

DLR-IB-FA-BS-2017-107

Abhängigkeit der
Fertigungskosten von
Designparametern am Beispiel von
Rotorblättern für
Windenergieanlagen

Bachelorarbeit

Annika Wollermann Umpierrez



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2017- 107

Abhängigkeit der Fertigungskosten von Designparametern am Beispiel von Rotorblättern für Windenergieanlagen

Zugänglichkeit:

Stufe 1 (intern und extern unbeschränkt zugänglich)

Braunschweig, April, 2017

Der Bericht umfasst: 97 Seiten

Institutsleiter:

Prof. Dr.-Ing. M. Wiedemann

Autoren:

Annika Wollermann Umpierrez

Abteilungsleiter:

Dr.-Ing. Markus Kleineberg

Autor 2 / Betreuer:

Dr.-Ing. Philipp Hilmer



DLR

Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



TU Clausthal

Clausthal University of Technology

Abhängigkeit der Fertigungskosten von Designparametern am Beispiel von Rotorblättern für Windenergieanlagen

Bachelorarbeit

von Annika Wollermann Umpierrez

Matrikelnummer: 431554

Wintersemester 2016/17

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners (TU Clausthal)

Zweitprüfer: Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann (TU Braunschweig)

Betreuer: Dr.-Ing. Philipp Hilmer (DLR)



Aufgabenstellung

Umfeld/ Überblick

Ein zunehmender Bedarf an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen erfordert den Einsatz angepasster Fertigungsprozesse, die schnell, kosteneffizient und ressourcenschonend sein müssen. Deshalb ist eine Abschätzung der Ressourcenaufwände bereits während der Design-Phase von hohem Wert. Diese Abschätzung erfordert eine genaue Analyse der Zusammenhänge zwischen Design-Parametern und Produktionsprozessen, die bei Faserverbundwerkstoffen äußerst vielfältig sind.

Zuverlässige Modelle, die die Abhängigkeiten von Design- und Fertigungsparametern abbilden sind notwendig, um in Zukunft kosten- und fertigungsgerechte Produkte aus Faserverbundwerkstoffen zu konzipieren. Diese Werkzeuge ermöglichen es Optimierungspotentiale aufzuzeigen und Fertigungsprozesse hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit und allgemeinen Ressourceneffizienz weiterzuentwickeln.

Ziel der Arbeit/ Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung der Abhängigkeit der Fertigungskosten von ausgewählten Design-Parametern bei Rotorblättern für Windenergieanlagen. Diese Relationen sollen in lineare und nichtlineare Komponenten aufgeteilt werden, welche wiederum mit ökonomisch wirksamen Prozessparametern gekoppelt werden. Mit Hilfe dieser Daten soll ein parametrisches Modell erstellt werden, anhand dessen die Zusammenhänge zwischen Design-Parametern und Fertigungskosten ersichtlich werden. Dieses Modell kann als Entscheidungshilfe für die Design-Phase dienen, um bereits frühzeitig Kosteneinsparungen zu erkennen und ressourceneffizient zu fertigen.

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit soll zunächst ein Fertigungsablauf modelliert werden, anhand dessen eine eindeutige Prozesskette abgeleitet werden kann. Auf Basis einer Literaturrecherche werden Annahmen für ökonomische Prozessparameter und Materialflusskosten getroffen und mit bereits erfassten Daten zur Herstellung eines Bauteils aus Faserverbundwerkstoffen versehen.

Folgende Teilaspekte/ Teilaufgaben sind in der Bachelorarbeit zu behandeln:

- Literaturrecherche zu ökonomischen Bewertungsmethoden von Fertigungsprozessen während der Design-Phase
- Darstellung des Produktionsprozesses und seiner Parameter eines Windenergieanlagen Rotorblatts nach dem aktuellen Stand der Technik
- Festlegung der Systemgrenzen
- Parametrische Modellierung des Produktionsprozesses
- Parametrisierung des erstellten Modells unter Verwendung von Literaturwerten
- Auswahl der zu untersuchenden Design-Parameter
- Darstellung und Diskussion der Zusammenhänge zwischen ausgewählten Design-Parametern und den Fertigungskosten
- Zusammenfassung und Dokumentation aller Ergebnisse in Form einer schriftlichen Arbeit und Präsentation im Rahmen eines Vortrags

Die Bachelorarbeit wird am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig durchgeführt. Hierfür können die Einrichtungen und die Software-Lizenzen des DLR-Instituts genutzt werden. Die Betreuung im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik übernimmt Dr.-Ing. Philipp Hilmer.

Die Betreuung seitens des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik wird von Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners wahrgenommen.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Instituts für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik möglich. Die Arbeit muss in dreifacher gebundener und elektronischer Ausführung im Prüfungsamt der TU Clausthal bis zum 27.06.2017 abgegeben werden.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist ein generischer Design- und Fertigungsprozess visualisiert. Angefangen mit der Planung der Designphase bis zum Lackieren des Rohlings wird der komplette Prozess betrachtet.

Aufbauend auf den generischen Fertigungsprozess werden die Abhängigkeit der Fertigungskosten von Designparameter bestimmt. Als Designparameter werden die Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität gewählt. Diese wiederum stehen am Anfang einer Wirkungskette mit Produktionsparametern. Oft sind die Fertigungskosten über Produktionsparameter indirekt von Designparameter abhängig.

Die Abhängigkeiten werden mittels eines Up-Scalings Versuch von 50m über 60m und 80m auf 100m sowie über eine Materialsubstitution der UD-Gurtkomponenten von Glasfaser auf Kohlefaser untersucht. Zur Bewertung der Komplexitäten wird eine geclusterte Komplexitätswertetabelle erstellt, mittels welcher einzelne Komplexitäten analysiert werden. Es wird zwischen geometrischer, struktureller und Prozesskomplexität unterschieden. In einer Bewertungsmatrix können einzelnen Rotorblattkonzepte mit unterschiedlicher Länge und unterschiedlichen Komplexitäten aus Kostensicht miteinander verglichen werden. In einem Parametermodell sind eindeutige Wirkungsketten ausgehend von den Designparametern Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität dargestellt, sowie Zeitfaktoren und Kostentreiber gekennzeichnet.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die Arbeit selbständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe und dass alle Stellen dieser Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht wurden und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderer Prüfungsstelle vorgelegt wurde.

Des Weiteren erkläre ich, dass ich mit der öffentlichen Bereitstellung meiner Abschlussarbeit in der Instituts- und/oder Universitätsbibliothek einverstanden bin / nicht einverstanden bin.

Braunschweig im April 2017

Annika Wollermann Umpierrez

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	- 1 -
ANLAGENVERZEICHNIS	- 3 -
TABELLENVERZEICHNIS	- 4 -
VERZEICHNIS VERWENDETER ABKÜRZUNGEN	- 5 -
1 EINLEITUNG	- 6 -
2 STAND DER TECHNIK	- 9 -
2.1 Faserverbundwerkstoffe	- 9 -
2.1.1 Fasern	- 9 -
2.1.2 Faserhalbzeuge	- 10 -
2.1.3 Matrix	- 11 -
2.2 Fertigungsprozess von Faserverbundwerkstoffen	- 13 -
2.2.1 RTM Prozess	- 14 -
2.2.2 VARI Prozess	- 15 -
2.2.3 Autoklav	- 16 -
2.3 Prinzipien der Kostenrechnung	- 18 -
2.3.1 Zuordnungsprinzip	- 19 -
2.3.2 Verteilungsprinzip	- 20 -
3 PROZESSMODELLIERUNG	- 22 -
3.1 Bestimmung Systemgrenzen	- 22 -
3.2 Generisches Modell	- 23 -
3.2.1 Designprozess	- 23 -
3.2.2 Fertigungsprozess	- 25 -
3.3 Konkretisierung eines Fertigungsprozesspfades	- 28 -
4 PARAMETRISIERUNG DES AUSGEWÄHLTEN FERTIGUNGSPROZESSES	- 41 -

4.1	Designparameter Rotorblattlänge	- 43 -
4.2	Designparameter Rotorblattkomplexität	- 46 -
4.3	Kostenbewertung	- 47 -
4.3.1	Referenzblatt	- 50 -
4.4	Zusammenhang Parameter und Fertigungskosten	- 53 -
4.4.1	Abhängigkeiten der Fertigungskosten von der Rotorblattlänge	- 53 -
4.4.2	Abhängigkeiten der Fertigungskosten von der Rotorblattkomplexität	- 67 -
5	FAZIT UND AUSBLICK	- 72 -
5.1	Fazit	- 72 -
5.2	Ausblick	- 73 -
6	LITERATURVERZEICHNIS	- 74 -
	ANLAGEN	- 74 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Gesamtleistung neu installierter Anlagen in Deutschland, On. und Offshore	- 6 -
Abbildung 1-2: Zeitlicher Verlauf der Längen- /Höhenentwicklung der Rotorblätter von 1980 bis 2010 inklusive Zukunftsprognose	- 7 -
Abbildung 2-1: Fasereinteilung	- 10 -
Abbildung 2-2: Faserhalbzeugarten: a) Gelege ,b) Gewebe und c) Geflecht	- 11 -
Abbildung 2-3: Vor- und Nachteile von duroplastischen und thermoplastischen Harzen	- 8 -
Abbildung 2-4: Faserverbundkonstruktionen nach	- 14 -
Abbildung 2-5: Prozessablauf RTM Verfahren	- 15 -
Abbildung 2-6: Schematischer Aufbau VARI Verfahren nach	- 16 -
Abbildung 2-7: schematischer Autoklavaufbau	- 17 -
Abbildung 2-8: Kostenrechnungsprinzipien in der Übersicht	- 19 -
Abbildung 2-9: Kostenträgeraufteilung	- 19 -
Abbildung 3-1: Veranschaulichung der Systemgrenzen	- 17 -
Abbildung 3-2: schematische Darstellung des Designprozesses	- 24 -
Abbildung 3-3: Metaprozesse des Fertigungsprozesses eines Rotorblattes	- 26 -
Abbildung 3-4: Legende der Symbole zum Lesen eines Prozesses	- 27 -
Abbildung 3-5: Prozessausschnitt „Zusammenfügen“	- 28 -
Abbildung 3-6: Beispielhafte gängige Bauweisen nach dem Stand der Technik	- 24 -
Abbildung 3-7: Rotorblattmasse in Abhängigkeit vom Rotordurchmesser und Werkstoff	- 31 -
Abbildung 3-8: schematische Darstellung der Kaskadeninjektion	- 35 -
Abbildung 3-9: Entwicklung der Techniken der Rotorblattfertigung über einen zeitlichen Verlauf abhängig von der Rotorblattlänge nach	- 36 -
Abbildung 3-10: Integralholmenbauweise mit Rundholm	- 37 -

Abbildung 3-11: Außen- und Explosionsansicht der Differentialholmenbauweise	- 38 -
Abbildung 4-1: Datenblatt des Referenzblattes	- 50 -
Abbildung 4-2: aktuelle Listenpreise	- 52 -
Abbildung 4-3: DLR interne Preise	- 53 -
Abbildung 4-4: Vergleich Verhältnis zwischen Blattlänge und Blattmasse	- 55 -
Abbildung 4-5: Konzept für die Hallenbreite	- 56 -
Abbildung 4-6: Preise Kransysteme	- 57 -
Abbildung 4-7: Kostenverlauf der UD-Bauteilkomponenten im Vergleich von Kohle- und Glasfaser	- 61 -
Abbildung 4-8: Kumulierte Kosten für Fasermaterial und Kransystem in Bezug auf die Rotorblattlänge	- 62 -
Abbildung 4-9: Verhältnis Rotorblattlänge zur spezifischen Blattmasse	- 63 -
Abbildung 4-10: Empirische Daten zur Abhängigkeit von Rotordurchmesser zur Spezifischen Masse	- 64 -
Abbildung4-11: Kosten der einzelnen Metaprozesse aufgeschlüsselt nach Material- und Personalkosten für das Referenzrotorblatt	- 61 -
Abbildung 4-12: Rotorblattmatrix	- 66 -

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Prozess Rotorblattfertigung	- 75 -
Anlage 2: Prozess Beschaffung Kran	- 81 -
Anlage 3: Prozess Beschaffung Formwerkzeug	- 82 -
Anlage 4: Prozess Nebenproduktion	- 84 -
Anlage 5: Verhältnisse zwischen Rotorblattlänge und der maximalen Blatattiefe	- 86 -
Anlage 6: Kransystempreise pro Rotorblatt nach Länge und Materialeinsatz	- 87 -
Anlage 7: Quellen der Videorecherche	- 87 -
Anlage 8: Auswertung der Priorisierung der Parameter im Experteninterview und der Gruppendiskussion	- 89 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einzelkosten	- 49 -
Tabelle 2: Sondereinzelkosten	- 49 -
Tabelle 3: unechte Gemeinkosten	- 50 -
Tabelle 4: nominelle Verbrauchsmengen und Massen des Referenzblattes	- 51 -
Tabelle 5: Spannweite und Gesamtmasse mit Bezug auf die Rotorblattlänge	- 57 -
Tabelle 6: Materialkennwerte	- 59 -
Tabelle 7: Rotorblattkomplexitäten	- 67 -
Tabelle 8: Zwei Beispielrotorblattkonzepte im Vergleich	- 71 -

Verzeichnis verwendeter Abkürzungen

Bzw.	Beziehungsweise
DLR	Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum
Evtl.	eventuell
LCM	Liquid Composite Moulding
ggf	gegebenenfalls
RoDeO	Rotor Design und Optimierung
RTM	Resin Transfer Moulding
SCRIMP	Seeman Composite Resin Infusion Moulding
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
z.B.	Zum Beispiel
zsm.	Zusammen
z.T.	Zum Teil

1 Einleitung

Heutzutage wird Energie als eine Selbstverständlichkeit angesehen und ist aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken. Allerdings hat die Herkunft der Energie für die Politik sowie für den Privatverbraucher eine ansteigende Bedeutung, sodass der Umstieg auf erneuerbare Energien ein heiß diskutiertes Thema ist. Speziell die Windenergie zeigt in den letzten Jahren ein starkes Leistungswachstum, welches durch die Regierung im Koalitionsvertrag im Dezember 2013 im Zuge der Energiewende beschlossen wurde (Die Bundesregierung, 2017). In Abbildung 1-1 ist der Anstieg der generierten Gesamtleistung an neu installierten Anlagen von 2010 bis 2015 dargestellt.

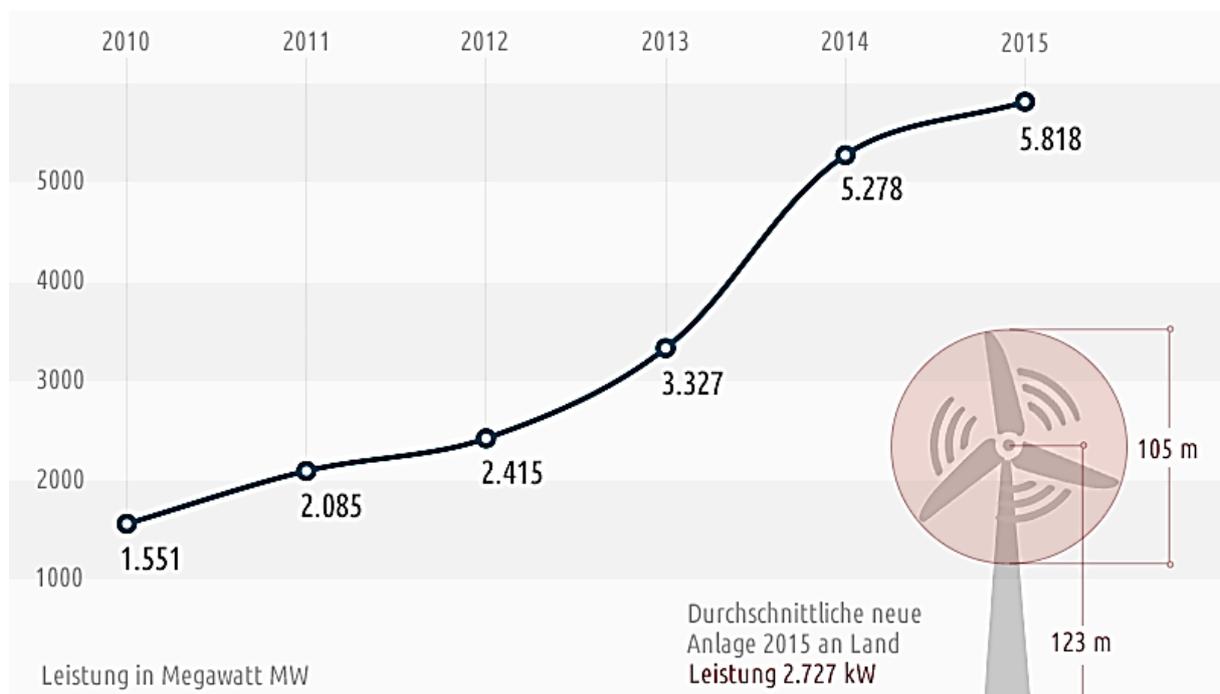


Abbildung 1-1: Gesamtleistung neu installierter Anlagen in Deutschland, On- und Offshore (Deutsche WindGuard)

Der positive Trend ist in Abbildung 1-1 eindeutig erkennbar. Die erbrachte Leistung der Windenergieanlagen machten im Jahr 2016 ca. 11% der gesamten Energieproduktion in Deutschland aus (Umweltbundesamt). Somit hat die Windenergiebranche einen immer höheren Stellenwert in der Energieversorgung. Aber auch die Anforderungen an die Windkraftanlagen steigen, sie müssen effizienter und zuverlässiger im Betrieb sein. Auf diesen ansteigenden Trend mit größeren Anforderungen reagiert die Windenergiebranche und forscht an immer größeren und effektiveren Windkraftanlagen mit längeren Rotorblättern und modernen Techniken zur Ertragsoptimierung (Bundesverband WindEnergie, 2017).

Wind ist ein Energieträger mit einer sehr geringen Energiedichte, was die Entnahme der Energie nur durch großflächige aerodynamische Rotorblätter ermöglicht (Hau, 2014). In Abbildung 1-2 ist der Verlauf des Up-Scaling der Rotorblätter sowie der Turmhöhe seit den 80er Jahren abgebildet. Die Rotorblätter werden immer länger, größer und leistungsstärker.

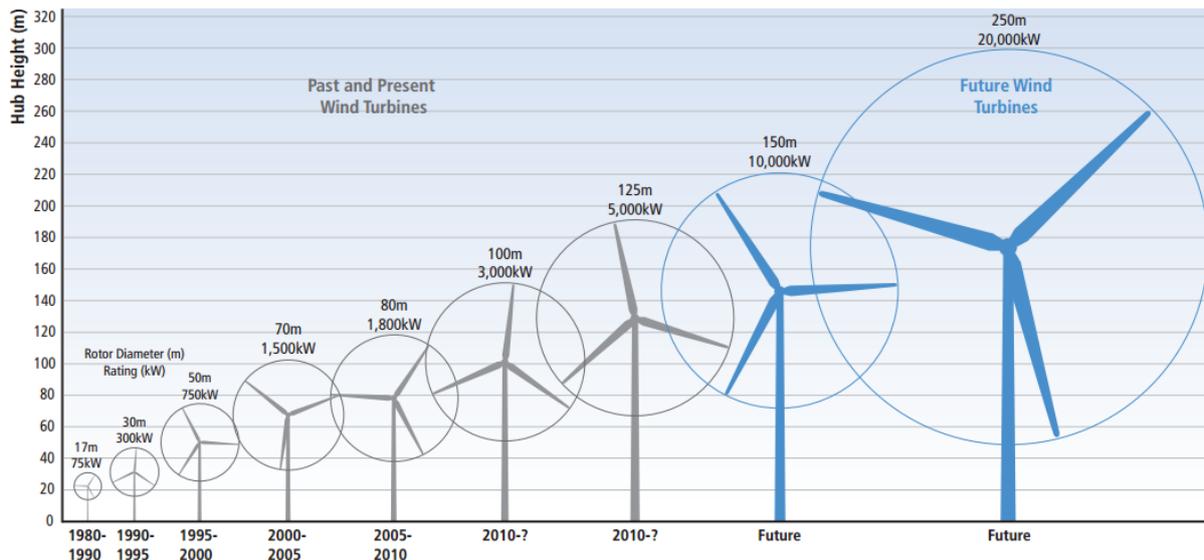


Abbildung 1-2: Zeitlicher Verlauf der Längen- /Höhenentwicklung der Rotorblätter von 1980 bis 2010 inklusive Zukunftsprognose (Working Group III of the IPCC, 2012)

Das längste derzeit realisierte Rotorblatt ist 88,4 m lang mit einem Rotorradius von 180m (LM Wind Power), doch der Trend geht zu noch längeren Rotorblättern. Mit dem Anstieg der Länge steigt auch die Masse des Blattes exponentiell an (Gasch, 2016). Daher ist das Up-Scaling durch die mechanischen Festigkeiten der verwendeten Materialien begrenzt. Folglich muss durch neue Design Konzepte und anderen Materialien die Fertigung von langen Rotorblättern wieder wirtschaftlich gestaltet werden.

Bei der Rotorblattfertigung handelt es sich aus der Sicht des Rechnungswesens nicht um eine Serienfertigung, maximal um eine größere Losfertigung mit einem Umfang von bis zu 1000 Windenergieanlagen pro Jahr. Zudem schwankt der Markt durch Subventionen und den aktuellen Strompreis, sodass die Anbieter stets mit ihrer Preisgestaltung auf die aktuellen Geschehnisse reagieren müssen (Hau, 2014). Betrachtet man den Markt auf der Beschaffungsseite ist erkennbar, dass die Materialien zu Rotorblattfertigung, die Faserverbundwerkstoffe, in der nächsten Zeit nicht auf demselben Preisniveau wie z.B. herkömmliche Materialien wie Stahl sein werden. Daher ist es von enormer Wichtigkeit die Halbzeuge für Faserverbundwerkstoffe kostengünstig zu verarbeiten und bereits in der Designphase eines Rotorblattes auf Einsparungspotentiale zu achten. Des Weiteren muss die Fertigungsprozesskette im Gegensatz zur Bauteilherstellung in der Metallverarbeitung wettbewerbsfähig gestaltet werden (Flemming, 1998).

Die Kombination zwischen der Wirtschaftlichkeit der Produktion und dem Bestreben, immer leistungsstärkere Rotorblätter zu fertigen, wird in dieser Arbeit untersucht. Dabei soll analysiert werden, wie sich der Kostenzuwachs in den einzelnen Fertigungsschritten bei dem Up-Scaling, sowie welche Abhängigkeiten zwischen den Design- und Produktionsparametern bestehen. Es sollen Kostentreiber identifiziert werden, welche sich bei dem Up-Scaling des Rotorblattes nichtlinear verhalten. Hierfür wird zuallererst der Fertigungsprozess einer kompletten Rotorblattproduktion visualisiert. Auf dieser Grundlage können die einflussnehmenden Design- und Produktionsparameter abgeleitet werden. Daraufhin werden die untereinander herrschenden Abhängigkeiten analysiert. Diese werden in einem Parametermodell grafisch dargestellt. Mit dem Ergebnis dieser Arbeit soll einem Rotorblattdesigner ermöglicht werden, bereits in der Designphase auf kostengünstiges Konstruieren zu achten.

Diese Arbeit wird im Rahmen des internen Projektes RoDeO (Rotor Design und Optimierung) vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum angefertigt. RoDeO ist ein institutsübergreifendes multidisziplinäres Projekt zur Gesamtanlagenauslegung von Windkraftrotoren, welches die Produktion, Strukturauslegung, Aeroelastik, Aeroakustik und Aerodynamik berücksichtigt. Das Endziel dieses gemeinsamen Projektes ist ein interaktives Kostenbewertungstool. Dieses soll dem Rotorblattdesigner während des Konstruierens eine Kostenanalyse bereitstellen, sodass dieser während der Planungsphase auf Kostentreiber reagieren kann.

2 Stand der Technik

Faserverbundwerkstoffe sind aus der heutigen Industrie nicht mehr wegzudenken. Die Luftfahrtindustrie, der Bootsbau sowie die Windenergiebranche und Automobilindustrie bedienen sich ihrer vorteilhaften Eigenschaften.

2.1 Faserverbundwerkstoffe

Streng genommen ist ein Faserverbundwerkstoff kein Werkstoff, sondern bereits ein Bauteil, bestehend aus einem bestimmten Anteil an Verstärkungsfasern und dem Matrixmaterial. Sinn dieser Verbundstruktur ist es, Synergieeffekte und verbesserte Bauteileigenschaften zu generieren (Ehrenstein, 2006). In der Natur findet man dieses Leichtbauprinzip der Kraftübertragung durch Fasern in einer Matrix in mehreren Bereichen, wie z.B. bei Holz oder der Muskulatur. Vereint mit dem Werkstoffverbundprinzip, bei welchem Teilmängel einzelner Werkstoffe durch die Kombination kompensiert werden, bieten die Faserverbundwerkstoffe eine hohe Steifigkeit und Festigkeit bei gleichzeitig niedriger Dichte (Schürmann, 2007). Im Folgenden wird auf die Einzelheiten der Fasern, Matrizen und Halbzeuge eingegangen.

2.1.1 Fasern

Die Fasern übernehmen im Verbundwerkstoff die Funktion der Lastübertragung in Zugrichtung. Sie geben dem Material seine Festigkeit. Das Fasermaterial sollte eine geringe Dichte einhergehend mit einer hohen eigenen Festigkeit und Steifigkeit vorweisen. Diese beiden Kriterien erfüllen vor allem Materialien bestehend aus Elementen der ersten beiden Reihen des Periodensystems, denn diese Elemente besitzen eine hohe atomare Bindungsenergie. Auf Grund dessen haben sie theoretisch eine hohe Eigensteifigkeit, welche am besten in Faserform genutzt werden kann (Schürmann, 2007).

In Abbildung 2-1 Fasereinteilung werden die wichtigsten Fasergruppen mit jeweils drei Beispielen aufgelistet. Dabei wird zwischen Naturfasern, organischen und anorganischen Fasern unterschieden. In dieser Arbeit werden organische und anorganische Fasern betrachtet. Im Genaueren Glasfasern, Aramidfasern und Kohlenstofffasern, da es sich hierbei um die gängigsten Faserwerkstoffe in der Faserverbundtechnologie der Rotorblattfertigung handelt.

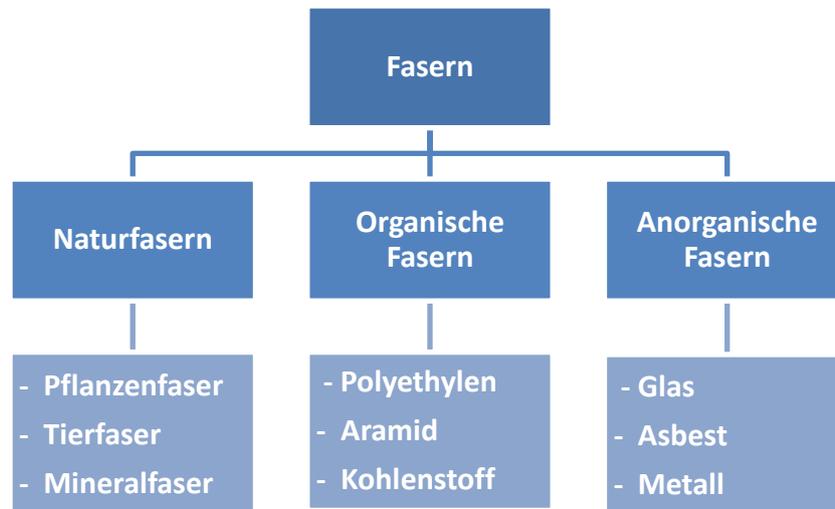


Abbildung 2-1 Fasereinteilung (Schürmann, 2007)

Fasern können, neben der Steifigkeit und Festigkeit, sich im Durchmesser unterscheiden. Durch das Variieren des Durchmessers können unterschiedliche Permeabilitäten der Halbzeuge erreicht werden. Je größer der Durchmesser, desto höher die Permeabilität. Kohlenstofffasern haben im Allgemeinen einen kleineren Durchmesser als Aramid- und Glasfasern. Zusätzlich werden die Fasern mit einer Schlichte beschichtet, sodass sich die Oberflächenbenetzungseigenschaften verbessern und die Kohäsion der Fasern verbessert. Diese Technik ist vor allem für die textilen Prozesse wichtig (Gurit GmbH, 2016).

Verarbeitet werden die Fasern entweder in Form von Endlosfilamenten oder als Faserhalbzeuge. Die Endlosfilamente werden in endlose Faserbündel, sogenannte Rovings, zusammengefasst. Diese können bei Glasfaserrovings 6 bis 12.000 Filamente enthalten, bei Kohlefaserrovings bis zu 18.000 Filamente (Ehrenstein, 2006).

2.1.2 Faserhalbzeuge

Für eine einfachere Handhabung und Verarbeitung werden oft Faserhalbzeuge für großflächige Bauteile benutzt. Daher ist diese Materialart sehr gängig in der Rotorblattfertigung. Es gibt insgesamt drei Arten von Flächengebilden von Faserhalbzeugen:

- Gelege: ein- oder mehrschichtige textile Struktur mit verschiedenen Orientierungen (meist eine Kombination aus 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$), welche durch ein Maschensystem oder eine chemische Bindung fixiert wird. Siehe hierzu Abbildung 2-2 a).

- Gewebe: rechtwinklige verkreuzte Fäden bestehend aus einem Fadensystem aus Kette und Schuss. Siehe hierzu Abbildung 2-2 b).
- Geflechte: verkreuzte Fäden mit einem einstellbaren Kreuzungswinkel und schräger Ausrichtung zur Warenkante werden zu einem Endlosschlauch verflochten. Siehe hierzu Abbildung 2-2 c).

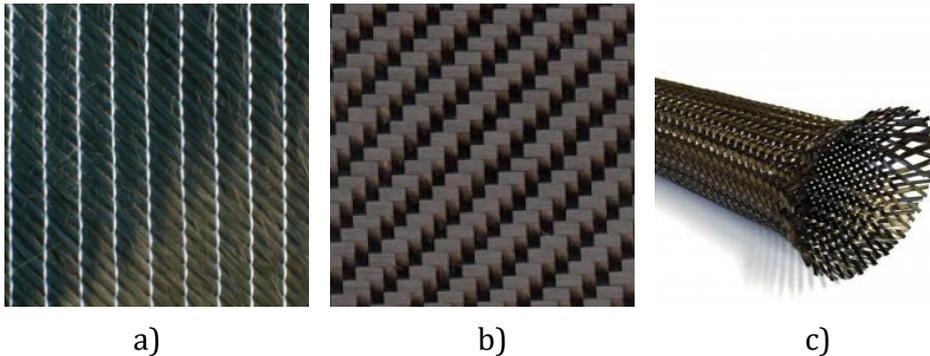


Abbildung 2-2 Faserhalbzeugarten:

- a) Gelege (Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH, 2017),
b) Gewebe (Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co KG, 2017) und
c) Geflecht (Composites4U, 2017)

Die genauen Definitionen der Flächengebilde sind in der DIN 60000 bzw. EN 13473-1 verfasst. (AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V, 2014). Eine erweiterte Form sind Faser-Matrix-Halbzeuge, auf welche im nächsten Kapitel genauer eingegangen wird.

2.1.3 Matrix

Fasern sind in ihrer losen Form nicht verwendbar, erst wenn sie in eine Bettungsmasse, die sogenannte Matrix, eingebunden werden und in kompakter Form vorliegen, ist es möglich, die Vorteile ihrer hohen Steifigkeit und Festigkeit zu nutzen. Somit übernimmt die Matrix die wichtigen Aufgaben der Fixierung der Fasern, Schutz vor Umwelteinflüssen und der Krafteinleitung/-übertragung, allerdings stellt die Matrix auch einen großen Schwachpunkt des Bauteils dar (Schürmann, 2007). Senkrecht zur Faserrichtung bestimmt die Matrix die Zugfestigkeit des Verbundes. Da diese sehr gering ist, kommt es schnell zur Rissbildung und so zur Schwächung des Verbundes. Außerdem sind Schäden schwer zerstörungsfrei zu erkennen und meist schwierig zu reparieren (Ehrenstein, 2006).

Als Matrixwerkstoff werden Metalle, Gläser, Kunststoffe, Beton und Keramiken genutzt (Schürmann, 2007). In dieser Arbeit werden jedoch nur Kunststoffe als Matrixwerkstoff betrachtet, da diese die gängigsten Matrixwerkstoffe in der Windindustrie sind. Der Matrixwerkstoff wird in flüssiger Form in das Fasergelege oder -gewebe, meist unter Vakuum, mit einem Überdruck von 1 bar bis ca. 25 bar je nach Methode, infundiert. Allerdings gibt es auch die Technik des Handlaminierens, bei welcher mittels einer Anpressrolle das Harz in die Fasern gebracht wird und überschüssige Luft aus dem Werkstück gepresst wird. Diese Technik wird hauptsächlich im Bereich des Modellbaus, Sportboote oder bei Prototypbauten angewendet. In der industriellen Herstellung von Rotorblättern findet diese Technik keine Anwendung, deshalb wird sie in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Im Genaueren wird beim Matrixwerkstoff zwischen Duroplasten und Thermoplasten unterschieden. Duroplastische Harze haben den Vorteil hohe Steifigkeits- und Festigkeitswerte erreichen zu können und bei Raumtemperatur bessere Fließeigenschaften zu besitzen, allerdings ist ein Verformen nach dem Aushärtungs- bzw. Vernetzungsprozess, für welchen Härter und z.T. Beschleuniger verwendet werden, nicht mehr möglich. Außerdem neigen sie zur Sprödigkeit mit einer Bruchdehnung von wenigen Prozent.

Thermoplastische Harze hingegen sind auf Grund ihrer höheren Zähigkeit attraktiv und können nach dem Erstarren durch Aufschmelzen in ihrer Form verändert werden, da es sich beim Erstarren um einen rein thermischen und keinen chemischen Prozess handelt. Der Nachteil von Thermoplasten liegt in ihrer geringeren Steifigkeit sowie Wärmeform- und Chemikalienbeständigkeit (Ehrenstein, 2006).

Konkrete Vor- und Nachteile von Duroplasten und Thermoplasten im Vergleich sind in Abbildung 2-3 aufgelistet.

Duroplaste		Thermoplaste	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Hohes Elastizitätsmodul, geringe Kriechneigung, hohe Risszähigkeit	Nachträgliches Aufschmelzen nicht möglich, nicht schweißbar	Nebervalentbindungen bewirken Zusammenhalt und verhindern Abgleiten bei Kräfteinwirkungen	Hohe Kriechneigung, da keine räumliche Vernetzung
Vernetzungsdichte steigt mit höherer Temperatur	Mit Vernetzungsgrad sinkt Zähigkeit → sprödes Bruchverhalten steigt	Aufschmelzvorgang ist reversibel, schweißbar	Geringeres Elastizitätsmodul
Einfache Verarbeitung und Benetzung da sehr dünnflüssig	Füllstoffe oder Verstärkungsfasern werden benötigt, um mit Werkstoff konstruieren zu können	Einfach in der Handhabung und kostengünstig, kann recycelt werden	Geringe chemische Beständigkeit
Sehr gute thermische und chemische Beständigkeit		Geringes Risiko eines Sprödbruchs, zähes Bruchverhalten	Geringe Wärmeformbeständigkeit

Abbildung 2-3: Vor- und Nachteile von duroplastischen und thermoplastischen Harzen nach (Schürmann, 2007)

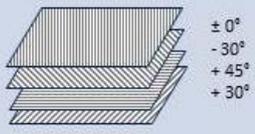
Bei Faser-Matrix-Halbzeugen wird das Flächengebilde (unidirektionale Schicht, Gelege oder Gewebe) bereits mit Matrixwerkstoff getränkt. Dieser Kombination aus Fasern und Harz wird Prepreg (preimpregnated fibres) genannt. Die Besonderheit ist, dass das Verhältnis von Fasern und Matrix genau definiert werden kann und das Flächengebilde vorimprägniert ist, sodass der Harzinjektionsprozess entfällt. Als Matrixwerkstoff werden duro- und thermoplastische Harze verwendet (AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V., 2014).

2.2 Fertigungsprozess von Faserverbundwerkstoffen

Auf Grund der Fortschritte in der Materialentwicklung von Fasermaterialien und Kunststoffen ist es immer wichtiger, kostengünstige und schnelle Verarbeitungsprozesse mit einem hohen Automatisierungsgrad zu entwickeln (Flemming, 1998). Um das Harz in die Faserstruktur zu integrieren, gibt es unterschiedliche Harzinjektionsverfahren. Diese Arbeit konzentriert sich, neben den fertigen Faser-Matrix-Halbzeugen, nur auf das Liquid Composite Moulding (LCM) Prinzip. Dabei handelt es sich um ein Prinzip, in welchem das flüssige Harz unter Kräfteinfluss, z.B. unter Vakuum, in die trockene Faser gebracht wird.

Dieser Vorgang wird so lange ausgeführt, bis das komplette Faserhalbzeug von dem Harz durchtränkt ist. Dieses Prinzip wird in unterschiedlichen Verfahren angewandt. Hauptsächlich unterscheiden sich die Verfahren durch das resultierende Verhältnis zwischen Harz und Faser. Jenes Verhältnis bezeichnet man als Faservolumengehalt. Grundsätzlich wird bei der Fertigung immer ein hohes Faservolumengehalt angestrebt.

In Abbildung 2-4 sind die gängigsten Typen von Faserverbundwerkstoffen aufgelistet. Bei den Verstärkungsformen unterscheidet man zwischen Kurz- und Langfasern. Per Definition handelt es sich bei Kurzfasern um gemahlene und in Einzelfasern aufgespaltete Fasern mit einer Länge zwischen 0,1mm und 5mm. Ab einer Länge von 5mm handelt es sich um Langfasern (Ehrenstein, 2006). In dieser Arbeit werden ausschließlich Duroplaste mit orientierten Glas-, Kohle oder Aramid - Langfasern betrachtet.

Werkstoff	Matrix	Faser
Faserhalbzeuglagen 	<ul style="list-style-type: none"> • Duroplast • Thermoplast • Metall • Keramik 	<ul style="list-style-type: none"> • Glasfaser • Kohlefaser • Aramidfaser • Borfaser • Keramikfaser

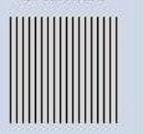
Verstärkungsformen	Kurzfaser (0,1 mm – 5 mm)	Langfasern (5 mm bis 27mm)
	Nicht orientiert 	Orientiert 
	Nicht orientiert 	Orientiert 

Abbildung 2-4 Faserverbundkonstruktionen nach (Bergner, 2016)

2.2.1 RTM Prozess

Das Resin Transfer Moulding (RTM) Verfahren gehört zu der Hauptgruppe der Liquid Composite Moulding (LCM) Verfahren und wird hauptsächlich zur Herstellung von Duroplasten verwendet. Zu aller erst wird eine trockene Verstärkungsstruktur während eines Umformprozess, maschinell oder manuell, in die grobe gewünschte Geometrie gebracht. Der Vorformling bzw. Preform wird daraufhin in die negative Form eingelegt (siehe hierzu Schritt 1 in Abbildung 2-5). Nach dem Schließen der beiden Formen wird das Harz-Härtergemisch über Harzinjektionsports unter geringen Druck bis zu 200 bar in die Form gespritzt, wie im zweiten Schritt in Abbildung 2-5 zu sehen ist (Neitzel, 2014).

Um den Harzfluss zu verbessern, kann zuvor ein Vakuum angelegt worden sein. Die Injektionsphase kann je nach Bauteilgröße zwischen 2 bis 5 Minuten variieren (Flemming, 1998). Nach der Injektion härtet das Bauteil im dritten Schritt unter Nachdruck und Temperaturen bis max. 80°C aus, somit erhält man eine hohe Formtreue. Zuletzt wird das Formteil aus dem Werkzeug entnommen und das Werkzeug für den nächsten Fertigungsdurchlauf vorbereitet.

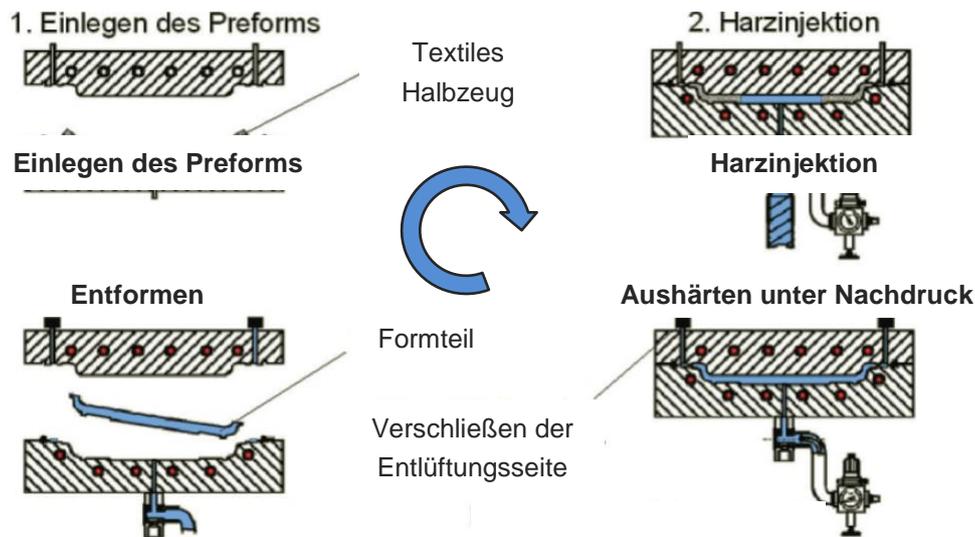


Abbildung 2-5: Prozessablauf RTM Verfahren (AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V, 2014)

Mit dieser Technik lassen sich hochwertige Bauteile herstellen, da ein Faservolumengehalt von 40% bis 50% erreicht, eine genaue Wanddicke definiert und eine hochwertige Oberfläche auf beiden Seiten hergestellt werden kann. Außerdem ist das Herstellen von Sandwichbauteilen in einem Schuss möglich. Ein weiterer Vorteil des RTM Verfahrens ist, dass es einen hohen Designfreiheitsgrad bietet und der Nachbearbeitungsaufwand meist sehr gering ist (AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V, 2014).

2.2.2 VARI Prozess

Die Abkürzung VARI steht für Vacuum Assisted Resin Infusion und gehört ebenfalls zur Hauptgruppe der LCM Verfahren, hat aber im Gegensatz zum RTM Verfahren nur eine einseitige Werkzeuggeometrie, wie in Abbildung 2-6 zu sehen ist. Auf der anderen Seite der Kavität wird eine luftdichte und reißfeste Folie verwendet. Dadurch fallen geringere Werkzeugkosten an und es ermöglicht eine optische Analyse des Fließverhaltens des Harzes während des Injektions- und Aushärtevorganges. Außerdem lässt dieses Verfahren die Fertigung von großen Bauteilen zu, bei welchen eine RTM Vorrichtung aus wirtschaftlichen oder fertigungstechnischen Gründen keine Option ist.

Auf der sogenannten Entlüftungsseite wird ein Vakuum angelegt, welches sich durch die gesamte Faserstruktur zieht. Dabei wird ein Anpressdruck der Vakuumfolie auf den Aufbau von maximal 1 bar erzeugt. Auf der gegenüberliegenden Seite wird das Harzreservoir mit einem Harz - Härter - Gemisch angeschlossen. Durch den Unterdruck fließt das Harz nun in Richtung Entlüftungsseite und durchtränkt das gesamte Bauteil (Flemming, 1998).

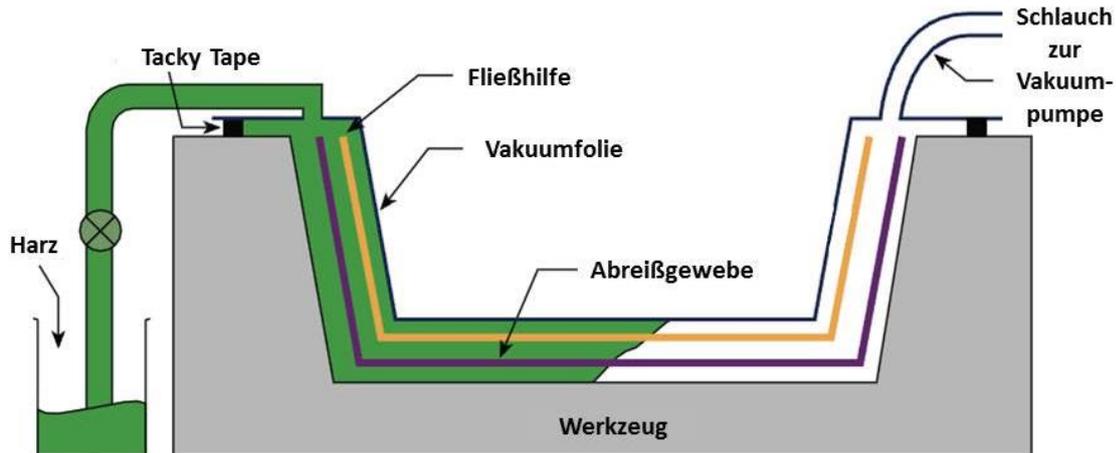


Abbildung 2-6 Schematischer Aufbau VARI Verfahren nach (Gurit GmbH, 2016)

In Abbildung 2-6 ist dieser Prozess schematisch visualisiert. Unter der Vakuumfolie werden Abreißgewebe und eine Fließhilfe eingelegt. Die Fließhilfe dient zum gleichmäßigen Verteilen des Harzes und das Abreißgewebe ist notwendig, um Fließhilfe und Vakuumfolie nach der Infusion und dem Aushärten, vom Bauteil zu trennen. Das Tacky Tape ist ein Siegel Kit und wird zum luftdichten Versiegeln der Vakuumfolie verwendet. Verschiedene Aushärtetemperaturen erfordern verschiedenen Siegelkit-Materialien.

Das bekannteste und in der Rotorblattfertigung vielfach angewandte VARI Verfahren ist das Seeman Composite Resin Infusion Moulding (SCRIMP) Verfahren. Hierbei kann das Harz-Härtergemisch über ein in die Folie eingepprägtes Kanalsystem gleichzeitig über die gesamte Fläche des Fasermaterials verteilt werden. Die Vorteile dieses Verfahrens sind der beschleunigte Imprägnierungsprozess und die verringerte Gefahr von Luft einschläüssen, denn der Luftgehalt beträgt meist weniger als 1% (Flemming, 1998).

2.2.3 Autoklav

Ein Autoklav ist ein aufheizbarer Druckkessel, in welchem Druck und Temperatur exakt und reproduzierbar einstellbar sind. Mit dem Autoklavaushärtungsprozess können Bauteile mit höchstem Anspruch gefertigt werden. Zwar ist die Autoklavhärtung

zeitaufwendig, mit höheren Energiekosten und mit einer hohen Anfangsinvestition verbunden, jedoch erreicht man die bestmögliche Fertigungsqualität. Dies liegt an dem hohen Faservolumengehalt der realisiert werden kann und der geringen Wahrscheinlichkeit von Lufteinschlüssen, denn durch den hohen Überdruck im inneren des Autoklaven entweicht die Luft aus dem Bauteil, ohne zu verdampfen und sich dabei auszudehnen.

Das Bauteil wird vor dem Aushärten, falls es sich nicht um Prepreg handelt, in einen Vakuumsack eingepackt und die Vakuum- und Harzleitungen müssen angeschlossen werden. Diese Arbeitsschritte werden manuell durchgeführt und sind je nach Bauteilgröße bzw. -komplexität sehr zeitaufwendig.

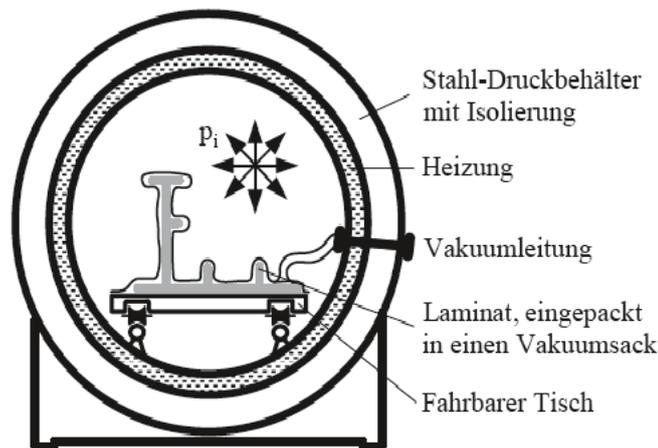


Abbildung 2-7: schematischer Autoklavenaufbau (Schürmann, 2007)

Ein schematischer Aufbau ist in Abbildung 2-7 zu erkennen. Der gesamte Aufbau wird mittels eines fahrbaren Tisches in den Autoklaven geschoben, in welchem das Bauteil je nach Harzsystem mehrere Stunden verweilt.

Bei diesem Verfahren ist mit einem Überdruck von 2 bis 25 bar ein Faservolumengehalt von bis zu 60% realisierbar. Allerdings muss die thermische Ausdehnung bei der Konstruktion beachtet werden, da Temperaturen von 170°C bis 180°C zur Aushärtung des Harzes im Autoklaven erreicht werden.

Dieses Verfahren wird jedoch selten in der Rotorblattfertigung verwendet. Hauptsächlich kommt es in der Luftfahrt und in der Formel 1 zum Einsatz (R&G Faserverbundwerkstoffe

GmbH, 2009), vor allem, wenn es sich um ein „design to weight“ Faserbauteil handelt (Flemming, 1998). Da es sich bei der Rotorblattfertigung aber eher um eine „design to cost“ Produktion handelt, wird der Autoklav in dieser Arbeit nur am Rande betrachtet.

2.3 Prinzipien der Kostenrechnung

Die Kostenrechnung ist die Grundlage des betrieblichen Rechnungswesens eines jeden Unternehmens. Sie dient der Sicherstellung der Erfüllung der unternehmerischen Ziele, der Rechnungslegung und ist eine Grundlage für die Entscheidungsfindung für z.B. Make-or-Buy Entscheidungen, Preisuntergrenzen oder Produktionsprogramme (Buchholz, 2016).

In der Kostenrechnung wird zwischen Kostenarten, Kostenstellen und Kostenträgern unterschieden. Bei den Kostenarten geht es darum, was für Kosten angefallen sind (z.B. Einzelkosten oder Gemeinkosten). Es handelt sich dabei um eine überschneidungsfreie Gliederung aller Kosten. Die Kostenstelle beschreibt, wo die Kosten angefallen sind (z.B. Material oder Energie). Hier wird zwischen räumlichen, funktionalen und aufbauorganisatorischen Orten der Kostenentstehung unterschieden. Bei dem Kostenträger wird sich die Frage gestellt, für welches Produkt, entweder Güter oder Dienstleistungen, jene Kosten angefallen sind. Auf diesem Grundprinzip bauen alle Arten der Kostenrechnung auf (Deimel, 2006).

In Abbildung 2-8 sind die in der Arbeit betrachteten Kostenrechnungsprinzipien aufgelistet. Im ersten Schritt wird zwischen dem Zuordnungs- und dem Verteilungsprinzip unterschieden. Der Unterschied dieser Prinzipien liegt in der Verteilung der Kosten auf Grund von unterschiedlichen Bezugsgrößen. Bei den Bezugsgrößen handelt es sich um Kostenarten, Kostenstellen und Kostenträger, zwischen denen unterschieden wird. In zweiter Ebene sind die Unterscheidungsmerkmale die Dimensionalität der Betrachtung bei dem Zuordnungsprinzip und die Herleitung des Verteilungsschlüssels bei dem Verteilungsprinzip.

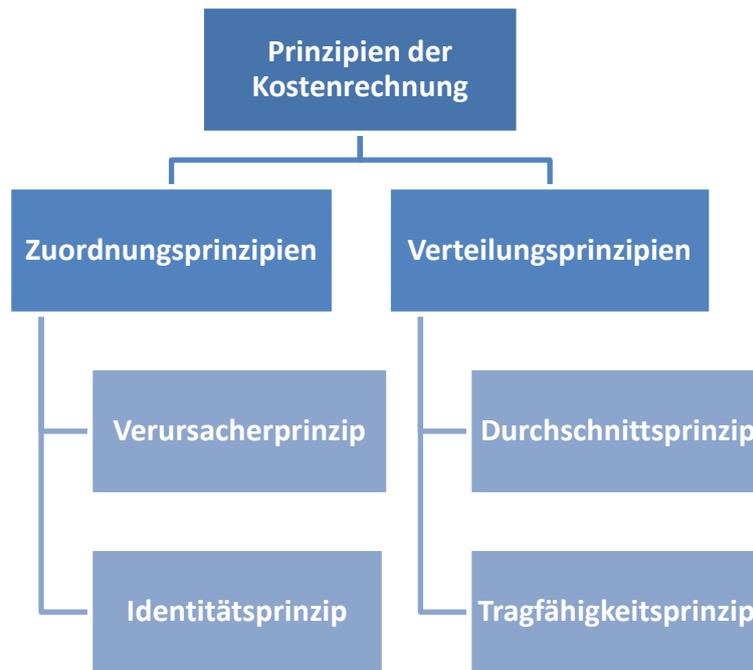


Abbildung 2-8: Kostenrechnungsprinzipien in der Übersicht

Es gibt vier Kategorien von Kostenträgern. Diese sind in Abbildung 2-9 mit jeweils zwei Beispielen aufgelistet. Anhand dieser Kategorien lassen sich später die anfallenden Kosten einordnen und bewerten.

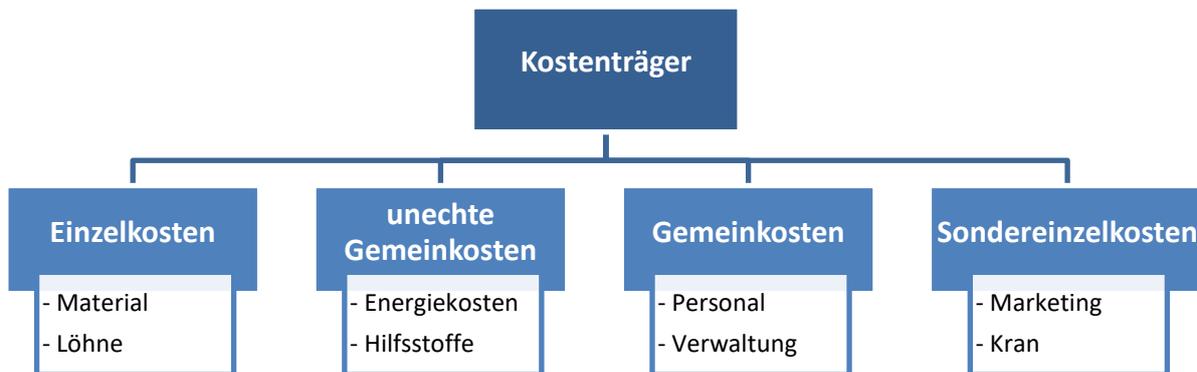


Abbildung 2-9: Kostenträgeraufteilung

2.3.1 Zuordnungsprinzip

Wie das Wort „Zuordnung“ bereits impliziert, werden bei dieser Methode die Kosten den Kostenträgern zugeordnet. Es werden die direkt auf die Produktion des Gutes einwirkenden Kosten betrachtet, die sogenannten Einzelkosten des Kalkulationsobjektes. Bei dieser direkten Kostenrechnung unterscheidet man unter anderem zwischen dem

Verursacherprinzip und dem Identitätsprinzip. Der hauptsächliche Unterschied dieser Prinzipien liegt in der Dimensionalität ihrer Betrachtung. Eine indirekte Kostenrechnung wird nicht betrachtet.

Das Verursacherprinzip, auch Kausalitätsprinzip genannt, ist ein eindimensionales Prinzip. Das Prinzip besagt, dass dem Kalkulationsobjekt nur jene Kosten zugeordnet werden dürfen, welche es tatsächlich verursacht. Bei dem Kalkulationsobjekt kann es sich um komplette Kostenstellen, um ein Produkt oder einen Betriebsbereich handeln. Die entstehenden Kosten bezeichnet man als Grenzkosten, denn es handelt sich um die Geldmenge, welche es braucht, um eine Einheit des Kalkulationsobjektes mehr zu produzieren bzw. wenn es sich nicht um ein Gut handelt, um eine Einheit zu erweitern (z.B. eine Person zusätzlich einstellen). Außerdem werden nur die Einzelkosten und die unechten Gemeinkosten mit einbezogen. Die fixen Anteile der Gemeinkosten und Sondereinzelkosten werden nicht betrachtet (Buchholz, 2016).

Das Identitätsprinzip hingegen ist ein mehrdimensionales Prinzip. Dies bedeutet, dass mehrere Bezugsgrößen betrachtet werden. Es werden die Zeitdimension, Leistungsdimension und Organisationsdimension betrachtet. Des Weiteren ist es die Grundlage für die relative Einzelkostenrechnung. Nach einer Definition von Paul Riebel besagt das Identitätsprinzip: „Kosten und Leistungen können nur insoweit einander gegenübergestellt werden, als der Verzehr an Gütern zur Erstellung von Leistungen auf dieselbe, identische Entscheidung zurückgeht. So kann der Erlös einer zusätzlich verkauften Einheit eines Produktes nur den Kosten gegenübergestellt werden, die durch dieselbe Entscheidung für die Erstellung dieser zusätzlichen Produkteinheit verursacht worden ist.“ Dabei ist die Zurückführbarkeit auf die Entscheidung das maßgebliche Kriterium für die Kostenzuordnung, daher hat dieses Prinzip auch seinen Namen. Es geht um die Identität, die Herkunft des Produktes. Somit wird bei dem Identitätsprinzip von einer anderen Ursache-Wirkung-Beziehung als im Verursacherprinzip ausgegangen (Riebel, 1994).

2.3.2 Verteilungsprinzip

Das Verteilungsprinzip besagt, dass die Kosten mit Hilfe eines Verteilungsschlüssels auf die jeweiligen Kostenträger verteilt werden. Hierbei wird ein Zusammenhang zwischen dem gesamten Output und den gesamten Kosten des Gutes gezogen.

Bei dem Durchschnittsprinzip stellt sich die Frage: Welche Kosten entfallen im Durchschnitt auf welche Kostenträger? Dieses Prinzip beinhaltet die Kosten, welche schwer exakt auf Kostenstellen, Kostenträger oder einzelne Perioden zurechenbar sind.

Darunter fallen z.B. Vorstandsgehälter, Verwaltungskosten oder Abschreibungen. Im Falle eines Unternehmens, welches nur Rotorblätter herstellt, werden die gesamten Kosten durch die gesamte Ausbringungsmenge dividiert. Falls das Unternehmen mehrere Güter produziert, werden die Kosten mit Hilfe eines Verteilungsschlüssels, auch Bezugsgrößen genannt, verteilt.

Kostenrechnung mit Hilfe des Tragfähigkeitsprinzips besagt, dass die nicht direkt zurechenbaren Kosten, dabei handelt es sich meist um die Gemeinkosten, in einem bestimmten Verhältnis, z.B. in einem proportionalen Verhältnis, auf die einzelnen Kostenträger verteilt werden. Hierfür verwendet man Kenngrößen wie Absatzpreise, Umsatz oder Deckungsbeiträge der jeweiligen Güter um die Kosten anteilig zu verteilen. Die Betrachtung dieser Kenngrößen ist zudem das Hauptunterscheidungsmerkmal zum Durchschnittsprinzip (Buchholz, 2016).

3 Prozessmodellierung

Im folgenden Kapitel geht es um die Betrachtung des gesamten Entstehungsprozesses vom Design bis hin zur Fertigstellung des Rohlings. Zuerst wird definiert, welche Aspekte in die Betrachtung mit einfließen. Daraufhin wird der Designprozess erläutert und der Bezug zu einem Prozessmodell gezogen. Auf Grundlage dieses Prozessmodells wird ein Prozesspfad konkretisiert.

3.1 Bestimmung Systemgrenzen

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden für die Betrachtung der Fertigungskosten folgende Systemgrenzen gesetzt (siehe hierzu Abbildung 3-1):

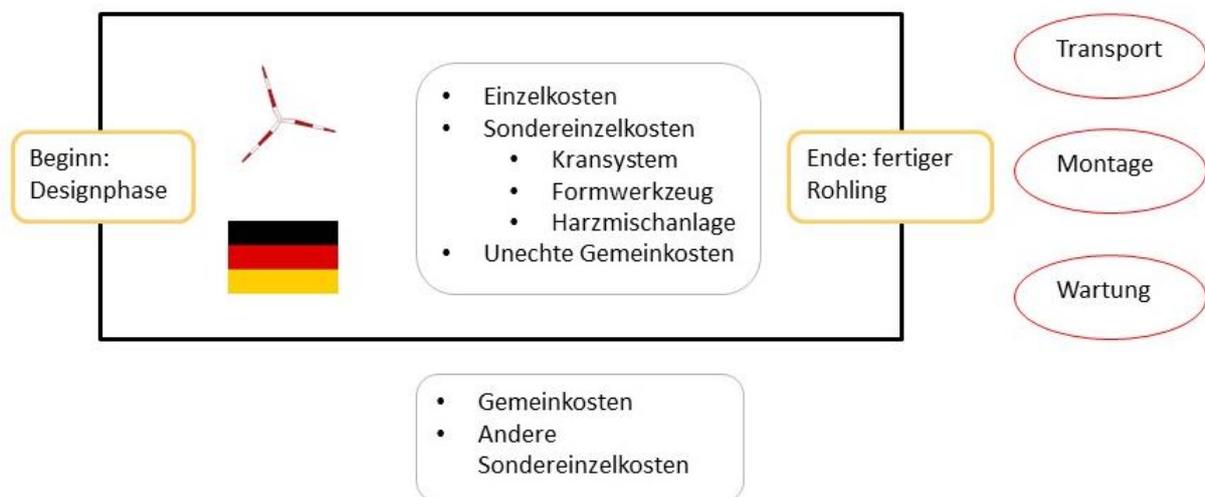


Abbildung 3-1: Veranschaulichung der Systemgrenzen

- Es werden nur Bauweisen von Rotorblättern einer dreiblättrigen Windenergieanlage analysiert.
- In die Betrachtung wird der Designprozess bis zur Fertigstellung des Rohlings einbezogen. Somit fällt der Transport an sich, die Montage und die Wartung nicht in die Kostenbewertung.
- Es werden nur Fertigungs-/Produktionseinzelkosten (z.B. Material) und Sondereinzelkosten (z.B. Anschaffung neuer Anlagen) betrachtet, außerdem werden unechte Gemeinkosten wie z.B. Hilfsstoffe zum Teil miteinbezogen. Nicht betrachtet werden Gemeinkosten wie z.B. die Verwaltung

- Von möglichen Investitionskosten werden der Kran, die Harzmischanlage und das Formwerkzeug betrachtet. Die Halle, Lüftungs- und Kühlsysteme, Autoklaven und Öfen werden nicht betrachtet.
- Regionsgebundene Daten wie z.B. Mitarbeiterlöhne werden für Deutschland angenommen.

3.2 Generisches Modell

In den folgenden zwei Unterkapiteln werden die Prozesse des Designs und der Fertigung eines Rotorblattes generisch erläutert. Dies bedeutet, dass sie auf keine spezielle Rotorblattfertigung ausgelegt sind, sondern allgemein für jede Bauart zu betrachten sind. Das Ziel dieses generischen Prozesses ist, ihn sowohl für Vergleiche von unterschiedlichen Fertigungsmethoden zu benutzen, als auch einzelne Teilprozesse innerhalb einer Fertigungsmethode zu vergleichen. Somit ermöglicht uns der generische Prozess bei Variieren der Designparameter, die einzelnen Abhängigkeiten zu analysieren und aufzuzeigen.

3.2.1 Designprozess

Bevor der Designprozess startet, sind einige Parameter in der Regel im Vorwege festgelegt. Dabei handelt es sich meist um das zu verwendende Harzsystem und die Materialien. Daher werden diese Produktionsparameter nicht im Designprozess mit einbezogen.

In Abbildung 3-2 ist der schematische Ablauf des Designprozesses eines Rotorblattes dargestellt. Die Informationen stammen aus einem DLR-internen Experteninterview mit wissenschaftlichen Mitarbeitern, welche im Bereich Funktionsleichtbau für Rotorblattdesigns zuständig sind. Die maßgeblichen Designparameter, die in dieser Phase festgelegt werden sind die Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität. In die Komplexität fließt die geometrische und strukturelle sowie die Prozesskomplexität mit ein. Diese beiden Designparameter bedingen alle anderen Produktionsparameter. Auf diese logische Verkettung der Parameter wird in Kapitel 4 näher eingegangen. Als Faktoren für die Designauslegung fließen die Leistungsklasse, der Standort und ob es sich um eine On- oder Off-Shore Anlage handelt, mit in die Entscheidungen ein.

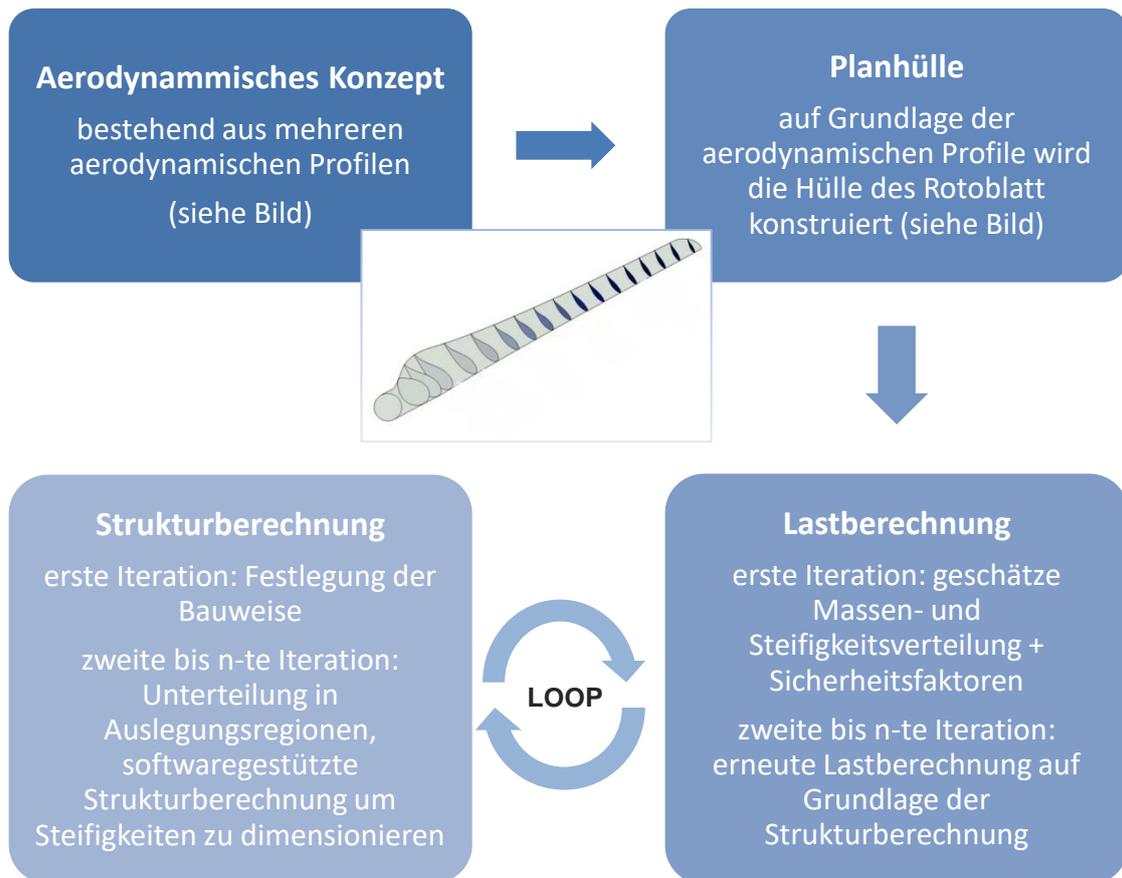


Abbildung 3-2: schematische Darstellung des Designprozesses,
Bildquelle: (Hau, 2014)

Als erstes wird ein aerodynamisches Konzept entworfen, welches aus einzelnen aerodynamischen Profilen, wie im Bild zu erkennen ist, besteht. Auf dieser Grundlage wird eine Planhülle konstruiert, welche die Profile umschließt. Danach beginnt die Arbeit des Strukturdesigns.

Im ersten Schritt wird eine geschätzte Massen- und Steifigkeitsverteilung aufgestellt, anhand derer man in der Strukturberechnung die Bauweise, wie z.B. die Anzahl der Stege oder Gurte, festlegt. Somit ist die erste Iteration erfolgt und die nächsten Iterationen folgen in einem Loop. Nachdem aus der Strukturberechnung neue Daten generiert werden, wird eine neue Lastberechnung durchgeführt. Daraufhin wird das Blatt in unterschiedliche Auslegungsregionen unterteilt, sodass abschnittsweise die Strukturberechnung zur Steifigkeit softwaregestützt durchgeführt wird.

Dieser Loop zwischen der Strukturberechnung und Lastberechnung durchläuft n Iterationen, bis die Designparameter auskonvergiert sind und ein eindeutiger Lageplan für die Faserhalbzeuge erstellt ist. Dieser Zustand ist erreicht, wenn die Massenänderung ein Konvergenzkriterium unterschreitet und die Zielfunktion erreicht ist. Danach wird

das Design der Konstruktionsabteilung übergeben, in welcher die Feinabstimmungen und die Anpassungen für die Produktion stattfinden. Die Hauptaufgabe der Konstruktionsabteilung ist, das Design in ein detailliertes CAD-Modell zu übertragen, anhand dessen die genauen Maße wie z.B. die sich ergebende Innenkontur bemessen werden können. Mit dem Durchlaufen der Konstruktionsabteilung ist die Designphase beendet und die Produktion kann beginnen.

3.2.2 Fertigungsprozess

Der Fertigungsprozess ist auf Grundlage von Experteninterviews mit Leichtbauingenieuren, Strukturmechanikern und Fertigungsingenieuren sowie auf Video-Material über Fertigungsabläufe von Rotorblattproduzenten aus der Industrie erstellt worden. Eine Liste der Videoquellen ist in Anlage 7 zu finden. Als Literaturquellen wird neben DLR internen Material hauptsächlich das Handbuch für Windenergie – Prozess der Rotorblattfertigung (Gurit GmbH, 2016) verwendet, sowie die Präsentation von dem Leiter für Konzepte und Technologieentwicklung für Fertigungssysteme der Firma Premium Aerotec (Apmann, 2016).

Die einzelnen Metaprozessschritte der Produktion sind in Abbildung 3-3 abgebildet. Es handelt sich hierbei um die Metaprozesse, also die übergeordneten Prozesse der Rotorblattfertigung. Die Diskretisierung geschieht auf Grundlage der verwendeten Anlagen und Werkzeuge. Somit soll ein Betrachten und Vergleichen von Abschnitten ermöglicht werden (Hilmer, 2015). Die Metaprozesse finden sich ebenfalls in Anlage 1 im Hauptprozess „Rotorblattfertigung“, in welcher die einzelnen Metaprozesse detailliert aufgeschlüsselt sind.

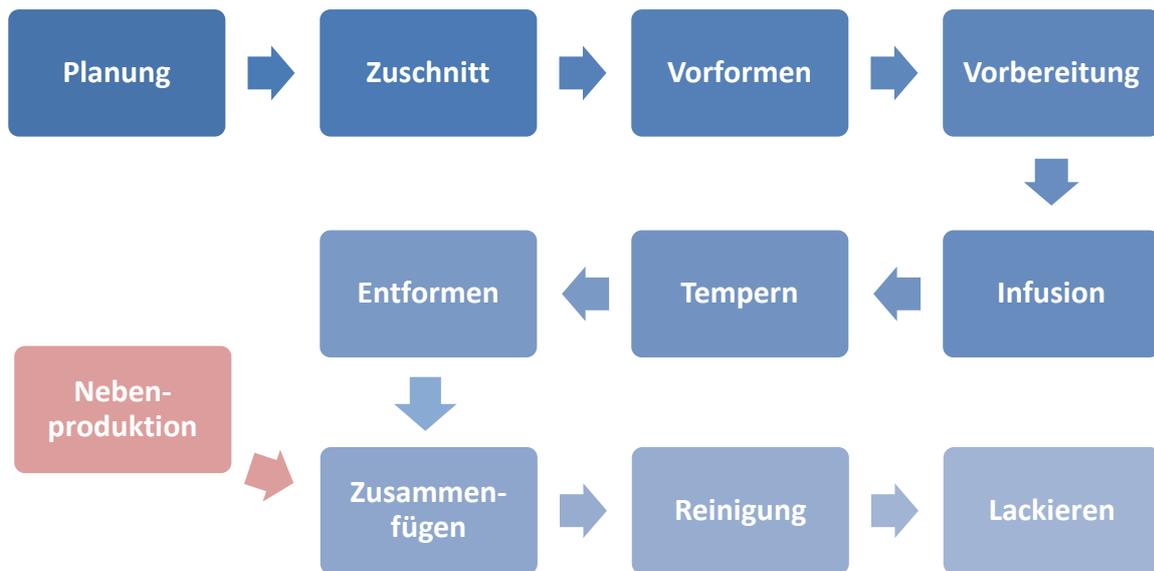


Abbildung 3-3: Metaprozesse des Fertigungsprozesses eines Rotorblattes

Um den Fertigungsprozess eines Rotorblattes übersichtlich darzustellen, wird der Prozess nach den Anforderungen der ISO 9001:2015 als Flussdiagramm mit dem Programm Microsoft Visio modelliert. Es handelt sich um einen generischen Prozess, welcher aus 4 Einzelprozessen besteht. Der Hauptprozess „Rotorblattfertigung“ findet sich im Anlage 1. Die Teilprozesse „Beschaffung Kran“, „Beschaffung Formwerkzeug“ und „Nebenproduktion“ sind im Anlage 2, 3 und 4 hinterlegt. In Abbildung 3-4 ist die Legende für den Prozess dargestellt. Alle Flussdiagrammsymbole beruhen auf den Richtlinien der DIN-Norm 66001 bzw. ISO-Norm 5807, außer der Metaprozess und die Entscheidungs-/Bestimmungs- und Designparameter. Diese sind für die Darstellung der Abhängigkeiten und Einflüsse der Parameter notwendig. Der Metaprozess wird aus Gründen der vereinfachten Darstellung und der Übersichtlichkeit miteinbezogen. Ein Prozesspfad ist mit einem roten Schatten hinterlegt worden, dieser stellt den konkretisierten Prozesspfad dar.

Legende

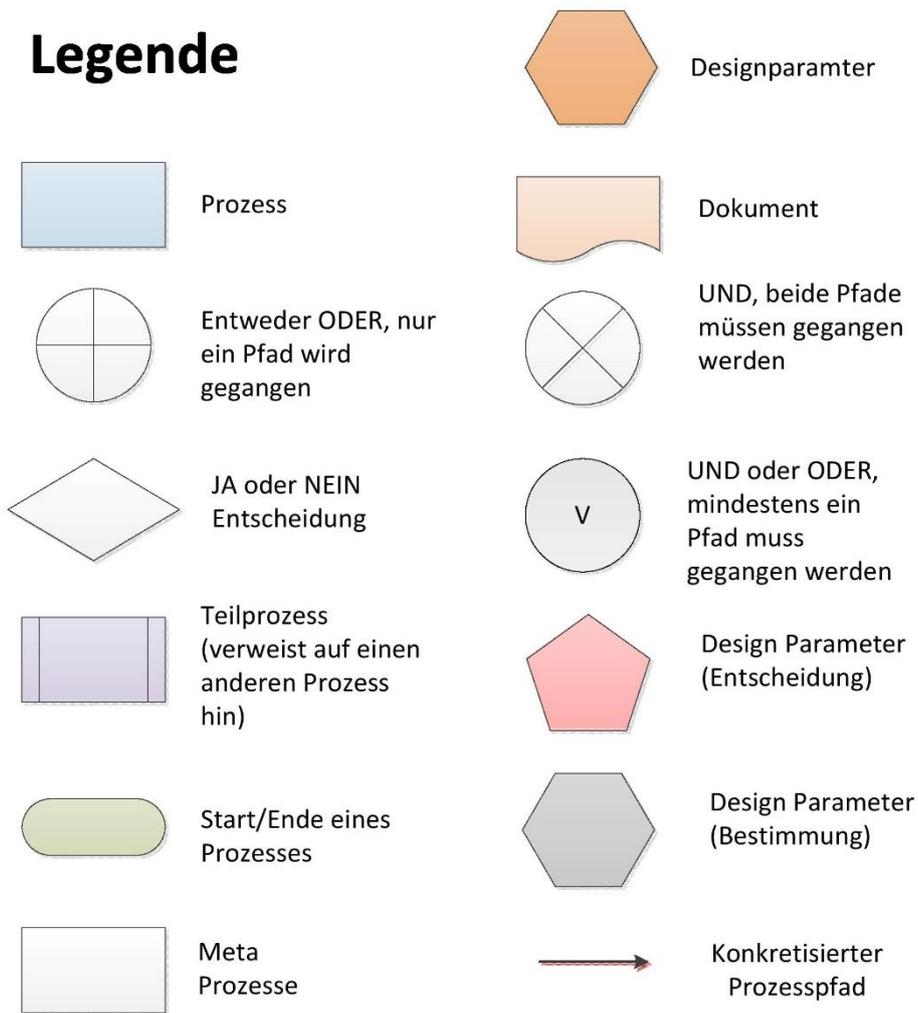


Abbildung 3-4: Legende der Symbole zum Lesen eines Prozesses

In Abbildung 3-5 ist ein Ausschnitt aus dem Hauptprozess „Rotorblattfertigung“ gezeigt. Es handelt sich dabei um den Metaprozess „Zusammenfügen“. Die rot unterlegten Pfeile zeigen den konkretisierten Prozesspfad. Auf diesen wird in Abschnitt 3.3 weiter eingegangen. In dem Prozessausschnitt sind in der linken Spalte die Verantwortlichen für die jeweiligen Prozessabschnitte aufgelistet, in diesem Falle Design- und Strukturingenieure, Produktionsingenieure sowie technische Mitarbeiter. In der Mitte sind die Prozessschritte und die jeweiligen Entscheidungen mit den Parametern visualisiert. Sie sind mit der Legende in Abbildung 3-4 zu lesen. In der rechten Spalte sind Dokumente oder Maschinen, welche für die Prozessschritte benötigt werden. Diese bezeichnet man als Input. In diesem Falle wird das Fügedesign sowie der Kran für den Schalentransport benötigt.

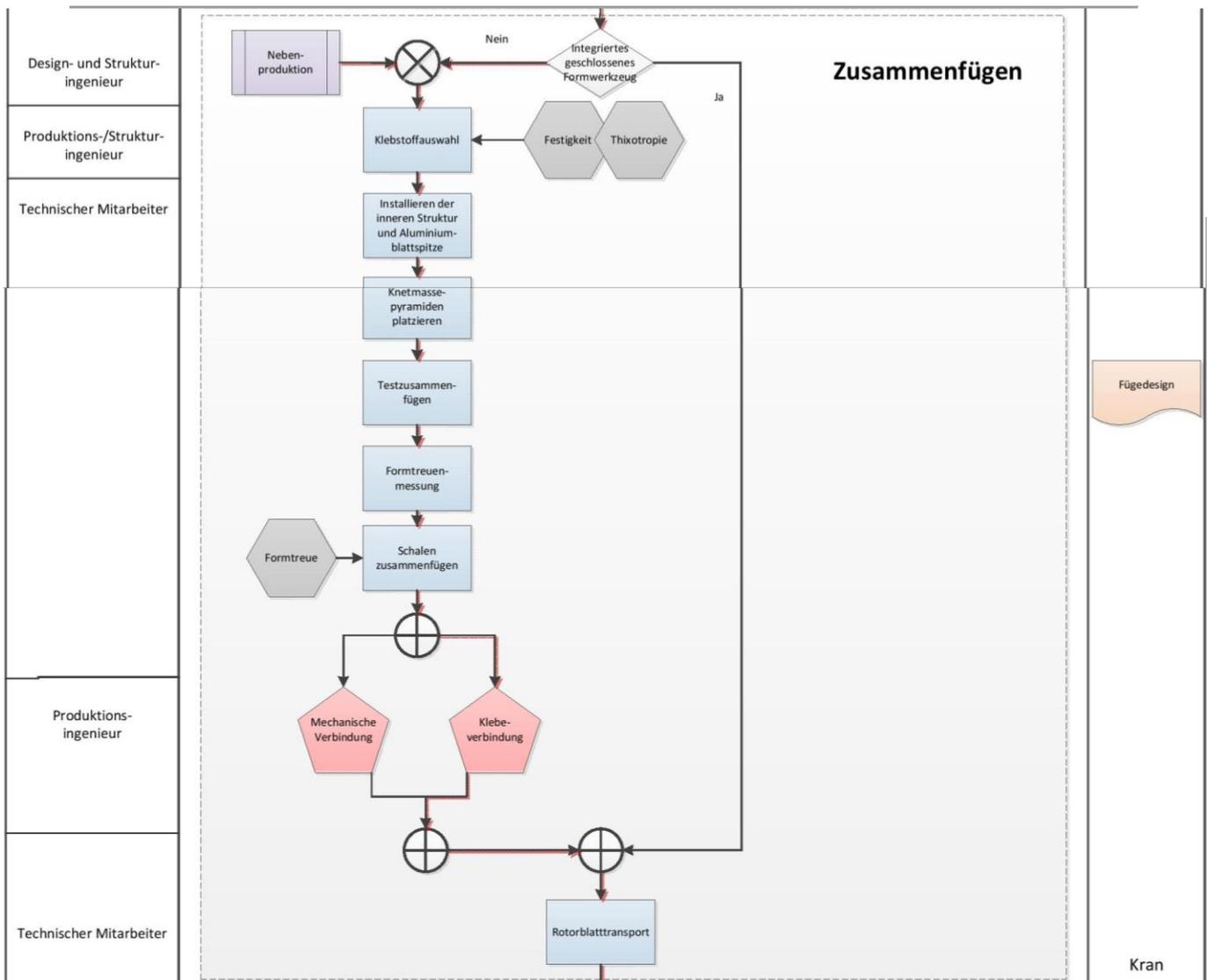


Abbildung 3-5 Prozessausschnitt „Zusammenfügen“

3.3 Konkretisierung eines Fertigungsprozesspfades

In diesem Abschnitt wird der Prozesspfad der Rotorblattfertigung konkretisiert, damit dieser in Kapitel 4 auf Abhängigkeiten der Fertigungskosten von Designparametern untersucht werden kann. Die Konkretisierung wird aus Gründen der Vergleichbarkeit und Vereinfachung vorgenommen. Da es unzählige Methoden und Techniken eines Rotorblattdesigns und einer Rotorblattfertigung gibt, muss sich im ersten Schritt auf einen Prozesspfad beschränkt werden. Somit kann eine eindeutige Abhängigkeit der Designparameter untersucht werden, denn die Analyse wird nicht durch die möglichen Prozessvariationen verzerrt.

Die im Nachfolgenden beschriebenen Entscheidungen werden in der Realität vor der Fertigung getroffen. In den Prozessen in Anlage 1 bis 4 sind die Entscheidungen allerdings in den Durchführungsprozess mit eingegliedert, sodass die Entscheidungen leichter den

abhängigen Prozessschritten zuordenbar sind und die Auswirkungen der Entscheidung sofort ersichtlich sind. Zudem sind die Entscheidungen und die Prozessbeschreibungen rein qualitativ betrachtet. Die quantitative Betrachtung wird in Kapitel 4 punktuell durchgeführt.

Nachdem in Kapitel 3.2.2 der Fertigungsprozess in generischer Form erklärt und diskretisiert wird, wird in diesem Kapitel ein Fertigungsprozesspfad konkretisiert. Da es sich bei der Rotorblattproduktion um eine sehr komplexe Fertigung handelt, welche viele Themengebiete der Ingenieurwissenschaften bedient, wird zur Informationsbeschaffung ein Experteninterview mit Leichtbauingenieuren, Strukturmechanikern sowie Fertigungsingenieure durchgeführt. Die Entscheidungen an den jeweiligen Knotenpunkten werden sowohl mit dem Wissen aus dem Experteninterview als auch mit Hilfe von Literatur getroffen. Aktuelle Informationen aus der Industrie konnten nicht verwendet werden, da konkrete Fakten aus der Industrie zu Rotorblattfertigungsprozessen nicht verfügbar sind. Des Weiteren werden Informationen aus dem internen Projekt RoDeO vom Deutschen Luft- und Raumfahrtzentrum verwendet.

Der konkretisierte Prozesspfad handelt gilt für eine gängige nach dem Stand der Technik (wie in Abbildung 3-6 dargestellt), welcher anhand der roten Unterlegung in dem Hauptprozess und Teilprozessen in den Anhängen 1 bis 4 zu entnehmen ist.

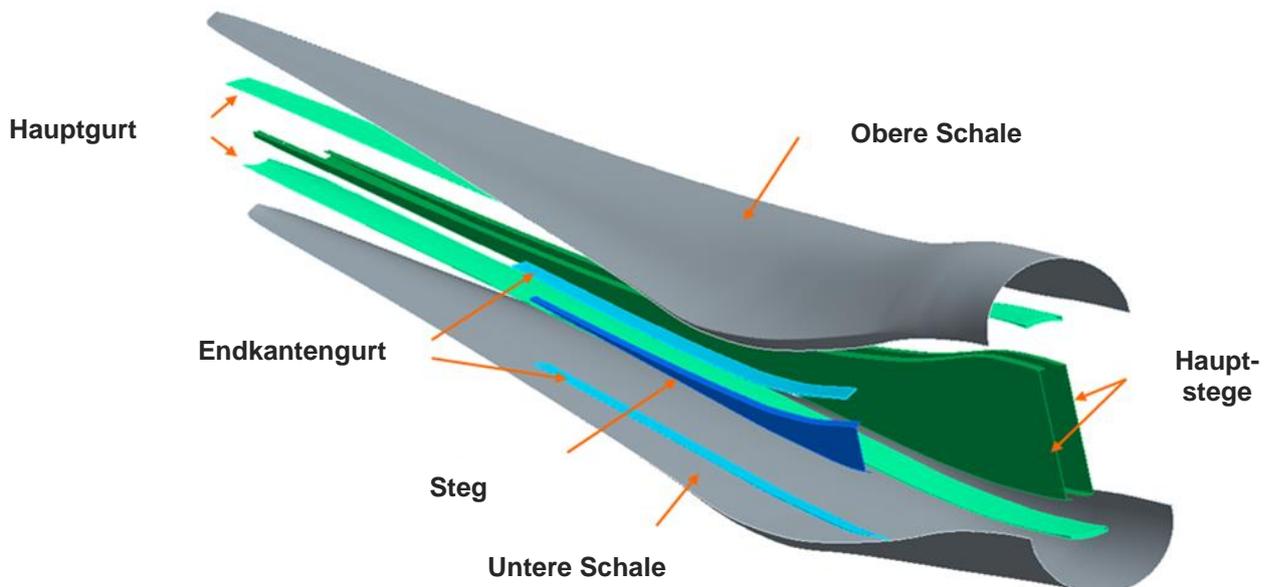


Abbildung 3-6: Beispielhafte gängige Bauweisen nach dem Stand der Technik (Al-Lami, 2015)

Grundlegend besteht der Prozess aus den Metaprozessen wie in Abbildung 3-3 gezeigt. Der Prozess (siehe hierzu Anlage 1) beginnt mit der Fertigstellung des Rotorblattdesigns.

Bevor mit der Herstellung des Blattes begonnen werden kann, müssen Vorbereitungen getroffen werden. Diese Vorbereitungen sind in dem Metaprozess „Planung“ enthalten. Die in unseren Systemgrenzen mit inbegriffenen Vorbereitungen sind die Bereitstellung eines Formwerkzeuges und eines Kransystems.

Der rechte Pfad führt zum Kransystem, welches in diesem Falle nicht vorhanden ist, sodass das Kransystem beschafft werden muss. Hierfür muss der Prozess „Beschaffung Kransystem“ in Anlage 2 betrachtet werden. Für das Kransystem sind die Parameter Spannweite, Lastkraft und der Hakenweg relevant. Die Spannweite wird durch die Breite der Halle bestimmt. Zwar liegt die Betrachtung der Fertigungshalle außerhalb unserer Systemgrenzen, allerdings verhält sich die Lastkraft eines Krans antiproportional zur Spannweite. Der Hakenweg muss deswegen betrachtet werden, da bei dem Zusammenfügen der Rotorblätter eine Schale um 180° gedreht werden muss. Hierfür benötigt man genügend Hakenweg und evtl. eine Spezifikation des Hakens. Danach wird die Krananzahl bestimmt. Der ausschlaggebende Faktor ist dabei die Rotorblattlänge und -geometrie. Je nach Vorbiegung und geometrischer Biegetorsionskopplung hat das Rotorblatt eine konkave Form und ist somit schwerer zu transportieren, da man einen längeren Hakenweg benötigt und die Eigenschwingung des Blattes kontrollieren muss. Außerdem nimmt mit der Länge die Durchbiegung des Blattes durch sein Eigengewicht zu. Da bei dieser Arbeit das Up-Scaling von Rotorblättern analysiert wird, bietet es sich an, die Last auf zwei Kräne zu verteilen, denn die resultierenden Lasten überschreiten ab 80m Rotorblattlänge die Tragfähigkeit eines Katalogkranes. Somit müsste man auf Sonderkräne umstellen, welche einen exponentiellen überproportionalen Kostenanstieg bedeuten würden.

Als nächstes wird das Kranprinzip gewählt. Zur Auswahl stehen der Einlaufkran und Zweilaufkran. Der Unterschied besteht in der Anzahl der Querträger, an denen die Katze des Kranes entlangfährt. Bei einem Zweilaufkran verteilen sich die Lasten dementsprechend auf zwei Träger. Somit ist die Gesamttragfähigkeit eines Zweilaufkranes größer als die eines Einlaufkranes. Einlaufkräne können eine Last von bis zu 10t tragen. Wie in Abbildung 3-7 ablesbar ist, kann das Einlaufkransystem bis zu einer Rotorblattlänge von ca. 60m verwendet werden, danach muss auf das Zweilaufkransystem zurückgegriffen werden, da die aufgeteilte Traglast für den Kran das Limit von 10t überschreitet.

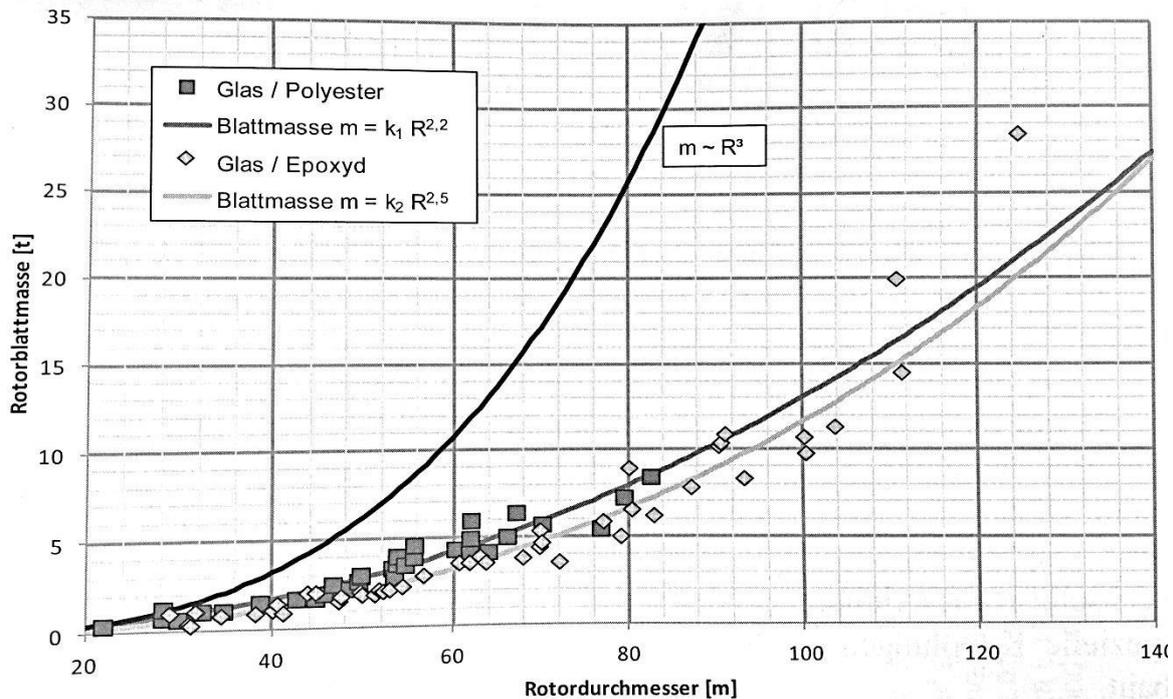


Abbildung 3-7: Rotorblattmasse in Abhängigkeit vom Rotordurchmesser und Werkstoff (Gasch, 2016)

Im zweiten Vorbereitungspfad in Anlage 1 wird das Formwerkzeug betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass dieses noch nicht vorhanden ist. Somit wird der Prozess „Beschaffung Formwerkzeug“ in Anlage 3 durchlaufen. Als erstes müssen die Anforderungen an das Formwerkzeug definiert werden. Hier fließen die Faktoren thermische Verformung, Rotorblattlänge und -geometrie mit ein. Das häufigste Ausschusskriterium sind die Oberflächenschäden sowie Beschädigungen der Zentriereinheiten und die thermische Verformung, durch welche sich die Formwerkzeuggeometrie ändert und Eigenspannungen im Material entstehen. Deswegen ist es wichtig, dass Materialien gewählt werden, welche für die späteren Aushärtetemperaturen und Entformungsprozesse genau ausgelegt sind. Die Rotorblattgeometrie ist deswegen relevant, da komplexere Geometrien z.B. durch eine geometrische Biegetorsionskopplung oder einer Vorbiegung konstruiert werden müssen. Dies bedarf ein größerer Planungs- und Fertigungsaufwand des Formwerkzeuges.

Nachdem die Anforderungen an das Formwerkzeug bestimmt sind, führt die rote Linie weiter über den Teilprozess „Beschaffung Formwerkzeug“. Zunächst muss das Formwerkzeug-Konzept gewählt werden. Hierfür stehen ein geschlossenes und ein offenes Konzept zur Auswahl. Auf diese Entscheidung hat ebenfalls das Design der inneren Struktur des Rotorblattes einen großen Einfluss. Handelt es sich z.B. um eine integrale Bauweise oder eine strukturelle Biegetorsionskopplung, ist ein geschlossenes

Konzept bzw. eine aufwändigere Herstellung der Holme einzuplanen. In diesem Fall wird die offene Version gewählt. Das offene Formwerkzeug-Konzept ist das in der Industrie gängigere, denn das Prozessrisiko ist geringer. Dieses Konzept bietet mehr Möglichkeiten der nachträglichen Korrektur bzw. Reparatur. Somit ist die Qualitätssicherung auch einfacher durchzuführen. Des Weiteren sind die aktuell verwendeten Rotorblattedesigns für die offenen Formwerkzeuge ausgelegt, sodass ein Umstellen des Formwerkzeugkonzepts ein angepasstes Design erfordert. Lediglich Siemens verwendet die Technik eines geschlossenen Formwerkzeuges in einer Test-Blätternversion. (Siemens AG, 2012) Als nächstes wird das Heizsystem in das Formwerkzeug implementiert. Dieses wird für das spätere Aushärten der Rotorblattschalen benötigt. Es wird ein raumtemperaturhärtendes Harz verwendet, allerdings kann der Aushärtungsprozess durch Erwärmung beschleunigt werden. Dieses Zeitersparnis ist der Grund, warum ein integriertes Heizsystem im Formwerkzeug verwendet wird. Daraufhin wird das Material für das Formwerkzeug bestimmt. Zur Auswahl stehen Metalle, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe. Für die Anforderungen der Windenergiebranche bietet sich der Glasfaserverbundwerkstoff an. Das Material Metall ist zum einen teurer im Gegensatz zu Glasfaser, zum anderen lässt sich schwieriger das benötigte Heizsystem im Formwerkzeug implementieren. Dabei ist es irrelevant, ob ein elektrisches Widerstandsheizsystem oder ein Fluidheizsystem verwendet werden soll. Außerdem bedeutet das zusätzliche Formwerkzeuggewicht höhere Anforderungen an den hydraulischen Klappmechanismus für das Zusammenfügen der Blattschalen. Bei der Verwendung von Kunststoff ist die maximale Belastung des Formwerkzeuges kritisch zu betrachten, denn bei den in dieser Arbeit analysierten Rotorblättern handelt es sich um Massen für Rotorblätter einer Länge ab 50m. Ein Formwerkzeug aus Kunststoff hat ebenfalls den Nachteil bei längeren Rotorblättern nicht genügend Stabilität bieten zu können, vor allem für den Entformungsprozess, bieten zu können. Daher hat ein Glasfaserformwerkzeug die Vorteile kostengünstig zu sein, geringeres Gewicht und eine hohe Stabilität zu besitzen. Außerdem lassen sich das elektrische Widerstandsheizsystem bzw. die Kanäle für die Fluidtemperierung einfacher integrieren und es besitzt ähnliche thermische Verformungseigenschaften wie das Bauteil selbst.

Nachdem Formwerkzeug und Kransystem bereitgestellt sind, beginnt die Fertigung des Rotorblattes. Der erste Metaprozess ist der „Zuschnitt“. Als Materialien für die Haut stehen zur Auswahl Glasfasern, Kohlenstofffasern und Aramidfasern. Bei dieser Entscheidung handelt es sich um eine XOR - Entscheidung, sodass ein oder mehrere Materialien ausgewählt werden können. Durch die Kohlefasern lassen sich Rotorblätter mit geringerem Gewicht fertigen. Außerdem können die Steifigkeitsanforderungen bei längeren Rotorblättern ab 40 m ggf. nicht mehr mit reiner Glasfaserbauweise erreicht

werden, bzw. nur noch mit einem unverhältnismäßig hohen Gewichtszuwachs. (Hau, 2014) Aramidfasern kommen seltener zum Einsatz, da sie gegenüber Kohlenstofffaser und Glasfasern eine geringe Scherfestigkeit besitzen. Zwar weisen Aramidfasern, genauso wie Glasfasern, eine geringere Bruchempfindlichkeit auf, jedoch neigt diese Faserart unter UV-Strahlung zum Altern. (Flemming, 1998) Kohlenstoff- und Glasfasern weisen beide eine hohe Steifigkeit und Festigkeit mit gleichzeitig geringer Dichte auf, wobei Kohlenstofffasern bessere Steifigkeitswerte erreichen und zudem leichter sind. Dafür sind Glasfasern günstiger im Einkauf. Daher werden die Gurte und Stege aus Kohlefasern und restliche Schale aus Glasfasern gefertigt.

Im nächsten Schritt wird festgelegt, dass die Fasern in Form von Faserhalbzeugen verarbeitet werden. Diese Entscheidung beruht auf der einfachen Handhabung von Halbzeugen bei großflächigen Bauteilen in Kombination mit der Möglichkeit schnell große Mengen ablegen zu können. Prepreg wird dagegen seltener verwendet, da zum einen durch die Vorimprägnierung das Faser-Matrix-Halbzeug in seiner Drapierbarkeit stark eingeschränkt ist und somit komplexere Formen wie z.B. bei einer geometrischen Biegetorsionskopplung schwer realisierbar sind. Zum anderen wird für das Aushärten ein Autoklav benötigt, welcher eine hohe Anfangsinvestition bedeutet und zudem je nach Rotorblattlänge die mechanischen und geometrischen Anforderungen an den Autoklaven stark ansteigen lässt. Außerdem muss Prepreg bei geregelter Luftfeuchtigkeit bei -18°C gelagert werden, sodass zu den höheren Einkaufspreisen noch zusätzlich hohe Lagerkosten entstehen würden. Rovings stellen auf Grund der zu belegenden Fläche einen zu großen Zeitaufwand dar. Lediglich bei unidirektionalen Bauteilkomponenten kann diese Technik aus wirtschaftlicher Sicht angewandt werden. Einhergehend mit dieser Entscheidung wird auch festgelegt, ob eine Infusion im späteren Prozessverlauf durchgeführt werden muss oder nicht. Da im Prepreg Material das Harz bereits mit dem Fasermaterial eingelegt wird, entfallen jegliche Infusionsprozessschritte, welche bei dem trockenen Halbzeugfasermaterial zusätzlich durchgeführt werden müssen.

Der im Designprozess festgelegte Lagenplan mit den jeweiligen Faserausrichtungen ist für den nächsten Prozessschritt relevant. Die Faserhalbzeuge gibt es in unidirektionaler, bidirektionaler, tridirektionaler und multidirektionaler Ausführung. Die Verwendung eines unidirektionalen Halbzeugs wäre in Hinblick auf Formtreue und Faserausrichtung optimal, allerdings würde der Lagenaufbau zu viel Zeit in Anspruch nehmen. Daher wird eine Mischung zwischen bi- und multidirektional gewählt, somit können mehrere Lagen unterschiedlicher Faserausrichtung in einem Schritt abgelegt werden. Zuvor werden die Lagen mit einem Cutter zugeschnitten, falls die Maße des gelieferten Materials nicht dem Lageplan entsprechen. Somit endet der Metaprozess „Zuschnitt“.

Der Metaprozess „Vorformen“ beginnt mit dem Vorbereiten des Formwerkzeugs. Dieser Vorgang beinhaltet das Eintrennen des Formwerkzeugs mit Trennmittel, damit das Rotorblatt bei dem Entformungsvorgang leichter auf dem Formwerkzeug zu entnehmen ist. Dieser Prozessschritt ist ausschlaggebend für die Oberflächenqualität. Danach werden die einzelnen Halbzeugfaserlagen in die Form nach einem vorgegebenen Ablageplan abgelegt. Hier ist eine hohe Sorgfalt nötig, denn die genaue Einhaltung des Ablageplans beeinflusst maßgeblich die Formtreue und somit die aerodynamischen Eigenschaften, sowie die geometrische Biegetorsionskopplung und Lastverteilung innerhalb des Blattes. Außerdem bedeutet das Nichteinhalten der geometrischen Form einen hohen Nacharbeitsaufwand. In den Faserlagen wird nun das Blitzableiter System integriert. Dabei werden sogenannte Einschlagpunkte im oberen Drittel des Rotorblattes eingebaut. Dieses Blitzableiter System ist notwendig, denn ein Blitzeinschlag kann zu Schädigungen elektrischer Komponenten und Oberflächenschäden bis hin zum Ausfall der Windenergieanlage führen.

Nach der Ablage werden die Fasern mit Hilfswerkzeugen geglättet, um Wellen innerhalb der Struktur zu verhindern. Auf die ausgerichteten Fasern wird dann das Sandwichmaterial gelegt. Hierbei handelt es sich entweder um Balsa Holz oder um Schaumstoffwerkstoffe. Der Schaum ist meist mit einer millimetertiefen Rillung versehen, dadurch gewinnt der Schaum minimal an Flexibilität und lässt sich besser in die konvexe Form der Rotorblattschale einlegen, allerdings verfügt er immer noch über eine hohe Eigensteifigkeit und ist deswegen schwierig zu drapieren. Der Schaumkern kann nur durch Thermoformen in die gewünschte Form gebracht werden, oder er muss vorher in die entsprechende Form gefräst werden. Dies ist ein aufwendiger und somit kostenintensiver Arbeitsschritt. Bei dem Balsa Holz sind Rillungen durch das gesamte Material gezogen bzw. einzelne Holzblöcke sind auf einem Trägermaterial geklebt, somit ist das Balsa Holz flexibler als der Schaum und einfacher zu verarbeiten. Der Nachteil des Holzes ist, dass in die Spalte zwischen den Blöcken sehr viel Harz fließt. Jedoch sind der zusätzliche Harzverbrauch und die resultierende Gewichtszunahme immer noch kostengünstiger als die Verwendung und Verarbeitung von Schaum. Schaum durch erschwerte Verarbeitung teurer

Nachdem das Sandwichkernmaterial in dem Bauteil verlegt wird, wird eine weitere Schicht Faserhalbzeug darübergerlegt und wie zuvor glattgestrichen. An diesem Punkt ist der Metaprozess „Vorformen“ abgeschlossen. Daraufhin folgt das „Vorbereiten“. Dieser Metaprozess beinhaltet den Vakuumaufbau und Vorbereitung auf den nächsten Metaprozess „Infusion“.

Da zuvor Faserhalbzeuge als Material gewählt wurde, beginnt dieser Prozess mit dem Zuschchnitt des Abreißgewebes und der Fließhilfe. Diese beiden Hilfsstoffe sind maßgeblich an einem Gelingen der Infusion beteiligt. Das Abreißgewebe wird für das spätere Entfernen der Vakuumfolie und der Fließhilfe von dem Werkstück benötigt. Die Fließhilfe bietet einen geringeren Widerstand, sodass sich das Harz gleichmäßig über das gesamte Bauteil verteilt. Danach werden die Injektionsports installiert. Diese werden zuvor in dem Infusionsplan festgelegt. Hierfür gibt es mehrere Methoden der Infusion. Es ist möglich die Injektionsports ringförmig anzulegen, auf einer Seite oder im Zentrum des Bauteils. Laut der Produktionsingenieure bietet bei der Rotorblattinfusion die Centre-Out Methode am meisten Vorteile. Allerdings wird diese Technik ergänzt durch eine Kaskadierung, damit das Bauteil über die gesamte Fläche gleichmäßig mit dem Harzsystem getränkt wird. Außerdem spart diese Methode Zeit, da das Blatt schneller komplett durchtränkt werden kann. In Abbildung 3-8 ist die Methode der Kaskadeninjektion dargestellt.

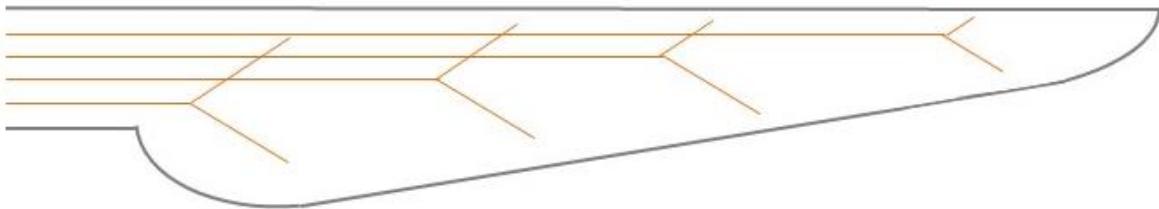


Abbildung 3-8: schematische Darstellung der Kaskadeninjektion

Um den Aufbau zu vervollständigen wird das Formwerkzeug mit einem Vakuumaufbau luftdicht verschlossen, der aus Vakuumfolie und Siegelkit besteht. Aus Sicherheitsgründen wird ein zweiter Vakuumsack angelegt, denn ein fehlerhaftes Vakuum kann zu einem Ausschuss des Rotorblattes führen oder zumindest zu einem hohen Aufwand in der Nacharbeitungsphase. Nun wird das Vakuum angeschlossen und überprüft, ob Leckagen vorhanden sind. Sobald das gewünschte Vakuum anliegt, wird das Harz injiziert. Es wird vorausgesetzt, dass es sich bei dem Injektionsverfahren um das VARI Verfahren handelt. Wie in Abbildung 3-9 zu sehen ist, wird seit den 2000er diese Technik ausschließlich angewendet, vor allem wenn es sich um längere Rotorblätter handelt.

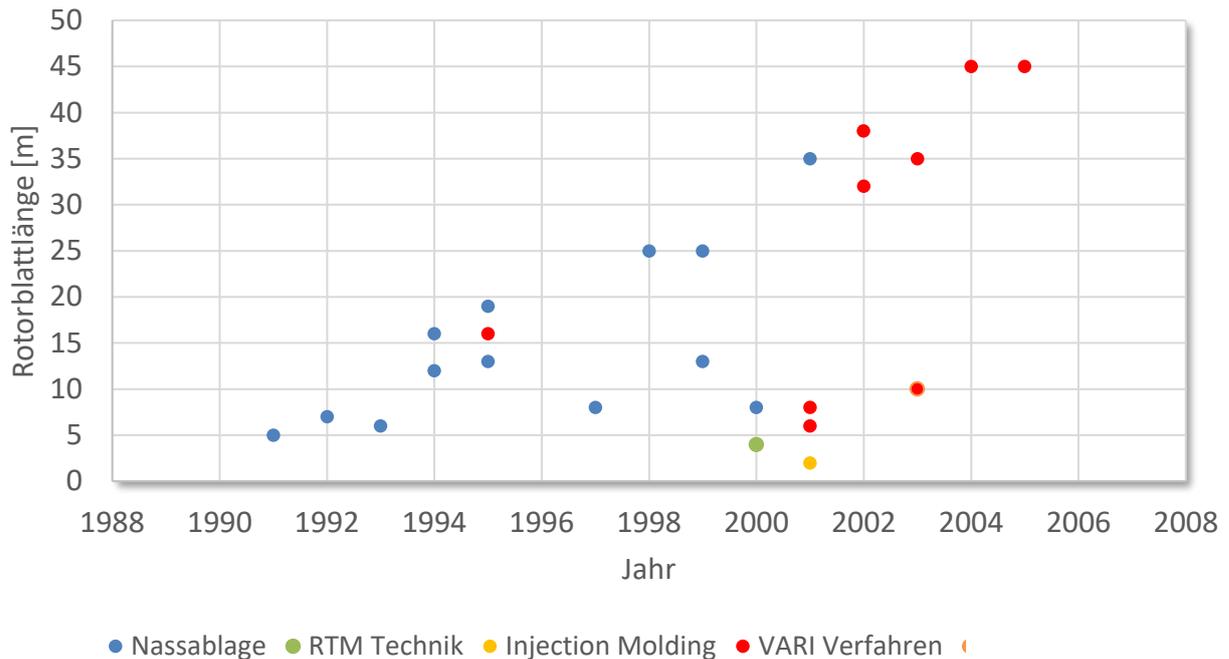


Abbildung 3-9: Entwicklung der Techniken der Rotorblattfertigung über einen zeitlichen Verlauf abhängig von der Rotorblattlänge nach (Gutierrez, 2017)

Bei der Harzauswahl kann allgemein zwischen Duroplasten und Thermoplasten entschieden werden. In diesem Fall werden duroplastische Harze verwendet, da die höheren Steifigkeits- und Festigkeitswerte gegenüber dem Thermoplast eindeutig von Vorteil bei der Auslegung von Rotorblättern sind. Bei allen Harzen handelt es sich um Epoxidharze. Zwar werden international auch Polyesterharze verwendet, in Deutschland wird der Gebrauch aus arbeitssicherheitstechnischen Gründen jedoch vermieden, denn in Polyesterharzen ist Styrol enthalten, welches gesundheitsschädliche Dämpfe absondert und somit einen höheren Aufwand für den Schutz der Mitarbeiter bedeutet.

Nachdem das gesamte Bauteil von dem Harz-Härter-Gemisch durchtränkt ist, muss dieses aushärten. Hierfür muss eine Aushärtetemperatur festgelegt werden. Diese wird eingeschränkt durch die thermische Formstabilität des Werkzeuges und des Wärmeausdehnungskoeffizienten der verwendeten Materialien. Außerdem beinhaltet das Aushärten einen großen Zeitfaktor. Deswegen wird die Aushärtezeit durch das integrierte Heizsystems im Formwerkzeug verkürzt.

Das Bauteil wird von der Vakuumfolie, dem Fließgewebe und dem Abreißgewebe befreit und nach einer visuellen Prüfung einem ersten Test unterzogen. Es handelt sich um einen NDT (non-destructive-technique) Test, bei welchen das Bauteil nicht beschädigt wird. Mittels Ultraschallwellen, Röntgenstrahlung oder einer Thermo-/Computertomografie können Lufteinschlüsse, Schrumpfungsrisse sowie Folieneinschlüsse detektiert werden. Falls Fehlstellen entdeckt werden, müssen diese ausgebessert werden oder das

Rotorblatt kann als Ausschuss deklariert werden und der Prozess wird von neuem gestartet. Ausbesserungen werden mittels des Handlaminierverfahrens durchgeführt, bei welchem das zusätzlich aufgebrachte Fasermaterial mit dem Harzsystem durchtränkt wird und manuell mit Hilfe von einem Handroller bzw. einer Handwalze entlüftet und verdichtet wird. Damit endet das „Entformen“.

Der nächste Metaprozess „Zusammenfügen“ ist nur für eine Fertigung mit offenem Formwerkzeugkonzepte relevant. Neben den beiden Schalen wird auch die innere Struktur zusammengefügt. Hierfür wird der Teilprozess Nebenproduktion in Anlage 4 betrachtet. Es gibt zwei gängige Methoden der inneren Struktur, die Integralholmenbauweise und die Differentialholmenbauweise. Die erste Methode ist in Abbildung 3-10 gezeigt.

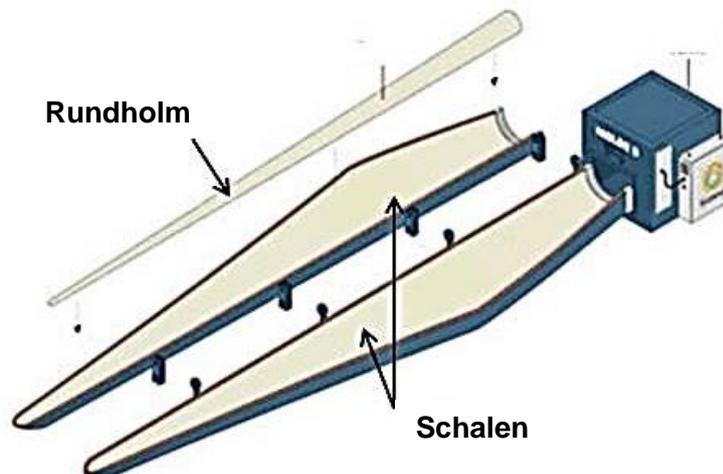


Abbildung 3-10: Integralholmenbauweise mit Rundholm (Gamesa Corporación Tecnológica, 2017)

Die innere Struktur besteht aus einem Rundholm, welcher mit Verbindungselementen mit der äußeren Struktur verbunden ist. Der Nachteil dieser Methode ist jedoch, dass die Materialverbindung zwischen dem Holm und der Schale eine höhere Fertigungsgenauigkeit verlangt sowie die Verbindungsfläche geringer ist als bei der Differentialbauweise. Diese Methode besteht aus einem Gurt, welcher in die Schale integriert ist, und der Stege, welche an dem Gurt befestigt werden und im Verbund einen Holm bilden. Die Differentialbauweise bietet somit eine einfache Blattintegration. Außerdem ist die Bauweise flexibler, sodass ein zusätzlicher Steg oder Gurt in das Design integriert werden kann. Aus diesen genannten Gründen wird die Differentialbauweise mit der Gurt-Steg-Technik gewählt. Diese Technik ist in Abbildung 3-11 zu sehen. Das Rotorblatt ist als Gesamtansicht und in einer Explosionsansicht abgebildet.

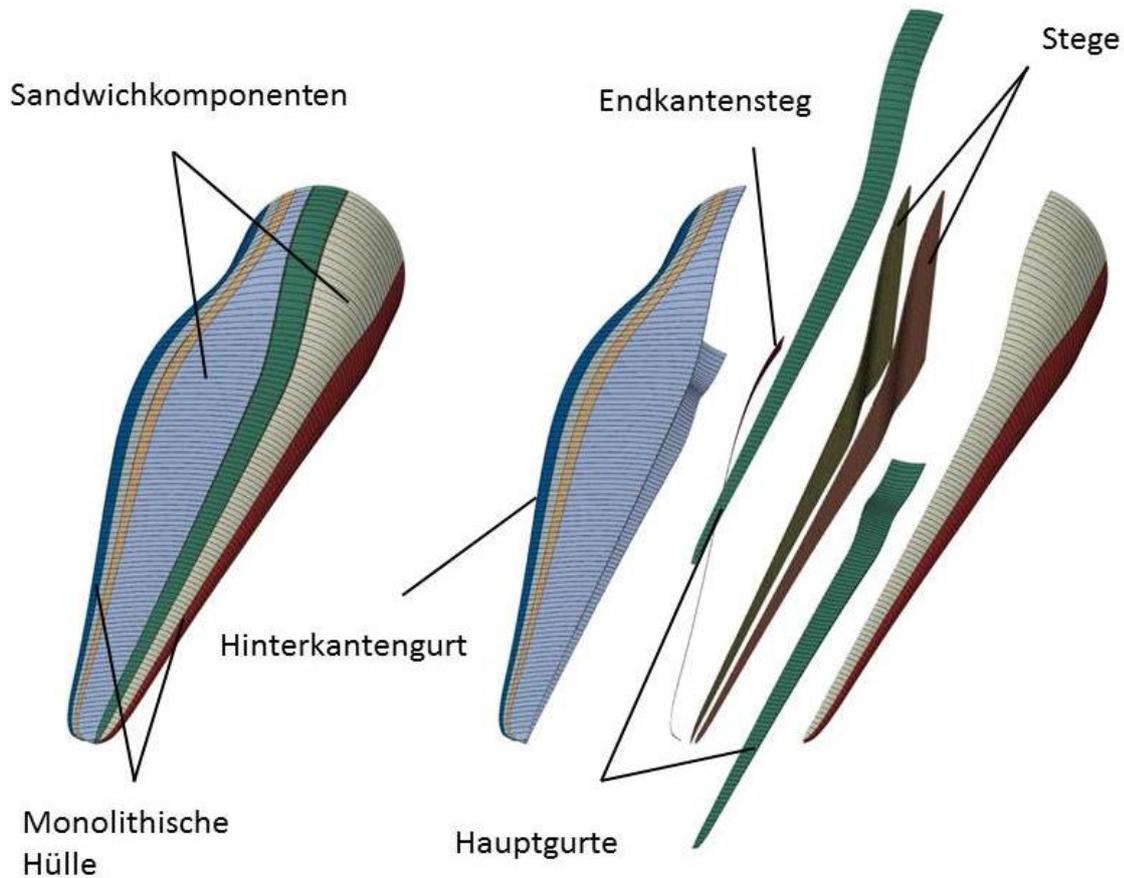


Abbildung 3-11: Außen- und Explosionsansicht der Differentialholmenbauweise nach (Bak et al., 2013)

Danach wird das Material für die Stege ausgewählt. Zur Auswahl stehen dieselben Faserarten wie für die Schale im Hauptprozess. Da die Stege für die Lastübertragung und Stabilität im Rotorblatt zuständig sind, wird das qualitativ hochwertigere Material verwendet. Die höhere Steifigkeit der Kohlefasern ist für die Materialanforderungen der Stege am geeignetsten. Die Lastübertragung innerhalb der Stege ist meist in vertikaler Richtung des Rotorblattes, deswegen verwendet man für diese Komponenten eine unidirektionale Faserausrichtung.

Nachdem diese Produktionsparameter festgelegt werden, geschieht die Fertigung analog zu den Schalen, deswegen sind die Metaprozesse Schneiden, Vorformen, Vorbereitung, Infusion, Tempern und Entformen aus dem Hauptprozess in Anlage 1 zu entnehmen. Schließlich werden die Stege zu den Halbschalen transportiert und der Teilprozess „Nebenproduktion“ ist abgeschlossen. Die nächsten Prozessschritte werden wieder im Hauptprozess betrachtet.

Nun werden die Stege in die Schale integriert. Dieser Metaprozess heißt „Zusammenfügen“. Neben der inneren Struktur wird auch die aus Aluminium bestehende Blattspitze, welche die Aufgabe des Blitzableitens hat, in die Rotorblattschalen integriert und mit dem bereits im inneren verbauten Blitzableitersystem, den Einschlagpunkten, verbunden. Für den Fügeprozess an sich wird als erstes das Klebharz ausgewählt. In diese Entscheidung fließen die thixotropen Eigenschaften des Klebstoffes während der Verarbeitung und die mechanische Festigkeit der ausgehärteten Klebung mit ein. Nachdem die untere Seite der Stege mit der unteren Schale verklebt wird, werden auf die obere Seite der Stege und der Schale Pyramiden aus einer Formmasse gelegt. Daraufhin wird die obere Schale probenhalber auf die untere Schale mit den Stegen gefügt. Nach dem Abnehmen der oberen Schalen kann anhand der Deformation der Formmasse der Abstand zwischen den Bauteilen bestimmt werden. Auf dieser Grundlage wird das Klebharz auf die Fügestellen aufgetragen. Außerdem kann die Fertigungsgenauigkeit bestimmt werden. Nun können die beiden Schalen und die Stege endgültig miteinander verklebt werden. Zwar besteht auch die Möglichkeit einer mechanischen Verbindung mittels Schrauben oder Nieten, allerdings weist Metall andere thermische Materialeigenschaften auf, sodass Spannungen in der Fügestelle entstehen können. Außerdem ist das Rotorblatt durch die Bohrungen korrosionsanfälliger und das zusätzliche Gewicht der Metallbauteile ist ebenfalls ein Grund, warum sich für eine reine Klebung entschieden wird. Die gesamte Formbelegungszeit beläuft sich zu diesem Zeitpunkt nach dem Aushärten des Klebharzes ohne Nacharbeiten auf 54 Stunden. Danach werden die Halbschalenformwerkzeuge entfernt. Dieser Vorgang erfordert äußerste Vorsicht, denn Oberflächenschäden in dem Formwerkzeug durch das Entformen der Rotorblatthälften sind ein großer Kostenfaktor in der Fertigung.

Im vorletzten Metaprozess „Reinigen“ werden zuerst an den Klebungen die überschüssigen Klebereste abgetragen. Für die Fügestellen, welche nicht von außen zugänglich sind, kriechen Mitarbeiter in den Rumpf des Rotorblattes und entfernen manuell die Klebereste. Des Weiteren wird die Wurzel gerade geschliffen, sodass sie später in die Nabenvorrichtung passt. Danach werden die Löcher für die mechanische Befestigung in die Wurzel gebohrt. Dabei ist zu beachten, dass bei der Verwendung von Kohlestofffasern als Material ein spezielles Abluftsystem für den Bohr- und Schleifvorgang verwendet werden muss, denn es besteht Explosionsgefahr. Der entstehende Kohlenstoffpartikelstaub entspricht Staubexplosionsklasse 1. Außerdem ist Kohlenstoff in Staubform elektrisch leitfähig, sodass eine Kurzschlussgefahr im Absaugsystem entstehen kann (DGUV Fachbereich Holz und Metall, 2014). Außerdem müssen die Schalenformwerkzeuge gereinigt werden, indem die Harzreste und das Trennmittel mit Aceton entfernt werden.

Der letzte Metaprozess „Lackieren“ beinhaltet die finale Oberflächenbehandlung des Rotorblattes. Als erstes werden Fertigungsungenauigkeiten mit Spachtelmasse und Schleiftechniken in Soll - Form gebracht. Anschließend wird die Oberfläche mit einem Sandstrahl angeraut, sodass der Lack optimal auf den Schalen haftet. Der Lack besteht aus zwei Komponenten. Die erste ist eine Schutzschicht aus einem Gelcoat. Der Lack muss eine hohe Beständigkeit gegen UV-Strahlen und Witterungseinflüsse haben. Außerdem wirken Regetropfen bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 300 km/h wie kleine Geschosse und beanspruchen die Oberfläche stark. Diese Funktion der Witterungsbeständigkeit übernimmt das Gelcoat. Die zweite Schicht besteht aus einem Decklack, welcher eine gewisse Mattigkeit vorweisen muss, damit Menschen und Tiere nicht durch Reflektionen irritiert werden und der sogenannte „Diskoeffekt“ vermieden wird (Deutsches Lackinstitut, 2017).

Anschließend wird ein finaler NDT Test durchgeführt, um sicher zu gehen, dass das Blatt bereit für den Transport und die Inbetriebnahme ist. Damit endet die Fertigung des Rotorblattes und der konkretisierte Prozesspfad wird im nächsten Kapitel auf seine Abhängigkeiten mit Designparameter untersucht.

4 Parametrisierung des ausgewählten Fertigungsprozesses

In diesem Kapitel geht es um die Parametrisierung des Fertigungsprozesses. Generell wird zwischen Bestimmungs- und Entscheidungsparameter differenziert. Mit Hilfe der Legende in Abbildung 3-4 kann man in den Anlagen 1-4 die jeweiligen einflussnehmenden Parameter in einem Rotorblattfertigungsprozess ablesen.

Zur quantitativen Bewertung der Parameter existieren sehr wenige Literaturwerte, da die Ergebnisse jener Quantifizierungen unter das Betriebsgeheimnis der jeweiligen Unternehmen fallen. Deswegen wird zuerst eine qualitative Bewertung mit Hilfe eines DLR-internen Experteninterviews und einer Gruppendiskussion durchgeführt.

An diesem Experteninterview nahmen Produktionsingenieure, Strukturmechaniker und Leichtbauingenieure teil. Die Relevanz der Design- und Produktionsparameter ist mit Hilfe einer Assoziations- und Priorisierungsmethode erörtert worden. Designparameter sind eindeutig identifiziert und die jeweiligen Produktionsparameter mit einer Priorisierung von eins (sehr wichtig) bis vier (unwichtig) bewertet worden. Da die Produktionsparameter je nach Fachrichtung des Experten unterschiedlich bewertet worden sind, werden im Folgenden die Durchschnittswerte verwendet. Die detaillierte Auswertung der Interviews ist in Anlage 8 zu finden. Nach den Experteninterviews sind in einer Gruppendiskussion die qualitativen Abhängigkeiten jener Parameter besprochen worden.

Während der Parametrisierung des Fertigungsprozesses hat sich herausgestellt, dass die Produktionsparameter hauptsächlich von zwei Designparametern abhängen. Diese sind die maßgeblichen Parameter, welche in dieser Arbeit betrachtet werden. Dabei handelt es sich um die Rotorblattlänge und die Rotorblattkomplexität. Alle anderen betrachteten Parameter werden durch andere Parameter stark beeinflusst. Bei dem Rückverfolgen dieser Wirkungsketten endeten die Abhängigkeiten jeweils bei den Designparametern Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität. In dem Parametermodell auf der nächsten Seite sind die einzelnen Wirkungsketten und Abhängigkeiten dargestellt, welche sich aus den Interviews und der Recherche ergeben.

Dargestellt sind die qualitativen Abhängigkeiten der Produktionsparameter von den Designparametern. Des Weiteren ist ersichtlich, in welchen Produktionsparametern sich der Einfluss der Designparameter treffen.

In dem Parametermodell werden neben den Wirkungsketten die Zeit- und Kostenfaktoren deutlich. Die in den folgenden Kapiteln näher untersuchten Abhängigkeiten sind mit der jeweiligen Seitenzahl angegeben.

Die Rotorblattlänge ist eindeutig definiert als die Länge von der Spitze des Rotorblattes bis zur Wurzel am Blattende. Die Rotorblattkomplexität wird in dieser Arbeit folgendermaßen definiert: Zuerst wird sie in die drei Teilaspekte geometrische, strukturelle und Prozesskomplexität unterteilt. Unter der geometrischen Komplexität werden Aspekte wie die geometrische Biegetorsionskopplung und Vorbeugung betrachtet, von welchen wiederum z.B. der Lageplan abhängt. Als strukturelle Komplexität wird vor allem die innere Struktur des Rotorblattes betrachtet. Es kann z.B. zwischen integraler und differentialer Holmen-Bauweise unterschieden werden. Die Prozesskomplexität beschreibt den Aufwand, der betrieben werden muss, um den Prozess abzuarbeiten und die Teilprozesse auf einander abzustimmen. Zudem herrscht eine positive Korrelation zwischen der Rotorblattgröße und der Komplexität des Fertigungsprozesses, da sich die Wirkungsketten der jeweiligen Designparameter über die Produktionsparameter verbinden.

Im Folgenden werden nun die von den Designparametern abhängigen Produktionsparameter analysiert, welche in dem Experteninterview eine Durchschnittspriorisierung von zwei oder niedriger erhalten haben (siehe hierzu Anlage 8). Die Analyse beginnt mit dem Designparameter Rotorblattlänge.

4.1 Designparameter Rotorblattlänge

In erster Linie hängt die Masse des Rotorblattes von der Rotorblattlänge ab. Dieser Zusammenhang kann sich mit einer Exponentialfunktion zweiten Grades beschreiben lassen (Gasch, 2016). In Abbildung 3-7 lässt sich dieser Zusammenhang für unterschiedliche Materialeinsätze erkennen.

Empirische Studien haben ergeben, dass der Massenzuwachs eines Rotorblattes sich exponentiell mit dem Rotorblattdurchmesser mit dem Exponenten 2,4 bis 2,8 verhält. Der genaue Faktor ist bedingt durch die jeweilige Bauart. Generell ist der Massenzuwachs höher, je mehr Glasfaseranteile in der Bauart enthalten sind. (Hau, 2014) Von der Masse wiederum hängen die Anforderungen für den Kran für die Produktionshalle ab. Außerdem die Blattmasse sowie die Blattlänge eine Restriktion der Fertigungskapazitäten.

Die Lastanforderungen werden auf Grundlage der geschätzten Massen- und Steifigkeitsverteilung zuzüglich der Sicherheitsfaktoren berechnet. Siehe hierzu den Designprozess in Kapitel 3.2.1. Die für die Lastanforderungen relevanten Produktionsparameter sind die Fasersteifigkeit und Faserfestigkeit. Der Einfachheit halber werden diese Parameter gemeinsam betrachtet. Die für die Materialauswahl relevanten Kennwerte sind die Maximalspannung in Hauptrichtung, die Querspannung, welche einen Matrixriss verursachen kann, und die Maximaldehnung, welche die Ermüdungsresistenz beschreibt. Diese Produktionsparameter sind jene, die maßgeblich an den Kosten eines Rotorblattes beteiligt sind. Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass je höher die Anforderungen an das Material sind, desto teurer werden die Fasern. Des Weiteren beeinflusst die Fasersteifigkeit die Drapierbarkeit und somit die Ablagezeit und Genauigkeit der Fertigung.

Ein weiterer Produktionsparameter, welcher direkt mit der Faserauswahl zusammenhängt, ist die Faserpermeabilität. Dieser Parameter ist deswegen von Relevanz, da die Permeabilität D einen direkten Einfluss auf die Infusionsgeschwindigkeit v und die Durchträngungsgüte hat. Dieser proportionale Zusammenhang ist durch folgende Formel zur Berechnung der Infusionsgeschwindigkeit beschreibbar (Gurit GmbH, 2016):

$$v \sim \frac{D \cdot x \cdot \Delta P}{\eta}$$

Des Weiteren wird die Infusionsgeschwindigkeit v vom Druckgradienten ΔP beeinflusst. Hier ist der korrelierende Produktionsparameter die Vakuumintegrität. Außerdem hat die Viskosität η des Harzes einen Einfluss auf die Infusionsgeschwindigkeit v .

Die Faserpermeabilität D kann durch die Schlichte einer Faser und den Faserdurchmesser beeinflusst werden. Außerdem liegt ein Zusammenhang zwischen der Permeabilität und der Porenbildung während des Injektionsvorganges vor. Des Weiteren wird durch weniger Fehlstellen im Bauteil Zeit während der Nacharbeitungsphase gespart. Somit lässt sich mit einer besseren Permeabilität eine höhere Qualität und auch ein höheres Faservolumengehalt generieren. Ein Fasermaterial mit höherer Permeabilität erlaubt zudem eine Masseneinsparung, da durch ein nachträgliches Kompaktieren der Fasern weniger Harz im Bauteil verbleibt. Je nach Faserpermeabilität kann das Material unterschiedlich stark kompaktiert werden.

Wie in der Formel zur Berechnung der Infusionsgeschwindigkeit zu erkennen ist, hängt die Fließgeschwindigkeit v auch von der Viskosität des Harzsystems zusammen, aber auch Harzeigenschaften wie die Topfzeit und das exotherme Reaktionsverhalten. Der Produktionsparameter Harzeigenschaften kann jedoch in der Designphase einfach

berücksichtigt werden und bedarf in der Praxis lediglich ein paar Vortests zur richtigen Handhabung des Harzes. Zeitintensiv sind hingegen Injektionssimulationen, da dreidimensionale Simulationen, besonders bei stärkeren Wanddicken, sehr komplex sind. Als letzter Faktor des Produktionsparameters Harzeigenschaften müssen die Dämpfe bei dem Aushärtungsprozess beachtet werden. Zwar sind die Dämpfe des verwendeten Epoxidharzes weniger toxisch als z.B. das früher verwendete Polyesterharz, allerdings kann der Dunst immer noch zu Kopfschmerzen und Schädigungen des Nervensystems führen.

Das Harzsystem bestimmt wiederum die Aushärtetemperatur und -zeit. Somit ist neben der Viskosität des Harzes auch die Aushärtungseigenschaft ein Zeitfaktor. Meist werden raumtemperaturhärtende Harzsysteme verwendet. Der Aushärtungsprozess wird jedoch durch eine höhere Aushärtetemperatur (50°C bis 80°C) beschleunigt. Das Formwerkzeug und Sandwichmaterial muss für die Aushärtetemperatur ausgelegt sein, denn thermische Verformungen während der Aushärtung können zu gefährlichen Lokaleigenstressungen im Bauteil führen. Mit steigenden Anforderungen an das Formwerkzeug steigt auch dessen Preis. Die thermische Verformung ist der häufigste Grund für geometrische Abweichungen des Rotorblattes von der Soll-Form, sodass mit Spachtelmasse und einem Schleifgerät manuell nachgearbeitet werden muss. Theoretisch ist der Aushärtungsprozess im Vorwege simulier- und berechenbar. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass die Aushärtung zu komplex und zu viele Einflussfaktoren besitzt, sodass ein gewisses Restrisiko besteht. Außerdem ist dieser Prozessschritt durch die zugeführte Wärme energieintensiv, sodass das Bauteil während der Aushärtung isoliert wird, was zusätzliche Arbeitszeit und Arbeitskraft in Anspruch nimmt. Die Güte einer Aushärtung ist zudem im Nachhinein sehr schwer zu überprüfen, denn die zerstörungsfreie Überprüfung ist sehr aufwendig und zeitintensiv. Ob sich Fehlstellen in das Bauteil eingeschlichen haben, liegt auch oft an der Vakuumintegrität. Eine hohe Vakuumintegrität muss erreicht werden, um der Bildung von Poren und Fehlstellen vorzubeugen. Dieser Prozessschritt kann z.T. sehr zeitintensiv sein, denn Leckagen finden und ausbessern geschieht manuell. Zwar werden Luft einschüsse im Design bereits einkalkuliert und mit Materialwertminima gerechnet, jedoch kann ein fehlerhaftes Vakuum ein Ausschusskriterium sein.

Dies waren die Produktionsparameter, deren Wirkungskette hauptsächlich von der Rotorblattlänge ausgeht.

4.2 Designparameter Rotorblattkomplexität

Der zweite Designparameter Rotorblattkomplexität wurde zuvor bereits in geometrische und strukturelle Komplexität sowie in Prozesskomplexität unterteilt. Die geometrische und strukturelle Komplexität wird durch das Konzept der Biegetorsionskopplung sowie der Vorbiegung des Blattes beeinflusst. Daraus resultiert wiederum die Komplexität des Lageplans für die Fasern und erfordert somit eine höhere Präzision der Mitarbeiter bei der Ablage. Des Weiteren ist ein komplexerer Lageplan neben dem höheren Fehlerpotential teurer, da mehr Zuschnitte angefertigt werden müssen und evtl. mehr Verschnitt anfällt. Außerdem ist der Designprozess zeitintensiver, allerdings können durch einen optimierten Lageplan mit mehreren Faserorientierungen und einer Biegetorsionskopplung die Lasten und somit Masse reduziert werden, wodurch der reduzierte Materialeinsatz Kosten einsparen kann. Falls eine geometrische Biegetorsionskopplung vorliegt, bedingt diese höheren Anforderungen an das Formwerkzeug. Eine strukturelle Biegetorsionskopplung beinhaltet einen komplexeren Nebenproduktionsprozess, da zusätzlich Strukturbauteile gefertigt und in das Bauteil eingesetzt werden müssen.

Weitere geometrischen Komplexitäten sind Winglets, sowie die Vorbiegung des Blattes. Bei den Winglets handelt es sich um eine abgeknickte Blattspitze, welche eine Lärmreduktion bewirkt. Die Vorbiegung ist notwendig, damit das Rotorblatt bei starken Windbelastungen mit der Spitze nicht den Turm berührt. Als strukturelle Komplexität sei das Blitzableitersystem noch zu nennen. Dieses ist hoch komplex in die Bauteilstruktur des Spitzendrittels integriert.

Generell hat die Rotorblattkomplexität einen Einfluss auf das Potential des Produktionsparameters der Fertigungsgenauigkeit. Hierbei handelt es sich um eine Prozesskomplexität. Besonders bei dem Prozessschritt des Zusammenfügens der beiden Rotorblattschalen ist ein genaues Arbeiten von Nöten. Zwar können mit Klebearzen und Schleifen Fertigungungenauigkeiten nachgearbeitet werden, dies ist jedoch kosten- und zeitintensiv, vor allem bei deutschen Personalkosten. Ein Soll-Form getreues Fertigen ist auf Grund der Bauteilgrößen in der Praxis schwierig umzusetzen. Bei jedoch zu großen Abweichungen muss mit einer Computersimulation nachgerechnet werden, ob das Blatt noch den Mindestlastanforderungen entspricht. Die Fertigungsgenauigkeit hat einen großen Einfluss auf den Ertrag und die Lebensdauer eines Rotorblattes. Außerdem kann durch ein Abweichen von der aerodynamischen Hülle eine höher akustische Belastung der Umwelt erfolgen. Deswegen kann eine Wurzelvorhärtung durchgeführt werden, bei welcher die dicken Lagen im Wurzelbereich des Rotorblattes vorab infusioniert und

ausgehärtet werden, sodass sie später in die Gesamtstruktur eingebaut werden kann. Dadurch ist ein genaueres Fertigen möglich, da speziell in dem mehrlagigen Wurzelbereich die thermischen Verformungen, auch Spring-In genannt, zu Fertigungsungenauigkeiten führen. Zudem ist der Aushärtungsprozess bei Wandstärken um die 20cm bis 30cm kritisch, sodass die Aufteilung aus der Sicht der Qualitätssicherung sehr sinnvoll ist.

4.3 Kostenbewertung

Bei dem Verteilungsprinzip handelt es sich um das schwächste Prinzip der Kostenrechnung, denn durch den einfachen Zusammenhang zwischen dem gesamten Output gegenüber den gesamten Kosten eines Gutes gehen viele Informationen verloren. Daher besteht die Gefahr, dass auf Grund von falschen Verteilungen der angefallenen Kosten, vor allem der Gemeinkosten, unternehmerische Fehlentscheidungen getroffen werden können. (Buchholz, 2016) Das Zuordnungsprinzip bietet hier mehr Möglichkeiten der Kostenunterscheidung an und einhergehend mit der Flexibilität der Dimensionalität. Daher wird in dieser Arbeit das Zuordnungsprinzip verwendet. Zudem gehen weniger Informationen verloren und die Zuordnung der Kosten auf die Kostenträger ist eindeutiger. Einhergehend mit den im Kapitel 3.1 gesetzten Systemgrenzen, ist das Zuordnungsprinzip eindeutig als Kostenrechnungsmethode zu wählen.

Im Folgenden werden die einzelnen Kostenträger Einzelkosten, unechte Gemeinkosten und Sondereinzelkosten in Tabellen aufgelistet. Die Gemeinkosten werden nicht betrachtet, da sie nicht innerhalb unserer Systemgrenzen liegen und eine eindeutige Zuordnung in diesem Falle schwer realisierbar ist. In Tabelle 1 sind die Preise für die Einzelkostenstellen für die Fertigung eines Rotorblattes aufgelistet. Diese Daten wurden hauptsächlich empirisch im Projekt MERWIND (Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt e.V.), durch eigene Einkaufspreise und durch eine institutsübergreifende Recherche generiert. Die Datenbank umfasst Personalkosten, Zeitaufwand, Materialpreise, Materialspezifikation und Materialverbrauch für die einzelnen Metaprozesse. Bei den Materialeinzelkostenstellen sind neben den DLR internen Angaben auch aktuelle Listenpreise angegeben. Dies liegt an der Unvollständigkeit der internen Datenbank. Außerdem liegen für die internen Daten z.T. keine technischen Spezifikationen vor, sodass ein Vergleichen oder Substituieren in der Analyse in den folgenden Kapiteln nicht durchgeführt werden konnte.

Für die Kostenstellen Gelcoat, Spachtelmasse und Decklack werden nach telefonischer Absprache mit der Firma Mankiewicz Gebr. & Co. mögliche Industriepreise für Großabnehmer angenommen.

Parametrisierung des ausgewählten Fertigungsprozesses

Kostenstelle	Preis pro Einheit	Quelle
Technischer Mitarbeiter	82,00 €/h	DLR interne Daten
Projektleiter	113,2 €/h	DLR interne Daten
Balsa Holz (19mm)	25,00 €/m ²	DLR interne Daten
	52,5 €/m ²	Sperrholzshop
Harz	3,00 €/kg	DLR interne Daten
	8,21 €/kg	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH
Härter	6,50 €/kg	DLR interne Daten
	16,18 €/kg	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH
Gelcoat	11,00 €/kg	Annahme für Industriepreis
	12,50 €/kg	Mankiewicz Gebr. & Co.
Spachtelmasse	6,00 €/kg	Annahme für Industriepreis
	9,00 €/kg	Mankiewicz Gebr. & Co.
Decklack	9,00 €/kg	Annahme für Industriepreis
	20 €/kg	Mankiewicz Gebr. & Co.
Triax Glasfaser 1215 g/m ²	2,00 €/m ²	DLR interne Daten
	7,52 €/m ²	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH
Biax Glasfaser 1010 g/m ²	2,00 €/m ²	DLR interne Daten
	6,59 €/m ²	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH
UD Glasfaser 1200 g/m ²	3,50 €/m ²	DLR interne Daten
	8,01 €/m ²	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH

UD Kohlefaser 400 g/m ²	20,56 €/m ²	R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH
Klebeharz	5,50 €/kg	DLR interne Daten
	22,25 €/kg	Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH

Tabelle 1: **Einzelkosten** Tabelle 2 zeigt alle Sondereinzelkostenstellen innerhalb der Systemgrenzen. Alle Preisangaben beziehen sich auf ein Referenzblatt, welches in Kapitel 4.3.1 vorgestellt wird.

Anlage	Preis pro Einheit	Quelle
Kran	30.000 €	ABUS GmbH
Formwerkzeug inklusive Heizsystem	682.000 €	DLR interne Daten
Harzmischanlage	100.000 €	DLR interne Daten

Tabelle 2: **Sondereinzelkosten**

In Tabelle 3 sind alle unechten Gemeinkosten aufgelistet. Hierbei handelt es sich lediglich um DLR interne Daten. Relevant sind diese Preise für die Kostenbewertung der einzelnen Teilprozesse, in denen diese Materialien verbraucht werden. Dort werden sie in den nächsten Kapiteln unaufgeschlüsselt mit als Materialkosten verbucht.

Kostenart	Preis pro Einheit	Quelle
Abreißgewebe	1,00 €/m ²	DLR interne Daten
Injektionsports	0,50 €/Stk.	DLR interne Daten
Siegelkit	0,50 €/m	DLR interne Daten
Fließhilfe	1,50 €/m	DLR interne Daten
Spiralschlauch	0,25€/m	DLR interne Daten
Vakuumschlauch	0,75€/m	DLR interne Daten

Vakuumfolie	7,00 €/m ²	DLR interne Daten
Eintrennmittel	38,3 €/l	DLR interne Daten
PVC Folie (20mm)	90,00 €/m ²	DLR interne Daten
Angussstutzen	0,5 €/Stk.	DLR interne Daten

Tabelle 3: unechte Gemeinkosten

Des Weiteren werden Hilfsmittel wie Schutzhandschuhe, Putztücher, Holzspatel und Aceton in die Materialkostenberechnung mit einbezogen.

4.3.1 Referenzblatt

Als Referenzblatt wird ein Rotorblatt mit der Bauweise aus Kapitel 3.3 verwendet. In der Abbildung 4-1 sind die technischen Daten des Referenzblattes aufgelistet.

- Länge: 48,7 m
- Mindestlebensdauer: 20 Jahre
- Nennleistung: 2,5 MW
- Klima: Korrosiv, salzhaltige Luft, Flugsand
- Betriebstemperaturen: -30°C bis +55°C
- Durchmesser: 100 m
- max. Blatttiefe: 3,7 m



Referenzblatt

Abbildung 4-1: Datenblatt des Referenzblattes

Es handelt sich um ein standardisiertes Rotorblatt mit den in der Industrie gängigen technischen Eigenschaften. Die Rotorblattlänge entspricht ungefähr der durchschnittlichen Länge einer neu installierten Windkraftanlage, wie in Abbildung 1-1 angegeben ist (Deutsche WindGuard).

Im folgenden Kapitel wird das Rotorblatt als Grundlage für alle Berechnungen verwendet. Hierfür sind in Tabelle 4 die nominellen Verbrauchsmengen für das Referenzblatt

angeben. Es wird, wie in Tabelle 1, zwischen den DLR internen Daten und den aktuellen Listenpreisen unterschieden. Um die Vergleichbarkeit der Daten zu analysieren, werden die prozentualen Kostenverhältnisse ausgerechnet. Da in den folgenden Kapiteln mit den Listenpreisen kalkuliert wird, muss überprüft werden, ob die Proportionalität der Kostenanteile äquivalent zu den DLR internen Daten ist. Bei den DLR internen Daten handelt es sich um Industriepreise für Großabnehmer, während die aktuellen Listenpreise sich auf die Verbrauchsmengen für ein einzelnes Rotorblatt beziehen und sich somit ohne jegliche Mengenrabatte, Skonti, Boni oder Verhandlungen ergeben.

Kostenstelle	Gewicht	Kosten mit DLR interne Daten	Kosten mit aktuellen Listenpreisen
Harz	3.028 kg	9.084 €	24.860 €
Härter	604 kg	3.926 €	9.773 €
Fließhilfen	40 kg	300 €	828 €
Balsa	497 kg	6.212 €	13.046 €
Gelcoat	130 kg	Annahme: 143 €	1.625 €
Spachtelmasse	25 kg	Annahme: 150 €	225 €
Lack	40 kg	Annahme: 360 €	800 €
Klebeharz	381 kg	2.096 €	8.477 €
Triax Glasfaser	3.240 kg	5.333 €	20.052 €
Biax Glasfaser	1.054 kg	2.087 €	6.877 €
UD Glasfaser	2.001 kg	5.836 €	13.356 €
Summe	11.040 kg	35.436 €	99.916 €

Tabelle 4: nominelle Verbrauchsmengen und Massen des Referenzblattes

Es ist zu erwähnen, dass es sich nur um die nominellen Verbrauchsmengen handelt, welche im Rotorblatt verbaut werden. Der reale Verbrauch liegt über den angegebenen

Werten, da z.B. bei dem Harzsystem eine Sicherheitszulage anfällt und bei den Faserzuschnitten Verschnitt.

Der größte Anteil sind die Kosten für die Fasermaterialien mit einem Anteil von 38% bzw. 40%. Den zweitgrößten Anteil besitzt das Harzsystem mit 37% bzw. 35%. Zu beachten ist, dass es sich bei diesen Werte lediglich um die Verbrauchsmengen handelt, welche später im Rotorblatt verbleiben. Der Verschnitt bei dem Fasermaterial und die Sicherheitszulagen des Harzsystems sind in dieser Kalkulation nicht mit inbegriffen. Somit ist der relative Anteil dieser beiden Kostenstellen in der Realität noch größer.

Um die Proportionalität zwischen den Kostenstellen und den unterschiedlichen Datensätzen besser zu veranschaulichen, werden diese in Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 in einem Kreisdiagramm angegeben.

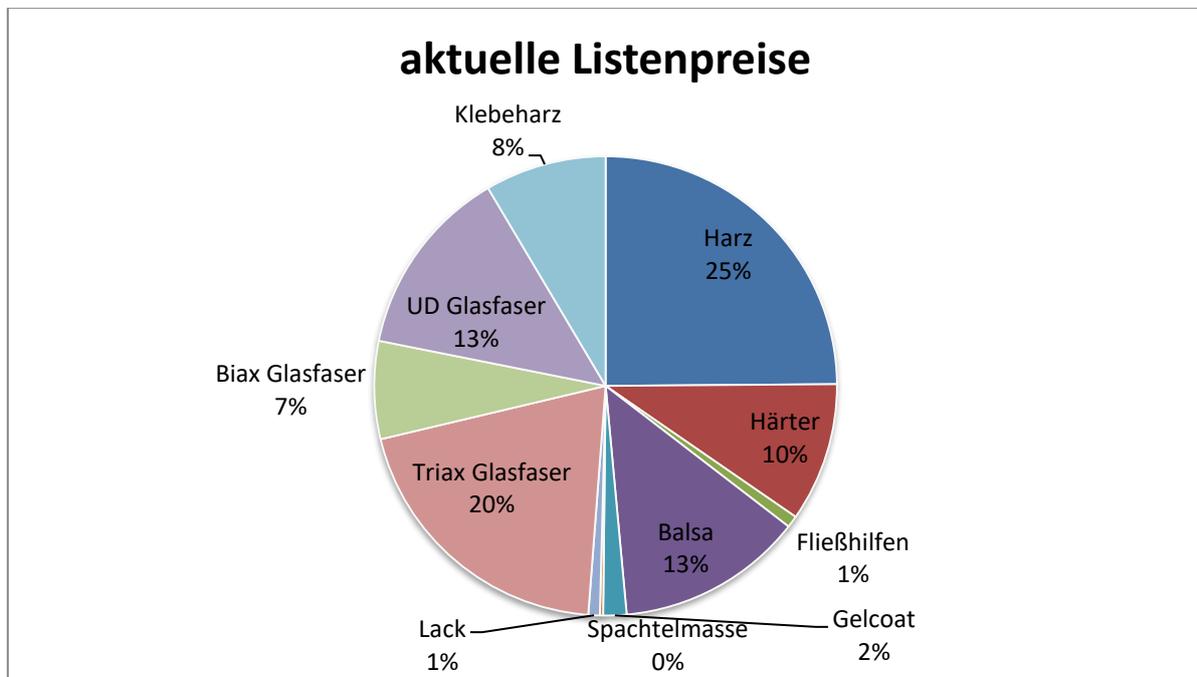


Abbildung 4-2: aktuelle Listenpreise

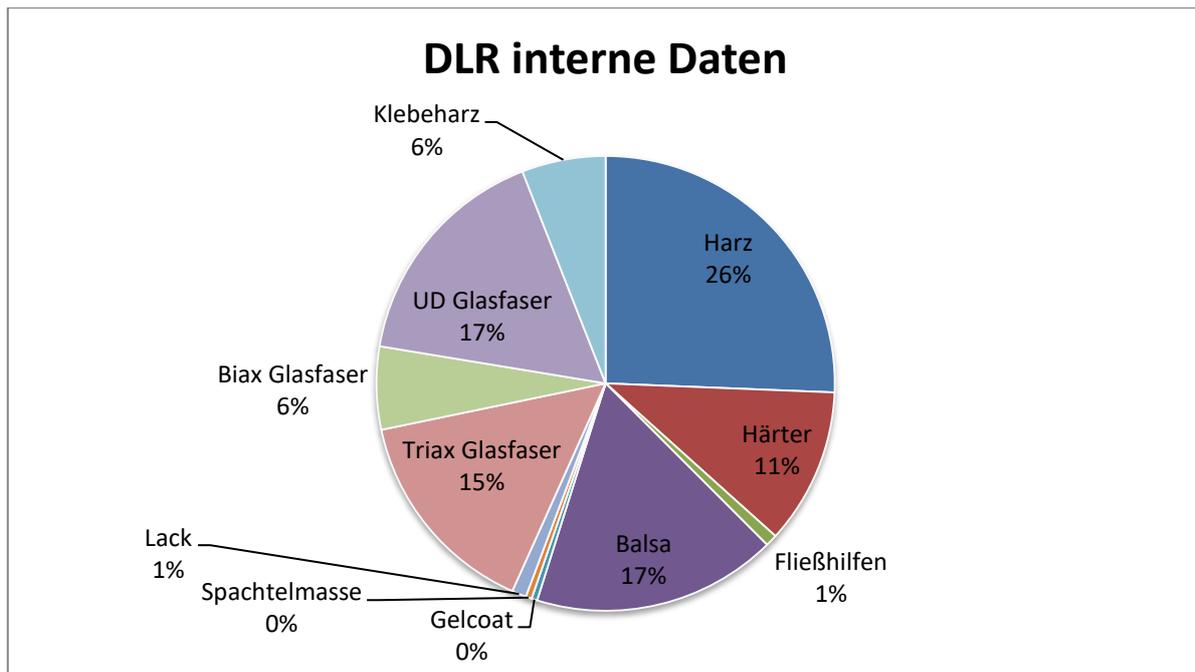


Abbildung 4-3: DLR interne Preise

Die größte relative Abweichung liegt bei den Triax Glasfasern. Hier ist jedoch zu beachten, dass der in der internen Datenbank angegebene Preis, siehe hierzu Tabelle 1, $2\text{€}/\text{m}^2$ beträgt. Dies ist derselbe Preis wie für ein Biax Gelege, welches zudem noch ein geringeres Flächengewicht besitzt. Des Weiteren ist ein Biax Gelege weniger aufwendig in der Fertigung. Somit ist derselbe Preis dieser beiden Glasfasermaterialien nicht gerechtfertigt, das Triax Gelege müsste teurer sein. Bei einem Preisanstieg von $0,50\text{€}/\text{m}^2$ würde der relative Kostenanteil auf 21% steigen, sodass er einen ähnlichen relativen Anteil wie bei den aktuellen Listenpreisen annehmen würde und auch die leichten Abweichungen bei UD und Biax Glasfasern würden sich etwas relativieren. Daher kann in den folgenden Analysen mit den aktuellen Listenpreisen gerechnet werden, da ihre relative Kostenverteilung einer Industriefertigung gleicht.

4.4 Zusammenhang Parameter und Fertigungskosten

In Kapitel 4.1 werden zwei Designparameter identifiziert, von denen die Produktionsparameter abhängig sind. Zum einen die Rotorblattlänge und zum anderen die Rotorblattkomplexität. An Hand dieser beiden Designparameter werden in den folgenden Analysen Ansätze gewählt, beginnend mit der Rotorblattlänge.

4.4.1 Abhängigkeiten der Fertigungskosten von der Rotorblattlänge

Um in diesem Kapitel die Zusammenhänge zwischen den Parametern und den Fertigungskosten zu berechnen, wird das Referenzblatt im ersten Schritt hochskaliert. Es

soll betrachtet werden, welche Kosten sich linear und nicht linear verhalten. Dabei ist zu beachten, dass die technische Auslegung des Rotorblattes identisch bleiben soll, sodass ein direkter Vergleich möglich ist. Als Beispiel ist hier die Blattspitzengeschwindigkeit zu nennen, welche mit dem Längenzuwachs exponentiell ansteigen würde, woraus wiederum unterschiedliche mechanische Beanspruchungen resultieren. Um solchen vergleicherschwerenden Entwicklungen entgegenzuwirken, wird neben der geometrischen die technische Analogie vorausgesetzt. Skaliert wird das Rotorblatt in den jeweiligen Betrachtungen auf 60m, 80m und 100m.

In Kapitel 4.3.1 ist hervorgegangen, dass die Fasermaterialien den größten Kostenfaktor in der Rotorblattfertigung darstellen. Deswegen wird an diesem Punkt angesetzt und es wird untersucht, ob eine Materialsubstitution der UD Glasfasern mit UD Kohlefasern bei dem Up-Scaling in Bezug auf den Massenzuwachs kostengünstiger werden.

Mit der Ausgangsformel in Gleichung (1) kann durch den Faktor α der Massenzuwachs in Relation zum Rotorblattradius beschrieben werden.

$$\text{Masse} = k * R^\alpha \quad (1)$$

Für die jeweiligen Rotorblatttypen ist der Massenzuwachsverlauf in

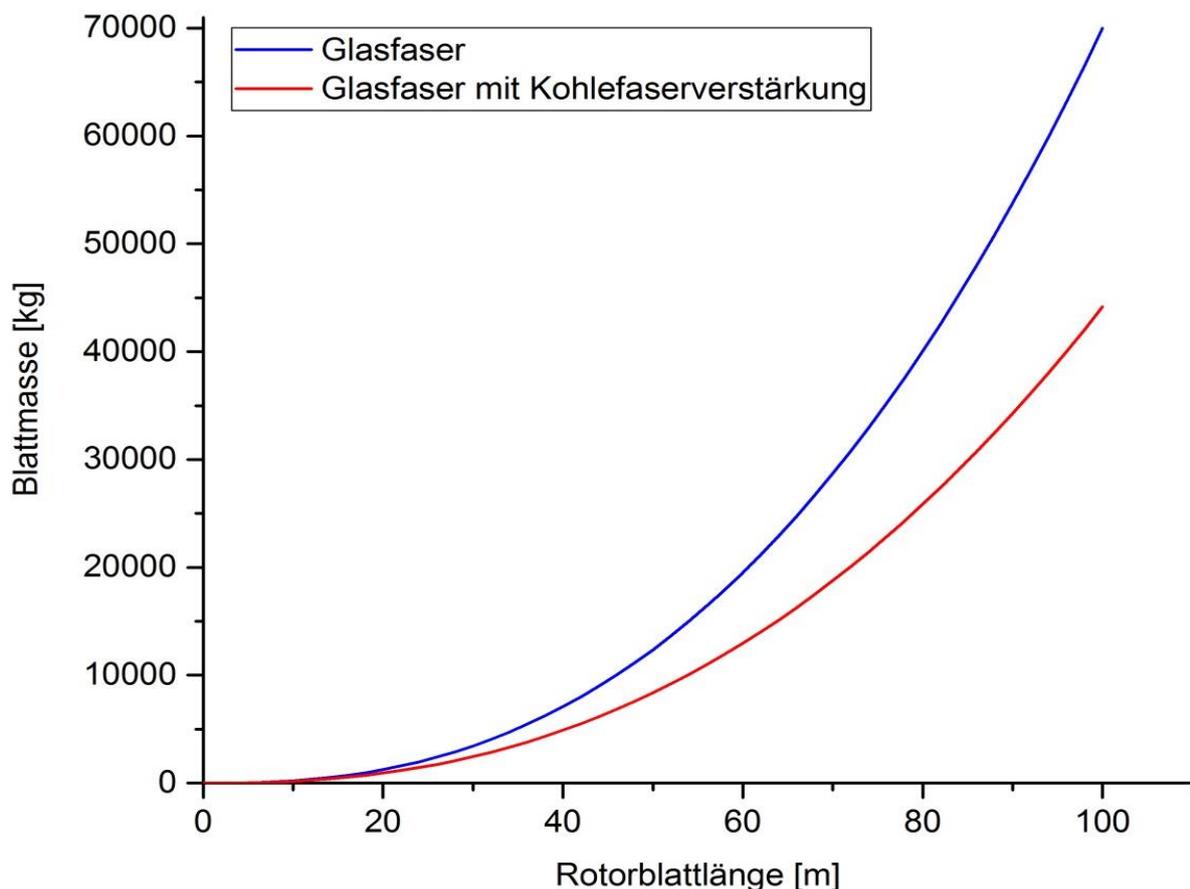


Abbildung 4-4 dargestellt.

- Blauer Graph: Glasfasern mit Epoxidharz, Gleichung (1.1) (Gasch, 2016)

$$\text{Masse} = 0,7 * R^{2,5} \quad (1.1)$$

- Roter Graph: Glasfaser mit Epoxidharz Kohlefaserverstärkungen, Gleichung (1.2) (Hau, 2014)

$$\text{Masse} = 0,7 * R^{2,4} \quad (1.2)$$

Zu Gleichung (1.2) ist zu erwähnen, dass der Faktor $k=0,7$ angenommen wird. Es findet sich für den Faktor für den Massenzuwachs von Glasfaser mit Epoxidharz und Kohlefaserverstärkungen kein eindeutiger Literaturwert. Daher wird dieser aus der Gleichung (1.1) übernommen, mit der Begründung, dass die Blattgeometrie dieselbe bleibt. Lediglich der Materialeinsatz verändert sich und dieser wird im Exponenten α bereits berücksichtigt.

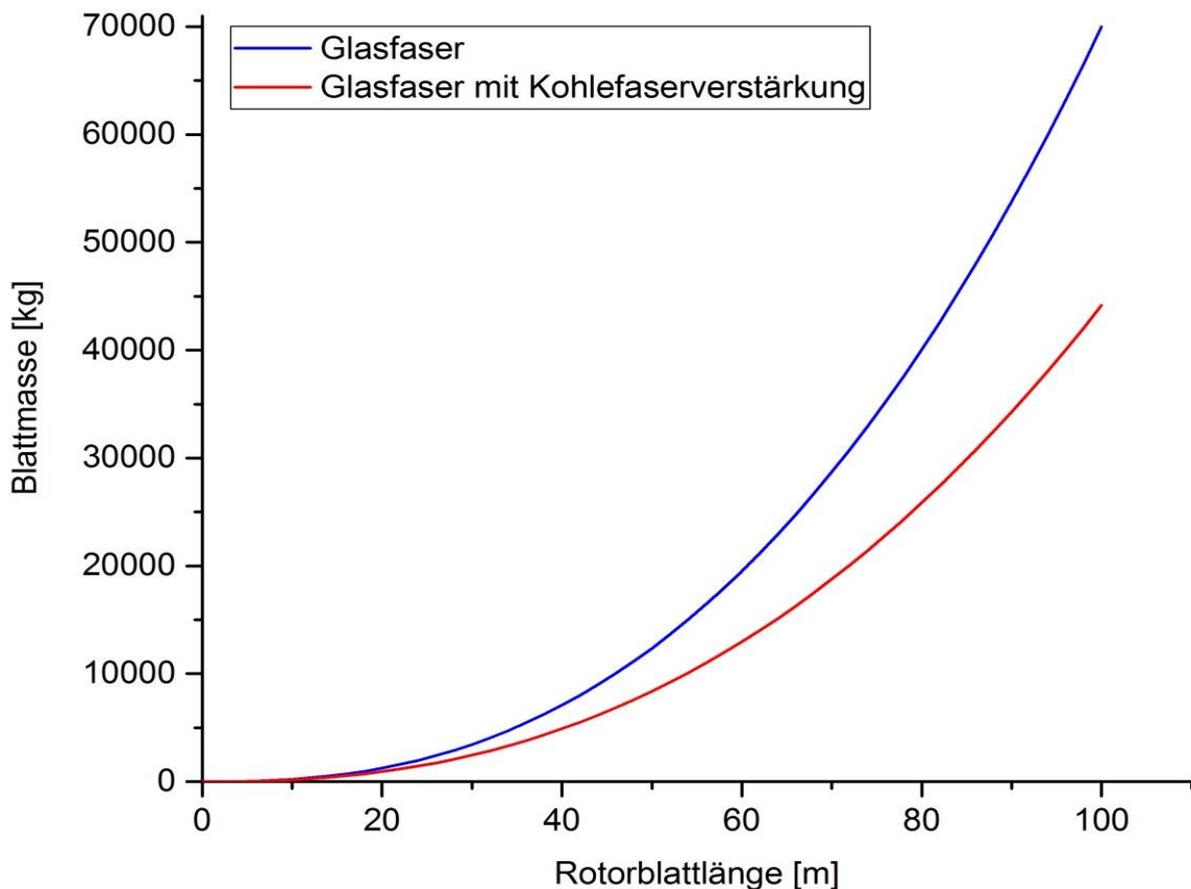


Abbildung 4-4: Vergleich Verhältnis zwischen Blattlänge und Blattmasse

Direkt abhängig von der Rotorblattmasse ist das Kransystem, welches das Rotorblatt halten und transportieren muss. Daher wird als nächstes die Sondereinzelkostenstelle

Kransystem betrachtet. Hierfür ist in Abbildung 4-5 ein Hallenkonzept erstellt. Zwar liegt die Halle außerhalb der Systemgrenzen, allerdings ist die Spannweite für den Kran ein maßgeblicher Wert und korreliert stark mit der maximalen Traglast. Die Traglast muss auf Grund der Sicherheitsfaktoren und der dynamischen Lasten stets größer sein, als die maximale Blattmasse.

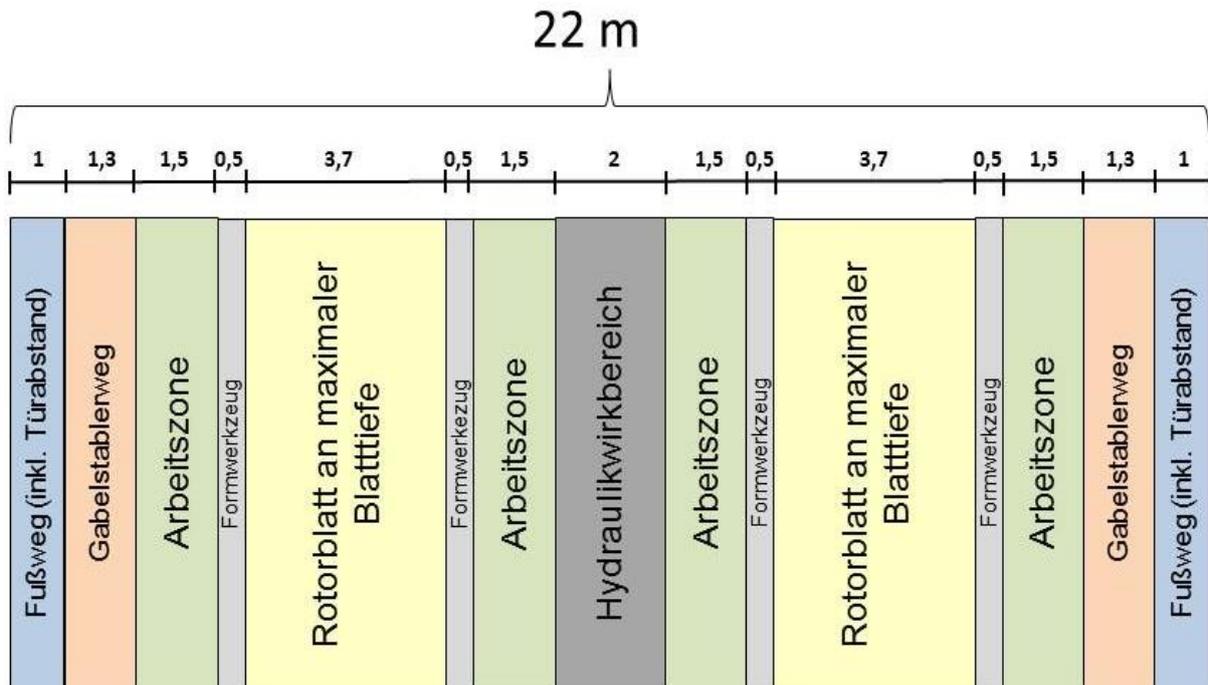


Abbildung 4-5: Konzept für die Hallenbreite (Bemaßungen sind in Meter angegeben)

Mit Hilfe dieses Hallenkonzepts lässt sich abschätzen, welches Kransystem verwendet werden soll. Da der Träger quer über der Halle verlaufen soll, ist die Länge irrelevant und wird in der Kalkulation nicht miteinbezogen. In Kapitel 3.3 wurde bereits festgelegt, dass zwei Kräne verwendet werden, sodass sich die Lasten aufteilen. Mit diesen Daten lassen sich die Lastanforderungen und die Spannweite bestimmen. Mit dem Durchschnittsverhältnis aus Anlage 5 zwischen Länge und maximaler Blattiefe von 13,68 ergibt sich folgende Formel zur Berechnung der Spannweite. In Gleichung (2.1) werden die bekannten Werte eingesetzt.

$$L_{\text{Fixanteil}} + \text{Anzahl Rotorblatthälften} \left(\frac{\text{Rotorblattlänge}}{\text{Durchschnittsverhältnis}} \right) = \text{Spannweite} \quad (2)$$

$$14,6 + 2 \left(\frac{L}{13,6} \right) = \text{Spannweite} \quad (2.1)$$

Diese Formel angewendet auf die zu betrachtenden 60m-, 80m- und 100m-Blätter ergeben sich die Spannweiten aus Tabelle 5. Des Weiteren werden mit Hilfe von Gleichung (1.1) und (1.2) die jeweiligen Gesamtblattmassen berechnet.

Rotorblattlänge	Spannweite	Gesamtmasse Glasfaser	Gesamtmasse Glasfaser mit Kohlefaserverstärkungen
60m	23,4m	19,519t	12,961t
80m	26,3m	40,070t	25,853t
100m	29,2m	70,000t	44,167t

Tabelle 5: Spannweite und Gesamtmasse mit Bezug auf die Rotorblattlänge

Nach telefonischer Auskunft des Unternehmens ABUS Kransysteme GmbH sind folgende Preise für die jeweiligen technischen Anforderungen der Rotorblätter anzunehmen (siehe Abbildung 4-6). Bei den angegebenen Preisen handelt es sich um Listenpreise, jegliche Dienstleistungen wie z.B. Lieferung und Montage sind nicht mit inbegriffen. Alle Preise sind in der Realität mit dem Faktor 1,2 bis 1,3 anzunehmen, da zusätzlich die Kosten für die Installation der Stromzufuhr beachtet werden müssen.

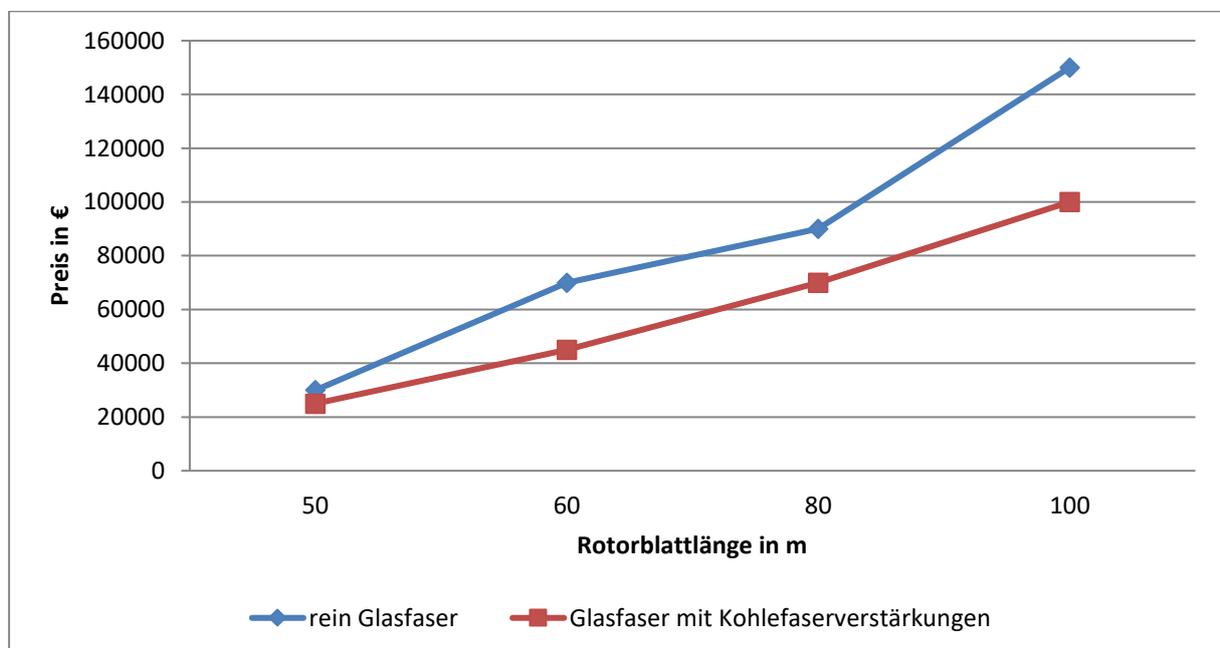


Abbildung 4-6: Preise Kransysteme

In Abbildung 4-6 ist zu erkennen, dass die Anschaffungskosten für das Kransystem annähernd linear verlaufen. Somit ist das Kransystem als ein linearer Kostenfaktor zu betrachten. Leichte Sprünge in dem Kostenverlauf sind damit zu erklären, dass z.T. maximal benötigte Traglast zwischen zwei Kranmodellen liegt, sodass ein leicht überdimensionierter Kran gewählt werden muss. Die absoluten Werte, welche für diese Grafik verwendet werden, sind in Anlage 6 einsehbar.

Eine Möglichkeit um die Blattmasse zu reduzieren, ist eine Materialsubstitution. Deswegen wird im Folgenden eine Substitution von unidirektionalen Glasfaserkomponenten durch Kohlefasern simuliert. Es wird betrachtet, ob sich diese Substitution angesichts der Massenreduktion bei gleichen Festigkeitswerten rechnet. Der rote Graph in Abbildung 4-6 zeigt den Kostenverlauf für ein kohlefaserverstärktes Glasfaserblatt.

Um den Kostenunterschied des Materials an sich zwischen einem reinen Glasfaserblatt und einem mit kohlefaserverstärkten Komponenten zu erörtern, wird als nächstes der Materialeinsatz verglichen. Substituiert werden die unidirektionalen Bauteilkomponenten, dabei handelt es sich um die Gurte (siehe hierzu Abbildung 3-11). Die Gurte werden nur auf Zug und Druck belastet, sodass sie aus strukturmechanischer Sicht als Stab angesehen werden können. Im Folgenden wird eine Substitutionsrechnung durchgeführt, welche als Basis den E-Modul und die Dehnung ε verwendet.

In den Gleichungen (2) und (3) wird die Spannung zum einen über das E-Modul und der Bruchdehnung und zum anderen über die Kraft pro Fläche berechnet.

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (4)$$

Durch Gleichsetzen der Gleichung (2) und (3) erhält man den Ausdruck in Gleichung (4), welche sich wiederum in Gleichung (4.1) umstellen lässt. Dieser Schritt wird mit der Voraussetzung durchgeführt, dass für Glas- und Kohlefaser jeweils die zulässigen maximal zulässige Zugspannungen angenommen werden.

$$\varepsilon * E = \frac{F}{A} \quad (5)$$

$$F = E * A * \varepsilon \quad (5.1)$$

Für die folgenden Berechnungen wird davon ausgegangen, dass die Kraft F , welche auf das Rotorblatt wirkt, konstant bleibt. Für Glas- und Kohlefaser gelten jeweils folgenden Werte (R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2017):

	Glasfaser	Kohlefaser
E-Modul	$E_{\text{Glasfaser}} = 73 \text{ GPa}$	$E_{\text{Kohlefaser}} = 242 \text{ GPa}$
Dehnung	$\epsilon_{\text{Glasfaser}} = 2,5 \%$	$\epsilon_{\text{Kohlefaser}} = 1,5 \%$
Dichte	$\rho_{\text{Glasfaser}} = 2,6 \text{ g/cm}^3$	$\rho_{\text{Kohlefaser}} = 1,81 \text{ g/cm}^3$
Flächengewicht	1200 g/m^2	400 g/m^2
Preis pro Quadratmeter	$8,01 \text{ €/m}^2$	$20,56 \text{ €/m}^2$

Tabelle 6: Materialkennwerte (R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH, 2009)

Über den Ansatz, dass die Kraft konstant bleibt und nur eine eindimensionale Krafrichtung vorliegt, was bei einer Gurtbelastung der Fall ist, kann mit den Werten aus Tabelle 6 die Gleichung (5) erschlossen werden.

$$E_{\text{Glasfaser}} * A_{\text{Querschnitt Glasfaser}} * \epsilon_{\text{Glasfaser}} = E_{\text{Kohlefaser}} * A_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} * \epsilon_{\text{Kohlefaser}} \quad (6)$$

$$73 \text{ GPa} * A_{\text{Querschnitt Glasfaser}} * 0,025 = 242 \text{ GPa} * A_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} * 0,015 \quad (6.1)$$

$$\Rightarrow A_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} = 0,5028 A_{\text{Querschnitt Glasfaser}} \quad (6.2)$$

Die Gleichung (6.2) sagt aus, dass der Flächenquerschnitt der Rotorblattkomponenten aus Kohlefasern bei gleicher Festigkeit und Steifigkeit um 0,5028 kleiner ist, als wenn er aus Glasfaser besteht. Durch eine vereinfachende Annahme der Rotorblattgeometrie kann davon ausgegangen werden, dass sich das Volumen äquivalent zum Flächenquerschnitt verhält, da die Länge unbeeinflusst ist. Somit gilt Gleichung (7).

$$V_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} = 0,5028 V_{\text{Querschnitt Glasfaser}} \quad (7)$$

Mit dem Wert der Gesamtmasse an UD-Glasfasern im Referenzblatt aus Tabelle 4 und der Dichte aus Tabelle 6 kann das Volumen der Glasfaserkomponenten berechnet werden.

$$V_{\text{Querschnitt Glasfaser}} = \frac{m_{\text{Glasfaser}}}{\rho_{\text{Glasfaser}}} \quad (8)$$

$$V_{\text{Querschnitt Glasfaser}} = \frac{2001 \text{ kg}}{2,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg/cm}^3} \quad (8.1)$$

$$V_{\text{Querschnitt Glasfaser}} = 769.615 \text{ cm}^3 \quad (8.2)$$

Nun wird Gleichung (8.2) in Gleichung (7) eingesetzt. Ab hier wird auf ganze Zahlen gerundet.

$$V_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} = 0,5028 * 769.615 \text{ cm}^3 = 386.962 \text{ cm}^3 \quad (9)$$

Mit Hilfe der Dichte von den Kohlefasern aus Tabelle 6 kann nun die benötigte Gesamtmasse an Kohlestofffasern berechnet werden.

$$m_{\text{Kohlefaser}} = V_{\text{Querschnitt Kohlefaser}} * \rho_{\text{Kohlefaser}} \quad (10)$$

$$m_{\text{Kohlefaser}} = 386.962 \text{ cm}^3 * 1,81 \text{ g/cm}^3 = 700.401 \text{ g} \quad (10.1)$$

Über das Flächengewicht lässt sich die Fläche der Kohlefasern berechnen, über welche wiederum die Gesamtkosten für das Kohlefasermaterial errechnet werden können.

$$A_{\text{Gesamtfläche Kohlefaser}} = \frac{m_{\text{Kohlefaser}}}{\text{Flächengewichte}} \quad (11)$$

$$A_{\text{Gesamtfläche Kohlefaser}} = \frac{700.401 \text{ g}}{400 \text{ g/m}^2} \quad (11.1)$$

$$A_{\text{Gesamtfläche Kohlefaser}} = 1.751 \text{ m}^2 \quad (11.2)$$

$$P_{\text{Gesamt Kohlefaser}} = P_{\text{pro m}^2} * A_{\text{Gesamtfläche Kohlefaser}} \quad (12)$$

$$P_{\text{Gesamt Kohlefaser}} = 20,56 \text{ €/m}^2 * 1.751 \text{ m}^2 \quad (12.1)$$

$$P_{\text{Gesamt Kohlefaser}} = 36.123 \text{ €} \quad (12.2)$$

Im Vergleich dazu ist $P_{\text{Gesamt Glasfaser}} = 27.895 \text{ €}$, also um ca. ein Drittel günstiger. Damit sich die qualitative Aussagekraft dieser Berechnungen erhöht, müsste die Annahme der konstanten Kraft aufgelöst werden und der iterative Designprozess, wie in Kapitel 3.2.1. beschrieben, angewendet werden. Diese Berechnung würde jedoch voraussetzen, dass der Lastenprozess vorliegt. Außerdem muss für die Kräfte- bzw. Lastenberechnung das gesamte Rotorblatt aus Struktursicht gekoppelt mit dem Lastenprozess betrachtet werden.

Um diesen Kostenunterschied bei dem Up-Scaling im Verlauf zu betrachten, wird im Folgenden eine allgemein gültige Formel zur Kostenberechnung der UD-Komponenten aus jeweils Glas- und Kohlefaser aufgestellt. Ausgehend von der Preisgleichung P_{Gesamt}

Kohlefaser in Gleichung (12) wird für die Gesamtfläche $A_{\text{Gesamtfläche Kohlefaser}}$ die Gleichung (11) verwendet. Somit ergibt sich Gleichung (13). Der Faktor β stellt den Anteil an UD-Bauteilkomponenten im Verhältnis zur Gesamtmasse des Rotorblattes dar.

$$P_{\text{Gesamt}} = P_{\text{pro m}^2} * \frac{\beta * m_{\text{Material}}}{\text{Flächengewicht}} \quad (13)$$

Mit der Massengleichung (1) ergibt sich die universelle Formel in Gleichung (14).

$$P_{\text{Gesamt}} = P_{\text{pro m}^2} * \frac{\beta * 0,7 * R^\alpha}{\text{Flächengewicht}} \quad (14)$$

Nun werden alle bekannten Parameter in die Gleichung (13), sodass die Funktion lediglich von der Länge, also dem Rotorradius, abhängig ist.

$$\text{Glasfaser: } P_{\text{Gesamt}} = 8,01 \text{ €/m}^2 * \frac{0,1795 * 0,7 * R^{2,5}}{1,2 \text{ kg/m}^2} = 0,8387 R^{2,5} \quad (14.1)$$

$$\text{Kohlefaser: } P_{\text{Gesamt}} = 20,56 \text{ €/m}^2 * \frac{0,0711 * 0,7 * R^{2,4}}{0,4 \text{ kg/m}^2} = 2,5582 R^{2,4} \quad (14.2)$$

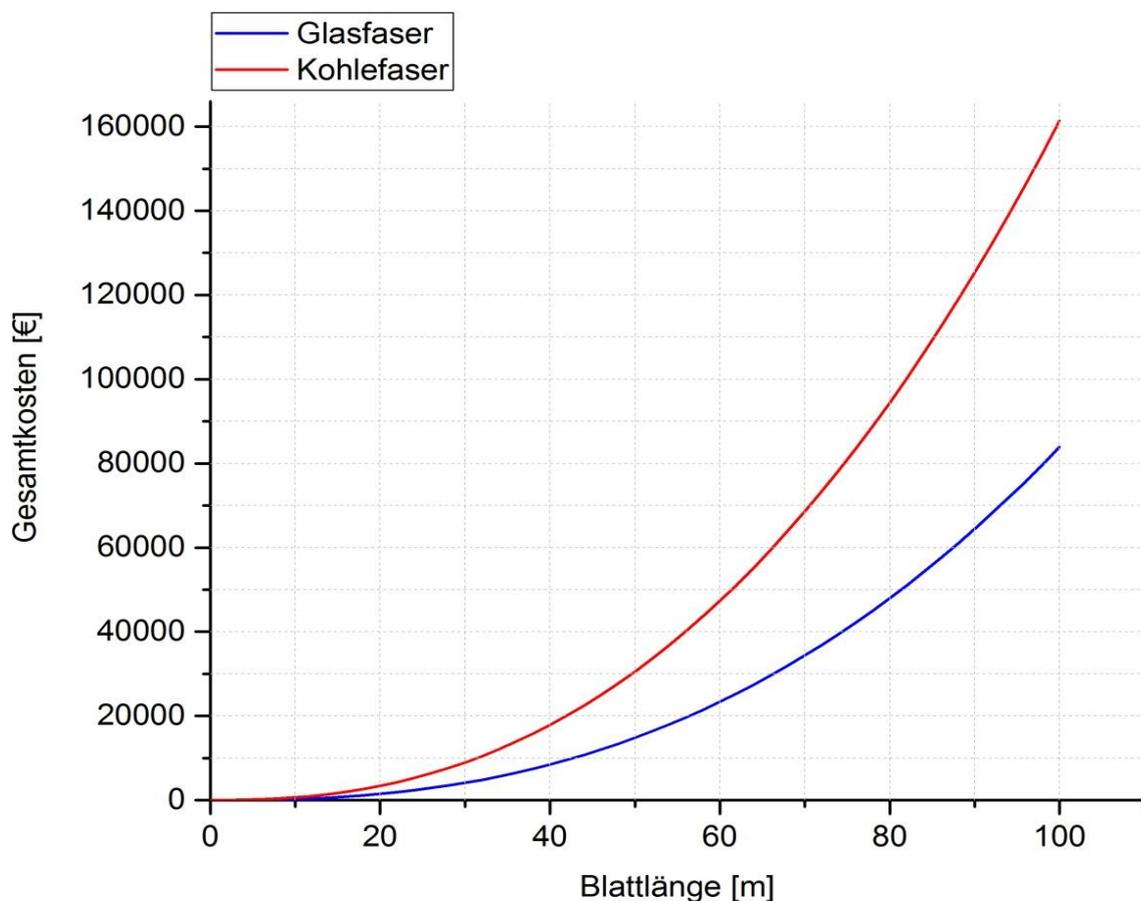


Abbildung 4-7: Kostenverlauf der UD-Bauteilkomponenten im Vergleich von Kohle- und Glasfaser

In Abbildung 4-7 sind die Gleichungen (14.1) in rot und (14.2) in blau als Graphen visualisiert. Es handelt sich hierbei um die Kosten für die gesamten UD-Komponenten. Anhand dieser Grafik ist zu erkennen, dass die Glasfaserbauart trotz größeren Massenzuwachses stets günstiger ist als die Variante mit Kohlefaser. Zudem ist eindeutig zu erkennen, dass die Fertigungskosten eindeutig konvex, also nicht linear, von dem Designparameter Rotorblattlänge abhängen. Dies liegt vor allem an der Gleichung (1), in welcher die Masse in der annähernd dritten Potenz mit dem Rotorblattradius wächst. Somit verhalten sich die Materialkosten des gesamten Bauteils konvex.

Bezugnehmend auf das Kransystem ergeben sich durch die Massenreduktion kumulierte Kosten, welche in Abbildung 4-8 dargestellt sind. Die Grafik zeigt, dass sich die Gesamtkosten für die Fasermaterialien und das benötigte Kransystem annähern und die reine Glasfaserbauweise nicht mehr eindeutig die kostengünstigere Methode darstellt.

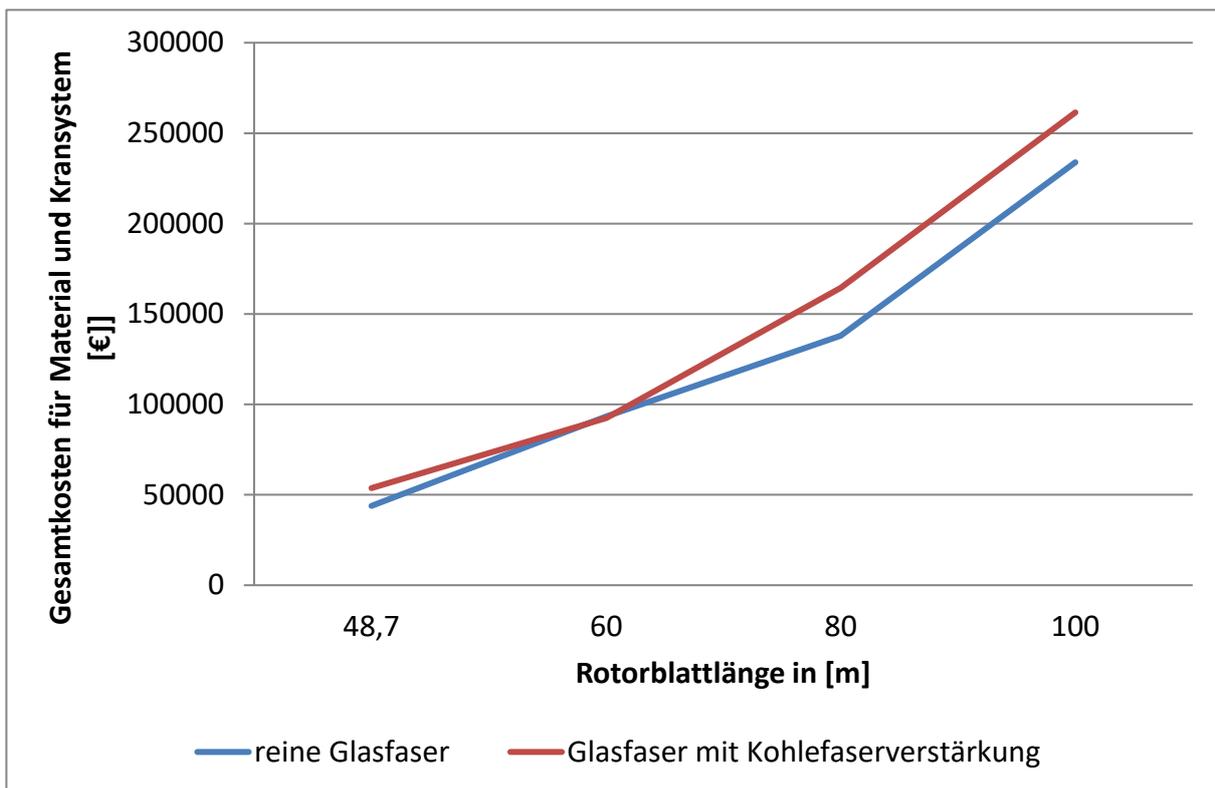


Abbildung 4-8: Kumulierte Kosten für Fasermaterial und Kransystem in Bezug auf die Rotorblattlänge

Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine Umstellung auf Kohlefaserverstärkungen nicht eindeutig zu empfehlen, da es keine direkte Kostenersparnis darstellt, allerdings wird die Glasfaserbauweise an noch anderer Stelle reglementiert. Aus strukturmechanischer Sicht erreicht die Masse der Gurte aus UD-Glasfasern bei dem Up-Scaling je nach Rotorblattkonzept irgendwann einen kritischen Wert, sodass sich der Querschnitt des

Gurtes nicht mehr in die aerodynamische Hülle integrieren lässt, somit weicht der Gurt in das Rotorblattinnere rein. Die inneren Lagen des Glasfasergurtes können bei Zunahme des Gurtquerschnitts nicht so viele Kräfte aufnehmen wie die äußeren, somit werden mehr Lagen benötigt. Diese Lagenzunahme begründet sich durch die exponentiell ansteigenden Trägheitsmomente in der Blattstruktur, welche nach dem Satz von Steiner quadratisch mit dem Abstand zwischen den beiden Gurten ansteigen. Außerdem bringt die zunehmende Gurtdicke Probleme während der Infusion mit sich. Jegliche Risiken für Fertigungsdefekte, wie z.B. Spring In und Porenbildungen, steigen. Auch die Aushärtung eines solch massiven Gurtes ist schwer von dem Designer im Vorwege und von dem technischen Mitarbeiter während des Aushärtens zu simulieren bzw. einzuschätzen. Ein weiteres Problem durch die starke Massenzunahme ist die Durchbiegung des Blattes, welche zu Problemen mit Turmberührungen führen kann.

Dieser Effekt der stärkeren Massenzunahme bei der Glasfaserbauweise lässt sich auch durch das spezifische Blattgewicht, also die Blattmasse pro Quadratmeter Rotorkreisfläche, zeigen. Hierfür wird das Verhältnis der Rotorblattdurchmesser mit einem bauweisenspezifischen Exponenten γ mit der spezifischen Masse des Ausgangsrotorblattes verrechnet (Hau, 2014). Siehe hierzu Gleichung (15)

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 * \left(\frac{D_2}{D_1} \right)^\gamma \quad (15)$$

Für die Glasfaserbauweise soll $\gamma = 0,8$ angenommen werden. Mit zunehmenden Kohlefaseranteil reduziert sich der Exponent auf $\gamma = 0,5$ (Hau, 2014). Mit den Ausgangswerten des Referenzblattes ergeben sich für die jeweiligen Bauweisen folgende Graphen in Abbildung 4-9.

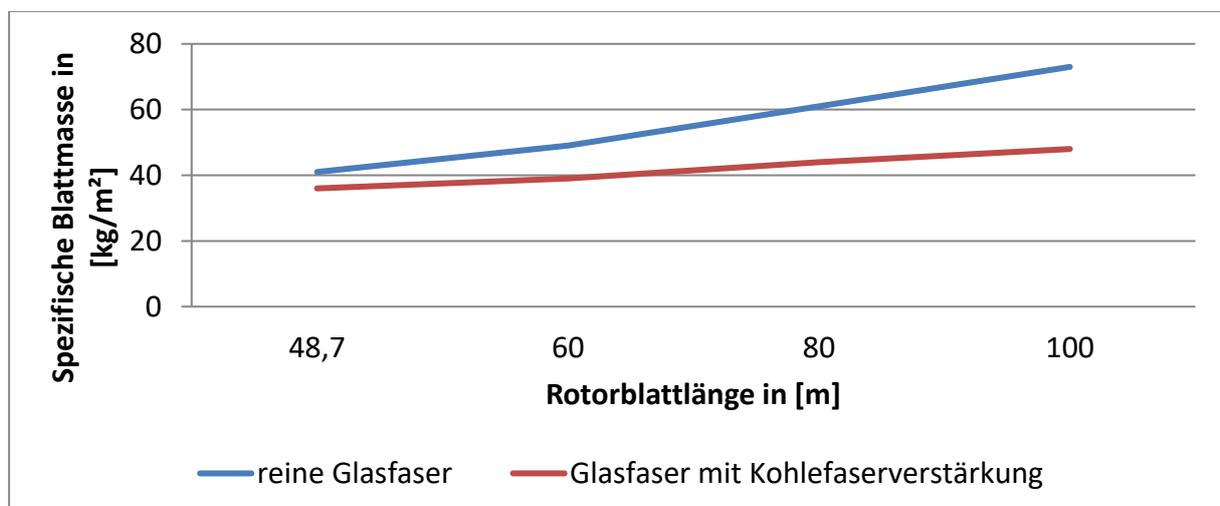


Abbildung 4-9: Verhältnis Rotorblattlänge zur spezifischen Blattmasse

Es ist zu erkennen, dass nicht nur die spezifische Blattmasse der reinen Glasfaserbauweise stets höher ist als die mit Kohlefaserverstärkungen, auch die Steigung des blauen Grafens ist größer als die Steigung der Methode Glasfaser mit Kohlefaserverstärkungen.

Diese Erkenntnisse liefern auch Ergebnisse aus Studien. In Abbildung 4-10 sind empirische Daten nach Rotorblattkonzept in Abhängigkeit der Rotorblattlänge zu spezifischer Masse dargestellt. Diese Daten unterstützen das theoretisch berechnete Modell in Abbildung 4-10.

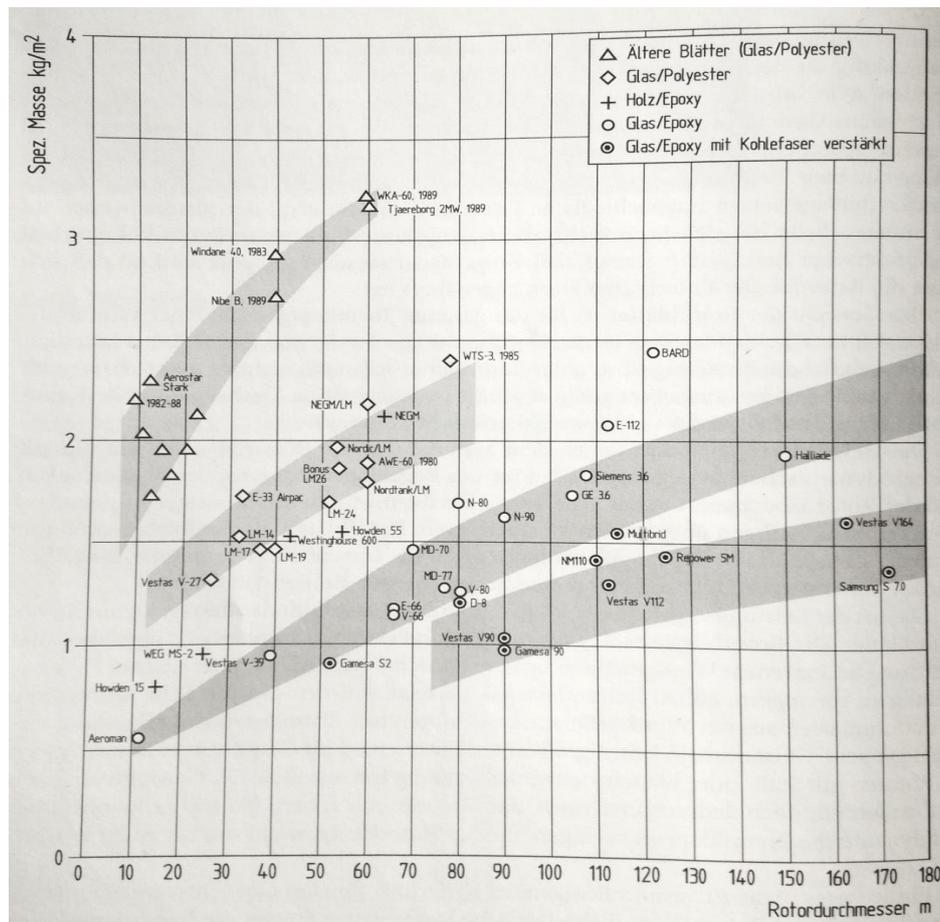


Abbildung 4-10: Empirische Daten zur Abhängigkeit von Rotordurchmesser zur Spezifischen Masse (Hau, 2014)

Somit ist, einhergehend mit den vorangebrachten Begründungen und das eine Substitution vom wirtschaftlichen Aspekt keine Mehrbelastung darstellt, aus Sicht der Qualitätssicherung und Strukturmechanik ein Wechsel auf Kohlefasergurte eindeutig zu empfehlen.

In Abbildung 4-11 ist nach der ausgewählten Kostenbewertungsmethode, dem Zuordnungsprinzip, eine Darstellung der Material- und Personalkosten der Fertigung des

Referenzblattes. Diese Bewertung ist auf Grundlage der DLR internen empirischen Verbrauchs- und Prozesszeitendaten aufgestellt. Die Gesamtkosten des Materials und Personals belaufen sich bei dem Referenzblatt auf 85.721€.

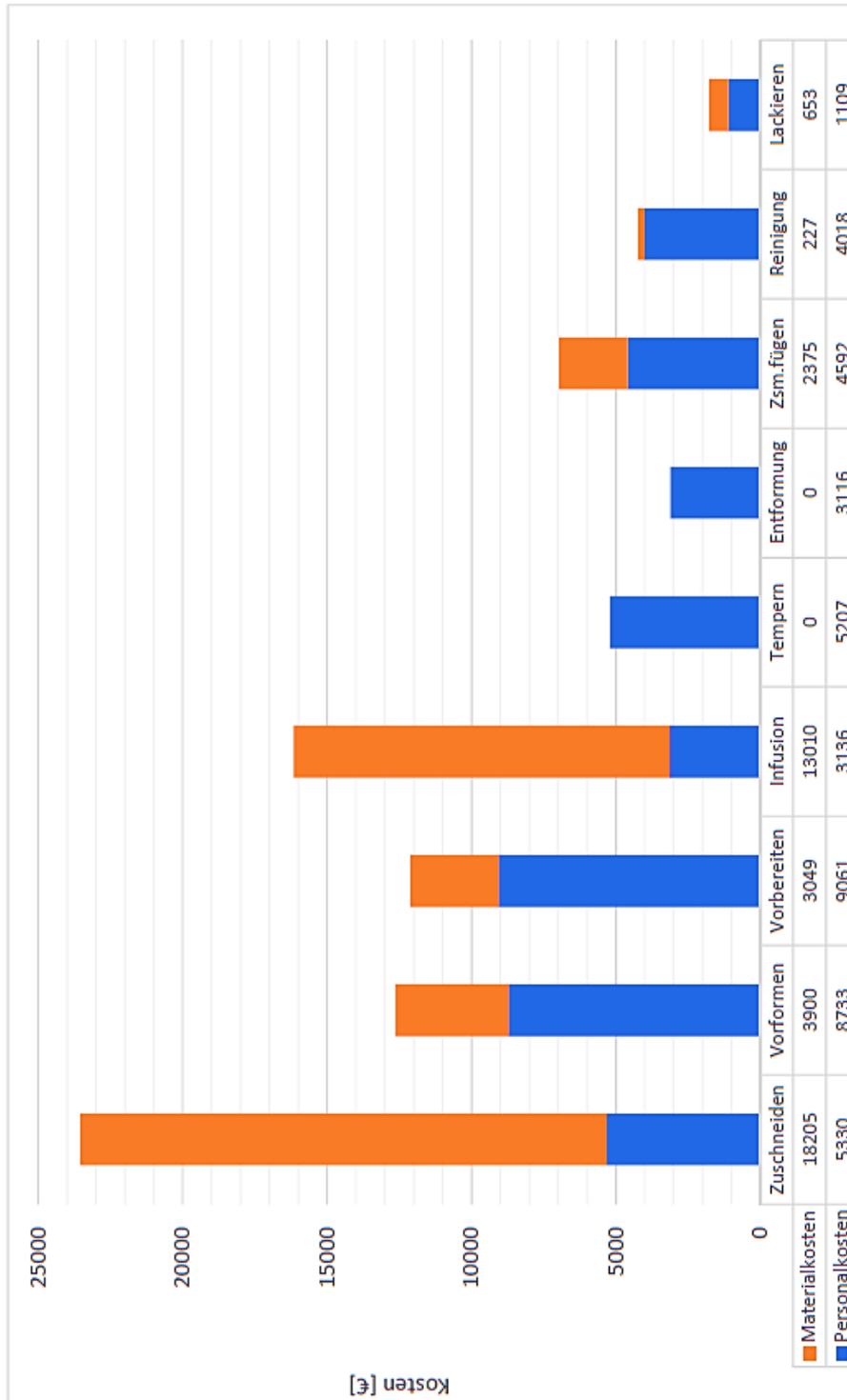


Abbildung 4-11: Kosten der einzelnen Metaprozesse aufgeschlüsselt nach Material- und Personalkosten für das Referenzrotorblatt

Bei den angegebenen Personalkosten handelt es sich stets um die Lohnkosten für die jeweilige Prozesszeit. In jedem Prozess wird von einem reibungslosen Ablauf ausgegangen. Auffällig ist, dass in den Prozessen Tempern, Entformung und Zusammenfügen keinerlei Materialkosten anfallen. Dies liegt vor allem daran, dass erstens die benötigten Maschinen unter Sondereinzelkosten fallen und zweitens es sich bei diesen Prozessen um energieintensive Prozesse handelt. Energiekosten fallen jedoch in die Kategorie Gemeinkosten und liegen somit außerhalb der gesetzten Systemgrenzen.

Die Kostenentwicklung der Materialkosten im Metaprozess Zuschneiden wurde bereits analysiert und ist eindeutig nichtlinear, sondern eine konvexe Funktion. Mit dem Anstieg des Materialverbrauchs steigen die Personalkosten ebenfalls leicht konvex an, da es mehr Zeit für die Zuschnitte braucht.

Der Materialverbrauch im Metaprozess Vorformen und Vorbereiten steigt annähernd linear an, da es sich bei den verwendeten Materialien um Hilfsstoffe handelt. Deren Verbrauch steigt relativ zur Rotorblattlänge an. Als Beispiel ist hier das Eintrennen des Formwerkzeuges zu nennen. Hierbei liegt ein eindeutiger linearer Zusammenhang zur Rotorblattlänge vor. Die Personalkosten steigen ebenfalls linear mit der Rotorblattlänge an. Die Arbeitszeiten der einzelnen Prozessschritte steigen mit der Rotorblattlänge linear an.

Im Metaprozess Infusion steigt der Materialverbrauch nichtlinear an, denn die zu infundierende Harzmenge hängt von der Fasermaterialmasse ab. Da der Faserverbrauch konvex ansteigt, steigt auch der Harzverbrauch und somit die Materialkosten konvex an. Die Personalkosten jedoch steigen annähernd linear an, da das Harzsystem mittels einer Harzmischanlage angerührt wird und lediglich die Prozesszeit für z.B. den Vakuumsack anlegen proportional zur Rotorblattlänge ansteigt.

Bei dem Tempern fallen keine Materialkosten an, sodass hier keine Aussage getätigt werden kann. Die in diesem Metaprozess anfallenden Energiekosten, analog zu jedem Metaprozess, sind unter der Kostenart Gemeinkosten zu verbuchen. Somit fallen sie nicht in die Kostenbewertung, da die Gemeinkosten außerhalb der gesetzten Systemgrenzen liegen. Die Personalkosten verhalten sich nichtlinear, sondern konkav, denn der zeitliche Zusatzaufwand für das Anlegen der Tempermatten ist marginal gering. Durch die Aushärtezeit für das Bauteil ist die Prozesszeit vorgegeben und die variiert nicht mit der Rotorblattlänge. Dasselbe gilt für den Metaprozess Entformen. Materialkosten sind nicht vorhanden und die Entformung beansprucht denselben Zeitaufwand. Somit verhalten sich die Personalkosten konkav.

In dem nächsten Metaprozess, dem Zusammenfügen, steigen die Personalkosten zwar nichtlinear an, aber nur leicht konvex. Mit einer ansteigenden Rotorblattlänge wächst die Prozesskomplexität für diesen Metaprozess. Der Zeitaufwand ist bedingt durch die Fertigungsgenauigkeit, welche mit ansteigender Rotorblattlänge eine größer werdende

Herausforderung darstellt. Der Materialkostenanstieg ist linear proportional zur Rotorblattlänge, da das Klebeharz über die gesamte Länge der Halbschalen aufgetragen wird.

Die Materialkosten des Metaprozesses Reinigen steigen linear mit der Rotorblattlänge, das es sich wieder im Hilfsmaterialien handelt. Folglich steigen auch die Personalkosten linear an, da der Zeitaufwand im relativen Bezug zur Blattlänge steht.

Abschließend wird der Bezug auf die Designphase gezogen. Aus der vorangegangenen Analyse wird deutlich, dass die Materialkosten in den Metaprozessen Zuschnitt und Infusion sowie die Personalkosten im Zuschnittsprozess die Kostentreiber sind. Zudem steigen diese Kostenstellen konvex mit der Rotorblattlänge an. Daher sollte bereits in der Designphase aus Fertigungskostensicht versucht werden, in diesen Bereichen kostengünstig zu konstruieren und die abhängigen Produktionsparameter zu beachten.

4.4.2 Abhängigkeiten der Fertigungskosten von der Rotorblattkomplexität

Als zweiter Ansatz wird die Rotorblattkomplexität betrachtet. Wie bereits in Kapitel 4.1 erläutert, spaltet sich diese in drei Komponenten auf. Die geometrische, die strukturelle und die Prozesskomplexität.

Strukturelle Komplexität		Geometrische Komplexität		Prozesskomplexität	
Strukturelle Biegetorsionskopplung	3	Geometrische Biegetorsionskopplung	2,5	Zwei Fasermaterialarten	2
Geschlossenes Formwerkzeug	1	Vorbiegung	1	Aushärtetemperatur höher als Raumtemperatur	1
Blitzableiter	2,5	Profiltreue	3	Kohlefaser-Komponenten Fräsen/Schleifen	2
Anti-Icing	2	Verwendung von Schaumwerkstoffen	1,5	Verwendung von Prepreg	2
Rund-/Differentialholm	1	Winglets	1	Off-Shore Auslegung	1,5
				Wurzelvorhärtung	1
Rotorblattlänge ist ein Komplexitätsmultiplikator für alle Komplexität					

Tabelle 7: Rotorblattkomplexitäten

In Tabelle 7 sind konkrete Komplexitäten nach den jeweiligen Kategorien aufgeteilt. Jede von ihnen erhält einen Komplexitätswert. Die Werte wurden im Rahmen der Gruppendiskussion bestimmt. Die Bewertung besteht somit aus einer Kombination aus der Designsicht und der Fertigungssicht. Eine konkrete quantitative Komplexitätenbewertung ist im Rahmen dieser Arbeit nicht realisierbar. Deswegen ist eine qualitative Bewertungsmethode ausgewählt. Die Komplexitätswerte werden auf der Wissensgrundlage einer umfangreichen Recherche sowie aus den Experteninterviews bestimmt. Im Folgenden werden die einzelnen Komplexitäten erläutert, sodass die Bewertung im Groben nachvollzogen werden kann.

Die strukturelle Biegetorsionskopplung ist aufwendig im Designprozess, da bei der Lastenberechnung der inneren Struktur mehr Kräfte in mehr Richtungen beachtet werden müssen. Diese zusätzlichen Berechnungen nehmen mehr Zeit in Anspruch als z.B. bei der geometrischen Biegetorsionskopplung. Bei dieser Methode sind lediglich der Materialzuschnitt und die Lagenablage aufwendiger.

Die Vorbiegung ist schon eine länger etablierte Technik, welche höhere geometrische Anforderungen an das Formwerkzeug stellt. Ein geschlossenes Formwerkzeug wiederum ist eine sehr moderne Technik im Bereich der Rotorblattfertigung. Die meisten Rotorblattdesigns sind für offene Formwerkzeuge ausgelegt, sodass die Umstellung einen Zusatzaufwand für die Designer darstellt. Außerdem stellt dieses Formwerkzeugkonzept hohe Anforderung an die technischen Mitarbeiter während der Fertigung, da Korrekturen während des Fertigungsprozesses schwer bis gar nicht durchführbar sind. Ein Einhalten der Profiltreue ist wichtig, da die aerodynamische Hülle für die akustische Belastung verantwortlich ist. Außerdem kann durch das Einhalten der geforderten Profilform zwischen drei bis sieben Prozent mehr Jahresenergieertrag generiert werden (Kramkowski, 1992).

Bezüglich des Blitzableiter Systems gibt es hohe Anforderungen an die Rotorblattdesigner. Vor allem bei großen Windkraftanlagen muss davon ausgegangen werden, dass das Blatt von Blitzen getroffen wird. Das Blitzableiter System ist hochintegral in das Rotorblatt eingebaut.

Die Technik eines zweigeteilten Rotorblattes ist noch nicht in die Produktion gegangen. Es handelt sich dabei um eine der neuesten und zukunftsweisenden, vor allem bei längeren Rotorblättern, Techniken in der Windenergiebranche. Viele Unternehmen investieren momentan in Forschungsprojekte, welche segmentierte Rotorblattkonzepte erstellen. Die Bindungsstelle der beiden Blattteile stellt jedoch eine große strukturengineeringwissenschaftliche Herausforderung dar.

Ein Anti-Icing System bedeutet nach DLR internen Abschätzungen einen Massenzuwachs von ca. 2%, sodass neben der Integration des Systems die Lastberechnung angepasst werden muss. Ein Anti-Icing System ist meist eine Option, welche in den nördlicheren Gebieten Anwendung findet. Es werden Eissensoren und Heizelemente in die Rotorblattstruktur implementiert.

Die Verwendung von Schaumwerkstoffen ist dahingehend kompliziert, als dass sie sich schwer in die exakte Soll-Form bringen lassen, denn sie weisen eine hohe Eigensteifigkeit auf. Deswegen müssen sie vor dem Einlegen in die Rotorblatthalbschalen angewärmt und präzise abgelegt werden. Auch das Verwenden von zwei Fasermaterialien bedeutet einen Mehraufwand. Das Harzsystem muss für beide Materialien kompatibel sein. Außerdem muss bei dem Lagenprozess die Ablegemaschine ggf. mehrfach umgerüstet werden. Wenn Kohlefasern verwendet werden und diese an Stellen verbaut werden, welche evtl. geschliffen oder gefräst werden müssen, zieht dies eine größere Prozesskomplexität mit sich, da ein gesondertes Abluftsystem mit aufwendiger Filterreinigung in der Halle integriert sein muss. Kohlefasern haben die Eigenschaften beim Schleifen oder Fräsen explosionsfähigen Kohlefaserstaub zu entwickeln. Außerdem sind die Kohlefasern schädlich für die Atemwege der Mitarbeiter sowie für die elektrischen Komponenten von Computern. Eine Modifikation der Halle muss auch bei der Verwendung von Prepreg vorgenommen werden, denn die Luftfeuchtigkeit muss sehr gering gehalten werden, damit kein Wasser in den Prepreglagen eingefangen wird. Dies hätte fatale Folgen bei dem Aushärtprozess im Autoklaven bzw. Ofen. Außerdem muss für die Lagerung des Prepregs ein Kühlsystem mit einer Kühllhalle betrieben werden, welches das Material stets bei -18°C lagert.

Eine weitere Prozesskomplexität ist, wenn die Aushärtetemperatur über der Raumtemperatur liegt. Meist wird hierfür ein integrales Heizsystem im Formwerkzeug benötigt, oder ein der Rotorblattlänge entsprechender Ofen. Bei beiden Methoden handelt es sich um eine Spezialanfertigung. Bei dem Formwerkzeug muss zusätzlich auf die thermischen Verformungseigenschaften geachtet werden.

Falls ein Rotorblatt für die Off-Shore Verwendung ausgelegt werden soll, sind viele zusätzliche Sicherheitsfaktoren zu beachten. Vor allem im Bereich Blattoberfläche, also bei der Spachtelmasse, dem Gelcoat und dem Decklack, muss das Design stark an die Wetterbedingungen angepasst werden. Zudem müssen Off-Shore Rotorblätter robuster gefertigt werden, da Wartung und Reparaturen nur an wenigen Tagen im Jahr durchführbar sind und zudem mit einem großen Kostenaufwand verbunden sind.

Je nach dem welches Rotorblattdesign vorliegt, werden die Werte der Komplexitäten addiert. In Abbildung 4-12 wird der aufsummierte Komplexitätswert auf der Ordinate eingetragen, während auf der Abszisse die Rotorblattlänge abgebildet wird. Somit ergibt sich ein Punkt auf der Matrix. Je weiter sich der Punkt im roten Bereich befindet, desto teurer ist die Fertigung des Rotorblattes. Die eingetragenen Punktwerte sind das Resultat eines Beispielvergleichs, welcher in Tabelle 8 durchgeführt wird.

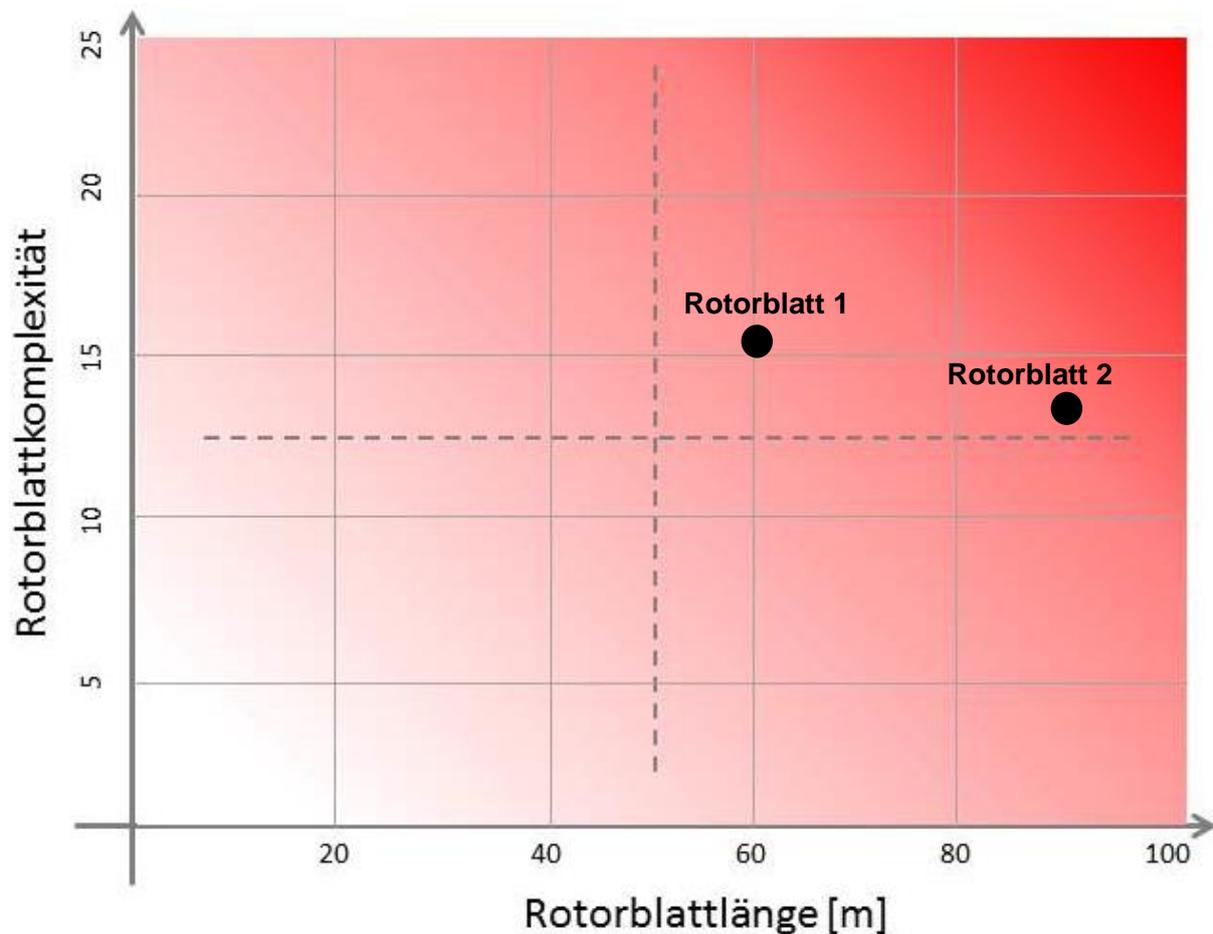


Abbildung 4-12: Rotorblattmatrix

Diese Matrix erlaubt zudem den Vergleich von zwei bzw. mehreren Rotorblattkonzepten, in dem die resultierenden Punkte mit einander verglichen werden können. Im Folgenden wird zur Veranschaulichung der Funktionsweise der Rotorblattmatrix ein Beispielvergleich durchgeführt.

In Tabelle 8 werden zwei unterschiedliche Rotorblattkonzepte mit unterschiedlichen Längen verglichen. Zum einen Rotorblatt 2, welches ein Off-Shore Blatt für nordische Regionen ist. Zudem werden zur Kosteneinsparung Schaumwerkstoffe benutzt. Es soll eine leistungsstarke Windenergieanlage sein, sodass eine sehr lange Rotorblattlänge gewählt wird. Zum anderen das Rotorblatt 1, welches ein sehr effektives Rotorblatt mit moderner Technik widerspiegelt. Die genaue Einhaltung der Profiltreue sowie die Winglet-Technik zeigen dies auf. Außerdem werden zwei Fasermaterialien verwendet, Glasfaser und Kohlefaser, damit die mechanischen Eigenschaften des jeweiligen Fasertyps optimal genutzt werden können und das Blatt leichter wird.

Rotorblatt 1		Rotorblatt 2	
Rotorblattlänge	60 m	Rotorblattlänge	90 m
Geometrische Biegetorsionskopplung	2,5	strukturelle Biegetorsionskopplung	3
Vorbiegung	1	Vorbiegung	1
Blitzableiter	2,5	Blitzableiter	2,5
Anti-Icing	2	Profiltreue	3
Off-Shore Auslegung	1,5	Winglets	1
Verwendung von Schaumwerkstoffen	1,5	Zwei Fasermaterialarten	2
Rundholm	1	Kohlefaserkomponenten Fräsen/Schleifen	2
Wurzelvorhärtung	1	Differentialholm	1
Summe der Komplexitätswerte	13	Summe der Komplexitätswerte	15,5
Kostenbewertung		Kostenbewertung	

Tabelle 8: Zwei Beispielrotorblattkonzepte im Vergleich

Anhand der Kostenbewertung in der letzten Spalte lässt sich erkennen, dass das lange Off-Shore Rotorblatt 1 teurer in der Fertigung ist, als das moderne Rotorblatt 2, da der Farbton des ersten Blattes rötlicher ist als der zweite Farbton.

Um im letzten Schritt die beiden betrachteten Designparameter Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität in Verbindung zu bringen, wird auf das Parametermodell vom Anfang dieses Kapitels verwiesen. Eine konkrete Parametrisierung des Modells und aller Abhängigkeiten ist nicht möglich, da es sich bei den Abhängigkeiten um hoch sensible und komplexe Prozesse handelt, welche sich alle gegenseitig bedingen. Somit war es im Rahmen der Bachelorarbeit nicht möglich, eindeutige quantitative Abhängigkeiten zu erarbeiten. In dem Modell ist jedoch ersichtlich, bei welchen Produktionsparametern es sich um die Kostentreiber handelt und welche Produktionsparameter die größten Zeitfaktoren darstellen. Konkreten Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern sind in den vorangegangenen Seiten erörtert worden. In dem Modell sind an den jeweiligen Verbindungsstellen die Seitenzahlen angegeben, die auf die Analyse der Abhängigkeit in dieser Arbeit verweisen.

5 Fazit und Ausblick

5.1 Fazit

In Rahmen dieser Arbeit konnte auf Grundlage von Experteninterviews sowie Gruppendiskussionen und eigener Recherche ein generischer Design- und Fertigungsprozess erstellt werden. Weiterführend wurden einflussnehmende Bestimmungs- und Entscheidungsparameter bestimmt und nach ihrer Wichtigkeit priorisiert. Die Fertigungskosten hängen von den Designparametern Rotorblattlänge und Rotorblattkomplexität ab, welche wiederum sich über eine Wirkungskette von Produktionsparametern gegenseitig bedingen.

Um die quantitativen Abhängigkeiten der Designparameter und deren Veränderungen auf die Fertigungskosten zu analysieren wurde eine Materialsubstitution der unidirektionalen Glasfaserkomponenten mit Kohlefaser durchgeführt. Zwar wird im Verhältnis weniger Kohlefaser bei gleichen Lastanforderungen benötigt, die Preisdifferenz des Materials bewirkt allerdings, dass aus rein wirtschaftlicher Sicht die Substitution kein Kostenvorteil darstellt. Über den gesamten Fertigungsprozess betrachtet ist die Substitution jedoch bei langen Blattlängen eindeutig zu empfehlen. Die Gewichteinsparungen wirken sich kostensenkend auf den gesamten Fertigungsprozess aus. So decken z.B. allein die Kosteneinsparungen des Kransystems durch die geringen Traglastanforderungen bereits die Preisdifferenz der beiden Materialkosten. Zudem stellt die exponentiell ansteigende Wandstärke der Bauteile mit Glasfasern bei dem Up-Scaling Prozess ein Problem dar. Dieser Effekt lässt sich durch steiler ansteigenden spezifische Blattmasse beschreiben.

Bei dem Up-Scaling verhalten sich die Material- und Personalkosten der einzelnen Metaprozesse unterschiedlich. Die Materialkosten der Metaprozesse Zuschneiden und Infusion sowie die Personalkosten der Metaprozesse Zuschneiden, Tempern und Zusammenfügen verhalten sich nichtlinear. Dabei handelt es sich bei allen Metaprozessen um einen konvexen Kostenanstieg, außer bei dem Metaprozess Tempern. Die Materialkosten der Metaprozesse Vorformen, Vorbereiten, Zusammenfügen und Reinigen sowie die Personalkosten der Metaprozesse Vorformen, Vorbereiten, Infusion und Reinigen verhalten sich (annähernd) linear.

Die Abhängigkeiten von der Rotorblattkomplexität lassen sich nur qualitativ darstellen. In erster Instanz teilt sich die Komplexität in geometrische, strukturelle und Prozesskomplexität auf. Einen direkten Bezug zu linearen und nichtlinearen

Kostenentwicklung kann bei dem Designparameter Rotorblattkomplexität nicht gezogen werden. Hierfür fehlt eine ausreichend validierte und mit empirischen Daten belegte Grundlage, auf welcher eine Kostenbewertung aufgebaut werden kann.

Im Dialog mit den Experten hat sich herausgestellt, dass die für das Rotorblattdesign zuständigen Ingenieure viele der Produktionsparameter als gegeben ansehen und in die Konstruktion und Simulationen nicht als Variablen einfließen. Betrachtet man also Produktionsparameter, wie z.B. die Faserpermeabilität, bereits während der Designphase als variabel, können sich bereits daraus große Einsparpotentiale ergeben.

5.2 Ausblick

In dieser Arbeit wird die Methode des Up-Scaling aus aktuellem Anlass des Trends, beschrieben wie in Kapitel 1, verwendet, jedoch wäre es interessant, ob sich dieselben Ergebnisse bei einem Down-Scaling einstellen. Ein weiterer Ansatz wäre die Betrachtung des Harzsystems. Da es sich bei dem Harzsystem um einen Hauptkostentreiber handelt, kann als möglicher nächster Schritt analysiert werden, ob anstatt einer Materialsubstitution, Kostenersparnisse durch eine Matrixsubstitution realisierbar sind.

Als weitere Komplexitäten zu betrachten, wären ein zwei geteiltes Blatt oder die Pultrusionstechnik. Zu beiden Konzepten gibt es momentan viele Forschungsprojekte und nach den Interviews mit den DLR-Experten und einem Rotorblatthersteller, handelt es sich bei diesen Techniken um die zukunftsweisenden Techniken in der Windenergiebranche.

Ein weiterer Ansatzpunkt um diese Arbeit fortzuführen, wäre das verändern der Systemgrenzen. In Bezug auf die Kostenrechnung können Gemeinkosten in die Bewertung miteinfließen, sodass z.B. der Energieverbrauch mitberücksichtigt wird. Oder die Betrachtung der Transport-, Montage- und Wartungskosten. Im Bereich der Kostenbewertung wäre zudem eine Ausweitung des Bewertungstools zu einem „Make-or-Buy“ Entscheider für Sondereinzelkostenstellen denkbar, welcher unter Bezugnahme von Anschaffungskosten, Wartungskosten über Eigenrisiko, bis hin zu Abschreibungen Faktoren miteinbezieht und eine Empfehlung abgibt. Speziell die Transportkosten können das Bild der Kostenbewertung stark verzerren.

Abschließend ist zu sagen, dass die Zusammenhänge der Fertigungskosten von Designparameter sehr komplex sind. Es ist ein sensibles System mit Abhängigkeiten, welche einander stark bedingen. Es sind in dieser Arbeit zwar nur zwei Designparameter betrachtet, aber selbst deren Analyse kann noch stark ausgeweitet werden und der Detailgrad sehr viel tiefer gehen. Allerdings benötigt solch eine Analyse ein umfassendes Wissen an Strukturmechanik, Aerodynamik, Leichtbauingenieurwesen und empirische Daten.

6 Literaturverzeichnis

AVK - Industrievereinigung Verstärkter Kunststoffe e.V. 2014. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014.

Working Group III of the IPCC. 2012. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Potsdam : s.n., 2012.

Al-Lami. 2015. *Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost Analysis for Manufacturing and Assembly of Complex Composite Structures*. Braunschweig : Institut für Faserverbundeleichtbau und Adaptronik, 2015.

Apmann. 2016. *Rotorblattfertigung: Was kann die Windenergie von der Luftfahrt lernen*. Varel : Premium Aerotec, 2016.

Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH. 2017. bacuplast.de. [Online] 07. Februar 2017. <https://www.bacuplast.de/kohlefaser/kohlefasergelege.html>.

Bak et al. 2013. *Description of the DTU 10 MW Reference Wind Turbine*. Roskilde : DTU Vinenergi, 2013.

Bergner. 2016. *Vorlesungsunterlagen der TU Chemnitz - Faserverbundkonstruktion*. 2016 : TU Chemnitz, 2016.

Buchholz, Gerhards. 2016. *internes Rechnungswesen*. Berlin Heidelberg : Gabler Verlag, 2016.

Bundesverband WindEnergie. 2017. wind-energie.de. [Online] 26. Januar 2017. <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/aerodynamik-rotorblaetter>.

Carbon-Werke Weißgerber GmbH & Co KG. 2017. carbon-vertrieb.com. [Online] 07. Februar 2017. http://www.carbon-vertrieb.com/shop/product_info.php?products_id=357.

Composites4U. 2017. composites4u.co.uk. [Online] 07. Februar 2017. <http://www.composites4u.co.uk/Medium-Weight-Carbon-Fibre-Braid-6k-40mm>.

Deimel, Isemann, Müller. 2006. *Kosten- und Erlösrechnung*. München : Pearson, 2006.

Deutsche WindGuard. [Online] 27. März 2017. strom-report.de.

Deutsches Institut für Luft- und Raumfahrt e.V. [Online] 26. Februar 2017.

http://www.dlr.de/as/desktopdefault.aspx/tabid-4701/7792_read-12148/.

Deutsches Lackinstitut. 2017. lacke-und-farben.de. [Online] 09. Februar 2017.

<http://www.lacke-und-farben.de/magazin/wissenschaft-technik/langfristiger-schutz-fuer-windenergieanlagen/>.

DGUV Fachbereich Holz und Metall. 2014. *Bearbeitung von CFK Materialien*. 2014.

Die Bundesregierung. 2017. bundesregierung.de. [Online] 28. März 2017.

https://www.bundesregierung.de/Webs/Breg/DE/Themen/Energiewende/EnergieErzeugen/ErneuerbareEnergien-Zeitalter/_node.html.

Ehrenstein. 2006. *Faserverbund-Kunststoffe*. München, Wien : Carl Hanser Verlag, 2006.

Flemming, Ziegmann, Roth. 1998. *Faserverbundbauweisen*. Berlin, Heidelberg :

Springer Verlag, 1998.

Gamesa Corporación Tecnológica. 2017. www.gamesacorp.com. [Online] 12. Januar

2017. <http://www.gamesacorp.com/en/products-and-services/wind-turbines/design-and-manufacture/manufacturing-and-assembly-process.html>.

Gasch, Twele. 2016. *Windkraftanlagen*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016.

Gurit GmbH. 2016. *Wind Energy Handbook - Blade Manufacturing Processes*. Zürich :

s.n., 2016.

Gutierrez. 2017. compositesworld.com. [Online] 30. März 2017.

<http://www.compositesworld.com/articles/the-evolution-of-infusion>.

Hau. 2014. *Windkraftanlagen*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2014.

Hilmer. 2015. *Ressourceneffizienz von Fertigungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe*.

Braunschweig : s.n., 2015.

Kramkowski, Seifert. 1992. *Rotor Blades in Practice*. Stuttgart : s.n., 1992. Bericht von dem IEA-Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines.

LM Wind Power. [Online] 27. März 2017.

<https://www.lmwindpower.com/en/products-and-services/blade-types/longest-blade-in-the-world>.

Neitzel, Mitschang, Breuer. 2014. *Handbuch Verbundwerkstoffe*. s.l. : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.

R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH. 2017. [Online] 03. März 2017. <http://www.r-g.de/>.

—. **2009.** *Faserverbundwerkstoffe*. Waldenbuch : s.n., 2009.

Riebel. 1994. *Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung*. Wiesbaden : Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, 1994.

Schürmann. 2007. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden*. Berlin, Heidelberg : Springer Verlag, 2007.

Siemens AG. 2012. Fact Sheet B75 Rotorblatt.

<https://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2012/energy/factsheet-b75-rotorblatt-d.pdf>. [Online] 2012.

Umweltbundesamt. [Online] 28. März 2017.

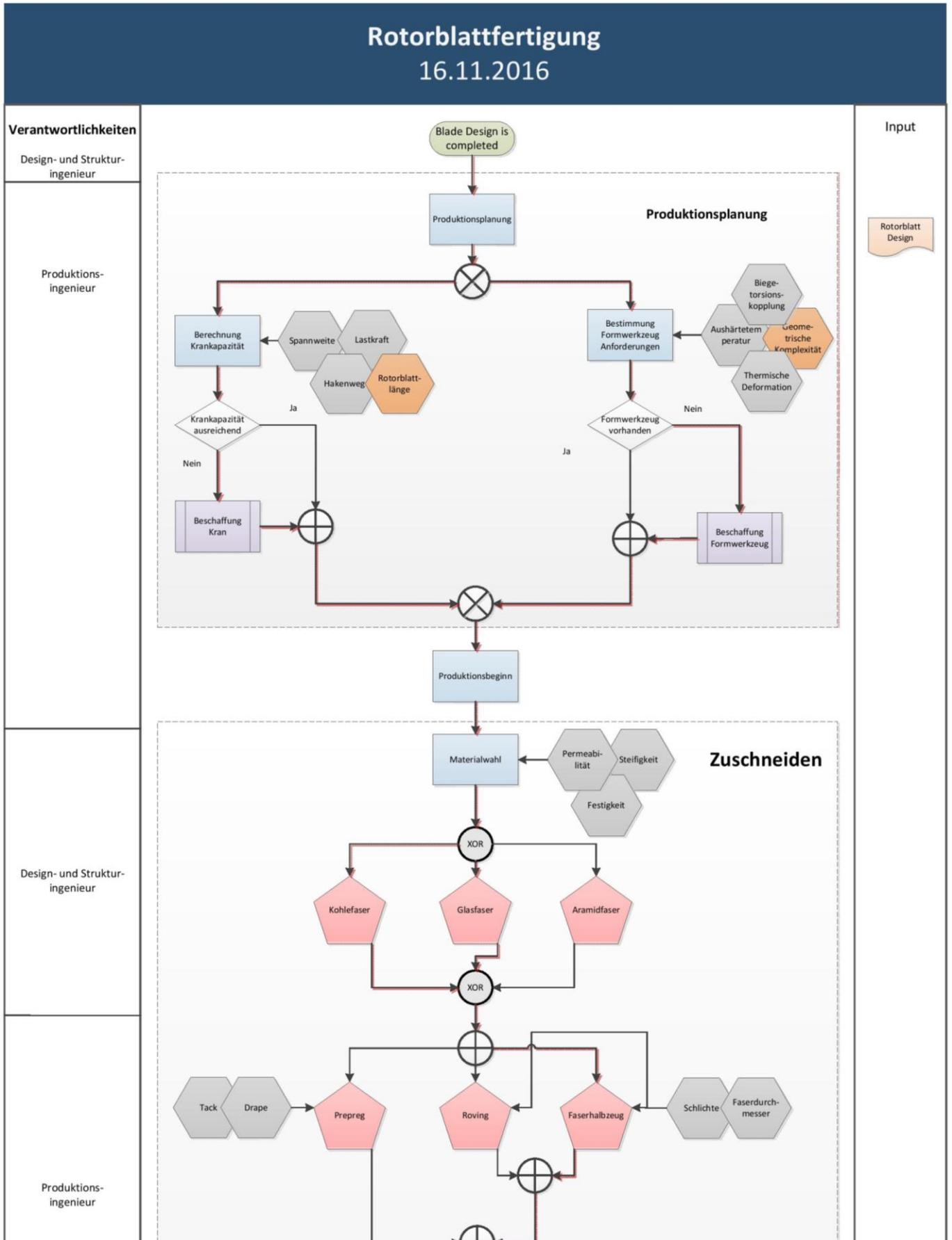
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen>.

Vestas Wind Systems A/S. [Online] 13. März 2017.

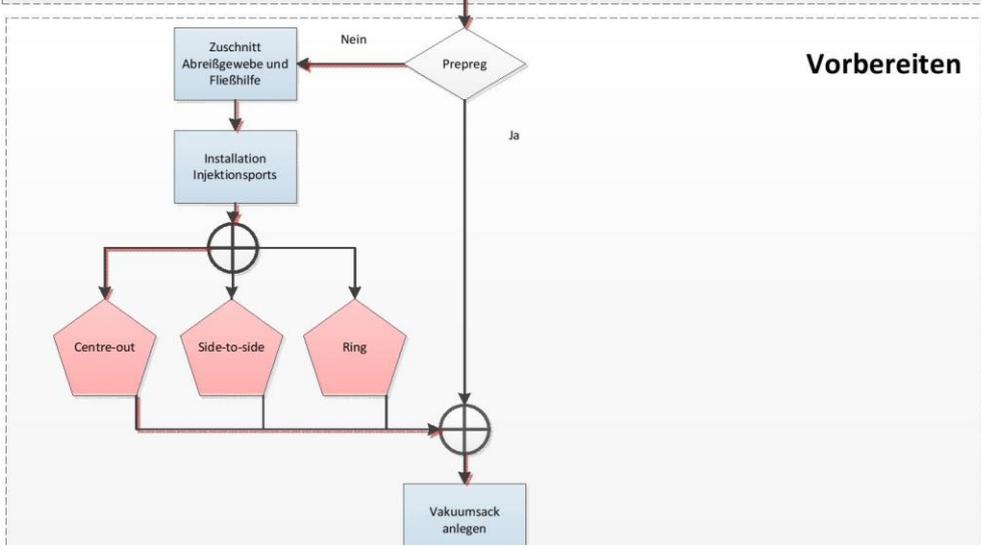
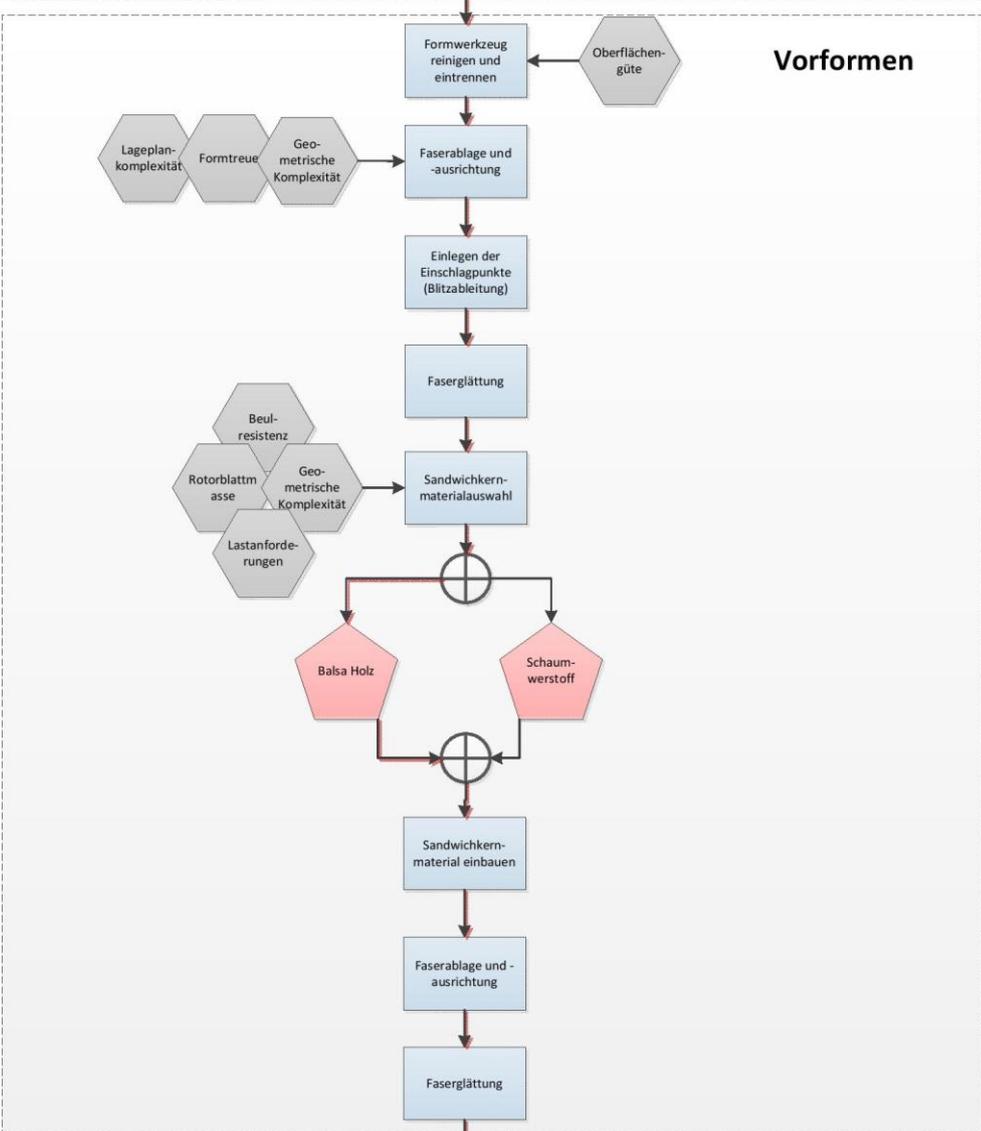
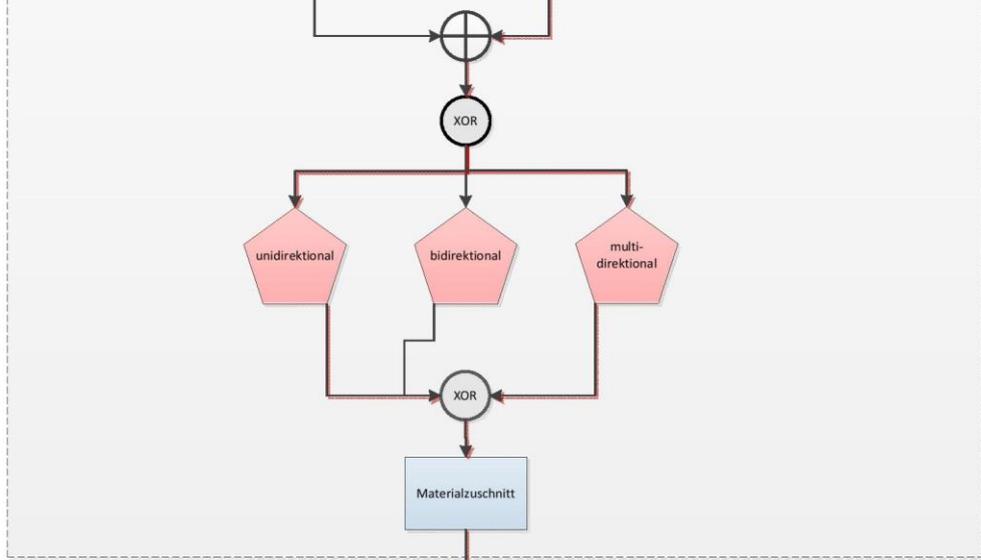
https://www.vestas.com/en/products/turbines/v136-_3_45_mw#!about.

Anlagen

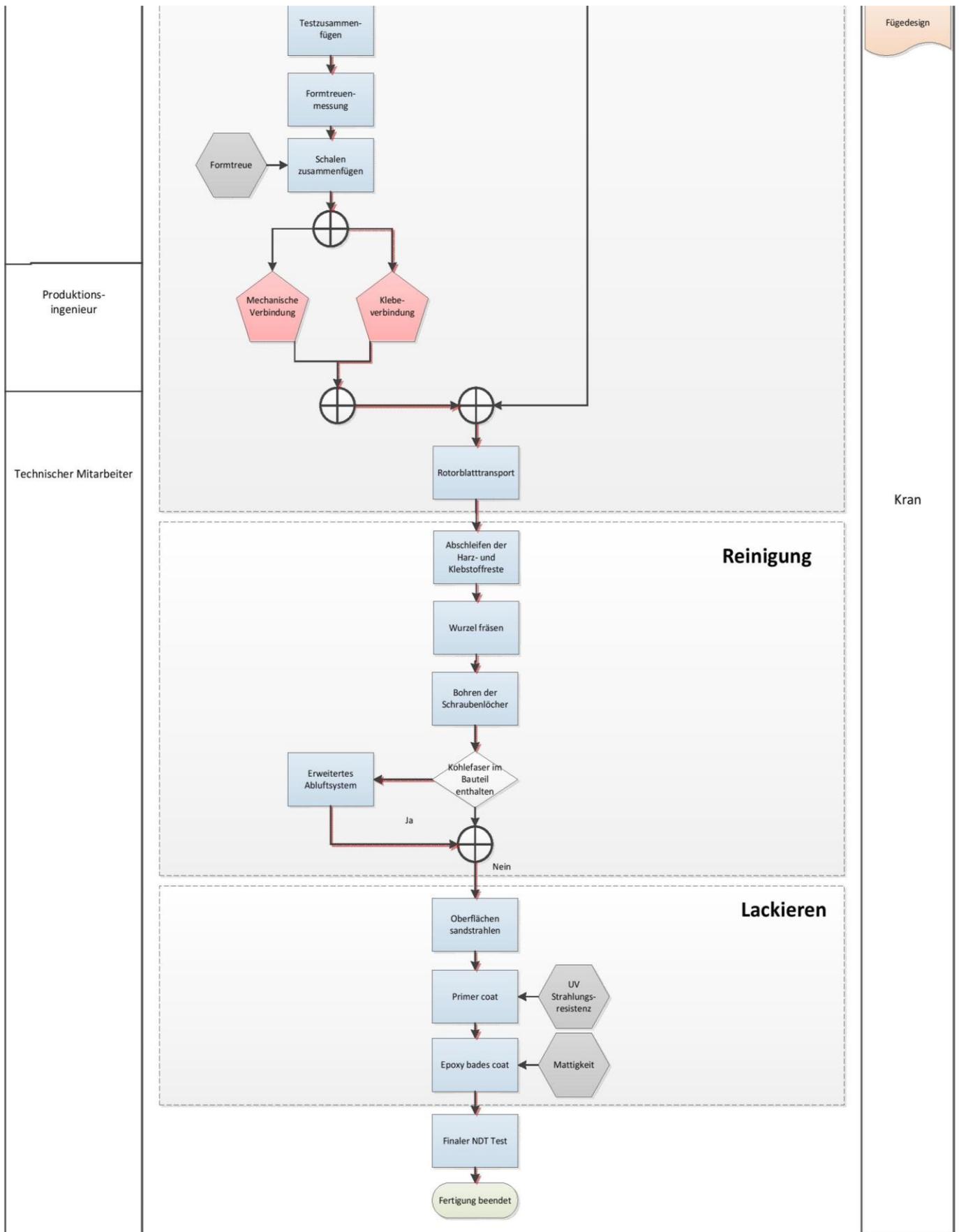
Anlage 1: Prozess Rotorblattfertigung



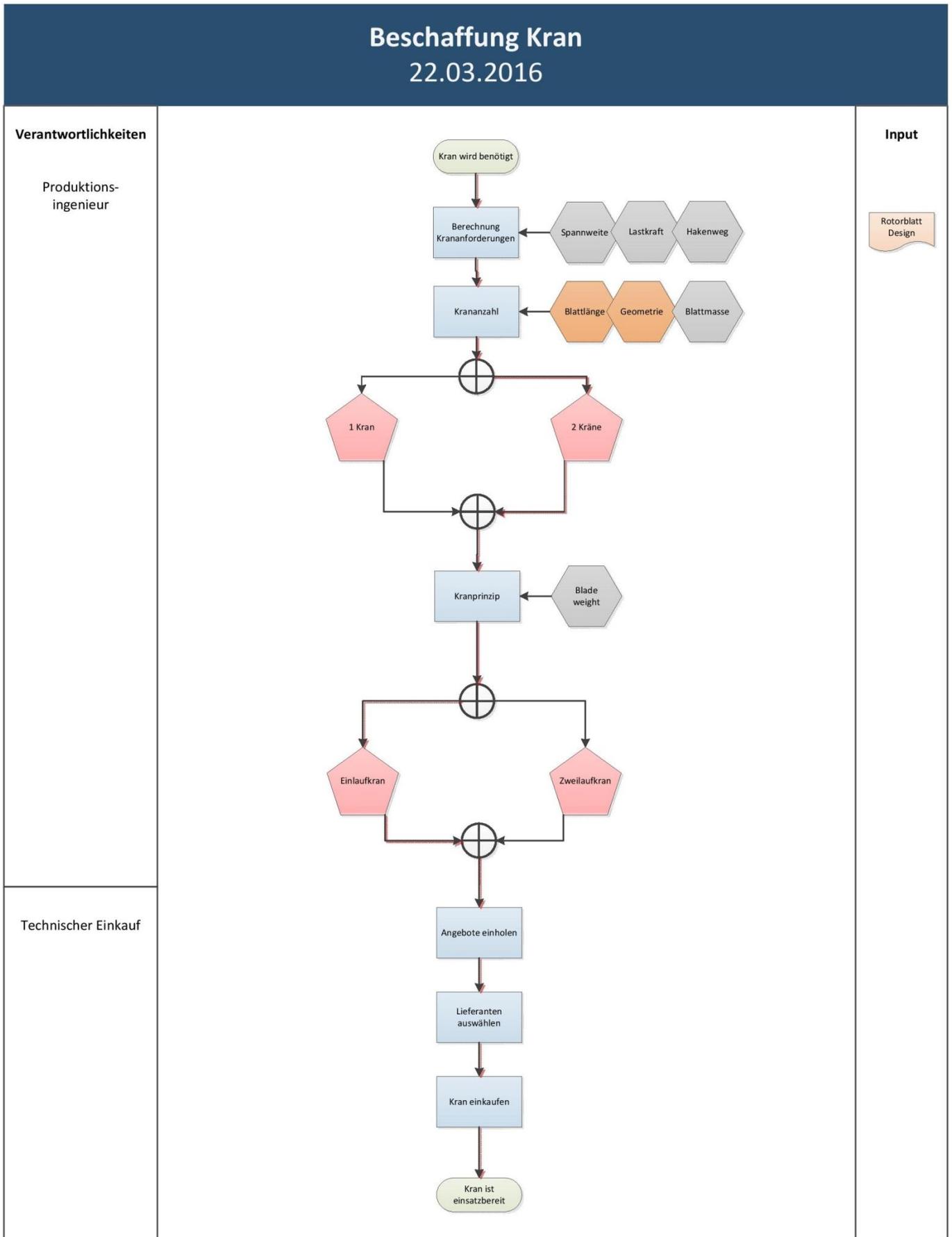
Design- und Struktur-ingenieur
Technische Mitarbeiter
Design- und Struktur-ingenieur
Technische Mitarbeiter
Design- und Struktur-ingenieur
Technischer Mitarbeiter
Produktionsingenieur



Form-werkzeug
Ablageplan
Formwerkzeug Konzept



Anlage 2: Prozess Beschaffung Kran



Anlage 3: Prozess Beschaffung Formwerkzeug

Beschaffung Formwerkzeug
22.03.2016

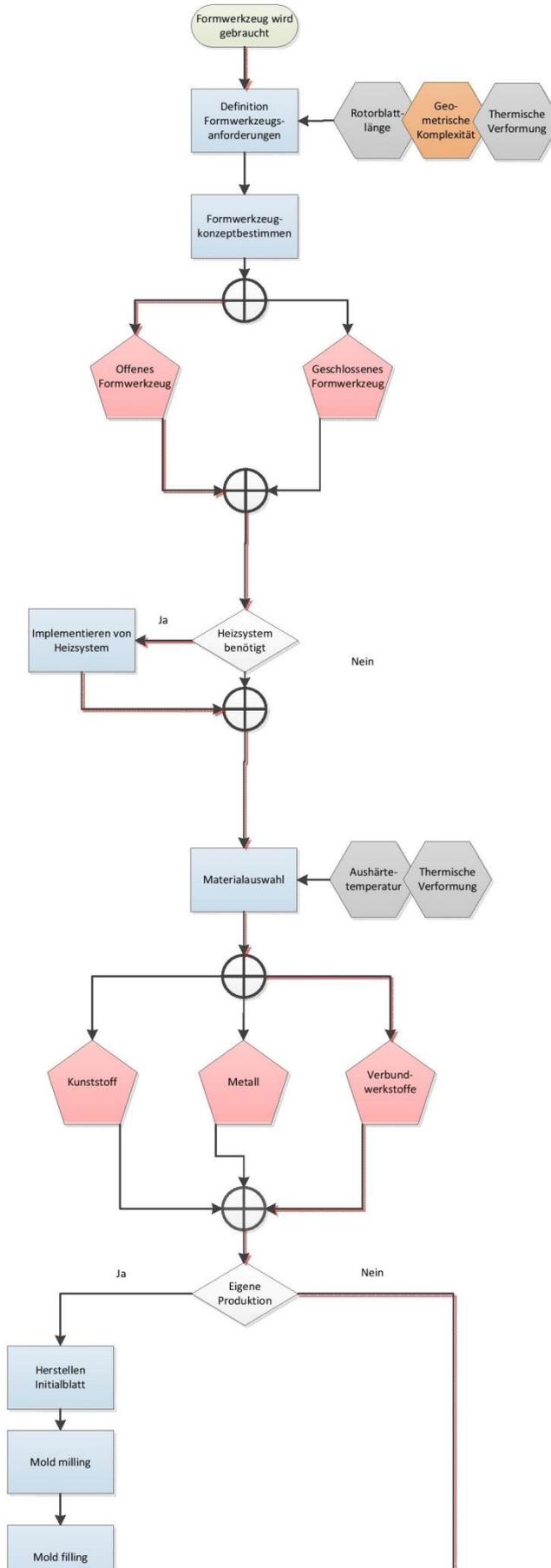
Verantwortlichkeiten

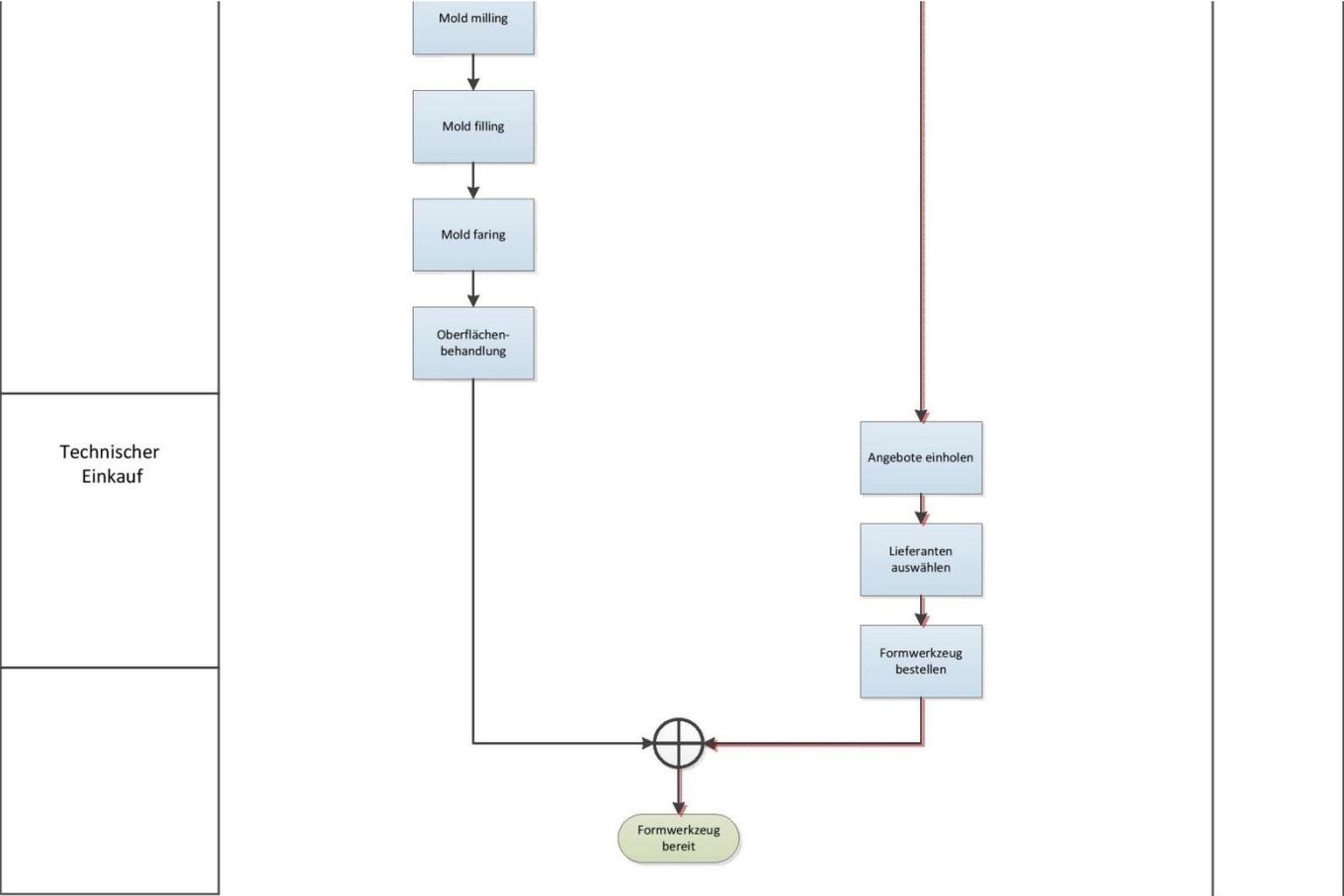
Input

Design- und
Strukturingenieur

Konzept innere
Struktur

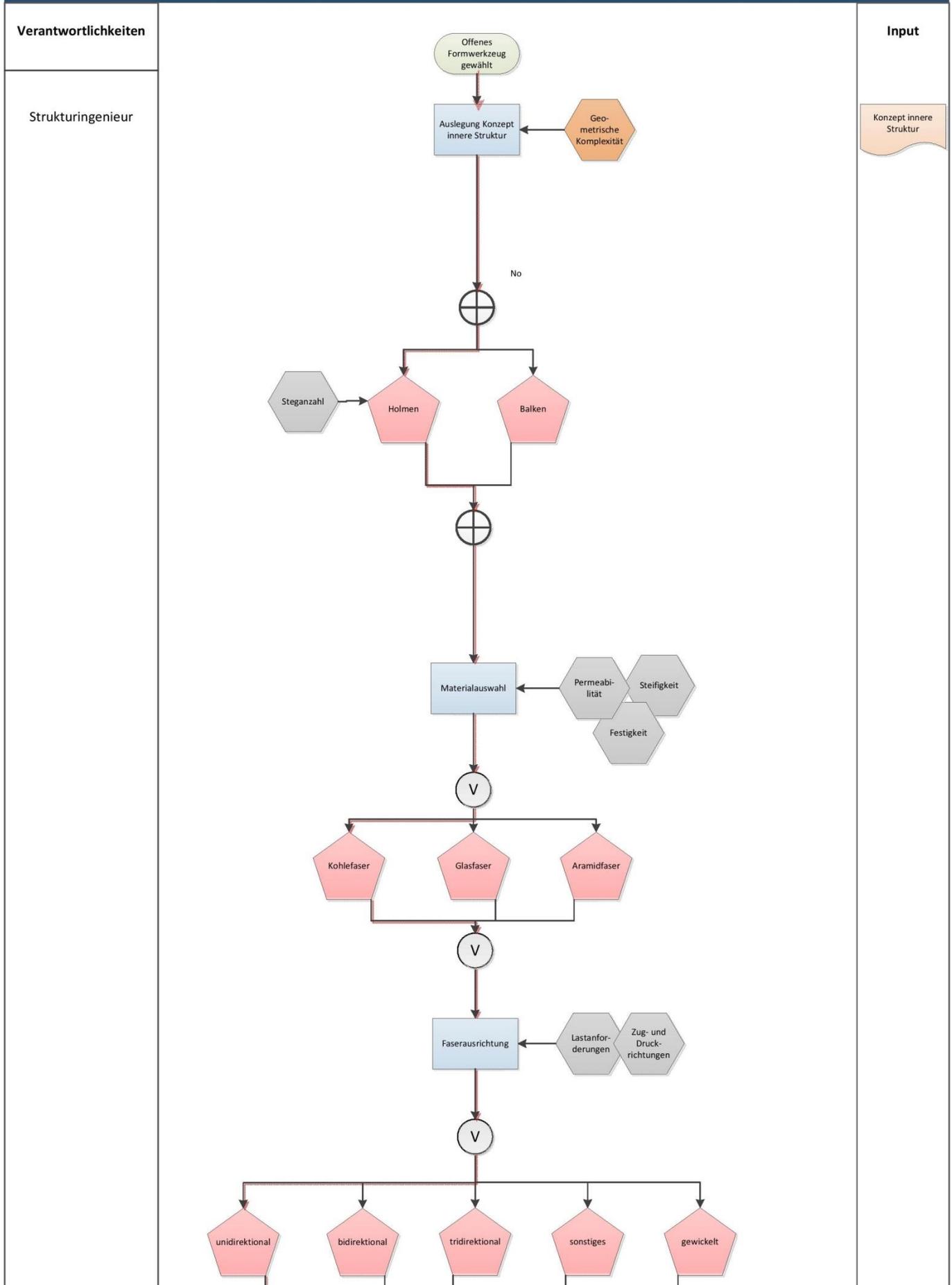
Technische
Mitarbeiter

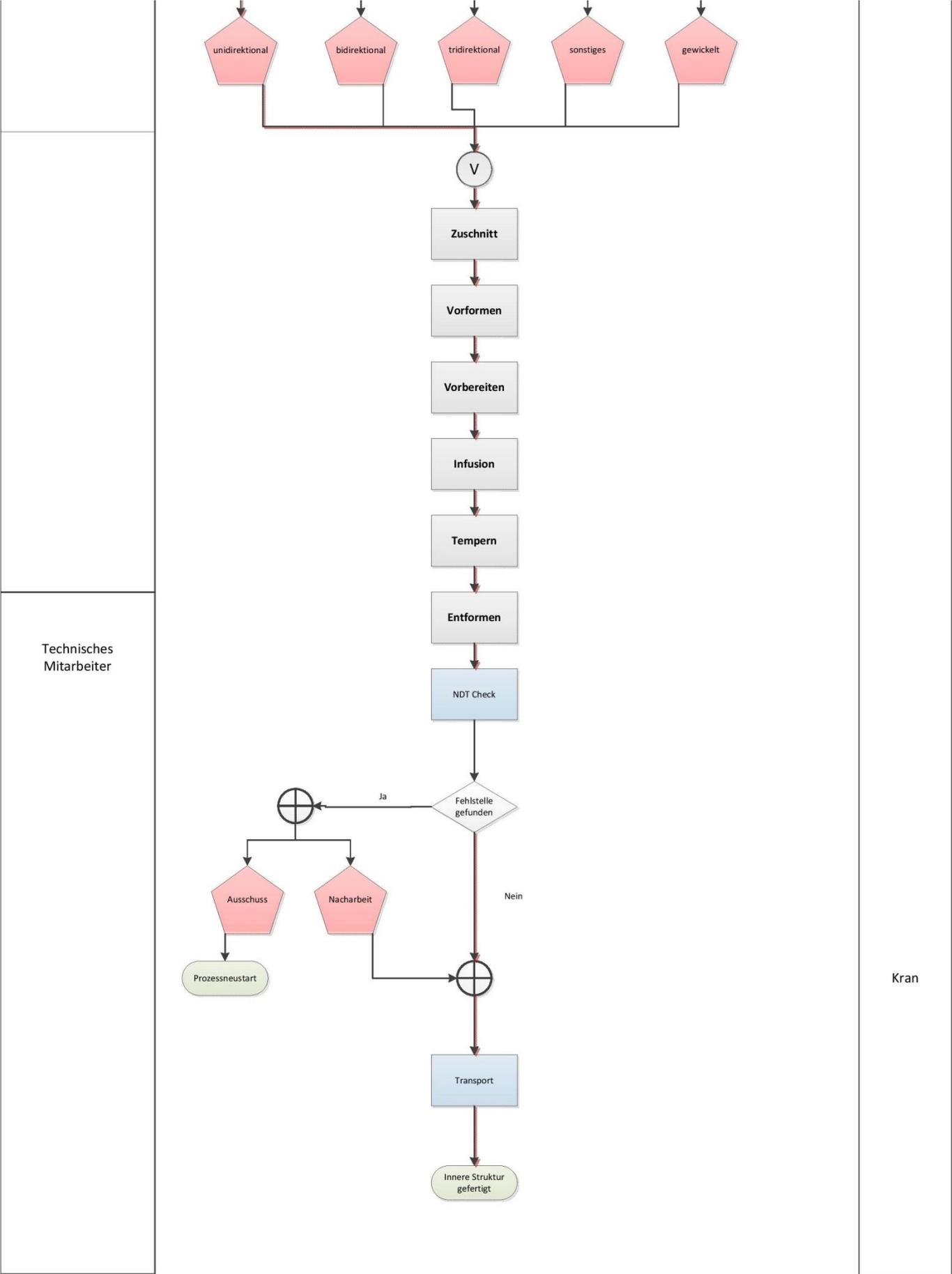




Anlage 4: Nebenproduktion

Nebenproduktion
22.03.2017





Technisches
Mitarbeiter

Kran

Anlage 5: Verhältnisse zwischen Rotorblattlänge und der maximalen Blatattiefe

Länge	Max. Blatattiefe	Verhältnis	Quelle
44	3,9	11,28	(Sandia)
48,7	3,7	13,16	Referenzblatt
49	3,9	12,56	(Vestas Wind Systems A/S)
52,2	4	13,05	(Vestas Wind Systems A/S)
54	3,9	13,85	(Vestas Wind Systems A/S)
54,65	4,04	13,53	(Vestas Wind Systems A/S)
54,7	4	13,68	(Vestas Wind Systems A/S)
57,2	4	14,3	(Vestas Wind Systems A/S)
61,5	4,6	13,37	(Vestas Wind Systems A/S)
61,7	4	15,43	(Vestas Wind Systems A/S)
66,7	4,1	16,27	(Nordex)
Ø - Verhältnis		13,68	

Anlage 6: Kransystempreise pro Rotorblatt nach Länge und Materialeinsatz

Rotorblattlänge	Preis für Glasfaserblatt [€]	Preis für kohlefaserverstärktes Glasfaserblatt [€]
50	30000	25000
60	70000	45000
80	90000	70000
100	150000	100000

Anlage 7: Quellen der Videorecherche

Titel	Quellenlink
Siemens Manufacture Blades	https://www.youtube.com/watch?v=FDyTxGvuAjk
116. How Siemens turned Tillsongburg into a clean energy town	https://www.youtube.com/watch?v=Tn_oHbpgQa0
Blade Size Matters - Siemens Builds the World's Largest Rotor Blade	https://www.youtube.com/watch?v=UN83zG7jHIk
Wind blades manufacturing	https://www.youtube.com/watch?v=ENoY2rRN4NE
Build a Wind Blade	https://www.youtube.com/watch?v=iY0oBGo0-W4
How It's Made Wind Turbines	https://www.youtube.com/watch?v=khkyUgX7QGE
Resin Infusion Demo: Wind Blades Made with Custom Vacuum Bag	https://www.youtube.com/watch?v=XVj_YyvgMbE
LM Wind Power sets record for the world's longest wind turbine blade, again!	https://www.youtube.com/watch?v=gl8xoWLtCps

Anlagen

The manufacturing process of a wind turbine blade	https://www.youtube.com/watch?v=MtVJAFKgfYw
Resin Infusion for Wind Mill Blade Manufacturing	https://www.youtube.com/watch?v=tu5ycxLsAvs
One Shot Blade Technology	https://www.youtube.com/watch?v=l9qMPQhjN9o
IACMI Wind Blade Prototype (Composites Manufacturing Innovation)	https://www.youtube.com/watch?v=Kslh8XUphJo
Die Windradbauer – Verfahrensmechaniker als Ausbildung	https://www.youtube.com/watch?v=csxrEQ0v_mU
HAWART Stegsetzer	https://www.youtube.com/watch?v=C5EJAWWBK10
Windindustrie im Umbruch Made in Germany	https://www.youtube.com/watch?v=UwilapkrVjI
Die Sendung mit der Maus: Windkraftanlagen	https://www.youtube.com/watch?v=GV46ehwxX04
Windräder fertigen Wie geht das? NDR	https://www.youtube.com/watch?v=LJJ05YUpL1A
eTa Blades - eTa4x Manufacturing	https://www.youtube.com/watch?v=VjXWaztOcCo
MHI Vestas - V164 Blade	https://www.youtube.com/watch?v=3Qm9qagk48E
Fast stand alone rotor blade scanner AMS-57.wmv	https://www.youtube.com/watch?v=P99wb6kyPi0
Wind Turbines: DANOBTGROUP - manufacturing the key components of a wind turbine	https://www.youtube.com/watch?v=2ML7aX1f0qU

Anlage 8: Auswertung der Priorisierung der Parameter im Experteninterview und der Gruppendiskussion

Experte a + b: Produktionsingenieur

Experte c + f: Strukturmechaniker

Experte d + e: Funktionsleichtbauingenieur

1 → sehr wichtig 2 → wichtig 3 → eher unwichtig 4 → unwichtig

Parameter	Experte a	Experte b	Experte c	Experte d	Experte e	Experte f	Durchschnitt
Rotorblattgewicht	3	3	2	2	1	1	2
Rotorblattlänge	2	1	1	1	2	1	1,3
Fertigungs- genauigkeit	2	2	2	2	2	2	2
Biegetorsions- kopplung	1	2	2	1	1	2	1,5
Geometrische Komplexität	1	1	2	1	1	2	1,3
Thermische Verformung	3	3	3	3	3	3	3
Aushärte- temperatur	2	1	/	1	3	3	2
Faserpermeabilität	1	2	3	/	/	3	2,25
Fasersteifigkeit	1	2	2	1	1	2	1,6
Faserfestigkeit	1	2	2	1	1	2	1,6
Faserdurchmesser	3	3	/	4	4	/	3,5
Faserschlichte	3	4	/	4	4	/	3,75

Anlagen

Oberflächenqualität	4	4	2	4	4	3	3,5
Komplexität des Lageplans	2	1	3	2	2	2	2
Vakuumintegrität	1	2	3	2	2	3	2,2
Druckgradient	4	4	3	4	4	3	3,7
Komplexität des Injektionsplan	4	4	3	4	4	4	3,8
Aushärtezeit	1	2	3	3	3	3	2,3
Harzeigenschaften (Topfzeit, Exothermie)	3	3	2	3	4	2	2,8
Thixotropische Eigenschaften Klebeharz	3	2	/	3	3	/	2,75
Sandwichmaterial	2	2	2	2	2	3	2,2