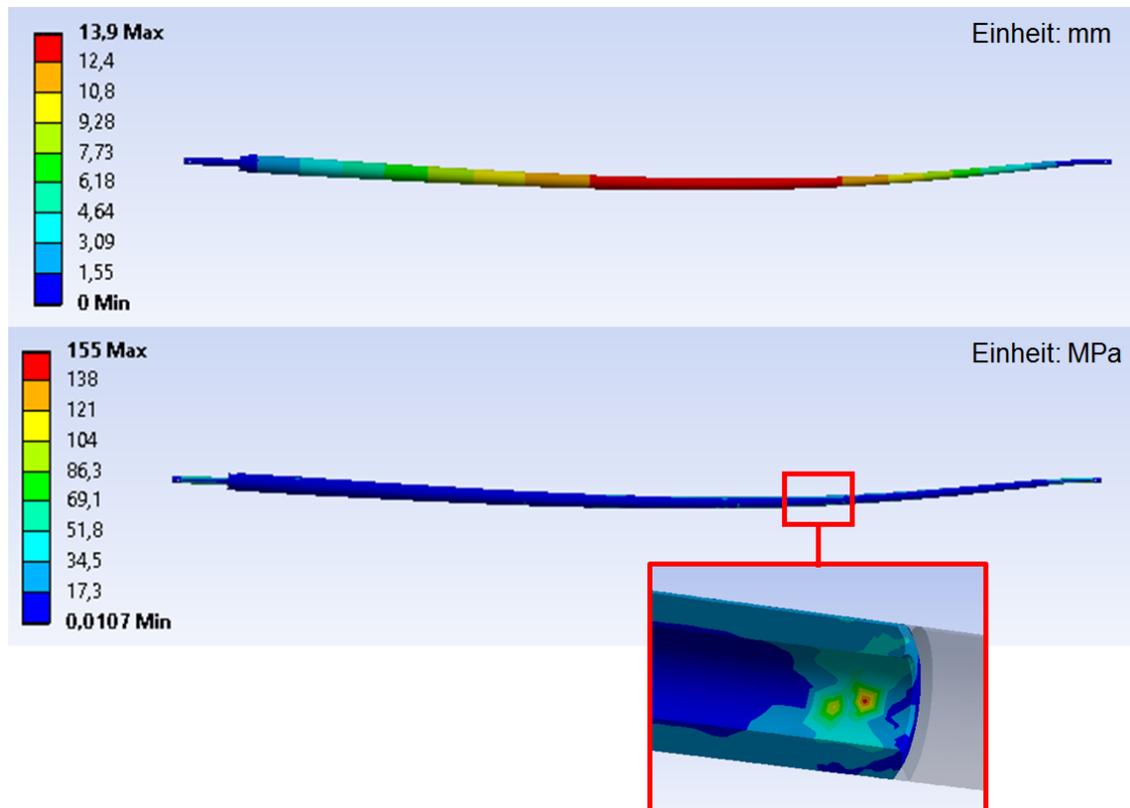


Abb. 42: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des hohlen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.

Bewertung der Ergebnisse:

Die Variante des hohlen Wickeldorns bringt zwar den Vorteil der reduzierten Durchbiegung, die Spannungswerte konnten aber erst nach mehrmaligem Anpassen der Geometrie reduziert werden. Da die Verschiebung ohnehin als eher unkritisch bewertet wird und die Herstellung dieser Ausführung mit hohem Aufwand verbunden ist, wurde entgegen einer Umsetzung entschieden. Sie stellt aber eine Alternative dar, falls die Durchbiegung zu untragbaren Problemen bei der Herstellung führen würde. Diese könnten sich zum Beispiel durch bleibende Verformungen der fertigen Bauteile oder durch extreme Faserverschiebungen der noch weichen Fasern ergeben.

Vorweg sei genommen, dass diese Variante nicht zum Einsatz kommt. Durch die erstellte Konstruktion und die ermittelten Ergebnisse wurde aber sehr wohl einiges an Erfahrung für mögliche andere Projekte gewonnen. Die Erwartungen an eine hohle Ausführung wurden dabei nicht getroffen. Hier wurden eigentlich bessere Ergebnisse erhofft.

6 ENTWICKLUNG DER VORRICHTUNGEN ZUR HERSTELLUNG DES LATERNENKOPFES

Für die Herstellung des Laternenkopfes werden mehrerer Vorrichtungen benötigt. Insgesamt sind dazu drei Vorrichtungen notwendig. Der Reflektor und die Konsolen müssen dabei vorab in eigenen Formen angefertigt werden, um schlussendlich in einem Prozess in der Legevorrichtung des Laternenkopfes zu dem fertigen Bauteil verschmelzen zu können.

Wie bereits erwähnt kommt für die Anfertigung der Bauteile das Handlaminierverfahren zur Anwendung. Die Auswahl des Fertigungsverfahrens hat dabei entscheidende Auswirkungen auf die Gestaltung der Vorrichtung (siehe Abschnitt 3.2.1). In erster Linie ist eine Materialauswahl zu treffen. Ein Einsatz von Holz oder Kunststoffen bzw. Harzen kommt aus Gründen der Verschleißfestigkeit nicht in Frage. Da hier einige Bauteile anzufertigen sind ist ein verschleißfesterer Werkstoff anzuwenden. Die Wahl fällt dabei entweder auf eine Stahl- oder Aluminiumlegierung. Von beiden Werkstoffen gibt es geeignete Vertreter für den Einsatz bei diesen Vorrichtungen. Um hier eine Auswahl zu treffen wird im ersten Schritt die Zerspanbarkeit dieser zwei Materialien betrachtet.

Betrachtet man Stähle, so lassen sich diese nach ihren Gefügebestandteilen und Eigenschaften einteilen. Nach dem Legierungsgehalt kann man dabei zwischen unlegierten, niedrig legierten und hochlegierten Stählen unterscheiden. Hierbei können die unlegierten Stähle noch weiter in jene, welche für eine Wärmebehandlung geeignet, bzw. nicht geeignet sind (allgemeine Baustähle), eingeteilt werden. Baustähle werden meist eingesetzt, wenn keine außergewöhnlichen Anforderungen an das Gefüge gestellt werden. Die Zerspanbarkeit ist unter anderem von den Gefügebestandteilen und den Legierungselementen, aber auch von der Vorbehandlung abhängig.⁶¹

Da für die Vorrichtungen keine besonderen Festigkeitsanforderungen vorliegen, wird auf einen unlegierten Baustahl (S235JR) zurückgegriffen. Klocke und König beschreiben dazu eine gute Zerspanbarkeit, da das Gefüge hauptsächlich aus Ferrit besteht und nur geringe Anteile an Perlit enthält. Somit ist der Verschleißangriff auf die Werkzeuge gering.⁶²

Bei der Bearbeitung von Aluminiumlegierungen treten im Vergleich zu Stählen wesentlich geringere Temperaturen auf. Die Zerspanbarkeit ist durch die geringere Festigkeit sehr gut zu bewerten. Zu beachten ist jedoch, dass die Grenzflächentemperatur bei der Bearbeitung unter der Schmelztemperatur liegen sollte. Diese ist bei Aluminiumlegierungen mit 520-650°C relativ gering. Von Vorteil sind aber die bedeutend höheren Schnittgeschwindigkeiten gegenüber Stählen.⁶³

Als Aluminiumwerkstoff wird hierbei an eine Speziallegierung für den Formenbau (AlZn5,5MgCu) gedacht. In Hinblick auf die Zerspanbarkeit hat diese Legierung Vorteile gegenüber dem genannten Baustahl. Auch in Anbetracht der Wärmeleitfähigkeit zeigt Aluminium vorteilhaftere Werte als vergleichbare Stahlwerkstoffe. Nachteilhaft ist jedoch der höhere Preis bzw. auch die Beschaffbarkeit von

⁶¹ Vgl. Klocke/König (2008), S. 273 ff.

⁶² Vgl. Klocke/König (2008), S. 291 f.

⁶³ Vgl. Klocke/König (2008), S. 319 f.

Aluminiumblöcken in geeigneten Dimensionen. Daher wird schlussendlich der genannte Baustahl als Werkstoff eingesetzt. Es sei jedoch angemerkt, dass die hohen Beschaffungskosten durch niedrigere Fertigungskosten, aber vor allem auch durch Einsparungen beim Aushärteprozess (kürzere Zykluszeiten) nach einer bestimmten Verwendungszeit egalisiert werden. Eine Aufstellung dieser Kosten ist in dieser Arbeit nicht vorgesehen.

In den folgenden Unterkapiteln wird nun auf die Gestaltung der Vorrichtungen zur Herstellung der Bauteile im Handlaminierverfahren eingegangen. Grundlage dafür sind die zuvor erstellten Geometrien des Laternenkopfes, des Reflektors und der Konsolen.

6.1 Entwicklung der Vorrichtung des Reflektors

Der Reflektor dient zum Abschluss des Laternenkopfes. Er befindet sich im Inneren des Kopfes und wird schlussendlich bei der Herstellung desselben miteingelegt. Zuerst muss dieser jedoch als eigener Bauteil geformt werden. Die Geometrie des Reflektors ist hierbei von der Innenkontur des Laternenkopfes vorgegeben. Sie besteht hauptsächlich aus Freiformflächen.

Betrachtet man die Vorrichtung zu diesem Bauteil, so muss diese einige Kriterien erfüllen. Zum einen muss die Herstellbarkeit im Handlaminierverfahren gewährleistet werden, zum anderen muss der Bauteil auch wieder entformt werden können. Zusätzlich sollte die nach außen zeigende Sichtfläche möglichst glatt und von hoher Oberflächenqualität sein. Für die Herstellung dieses Bauteiles muss daher die Negativform dieser Außenfläche abgebildet werden. Um die Fasern genau ablegen und gleichzeitig die Außenkontur fixieren zu können, wird diese Form außerdem als Vertiefung dargestellt. Die Tiefe wird dabei durch die Höhe des fertigen Laminataufbaues bestimmt. Sie muss mindestens so hoch wie die Dicke des ausgehärteten Reflektors sein. Da die Fasern während des Laminierens in etwas dickerer Form vorliegen, wird die Vertiefung aber größer ausgeführt. Wie bereits erwähnt wird die Vorrichtung aus einem Stahlblock gefräst. Um hier Gewicht einzusparen, aber auch um den Fertigungsprozess beschleunigen zu können, wird so viel Material wie möglich entfernt. Das geschieht hauptsächlich durch ein stufenförmiges Abfräsen der Rückseite der Vorrichtung. In der nachfolgenden Abbildung ist das CAD-Modell des Bauteils und der Vorrichtung zu sehen. Die dargestellte Aussparung an der Oberseite des Reflektors wird durch die Form nicht mitgeformt. Sie muss erst nachträglich angebracht werden. Diese Aussparung dient zur Kabeldurchführung. Auf Details wird später noch näher eingegangen.

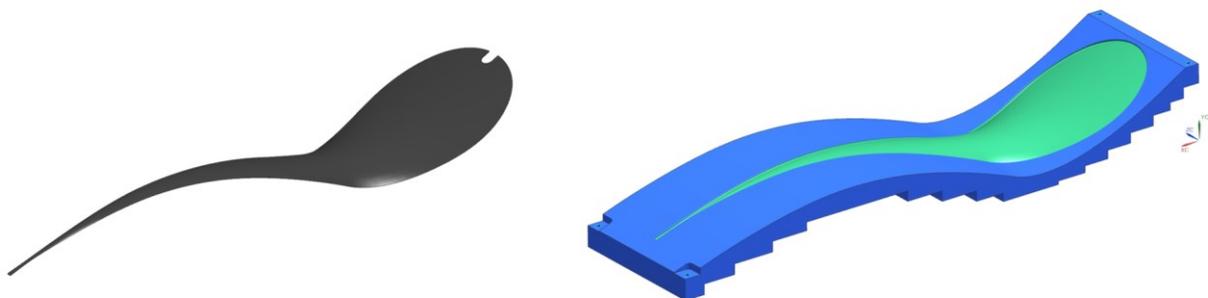


Abb. 43: CAD-Modell Reflektor (links), Stahlvorrichtung (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Im Hinblick auf die Machbarkeit dieser konstruierten Vorrichtung konnten keine großen Probleme gefunden werden. Sowohl die Beschaffung von geeignetem Rohmaterial, wie auch eine hausinterne Fertigung sind ohne weiteres möglich. Nur bei der Oberflächenqualität müssen Abstriche gemacht werden. Die Vorrichtung kann durch die großen Abmessungen (1300 x 350 x 180 mm) nicht auf für Freiformflächen geeigneten Maschinen gefertigt werden. Eine Nachbehandlung durch Schleifen und Polieren wird daher notwendig. Die gewünschte Güte bzw. die notwendigen Schritte werden im Kapitel zur Herstellung noch genauer behandelt.

Maßschwankungen infolge des Aushärtungsprozesses wurden bei der Entwicklung der Vorrichtung nicht berücksichtigt. Die Vorrichtung wurde hier mit den theoretischen Abmessungen des fertigen Bauteiles erstellt. Um diese zu erreichen wird meist der Verzug bzw. die Längenänderung nach dem Aushärten in der Form berücksichtigt. Das kann entweder durch Erfahrungswerte mit ähnlichen Bauteilen, oder durch Anfertigung und Vermessung von Prototypen erreicht werden. Da hier aber keine besonderen Anforderungen an Maßhaltigkeit und Form vorliegen, kann auf diesen Schritt verzichtet werden.

Die Entformung des ausgehärteten Reflektors dürfte mit dieser Vorrichtung kein Problem darstellen. Da die Formtiefe recht gering ist wird zudem auf eine Formschräge verzichtet. Zum Lösen des Bauteils können entweder Keile oder Saugvorrichtungen verwendet werden. Die zweite Lösung ist dabei zu bevorzugen, da der Bauteil dadurch mit Sicherheit nicht beschädigt wird.

6.2 Entwicklung der Vorrichtung der Konsolen

Die Konsolen dienen zur Aufnahme der Leuchtkörper. Sie werden ebenfalls zuvor angefertigt und später bei der Herstellung des Hauptteiles mit diesem verbunden. Darum sind auch für diese Bauteile eigene Vorrichtungen notwendig. Auch diese werden im Handlaminierverfahren hergestellt.

Die Kontur der Konsolen ist dabei durch mehrere Randbedingungen definiert. Die Größe selbst ist durch die Leuchtkörper vorgegeben. Diese werden später auf die Konsolen geschraubt. Dadurch ist auch die Position dieser Fläche definiert. Diese muss dabei parallel zum Untergrund ausgerichtet sein. Mit dieser Ausrichtung wird die Richtung der Beleuchtung bereits grob vorbestimmt. Eine Feineinstellung ist bei der Montage der Leuchtkörper selbst möglich. Da nun sowohl Position und Größe der Konsolen definiert wurden, kann die Geometrie der Teile an die Innenkontur des Kopfes angepasst werden. Dadurch ergeben sich zwei unterschiedliche Konsolen in U-Form. Die Länge der umgelenkten Flächen steuert hierbei die Orientierung im Laternenkopf. Beim späteren einlegen in den Kopf muss daher nur mehr die Position bestimmt werden. Die horizontale Ausrichtung ergibt sich durch das Zusammenwirken der Geometrie von Laternenkopf und Konsolen.

In der nachfolgenden Abbildung ist die Position der Konsolen in der Straßenbeleuchtung dargestellt. Bei der horizontalen Ausrichtung ist dabei auch die Montagelage (80° zu Horizontalen) zu berücksichtigen. Die Geometrie kann dadurch im CAD-Modell bestimmt werden und dient als Ausgangspunkt für die Gestaltung der Vorrichtungen.

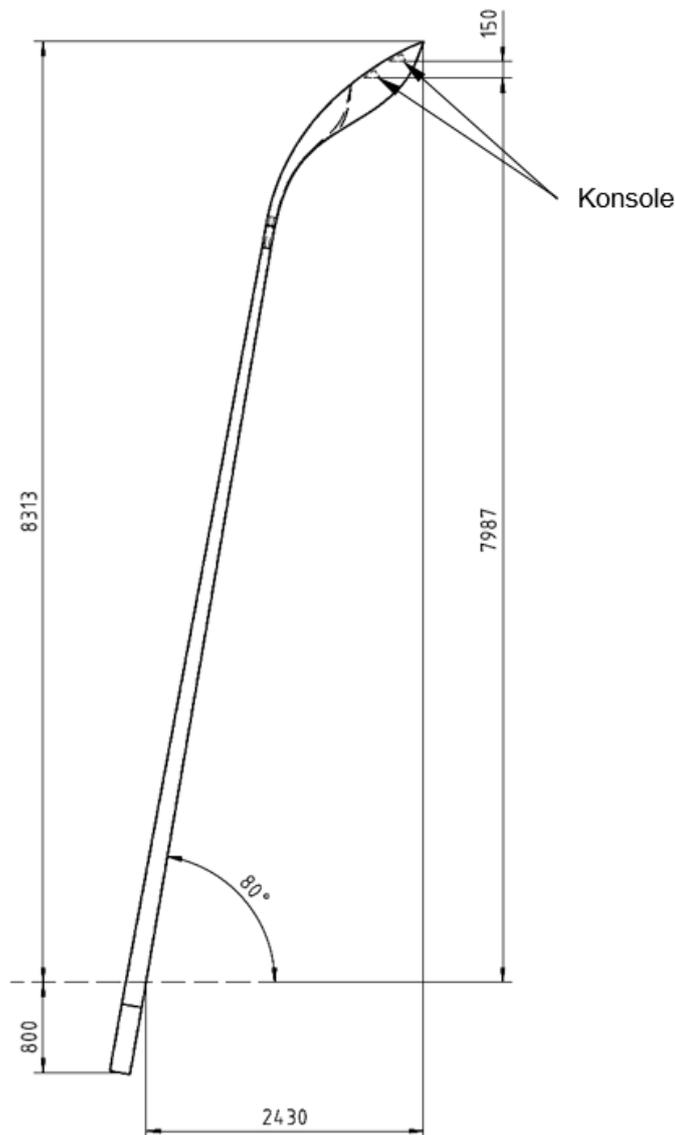


Abb. 44: Position der Konsolen in der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.

Da nun die Geometrie der Konsolen bestimmt ist kann auf die restlichen Bedingungen Rücksicht genommen werden. An die Oberfläche sind keine besonderen Anforderungen gerichtet. Die Konsolen werden von den Leuchtkörpern weitgehend abgedeckt und sind kaum sichtbar. Auch das Entformen der beiden u-förmigen Bauteile stellt keinerlei Schwierigkeiten dar. Auf die Geometrie ist jedoch besonders zu achten, da durch sie die Ausrichtung mitbestimmt wird.

Zur Formgebung der Konsolen sind dabei einfache Kantbleche ausreichend (siehe Abb. 45). Die Innenkontur der Bleche muss dabei die Außenkontur der Konsolen widerspiegeln. Gleichzeitig werden die Bleche mittels Schablonen auf die Endkontur mit der notwendigen Geometrie zugeschnitten. Die Fasern können dadurch in die Kantbleche gelegt werden. Sie müssen dabei über den Rand hinaus laminiert werden. Erst nach dem Aushärten der Bauteile dienen die Kantbleche selbst als Schablone und die Konsolen erhalten nach dem Zuschneiden ihre endgültige Form.

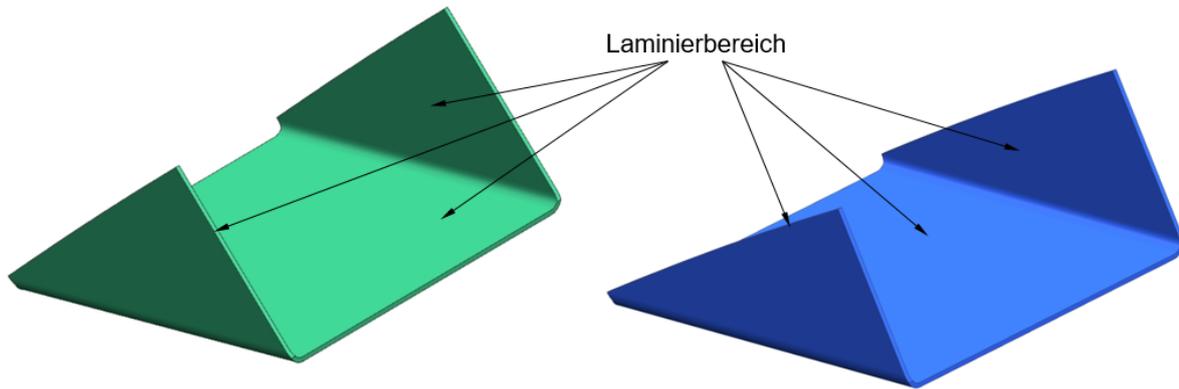


Abb. 45: Vorrichtungen zur Konsolenherstellung, Quelle: Eigene Darstellung.

Durch diese recht einfache Lösung sind die Vorrichtungen einerseits sehr günstig auszuführen, andererseits ist auch das Thema zur Gewichtseinsparung geklärt. Auch das Lösen der Teile aus den Vorrichtungen ist durch die flexiblen Kantbleche einfach gegeben. In Punkto Maßhaltigkeit ist hier nur die Geometrie ausschlaggebend. Da diese durch Zuschneiden nach dem Aushärteprozess definiert wird ist auch das kein Problem. Zudem ist durch die Verwendung der Vorrichtung als Schablone auch die Wiederholbarkeit gegeben.

6.3 Entwicklung der Vorrichtung des Laternenkopfes

Die Vorrichtung des Laternenkopfes ist am komplexesten im Vergleich zu den restlichen Bauteilen. Sie muss die Geometrie des Kopfes formen und gleichzeitig den Reflektor und die Konsolen in der richtigen Position halten. Schlussendlich entsteht dadurch der fertige Laternenkopf, welcher mit dem Mast verklebt werden kann. Auch durch die außergewöhnliche Gestalt und Größe des Kopfes stellt sie eine eigene Herausforderung dar. Der Kopf selbst besteht wiederum weitgehend aus Freiformflächen. Nur die Verbindung zum Mast ist durch zylindrische Flächen dargestellt. Dies ist zugleich der einzige Bereich bei dem insbesondere Wert auf die Maßhaltigkeit gelegt werden muss. Diese ist zur genauen Gestaltung der Klebeverbindung notwendig.

In den folgenden Abschnitten wird nun separat auf die Konstruktion der Legevorrichtung zur Formgebung des Laternenkopfes, sowie die Positioniervorrichtung zur Ausrichtung der Konsolen eingegangen.

6.3.1 Konstruktion der Legevorrichtung

Bei der Legevorrichtung ist wieder auf dieselben Gesichtspunkte zu achten. In erste Linie stellt die Entformung des fertigen Bauteiles ein Problem dar. Der Laternenkopf ist durch seine gewölbte, beinahe geschlossene Form, nicht einfach entformbar. Daher ist hier zwangsläufig eine geteilte Vorrichtung notwendig. Um das Bauteil reibungslos aus der Vorrichtung lösen zu können ist eine Schräge zum Entformungsvektor erforderlich. Dieser Vektor kann dabei frei gewählt werden. Eine nähere Betrachtung der Geometrie zeigt dabei zwei mögliche Richtungen. Hierbei kann die dadurch entstehende Formenteilung bzw. der Winkel der Bauteilflächen zur möglichen Teilungsebene mittels CAD-Software ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Bauteilanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung zu sehen.

Durch die gewölbte Form ergibt sich dabei eine klare Trennebene bei beiden Varianten. Wäre diese nicht der Fall, so könnte man keinen klaren Farbwechsel zwischen positiven und negativen Entformungswinkel sehen. Zur Betrachtung wurden nur die Außenflächen herangezogen. Diese sollten glatt sein und eine hohe Oberflächenqualität aufzeigen. Die Innenseite des Kopfes muss diese Kriterien nicht erfüllen. An der Trennstelle stoßen die Fasern hierbei aneinander. Dadurch ist diese meist nach dem Entformen sichtbar. Im vorliegenden Fall ist die zweite Variante zu bevorzugen. Einerseits entstehen dadurch zwei symmetrische Formenhälften, andererseits ist hier nur eine Trennstelle sichtbar. Die Ausführung hat daher sowohl fertigungstechnische, wie auch ästhetische Vorteile.

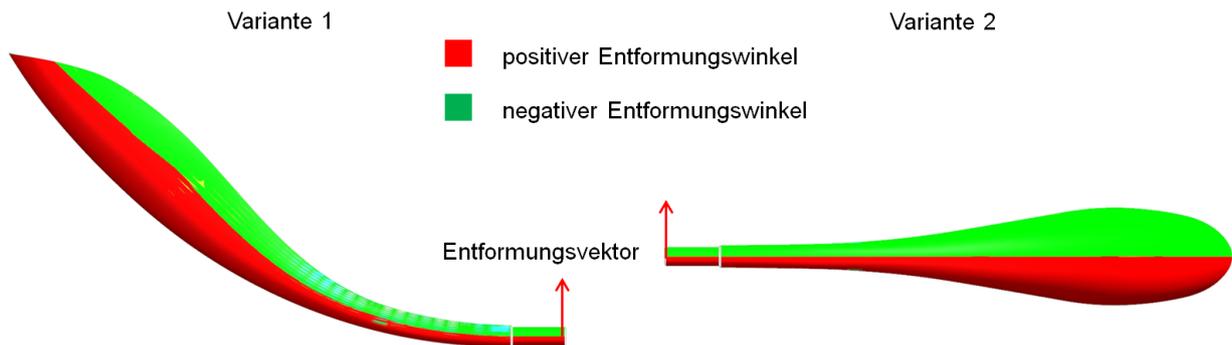


Abb. 46: Analyse der Formteilung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Im nächsten Schritt kann die Vorrichtung mit der Grundlage des 3D-Modells und dem festgelegten Entformungsvektor konstruiert werden. Sie besteht aus zwei Hauptteilen, dem Ober- und Unterteil, welche mittels Zentriereinheiten zueinander positioniert werden. Um hier wiederum Gewicht einzusparen wird der Ausgangsblock so weit möglich abgefräst. Dabei wurde die Außenkontur mit einer Distanz zum Bauteil selbst, wie auch die Höhe soweit möglich stufenförmig freigefräst (siehe Abb. 47). In dieser Ausführung können die zwei Hälften des Kopfes separat laminiert und anschließend gefügt werden. Auf den genauen Ablauf wird dabei später noch näher eingegangen.

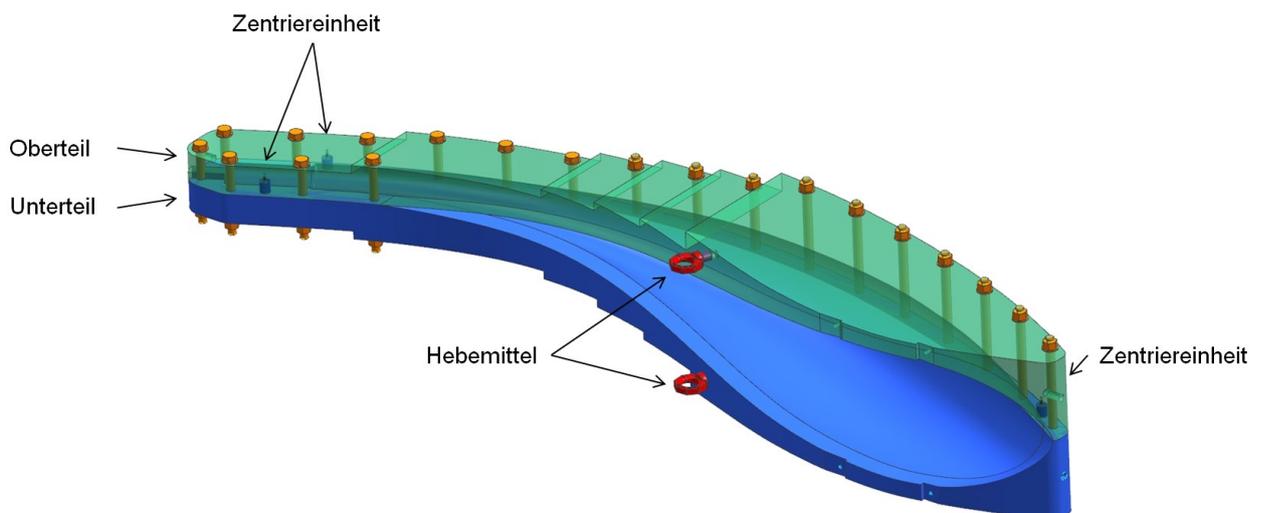


Abb. 47: Legevorrichtung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Machbarkeit der Vorrichtungshälften gelten hier dieselben Bedingungen wie auch für die Vorrichtung des Reflektors. Mit den großen Hauptabmessungen von 2420 x 510 x 200 mm müssen auch hier Abstriche bei der Oberflächenqualität gemacht werden. Erst durch dementsprechendes händisches nacharbeiten kann die gewünschte Güte erzielt werden. Eine hausinterne Fertigung der Teile ist aber prinzipiell kein Problem.

Auf eine Festigkeitsberechnung zu Dimensionierung kann hierbei verzichtet werden. Die Komponenten der Vorrichtung unterliegen keinen besonderen Beanspruchungen und müssen daher nicht näher betrachtet werden.

6.3.2 Konstruktion der Positioniervorrichtung

Die Positioniervorrichtung dient als Hilfsmittel um die Position der Konsolen eindeutig definieren zu können. Sie wird dabei auf die eigentliche Vorrichtung nach dem Zusammensetzen von Ober- und Unterteil aufgeschraubt (siehe Abb. 48). Sie ist hierbei weitgehend modular mit Winkeln, Kantblechen und Langlöchern ausgeführt. Nach einer ersten Arretierung und Fixierung kann sie zur Fertigung mehrerer Bauteile eingesetzt werden. Sie stellt dabei in Kombination mit der Geometrie der Konsolen die genaue Ausrichtung sicher. Die Wiederholbarkeit ist dadurch gegeben und die Aufnahme für die Leuchtkörper ist bei allen Bauteilen einheitlich. Bei der Konstruktion musste hierbei auf die Zugänglichkeit geachtet werden. Um die positionierten Konsolen mit dem Laternenkopf verbinden zu können ist eine platzsparende Ausführung zwingend notwendig.

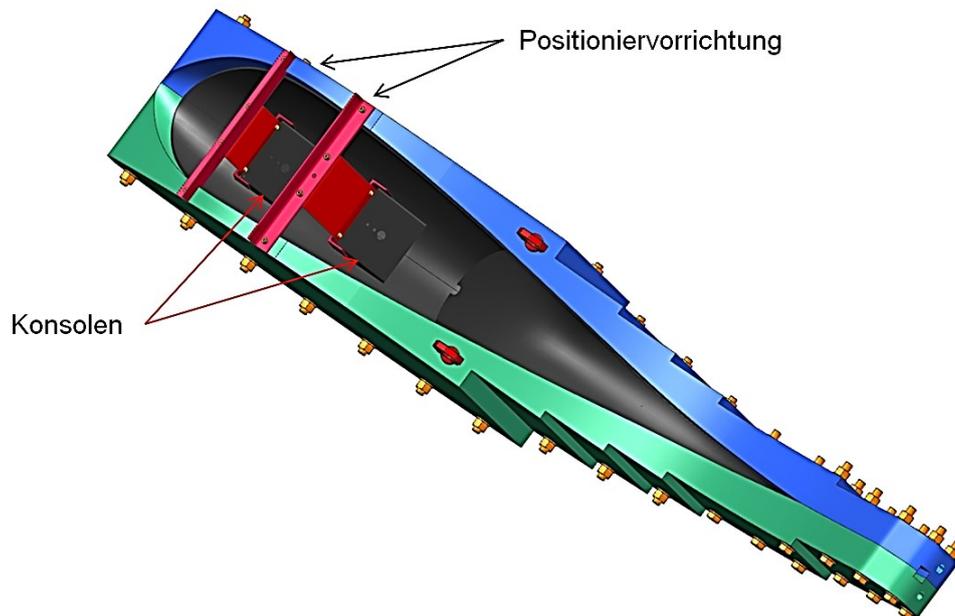


Abb. 48: Positioniervorrichtung der Konsolen, Quelle: Eigene Darstellung.

Auch bei der Auslegung der Positioniervorrichtung wurden keine Festigkeitsberechnungen oder dergleichen durchgeführt. Die Dimensionierung der wenig beanspruchten Bauteile erfolgte nach Erfahrungswerten.

7 HERSTELLUNG DES MASTES

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die Herstellung des Mastes inkl. der zuvor entwickelten Wickelvorrichtung eingegangen. Dabei werden Probleme und Lösungsansätze behandelt, die zur Umsetzung des Vorhabens notwendig waren. Erst durch die Realisierung der geplanten Maßnahmen konnte das gewünschte Ergebnis sichergestellt werden.

7.1 Herstellung und Montage der Wickelvorrichtung

Für die Gestaltung des Wickeldorns wurde die Variante zwei (zehnteiliger Wickeldorn) gewählt. Die Auswahl basierte dabei auf Grundlage der Machbarkeit, wie auch der Kosten zur Umsetzung. Bei der Herstellung der Einzelteile gab es hierbei keinerlei Probleme. Beim Zusammenfügen der zehn Teile traten jedoch erste Schwierigkeiten auf. Die Teile wurden hierbei auf einer Flachbettdrehmaschine unter Zuhilfenahme einer Lünette und einem Kran händisch verschraubt (siehe Abb. 49). Problematisch ist dabei eine axiale Schiefstellung der Teile beim Verschrauben. Infolgedessen kommt es zum Verreiben der Gewinde oder der Zentrierung. Erst unter Zuhilfenahme von Wärme konnten die Teile gefügt und anschließend verschweißt werden. Ein weiteres Problem trat durch die fehlende axiale Vorspannkraft auf. Dadurch ergaben sich immer wieder kleine Spalte in den Trennstellen. Die Geradlinigkeit des Wickeldorns ist dadurch nicht gegeben. Erst durch mehrmaliges Ausrichten der Teile vor dem Verschweißen konnte ein ausreichendes Ergebnis erzielt werden.



Abb. 49: Montage des zehnteiligen Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach Überwindung der Probleme konnten schlussendlich erste Wickelversuche (Drehzahl 20-40 U/min) durchgeführt werden. Hierbei trat das Hauptproblem mit dieser Variante auf. Nach einigen Versuchsläufen kam es letztendlich nach ersten Rissen in den Schweißnähten und mehrmaligem Ausbessern dieser Risse zu dem Bruch des Wickeldorns. Der Bruch trat hierbei zwischen den Einzelteilen 5 und 6 auf. In diesem Bereich zeigten auch die Berechnungen die maximalen Spannungswerte. Auch die Durchbiegung ist in diesem Bereich maximal. Da es in diesem Bereich entgegen der Simulationsergebnisse zu einem Bruch kam, kann hierbei verschiedene Ursachen haben. Entweder wurden die Spannungen im Gewindefreistich durch ein ungewolltes Vorspannen zu groß und

infolgedessen ist die Schweißnaht gerissen, oder ungewollte Spannungen in den Schweißnähten führten zu Rissen und schlussendlich zum Bruch im Gewindefreistich. Letztere Variante scheint wohl wahrscheinlicher, da bereits zuvor Risse in den Schweißnähten festgestellt wurden. Von einer genauen Schadensermittlung durch weitere Analysen wird aber abgesehen. Dies scheint hier nicht sinnvoll, da zur Lösung des Problems eine andere Verbindung gewählt wird. In der nachfolgenden Abbildung ist der Bruch des Wickeldorns ersichtlich. Dieser geschah bei einem Wickelversuch mit trockenen Fasern.



Abb. 50. Wickeldornbruch zwischen Teil 5 und 6, Quelle: Eigene Darstellung.

Als Abhilfemaßnahme wurde beschlossen den Wickeldorn mit zwei neuen Teilen nach Ausführung der dritten Variante (dreiteiliger Wickeldorn) zu reparieren. Dabei wurde die Länge der Einzelteile und auch die Verbindungsart, wie zuvor dargestellt, abgeändert. Nach Neufertigung und Montage dieser Teile konnten erfolgreiche Wickelversuche durchgeführt werden. Dabei konnten keine weiteren Probleme an den Schnittstellen bzw. Schweißverbindungen festgestellt werden.

7.2 Wickeln des Mastes

Nach erfolgreichen Wickelversuchen und der Fertigstellung der Wickelvorrichtung können erste Bauteile angefertigt werden. Hierbei wird der Wickeldorn auf die Wickelanlage gespannt und dementsprechend vorbereitet. Zur Vorbereitung zählen hierbei das Reinigen der Oberfläche sowie das Anbringen von Wickelpins (siehe Abb. 51), welche beim Wenden des Wickelkopfes die Fasern in Position halten. Nach Vorbereitung der Fasern und des Harzsystems kann nun das Wickelprogramm gestartet und die einzelnen Lagen laut Lagenaufbau aufgewickelt werden.

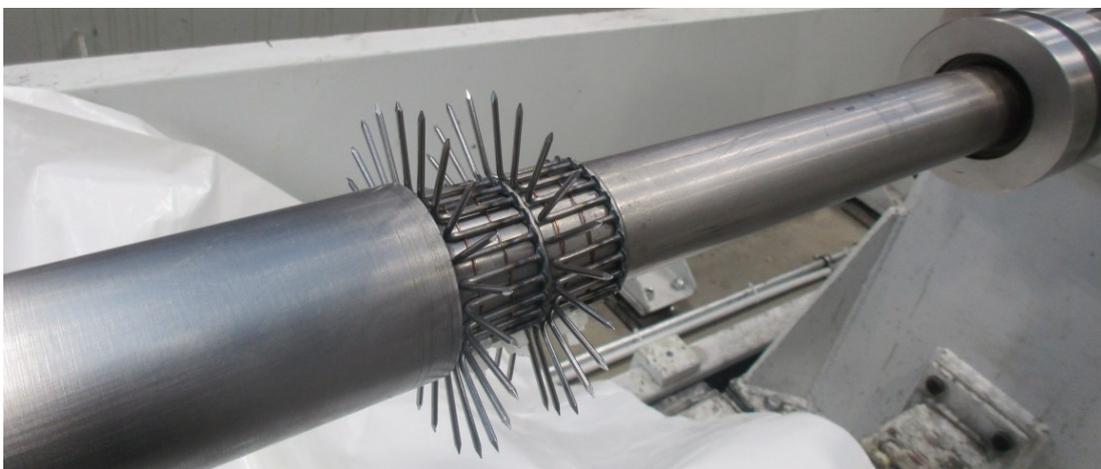


Abb. 51: Wickelpins auf dem Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.

Herstellung des Mastes

Die Wickelmaschine steuert hierbei über den drehbaren Kopf und dem Vorschub den Wickelwinkel und somit die entstehende Wandstärke wie in der nachfolgenden Abbildung zu sehen ist. Dabei wendet der Kopf jeweils am Ende des Wickeldorns bis schlussendlich der komplette Lagenaufbau aufgewickelt wurde.



Abb. 52: Wickeln des Mastes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Fasern werden beim Wenden durch die Wickelpins in Position gehalten. Die Faserorientierung wird dabei nach dem Bereich mit den Pins sehr ungenau bzw. unbrauchbar (siehe Abb. 53). Der Bereich befindet sich jedoch nach dem fertigen Bauteil und wird letztendlich vor dem Aushärten vom restlichen Mast getrennt.



Abb. 53: Wendebereich mit Wickelpins, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Aufwickeln aller Lagen befindet sich sehr viel Harz am Wickeldorn. Um das überschüssige Harz entfernen zu können wird ein Harz aufnehmendes Abreißgewebe verwendet. Dieses wird händisch aufgewickelt und nach einer kurzen Verweilzeit wieder entfernt. In der Zwischenzeit werden die Fasern an den Wickelpins getrennt und die Formelemente zur Gestaltung des Abschlusses angebracht. Die Ergebnisse dieser Vorgänge sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. In der oberen Abbildung wird das Abreißgewebe angebracht, in der unteren Abbildung ist die montierte Spannvorrichtung mit Formelement ersichtlich. Die gesamte Vorrichtung ist hierbei noch in der Drehbankwickelanlage eingespannt. Nach dem Entfernen des Abreißgewebes und einem händischen Glätten der Oberfläche kann die Vorrichtung in den Ofen zum Aushärten gehoben werden. Das Glätten ist dabei notwendig um die Oberflächenqualität zu erhöhen. Nach dem Abziehen des Abreißgewebes ist diese eher rau und ungleichförmig.

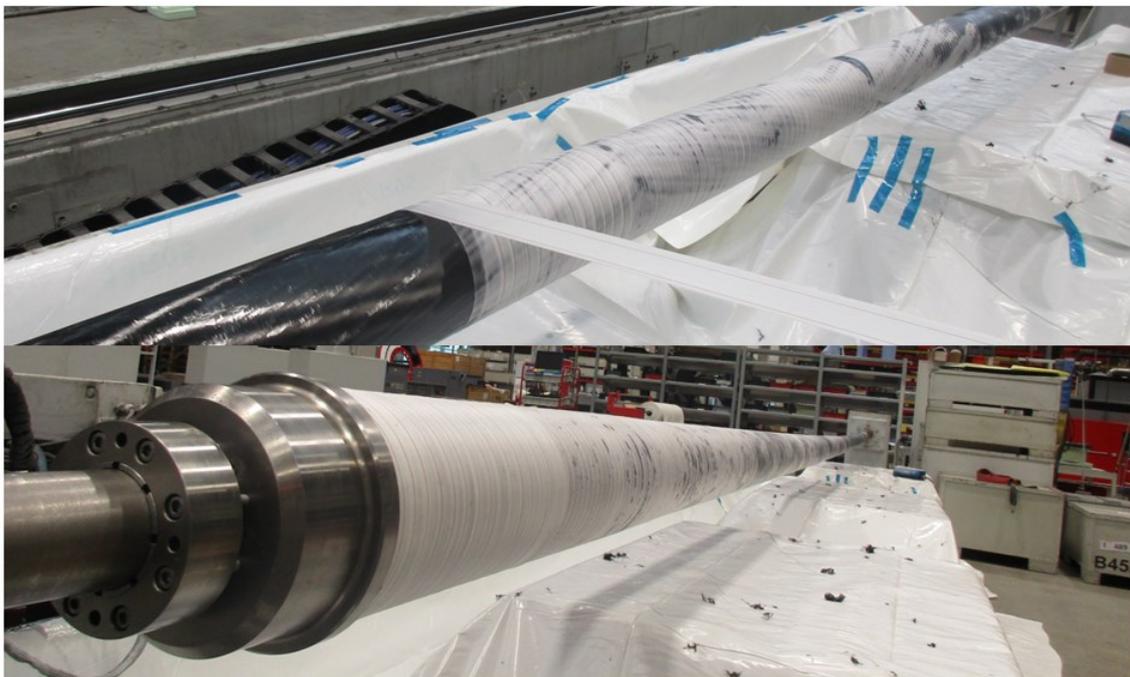


Abb. 54: Aufwickeln des Abreißgewebes (oben), montiertes Formelement (unten), Quelle: Eigene Darstellung.

Auch im Ofen findet eine konstante langsame Drehbewegung (ca. 100 U/min) der Wickelvorrichtung statt. Dadurch sollte sich die Verformung infolge des Eigengewichts nicht weiter auf das fertige Bauteil auswirken. Das Ergebnis wird hierbei jedoch erst nach dem Entformen sichtbar. Der ausgehärtete Mast auf der Vorrichtung ist zu flexibel um hier bereits etwas erkennen zu können.

Nach dem abgeschlossenen Ofenzyklus ist der Rohbauteil fertig. Hierbei können einige interessante Erkenntnisse gesehen werden. Zum einen hat sich der Mast um ca. 5mm verkürzt (Richtung der Seite mit größerem Durchmesser), zum anderen können leichte Fasererhebungen im mittleren Bereich festgestellt werden. Der Längenunterschied ist hierbei auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der verschiedenen Materialien zurückzuführen. Die Erhebungen dürften durch die dauernde wechselnde Verformung infolge der Drehbewegung entstehen. Das Gesamtergebnis wird jedoch als zufriedenstellend angesehen. Die Toleranzen um die Länge des Mastes zu erreichen ist nicht von hoher Priorität. Ebenso werden die Erhebungen vernachlässigt, da der Bereich kaum sichtbar ist und die Oberfläche ohnehin nachbearbeitet und lackiert wird. In der nachfolgenden Abbildung ist der Mast inkl. Wickelvorrichtung

nach dem entnehmen aus dem Ofen ersichtlich. Bei genauerer Betrachtung sind hier die genannten Erhebungen erkennbar.

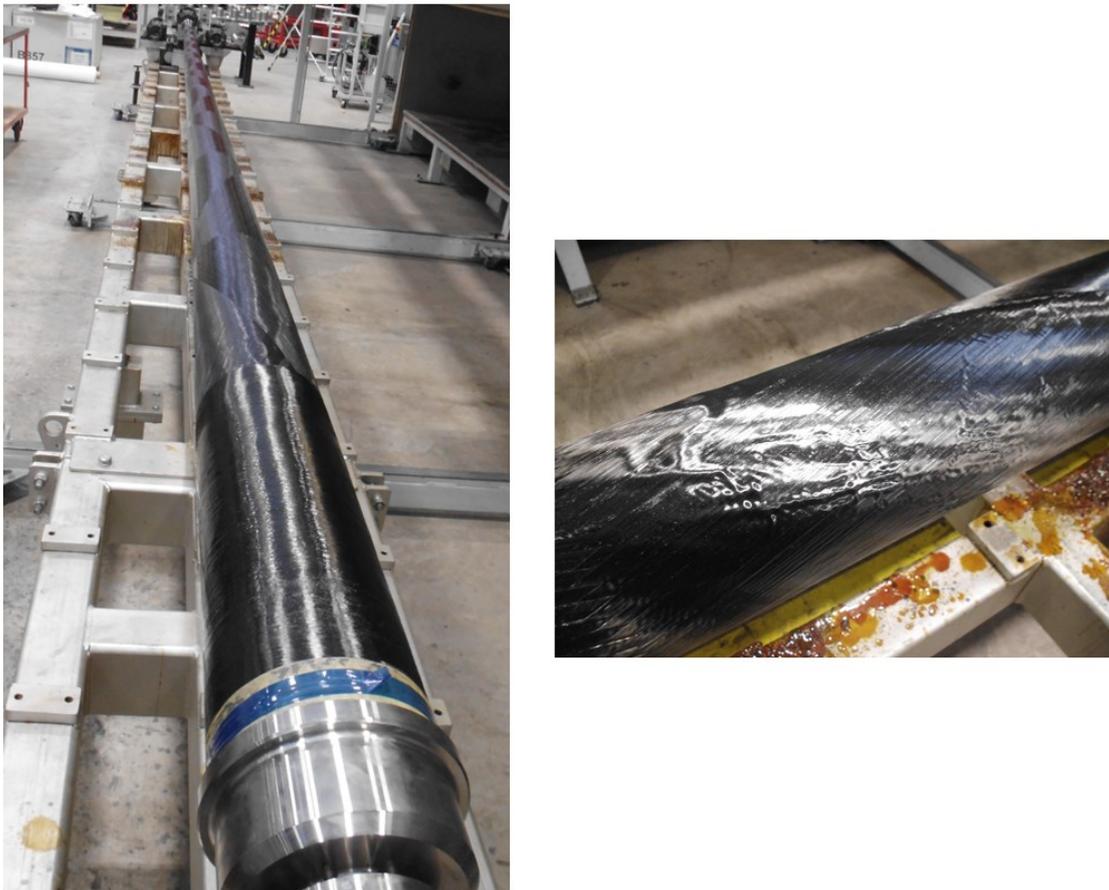


Abb. 55: Ausgehärteter Mast (links), Fasererhebungen am Masten (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Demontieren der Formelemente kann der Mast nun schlussendlich entformt werden. Das Entformen erfolgt hierbei mit einer hydraulischen Abziehvorrichtung. Da hierbei unter Umständen hohe Kräfte entstehen können ist dieser Prozess genauer zu betrachten.

7.3 Abziehen des Mastes

Um eine Beschädigung des Bauteils beim Abziehen vermeiden zu können ist es zweckmäßig diesen Prozess vorher näher zu betrachten. Bei diesem Vorgang wird die Vorrichtung gezogen und der Bauteil gegen eine Druckplatte gestützt. Dadurch löst sich der Mast von der Vorrichtung. Die Hauptbeanspruchungen liegen dabei in der Stirnfläche des Bauteiles bzw. in der Verbindung des Wickeldorns mit der Abziehvorrichtung. Diese ist durch einen Bolzen, der durch die Querbohrung am Ende des Dorns gesteckt wird, ausgeführt. Zum Abziehen sind hierbei mehrere Druckplatten mit verschiedenen Durchmessern vorhanden. Da der Mast in diesem Fall eine sehr kleine Stirnfläche hat wird eine passende Druckplatte angefertigt. Um hier Material zu sparen wird diese mit einem Außendurchmesser von 300 mm konstruiert. Die Druckplatte stützt sich dann letztendlich gegen eine weitere Druckplatte, welche mit dem Grundgerüst der Abziehvorrichtung verbunden ist. Dadurch wird die Auflagefläche maximiert und die Flächenpressung reduziert. Der Aufbau ohne Abziehvorrichtung ist in Abb. 56 dargestellt.

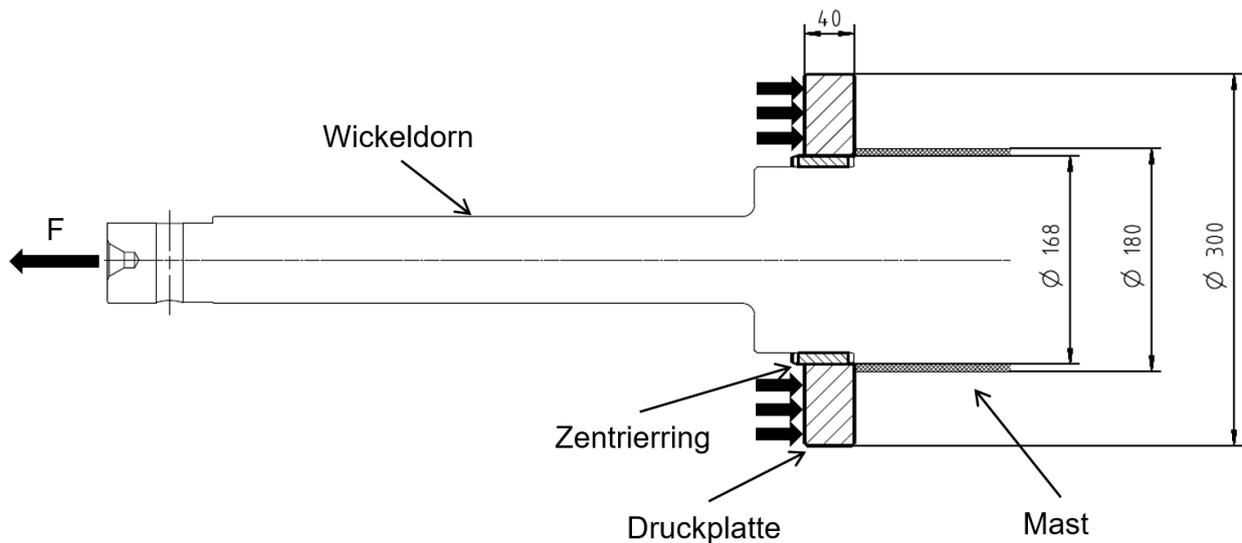


Abb. 56: Aufbau zum Abziehen des Mastes, Quelle: Eigene Darstellung.

Die maximale Kraft zum Abziehen mit der genannten hydraulischen Vorrichtung liegt bei 600 kN, kann jedoch durch Druckreduktion am Hydraulikkreislauf eingeschränkt werden. Sie sollte daher auf einen angemessenen Wert begrenzt werden, um die Vorrichtung und den Bauteil selbst nicht zu beschädigen. Ob diese Kraft überhaupt erforderlich ist, oder bereits ein geringerer Wert ausreicht, ist dabei offen. Aus Sicherheitsgründen sollte die Kraft auf die Bauteile ausgelegt werden. Betrachtet man den großen Konus des Mastes so ist die Notwendigkeit von hohen Kräften eher unwahrscheinlich.

In der nachfolgenden Abbildung sind die Belastungen (Mises-Vergleichsspannungen) des Wickeldorns und Mastes bei maximaler Abziehkraft und halbierten Kraft dargestellt. Die Ergebnisse bei 300 kN liegen dabei in einem sicheren Bereich. Somit wird die Vorrichtung auf diesen Wert zum Abziehen eingeschränkt.

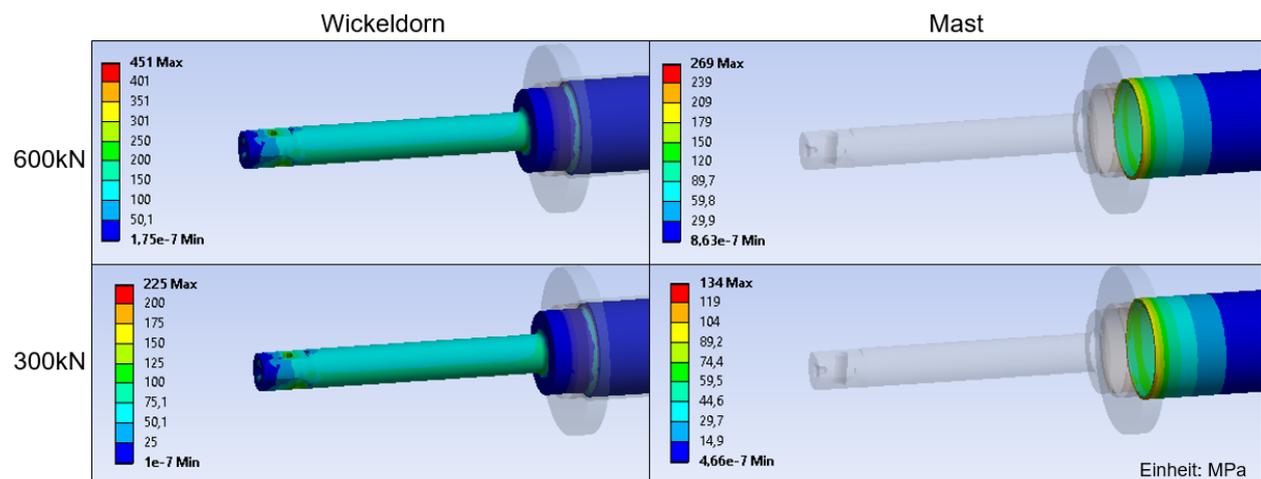


Abb. 57: Belastungen des Wickeldorns und Mastes beim Abziehen, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Abziehen des Mastes selbst verlief ohne weitere Probleme. Dabei konnte keine bleibende Verformung am fertigen Bauteil festgestellt werden. Der Mast kann nun für die Montage verwendet werden.

8 HERSTELLUNG DES LATERNENKOPFES

Anschließend werden die Schritte zur Herstellung des Laternenkopfes mit den entwickelten Vorrichtungen dargestellt. Dazu zählen die Herstellung der Legevorrichtungen, des Reflektors und der Konsolen sowie die endgültige Anfertigung des Laternenkopfes.

8.1 Herstellung der Legevorrichtungen

Die Machbarkeit der Vorrichtungen wurde bereits im Zuge der Entwicklung berücksichtigt. Im Folgenden werden die erzielten Ergebnisse dargelegt und auf den Prozess zur Erreichung dieser eingegangen. Nach der erfolgten Erstellung des 3D-CAD-Modells erfolgt hierbei die Programmierung (d.h. Erstellung des CNC-Codes) der Bauteile auf Grundlage der Geometrie. Das Programm ist schlussendlich Ausgangspunkt für die Fertigung der Bauteile.

Bei den vorliegenden Bauteilen ist vor allem die Oberflächenqualität der Negativfläche des Bauteiles wichtig. Der durch die Vorrichtung geformte Bauteil kann höchstens dieselbe Qualität zeigen. Nach dem Fertigen auf einer 3-Achs-Anlage ist diese Fläche eher rau und für das Formen der Verbundbauteile ungeeignet. Bedingt ist das durch die verwendeten Anlagen, welche in dieser Größe nicht wirklich zum Fräsen von Freiformbauteilen ausgelegt sind. Hierfür wären Mehrachsmaschinen mit entsprechend hohen Spindeldrehzahlen erforderlich. Nichtsdestotrotz kann die dargestellte Vorrichtung (siehe Abb. 58) in ausreichend hoher Qualität für einen nachträglichen Polierprozess angefertigt werden. Da für diese Anwendung die Form selbst nicht von hoher Genauigkeit sein muss, könnte auch eine schlechtere Fläche durch nachträgliches Schleifen und Polieren brauchbar gemacht werden. Letztendlich liefert die polierte Vorrichtung die Ausgangssituation für die Herstellung der Verbundbauteile.



Abb. 58: Legevorrichtung des Laternenkopfes nach dem Fräsen bzw. Polieren, Quelle: Eigene Darstellung.

Die angefertigten und polierten Einzelteile werden in einem letzten Schritt probeweise montiert um bereits im Vorhinein mögliche Probleme erkennen zu können. Beispielweise könnte hier ein Versatz in der Trennebene durch ungenaue Fertigung vorliegen. Dieser wäre auch im fertigen Bauteil sichtbar. Im vorliegenden Fall konnten die Teile aber ohne Probleme mithilfe der Zentrierungen gefügt werden. Die Vorrichtungen stellen nun die Grundlage zur Herstellung der Bauteile dar. In der nachfolgenden Abbildung sind die fertigen Legevorrichtungen des Laternenkopfes und Reflektors dargestellt.



Abb. 59: Positioniervorrichtung (links), montierte Vorrichtung des Laternenkopfes (Mitte) und Vorrichtung des Reflektors (rechts),
Quelle: Eigene Darstellung.

8.2 Anfertigung des Reflektors und der LED – Konsolen

Im nächsten Schritt sind die ersten Verbundbauteile anzufertigen. Dabei handelt es sich um den Reflektor und die Konsolen. Diese müssen vorab hergestellt werden, da sie im späteren Herstellprozess des Laternenkopfes mitintegriert werden.

Basis für die Anfertigung sind dabei die gewählten Materialien (Faser und Matrix), der definierte Lagenaufbau und die Legevorrichtung. Anhand der Vorrichtung bzw. des 3D-Modells können die Fasern aus entsprechenden Rollen zugeschnitten werden. Hierbei werden für alle Lagen notwendige Zuschnitte angefertigt. Man arbeitet hier entweder mit genau an die Form angepassten Zuschnitten, oder schneidet diese erst auf ihr endgültiges Maß beim Einlegen. Bei höheren Stückzahlen wird hier meist mit genauen Zuschnitten, welche zuvor einmalig ermittelt werden, gearbeitet. Dadurch kann die Prozesszeit dementsprechend verkürzt werden. Nachdem alle Zuschnitte vorliegen und die Matrix gemischt wurde kann der Handlaminierprozess beginnen. Hierbei werden die trockenen Fasern in die Vorrichtung gelegt und mittels Rollen mit Harz durchtränkt. Die Harzmenge ist hier meist vom Arbeiter selbst abhängig. Der Prozess sollte daher von erfahrenem bzw. geschultem Personal durchgeführt werden. Nachdem alle Lagen auf die Vorrichtung aufgebracht wurden kann der Bauteil durch einen Wärmeprozess ausgehärtet werden. Eine zusätzliche Abdeckung der Fasern oder ein Anlegen von Vakuum ist hierbei nicht notwendig. Dadurch könnten die Fasern zwar mehr verdichtet und der Faservolumengehalt erhöht werden, das ist für diese Bauteile aber nicht erforderlich. Das Aushärten der Bauteile geschieht wiederum durch eine Ofenfahrt. Nach dem Aushärten und Entformen der Bauteile werden nur noch überschüssige Harz- oder Faserreste abgeschnitten bzw. abgeschliffen. Der Bauteil ist nach diesem Arbeitsschritt fertig zur weiteren Verwendung.

In der nachfolgenden Abbildung ist die gefüllte Vorrichtung mit den durchtränkten Fasern und der fertige Reflektor nach dem Entformen und Nacharbeiten zu sehen. Die der Vorrichtung abgewandte Fläche des fertigen Teiles ist dabei rau. Nur die Formenfläche weist eine dementsprechende Oberflächenqualität auf.



Abb. 60: Laminiertes Reflektor (links) und ausgehärtetes Bauteil (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

Derselbe Ablauf wird zur Herstellung der Konsolen angewandt. Der einzige Unterschied liegt im Aufwand der Nacharbeit. Bei den Konsolen werden die Fasern über die Vorrichtung hinausgelegt und der Bauteil erst nach dem Aushärten auf Endmaß gebracht. Da die aus einfachen Kantblechen bestehende Form keinen Abschluss zum Anlegen der Fasern hat, ist dies hier die einfachere Lösung. Ansonsten wäre auch hier eine aufwendige Vorrichtung notwendig.

8.3 Laminieren des Laternenkopfes

Der Laternenkopf ist in diesem Projekt der komplexeste Bauteil. Der Ablauf zur Anfertigung ist hierbei ähnlich dem zuvor genannten Reflektor. Jedoch ist die Vorrichtung hier in zwei Hälften geteilt. Darum werden zuerst die zwei Hälften einzeln laminiert. Dabei werden wiederum zuvor angefertigte Zuschnitte eingelegt und mit der Matrix durchtränkt. An der Formtrennung wird der Zuschnitt über die Vorrichtung hinausgelegt (siehe Abb. 61). Erst danach wird dieser genau zugeschnitten. Dadurch ist die Verbindung der Fasern in der Trennstelle gewährleistet. Hier sind die Fasern größten Teils unterbrochen und werden nur durch die Matrix verbunden. Erst nach dem Zusammenschrauben der zwei Hälften kann eine die Trennstelle überdeckende Faserlage eingelegt werden.



Abb. 61: Lamierte Hälfte des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach dem Laminieren und Zusammenfügen der zwei Vorrichtungshälften werden die genannten Verbindungslagen und auch die restlichen Bauteile eingelegt. Der gesamte vorbereitete Aufbau ist in der nachfolgenden Abbildung zu sehen. Der Reflektor passt sich hierbei der Form des Laternenkopfes an und kann in diesen gesteckt werden. Um einen sicheren Abschluss gewährleisten zu können wird er zusätzlich mit zwei Federelementen nach oben gezogen. Die Konsolen werden mithilfe der Positionier Vorrichtung ausgerichtet und ebenfalls mit zusätzlichen Verbindungslagen am restlichen Lagenaufbau des Laternenkopfes befestigt. In diesem Schritt wird auch ein Kunststoffrohr zur Kabelführung im Laternenkopf befestigt. Das Rohr wird später durch den Mast geführt und bildet somit einen Kanal zur Kabelführung. Alle Bauteile werden dabei mittels Matrix oder auch zusätzlichen Fasern aneinandergelassen.



Abb. 62: Zusammengebaute Legevorrichtung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.

Somit ist auch diese Vorrichtung fertig für den Aushärtezyklus. Wie auch bei den restlichen Bauteilen wird auch hier von einer zusätzlichen Verdichtung der Fasern abgesehen. Der Teil kann direkt, nachdem alle Lagen und Anbauteile eingelegt wurden, in den Ofen zum Aushärten gebracht werden.

Nach dem erfolgten Aushärten kann die Positioniervorrichtung wieder entfernt werden. Anschließend lassen sich die Hälften der Legevorrichtung durch Lösen der Schrauben trennen. Durch die gewölbte Form und den immer größer werdenden Entformungswinkel ab der Trennebene lässt sich der Laternenkopf einfach aus der Vorrichtung lösen. Anschließend können die überschüssigen Harzränder entfernt und der Bauteil entgratet werden. In der nachfolgenden Abbildung ist der fertige Laternenkopf nach der händischen Fertigbearbeitung zu sehen.



Abb. 63: Ausgehärteter Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.

Das Ergebnis des ersten Bauteils ist hierbei sehr zufriedenstellend ausgefallen. Die Abmessungen der Schnittstelle liegen innerhalb der Toleranzen und das Gesamtbild bzw. die Verbindung der Einzelteile ist in Ordnung. Der Laternenkopf kann somit zur weiteren Verwendung freigegeben werden.

Somit sind alle Verbundbauteile der Straßenbeleuchtung vorhanden und können durch die bereits erwähnte Klebeverbindung zusammengefügt werden. Anschließend sind die Teile bereit zur Lackierung und Endmontage.

9 MONTAGE DER STRAßENBELEUCHTUNG

Nachdem alle Verbundbauteile fertiggestellt sind, kann die Straßenbeleuchtung zusammengebaut und montiert werden. Die dazu notwendigen Schritte lassen sich in das Verkleben von Mast und Laternenkopf, das Lackieren und das endgültige Aufstellen der Straßenbeleuchtung aufteilen. Im letzten Kapitel wird nun anschließend auf die dazu notwendigen Prozesse eingegangen. Mit Inbetriebnahme der Straßenbeleuchtung findet das Projekt letztendlich sein Ende.

9.1 Verklebung des Mastes mit dem Laternenkopf

Bei der Verbindung der Faserverbundbauteile ist insbesondere auf die richtige Vorbehandlung zu achten. Ohne diese kann es rasch zu einem Versagen der Verklebung kommen. Dabei ist es oft schwierig im Nachhinein eine genaue Fehlerursache zu bestimmen.

In der Literatur wird dabei die Wichtigkeit der Vorbehandlung der Klebeflächen in den Vordergrund gerückt. Sie ist mit ausschlaggebend für die Festigkeit der Verbindung und sollte keinesfalls vernachlässigt werden. Gängige Maßnahmen zur Vorbehandlung sind hierbei Schleifen, Strahlen, Bürsten oder Entfetten. Des Weiteren wird die Qualität der Verbindung durch das Arbeiten in trockener, staubfreier Umgebung begünstigt. Das Auftragen des Klebers kann hierbei durch Spritzen, Sprühen, Streichen oder Spachteln erfolgen. Ein wichtiger Punkt ist auch die Fixierung der Bauteile während des Aushärtens der Klebeschicht.⁶⁴

Die Oberflächenvorbehandlung bei der vorliegenden Anwendung auf jeden Fall erforderlich, da dadurch erst haftungshemmende Grenzschichten entfernt werden. Diese können durch Trennmittel, welche zum einfachen Lösen der Bauteile aus den Vorrichtungen eingesetzt werden, entstehen. Eine mechanische Oberflächenbehandlung, bestehend aus Reinigen, Aufrauen und chemischen Methoden wird daher notwendig.⁶⁵

Im vorliegenden Fall wird die Oberfläche durch Schleifen aufgeraut. Hierbei wird die bereits dargelegte Geometrie am Mast (siehe Abb. 24) ebenfalls angebracht. Dadurch lassen sich die Teile problemlos fügen. Die Klebefläche des Laternenkopfes wird dabei ebenso mittels Schleifpapier aufgeraut und mögliche Rückstände des Trennmittels werden somit entfernt. Nachdem die Teile vorbereitet und in Position gebracht wurden, folgt der eigentliche Klebeprozess. Dazu werden die Außenflächen abgedeckt um diese vor einer Verschmutzung durch Kleber zu schützen. Anschließend lässt sich der Kleber in ausreichender Menge am Laternenkopf auftragen. Beim folgenden Fügen der Teile wird dabei der überschüssige Kleber wieder entfernt. Nachdem die Teile vollständig verbunden wurden werden diese fixiert. Die durchgeführten Schritte sind hierbei in der nachfolgenden Abbildung ersichtlich. Auf eine chemische Vorbehandlung der Klebefläche wurde dabei verzichtet. Ebenso ist das Arbeiten in einer staubfreien Umgebung bei der Größe dieser Bauteile nicht einfach möglich. Der Klebevorgang wurde in der Fertigungshalle durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen reichen für diese Anwendung aber aus.

⁶⁴ Vgl. Westkämpfer/Warnecke (2010), S. 168 f.

⁶⁵ Vgl. Habenicht (2006), S. 652 ff.



Abb. 64: Verklebung des Mastes mit dem Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Teile müssen nach dem Fügen solange in Position gehalten und fixiert werden, bis der Kleber seine Endfestigkeit erreicht. Die Aushärtedauer kann bei dem verwendeten Reaktionsklebstoff durch Wärmeeinbringung verkürzt werden. Dadurch können die Fixierdauer und damit auch der Gesamtprozess reduziert werden. Um dies zu erreichen wird ein Heizdraht im Bereich der Klebeverbindung angebracht und die Schnittstelle dadurch erwärmt (siehe Abb. 65). Die Temperatur sollte dabei nicht zu hoch sein, um die Verbundbauteile vor Schäden zu schützen. Eine Aufwärmung auf ca. 60°C wird dabei als ausreichend angesehen.



Abb. 65: Aushärten des Klebers mittels Heizdraht, Quelle: Eigene Darstellung.

9.2 Lackieren der Straßenbeleuchtung

Die Lackierung der Straßenbeleuchtung dient einerseits zum Schutz der Bauteile vor Witterung und UV-Einstrahlung, andererseits kann dadurch die Optik nach eigenen Vorstellungen beeinflusst werden. Bei der Lackierung von Faserverbundbauteilen sind jedoch einige Punkte zu beachten um ein vernünftiges Ergebnis erzielen zu können. Diverse Lackhersteller geben hierbei Infos zur notwendigen Oberflächenbehandlung solcher Bauteile.

Die Suter Kunststoffe AG bietet hier beispielweise eigens für CFK-Oberflächen ausgelegte Lacksysteme und Vorgehensweisen um eine qualitativ hochwertige Oberfläche zu erreichen. Ein wichtiger Punkt ist dabei die Vorbehandlung. Die zu lackierenden Oberflächen sollten dabei staub- und fettfrei sein. Trennmittel, die nach dem Entformen noch am Bauteil haften, müssen entfernt werden. Anschließend wird die Oberfläche mit Trockenschleifpapier aufgeraut und mittels Druckluft gereinigt. Beim Anschleifen

ist darauf zu achten, dass die Fasern nicht mitangeschliffen werden. Dies würde zu optischen Fehlstellen führen. Je nach den Anforderungen kann nun ein Füller aufgetragen, oder große Fehlstellen gespachtelt und erneut geschliffen werden. Nach erfolgter Vorbehandlung steht dem Lackieren nichts mehr im Wege. Bei diesem Prozess ist den Anweisungen des Lackherstellers zu folgen.⁶⁶

Wie viel Aufwand zur Vorbehandlung notwendig ist hängt von der Art, Menge und Methode des Auftrages des Trennmittels ab. Die Reinigung sollte sich nur auf den wirklich notwendigen Umfang beschränken. Neben dem bereits genannten Reinigen und Anschleifen der Oberfläche werden vom Fraunhofer IFAM noch andere wirkungsvolle Methoden beschrieben. Die schlussendliche Auswahl ist dabei von der spezifischen Anwendung abhängig. So kann durch CO₂-Schneestrahlen eine material- und umweltschonende Variante genannt werden. Des Weiteren werden hier noch Methoden wie Vakuum-Ultra-Violett-Strahlung oder das Vakuum-Saugstrahlen beschrieben. Eine Kombination aus mehreren Methoden ist hier meist die optimale Lösung.⁶⁷

In Bezug auf die Straßenbeleuchtung muss hier leider von den genannten Technologien Abstand genommen werden. Da diese momentan nicht eingesetzt werden, wären für eine Erprobung erst dementsprechende Investitionen notwendig. So bleibt für die Vorbehandlung der Bauteile nur mehr der Reinigungs- und Schleifvorgang. Da der Aufwand für die großen Bauteile sehr hoch ist wird jedoch in einem ersten Schritt versucht ohne diesen auszukommen. Stattdessen wird der Einsatz eines Haftgrundes getestet. Zur Überprüfung der erreichten Haftqualität des Lackes wird hierbei eine Gitterschnittprüfung nach DIN EN ISO 2409 durchgeführt. Dabei werden die Ergebnisse von lackierten Probekörpern ohne Haftgrund und Vorbehandlung, mit Haftgrund und mit zusätzlicher Vorbehandlung verglichen.

Wie nachfolgend ersichtlich sind die Ergebnisse ohne dementsprechende Vorbehandlung ernüchternd. Auch durch den Einsatz eines Haftgrundes kann die Qualität nicht wirklich verbessert werden. Das Fehlerbild der Prüfung ist hierbei nahezu ident bei der Variante mit, bzw. ohne Haftgrund. Erst durch das Reinigen und Anschleifen der Bauteile erhält man ein positives Ergebnis. Hier können nach der Prüfung keine Fehler erkannt werden.

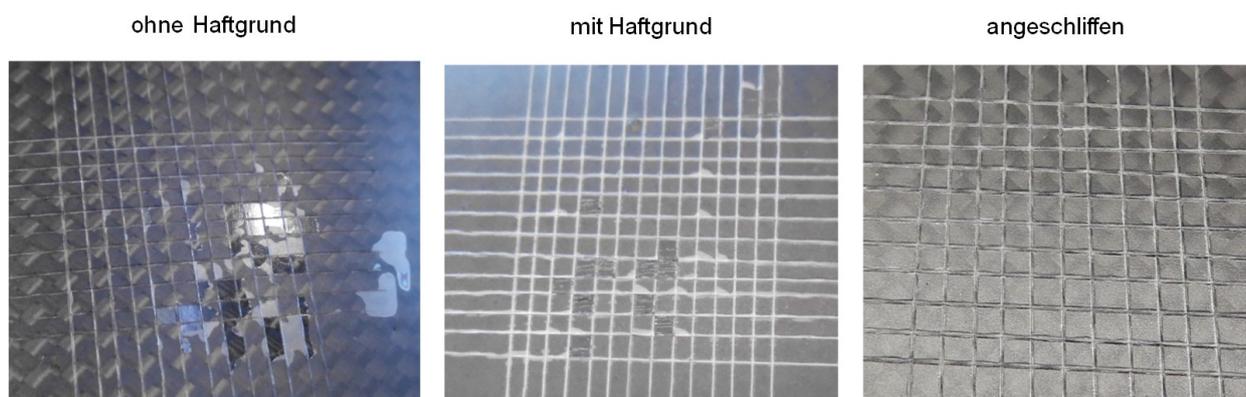


Abb. 66: Gitterschnittprüfung der lackierten Probekörper, Quelle: Eigene Darstellung.

⁶⁶ Vgl. Suter Kunststoffe AG (2016), Online-Quelle [24.10.2016]

⁶⁷ Vgl. Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (2012), Online-Quelle [24.10.2016]

Nach Festlegung des Vorbehandlungsprozesses bleibt die Frage nach der Lackierung offen. Hierbei stehen die Varianten einer Klarlackierung bis hin zur vollständigen Mattlackierung zur Auswahl. Um sich ein Bild des Resultats zu machen werden hierzu drei Probekörper lackiert. Die drei Ausführungen mit Klarlackierung, Halbmattlackierung und Mattlackierung sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die Faserorientierung bei der matten Ausführung nahezu verschwindet. Um hier die gewollte Optik der Faserstruktur nicht zu verlieren, wird deshalb eine Klarlackierung für die Straßenbeleuchtung eingesetzt.



Abb. 67: Lackierte Probekörper (klar, halbmatt und matt), Quelle: Eigene Darstellung.

Nachdem das Vorgehen zur Lackierung der Faserverbundbauteile geklärt wurde, sind nun alle Prozessschritte zur Herstellung festgelegt. Die entformten Bauteile können nun nach entsprechender Nachbearbeitung, Verklebung und Lackierung für die Montage der Straßenbeleuchtung verwendet werden.

Die elektrische Ausführung sowie etwaige Beleuchtungsfragen sind hier nicht Teil dieser Arbeit. Diese Themen wurden an darauf spezialisierte Unternehmen vergeben. Bei der Gestaltung der Faserverbundbauteile wurde jedoch auf die notwendigen Aspekte, wie Kabelführung etc., Rücksicht genommen. So ist die Ausrichtung der Konsolen an die Anforderungen angepasst worden. Ebenso wurden Maßnahmen zur Kabelführung vorgesehen. Auf die bauliche Ausführung des Fundaments zur Befestigung der Straßenbeleuchtung wird ebenso nicht näher eingegangen.

9.3 Endmontage der Straßenbeleuchtung

In diesem Kapitel wird auf die Fertigstellung der Straßenbeleuchtung eingegangen. Dies dient zur Darstellung des abgeschlossenen Projektes, bzw. wird im Zuge der Montage auf den aufgeworfenen Punkt der Temperatureintragung durch die Leuchtkörper eingegangen.

Nach der Montage und Verkabelung der Beleuchtungsmodule mit dem zugehörigen Steuergerät kann ein erster Test durchgeführt werden. Eine Temperaturmessung ergibt hierbei nach mehrstündigem Betrieb einen Maximalwert von 41.1°C am Gehäuse der beigeestellten LED-Leuchtkörper. Anzumerken sei dabei, dass der Test ohne Sonneneinstrahlung durchgeführt wurde. Der Wert liegt in einem annehmbaren Bereich, zudem das Gehäuse nicht direkt an den Verbundbauteilen anliegt. Aus diesem Grund und da die Konsolen ohnehin nicht direkt der Sonneneinstrahlung unterliegen, wird an der Ausführung nichts mehr verändert.



Abb. 68: Temperatur der Leuchtkörper im Dauerbetrieb, Quelle: Eigene Darstellung.

Nach erfolgter Befestigung der Leuchtkörper ist die Straßenbeleuchtung fertig für die endgültige Montage und Inbetriebnahme. In der nachfolgenden Abbildung sind hier die ersten Bauteile am Standort der Geislinger GmbH in Hallwang bei Salzburg zu sehen. Die Straßenbeleuchtung wurde in einem Winkel von 10° direkt in ihr Fundament eingesetzt. Mit der erfolgreichen Inbetriebnahme findet das Projekt so einen äußerst positiven Abschluss.



Abb. 69: Endmontierte Straßenbeleuchtung am Firmenstandort Salzburg, Quelle: Geislinger GmbH (2016), Online-Quelle [24.10.2016].

10 RESÜMEE UND AUSBLICK

Die in dieser Arbeit behandelten Themen und Entscheidungen dienen zu Herstellung der Faserverbundbauteile unter Rücksichtnahme der Anforderungen laut Aufgabenstellung. Die Wahl der richtigen Materialien und Fertigungsverfahren wurde dabei an die vorhandenen Ressourcen und Technologien angepasst. Alternative Techniken wurden jedoch nicht außer Acht gelassen.

Die Entwicklung der Vorrichtungen stellte hier eine große Herausforderung dar. Vor allem da mit dem Bruch des Wickeldorns das Projekt auf der Kippe stand. Die Erarbeitung von Lösungsmöglichkeiten und die Umsetzung derer hat hier besonders viel Zeit in Anspruch genommen. Dadurch wurde auch der gewünschte Fertigstellungstermin der ersten Bauteile verschoben. Im Nachhinein wäre hier eine Fehlerursachenanalyse anzuraten um mögliche Fehler bereits im Vorhinein ausschließen zu können. Ebenso könnten dadurch Maßnahmen getroffen werden um die Wahrscheinlichkeit des Auftretens zu senken. Dadurch könnten Kosten aber auch Zeit gespart werden. Für ähnliche Projekte, bei denen es an Erfahrung mangelt, ist diese Herangehensweise zu empfehlen.

Nach Überwindung aller Probleme kann jedoch ein sehr positives Resümee getroffen werden. Eine erfreuliche Erkenntnis ist hierbei die hohe Motivation die bei der Umsetzung des Projektes bei allen beteiligten herrschte. Mittlerweile sind alle geplanten Straßenbeleuchtungen an den Firmenstandorten in Salzburg und Bad. St. Leonhard in Betrieb.

Ein Ausblick ist durch den angedachten Vertrieb an Interessenten gegeben. Hierbei kann durch die geteilte Ausführung von Mast und Laternenkopf vor allem auch auf Kundenwünsche eingegangen werden. Neue Gestaltungsvarianten sind dadurch einfach möglich. Im Hinblick auf eine mögliche Serienfertigung sind die erarbeiteten Ergebnisse jedoch zu überdenken. Hier ist mit Sicherheit noch einiges an Optimierungspotenzial bezüglich Materialien und Fertigungsprozessen vorhanden. Ebenso sind noch weitere Schritte, welche für einen Verkauf notwendig sind, abzuklären und durchzuführen.

Zu empfehlen wären auch weitere Tests bzw. Untersuchungen an den zurzeit ausgeführten Verbundbauteilen. Offene Fragen könnten hierbei wie folgt formulierte werden: Wie reagiert die Straßenbeleuchtung auf einen Crash durch ein Fahrzeug? Welche Schäden werden infolge eines Blitzeinschlages davongetragen? Wie ist das Schwingverhalten der Straßenbeleuchtung (Wind)?

Abschließen lässt sich zusammenfassen, dass durch diese Arbeit viele neue Erkenntnisse und Erfahrungen im Bereich der Faserverbundtechnik gewonnen wurden. Diese können und werden bei weiteren Projekten zum Einsatz kommen.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (9)

AVK, Industrievereinigung (Hrsg.) (2014): *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*, 4. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.) (2007): *Beschichtungsstoffe-Gitterschnittprüfung (ISO 2409:2007)*

Habenicht, Gerd (2006): *Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen*, 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York

Klocke, Fritz; König, Wilfried (2008): *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*, 8. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York

Michaeli, Walter (2010): *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*, 6. Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Neugebauer, Reimund (Hrsg.) (2012): *Werkzeugmaschinen: Aufbau, Funktion und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen*, 1. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg

Petersen, Christian (2013): *Stahlbau: Grundlagen der Berechnung und bauliche Ausbildung von Stahlbauten*, 4. Auflage, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden

Schürmann, Helmut (2007): *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg

Westkämpfer, Engelbert; Warnecke, Hans-Jürgen (2010): *Einführung in die Fertigungstechnik*, 8. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden

Online-Quellen (5)

Ensinger GmbH (2016): *Technische Kunststoffe - Das Handbuch*

http://www.ensinger-online.com/fileadmin/_migrated/content_uploads/Ensinger-Handbuch_05.pdf [Stand: 06.07.2016]

Suter Kunststoffe AG (2016): *Carbon-Hochglanz-Oberflächen mit dem Basco-Lackiersystem*

<http://www.swiss-composite.ch/pdf/A-Basco-CFK-lackierung.pdf> [Stand: 24.10.2016]

Geislinger GmbH (2016): *Architecture as a reflection of Geislinger's corporate culture*

<http://www.geislinger.com/en/blog/post/architecture-as-a-reflection-of-geislinger-s-corporate-culture> [Stand: 24.10.2016]

Suter Kunststoffe AG (2016): *Konische Fiberglass-Maste für Strassenbeleuchtungen*

<http://www.swiss-composite.ch/pdf/t-Konische-GFK-Masten.pdf> [Stand: 01.08.2016]

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (2012): *Reinigen und Aktivieren vor Lackieren und Kleben*

http://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/Klebtechnik_Oberflaechen/PLATO/reinigung_und_aktivierung_fvk_fraunhofer_ifam.pdf [Stand: 24.10.2016]

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Flächenmodel der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.....	2
Abb. 2: Bürogebäude BSL (links), Bürogebäude SBG (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	3
Abb. 3: Vergleich der Energiebilanz zwischen Stahl und GFK, Quelle: Schürmann (2007), S. 5.	5
Abb. 4: Einfluss der Faserherstellung auf Kerben (links vor, rechts nach dem Ziehen), Quelle: Schürmann (2007), S. 24.....	6
Abb. 5: Bindungsarten von Geweben, Quelle: Schürmann (2007), S. 60 (leicht modifiziert).	10
Abb. 6: Gelege aus Schichten gezielter Orientierung, Quelle: Schürmann (2007), S. 63.	11
Abb. 7: Anlagenschema zur Herstellung von Prepregs, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 234.....	12
Abb. 8: Abstandsgewebe, Quelle: Schürmann (2007), S. 69 (leicht modifiziert)	13
Abb. 9: Gestickerstellung, Quelle: Eigene Darstellung.	13
Abb. 10: Schematische Darstellung der Kettenstruktur von Polymeren, Quelle: Schürmann (2007), S. 85 (leicht modifiziert).	17
Abb. 11: Ablaufdiagramm zur Dimensionierung von Verbundbauteilen, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 296.....	19
Abb. 12: Koordinatensysteme eines Verbundbauteiles, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 300.....	20
Abb. 13: Schritte der klassischen Laminatschichttheorie, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 306.	22
Abb. 14: Aufbau des Pultrusionsverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 157 (leicht modifiziert).	24
Abb. 15: Drehbankwickelanlage mit Kern, Quelle: Michaeli (2010), S. 156.....	24
Abb. 16: Prinzip des Schleuderverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 176 (leicht modifiziert).	25
Abb. 17: Prinzip des Handlaminierverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 154.	27
Abb. 18: Prinzip des Verlegens von Prepreg, Quelle: Eigene Darstellung.	27
Abb. 19: Legevorrichtung zum Verlegen von Prepreg, Quelle: Eigene Darstellung.	28
Abb. 20: Ablauf des Harzinjektionsverfahrens, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 391.....	29
Abb. 21: Schematischer Infusionsaufbau und Fließfrontverlauf des Harzinfusionsverfahrens, Quelle: Michaeli (2010), S. 160.....	30
Abb. 22: Außenkontur des Hohlmastens, Quelle: Eigene Darstellung.	34
Abb. 23: Laternenkopf der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.	35
Abb. 24: Schnittstelle zwischen Mast und Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abb. 25: Abhängigkeit der Festigkeit einer Rohrklebung von der Klebeschichtdicke, Quelle: Habenicht (2006), S. 507.....	40

Abb. 26: Spannungsverteilung in der Klebefuge zwischen Laternenkopf und Mast, Quelle: Eigene Darstellung.	41
Abb. 27: Vereinfachtes Modell der Straßenbeleuchtung mit Randbedingungen, Quelle: Eigene Darstellung.	42
Abb. 28: Drehbankwickelanlage der Fa. Geislinger, Quelle: Eigene Darstellung.	43
Abb. 29: Einteiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.	44
Abb. 30: Formelemente zur Gestaltung des Abschlusses, Quelle: Eigene Darstellung.	45
Abb. 31: Geschlossene und offene Lünette, Quelle: Neugebauer (Hrsg.) (2012), S. 95.	46
Abb. 32: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast, Quelle: Eigene Darstellung.	47
Abb. 33: 10-teiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.	48
Abb. 34: Schraubverbindung des geteilten Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.	49
Abb. 35: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns ohne axiale Vorspannkraft, Quelle: Eigene Darstellung.	50
Abb. 36: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns mit axialer Vorspannkraft, Quelle: Eigene Darstellung.	51
Abb. 37: Schweißverbindung des geteilten Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.	52
Abb. 38: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des zehnteiligen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	53
Abb. 39: 3-teiliger Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.	54
Abb. 40: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des dreiteiligen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	56
Abb. 41: Hohler Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung.	57
Abb. 42: Durchbiegung (oben) und Mises-Vergleichsspannung (unten) unter Eigenlast des hohlen Dorns mit Schweißverbindung, Quelle: Eigene Darstellung.	59
Abb. 43: CAD-Modell Reflektor (links), Stahlvorrichtung (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	61
Abb. 44: Position der Konsolen in der Straßenbeleuchtung, Quelle: Eigene Darstellung.	63
Abb. 45: Vorrichtungen zur Konsolenherstellung, Quelle: Eigene Darstellung.	64
Abb. 46: Analyse der Formenteilung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abb. 47: Legevorrichtung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	65
Abb. 48: Positioniervorrichtung der Konsolen, Quelle: Eigene Darstellung.	66
Abb. 49: Montage des zehnteiligen Wickeldorns, Quelle: Eigene Darstellung.	67
Abb. 50. Wickeldornbruch zwischen Teil 5 und 6, Quelle: Eigene Darstellung.	68

Abb. 51: Wickelpins auf dem Wickeldorn, Quelle: Eigene Darstellung	68
Abb. 52: Wickeln des Mastes, Quelle: Eigene Darstellung.....	69
Abb. 53: Wendebereich mit Wickelpins, Quelle: Eigene Darstellung.....	69
Abb. 54: Aufwickeln des Abreißgewebes (oben), montiertes Formelement (unten), Quelle: Eigene Darstellung.	70
Abb. 55: Ausgehärteter Mast (links), Fasererhebungen am Masten (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	71
Abb. 56: Aufbau zum Abziehen des Mastes, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 57: Belastungen des Wickeldorns und Mastes beim Abziehen, Quelle: Eigene Darstellung.	72
Abb. 58: Legevorrichtung des Laternenkopfes nach dem Fräsen bzw. Polieren, Quelle: Eigene Darstellung.	73
Abb. 59: Positioniervorrichtung (links), montierte Vorrichtung des Laternenkopfes (Mitte) und Vorrichtung des Reflektors (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.	74
Abb. 60: Laminiertes Reflektor (links) und ausgehärtetes Bauteil (rechts), Quelle: Eigene Darstellung. ..	75
Abb. 61: Laminierte Hälfte des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Abb. 62: Zusammengebaute Legevorrichtung des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	76
Abb. 63: Ausgehärteter Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.	77
Abb. 64: Verklebung des Mastes mit dem Laternenkopf, Quelle: Eigene Darstellung.	79
Abb. 65: Aushärten des Klebers mittels Heizdraht, Quelle: Eigene Darstellung.....	79
Abb. 66: Gitterschnittprüfung der lackierten Probekörper, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abb. 67: Lackierte Probekörper (klar, halbmatt und matt), Quelle: Eigene Darstellung.	81
Abb. 68: Temperatur der Leuchtkörper im Dauerbetrieb, Quelle: Eigene Darstellung.	82
Abb. 69: Endmontierte Straßenbeleuchtung am Firmenstandort Salzburg, Quelle: Geislinger GmbH (2016), Online-Quelle [24.10.2016].	82

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Daten verschiedener Glasfasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 30.....	7
Tab. 2: Daten verschiedener Kohlenstofffasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 41.	8
Tab. 3: Daten verschiedener Aramidfasertypen, Quelle: Schürmann (2007), S. 45.....	9
Tab. 4: Harzsysteme und Einsatzbereiche, Quelle: Eigene Darstellung.	18
Tab. 5: Kennwerte einer unidirektionalen Einzelschicht, Quelle: AVK (Hrsg.) (2014), S. 303.	21
Tab. 6: Vergleich der Verfahren zur Herstellung von Rohren, Quelle: Eigene Darstellung.	31
Tab. 7: Vergleich der Verfahren zur Herstellung von Freiformbauteilen, Quelle: Eigene Darstellung.	32
Tab. 8: Lagenaufbau der Wanddicke des Hohlmastes, Quelle: Eigene Darstellung.	36
Tab. 9: Lagenaufbau der Wanddicke des Laternenkopfes, Quelle: Eigene Darstellung.	37
Tab. 10: Lagenaufbau Reflektor und Konsolen, Quelle: Eigene Darstellung.....	38

ANHANG 1: DATENBLATT KLEBER ARALDITE® 2014-1



Advanced Materials

Araldite® 2014-1

Structural Adhesives

Araldite® 2014-1

Pastöser Zweikomponentenklebstoff auf Epoxidharzbasis

Spezifische Eigenschaften

- Graue Paste
- Hohe Wärmefestigkeit und Beständigkeit gegen Chemikalien
- Geringe Schrumpfung
- Hervorragende Beständigkeit gegen Wasser und unterschiedlichste Chemikalien
- Fugenfüllend, bei Auftragsdichten bis 5 mm nicht ablaufend

Produktbeschreibung

Araldite® 2014-1 ist ein bei Raumtemperatur aushärtender, pastöser Zweikomponentenklebstoff. Die thixotrope Paste ist durch gute Kontakthaftung und Zähigkeit gekennzeichnet und besitzt ausgezeichnete Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse und Chemikalien.

Der Klebstoff findet Anwendung beim Verbinden von Metall, elektronischen Bauteilen, GVK-Komponenten und einer Vielzahl weiterer Bauteile in jenen Anwendungsbereichen, in denen während der Nutzung höhere Temperaturwerte als normal oder stärker beanspruchende Umweltbedingungen vorliegen. Durch seine geringe Ausgasung ist dieses Produkt für Anwendungen in den Bereichen professionelle elektronische Kommunikation und Raumfahrt geeignet.

Produktdaten

Eigenschaften	2014-1/A	2014-1/B	2014-1 (gemischt)
Farbe (visuell)	beige Paste	graue Paste	graue Paste
Dichte	ca. 1.6	ca. 1.6	ca. 1.6
Viskosität bei 25°C (Pas)	ca. 100	thixotrop	thixotrop
Gebrauchsdauer (100 g bei 25°C)	-	-	60 Minuten
Lagerfähigkeit (2-40°C)	3 Jahre	3 Jahre	-

Verarbeitung

Vorbehandlung

Die Voraussetzung zum Erreichen fester und dauerhafter Verklebungen ist eine zweckmässige Vorbehandlung der Klebfläche.

Die Klebflächen werden am besten mit einem guten Fettlösungsmittel wie z.B. Aceton, Alkohol oder einem firmenspezifischen Fettlösungsmittel gründlich von Öl, Fett und Schmutz gereinigt.

Beste Festigkeiten werden erreicht, wenn die entfetteten Klebflächen mechanisch aufgeraut oder chemisch vorbehandelt werden. Nach dem mechanischen Aufräumen ist ein nochmaliges Entfetten unerlässlich.

Mischungsverhältnis	Gewichtsteile	Volumenteile
Araldite® 2014-1/A	100	100
Araldite® 2014-1/B	50	50

Araldite® 2014-1 ist in Kartuschen, komplett mit Mischer erhältlich und kann als gebrauchsfertiger Klebstoff mit dem von Huntsman Advanced Materials empfohlenen Werkzeug verarbeitet werden.

Auftragen des Klebstoffs

Die Harz-/Härtermischung wird manuell oder maschinell auf die vorbehandelten und trockenen Klebflächen aufgetragen. Das Technical Support Team von Huntsman kann dem Anwender bei der Auswahl einer geeigneten Auftragsart helfen sowie eine Vielzahl namhafter Unternehmen empfehlen, die Hilfsmittel für den Klebstoffauftrag herstellen und warten.

Klebfugen von 0,05 bis 0,10 mm Dicke ergeben grundsätzlich die besten Zugscherfestigkeiten. Huntsman betont, dass eine ordnungsgemässe Klebfuge essenziell für eine dauerhafte Klebverbindung ist. Die Klebkomponenten sollten in einer festen Position angeordnet und gesichert werden, sobald der Klebstoff aufgetragen worden ist. Weitere Informationen bezüglich der Oberflächenvorbereitung und -vorbehandlung, des Ausführens von Verklebungen und des Arbeitens mit Doppelkartuschen finden Sie auf die Internetseite www.araldite2000plus.com.

Reinigung der Werkzeuge

Alle Werkzeuge werden am besten mit heissem Wasser und Seife gereinigt, bevor Klebstoffrückstände anhärtet können. Das Entfernen bereits gehärteter Rückstände ist mühsam und zeitraubend.

Bei Verwendung eines Lösungsmittels wie beispielsweise Aceton sind die üblichen Vorsichtsmassnahmen zu beachten. Ausserdem ist der Kontakt mit Haut und Augen zu vermeiden.

Härtungsbedingungen

Temperatur	°C	10	15	23	40	60	100
Härtungsdauer	Stunden	14	8	3	-	-	-
ZSF > 1MPa	Minuten	-	-	-	60	15	3
Härtungsdauer	Stunden	20	11	5	-	-	-
ZSF > 10MPa	Minuten	-	-	-	80	20	4

ZSF = Zugscherfestigkeit

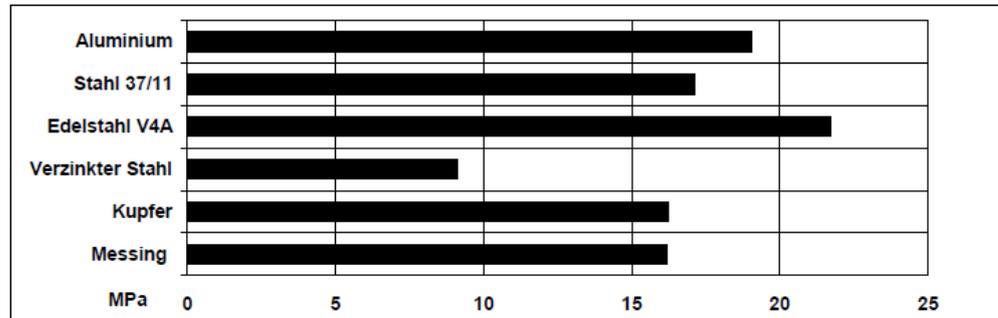
**Typische
Härtungs-
eigenschaften**

Falls nicht anders angegeben, wurden zur Ermittlung der unten angegebenen Werte Standardprüfkörper aus Aluminiumlegierung mit den Massen 114 x 25 x 1,6 mm. Die Überlappungsfläche betrug jeweils 12,5 x 25 mm. Die Werte wurden nach Standardprüfverfahren an typischen Produktionschargen bestimmt. Sie dienen ausschliesslich der technischen Information und stellen keine Produktspezifikation dar.

Typische Mittelwerte der Zugscherfestigkeit verschiedener Metallverklebungen (ISO 4587)

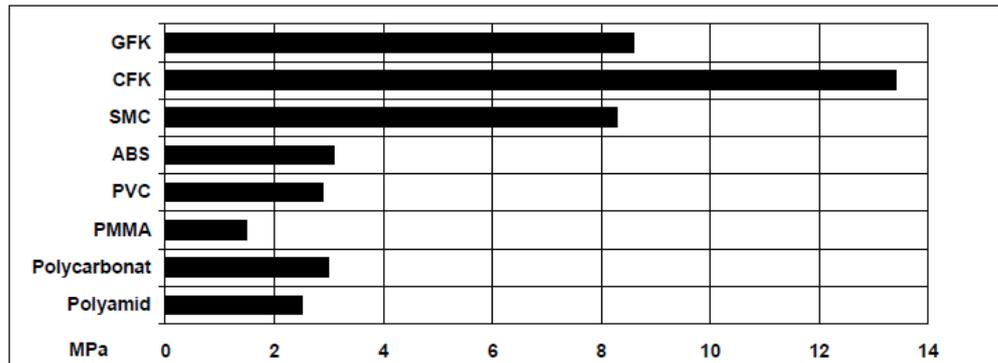
Härtung: 16 Stunden bei 40°C; Prüftemperatur: 23°C

Vorbehandlung - Sandstrahlen



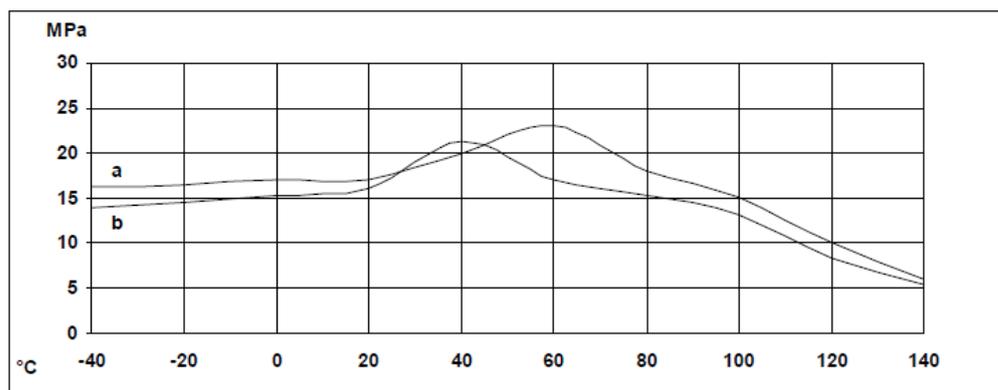
Typische Mittelwerte der Zugscherfestigkeit verschiedener Kunststoffverklebungen (ISO 4587)

Härtung: 16 Stunden bei 40°C; Prüftemperatur: 23°C. Vorbehandlung: Leichtes Aufrauen und Entfetten mit Alkohol.



Zugscherfestigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur (ISO 4587) (typische Mittelwerte)

Härtung: (a) = 7 Tage/23°C; (b) = 24 Stunden/23°C + 30 Minuten/80°C



Rollenschälversuch (ISO 4587)

Härtung 16 Stunden/40°C

3,0 N/mm

Glasübergangstemperatur (DSC)

Härtung: 24 Stunden bei 23°C plus 1 Stunde bei 80°C:

ca. 85°C

Schubmodul (DIN 53445)

Härtung: 16 Stunden/40°C

50°C - 1,2 GPa

75°C - 400 MPa

100°C - 180 MPa

125°C - 20 MPa

E-Modul (ISO R527) bei 23°C

4 GPa

Biegefestigkeit (ISO 178) Härtung 16 Stunden/40°C Härtung 1 Tag/23°C +30 Minuten/80°C; Prüftemperatur: 23°C

Biegefestigkeit

61 MPa

E-Modul

4355 MPa

Zugfestigkeit (ISO R527) bei 23°C

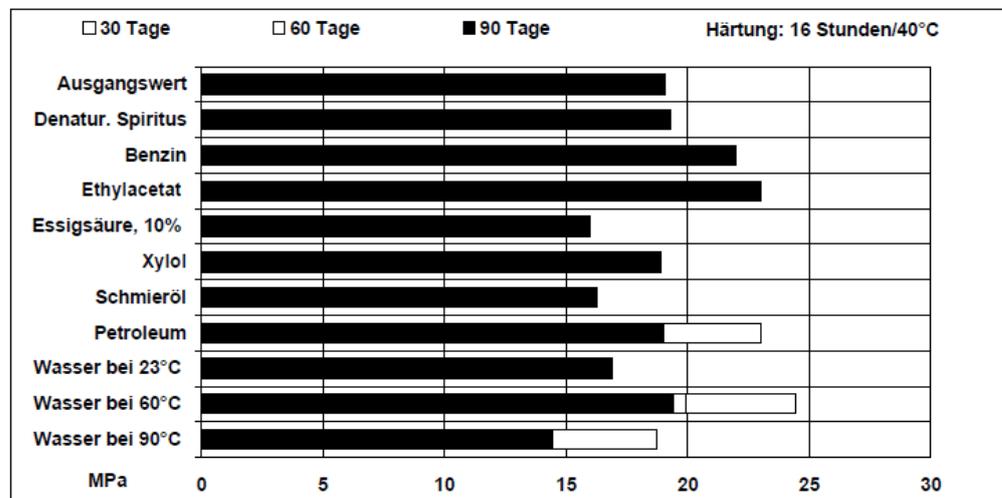
26 MPa

Bruchdehnung

0,7%

Zugscherfestigkeit nach Lagerung in verschiedenen Agenzien (typische Mittelwerte)

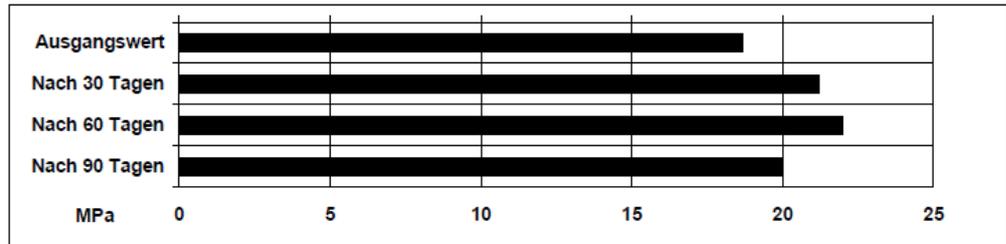
Sofern nicht anders angegeben wurde die ZSF nach einer Lagerung für die Dauer von 90 Tagen bei 23°C ermittelt.



Zugscherfestigkeit nach Lagerung im Tropenklima

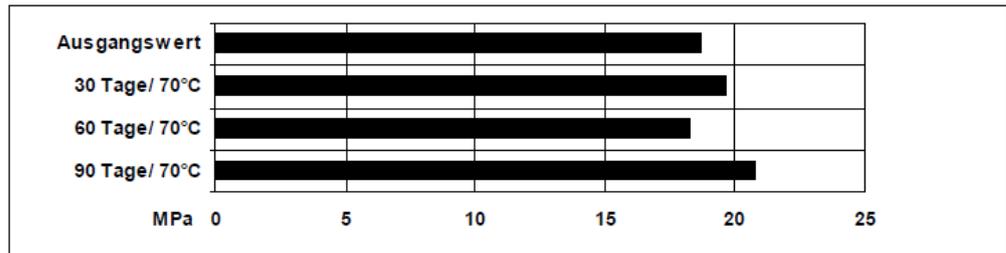
(40/92, DIN 50015; typische Mittelwerte)

Härtung: 16 Stunden/40°C Prüfung: bei 23°C



Zugscherfestigkeit nach Wärmealterung

Härtung: 16 Stunden/40°C



	Wert	nach
Durchschlagfestigkeit (Volt/mil)	440	ASTM D-149
Spez. Oberflächenwiderstand (Ohm)	7.0 E+15	IEC 60093
Spez. Durchgangswiderstand (Ohm-cm)	6.1 E+15	IEC 60093
Dielektrische Konstante bei 60Hz	4.0	IEC 60250
Dielektrizitätsverlust, % bei 60Hz	1.0	IEC 60250

Lagerung Araldite® 2014-1A und Araldite® 2014-1/B können für eine Dauer von bis zu 3 Jahren bei Raumtemperatur gelagert werden, unter der Bedingung, dass die Komponenten in ihren Originalgebinden verbleiben. Das Verfalldatum ist auf den Produktetiketten angegeben.

**Vorsichts-
massnahmen**

Achtung!

Huntsman Advanced Materials Produkte können ohne Gefahr verarbeitet werden, vorausgesetzt dass die im Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmassnahmen eingehalten werden. Ungehärtete Materialien sind von Lebensmitteln fernzuhalten. Um allergische Reaktionen zu vermeiden, wird dringend empfohlen, undurchlässige Gummi- oder Plastikhandschuhe sowie eine Schutzbrille zu tragen. Nach jedem Arbeitstag müssen die Hände mit warmem Wasser und Seife gründlich gewaschen werden. Die Verwendung von Lösungsmitteln ist zu vermeiden. Anschliessend wird die Haut mit Einwegpapiertüchern – keine Textilien – getrocknet. Der Arbeitsraum sollte gut durchlüftet sein; evtl. Absaugvorrichtung über dem Arbeitsplatz. Eine Beschreibung sämtlicher Vorsichtsmassnahmen ist in den Sicherheitsdatenblättern der Einzelprodukte enthalten. Gerne schicken wir Ihnen diese auf Anforderung zu.

**Huntsman Advanced Materials
(Switzerland) GmbH**
Klybeckstrasse 200
CH - 4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 966 33 33

www.huntsman.com/advanced_materials

Huntsman Advanced Materials gewährleistet ausschließlich, dass seine Produkte den mit dem Benutzer vereinbarten Spezifikationen entsprechen. Angegebene typische Eigenschaften sind repräsentativ für die laufende Produktion und dürfen nicht als Spezifikationen verstanden werden.

Die Herstellung von Materialien unterliegt erteilten oder beantragten Patenten und diese Publikation ist nicht als Erlaubnis zur Benutzung patentierter Verfahren zu verstehen.

Während die in dieser Publikation aufgeführten Informationen und Empfehlungen nach dem besten Wissen und Gewissen von Huntsman Advanced Materials zum Zeitpunkt der Veröffentlichung zutreffen, IST NICHTS IN DIESER PUBLIKATION ALS AUSDRÜCKLICHE ODER STILLSCHWEIGENDE GEWÄHRLEISTUNG, EINSCHLIESSLICH ABER NICHT AUSSCHLIESSLICH, DER MARKTSÄNGIGKEIT ODER EIGNUNG FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ZU VERSTEHEN. DER BENUTZER MUSS SICH STETS SELBST VON DER ANWENDBARKEIT SOLCHER INFORMATIONEN UND EMPFEHLUNGEN UND DER EIGNUNG VON PRODUKTEN FÜR EINEN BESTIMMTEN ZWECK ÜBERZEUGEN.

Das Verhalten der in dieser Publikation aufgeführten Produkte in Produktionsverfahren und ihre Eignung für einen bestimmten Endzweck sind von diversen Bedingungen abhängig, so etwa von der chemischen Verträglichkeit, Temperatur und anderen Huntsman Advanced Materials nicht bekannten Variablen. Der Benutzer ist verantwortlich für die Auswertung der Produktionsverhältnisse und des Endproduktes unter realen Endverbrauchsbedingungen und für die angemessene Beratung und Warnung der Käufer und Benutzer.

Die Produkte sind unter Umständen toxisch und erfordern besondere Vorsicht beim Umgang. Der Benutzer ist gehalten, Sicherheitsdatenblätter von Huntsman Advanced Materials mit genauen Angaben über die Toxizität und die richtigen Handhabungs- und Lagerverfahren anzufordern und sich an alle geltenden Sicherheits- und Umweltnormen zu halten.

Gefährlichkeit, Toxizität und Verhalten der Produkte können sich bei Verwendung mit anderen Materialien ändern und sind abhängig von den Produktionsverhältnissen oder anderen Verfahren. Gefährlichkeit, Toxizität und Verhalten sind vom Benutzer zu bestimmen und sind dem Umschlag- und Verarbeitungspersonal sowie den Endbenutzern mitzuteilen.

Wenn nicht ausdrücklich etwas anderes vereinbart wird, untersteht der Verkauf der in dieser Publikation aufgeführten Produkte den allgemeinen Geschäftsbedingungen von Huntsman Advanced Materials LLC oder denen ihrer Konzerngesellschaften, einschließlich ohne Einschränkung Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., und Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials ist eine internationale Unternehmenseinheit der Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials ist über Huntsman Konzerngesellschaften in verschiedenen Ländern tätig, einschließlich, aber nicht beschränkt auf Huntsman Advanced Materials LLC in den USA und Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europa.

Araldite ist ein eingetragenes Markenzeichen der Huntsman Corporation oder einer ihrer Konzerngesellschaften.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation oder Konzerngesellschaft. Alle Rechte vorbehalten.

ANHANG 2: DATENBLATT HARZSYSTEM EP 127

General Datasheet



EP 127

HIGH TG STRUCTURAL EPOXY PREPREG

- ▮ Toughened and self-extinguishing resin system
- ▮ Self-adhesive to core materials
- ▮ Excellent Mechanical Properties
- ▮ High temperature stability
- ▮ Long shelf and shop life

INTRODUCTION

EP 127 is a self-adhesive epoxy system, designed for high temperature stability up to 185°C (365°F) with a Tg of 200°C (392°F).

EP 127 prepreg material is very suitable for the manufacturing of light-weight composite components with high specific mechanical properties and has a controlled resin flow during curing and high interlaminar shear strength.

EP 127 is a sub-180°C (356°F) curing system, which can be cured at a temperature range between 130°C (266°F) and 180°C (356°F) depending on the required performance. The curing can be performed by press, vacuum and autoclave moulding with a pressure of at least 0.7 bar / 10 psi.

For increased thermal and chemical stability, the components can be subjected to a stepped free-standing post-cure up to 220°C (428°F) to achieve a glass transition temperature of 230°C (446°F).

Composite structures can be exposed to temperatures in the range of -55°C (-67°F) up to 185°C (365°F). EP 127 prepreg is suitable for following applications:

- ▮ Aerospace
- ▮ Industrial
- ▮ Automotive

PRODUCT INFORMATION

EP 127 epoxy prepreg is available in a range of product formats. Please consult your local sales contact for further information. Full contact details can be found at www.gurit.com.

PROPERTY	EP 127-CR508_190-35	EP 127-C20-45P	TEST STANDARD
Resin	Epoxy Cyanate Ester blend	Epoxy Cyanate Ester blend	-
Prepreg Weight	295 ± 20 g/m ²	365 ± 15 g/m ²	EN 2329
Volatile	< 1.0 %	< 1.5 %	EN 2330 (180°C / 10 min)
Resin Flow	> 8 % (4 plies, 140°C, 10min, 4 bar)	> 10 % (4 plies, 140°C, 10min, 4 bar)	EN 2332
Tackiness	Adjustable	Adjustable	-
Fibre Material	Toray T700SC 12K, DU	3k HTA	-
Fabric Weight	190 g/m ² ± 5%	204 g/m ² ± 5%	EN 2331
Weave Style	Unidirectional	Plain Weave	-
Service Temperature (Cured State)	-56°C to +200°C (-67°F to 392°F)	-56°C to +185°C (-67°F to 365°F)	-
Resin Content	35 ± 3%	45 ± 3%	EN 2331
Typical Roll Length	50 m / 55 yd	50 m / 55 yd	-
Typical Roll Width	1.0 m / 39 in	1.27 m / 50 in	-

PREPREG PROPERTIES

TRANSPORT & STORAGE

When stored sealed & out of direct sunlight.

All prepreg materials should be stored in a freezer when not in use to maximise their useable life, since the low temperature reduces the reaction of resin and catalyst to virtually zero. However, even at -18°C (0°F), the temperature of most freezers, some reaction will still occur. In most cases after some years, the material will become unworkable.

STORAGE TEMP	UNIT	VALUE
-18°C	0°F	months
+21°C	+70°F	days

HEALTH AND SAFETY

Please refer to product MSDS for up to date information specific to this product.

QUALIFICATIONS / FIRE PERFORMANCE

PRODUCT	QUALIFICATIONS	FIRE PERFORMANCE
EP 127-C20-46P	-	→ FAR 25.853 Flame Test (self-extinguishing)

CURING CONDITIONS

PROPERTY	180°C CURE	STANDARD CURE			TEST STANDARD
Cure Process	Press / Autoclave / Vacuum-Bag				-
Cure Pressure	0.7 – 7.0 bar / 10 - 101 psi				-
Heat-up Ramp Rate	Max 4°C / 7.2°F per min below 80°C / 140°F Max 3°C / 5.4°F per min above 80°C / 140°F				-
Dwell Temperature 1	90°C / 194°F	145°C / 293°F	160°C / 320°F	180°C / 356°F	-
Dwell Time 1	30 min	90 min	60 min	45 min	-
Dwell Temperature 2	115°C / 239°F	-	-	-	-
Dwell Time 2	60 min	-	-	-	-
Post-Cure Temperature	180°C / 356°F	200°C / 392°F	220°C / 428°F		-
Post-Cure Time	120 min	120 min	120 min		-
Cool-down Ramp Rate	4°C per min / 7.2°F per min				-
Remove material at	< 60°C / 140°F				-

LAMINATE PROPERTIES

All data presented in this datasheet is based on the mechanical testing of a single batch of material.

MECHANICAL PROPERTIES AT ROOM TEMPERATURE (21°C / 70°F)

PROPERTY	SYMBOL	EP 127-CR508 / 190-35		EP 127-C20-45P		TEST STANDARD
0° Flexural Strength	X _F	2200 MPa	319 ksi	910 MPa	132 ksi	ISO 178
0° Flexural Modulus	E _{F11}	120 GPa	17.4 msi	49 GPa	7.11 msi	ISO 178
0° Tensile Strength	X _T	1850*** MPa	239*** ksi	780 MPa	110 ksi	ISO 527-4
0° Tensile Modulus	E _{T11}	140*** GPa	20.3*** msi	59 GPa	8.56 msi	ISO 527-4
0° Compressive Strength	X _C	-	-	800 MPa	116 ksi	EN 2850
0° Compressive Modulus	E _{C11}	-	-	48 GPa	6.96 msi	EN 2850
±45° In-Plane Shear Strength	τ ₁₂			104 MPa	15 ksi	EN 14129
±45° In-Plane Shear Modulus	G ₁₂			4.0 GPa	0.58 msi	EN14129
0° Interlaminar Shear Strength	X _{LSS}	105 MPa	15 ksi	74 MPa	11 ksi	DMS 2144
Climbing Drum Peel*	σ _{PEEL}	-	-	> 130 N/75mm		EN 2243-3
Bending Load	F _{BENDING}	-	-	-		AITM 1.0018
Compression After Impact	CAI – 0 J	-	-	222 MPa	32 ksi	AITM 1-0010
Compression After Impact	CAI – 10 J	-	-	201 MPa	29 ksi	AITM 1-0010
Compression After Impact	CAI – 30 J	-	-	167 MPa	24 ksi	AITM 1-0010
Compression After Impact	CAI – 50 J	-	-	145 MPa	21 ksi	AITM 1-0010
Glass Transition Temp.	T _{g1}	> 145°C	> 293°F	200°C	392°C	ISO 6721 (DMA)
Glass Transition Temp. (200°C / 120min Post-Cure)	T _{g1}	210°C	410°F	-	-	ISO 6721 (DMA)
Glass Transition Temp. (220°C / 120min Post-Cure)	T _{g1}	230°C	446°F	-	-	ISO 6721 (DMA)
HW** Glass Transition Temperature	T _{gHW}	-	-	160*	320°F	ISO 6721 (DMA)

*sandwich structure: 2 plies per side; core 3.2-48kg/m³ 9.4mm (honeycomb)

**HW – Hot-Wet, soaked in distilled water 98°C (208°F) for 24 hours.

***Normalized to 60% volume of fibre fraction

MECHANICAL PROPERTIES AT ELEVATED TEMPERATURE

PROPERTY	SYMBOL	EP 127-CR508/190-35		EP 127-C20-45P						TEST STANDARD
Test Temperature	T	70°C	158°F	90°C	194°F	120°C	248°F	120°C HW*	248°F HW*	
0° Flexural Strength	X _F	-	-	850 MPa	123 ksi	840 MPa	122 ksi	710 MPa	103 ksi	ISO 178
0° Flexural Modulus	E _{F11}	-	-	48 GPa	6.96 msi	47 GPa	6.82 msi	47 GPa	6.82 msi	ISO 178
0° Tensile Strength	X _T	-	-	750 MPa	109 ksi	710 MPa	103 ksi	660 MPa	96 ksi	ISO 527-4
0° Tensile Modulus	E _{T11}	-	-	58 GPa	8.41 msi	58 GPa	8.41 msi	-	-	ISO 527-4
0° Compressive Strength	X _C	-	-	740 MPa	107 ksi	710 MPa	103 ksi	600 MPa	87 ksi	EN 2850
0° Compressive Modulus	E _{C11}	-	-	43 GPa	6.24 msi	41 GPa	5.95 msi	40 GPa	5.80 msi	EN 2850
±45° In-Plane Shear Strength	τ ₁₂	-	-	-	-	85 MPa	12 ksi	69 MPa	10 ksi	EN 14129
±45° In-Plane Shear Modulus	G ₁₂	-	-	-	-	3.9 GPa	0.57 msi	2.7 GPa	0.39 msi	EN14129
0° Interlaminar Shear Strength	X _{LSS}	80 MPa	11.6 ksi	65 MPa	9.43 ksi	64 MPa	9.28 ksi	42 MPa	6.09 ksi	DMS 2144

BURN BEHAVIOUR

PROPERTY	EP 127-CR508_190-35	EP 127-C20-45P	TEST STANDARD
Flammability vertical, 60s flaming – Burn length	-	110 mm	AITM 2.0002A
Flammability vertical, 60s flaming – After flame time	-	2 s	AITM 2.0002A
Flammability vertical, 60s flaming – After flame time of drips	-	0 s	AITM 2.0002A



NOTICE

All advice, instruction or recommendation is given in good faith but the Company only warrants that advice in writing is given with reasonable skill and care. No further duty or responsibility is accepted by the Company. All advice is given subject to the terms and conditions of sale (the Conditions) which are available on request from the Company or may be viewed at the Company's Website: www.gurit.com/terms-and-conditions.aspx.

The Company strongly recommends that Customers make test panels and conduct appropriate testing of any goods or materials supplied by the Company to ensure that they are suitable for the Customer's planned application. Such testing should include testing under conditions as close as possible to those to which the final component may be subjected. The Company specifically excludes any warranty of fitness for purpose of the goods other than as set out in writing by the Company. The Company reserves the right to change specifications and prices without notice and Customers should satisfy themselves that information relied on by the Customer is that which is currently published by the Company on its website. Any queries may be addressed to the Technical Services Department.

Gurit are continuously reviewing and updating literature. Please ensure that you have the current version, by contacting Gurit Marketing Communications or your sales contact and quoting the revision number in the bottom right-hand corner of this page.

E contact@gurit.com

W www.gurit.com

ANHANG 3: DATENBLATT HARZSYSTEM ARALDITE® LY 5085 / HARDENER HY 5046-U

Ciba Specialty Chemicals
Performance
Polymers
 Structural Composites



MATRIX SYSTEMS FOR RECREATIONAL COMPOSITES

DATA SHEET

Araldite® LY 5085 Hardener HY 5046-U																																					
<p>Araldite LY 5085 is a low-viscosity epoxy resin Hardener HY 5046-U is a hardener mixture of polyamines</p>																																					
Applications	Recreational composites Structural composites																																				
Properties	<p>Easy-to-handle laminating system for the production of advanced composites using the wet lay-up process.</p> <p>The system exhibits an excellent impregnation behaviour due to its low viscosity. As a consequence of its high reactivity short cycle times can be realized even though the pot life is long. The system has superior adhesion properties.</p>																																				
Processing	Wet lay-up Pressure Moulding																																				
Key data	<p>Araldite LY 5085</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>liquid</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Colour (Gardner, ISO 4630)</td> <td>≤ 3</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)</td> <td>7000 - 9000</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>1.16</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>> 200</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> </tbody> </table> <p>Hardener HY 5046-U</p> <table border="1"> <tbody> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td>liquid</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Colour (Gardner, ISO 4630)</td> <td>≤ 8</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)</td> <td>10 - 20</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>0.90</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>105</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> </tbody> </table>	Aspect (visual)	liquid		Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3		Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)	7000 - 9000	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.16	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]	Aspect (visual)	liquid		Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 8		Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)	10 - 20	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.90	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	105	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
Aspect (visual)	liquid																																				
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 3																																				
Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)	7000 - 9000	[mPa s]																																			
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.16	[g/cm ³]																																			
Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]																																			
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																			
Aspect (visual)	liquid																																				
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 8																																				
Viscosity at 25 °C (ISO 9371B)	10 - 20	[mPa s]																																			
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.90	[g/cm ³]																																			
Flash point (ISO 2719)	105	[°C]																																			
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																			
Storage	<p>Provided that the products described above are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels.</p> <p>Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p> <p>Araldite LY 5085 which has crystallized and looks cloudy can be restored to its original state by heating to 60 - 80 °C.</p>																																				

Processing data

Mix ratio	<i>Components</i>	<i>Parts by weight</i>	<i>Parts by volume</i>
	Araldite LY 5085	100	100
	Hardener HY 5046-U	14 - 15	18 - 19
<p>We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process.</p> <p>When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.</p>			
Initial mix viscosity (Hoeppler, ISO 9371B)		<i>[°C]</i>	<i>[mPa s]</i>
		at 25	1200 - 1500
		at 40	500 - 550
Viscosity build-up (Hoeppler, ISO 9371B)		<i>[°C]</i>	<i>[min]</i>
		at 25	to 3000
Pot life (Tecam, 100 ml, 65 % RH)		<i>[°C]</i>	<i>[min]</i>
		at 23	150 - 180
Gel time (Hot plate)		<i>[°C]</i>	<i>[min]</i>
		at 80	9 - 13
		at 90	5 - 7
		at 100	4 - 5
		at 110	3 - 4
		at 120	3
<p>The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.</p>			
Typical cure cycles			60 min 80 °C or 10 min 110 °C or 8 min 120 °C
<p>The optimum cure cycle has to be determined case by case depending on the processing and the economic requirements.</p>			

Properties of the cured, neat formulation

Glass transition temperature (IEC 1006, DSC, 10 K/min)	<i>Cure:</i>		<i>T_g[°C]</i>
	150 min 60 °C		88
	60 min 80 °C		95
	25 min 90 °C		87
	60 min 90 °C		87
	20 min 100 °C		68
	30 min 100 °C		71
	15 min 110 °C		64
	15 min 120 °C		65
	15 min 140 °C		63
Flexural test (ISO 178)		<i>Cure:</i>	<i>10 min 80 °C + 20 min 100 °C</i>
			<i>1 h 110 °C</i>
	Flexural strength	[MPa]	100 - 120
	Elongation at flexural strength	[%]	5 - 6
	Ultimate strength	[MPa]	80 - 100
	Ultimate elongation	[%]	9 - 12
	Flexural modulus	[MPa]	2950 - 3150
Tensile test (ISO 527)		<i>Cure:</i>	<i>10 min 80 °C + 20 min 100 °C</i>
	Tensile strength	[MPa]	60 - 68
	Elongation at tensile strength	[%]	4.0 - 4.5
	Ultimate strength	[MPa]	56 - 63
	Ultimate elongation	[%]	6.0 - 7.4
	Tensile modulus	[MPa]	3100 - 3300
Water absorption (ISO 62)	<i>Immersion:</i>	<i>Cure:</i>	<i>10 min 80 °C + 20 min 100 °C</i>
	1 day H ₂ O 23 °C	[%]	0.25
	4 days H ₂ O 23 °C	[%]	0.58
	10 days H ₂ O 100 °C	[%]	1.01
Lab shear strength test on different materials (ISO 4587)		<i>Cure:</i>	<i>10 min 80 °C + 20 min 100 °C</i>
	Alu/Alu	[MPa]	13.1 - 14.4
	Alu/ABS	[MPa]	12.5 - 15.7
	Alu/Zicral	[MPa]	9.9 - 12.2
	Steel/Steel	[MPa]	16.6 - 17.16

Properties of the cured, reinforced formulation

Interlaminar shear strength (ASTM D 2344)	Short beam: Laminate comprising 12 layers unidirectional E-glass fabric (425 g/m ²) Laminate thickness t = 3.0 - 3.3 mm Fibre volume content: 58 - 60 % Cure: 20 min 60 °C + 20 min 100 °C		
	Unconditioned	[MPa]	50 - 53
	After 10 days in H ₂ O 23 °C	[MPa]	41 - 47
Water absorption (ISO 62)	Laminate comprising 12 layers unidirectional E-glass fabric (425 g/m ²) Laminate thickness t = 3.0 - 3.3 mm Fibre volume content: 58 - 60 % Cure: 20 min 60 °C + 20 min 100 °C		
	1 day H ₂ O 23 °C	[%]	0.07
	4 days H ₂ O 23 °C	[%]	0.14
	10 days H ₂ O 23 °C	[%]	0.26

Handling precautions Mandatory and recommended industrial hygiene procedures should be followed whenever our products are being handled and processed. For additional information please consult the corresponding product safety data sheets and the brochure "Hygienic precautions for handling plastics products" (Publ. No. 24264/e).

Personal hygiene

Safety precautions at workplace

protective clothing	overalls
gloves	essential
arm protectors	recommended when skin contact likely
goggles/safety glasses	yes

Skin protection

before starting work	Apply barrier cream to exposed skin
after washing	Apply barrier or nourishing cream

Cleansing of contaminated skin

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels. Do not use solvents

Disposal of spillage

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin

Ventilation

of workshop	Renew air 3 to 5 times an hour
of workplaces	Exhaust fans. Operatives should avoid inhaling vapours

First aid

Contamination of the *eyes* by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted.

Material smeared or splashed on the *skin* should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately.

Anyone taken ill after *inhaling* vapours should be moved out of doors immediately. In all cases of doubt call for medical assistance.

Ciba Specialty Chemicals
Performance
Polymers
®Registered trademark



All recommendations for use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.

Publ. No. 98009/e

Printed in Switzerland

ANHANG 4: DATENBLATT HARZSYSTEM ARALDITE® LY556 / ARADUR® 917 / ACCELERATOR DY 070



Advanced Materials

Araldite® LY 556* / Aradur® 917* / Accelerator DY 070*

HOT CURING EPOXY MATRIX SYSTEM

Araldite® LY 556 is an epoxy resin
 Aradur® 917 is an anhydride hardener
 Accelerator DY 070 is an imidazole accelerator

APPLICATIONS	High performance composite parts		
PROPERTIES	Anhydride-cured, low-viscosity standard matrix system with extremely long pot life. The reactivity of the system is adjustable by variation of the accelerator content. The system is easy to process, has good fibre impregnation properties and exhibits excellent mechanical, dynamic and thermal properties. It has an excellent chemical resistance especially to acids at temperatures up to 80 °C. This epoxy system fulfills MIL specifications R 9300.		
PROCESSING	Filament Winding Pultrusion Pressure Moulding		
KEY DATA	Araldite® LY 556		
	Aspect (visual)	clear, pale yellow liquid	
	Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2	
	Epoxy content (ISO 3000)	5.30 - 5.45	[eq/kg]
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	10000 - 12000	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.20	[g/cm ³]
	Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]
	Aradur® 917		
	Aspect (visual)	clear liquid	
	Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	50 - 100	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.20 - 1.25	[g/cm ³]
	Flash point (ISO 2719)	195	[°C]
	Accelerator DY 070		
	Aspect (visual)	clear liquid	
	Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 9	
	Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	≤ 50	[mPa s]
	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.95 - 1.05	[g/cm ³]
	Flash point (ISO 2719)	92	[°C]
	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40 °C	[°C]

* In addition to the brand name product denomination may show different appendices, which allows us to differentiate between our production sites: e.g., BD = Germany, US = United States, IN = India, CI = China, etc.. These appendices are in use on packaging, transport and invoicing documents. Generally the same specifications apply for all versions. Please address any additional need for clarification to the appropriate Huntsman contact

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

STORAGE	Provided that Araldite® LY 556, Aradur® 917 and Accelerator DY 070 are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels. Partly emptied containers should be closed immediately after use. Because Aradur® 917 is sensitive to moisture, storage containers should be ventilated with dry air only. Araldite® LY 556 which has crystallized and looks cloudy can be restored to its original state by heating to 60 - 80 °C.
----------------	--

PROCESSING DATA

MIX RATIO	<i>Components</i>	<i>Parts by weight</i>	<i>Parts by volume</i>
	Araldite® LY 556	100	100
	Aradur® 917	90	86
	Accelerator DY 070	0.5 - 2	0.6 - 2.4

We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process. When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.

PROCESSING RECOMMENDATIONS	To simplify the mixing process the resin can be preheated to about 30 °C to 50 °C before adding the cold hardener. Hardener and accelerator can be premixed, thus allowing the use of two component mixing/metering equipment. The mix of hardener and accelerator has a shelf life of several days.
-----------------------------------	--

The processing of the system at elevated temperatures of 30 °C to 40 °C shows the best results. The gelation temperature should not be higher than absolutely necessary. A high gelation temperature induces high shrinkage and generates internal stresses.

INITIAL MIX VISCOSITY (HOEPLER, ISO 12058-1B)	<i>[°C]</i>	<i>[mPa s]</i>
	at 25	600 - 900
	at 40	200 - 300
	at 60	< 75

VISCOSITY BUILD-UP (HOEPLER, ISO 12058-1B)	<i>Components [pbw]</i>	<i>System 1</i>	<i>System 2</i>	<i>System 3</i>
	Araldite® LY 556	100	100	100
	Aradur® 917	90	90	90
	Accelerator DY 070	0.5	1	2

	<i>[°C]</i>	<i>[mPa s]</i>				
at 25		to 1500	[h]	10 - 12	3.5 - 4.5	1.5 - 2
		to 3000	[h]	33 - 37	16 - 18	6 - 7
at 40		to 1500	[h]	19 - 21	7 - 8	3 - 4
		to 3000	[h]	23 - 26	9 - 10	4 - 5
at 80		to 1500	[min]	95 - 105	52 - 57	32 - 35
		to 3000	[min]	105 - 115	60 - 65	35 - 38
at 90		to 1500	[min]			14 - 16
		to 3000	[min]			15 - 17

POT LIFE (TECAM, 65 % RH, 100 G) 10 KG METAL CONTAINER	<i>[°C]</i>		<i>System 1</i>	<i>System 2</i>	<i>System 3</i>
	at 23	[h]	165 - 175	95 - 105	48 - 54
	at 40	[h]	5 - 7	4 - 5	-

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

GEL TIME (HOT PLATE)	[°C]		System 1	System 2	System 3
	at 80	[min]	230 - 270	140 - 160	65 - 75
	at 100	[min]	65 - 75	35 - 45	18 - 22
	at 120	[min]	21 - 25	10 - 12	5 - 7
	at 140	[min]	7 - 9	3 - 5	1 - 3
	at 160	[min]	2 - 4	1 - 2	-

The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.

TYPICAL CURE CYCLES		
Gelation either		2 - 4 h at 80 °C
or		1 - 3 h at 90 °C
Post-cure either		4 - 8 h at 120 °C
or		2 - 8 h at 140 °C
or		2 - 8 h at 160 °C

Cure temperatures in excess of about 130 °C cause brown discolouration but do not impair the properties of the product.

PROPERTIES OF THE CURED, NEAT FORMULATION

Unless otherwise stated, the processing schedule for the samples tested was gelation for 4 hours at 80 °C and post-cured for 8 hours at 140 °C.

GLASS TRANSITION TEMPERATURE (T _G) (IEC 1006, 10 K/MIN)	Cure:		T _G DSC [°C]	T _G TMA [°C]
		4 h 80 °C + 4 h 120 °C		140 - 144
	4 h 80 °C + 8 h 120 °C		144 - 148	125 - 128
	4 h 80 °C + 4 h 140 °C		145 - 150	130 - 135
	4 h 80 °C + 8 h 140 °C		148 - 153	135 - 145
	4 h 80 °C + 4 h 160 °C		150 - 155	140 - 145
	4 h 80 °C + 8 h 160 °C		150 - 155	140 - 145
TENSILE TEST (ISO 527)	Tensile strength	[MPa]		83 - 93
	Elongation at tensile strength	[%]		4.2 - 5.6
	Ultimate strength	[MPa]		80 - 90
	Ultimate elongation	[%]		5.0 - 7.0
	Tensile modulus	[MPa]		3100 - 3300
FLEXURAL TEST (ISO 178)	Flexural strength	[MPa]		125 - 135
	Deflection at maximum load	[mm]		10 - 18
	10 days in H ₂ O 23 °C	[MPa]		110 - 120
	Flexural strength	[mm]		8 - 18
	Deflection at maximum load			
	60 min in H ₂ O/100 °C			
	Flexural strength	[MPa]		125 - 135
Deflection at maximum load	[mm]		10 - 18	
FRACTURE PROPERTIES BEND NOTCH TEST (PM 258-0/90)	Fracture toughness K _{1C}	[MPa√m]		0.56 - 0.6
	Fracture energy G _{1C}	[J/m ²]		88 - 96
WATER ABSORPTION (ISO 62)	Immersion:			
	1 day H ₂ O 23 °C	[%]		0.10 - 0.15
	10 days H ₂ O 23 °C	[%]		0.30 - 0.40
	30 min H ₂ O 100 °C	[%]		0.10 - 0.15
	60 min H ₂ O 100 °C	[%]		0.15 - 0.20
COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION (DIN 53 752)	Mean value:			
	α from 20 - 100 °C	[10 ⁻⁶ /K]		55 - 57
	α from 100 - 130 °C	[10 ⁻⁶ /K]		67 - 70
POISSON'S RATIO		[μ]		0.35



Enriching lives through innovation

PROPERTIES OF THE CURED, REINFORCED FORMULATION

PROPERTIES OF THE CURED, REINFORCED FORMULATION			
Unless otherwise stated, the figures given are for pressed laminate samples comprising 16 layers (4 mm) of E-glass fabric 1:1, 280 - 300 g/m ² , fibre volume content 42 - 47 %.			
FLEXURAL TEST (ISO 178)	Flexural strength	[MPa]	520 - 550
	Deflection at maximum load	[mm]	5 - 6
	Flexural modulus	[MPa]	16500 - 16700
	10 days in H ₂ O 23 °C		
	Flexural strength	[MPa]	390 - 410
	Deflection at maximum load	[mm]	4 - 5
TENSILE TEST (ISO 3268 - 1978)	60 min in H ₂ O/100 °C		
	Flexural strength	[MPa]	460 - 480
	Deflection at maximum load	[mm]	5 - 6
	Tensile strength	[MPa]	345 - 375
INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH (ASTM D 2344)	Ultimate elongation	[%]	1 - 2
	Tensile modulus	[MPa]	25500 - 26000
	Short beam: E-glass unidirectional specimen Laminate thickness t = 6.4 mm Fibre volume content: 60 %		
WATER ABSORPTION (ISO 62)	Shear strength: [MPa] 75 - 77		
	<i>Immersion:</i>		
	1 day H ₂ O 23 °C	[%]	0.15 - 0.20
	10 days H ₂ O 23 °C	[%]	0.25 - 0.30
	30 min H ₂ O 100 °C	[%]	0.01 - 0.05
TENSILE, COMPRESSIVE AND TORSIONAL TEST (TCT)	60 min H ₂ O 100 °C [%] 0.03 - 0.07		
	E-glass	Roving	E-glass roving, 1200 tex, silane finish
		Fibre volume content	67 %
		Gelation temperature	90 °C
		Post-cure	8 h at 140 °C
	Carbon HT	Roving	Carbon fibre high tensile, Torayca T 300 B - 6000 - 50 B
		Fibre volume content	64 %
		Gelation temperature	90 °C
		Post-cure	8 h at 140 °C
	Transverse tensile test		<i>E-Glass</i>
Tensile strength	[MPa]	48 - 55	77 - 85
Tensile strain	[%]	0.25 - 0.33	0.9 - 1.0
Elastic modulus	[MPa]	18000 - 20000	9300 - 9900
Transverse compressive test			
Compressive strength	[MPa]	165 - 175	190 - 206
Compressive strain at brak	[%]	1.2 - 1.4	2.7 - 3.4
Elastic modulus	[MPa]	20000 - 22000	9700 - 9900
Torsional test			
Shear strength	[MPa]	77 - 82	76 - 80
Shear angle	[%]	2.7 - 3.1	3.3 - 4.0
Shear modulus	[MPa]	6100 - 7100	6000 - 6300



Enriching lives through innovation

HANDLING PRECAUTIONS

Personal hygiene

Safety precautions at workplace

protective clothing	yes
gloves	essential
arm protectors	recommended when skin contact likely
<u>goggles/safety glasses</u>	yes

Skin protection

before starting work	Apply barrier cream to exposed skin
after washing	Apply barrier or nourishing cream

Cleansing of contaminated skin

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels. Do not use solvents

Disposal of spillage

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin

Ventilation

of workshop	Renew air 3 to 5 times an hour
of workplaces	Exhaust fans. Operatives should avoid inhaling vapours

FIRST AID

Contamination of the eyes by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted.

Material smeared or splashed on the skin should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately.

Anyone taken ill after *inhaling* vapours should be moved out of doors immediately.

In all cases of doubt call for medical assistance.

IMPORTANT LEGAL NOTICE

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT WITHOUT LIMITATION, AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility,



Enriching lives through innovation

temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Aradur and Araldite are registered trademarks of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Main Office :
Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 BASEL
Switzerland
+41 61 966 3333

ANHANG 5: DATENBLATT HARZSYSTEM ARALDITE® LY556 / HARDENER XB 3473

HUNTSMAN

Enriching lives through innovation

Advanced Materials

Araldite® LY 556* / Hardener XB 3473*

HOT CURING EPOXY SYSTEM

Araldite® LY 556 is an epoxy resin
Hardener XB 3473 is a formulated amine hardener

APPLICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • Industrial composites • Structural composites 																																							
PROPERTIES	Laminating system																																							
PROCESSING	<ul style="list-style-type: none"> • Filament Winding • Resin Transfer Moulding (RTM) • Pressure Moulding • Pultrusion 																																							
KEY DATA	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Araldite® LY 556</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td colspan="2">clear, pale yellow liquid</td> </tr> <tr> <td>Colour (Gardner, ISO 4630)</td> <td colspan="2">≤ 2</td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>10000 - 12000</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>1.15 - 1.2</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>> 200</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Hardener XB 3473</th> </tr> <tr> <td>Aspect (visual)</td> <td colspan="2">clear yellow to brown liquid</td> </tr> <tr> <td>Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)</td> <td>95 - 145</td> <td>[mPa s]</td> </tr> <tr> <td>Density at 25 °C (ISO 1675)</td> <td>0.99 - 1.02</td> <td>[g/cm³]</td> </tr> <tr> <td>Flash point (ISO 2719)</td> <td>121</td> <td>[°C]</td> </tr> <tr> <td>Storage temperature (see expiry date on original container)</td> <td>2 - 40</td> <td>[°C]</td> </tr> </tbody> </table>	Araldite® LY 556			Aspect (visual)	clear, pale yellow liquid		Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	10000 - 12000	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.2	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]	Hardener XB 3473			Aspect (visual)	clear yellow to brown liquid		Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	95 - 145	[mPa s]	Density at 25 °C (ISO 1675)	0.99 - 1.02	[g/cm ³]	Flash point (ISO 2719)	121	[°C]	Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]
Araldite® LY 556																																								
Aspect (visual)	clear, pale yellow liquid																																							
Colour (Gardner, ISO 4630)	≤ 2																																							
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	10000 - 12000	[mPa s]																																						
Density at 25 °C (ISO 1675)	1.15 - 1.2	[g/cm ³]																																						
Flash point (ISO 2719)	> 200	[°C]																																						
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																						
Hardener XB 3473																																								
Aspect (visual)	clear yellow to brown liquid																																							
Viscosity at 25 °C (ISO 12058-1)	95 - 145	[mPa s]																																						
Density at 25 °C (ISO 1675)	0.99 - 1.02	[g/cm ³]																																						
Flash point (ISO 2719)	121	[°C]																																						
Storage temperature (see expiry date on original container)	2 - 40	[°C]																																						
STORAGE	<p>Provided that Araldite® LY 556 and Hardener XB 3473 are stored in a dry place in their original, properly closed containers at the above mentioned storage temperatures they will have the shelf lives indicated on the labels. Partly emptied containers should be closed immediately after use.</p>																																							

* In addition to the brand name product denomination may show different appendices, which allows us to differentiate between our production sites: e.g., BD = Germany, US = United States, IN = India, CI = China, etc.. These appendices are in use on packaging, transport and invoicing documents. Generally the same specifications apply for all versions. Please address any additional need for clarification to the appropriate Huntsman contact.



Enriching lives through innovation

PROCESSING DATA

MIX RATIO	<i>Components</i>	<i>Parts by weight</i>	<i>Parts by volume</i>
	Araldite® LY 556	100	100
	Hardener XB 3473	23	27

We recommend that the components are weighed with an accurate balance to prevent mixing inaccuracies which can affect the properties of the matrix system. The components should be mixed thoroughly to ensure homogeneity. It is important that the side and the bottom of the vessel are incorporated into the mixing process.

When processing large quantities of mixture the pot life will decrease due to exothermic reaction. It is advisable to divide large mixes into several smaller containers.

INITIAL MIX VISCOSITY (CONE/PLATE VISCOSIMETER)		<i>[°C]</i>	<i>[mPa s]</i>
	LY 556/XB 3473	at 25 at 40	5200 - 6000 700 - 900

POT LIFE (TECAM, 23°C, 65 % RH)		<i>[g]</i>	<i>[h]</i>
	LY 556/XB 3473	100	32 - 37

GEL TIME (HOT PLATE)		<i>[°C]</i>	<i>[min]</i>
	LY 556/XB 3473	at 120 at 140 at 160 at 180	68 - 78 35 - 43 18 - 23 9 - 13

The values shown are for small amounts of pure resin/hardener mix. In composite structures the gel time can differ significantly from the given values depending on the fibre content and the laminate thickness.

PROPERTIES OF THE CURED, NEAT FORMULATION			
GLASS TRANSITION TEMPERATURE	<i>Cure:</i>	T_g	LY 556 XB 3473
(IEC 1006, DSC, 10 K/MIN)	4 h 80°C + 4 h 160°C	[°C]	162 - 168
	2 h 120°C + 4 h 180°C	[°C]	185 - 194
	2 h 120°C + 2 h 160°C + 2h 200°C	[°C]	185 - 193
	2 h 120°C + 2 h 160°C + 2h 200°C + 4h 220°C	[°C]	187 - 195
GLASS TRANSITION TEMPERATURE	<i>Cure:</i>	T_g	LY 556 XB 3473
(ISO 6721, DMA, 2 K/MIN)	2 h 120°C + 2 h 140°C + 2h 180°C	[°C]	175 - 185
FLEXURAL TEST	<i>Cure:</i>		
(ISO 178)	2 h 120°C + 2 h 140°C + 2 h 180°C		
	Flexural strength	[MPa]	110 - 120
	Elongation at flexural strength	[%]	5,5 - 6,5
	Ultimate strength	[MPa]	110 - 120
	Ultimate elongation	[%]	5,5 - 6,5
	Flexural modulus	[MPa]	2700 - 2900
FRACTURE PROPERTIES BEND NOTCH TEST	<i>Cure:</i>		
(PM 258-0/90)	2 h 120°C + 2 h 140°C + 2 h 180°C		
	Fracture toughness K_{1c}	[MPa \sqrt{m}]	0,70 - 0,85
	Fracture energy G_{1c}	[J/m ²]	190 - 220

PROPERTIES OF THE CURED, REINFORCED FORMULATION

	Short beam: Laminate comprising 12 layers unidirectional E-glass fabric (425 g/m ²) Laminate thickness t = 3.1 - 3.3 mm Fibre volume content: 63 - 65 %		
INTERLAMINAR SHEAR STRENGTH	<i>Cure:</i>		
(ASTM D 2344)	2 h 120 °C + 2 h 140 °C + 2 h 180 °C		
	Shear strength	[MPa]	62 - 66
FLEXURAL TEST	<i>Cure:</i>		
(ISO 178)	2 h 120 °C + 2 h 140 °C + 2 h 180 °C		
	Flexural strength	[MPa]	1050 - 1250
	Ultimate elongation	[%]	2.4 - 2.8
	Flexural modulus	[MPa]	40000 - 44000

**HANDLING
PRECAUTIONS**
Personal hygiene
Safety precautions at workplace

protective clothing	yes
gloves	essential
arm protectors	recommended when skin contact likely
goggles/safety glasses	yes

Skin protection

before starting work	Apply barrier cream to exposed skin
after washing	Apply barrier or nourishing cream

Cleansing of contaminated skin

Dab off with absorbent paper, wash with warm water and alkali-free soap, then dry with disposable towels. Do not use solvents

Disposal of spillage

Soak up with sawdust or cotton waste and deposit in plastic-lined bin

Ventilation

of workshop	Renew air 3 to 5 times an hour
of workplaces	Exhaust fans. Operatives should avoid inhaling vapours

FIRST AID

Contamination of the eyes by resin, hardener or mix should be treated immediately by flushing with clean, running water for 10 to 15 minutes. A doctor should then be consulted.

Material smeared or splashed on the *skin* should be dabbed off, and the contaminated area then washed and treated with a cleansing cream (see above). A doctor should be consulted in the event of severe irritation or burns. Contaminated clothing should be changed immediately.

Anyone taken ill after *inhaling* vapours should be moved out of doors immediately.

In all cases of doubt call for medical assistance.

IMPORTANT LEGAL NOTICE

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, WHETHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING BUT WITHOUT LIMITATION, AS TO MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility



Enriching lives through innovation

of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Main Office :
Huntsman Advanced Materials (Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 BASEL
Switzerland
+41 61 966 3333

ANHANG 6: DATENBLATT GEWINDEFESTIGER LOCTITE® 275

Technisches Datenblatt



LOCTITE® 275

Juni 2004

PRODUKTBESCHREIBUNG

LOCTITE® 275 besitzt die folgenden Produkteigenschaften:

Technologie	Acrylat
Chemische Basis	Dimethacrylatester
Aussehen (unausgehärtet)	Grün, flüssig ^{MS}
Fluoreszenz	Ja, unter UV-Licht ^{MS}
Komponenten	Einkomponentig - kein Mischen erforderlich
Viskosität	Mittel
Aushärtung	Anaerob
Sekundärhärtung	Aktivator
Anwendung	Schraubensicherung
Festigkeit	hoch

LOCTITE® 275 wird zum dauerhaften Sichern und Dichten von Gewindeverbindungen eingesetzt. Das Produkt härtet unter Luftabschluss zwischen enganliegenden Metallflächen aus und verhindert selbständiges Losdrehen und Undichtheiten durch Stöße und Vibrationen. Typische Anwendungen sind u.a das Sichern und Abdichten von großen Schrauben und Stehbolzen (M25 und größer).

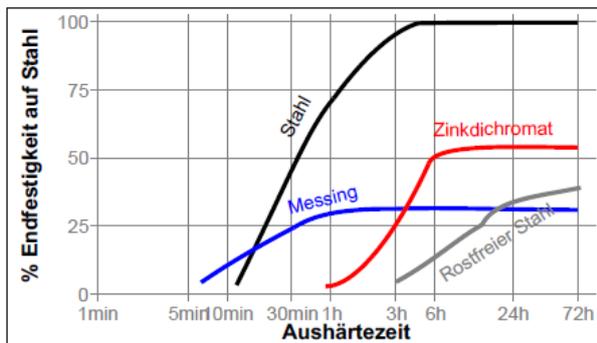
MATERIALEIGENSCHAFTEN

Spez. Dichte bei 25 °C 1,1
 Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt
 Viskosität, Brookfield - RVT, 25 °C, mPa·s (cP):
 Spindel 5, bei 20 U/min 5 000 bis 10 000^{MS}

TYPISCHE AUSHÄRTEEIGENSCHAFTEN

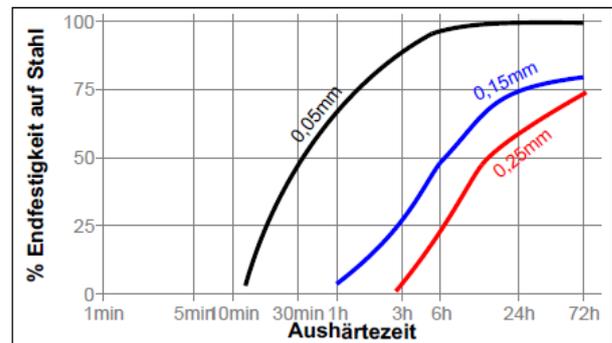
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten Materialoberfläche. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Losbrechfestigkeit bei vergütungsschwarzen Schrauben und Muttern M10 verglichen mit anderen Materialien. Geprüft gemäß MIL-S-46163.



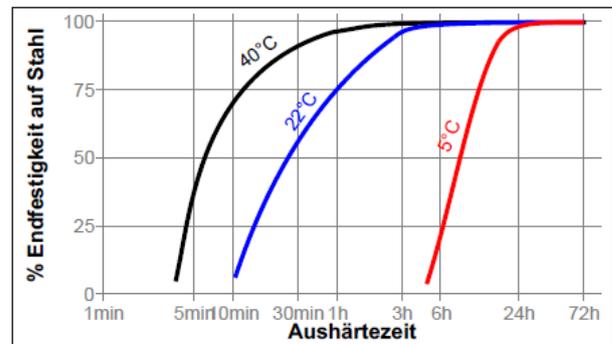
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spalt

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig vom Klebespalt. Spalten in Schraubverbindungen sind abhängig von Gewindetyp, Qualität und Größe. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit auf Wellen und Naben aus Stahl bei unterschiedlichen Spalten. Geprüft gemäß MIL-R-46082.



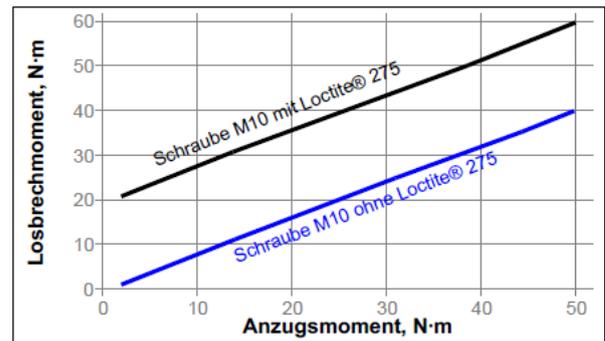
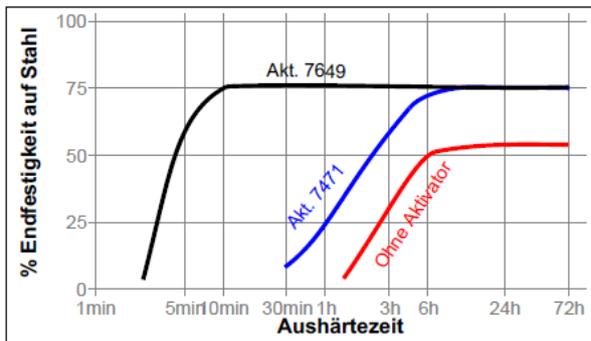
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der Temperatur. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Losbrechfestigkeit bei vergütungsschwarzen Schrauben und Muttern M10 bei unterschiedlichen Temperaturen. Geprüft gemäß MIL-S-46163.



Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Aktivator

Ist die Aushärtegeschwindigkeit zu langsam, oder sind große Spalten vorhanden, kann durch Einsatz eines Aktivators die Aushärtung beschleunigt werden. Das untenstehende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Losbrechfestigkeit bei Zinkdichromat beschichteten Stahlschrauben und -muttern M10 unter Verwendung der Aktivatoren 7471 und 7649. Geprüft gemäß MIL-S-46163.



TYPISCHE EIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Physikalische Eigenschaften:

Wärmeausdehnungskoeffizient, ASTM D 696, K ⁻¹	100×10 ⁻⁶
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, ASTM C 177, W/(m·K)	0,3
Spezifische Wärmekapazität, kJ/(kg·K)	0,1

BESTÄNDIGKEIT GEGEN UMGEBUNGSEINFLÜSSE

Aushärzeit 1 Woche bei 22 °C

Losbrechmoment unter Vorspannung, ISO 10964,
Anzugsmoment 5 N·m:
zinkphosphatierte Muttern und Schrauben
M10

FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Eigenschaften

Nach 24 Stunden bei 22 °C

Losbrechmoment ohne Vorspannung, ISO 10964:
vergütungsschwarze N-m 15 bis 36
Stahlschrauben und –muttern (lb.in.) (130 bis 320)
M10

Weiterdrehmoment, ISO 10964:
vergütungsschwarze N-m 20 bis 50
Stahlschrauben und –muttern (lb.in.) (175 bis 440)
M10

Losbrechmoment unter Vorspannung, ISO 10964,
Anzugsmoment 5 N·m:
vergütungsschwarze N-m 25 bis 50
Stahlschrauben und –muttern (lb.in.) (220 bis 440)
M10

Max. Weiterdrehmoment unter Vorspannung, ISO 10964,
Anzugsmoment 5 N·m:
vergütungsschwarze N-m 35 bis 65
Stahlschrauben und –muttern (lb.in.) (310 bis 575)
M10

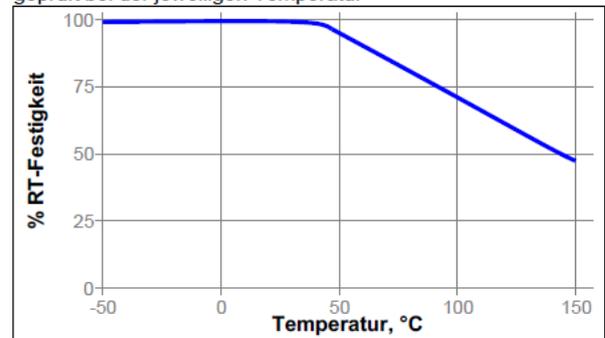
Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl N/mm² ≥11^{LMS}
(psi) (≥1 595)

Nach 1 Stunde bei 22 °C

Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl N/mm² ≥3^{LMS}
(psi) (≥435)

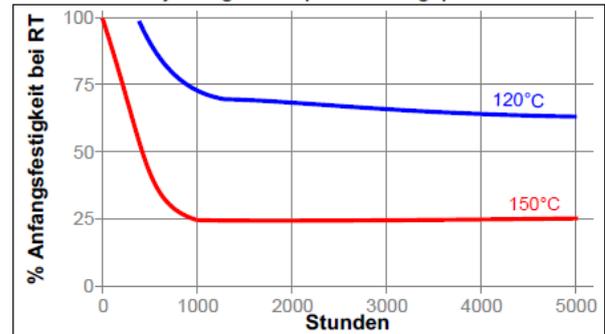
Temperaturfestigkeit

geprüft bei der jeweiligen Temperatur



Wärmealterung

Gealtert bei der jeweiligen Temperatur und geprüft bei 22°C



Erhöhung des Losbrechmoments

Das Losbrechmoment einer ungesicherten Schraube ist normalerweise 15 – 30 % niedriger als das Anzugsmoment. Das folgende Diagramm zeigt die Auswirkung von LOCTITE® 275 auf das Losbrechmoment.

Henkel Loctite Americas
+860.571.5100

Henkel Loctite Europe
+49.89.9268.0

Henkel Loctite Asia Pacific
+81.45.758.1810

Den direktesten Zugang zu Informationen und Unterstützung in kaufmännischen und technischen Fragen finden Sie im Internet unter: www.loctite.com

Beständigkeit gegen Medien

Alterungstest wie beschrieben und geprüft bei 22°C.

Medium	°C	% Anfangsfestigkeit		
		100 h	500 h	1000 h
Motoröl	125	85	85	75
Benzin	22	100	100	100
Bremsflüssigkeit	22	100	100	100
Ethanol	22	95	95	95
Aceton	22	95	95	95
1,1,1-Trichlorethan	22	100	95	95
Wasser/Glycol 50/50	87	100	85	85

ALLGEMEINE INFORMATION

Dieses Produkt ist nicht geeignet für reinen Sauerstoff und/oder sauerstoffangereicherte Systeme und sollte nicht als Dichtstoff für Chlor oder stark oxidierende Medien gewählt werden.

Sicherheitshinweise zu diesem Produkt entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt.

Wenn die zu verklebenden Oberflächen vorher mit einem wässrigen Reinigungssystem gereinigt werden, ist darauf zu achten, dass die Verträglichkeit zwischen Reiniger und Kleb- bzw. Dichtstoff gegeben ist. In manchen Fällen können diese wässrigen Reiniger die Aushärtung bzw. die Eigenschaften des Klebstoffes beeinträchtigen.

Dieses Produkt wird nicht für Kunststoffe empfohlen (insbesondere bei thermoplastischen Materialien können Spannungsrisse auftreten). Dem Anwender wird empfohlen, vorher die Verträglichkeit mit solchen Materialien zu prüfen

Gebrauchshinweise**Montage**

- Zur Erzielung optimaler Ergebnisse alle Oberflächen (innen und aussen) mit einem Loctite® Reiniger reinigen und trocknen lassen.
- Bei inaktiven Metalloberflächen oder zu langsamer Aushärtegeschwindigkeit alle Gewinde mit Aktivator 7471 oder 7649 besprühen und trocknen lassen.
- Um ein Verstopfen der Düse durch ausgehärtetes Produkt zu vermeiden, darf die Spitze bei der Auftragung keine Metalloberflächen berühren.
- Bei Durchgangsbohrungen** mehrere Tropfen dort auf die Schraube auftragen, wo die Mutter sitzen wird.
- Bei Sacklochbohrungen** mehrere Tropfen innen entlang des Gewindes bis auf den Bohrungsgrund auftragen.
- Bei Dichtanwendungen** Produkt 360° ringförmig auf den Gewindeanfang des Außengewindes auftragen, dabei den ersten Gewingegang frei lassen. Material bis auf den Gewindegrund streichen, um die Zwischenräume gut auszufüllen. Bei größeren Gewinden und Zwischenräumen Produktmenge entsprechend anpassen und Produkt auch 360° ringförmig auf das Innengewinde auftragen.
- Teile wie gewohnt montieren und festziehen.

Demontage

- Mutter oder Schraube lokal auf ca. 250 °C erwärmen. Im erwärmten Zustand demontieren.

Reinigung

- Ausgehärtetes Produkt kann durch Einlegen in ein Loctite® Lösungsmittel und anschließende mechanische Bearbeitung z.B. mit einer Drahtbürste entfernt werden.

Loctite Material-Spezifikation LMS

LMS vom 20. April 1999. Prüfberichte über die angegebenen Eigenschaften sind für jede Charge erhältlich. LMS-Prüfberichte enthalten ausgewählte, im Rahmen der Qualitätskontrolle festgelegte Prüfwerte, die als relevant für Kunden-Spezifikationen erachtet werden. Darüber hinaus sind umfassende Kontrollmaßnahmen in Kraft, die eine gleichbleibend hohe Produktqualität gewährleisten. Spezifikationen unter Berücksichtigung von speziellen Kundenwünschen können über die Qualitätsabteilung von Henkel koordiniert werden.

Lagerung

Produkt im ungeöffneten Behälter in trockenen Räumen lagern. Hinweise zur Lagerung können sich auf dem Etikett des Produktbehälters befinden.

Optimale Lagerung: 8 °C bis 21 °C Durch Lagerung unter 8°C und über 28°C können die Produkteigenschaften nachteilig beeinflusst werden.

Aus dem Gebinde entnommenes Produkt kann beim Gebrauch verunreinigt worden sein. Deshalb keine Produktreste in den Originalbehälter zurückschütten. Henkel kann keine Haftung für Material übernehmen, das verunreinigt oder in einer Weise gelagert wurde, die von den oben aufgeführten Bedingungen abweicht. Wenn Sie weitere Informationen benötigen, wenden Sie sich bitte an Ihren zuständigen technischen Service oder den Kundenbetreuer vor Ort.

Umrechnungsfaktoren

(°C x 1,8) + 32 = °F
 kV/mm x 25,4 = V/mil
 mm / 25,4 = inches
 N x 0,225 = lb
 N/mm x 5,71 = lb/in
 N/mm² x 145 = psi
 MPa x 145 = psi
 N·m x 8,851 = lb·in
 N·mm x 0,142 = oz·in
 mPa·s = cP

Hinweis

Die hierin enthaltenen Daten dienen lediglich zur Information und gelten nach bestem Wissen als zuverlässig. Wir können jedoch keine Haftung für Ergebnisse übernehmen, die von anderen erzielt wurden, über deren Methoden wir keine Kontrolle haben. Der Anwender selbst ist dafür verantwortlich, die Eignung von hierin erwähnten Produktionsmethoden für seine Zwecke festzustellen und Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, die zum Schutz von Sachen und Personen vor den Gefahren angezeigt wären, die möglicherweise bei der

Henkel Loctite Americas
 +860.571.5100

Henkel Loctite Europe
 +49.89.9268.0

Henkel Loctite Asia Pacific
 +81.45.758.1810

Den direktesten Zugang zu Informationen und Unterstützung in kaufmännischen und technischen Fragen finden Sie im Internet unter: www.loctite.com

Handhabung und dem Gebrauch dieser Produkte auftreten. Dementsprechend **lehnt die Firma Henkel im besonderen jede aus dem Verkauf oder Gebrauch von Produkten der Firma Henkel entstehende ausdrücklich oder stillschweigend gewährte Garantie ab, einschließlich aller Gewährleistungsverpflichtungen oder Eignungsgarantien für einen bestimmten Zweck. Die Firma Henkel lehnt im besonderen jede Haftung für Folgeschäden oder mittelbare Schäden jeder Art ab, einschließlich entgangener Gewinne.** Die Tatsache, dass hier verschiedene Verfahren oder Zusammensetzungen erörtert werden, soll nicht zum Ausdruck bringen, dass diese nicht durch Patente für andere geschützt sind, bzw. unter Patenten der Firma Henkel lizenziert sind, die solche Verfahren oder Zusammensetzungen abdecken. Wir empfehlen jedem Interessenten, die von ihm beabsichtigte Anwendung vor dem serienmäßigen Einsatz zu testen und dabei diese Daten als Anleitung zu benutzen. Dieses Produkt kann durch eines oder mehrere in- oder ausländische Patente oder Patentanmeldungen geschützt sein.

Verwendung von Warenzeichen

LOCTITE ist ein Warenzeichen der Firma Henkel

Referenz 1

Henkel Loctite Americas
+860.571.5100

Henkel Loctite Europe
+49.89.9268.0

Henkel Loctite Asia Pacific
+81.45.758.1810

Den direktesten Zugang zu Informationen und Unterstützung in kaufmännischen und technischen Fragen finden Sie im Internet unter: www.loctite.com