

Reinhard Diethardt, BSc.

# **Evaluierung von Fertigungstechnologien zur Kostenreduktion neuartiger Windkraftkonverter und Identifikation von Insourcing Potenzialen**

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Wirtschaftsingenieurwesen Maschinenbau

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Ramsauer

Graz, 2014

## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich all jenen Personen danken, die mich während meiner Studienzeit und bei meiner Diplomarbeit unterstützt haben.

Bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Mario Müller und bei Herrn Dr. Karl Ritsch, die mir inhaltlich diese Diplomarbeit ermöglichen haben und mir mit viel Engagement und Ideen zur Seite standen sowie bei Herrn Dipl. Ing. Mario Kleindienst für seine fachliche Betreuung am Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung der Technischen Universität Graz.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern und Großeltern für all die Unterstützung im Laufe meiner Studiendauer. Des Weiteren bedanke ich mich bei allen Studienkollegen, Kollegen des TERA TU Graz und allen anderen Wegbegleitern für bereichernde und nachhaltige Erfahrungen.

## Kurzfassung

Für die Serienüberleitung der Kleinwindkraftanlage „Turbine 01“ der Unternehmung wind2power GmbH, ist ausgehend vom Entwicklungsstand des Prototyps, das angewandte Fertigungsverfahren und die dazugehörige konstruktive Ausführung auf dessen Kosteneinsparungs- bzw. dessen Insourcingpotentials hin zu untersuchen. Bei dieser Anlage handelt es sich um eine Ausführungsart mit ummanteltem Rotor mit einer Nennleistung von 1 kW, welche speziell für den Einsatz in urbanen Gebieten zur Gebäudeintegration entwickelt wurde.

Die Untersuchung der Kostenstruktur ergibt für die Betrachtung der mechanischen Komponenten bezogen auf die gesamten variablen Herstellkosten eine deutliche Kostendominanz des Windturbinenmantels von ca. 45 %, gefolgt von der Lagerungsbaugruppe zur Windrichtungsnachführung mit 10 %. In weiterer Folge wird die derzeitige Fertigungstechnologie der Mantelkonstruktion genauer untersucht, um einfache und rasche Änderungsmöglichkeiten zu identifizieren. Dabei können Kostensenkungen bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion einerseits durch eine Wandstärkenreduzierung des Glasfaserverbundkunststoffes und andererseits durch den Einsatz einer Sandwichbauweise erreicht werden. Für die Erreichung weiterer Kostensenkungen werden jedoch andere Fertigungstechnologien und Werkstoffe benötigt. Dabei kann sich bei geringen Stückzahlen (< 800 Stück) die Fertigungstechnologie des Kunststoff-Rotationsgusses und bei höheren Stückzahlen, das Tiefziehen von Metallblechhalbzeugen gegenüber dem Kunststoff-Tiefziehen (Thermoforming) in der entwicklungsbegleitenden Kalkulation durchsetzen. Eine weitere Kostensenkung kann mit dem Ersatz der eigengefertigten Lagerungsbaugruppe durch eine komplette Lagerbaugruppe aus der Automobilindustrie erreicht werden. Mit der Veränderung dieser beiden Komponenten lassen sich die variablen Herstellkosten bereits um bis zu 40 % im Vergleich zur Ausgangssituation verringern.

In Bezug auf ein mögliches Insourcingpotential zur Mantelherstellung kann sich nach dem direkten Vergleich der verschiedenen Fertigungstechnologien das Kunststoff-Thermoforming gegenüber den anderen Technologien durchsetzen. Vorteile dieser Technologie ergeben sich durch günstige prozessspezifische Eigenschaften und deren Anwendungsbereiche. Eine Einführung dieser neuen Fertigungstechnologie ist in weiterer Folge noch genauer durch eine Investitionsrechnung zu untersuchen.

## **Abstract**

The implementation of a serial production of the small wind turbine “Turbine 01” from the company wind2power GmbH requires an investigation of the prototype design to point out different manufacturing technologies, cost reduction and insourcing opportunities. The “Turbine 01” is a diffuser augmented wind turbine with a nominal power of 1 kW and was developed to be installed in urban areas for building integration.

The cost structure analysis of the mechanical components shows that the diffuser causes about 45 % of the variable manufacturing costs, followed by the bearing components, which provide the adjustment to the current wind direction, with 10 %. Improvements for a quick cost reduction can be found in the actual diffuser design and are achievable by reducing the glass fibre composite wall thickness on the one hand, and by using a glass fibre composite sandwich structure on the other hand. Further cost reductions need total different manufacturing technologies and raw materials. An attended cost calculation for new production technologies demonstrated rotational molding as the cost effective technology for low amount of pieces (< 800 pc.) compared with thermoforming and metal deep drawing. For a production output higher than 800 pieces the cost effectivity switches to the metal deep drawing technology. Another cost reduction can be realized by a substitution of the in-house production bearing with a standardized bearing device, commonly used in the automobile industry. These two design variations cause an approximate reduction of 40 % of the original costs.

In order to make a recommendation for the imposition of a new technology, the comparison between the three production technologies for the diffuser indicates that thermoforming can provide a usage in a wide range of applications. Advantages can also be identified by examine the production process. This conclusion had to be confirmed by a final investment appraisal.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	1
1.1	Die Unternehmung wind2power GmbH.....	3
1.2	Markt der Kleinwindenergieanlagen .....	4
1.3	Aufgabenstellung und Zielsetzung .....	6
1.4	Vorgehensweise.....	6
2	Theoretische Grundlagen zur Windkraft.....	9
2.1	Physikalische Grundlagen der Windkraft .....	9
2.1.1	Widerstandsläufer .....	11
2.1.2	Auftriebsnutzender Rotor .....	12
2.2	Berechtigung der Stromerzeugung durch Windkraft .....	13
2.2.1	Wirtschaftlichkeitsrechnung.....	14
2.3	Kosten von Windkraftanlagen .....	16
3	Theoretische Grundlagen zur Entstehung und Kalkulation von Kosten .....	20
3.1	Begriffsdefinition Kosten .....	20
3.2	Kostenarten.....	20
3.3	Einflussfaktoren auf die Kostenentstehung .....	22
3.4	Methoden zur zielkostenorientierten Entwicklung .....	35
4	Praktische Betrachtungen zur Serienüberleitung des Windenergiekonverters...	41
4.1	Beschreibung des Anlagenkonzepts .....	41
4.2	Analyse der derzeitigen Bauteilkosten .....	44
4.2.1	Kostenstrukturanalyse mechanischer Bauteile.....	45
4.2.2	Zielkostendefinition der Gesamtanlage .....	48
4.3	Eingrenzung des Untersuchungsbereiches.....	51
4.3.1	Situationsanalyse des Windturbinenmantels.....	52
4.3.2	Zielkosten und Gewichtsdefinition.....	57
4.4	Möglichkeiten zur Kostenreduktion .....	59
4.4.1	Leichtbaustrategien.....	60
4.4.2	Bauweisen.....	61

4.4.3	Entwicklung möglicher Lösungsvarianten .....	64
4.4.4	Lösungsvarianten aus der bestehenden Bauweise .....	68
4.4.5	Variante 1: Reduzierung der Wandstärke .....	70
4.4.6	Variante 2: GFK Sandwichbauweise .....	72
4.4.7	Variantenentwicklung aus der Differentialbauweise .....	75
4.4.8	Lösungsvariantenentwicklung aus der Integralbauweise .....	81
4.5	Konzeptausarbeitung und Variantendarstellung .....	84
4.5.1	Variante 3.1: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile ..	88
4.5.1	Variante 3.2: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile ....	94
4.5.2	Variante 4.1: Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Stahl .....	97
4.5.1	Variante 4.2: Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Alu .....	98
4.5.2	Variante 5.1: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE.....	100
4.5.1	Variante 5.2: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PP.....	103
4.5.2	Variante 5.3: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/3 PE.....	104
4.6	Konzeptevaluierung .....	106
4.6.1	Nutzwertanalyse.....	107
4.6.2	Nutzwertanalyse zur Lösungsbewertung .....	109
4.6.3	Ergebnisauswertung und Analyse.....	115
4.7	Betrachtung weiterer mechanischer Komponenten .....	119
4.8	Potentiale zum Insourcing der Fertigung.....	121
4.8.1	Fertigungsmaschinenaufstellung.....	121
4.8.2	Analyse Maschinenpark .....	122
4.8.3	Benötigte Fertigungsverfahren .....	123
4.8.1	Insourcing der Fertigungsverfahren für den Windturbinenmantel....	125
5	Zusammenfassung und Ausblick .....	128
6	Literaturverzeichnis .....	130
7	Internetquellenverzeichnis.....	135
8	Abbildungsverzeichnis.....	137
9	Tabellenverzeichnis .....	140
10	Anhang.....	i

## 1 Einleitung

In den vergangenen Jahrzehnten hat sich trotz starker Interessensgruppen die Einsicht in der Bevölkerung durchgesetzt, dass die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern wie Erdöl, Erdgas und Kohle deutlich verringert werden muss. Wissenschaftler haben mit ihrer Arbeit den überwiegend durch den Menschen verursachten Klimawandel verdeutlicht und maßgeblich zur Bewusstseinsbildung beigetragen. Die Europäische Union hat in diesem Zusammenhang eine Vereinbarung getroffen, welche in einem ersten Schritt die Emission von klimaschädlichen Treibhausgasen bis 2020 im Vergleich zu 1990 um mindestens ein Fünftel reduzieren soll. Um dieses Ziel erreichen zu können, ist eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz sowie ein umfangreicher Ersatz fossiler Energieträger durch Erneuerbare nötig. Dieser Anteil bestehend aus Sonne, Wasser, Wind und Biomasse soll bis 2020 in der Europäischen Union mindestens 20 % des Primärenergieeinsatzes betragen. Neben dem Klimawandel spielt auch die Abhängigkeit Europas von Rohstoffimporten aus teils politisch unsicheren Ländern eine wichtige Rolle. Um einer nicht absehbaren, politisch motivierten Verknappung zu entgehen, muss diese Rohstoffabhängigkeit durch den Einsatz von Energiealternativen verringert werden. In den letzten Jahren haben sich aufgrund der intensiven Weiterentwicklung Photovoltaik und Windenergie an die Spitze der regenerativen Energieformen gesetzt.<sup>1</sup> In weiterer Folge wird im Speziellen auf die Windenergie eingegangen.

Wie fast alle verfügbaren Energieformen auf der Erde, ist auch die Windenergie eine Art der Sonnenenergie. Die unterschiedliche Erwärmung der Atmosphäre, vor allem durch die Kugelform der Erde, lässt globale Windsysteme entstehen. Am Äquatorbereich entsteht ein Energieüberschuss und in den Polbereichen ein Defizit. Zum Ausgleich dieser Energiedifferenz wird Wärme durch bewegte Luftmassen transportiert - Wind entsteht. Daneben bilden sich auch Lokalwinde, getrieben ebenfalls durch Potentialunterschiede durch ungleiche Erwärmung der Erdoberfläche aus.<sup>2</sup> Maschinen für die Nutzung dieser Windenergie wurden urkundlich in Schriften des 7. Jh. n. Chr. belegt und wurden zum Mahlen von Getreide eingesetzt. Eine Untersuchung und Anwendung zur elektrischen Stromerzeugung erfolgte ab dem Jahre 1891. Erst nach dem ersten Weltkrieg und unterstützt durch die Erkenntnisse der Luftfahrt setzte der wissenschaftliche Windturbinenbau ein. Im Zuge der Ölpreisschocks 1973 und 1978

---

<sup>1</sup>Vgl. Jarass/Obermair/Voigt (2009), S. 1ff.

<sup>2</sup>Vgl. Gasch/Twele (2005), S. 123ff.

wurde über die zukünftige Energieversorgung nachgedacht und die Windenergie erlebte einen Entwicklungsschub.<sup>3</sup>

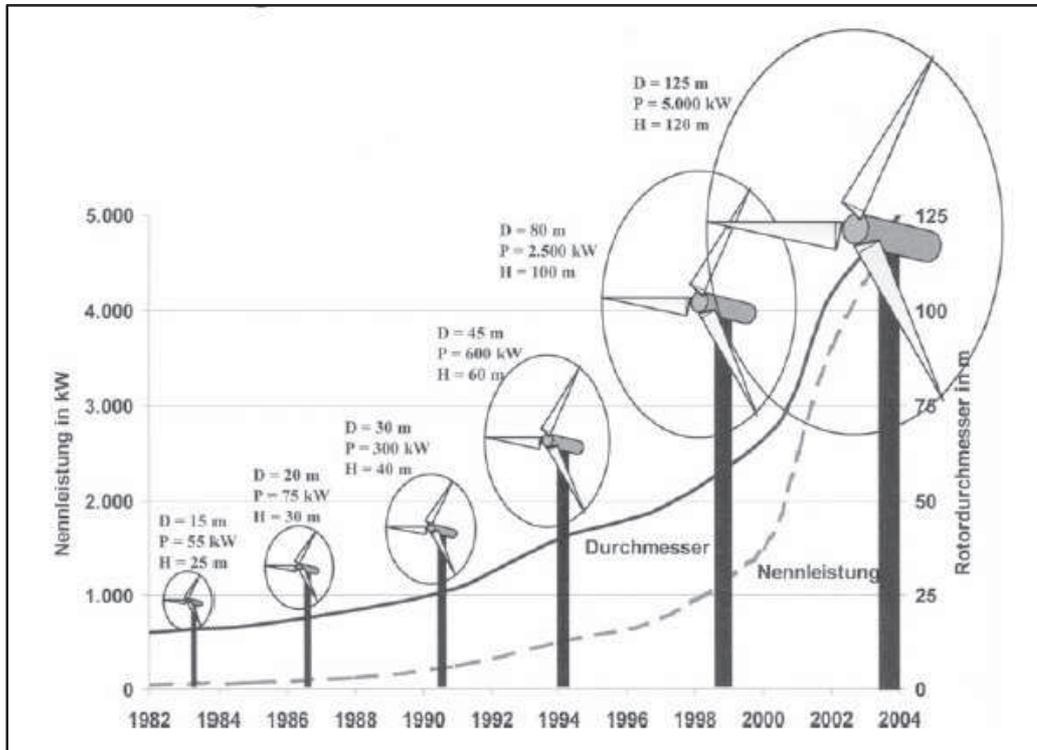


Abbildung 1: Entwicklung der Windenergieanlagen nach Baugröße und Nennleistung<sup>4</sup>

Bis 2012 wurden in der Europäischen Union Windräder mit einer Gesamtleistung von 106.000 MW errichtet und erzeugten ca. 7 % des europäischen Gesamtverbrauches. Neben der Energie aus Photovoltaikanlagen steht die Windenergie am zweiten Rang beim Bau neuer Kraftwerkskapazitäten. Damit war 2012 das fünfte Jahr hintereinander, in dem der Kapazitätenausbau für erneuerbare Energieformen höher war als jener für Fossile. Neben Europa sind vor allem Asien und Nordamerika die größten Märkte für Windenergie.<sup>5</sup>

<sup>3</sup>Vgl. Gasch/Twele (2005), S. 16ff.

<sup>4</sup>Gasch/Twele (2005), S. 1

<sup>5</sup>Vgl. Interessengemeinschaft Windkraft Österreich (2005), Zugriffsdatum 27.11.2013

## 1.1 Die Unternehmung wind2power GmbH

Unabhängig voneinander haben beide Gesellschafter (qpunkt GmbH und HANS HÖLLWART - Forschungszentrum für integrales Bauwesen AG kurz FIBAG) der wind2power GmbH begonnen, sich über die Windenergie und deren Nutzung Gedanken zu machen. Die Unternehmung qpunkt mit der Idee, dass bestehende Windenergiesysteme verbessert werden können. Genau hier kann ihr Know-how aus dem Bereich Aerodynamik und Strömungssimulation ideal angewandt werden. Die Unternehmung FIBAG mit dem Gedanken, die Nutzung der Windenergie in Gebäude zu integrieren, wobei die eigenen Kernkompetenzen eingesetzt werden können, um so eine dezentrale Energieversorgung sicher zu stellen. Mit diesen beiden Gedanken war es naheliegend, die Ressourcen zu bündeln und gemeinsam ein neues, innovatives Produkt zu entwickeln, wobei das Konzept einer ummantelten Windturbine entstand.<sup>6</sup>

Entwickelt wurden zwei unterschiedliche Leistungsgrößen dieser ummantelten Windkraftanlage, die kleinere „Turbine 01“ mit 1 kW Nennleistung und die „Turbine 10“ mit 10 kW Nennleistung. Mittlerweile sind neben den zwei Prototypen dieser Anlagen, welche in Ungarn auf einem eigenen Prüfturm (Abbildung 2) in Betrieb genommen wurden, zwei weitere Anlagen der „Turbine 01“ installiert worden. Die erste davon befindet sich im Energieforschungspark Lichtenegg und die zweite in Stallhofen am Unternehmensstandort der FIBAG.

---

<sup>6</sup>Vgl. wind2power (2013), Zugriffsdatum 27.11.2013



Abbildung 2: Prüfturm mit Turbine 01 (links), Turbine 10 (rechts)

## 1.2 Markt der Kleinwindenergieanlagen

Auch Kleinwindenergieanlagen (KWEA) fanden in den vergangenen Jahren vermehrt Einsatz. Für diesen Begriff gibt es keine exakte Definition, die meisten Hersteller beschränken sich dabei auf eine Nennleistung von bis zu 20 kW. Diese Leistungsgrenze hat einerseits je nach Standort vereinfachte Errichtungsvorgaben im Vergleich zu Großanlagen zur Folge. Andererseits sind diese Kleinwindenergieanlagen hauptsächlich für die Eigenversorgung von Haushalten, Landwirtschaften und Kleinbetrieben gedacht, woraus sich ebenfalls die oben genannte Anlagengröße ergibt.<sup>7</sup>

Die Marktsituation für kleine Windkraftanlagen ist durch viele kleine Hersteller gekennzeichnet, die neben ihrem Hauptgeschäft kleine Windkraftanlagen entwickelt haben. Viele dieser Anlagen befinden sich erst im Versuchsstadium und einige werden diese Phase auch nicht verlassen. Es ist schwer, einen Gesamtüberblick über

---

<sup>7</sup>Vgl. Reiterer (2013), S 4

diese Branche zu erlangen, da Informationen zu den Herstellern und deren Anlagen meist sehr unvollständig oder gar nicht zu erhalten sind. Eben so verhält es sich mit den korrekten Absatzzahlen, die aufgrund der Vielzahl von Anbietern und des gelinden Informationsangebotes sehr gering ausfallen und sich meist auf den lokalen Markt in der geographischen Umgebung der Hersteller konzentrieren.<sup>8</sup>

Ende 2011 wurden über 330 Hersteller von Kleinwindkraftanlagen weltweit identifiziert, welche Komplettsysteme am Markt anbieten. Die meisten dieser Hersteller befinden sich in den USA, China, Kanada, Großbritannien und Deutschland. Auch diese Länder sind es, in denen die meisten Kleinwindkraftanlagen installiert sind und auch in naher Zukunft installiert werden. Entwicklungsländer wie Südamerika, Südostasien und Afrika spielen trotz idealer Umweltbedingungen für den Standort solcher Anlagen noch keine Rolle. Die Anzahl der Hersteller wächst aufgrund des steigenden Kundeninteresses stetig, sodass zwischen 2000 und 2010 mehr als 120 neue Anbieter am Markt erschienen sind. Allein die in China produzierten Anlagen werden auf 180.000 Stück pro Jahr geschätzt. Das verdeutlicht umso mehr das Potential der Länder, in denen Kleinwindkraftanlagen noch nicht eingesetzt werden. Aus Studien der WWEA (World Wind Energy Association) geht ein jährliches Wachstum von 35 % der Gesamtleistung von Kleinwindkraftanlagen der vergangenen Jahre hervor und zwischen 2015 und 2020 wird ein jährliches Leistungswachstum von 20 % vorausgesagt, siehe Abbildung 3.<sup>9</sup>

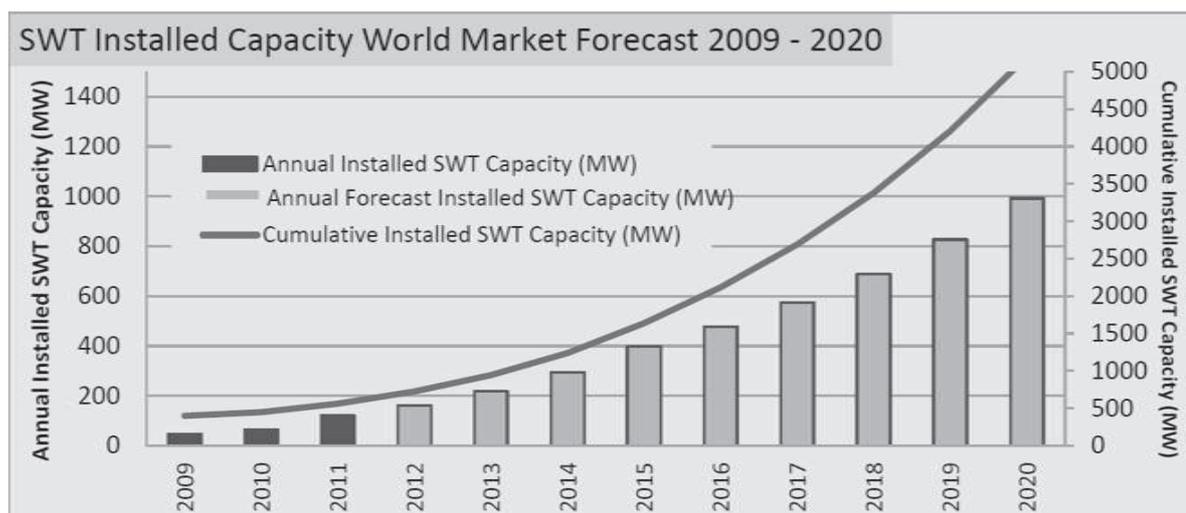


Abbildung 3: Voraussage Gesamtleistung der installierten Kleinwindkraftanlagen (SWT)<sup>10</sup>

<sup>8</sup>Vgl. Halbhuber (2009), S. 7ff.

<sup>9</sup>Vgl. Gsänger (2013), S 1ff.

<sup>10</sup>Gsänger (2013), S 9

### 1.3 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Zuge dieser Arbeit sind Fertigungstechnologien für die Einführung einer Serienproduktion der Turbine 01 (Abbildung 4) zu identifizieren und im Anschluss zu evaluieren. Gleichmaßen sind mögliche Insourcing-Potentiale zu erörtern. Besonderer Schwerpunkt bei diesen Fragestellungen liegt bei den Herstellkosten - diese bilden den Ausgangspunkt aller Kosten - und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen. Aus diesem Grund ist das Kostensenkungspotential hinsichtlich kostengünstigerer Lösungen als auch eine Weiterentwicklung der technischen Konzepte zur Begünstigung der Fertigung mit zukünftig höheren Stückzahlen von Interesse. Mit den steigenden Stückzahlen können Herstellkosten durch Kostendegression der Serienfertigung deutlich verringert werden. Ziel ist es, schlussendlich mit verschiedenen Konzepten die Herstellkosten im Vergleich mit dem Prototypen deutlich zu reduzieren, um einen wirtschaftlichen Betrieb der Turbine 01 zu gewährleisten, neue Märkte zu erschließen und um langfristig wettbewerbsfähig zu sein.

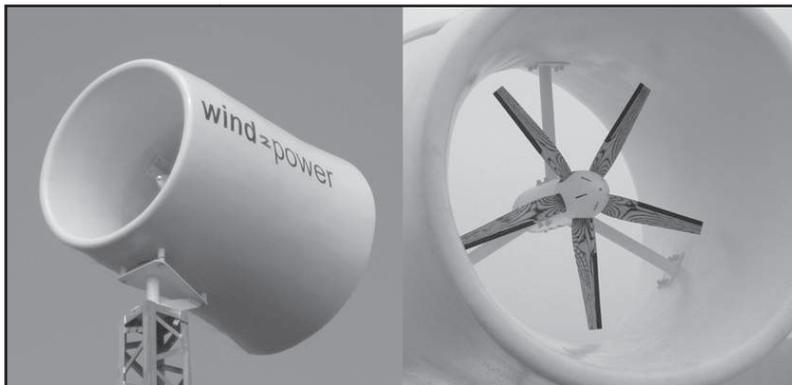


Abbildung 4: Turbine 01 in Lichtenegg (links), Prototyp Turbine 01 (rechts)<sup>11</sup>

### 1.4 Vorgehensweise

Mit einer Literaturrecherche über theoretische Grundlagen zur Windkraft (Kapitel 2) sowie den theoretischen Grundlagen zur Entstehung und Kalkulation von Kosten (Kapitel 3), soll eine Ausgangsbasis für die produktbezogene Analyse hinsichtlich Kostensenkungs- und Insourcingpotential geschaffen werden. Spezielle Grundlagen für die Bearbeitung der einzelnen Aufgabenstellungen werden dazu erst in den dazugehörigen Kapiteln genauer erläutert. Der Hauptbestandteil dieser Arbeit beginnt mit der Durchführung einer Kostensenkungspotentialanalyse (Kapitel 4). Diese umfasst eine ausführliche Kostenstrukturanalyse des Prototyps der Turbine 01 inklusive der eingesetzten Fertigungsverfahren, bezogen auf die mechanischen Bauteile. Er-

---

<sup>11</sup>wind2power (2013), Zugriffsdatum 4.12.2013

gebnis dieser Analyse ist eine Reihung der Einzelkomponenten nach deren Kostenverursachung. Kostensenkungspotentiale sind dabei bei Komponenten mit hohem Kostenanteil an den Gesamtkosten zu vermuten und zu identifizieren. Für diese Komponenten sind neue kostengünstigere Konstruktionen bzw. neue Fertigungsverfahren zu suchen und zu evaluieren. Im Anschluss werden die unternehmensinternen Fertigungsressourcen, bezogen auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsverfahren, erfasst und mögliche Insourcingpotentiale erarbeitet.

Um für diese Problemstellungen einfacher und rascher Lösungsansätze zu finden, ist ein strukturierter Arbeitsablauf erforderlich. Der logische Arbeitsplan (Abbildung 5) umfasst dabei sechs aufeinanderfolgende Phasen, die für einfache Aufgabenstellungen einmalig und für komplexe Aufgabenstellungen als iterativer Prozess mehrmals durchlaufen werden können.<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup>Vgl. Bronner/Herr (2009), S. 20

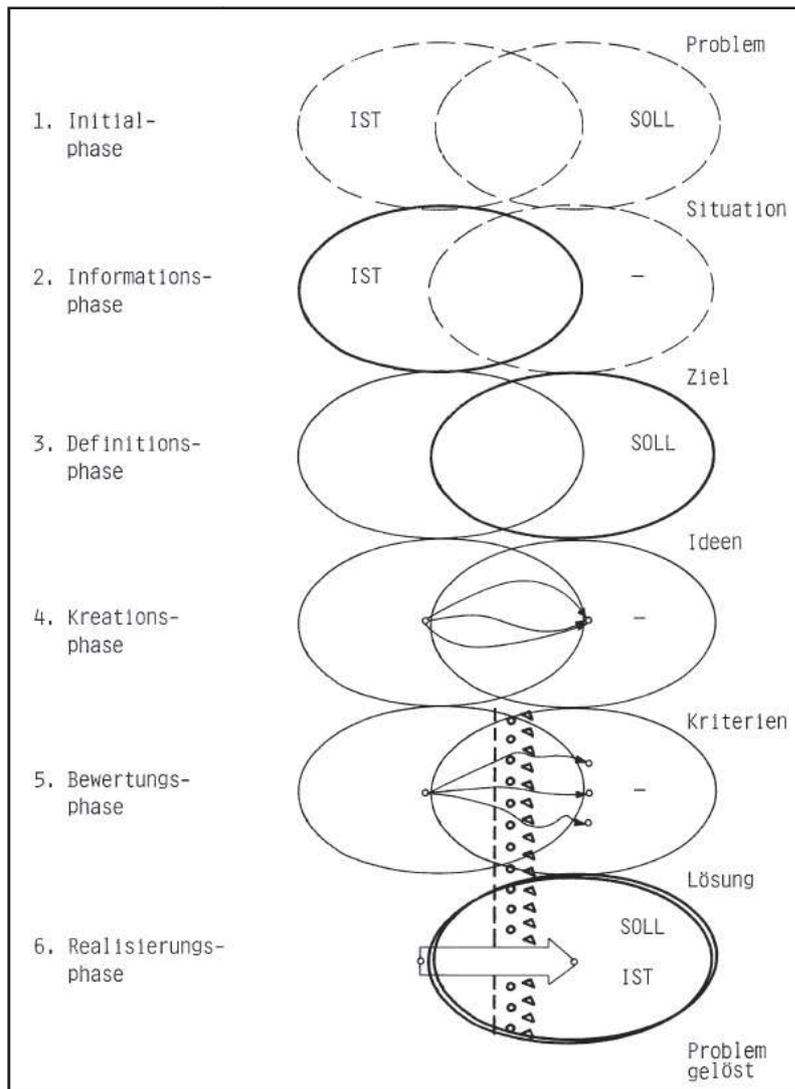


Abbildung 5: Logischer Arbeitsplan<sup>13</sup>

Nach Durchlaufen der Einzelschritte soll am Ende ein neues kostengünstigeres Fertigungsverfahren sowie konstruktionstechnische Lösungskonzepte zur Realisierung einer Serienfertigung empfohlen werden können.

<sup>13</sup>Bronner/Herr S. (2009), S. 21

## 2 Theoretische Grundlagen zur Windkraft

In diesem Teil der Arbeit werden theoretische Grundlagen zur Windkraft erläutert. Diese umfassen die physikalischen Grundlagen der Windkraft und unterschiedliche Funktionsprinzipien.

### 2.1 Physikalische Grundlagen der Windkraft<sup>14</sup>

Die kinetische Energie  $E_{kin}$  strömender Luftmassen kann genutzt werden, indem man diese in kinetische Energie des Rotors umwandelt und dadurch die bewegten Luftmassen abbremst.

$$E_{kin} = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Aus der Formel der kinetischen Energie lässt sich die im Wind enthaltene Leistung, bezogen auf die durchströmte Fläche  $A$  wie folgt darstellen:

$$P_{Wind} = \dot{E}_{kin} = \frac{1}{2}\dot{m}v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2)$$

Für die Bestimmung der mechanischen Leistung  $P_{mech}$ , die den Luftmassen entzogen werden soll, betrachtet man die Strömungsverhältnisse vor und nach der Windkraftanlage (Abbildung 6). Daraus ergibt sich die Leistung wie folgt:

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1^3 - \frac{1}{2}\rho A_2 v_2^3 \quad (3)$$

Durch die Erhaltung des Massenstromes wird daraus:

$$P_{mech} = \frac{1}{2}\rho A_1 v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (4)$$

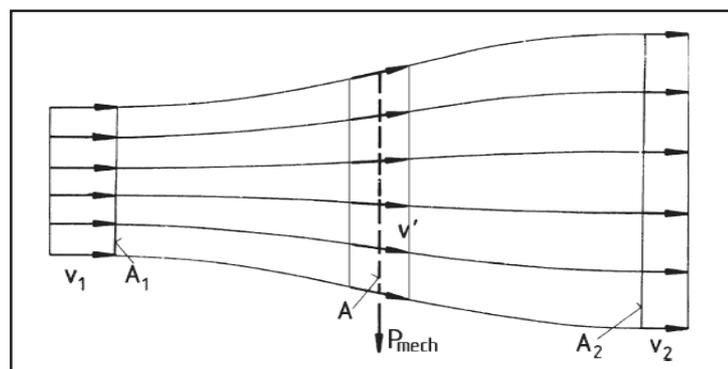


Abbildung 6: Strömungsverhältnisse unter Entzug mechanischer Leistung<sup>15</sup>

<sup>14</sup>Vgl. Hau (2008), S. 79ff.

<sup>15</sup>Hau (2008), S. 80

Die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit durch den Leistungsentzug bei unverändertem Massenstrom bewirkt eine Aufweitung des Strömungsquerschnittes (Abbildung 6). Dabei kann die Windleistung durch eine Windkraftanlage nicht zur Gänze umgewandelt werden. Das würde sonst bedeuten, dass den durchströmten Luftmassen die ganze kinetische Energie entzogen wird und diese gänzlich zum Stillstand kommen, wodurch die durchströmte Fläche für nachfolgende Luftmassen unpassierbar wäre.

Für die Bestimmung der maximal entziehbaren Leistung vergleicht man die Leistung des ungestörten Luftstromes  $P_{Wind}$  mit der mechanischen Leistung  $P_{mech}$  bezogen auf den gleichen Strömungsquerschnitt  $A$ . Diese Verhältniszahl zwischen den beiden Leistungen wird als Leistungsbeiwert  $c_p$  bezeichnet und ist nur vom Geschwindigkeitsverhältnis  $v_2/v_1$  abhängig.

$$c_p = \frac{P_{mech}}{P_{Wind}} \quad (5)$$

Trägt man den Verlauf des Leistungsbeiwertes  $c_p$  über dem Geschwindigkeitsverhältnis auf, erhält man den Kurvenverlauf aus Abbildung 7.

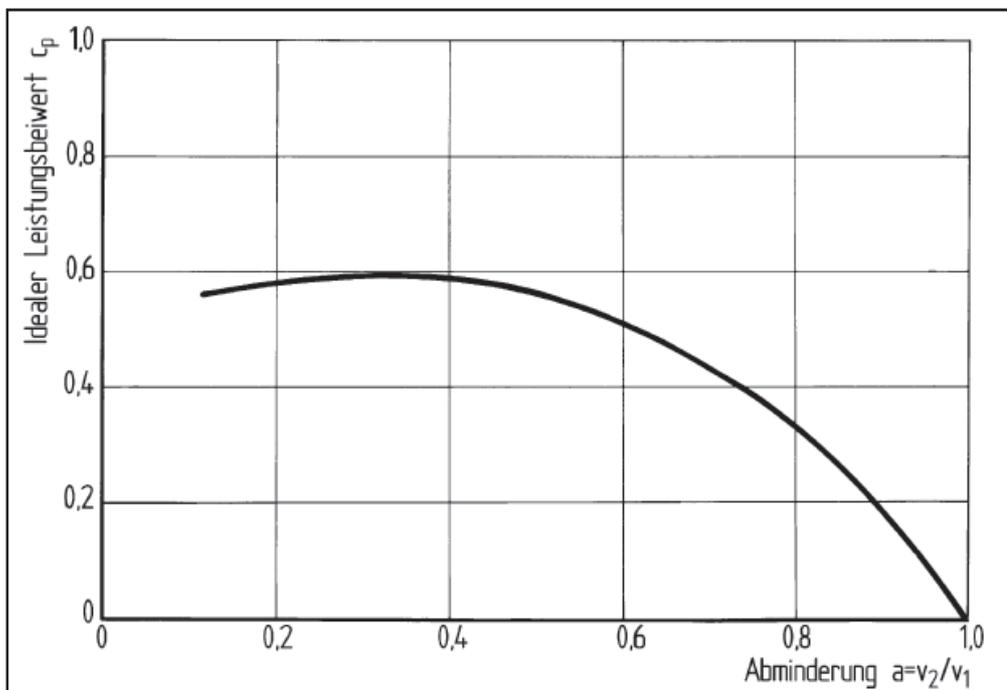


Abbildung 7: Verlauf des Leistungsbeiwertes über dem Geschwindigkeitsverhältnis vor und nach der Windkraftanlage<sup>16</sup>

<sup>16</sup>Hau (2008), S. 82

Der Verlauf zeigt, dass auch bei idealen Strömungsverhältnissen und verlustloser Energiewandlung maximal 60 % ( $c_p \approx 0,6$ ) der Windenergie in mechanische Arbeit umgewandelt werden können. Dabei reduziert sich die Strömungsgeschwindigkeit hinter der Windkraftanlage auf ein Drittel der ungestörten Windströmung vor der Anlage ( $v_2/v_1 \approx 0,3$ ).

### 2.1.1 Widerstandsläufer<sup>17</sup>

Bei einem Widerstandsläufer entsteht die nutzbare Kraft durch den Luftwiderstand einer angeströmten Fläche. Diese resultierende Kraft  $F_W$  setzt sich aus der Fläche  $A$ , der Luftdichte  $\rho$ , dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit und dem Widerstandsbeiwert  $c_w$  des Körpers (Fläche) zusammen.

$$F_W = c_w \frac{\rho}{2} A c^2 \quad (6)$$

Die auf eine bewegte Fläche wirkende Anströmgeschwindigkeit  $c$  ergibt sich aus der Differenz zwischen der Windgeschwindigkeit und der Umfangsgeschwindigkeit (Abbildung 8).

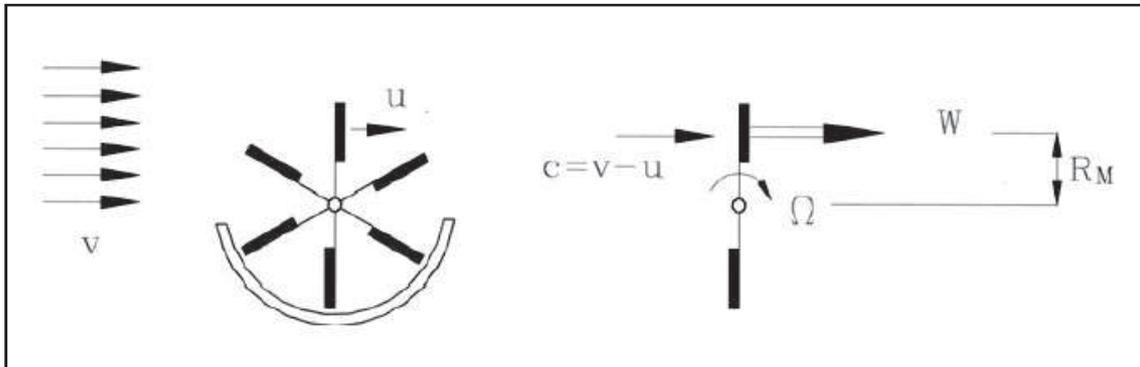


Abbildung 8: Prinzip eines Widerstandsläufers<sup>18</sup>

Damit ergibt sich die Widerstandskraft zu

$$F_W = c_w \frac{\rho}{2} A (v - u)^2 \quad (7)$$

Dabei liegt der maximal zu erreichende Leistungsbeiwert eines Widerstandsläufers bei etwa  $c_p \approx 0,2$ . Das bedeutet, dass maximal 20 % der im Wind enthaltenen Energie genutzt werden kann.

<sup>17</sup>Vgl. Gasch/Twele (2005), S. 38ff.

<sup>18</sup>Hau (2008), S. 39

### 2.1.2 Auftriebsnutzender Rotor<sup>19</sup>

Auf Auftrieb basierende Rotoren nutzen nicht nur die Widerstandskraft in Anströmrichtung sondern zusätzlich die daraus resultierende Auftriebskraft (Abbildung 9).

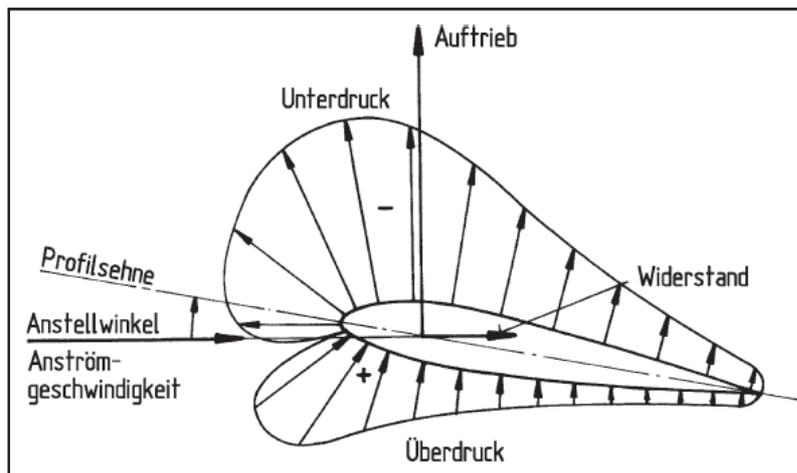


Abbildung 9: Kräfte am Tragflügel<sup>20</sup>

Diese Auftriebskraft setzt sich ähnlich wie die Widerstandskraft zusammen, dabei wird nur der Widerstandsbeiwert  $c_w$  durch den Auftriebsbeiwert  $c_A$  ersetzt.

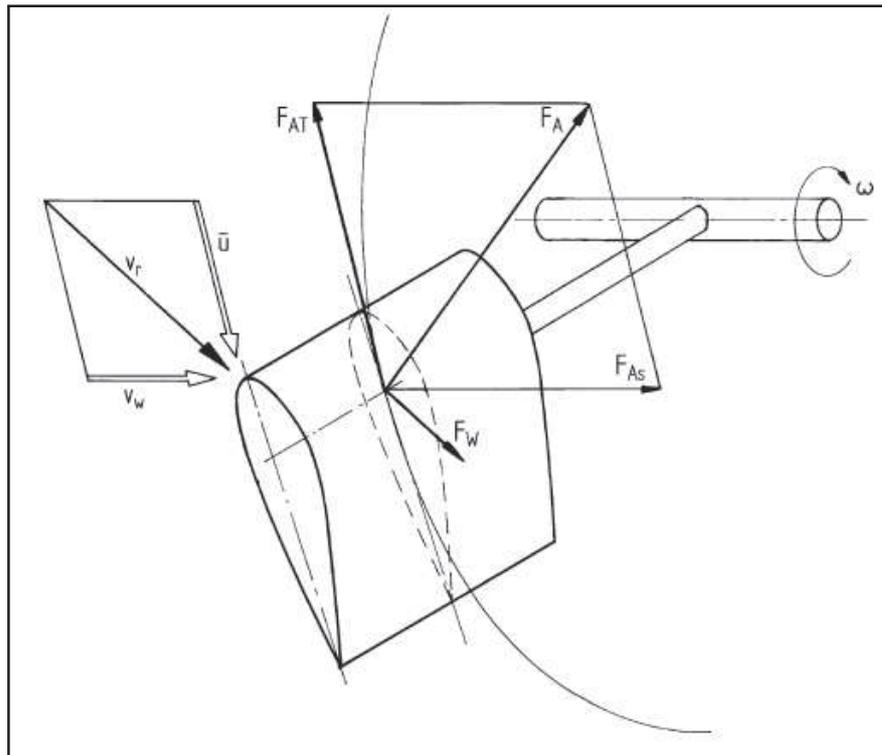
$$F_A = c_A \frac{\rho}{2} A v^2 \quad (8)$$

Abbildung 10 zeigt die sich ergebenden Luftkräfte eines propellerartigen Rotors mit Auftrieb. Die Widerstandskraft  $F_W$  ergibt sich dabei in Strömungsrichtung und senkrecht dazu die Auftriebskraft  $F_A$ . Zerlegt man nun diese Auftriebskraft in die Komponenten der Rotordrehebene und in eine Ebene senkrecht dazu, erhält man die Tangentialkomponente  $F_{AT}$ , die das Antriebsmoment bildet und die Kraft  $F_{AS}$  für den Rorschub.

Mit der Nutzung des Auftriebs und der Wahl geeigneter Tragflügelprofile lassen sich Leistungsbeiwerte von bis zu  $c_p \approx 0,5$  erzielen. Dieser ist damit deutlich höher als jener reiner Widerstandsläufer und es kann dadurch dem Luftstrom mehr nutzbare Energie entzogen werden.

<sup>19</sup>Vgl. Hau (2008), S. 851ff.

<sup>20</sup>Hau (2008), S. 86

Abbildung 10: Luftkräfte am auftriebsnutzenden Rotor<sup>21</sup>

## 2.2 Berechtigung der Stromerzeugung durch Windkraft

Erneuerbare Energiequellen dürfen nicht zu jedem Preis als sinnvoll erachtet werden. Dem gegenüber steht das Anliegen des Betreibers einer solchen Anlage, wirtschaftliche Rentabilität zu erzielen. Besonders in der Energiewirtschaft entscheiden die von der Politik festgelegten Rahmenbedingungen, welche Kosten von der Allgemeinheit (Förderungen, Folgekosten) getragen werden müssen und welche wirklich auf den Energieerzeuger zurückfallen. Dies beeinflusst so den Konkurrenzkampf der verschiedenen Energieträger untereinander. Erst solche Stromvergütungen durch Gesetze (gesetzliche Einspeisetarife) machen eine Stromerzeugung an Standorten mit guten Windverhältnissen wirtschaftlich. Diese Situation hat sich in den vergangenen Jahren durch die stetig steigenden Stromerzeugungskosten verändert. Bei einer großen Windkraftanlage stellt man sich weniger die Frage nach den Stromerzeugungskosten, sondern als der durch die vorgegebenen Stromerlöse auftretenden Amortisationszeit für das investierte Kapital.<sup>22</sup>

<sup>21</sup>Hau (2008), S. 87

<sup>22</sup>Vgl. Hau (2008), S. 851ff.

### 2.2.1 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die einfachste Möglichkeit zur Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist die statisch durchführbare Amortisationsrechnung. Diese ermittelt dabei die Anzahl an Perioden (in Jahren), nach denen das eingesetzte Kapital durch die Kapitalrückflüsse wieder erwirtschaftet wird. Dabei geht man davon aus, dass eine rasche Erwirtschaftung des verwendeten Kapitals vorteilhaft ist, da die nähere Zukunft mit geringerem Risiko behaftet ist. Die Differenz zwischen Amortisationszeit und Restnutzungsdauer dient als Zeit für die Verzinsung des Kapitals.<sup>23</sup>

Für die Bestimmung der Amortisationszeit bei gegebenen Stromtarifen sind folgende Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Mittlere Jahreswindgeschwindigkeit am Standort (Häufigkeitsverteilung)
- Leistungskennlinie der Windkraftanlage
- Investitionskosten
- Betriebskosten (Wartung bzw. Instandsetzung)

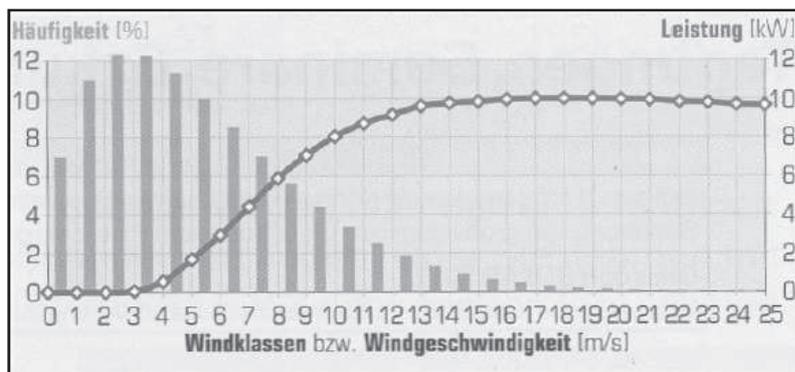


Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Leistungskennlinie<sup>24</sup>

Für Windkraftanlagen sind Amortisationszeiten aus betriebswirtschaftlicher Sicht von zwanzig Jahren und mehr für Investitionsgüter von einigen hunderttausend Euro unrealistisch. Vor allem für kleine Anlagen, welche für den privaten Verbraucher bestimmt sind, sind Amortisationszeiten von über zehn Jahren nicht marktgerecht. Bei großen Anlagen sehen die Verhältnisse etwas anders aus, da Energieversorgungsunternehmen gewohnt sind, konventionelle Kraftwerke über zwanzig Jahre und länger zu betreiben. Zusätzlich kommt noch die höhere Lebenserwartung von Anlagen

---

<sup>23</sup>Vgl. Poggensee (2011), S. 89

<sup>24</sup>Reiterer (2013), S. 12

im Megawattbereich hinzu. Dies zusammen führt zum Zugeständnis höherer Amortisationszeiten solcher Anlagen.<sup>25</sup>

Daher ist es umso wichtiger, die Kostenstruktur von Kleinwindkraftanlagen zu analysieren, um Optimierungspotentiale zu finden, die Herstellkosten zu reduzieren sowie gleichzeitig die Amortisationszeit zu verkürzen. Die derzeit durchschnittlichen Kosten bezogen auf die Nennleistung verdeutlichen das Problem der zu hohen Anschaffungskosten. Mit 6040 \$/kW im Jahr 2011 sind diese zu hoch, um Anlagen wirtschaftlich zu betreiben. Den Kosten gegenüber steht der Ertrag. Dieser ist abhängig von der Energiemenge, die produziert werden kann und somit von den standortabhängigen Windverhältnissen und bei ins Netz einspeisenden Anlagen vom Einspeisetarif. Manche Länder haben eigene Einspeisetarifbestimmungen für Kleinwindanlagen bis zu einem bestimmten Leistungslimit. Diese können sich von Land zu Land deutlich unterscheiden. Diese Tarife liegen global gesehen zwischen 0,1 und 0,5 €/kWh (Tabelle 1). Diese unterschiedlichen Bestimmungen verändern die Amortisationszeit von ein und derselben Anlage bei ähnlichen Windverhältnissen und beeinflussen das Marktpotential erheblich. Es ist auf jeden Fall zu beachten, dass es sich oft um staatlich unterstützte Preise handelt, die dadurch schwanken können.<sup>26</sup> In Österreich gibt es derzeit keine gesonderten Tarife für den Betrieb solcher Kleinwindkraftanlagen.

---

<sup>25</sup>Vgl. Hau (2008), S. 855

<sup>26</sup>Vgl. Gsänger (2013), S. 6ff.

Tabelle 1: Einspeisetarifbestimmungen für KWEA weltweit<sup>27</sup>

Country/Region	Size Limit	EUR/kWh	Country/Region	Size Limit	EUR/kWh
Chinese Taipei	1-10kW	0,185	Japan	< 20kW	0,500
Canada				≥ 20kW	0,200
Ontario	< 10kW	0,104	Lithuania	< 30kW	0,110
Nova Scotia	< 50kW	0,386		30-350kW	0,100
Cyprus	< 30kW	0,220	Portugal	< 3,68kW	0,261
	Off-grid	0,190		After 8 <sup>th</sup> year	0,120
Greece	< 50kW	0,250	Switzerland		0,180
	> 50kW	0,090	UK	< 1,5kW	0,443
	Off-grid	0,100		1,5-15kW	0,343
Italy	< 20kW	0,291		15-100kW	0,309
	20-200kW	0,268	USA		
Israel	< 15kW	0,254	Indiana	5-100kW	0,130
	< 50kW	0,326	Hawaii	< 20kW	0,123
				20-100kW	0,105
			Vermont	< 100kW	0,193

Die Vergütung pro gelieferter Kilowattstunde beträgt momentan in Österreich 0,0945 €/kWh<sup>28</sup> und liegt deutlich unter den Tarifen anderer Länder. Daher ist es sinnvoller, Anlagen zur Eigenversorgung, als ausschließlich zur Netzeinspeisung zu betreiben, da der Einkaufspreis für Haushalte zurzeit ca. 0,2053 €/kWh<sup>29</sup> (EU-Durchschnitt 0,201 €/kWh) beträgt.

### 2.3 Kosten von Windkraftanlagen

Windenergienutzung aus rein ökologischen Gründen zu jedem Preis stellt unter heutigen Bedingungen kein realistisches Ziel dar. Das gilt für sämtliche regenerative Energiequellen. Es stellt sich die entscheidende Frage ob, die Energieerzeugungskosten durch den hohen Kapitaleinsatz trotz der Einsparungsmöglichkeit von Brennstoffkosten wirtschaftlich sind oder nicht. Durch die Entwicklung der vergangenen 15 Jahre konnten erhebliche Fortschritte in Bezug auf die Reduzierung der Herstellkosten, wie in kaum anderen Bereichen der Energietechnik erzielt werden. Die zu Beginn der achtziger Jahre serienmäßig gefertigten kleineren Anlagen, die für Standorte in Dänemark und Amerika bestimmt waren, hatten spezifische Kosten zwischen 2.000 - 3.000 €/kW Nennleistung. Diese spezifischen Verkaufspreise konnten bis Ende der Neunziger auf unter 800 €/kW für Großanlagen gesenkt werden und ermöglichen bereits eine wirtschaftliche Stromerzeugung durch Windkraft an vielen

<sup>27</sup>Gsänger (2013), S. 8

<sup>28</sup>Vgl. IG Windkraft (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

<sup>29</sup>Vgl. E-Control (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

Standorten mit entsprechender Einspeisevergütung. Nichts desto trotz sind weitere nutzbare Kostensenkungspotentiale von großem Interesse und beruhen in Prinzip auf zwei Faktoren. Der eine bezieht sich auf den heutigen technischen Entwicklungsstand, welcher noch genügend Verbesserungspotential für kostengünstigere Lösungsansätze bietet, mit dem Hauptziel, einfachere und leichtere Anlagen zu entwickeln, die dadurch kostengünstiger werden. Der zweite Faktor beruht auf der Herstellkostenreduktion durch Fertigung größerer Stückzahlen. Dazu sei jedoch erwähnt, dass Windkraftanlagen wahrscheinlich nie am Fließband gefertigt werden und sich eine Serienfertigung auf einige hundert bzw. bei kleineren Anlagengrößen auf einige tausend Stück pro Jahr begrenzen wird.<sup>30</sup>

Die Produktkostenstruktur bestimmt sich hauptsächlich durch das Produkt selbst. Nebenbei existieren jedoch weitere Faktoren, welche die Herstellkosten und deren Zusammensetzung, wenn auch nur in geringerem Ausmaß, beeinflussen. Das Herstellungsumfeld, in dem das Produkt entsteht, ist ein oft unterschätzter Einflussfaktor. Neuentwicklungen starten oft mit einem Handicap, weil die Produktionsstruktur, in der sie hergestellt werden sollen, ursprünglich für andere Produkte entworfen wurden und mit ihnen über die Zeit gewachsen sind. Das ist einer der häufigen Gründe, warum bei Diversifikationsversuchen neue Produkte unwirtschaftlich erscheinen. Ein weiterer wichtiger Faktor ist der Produktionsstatus. Es macht einen großen Unterschied für die Kostenstruktur, ob eine Einzelfertigung eines Prototyps oder eine Serienfertigung vorliegt. Unterschiedliche Komponenten zeigen dabei deutlich verschieden hohe Kostensenkungspotentiale auf. Rotorblätter großer Anlagen können beispielsweise in einer Serienproduktion wesentlich kostengünstiger produziert werden, wohingegen Getriebe, Lager und viele andere Maschinenbauteile durch eine Serienfertigung kaum Veränderungen in den Kosten erfahren. Wie für alle Produkte lassen sich Kostenstrukturen von Windkraftanlagen auf unterschiedliche Weise gliedern. Für kaufmännische Kalkulationen erfolgt die Gliederung nach Material, Zulieferteilen, Bearbeitungsstunden und den Zuschlägen für die Allgemeinkosten. Diese Aufschlüsselung ist jedoch wenig aussagekräftig in Bezug auf die Technik. Aufschlussreicher dahin gehend ist eine Gliederung nach Komponenten und macht Weiterentwicklungspotentiale hinsichtlich kostengünstigerer Konzepte sichtbar.<sup>31</sup>

Eine weitere Möglichkeit zur Kostengliederung bietet eine ABC-Analyse deren Ursprung in der Materialwirtschaft liegt. Um eine Fülle von Komponenten überblicken zu können, sollte man zu Beginn Prioritäten setzen. Dabei hat die Erfahrung gezeigt, dass hohe Wertanteile verhältnismäßig von wenigen Komponenten verursacht wer-

---

<sup>30</sup>Vgl. Hau (2008), S. 797ff.

<sup>31</sup>Vgl. Hau (2008), S. 810ff.

den. Genau jenen Komponenten ist die höchste Priorität einzuräumen, da man mit deren Bearbeitung bereits einen hohen Kostenanteil analysieren kann. Eine Zuteilung der Priorität erfolgt über die Buchstaben A, B und C. A bedeutet einen hohen Kostenanteil und dadurch eine hohe Priorität, B einen mittleren Kostenanteil und C einen geringen Anteil an den Gesamtkosten und somit die niedrigste Prioritätsstufe.<sup>32</sup>

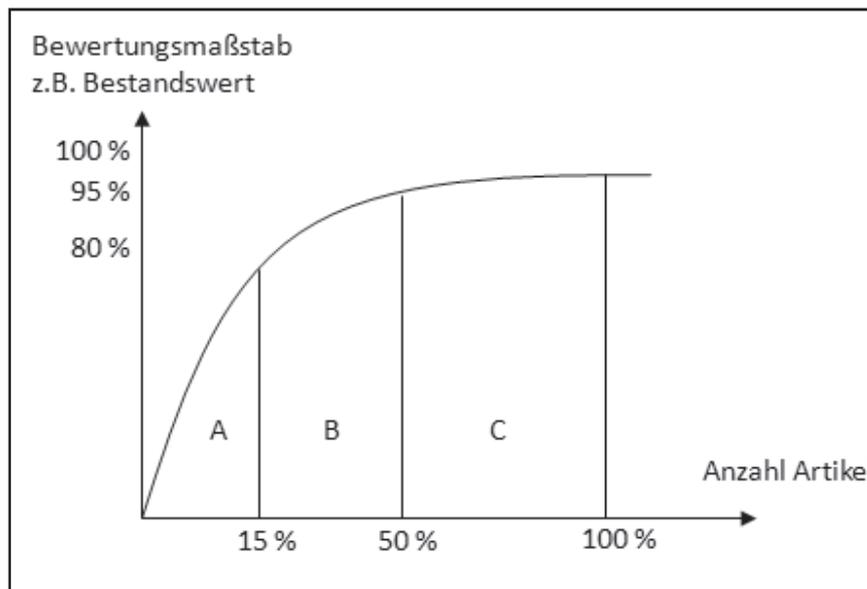


Abbildung 12: ABC-Analyse<sup>33</sup>

Die Festhaltung der gesamten Kosten kann nicht ohne die Berücksichtigung der Entwicklungskosten erfolgen, welche selbstverständlich durch den Verkaufspreis gedeckt werden müssen. Die Größenordnung hängt dabei von den angenommenen Verkaufszahlen ab, es kann jedoch üblicherweise nicht mehr als 5 bis 10 % des Verkaufspreises für die Entwicklungskostenamortisation angesetzt werden. Ausgehend von einem komplexen System einer großen Windkraftanlage, lassen sich bei vorhandener technischer Erfahrung aus ähnlichen Projekten Entwicklungskosten für den Prototyp mit mindestens dem Doppelten der Baukosten beziffern. Darin noch nicht berücksichtigt sind die teils hohen Investitionskosten in Vorrichtungen und Werkzeuge. Mit der Entwicklung des Prototyps ist jedoch die kommerzielle Reife eines Produktes noch nicht erreicht. In der Regel stehen zwischen diesem Prototyp und einem marktreifen Produkt drei konstruktive Überarbeitungsschritte. Vom ersten Entwurf des Prototyps, mit welchem experimentelle Erfahrung gesammelt werden soll, erfolgt im zweiten Schritt eine sichere Funktionsweise für den Dauereinsatz. Erst im dritten Schritt wird durch Berücksichtigung und Wahl der geeigneten Produktionsprozesse

---

<sup>32</sup>Vgl. Probst/Haunerding (2005), S. 36ff.

<sup>33</sup>Vgl. Grap (1998) S. 255

die Grundlage einer kommerziellen Produktion geschaffen. Ebenfalls dürfen die anfallenden Markteinführungskosten nicht unberücksichtigt bleiben und zählen im weiteren Sinne ebenfalls zu den Entwicklungskosten. Für neue Marktteilnehmer, die in Wettbewerb mit bereits etablierten Mitbewerbern treten, sind in dieser Phase nicht kostendeckende Markteinführungspreise unumgänglich. Dazu kommen noch Gewährleistungsfälle und nachgezogene Entwicklungskosten direkt beim Kunden. Dies sind Gründe für die stetig anwachsenden Entwicklungskosten bis zur Markteinführung einer neuen Windkraftanlage.<sup>34</sup>

---

<sup>34</sup>Vgl. Hau (2008), S. 822ff.

### 3 Theoretische Grundlagen zur Entstehung und Kalkulation von Kosten

Nach der Behandlung der allgemeinen Grundlagen der Windkraft (Kapitel 2 ) werden in diesem Kapitel die Grundlagen zur Kostenentstehung näher erläutert. Im speziellen wird dabei auf Faktoren zu Kostenbeeinflussung näher eingegangen.

#### 3.1 Begriffsdefinition Kosten

Kosten werden in der Betriebswirtschaftslehre als betriebsbedingter Werteverzehr an Sachgütern und Dienstleistungen zum Zweck der betrieblichen Leistungserstellung definiert. Ziel ist die Schaffung von Produkten oder von Dienstleistungen bei einer angestrebten Wertschöpfung. Die Wertschöpfung bestimmt sich aus der Wertsteigerung des Gütereinsatzes der Endleistung im Vergleich zu den eingesetzten Kosten. Bei der Produktentwicklung sind vor allem die vom Produkt hervorgerufenen Kosten von Bedeutung und für einen effizienten Kosteneinsatz von Interesse.

#### 3.2 Kostenarten

Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, die Kosten in Herstellkosten, Selbstkosten und Lebenslaufkosten einzuteilen (Abbildung 13).<sup>35</sup>

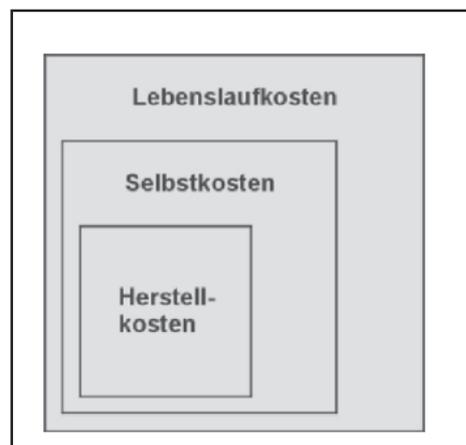


Abbildung 13: Kosteneinteilung<sup>36</sup>

Die Herstellkosten setzen sich, wie der Name bereits vermuten lässt, aus den Kosten des Herstellungsvorganges zusammen. Das sind im Wesentlichen die Fertigungs- und Materialkosten des Produktes inklusive aller Sonderkosten für die Fertigungsein-

---

<sup>35</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 5

<sup>36</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 6

führung. Neben diesen Kosten gibt es welche, die nicht direkt mit der Herstellung verbunden sind, wie z.B. Vertriebs-, Verwaltungs-, Entwicklungs- und Konstruktionskosten. Addiert man diese Kosten zu den Herstellkosten erhält man die Selbstkosten. Die Selbstkosten sind wiederum nur ein Teil der Lebenslaufkosten. Diese setzen sich aus sämtlichen Kosten zusammen, die durch den Kauf und während der Nutzung über die gesamte Produktlebensdauer beim Käufer anfallen. Die Lebenslaufkosten umfassen die Instandskosten, einmalige Kosten wie z.B. Transport und Aufstellung, Betriebskosten, Instandhaltungskosten und sonstige Kosten, zu denen z.B. Kapital- oder Steuerkosten zählen.<sup>37</sup>

Im Investitionsgüterbereich sind die Lebenslaufkosten aus wirtschaftlicher Sicht das Hauptverkaufsargument, bei Konsumgütern spielen sie dagegen nur eine Nebenrolle. Der Unternehmer wird sowohl danach trachten, seine Selbstkosten so gering als möglich zu halten, aber auch die Lebenslaufkosten seines Produktes zu minimieren, um am Markt konkurrenzfähig zu sein.<sup>38</sup>

Die Einteilung der Kosten kann unternehmensintern auch auf andere Art und Weise erfolgen (Abbildung 14).

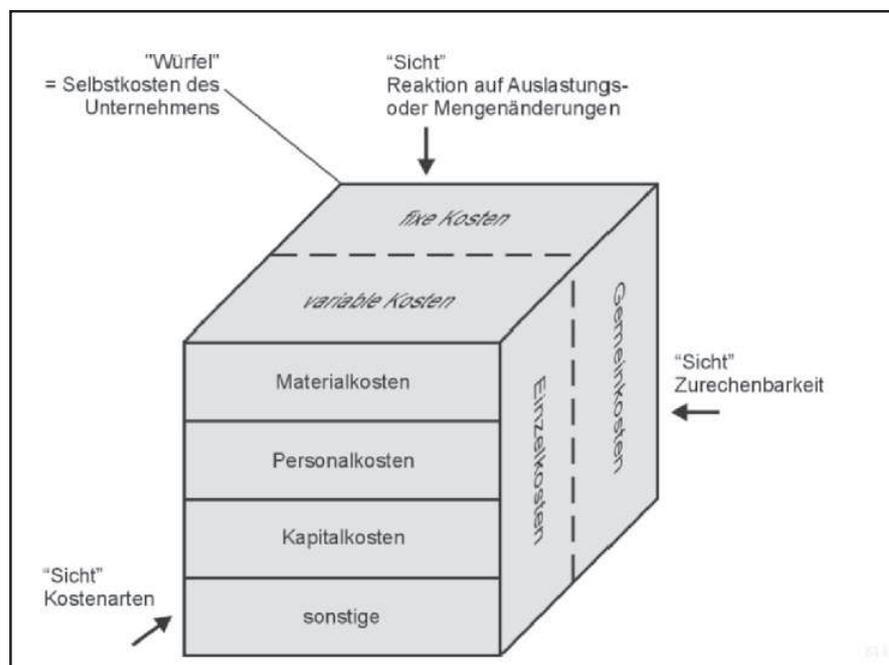


Abbildung 14: Verschiedene Sichten auf Selbstkosten eines Unternehmens<sup>39</sup>

<sup>37</sup>Vgl. Böge (2011), S. 116

<sup>38</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 6

<sup>39</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 7

Sie können in Kostenarten wie z.B. Material-, Personal oder Kapitalkosten unterteilt werden. Verwendet man die Zurechenbarkeit der Kosten erhält man Einzel- und Gemeinkosten. Dabei können Einzelkosten wie Fertigungsmaterial oder Fertigungslohne den Kostenträgern (Produkt oder Dienstleistung) direkt zugeordnet werden, bei Gemeinkosten (z.B. Vertrieb-, Verwaltung, Gehälter der Angestellten, usw.) kann hingegen keine direkte Zuordnung erfolgen. Des Weiteren gibt es noch Kosten, die vom Beschäftigungsgrad oder der Anzahl der produzierten Produkte abhängen. Dabei bezeichnet man Kosten, die von der Stückzahl abhängen als variable Kosten wie z.B. Materialkosten oder Fertigungslohnkosten und Kosten, die unabhängig von der Unternehmensauslastung anfallen als Fixkosten (z.B. Miete, Abschreibung, usw.).<sup>40</sup>

### 3.3 Einflussfaktoren auf die Kostenentstehung

Unternehmen verfolgen das Ziel, eine möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals durch Steigerung des Gewinnes zu erreichen. Da sich der Gewinn aus der Differenz zwischen den Produkterlösen und den Produkterstellungskosten (Selbstkosten) ergibt, kann auch der Gewinn durch Beeinflussung dieser Parameter erfolgen. Höhere Erlöse können durch Verbesserung der Produktqualität, umfangreicheren Service und durch viele weitere Faktoren erreicht werden. Schwerpunkt dieser Betrachtung liegt jedoch auf dem zweiten Parameter, der Gewinnerhöhung durch Verringerung der Selbstkosten. Die Selbstkosten können durch Rationalisierungsmaßnahmen in der Produkterstellung erfolgen. Dabei werden betriebsinterne Abläufe effizienter durch unterschiedliche Maßnahmen (z.B. Automatisierung erhöhen, Personalkosten senken, bessere Ablaufplanung usw.) gestaltet. Selbstkostensenkung kann auch durch eine Entwicklung kostengünstigerer Produkte erfolgen. Hierbei finden Konzepte zur kostengünstigen Produktentwicklung ihren Einsatz. Diese Konzepte umfassen unter anderem material-, fertigungs-, und montagekostengünstige Produktgestaltungen. Um die unterschiedliche Kostenbeeinflussungsmöglichkeiten schematisch darstellen zu können, betrachtet man den Entwicklungsprozess.<sup>41</sup>

---

<sup>40</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 711ff.

<sup>41</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 8ff.

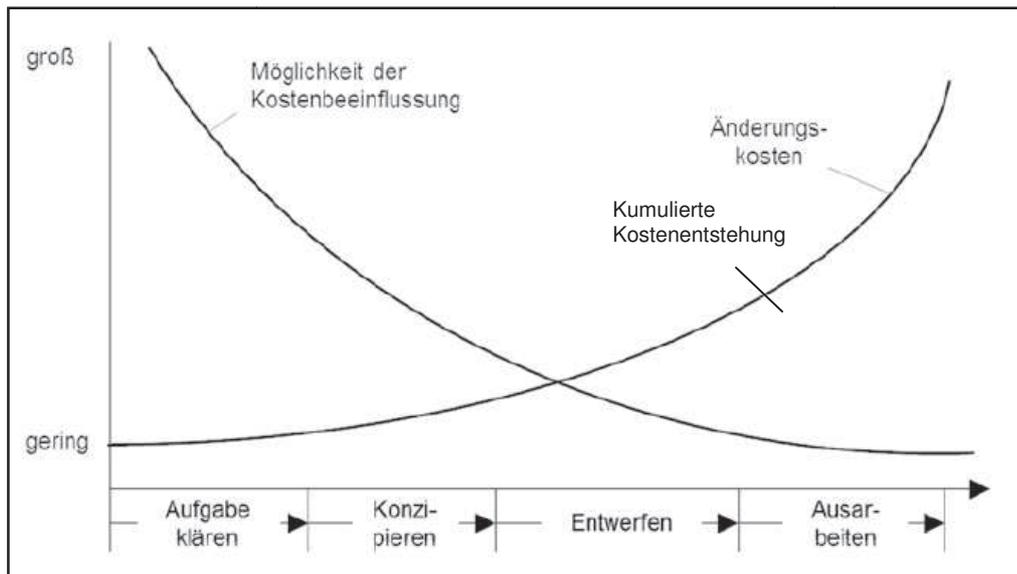


Abbildung 15: Kostenfestlegung und Kostenbeeinflussung während des Entwicklungsprozesses<sup>42</sup>

Dieser Prozess lässt sich in vier aufeinander folgende Phasen unterteilen (siehe. Abbildung 15 und Abbildung 22). In den Frühphasen der Entwicklung ist die Kostenbeeinflussung sehr hoch, jedoch ist auch der Informationsstand der später anfallenden Kosten gering. Mit Beendigung des Entwicklungsprozesses sind die Lebenslaufkosten weitestgehend festgelegt, allerdings ebenfalls noch nicht bekannt. In der nachstehenden Produktion, Nutzung und Entsorgung können nur noch prozessoptimierende Maßnahmen die Kosten weiter verringern, diese sind im Vergleich zu den Kosteneinsparungsmöglichkeiten zu Beginn des Entwicklungsprozesses aber gering. Fehler in frühen Entwicklungsschritten eines Produktes können zu späteren Zeitpunkten nur mehr mit hohem Aufwand korrigiert werden, aus diesem Grund ist eine Kostenerkennung in den frühen Entwicklungsphasen besonders wichtig.<sup>43</sup>

Aus diesen Erkenntnissen und der Erfahrung aus der Praxis wurde daraus eine „Zehnerregel“ formuliert. Diese besagt, dass eine Änderung umso teurer ist, je später sie stattfindet. Eine Änderung in der Aufgabenklärung kostet z.B. 1 €, in der Konstruktionsphase bereits 10 €, 100 € in der Fertigunsvorbereitung, während der Fertigung schon 1.000 € und nach der Auslieferung 10.000 €. Dieses Beispiel zeigt die hohe Kostenverantwortung der Entwicklung.<sup>44</sup>

Die Entwicklung und Fertigungsplanung legen zusammen etwa 90 % der Produktkosten fest, verursachen selbst aber nur ein Achtel der Produktkosten. Es ist daher nahezu zwecklos Entwicklungspersonal zu reduzieren um Selbstkosten zu senken.

<sup>42</sup>Schuh (2012), S. 233

<sup>43</sup>Vgl. Schuh (2012), S. 232ff.

<sup>44</sup>Vgl. Lindemann (2009), S. 198ff.

Es soll vielmehr darauf geachtet werden, einen qualifizierten Personalstamm aufzubauen, der ein enges Zusammenspiel zwischen Entwicklung, Beschaffung, Produktion, Vertrieb, Controlling und der Unternehmensführung ermöglicht.<sup>45</sup>

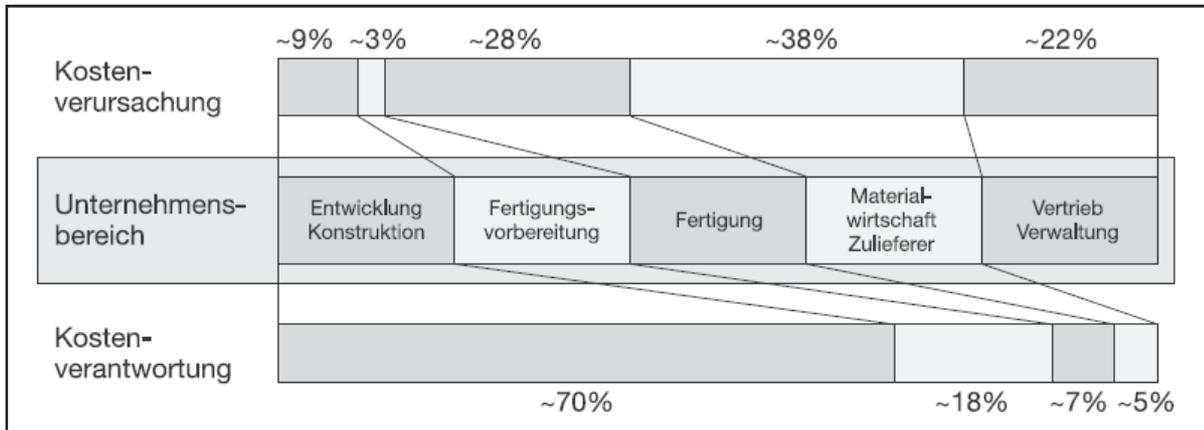


Abbildung 16: Kostenentstehung und Kostenfestlegung in Unternehmensbereichen<sup>46</sup>

Die Herstellkosten setzen sich aus der Summe der Material- und Fertigungskosten zusammen, wobei die Fertigungskosten wiederum in Teilfertigung und Montagekosten unterteilt werden können. Somit können durch gesetzte Maßnahmen in diesen drei Kategorien, die Herstellkosten eines Produktes beeinflusst werden. Diese Kategorien umfassen eine große Anzahl von weiteren Einflussfaktoren, daher kann hier nur auf einige wichtige genauer eingegangen werden. Die konstruktiven Hauptkosteneinflussfaktoren umfassen:<sup>47</sup>

- Aufgabenstellung bzw. Anforderungen
- Konzept (Funktionsprinzip, Komplexität, Anzahl und Art der Wirkflächen, physikalisches Prinzip mit Werkstoff)
- Baugröße (Abmessungen, Werkstoffmenge)
- Stückzahl (Standardisierung, Normung, Einzel- bzw. Serienfertigung)
- Fertigungs- und Montagetechnologie (bestimmt durch Werkstoff, Baugröße und Stückzahl)

<sup>45</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 52ff.

<sup>46</sup>Ponn/Lindemann (2011), S. 225

<sup>47</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 161ff.

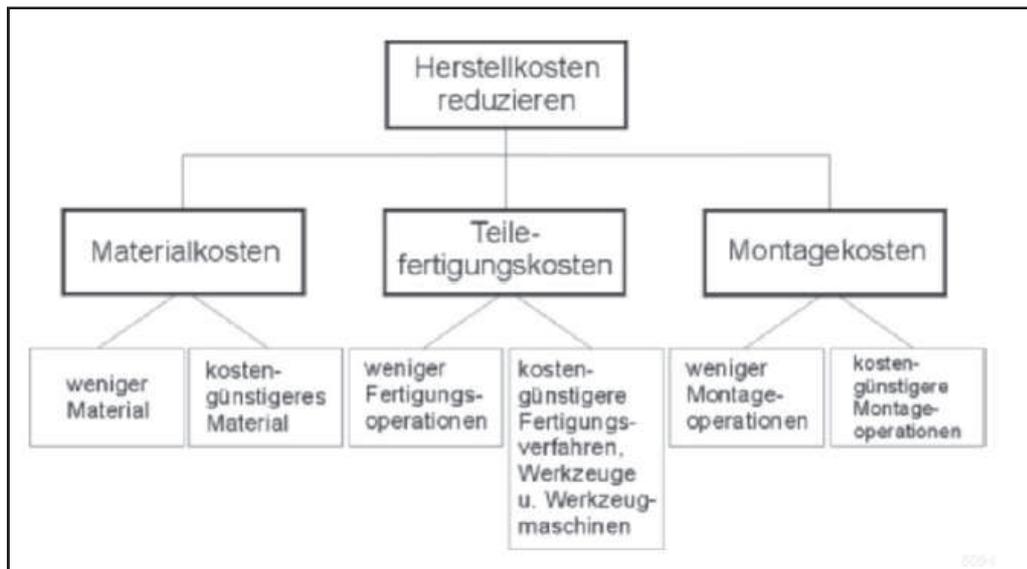


Abbildung 17: Reduzierungsmöglichkeiten der Herstellkosten<sup>48</sup>

Produktkosten werden durch die **Anforderungen** aus der Aufgabenstellung bestimmt. Je mehr Funktionen das Produkt erfüllen muss, desto höher sind seine Kosten (z.B. PKW-Entwicklung). Die Kosten einer Funktion lassen sich auch bereits in der Entwicklungsphase annähernd bestimmen, vorausgesetzt eine prinzipielle Lösung ist bekannt und kann aus erwerbbaaren Elementen umgesetzt werden. Prinzipiell können die Produktkosten durch Minimierung der Anforderungen reduziert werden. Das **Konzept** hat großen Einfluss auf die Herstellkosten, da es die wesentlichen Produkteigenschaften, physikalische Effekte, Abläufe und die Anordnung der Funktionsstruktur festlegt. Es bestimmt die Wirkflächen, die Komplexität sowie auch die Baugröße und ist für eine Kostenbeeinflussung von hoher Bedeutung. Trotzdem wird laut empirischer Untersuchungen, nur 0-10 % der Gesamtentwicklungszeit für die Konzeptphase aufgewendet. Positiven Einfluss auf die Herstellkosten haben vor allem leichte und kleine Konzepte und Konzepte mit einfachem Aufbau und wenigen Einzelteilen. Die **Gestalt** eines Produktes durch seine geometrischen Eigenschaften wie den Abmessungen, Anzahl und Position der Elemente eines Produktes, Toleranzen aber auch Oberflächenbeschaffenheit sind weitere wichtige Kostenparameter.<sup>49</sup>

Einen der größten Einflüsse auf die resultierenden Herstellkosten übt die **Stückzahl** aus. Die Kostenreduzierung erfolgt dabei durch den Einsatz von Fertigungsverfahren für eine rationellere Serienfertigung. Dabei ist zwischen den Kosten, welche einmal und unabhängig von der Stückzahl bei der Entwicklung und Einführung der Serienfertigung anfallen und den Produktionskosten je Stück zu unterscheiden. Einmalig

<sup>48</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 162

<sup>49</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 161ff.

anfallende Kosten der Entwicklung, Versuche, Modelle, Werkzeugkosten, usw. sind auf die Gesamtstückzahl zu verteilen. Häufig wird aber die Gesamtstückzahl nicht auf einmal, sondern in mehreren Losen gefertigt. In diesem Fall müssen die anfallenden Rüstkosten und Fertigungsvorbereitungskosten auf die Losgröße dementsprechend verteilt werden.<sup>50</sup>

Die Kostendegression durch die Stückzahl wird jedoch in der Praxis nur teilweise berücksichtigt, da Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb, Arbeitsvorbereitung und Materialwirtschaft pauschal in den Gemeinkostenzuschlagsätzen auf die Herstellkosten aufgeschlagen werden. Über die Stückzahl lässt sich eine Kostensenkung durch unterschiedliche Effekte erreichen. Wie erwähnt, lassen sich die einmaligen Kosten auf die Stückzahl bzw. Losgröße verteilen. Das bewirkt eine Fertigungskostenfunktion in Form einer Hyperbel. Je nach Kostenstruktur fällt die Kostendegression dabei stark oder schwach aus. Eine weitere stückzahlabhängige Kostenreduzierung kann durch den Trainingseffekt erreicht werden. Im Laufe der wiederholten Arbeitsvorgänge werden alle Tätigkeiten geistig und manuell trainiert. Zum Beispiel laufen Fertigungs- und Montagevorgänge mit der Anzahl der Wiederholungen mit deutlich geringerem Zeitaufwand ab. Die nächste Ursache ist eine auf die Stückzahl angepasste Konstruktion. Meist gestalten sich diese Konstruktionen aufwändiger. Es können jedoch Verbesserungen, auch wenn sie nur klein ausfallen, durch die größere Stückzahl hohe Kosteneinsparungen hervorbringen. Eng im Zusammenhang mit der Konstruktion sind leistungsfähige Fertigungsverfahren zu nennen. Jedes Fertigungsverfahren hat einen Stückzahlbereich, in dem es relativ zu anderen, die geringsten Stückkosten verursacht. Dabei rufen leistungsfähigere Verfahren in der Regel die höheren Einmalkosten hervor, können aber die Stückkosten reduzieren. Abschließend sind noch stückzahlbezogene Mengenrabatte zu erwähnen, wodurch die Einzelstückkosten erheblich gesenkt werden können.<sup>51</sup>

Einen ähnlich starken Einfluss wie die Stückzahl hat auch die **Baugröße** auf die Produktkosten. Mit einer Baugrößenverringerung ist auch eine Gewichtsverringerung verbunden, wodurch sich eine Kostensenkung ergibt, vorausgesetzt der Leichtbau wird nicht ins Extreme getrieben, wo dieser hohen Entwicklungs-, Fertigungs- und Materialaufwand verursacht. Die Baugröße beeinflusst nicht nur die Materialkosten, große Bauteile benötigen zusätzlich aufwändigere Fertigungsverfahren, höhere Einführungskosten (Werkzeuge,...) und längere Rüstzeiten.<sup>52</sup>

---

<sup>50</sup>Vgl. Edmund et al. (1994), S. 192ff.

<sup>51</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 171ff.

<sup>52</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 178ff.

Die **Auslegung** bestimmt die Nennbeanspruchung der Wirkflächen des Produktes, dabei handelt es sich hauptsächlich um mechanische, thermische, korrosive und um Strömungsbeanspruchungen. Im Allgemeinen reduziert sich die Baugröße durch die Wahl höherer Beanspruchung und höher belastbarer Werkstoffe. Dadurch können die Herstellkosten vermindert werden. Außerdem sinken die Betriebskosten, da z.B. Schmierstoffverbrauch, Wartungs- und Reparaturkosten sich ebenfalls reduzieren. Negativ wirkt sich eine stärkere Beanspruchung jedoch auf die Ausfalls- und Instandhaltungskosten aus, weil eine geringere Zuverlässigkeit zu erwarten ist. Fasst man all diese Kosten zu den Lebenslaufkosten zusammen, ergibt sich ein Kurvenverlauf mit einem Minimum, das es zu finden gilt (Abbildung 18). Schwierig dabei ist jedoch, die Schadenshäufigkeit von Investitionsgütern zu bestimmen, da Versuche so gut wie nie durchgeführt werden. Es soll besonders auf die Betriebssicherheit geachtet werden, da Schadensfälle die Kundenzufriedenheit negativ beeinflussen. Nach der Fertigung eines Prototyps sinken üblicherweise die Herstellkosten durch neue Fertigungsverfahren. Durch spätere Schadensfälle werden oft Verstärkungen eingeführt und für alle Nachfolgeprodukte übernommen. Auf der anderen Seite werden von Beginn an überdimensionierte Komponenten ohne Schadensfälle nicht entdeckt und bleiben daher teurer. Aus diesem Grund lassen PKW-Hersteller auf Schrottplätzen feststellen, welche ausgeschlachteten Teile sich am besten verkaufen, da diese dann möglicherweise überdimensioniert und zu teuer konstruiert wurden.<sup>53</sup>

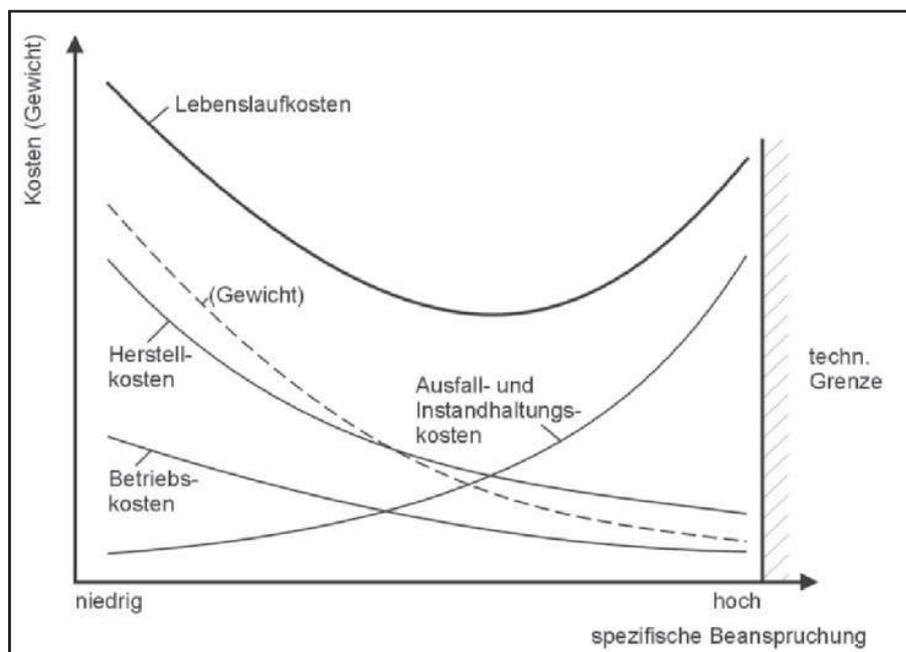


Abbildung 18: Einfluss der spezifischen Beanspruchung auf verschiedene Kostengruppen<sup>54</sup>

<sup>53</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 193ff.

<sup>54</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann. (2007), S. 192

**Materialkosten** verursachen im Maschinenbau, inklusive der Zukaufteile, zwischen 15 % und 60 % (im Schnitt ca. 43 %) der Gesamtkosten.<sup>55</sup> Aber auch der Einkauf hat einen erheblichen Einfluss auf die Materialkosten, denn mit der dazugehörigen Logistik können deutliche Kostenersparnisse erreicht werden, weil bei Materialkostenanteile von 50 %–60 % an den Verkaufserlösen bereits kleine Änderungen hohen Einfluss haben.<sup>56</sup> Dünnere Materialwandstärken oder eine andere Werkstoffqualität einzusetzen sind hierbei Vorgehensmöglichkeiten, um Materialkosten einzusparen. Besonders hoch sind die Materialkostenanteile bei der Serienfertigung. Fertigungskosten sind aufgrund der hohen Stückzahl bei leistungsfähigen Fertigungsverfahren gering, Materialkosten bleiben hingegen dabei fast unbeeinflusst.<sup>57</sup> Die nachstehende Abbildung 19 zeigt wichtige Regeln für eine materialkostengünstige Konstruktion.

---

<sup>55</sup>Vgl. VDMA Kennzahlenkompass (2002)

<sup>56</sup>Vgl. Arnolds et al. (2013), S. 13

<sup>57</sup>Vgl. Weiß (2005), S. 162

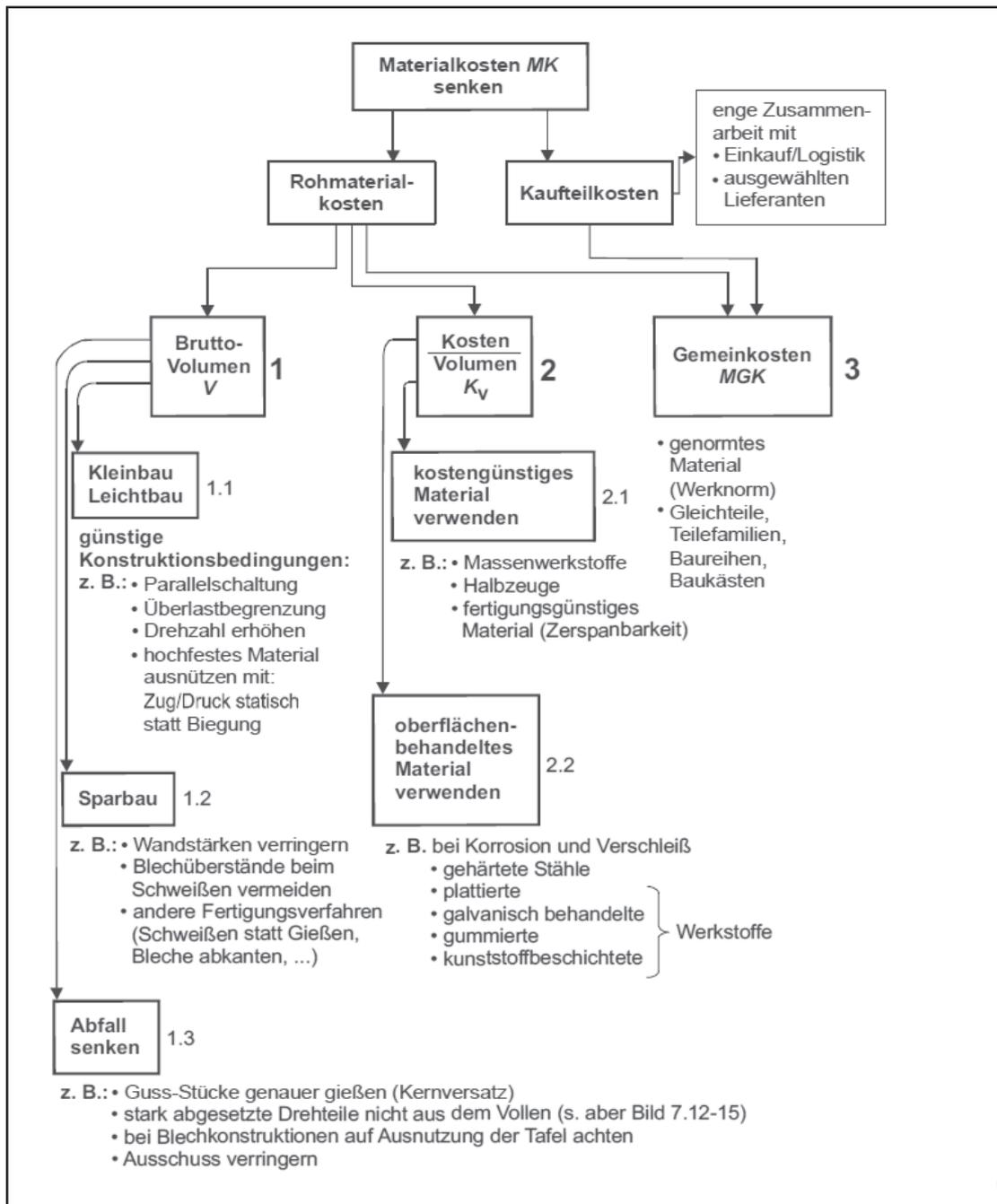


Abbildung 19: Regel für eine materialkostengünstige Konstruktion<sup>58</sup>

Die **Leistungstiefe** wird in technischen Unternehmen als der Wertschöpfungsanteil bezeichnet, der vom Unternehmen selbst durchgeführt wird. Durch immer komplexere Produkte ist es naheliegend, sich auf einige wenige Gebiete zu konzentrieren und die anderen Aktivitäten an spezialisierte Lieferanten auszulagern. Der Anteil der Eigenfertigung variiert je nach Branche sehr. Es gibt jedoch für beides, sowohl für die Eigenfertigung als auch für die Fremdfertigung Vor- und Nachteile. Die Festlegung

<sup>58</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 198

der Leistungstiefe stellt dabei eine strategisch wichtige Entscheidung dar und umfasst den gesamten Produktionsprozess.<sup>59</sup>

Vorteile der Fremdfertigung sind z.B.:

- Höhere Flexibilität bei schwankender Auslastung
- Skalen- und Erfahrungseffekte
- Mehr Kapazität für die eigenen Kernkompetenzen
- Geringere unternehmensinterne Ressourcenbindung

Nachteile der Fremdfertigung sind z.B.:

- Know-how-Verlust an Zulieferer, möglicher Konkurrent
- Lieferausfall
- Abstimmungsaufwand mit Lieferanten, Qualität,..
- Vertrauensverhältnis muss erst geschaffen werden

Es muss daher abgewogen werden, wo die eigenen Kernkompetenzen liegen, um einen Kundennutzen zu generieren. Als Kernkompetenz wird die Gesamtheit von Know-how, Einstellungen, Prozessen und Technologien verstanden, die für die Erfüllung der Kundenanforderungen maßgeblich sind, das eigene Unternehmen von der Konkurrenz abhebt und dadurch einmalig macht. Es empfiehlt sich diese Wertschöpfungsschritte, die diese Anforderungen erfüllen unternehmensintern auszuführen und andere Aktivitäten auszulagern. Damit sichert man die Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens. Aus kostentechnischer Sicht führt eine Fremdfertigung zu einer geringeren unternehmensinternen Ressourcenbindung und damit zu kleineren Fixkostenanteilen. Dadurch entsteht eine höhere Flexibilität der Kosten als bei der Eigenfertigung. Für die Gegenüberstellung der eigenen Herstellkosten und der Fremdbezugskosten sind sämtliche Kostenfaktoren der Fertigung und des Materialeinsatzes zu berücksichtigen. Diese umfassen mögliche Skalen- und Erfahrungseffekte, die sowohl die Eigenfertigung als auch den Fremdbezug vorziehen können. Bei ausschließlicher Berücksichtigung der Produktionskosten als Entscheidungsbasis für Eigen- oder Fremdfertigung besteht die Gefahr der Vernachlässigung strategischer Aspekte. Zusätzlich zu den Produktionskosten fallen auch Kosten für die Übergabe von Information und für die Kommunikation zwischen den einzelnen Produktionsschritten an, welche Berücksichtigung finden müssen. Für die Reduzierung dieser Kommunikationskosten eignen sich besonders langfristige Kooperationen.<sup>60</sup>

---

<sup>59</sup>Vgl. Irle (2011), S. 19ff.

<sup>60</sup>Vgl. Irle (2011), S. 8ff.

Ein Werkzeug zur Entscheidung zwischen Eigen- und Fremdfertigung auf Kostenbasis ist die Teilkostenrechnung. Diese teilt die Kosten in mengenabhängige (variable) und mengenunabhängige (fixe) Kosten ein. Es wird dabei verzichtet, die Fixkosten auf die Kostenträger (Produkte) aufzuteilen. Man berücksichtigt nur die variablen Kosten. Zur Kompensierung der Fixkosten bildet man einen sogenannten Deckungsbeitrag, welcher sich aus der Differenz zwischen Erlös und variablen Kosten ergibt. Für die Entscheidung zwischen Eigen- und Fremdfertigung kann man nun die beiden Deckungsbeiträge vergleichen. Bei gleichem Erlös beider Fertigungsvarianten lassen sich die Bezugskosten und die variablen Herstellkosten direkt gegenüberstellen und es ist jene Variante mit den geringeren Kosten zu bevorzugen. Sind die variablen Herstellkosten geringer, ergibt sich der Deckungsbeitrag aus der Differenz zum Erlös und eine Eigenfertigung ist durchzuführen. Sind jedoch die Bezugskosten geringer, dann ist die Deckung der Fixkosten durch die Fremdfertigung höher und diese ist heranzuziehen.<sup>61</sup>

Die **Fertigungskosten** (Kosten der Fertigung und Montage) stellen nach den Materialkosten im Maschinenbau den zweiten großen Herstellkostenanteil dar.<sup>62</sup> Es bieten sich für die Umsetzung einer technologischen Aufgabe meist mehrere Fertigungsverfahren an. Die Auswahl des geeignetsten Fertigungsverfahrens ist von dessen Anwendungsgrenzen bezüglich der zu bearbeitenden Form der Elemente, den spezifischen Abmessungen, Toleranzen, Oberflächenqualitäten und den zu erzielenden Stoffeigenschaften des Werkstoffes abhängig. Zusätzlich können noch viele weitere Faktoren eine Rolle bei der Fertigungsverfahrensauswahl spielen. Die Fertigungsverfahren und Fertigungssysteme sollen so gewählt werden, dass die Werkstücke in ausreichender Menge und Qualität zu minimalen Kosten unter ergonomisch zumutbaren Bedingungen hergestellt werden können. Auf keinen Fall darf das Fertigungsverfahren isoliert betrachtet werden, die engen Zusammenhänge zu vor- bzw. nachgelagerten Prozessen (z.B. Montage) erschweren die Auswahl. Die Strategien zur Optimierung betreffen vor allem die Minimierung von Kosten, Fertigungszeiten und die Kapitalbindung bei maximaler technischer und zeitlicher Auslastung des Fertigungsverfahrens.<sup>63</sup>

Ein wichtiges Hilfsmittel bei der Wahl des Fertigungsverfahrens ist die Bestimmung der Grenzstückzahlen durch eine Grenzmengenrechnung. Dieses statische Verfahren berücksichtigt sämtliche anfallenden Kosten in einem Bezugszeitraum. Durch die Änderung dieses Bezugszeitraumes und die dadurch ebenfalls veränderten Stück-

---

<sup>61</sup>Vgl. Edmund et al. (1994), S. 89ff.

<sup>62</sup>Vgl. VDMA Kennzahlenkompass (2002)

<sup>63</sup>Vgl. Risse (2012), S. 7ff.

zahlen können die Ergebnisse sehr unterschiedlich ausfallen, daher ist dieser sorgfältig zu wählen. Dabei ist die Grenzstückzahl jene Menge, bei denen die Kosten zweier Fertigungsverfahren identisch sind<sup>64</sup>, siehe Abbildung 20.

Unterschiedliche Fertigungsverfahren haben verschieden hohe einmalige Kosten z.B. Rüst- und Werkzeugkosten und daher ungleich stark abfallende Herstellkosten pro Stück. Fertigungsverfahren mit hohen Einmalkosten haben oft geringere Fertigungszeiten, wodurch durch steigende Stückzahlen die Fertigungskosten stark abfallen. Materialkosten bleiben hingegen annähernd konstant, können aber durch Mengenrabatte ebenfalls gesenkt werden. Durch Aneinanderreihung der Verfahren ergibt sich für jede Stückzahl eine kostengünstige Fertigungsmöglichkeit, welche zu bevorzugen ist. Jedoch benötigt jede Änderung des Fertigungsverfahrens eine Umgestaltung der Konstruktion, um das Verfahren kostenoptimiert einsetzen zu können.<sup>65</sup>

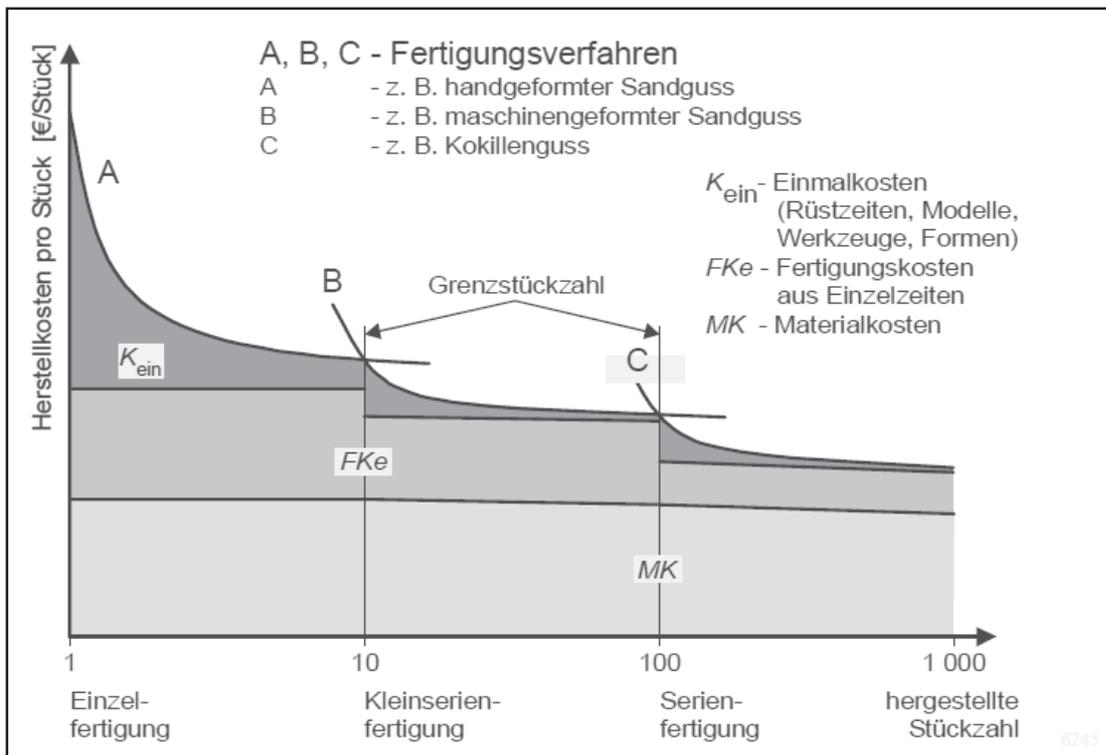


Abbildung 20: Herstellkostenreduktion bei steigender Stückzahl durch andere Fertigungsverfahren<sup>66</sup>

Die **Montage** steht wie bereits erwähnt im direkten Zusammenhang mit den Fertigungskosten und kann bis zu 50 % der Herstellkosten verursachen. Die gesamte Montagezeit beinhaltet jedoch nicht nur die Montage, sondern setzt sich vor allem bei

<sup>64</sup>Vgl. Westkämper/Warnecke (2012), S. 46ff.

<sup>65</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 212ff.

<sup>66</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 222

Einzel- und Kleinserien aus der Montagezeit, Vorbereitungszeit, Zeit für die Anpassung und Nachbearbeitung und der Transportzeit zusammen. Wobei die größte Zeitbeanspruchung durch Nach- bzw. Anpassungsarbeit und nicht durch die eigentliche Montage selbst erfolgt (Abbildung 21).<sup>67</sup>

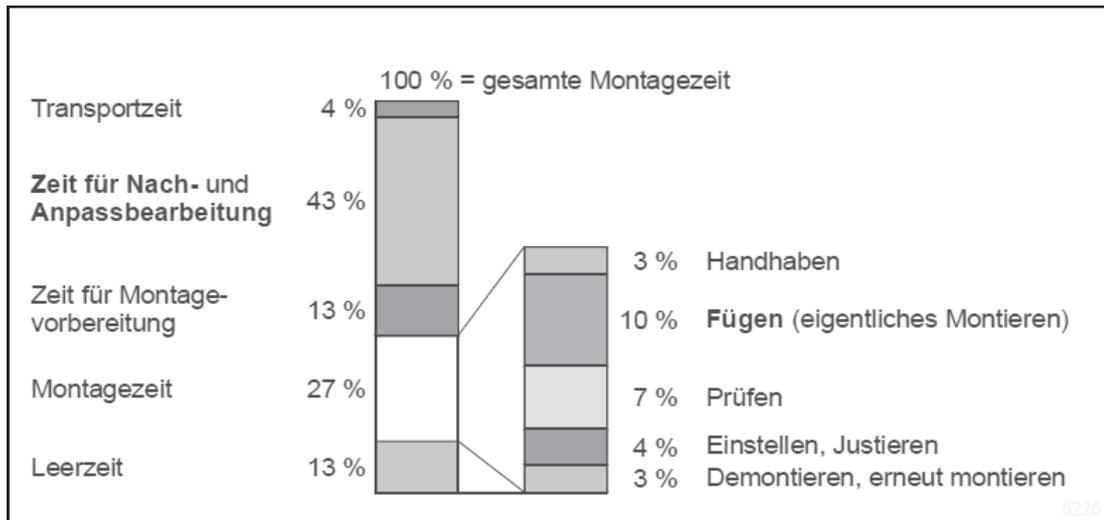


Abbildung 21: Zeitverteilung während der Montage im Maschinenbau für Einzel- und Kleinserien<sup>68</sup>

Beeinflusst werden die Qualität und die Kosten der Montage bereits in der Konzeptphase und hängen von der Art der Montage und der Anzahl der Montageschritte und deren Durchführung ab. Dabei zeigt sich ein enger Zusammenhang zwischen der Werkstückgestaltung und des angewandten Fertigungsverfahrens. Bei der Montage lassen sich folgende Teilschritte erkennen: Speichern (Bereitstellen von Werkstück und Verbindungselement), Werkstück handhaben, Positionieren, Fügen, Einstellen, Sichern und Kontrollieren. Diese Montageschritte fallen bei jedem Montageprozess an und treten in Abhängigkeit der Stückzahl und der Automatisierung in unterschiedlicher Reihenfolge und Häufigkeit auf. Wichtig für den Montageaufwand ist überdies, ob dieser im Werk oder auf einer Baustelle durch Fachkräfte oder weniger geschultes Personal direkt beim Kunden erfolgen kann. Als zweckmäßig hat sich erwiesen, bereits in der Konzeptphase auf eine montagegerechte Baustruktur zu achten. Durch Gliedern, Reduzieren, Vereinheitlichen und Vereinfachen der Montageoperationen lässt sich eine Aufwandssenkung herbeiführen. Diese Ansätze lassen sich auch für die Gestaltung der Fügestellen anwenden. Der Aufwand für Montagevorgänge und Verbindungselemente wird dadurch vermindert. Ebenso wichtig und eng mit der Gestaltung der Fügestellen verbunden ist die Gestaltung der Fügeteile. Diese soll ein

<sup>67</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 270ff.

<sup>68</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 277

einfaches Erkennen, Bewegen und Fügen ermöglichen. Sämtliche Richtlinien zur Montage lassen sich aus der Grundregel „Einfachheit“ (Vereinheitlichen, Vereinfachen, Reduzieren) und „Eindeutigkeit“ (keine Über- bzw. Unterbestimmung) ableiten.<sup>69</sup>

Der letzte Einflussfaktor der hier betrachtet werden soll, ist die **Teilevielfalt**. Diese beschreibt die Anzahl der unterschiedlichen Teile in einem Produkt und ist vor allem in Einzel- und Kleinserien aufgrund der Einführungskosten verschiedener Teile von Bedeutung und soll so gering als möglich ausfallen. Nachstehend sind einige Maßnahmen zur Reduktion der Teilevielfalt angeführt.<sup>70</sup>

- Teilnormungsgrad steigern durch Gleich- und Wiederholteile
- Verwendung von Kaufteilen nach Lieferanten- oder Kundenspezifikation
- Teilefamilien bilden
- Integralbauweise anwenden
- Baureihen und Baukästen bilden
- Modulbauweise verwenden

Unter Normung versteht man das Lösen wiederkehrender Probleme durch bekannte, bereits eingesetzte Mittel. Es zielt darauf ab, die Anzahl der Neuteile möglichst gering zu halten. Damit sollen alle anfallenden Kosten der Neuteile, die unter anderem bei der Entwicklung und der Fertigungseinführung anfallen, vermieden werden. Neben den Neuteilen gibt es noch Wiederholteile und Gleichteile. Wiederholteile sind Teile, die bereits in anderen Produkten zum Einsatz kommen, Gleichteile hingegen kommen in einem Produkt mehrmalig vor. Durch erhöhte Anwendung dieser Wiederhol- und Gleichteilestrategie kann auch bei Kleinserien die Stückzahl der einzelnen Teile erhöht werden. Eine solche Erhöhung bewirkt eine bessere Verteilung der einmalig anfallenden Einführungskosten. Der Vorteil bei der Anwendung von Norm- und Kaufteilen ist z.B., dass diese erprobt, am Stand der Technik, kurzfristig lieferbar und auch normierte Werkzeuge dafür vorhanden sind. Mittlerweise ist die Zahl der unterschiedlichen Normungen kaum mehr überschaubar. Diese sind auch Änderungsvorgängen unterworfen. Des Weiteren gibt es Abstufungen der Normen, welche dann verwendet werden müssen (z.B. keine M14,3 Schraube). Für eine Erhöhung der Normierung sind auch lieferantenspezifische oder auch kundenspezifische Kaufteile möglich. Dabei werden lieferantenspezifische Kaufteile vom Lieferanten standardisiert. Diese sind einerseits wie Normteile erprobt und verringern den eigenen Entwicklungsaufwand, andererseits verursachen sie eine Abhängigkeit vom Lieferanten

---

<sup>69</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 468ff.

<sup>70</sup>Vgl. Edmund et al. (1994), S. 193

und sind im Einzelfall oft nicht die optimalste Lösung. Kundenspezifische Kaufteile können hingegen ganz auf dessen Anforderungen zugeschnitten sein, erschweren zusätzlich aufgrund der Anpassung an oft spezielle Kundenanforderungen einen Lieferantenwechsel.<sup>71</sup>

Die in diesem Abschnitt behandelten Einflussfaktoren auf die Herstellkosten weisen komplexe Zusammenhänge untereinander auf und es ist daher kaum möglich, einzelne Faktoren isoliert voneinander zu betrachten. Oft ziehen Verbesserungen auf einer Seite unweigerlich Nachteile bei anderen Einflussgrößen nach sich, daher sind Kompromisslösungen unvermeidlich. Förderlich ist es auf jeden Fall, Personen unterschiedlicher betrieblicher Teilbereiche während der Lösungssuche einzubinden, um nicht nachträglich durch eine notwendige Neu- oder Anpassungskonstruktion zusätzlich Kosten zu verursachen.

### **3.4 Methoden zur zielkostenorientierten Entwicklung**

Der Ablauf der zielkostenorientierten Entwicklung orientiert sich am Vorgehensplan für das Entwickeln und Konstruieren nach der VDI-Richtlinie 2222 (Abbildung 22). Den ersten Arbeitsschritt bildet die Planung durch die Abklärung der Anforderungen an das Produkt. Es gilt eine Anforderungsliste mit den Mindestanforderungen und Wünschen des Kunden zu erstellen, um später kostspielige Änderungen zu vermeiden. Dieses Lastenheft beinhaltet nicht nur technische Gesichtspunkte, sondern auch Zielkosten, Ergonomie, Arbeitssicherheit, usw., aber auch unternehmensinterne Anforderungen wie z.B. Budget, Personalkapazität und Termine. Diese Anforderungsliste ist der Ausgangspunkt für eine Funktionsanalyse, in der alle Funktionen, die das Produkt erfüllen muss, identifiziert werden und für die Lösungsvorschläge zu entwickeln sind. Sie bewirken eine ausführliche Auseinandersetzung mit dem zu entwickelnden System.<sup>72</sup>

---

<sup>71</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 304ff.

<sup>72</sup>Vgl. Schuh (2012), S. 187ff.

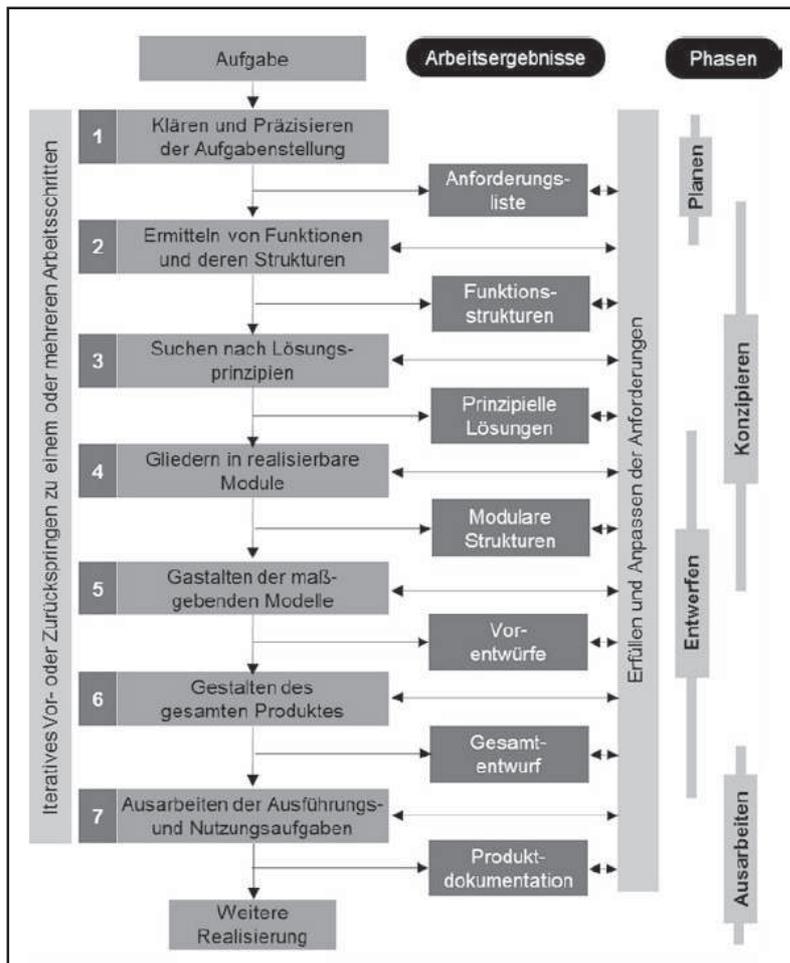


Abbildung 22: Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren VDI 2222<sup>73</sup>

Die Zielkostenermittlung ist in der Aufgabenklärung von besonderer Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg einer Produktentwicklung. Herausfordernd ist vor allem die zeitliche Differenz zwischen Ermittlung der Zielkosten und der Markteinführung des Produktes. Nur wenn die Zielkostenprognosen aus der Entwicklungsphase noch zum Verkaufszeitpunkt zutreffen, können die benötigten Erträge erwirtschaftet werden. Um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen, sind einige Faktoren zu berücksichtigen. Eine zuverlässige Zielkostenermittlung ist nahezu unmöglich, da Marktverhältnisse und unternehmensinterne Verhältnisse abgeschätzt werden müssen. Wichtig sind daher möglichst kurze Entwicklungszeiten, denn diese erhöhen die Eintrittswahrscheinlichkeit vorausgesagter Trends. Die Grundlage der Gesamtzielkosten bilden die Anforderungen des Kunden sowie die Bereitschaft dafür zu bezahlen. Natürlich will jeder Kunde die bestmögliche Lösung zu geringsten Kosten, daher muss diese Betrachtungsweise noch durch zusätzliche Aspekte erweitert werden. Diese umfassen unter anderem eine Analyse des Kundennutzens, des Marktes, der Vor-

<sup>73</sup>Schuh (2012), S. 52ff.

gängerprodukte, der Mitbewerber, des Innovationspotentials und der strategischen Entscheidung. Der potentielle Kunde steht im Zentrum der Zielkostenbestimmung, da dieser das Produkt in ausreichender Menge erwerben soll und dies nur tun wird, wenn es ihm einen gewissen Nutzen bzw. Gewinn verspricht oder ihn begeistern kann. Man teilt diesen Nutzen in objektiven und subjektiven Kundennutzen ein. Der objektive Kundennutzen spiegelt die Wirtschaftlichkeit eines Produktes für den Kunden wider und ergibt sich aus dessen Funktionen einerseits und aus den Anschaffungs- bzw. Betriebskosten andererseits. Der subjektive Nutzen berücksichtigt hingegen die Kriterien wie Design und Image die das Produkt von möglichen Mitbewerbern herausheben. Je höher diese Kundennutzen, desto höher können auch die Zielkosten angesetzt werden.<sup>74</sup>

Bei der Marktanalyse wird der erzielbare Preis durch Marktforschungsmethoden festgestellt und durch Abziehen des eingeplanten Gewinnes werden die Zielkosten bestimmt. Man bezeichnet diese auch als die vom Markt erlaubten Kosten. Eine Analyse der eigenen Vorgängerprodukte erlaubt ein detailliertes Wissen über die Kostenstruktur ähnlicher Produkte und der erreichbaren Zielkosten unter den vorliegenden unternehmensinternen Bedingungen. Besonders wichtig ist selbstverständlich die Berücksichtigung der derzeit am Markt befindlichen Konkurrenzprodukte hinsichtlich Funktionalität und Kosten. Aber auch die zukünftigen Innovationspotentiale sind abzuschätzen, um nicht davon überrascht zu werden. Diese Erkenntnisse sind mit dem eigenen Produkt zu vergleichen, daraus sind wertvolle Hinweise für die eigene Entwicklung zu erhalten. Innovationen haben großen Einfluss auf die Zielkostendefinition. Es ist zu beurteilen, welche und ob Innovationen Wettbewerbsvorteile bringen und wie sie sich auf die Zielkosten auswirken. Vor allem Innovationen in den Fertigungstechnologien können große Kosteneinsparungspotentiale nach sich ziehen. Des Weiteren wirken sich auch strategische, unternehmerische Entscheidungen auf die Zielkosten aus. Als Beispiel kann hier die Einsetzung von Vorzugslieferanten, eine Eigenfertigung oder eine Abnahmeverpflichtung bei Tochterunternehmen aufgeführt werden. Diese erwähnten Aspekte können bereits erste Lösungsvorschläge für Kostensenkungen aufzeigen und sind die Basis für die weitere Suche nach Kostensenkungspotentialen.<sup>75</sup>

Bevor nun die Gesamtzielkosten in Teilkosten aufgeteilt werden, sind die nachstehenden Fragen kritisch zu beantworten:<sup>76</sup>

---

<sup>74</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 52ff.

<sup>75</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 737ff.

<sup>76</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 52

- Warum ist das Produkt so teuer? (z.B. geringe Stückzahlen, andere Leistungsmerkmale,..)
- Warum kann die Konkurrenz zu geringeren Kosten anbieten? (z.B. höhere Stückzahlen,...)
- Wofür ist der Kunde bereit zu zahlen? (z.B. welche Funktionen braucht er wirklich,...)
- Braucht der Kunde z.B. mehr Leistung und wie würde er das honorieren?

Mit diesen Fragen lassen sich ein Zielpreis des zu entwickelnden Produktes und somit auch durch Abzug des Gewinnes und der Overheadkosten die Gesamtzielkosten des Produktes festlegen. Ausgangspunkt dieser Festlegung muss immer der Kundennutzen sein, da dieser für die Gesamtfunktion des Produktes bezahlen muss. Da sich Produkte generell aus mehreren Komponenten zusammensetzen und von verschiedenen Personen bearbeitet werden, müssen die Gesamtzielkosten in Teilzielkosten aufgespalten werden. Diese Teilzielkosten dienen zur Steuerung der Lösungsentwicklung und sollen Funktionen und Bauweisen in Frage stellen. Kostensenkungspotentiale sind hauptsächlich bei Teilsystemen mit hohen Kostenanteilen zu suchen. Durch veränderte Lösungs- bzw. Gestaltungsvarianten, Fertigungsverfahren, Werkstoffe udgl., kann deren Kostenniveau oft deutlich reduziert werden. Eine erfolgreiche Umsetzung und Einhaltung der Zielkosten ist nur durch Einschluss aller an der Produktentwicklung beteiligten Unternehmensbereiche möglich. Dafür ist bereits ab dem Frühstadium der Entwicklung, bei der Lösungssuche und Lösungsauswahl, die Erreichbarkeit der festgelegten Kostenziele durch unterstützende Methoden der Kostenerkennung und Kostenminimierung sicherzustellen.<sup>77</sup>

Nach der Definition der Anforderungen sowie der Festlegung der Zielkosten ist ein technisches Konzept zu entwickeln, das die vorgegebenen Ziele erfüllt. Diese Phase der Lösungssuche beinhaltet die Konkretisierungsstufen Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Während des **Konzipierens** werden unterschiedliche physikalische Effekte betrachtet oder die Gestalt des Produktes variiert und nur die funktionsbezogenen Wirkflächen betrachtet. Dabei wird die Gesamtfunktion zur einfacheren Bearbeitung in Teilfunktionen zerlegt. Diese Strukturierung ermöglicht eine effiziente Verteilung der Konstruktionsarbeit, wobei Entwicklungsschwerpunkte schneller identifiziert und bearbeitet werden können. Beim **Entwerfen** wird ein Grobentwurf der Lösungsvarianten angestrebt, um diese vergleichend bewerten zu können. Es hat sich dabei herausgestellt, Details nur so weit auszuarbeiten, dass ein Erkennen des Gestaltungsoptimums möglich wird. Nach Abschluss dieser Phase für alle Teilsysteme

---

<sup>77</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 737ff.

muss noch der Gesamtentwurf auf Umsetzbarkeit, Haltbarkeit und Funktion geprüft werden. Dafür kommen Simulationen und Berechnungen zum Einsatz. Das **Ausarbeiten** bildet, mit einem fließenden Übergang zum Entwerfen, die letzte Konkretisierungsstufe, in der eine detaillierte Festlegung des Produktes vorgenommen wird. Es werden Werkstoffe, Oberflächeneigenschaften und Herstellungsmöglichkeiten bestimmt, sowie die anfallenden Kosten geprüft.<sup>78</sup>

An dieser Stelle sollen jedoch noch einige Punkte zur Betrachtung der Kosten erwähnt werden. Essentiell ist hierbei die Kostenfrüherkennung, sodass bereits vor der Entscheidungsfindung für eine Lösungsvariante klar ist, wie hoch deren Kosten anzusetzen sind. Hierbei reichen oft Relativaussagen, um sich bereits in der frühen Phase der Entwicklung für eine oder mehrere Lösungen zu entscheiden. Es müssen jedoch trotzdem in regelmäßigen Zeitabständen die absoluten Kosten bestimmt werden, um die Zielkosteneinhaltung prüfen zu können. Daher benötigt jeder Entwicklungsprozess eine begleitende Kalkulation. In der Regel wird eine Vorkalkulation erst nach Beendigung der Konstruktion erstellt, wo viele Unterlagen bereits zur Verfügung stehen. Bei der entwicklungsbegleitenden Kalkulation ist das nicht der Fall. Die Unterlagen sind unvollständig, da Produktdetails noch gar nicht fixiert wurden. Trotzdem würde man die Kosten in dieser Phase bereits gerne wissen. Für komplexe Produkte ist es schwer, die Herstellkosten als Ganzes zu überblicken. Die vielen Einzelteile haben unterschiedliche Werkstoffe und durchlaufen die unterschiedlichsten Prozesse. Dabei ist nicht so sehr die Genauigkeit der Daten wichtig, sondern deren Vollständigkeit. Probleme stellen dabei die Datenquellen dar, die sehr unterschiedliche Qualität aufweisen können. Für Zukaufteile können ganz exakte Kosten vorhanden sein und einfach übernommen werden, während für neu zu entwickelnde Komponenten Schätzungen vorgenommen werden müssen, oder es sind nur die Kosten des Prototyps bekannt, jedoch nicht die Kosten einer Serienproduktion. Auch der Detaillierungsgrad kann unterschiedlich sein, möglicherweise liegen für große Zukaufteile nur Einkaufspreise, für selbstgefertigte Kleinteile hingegen Material- und Fertigungskosten aufgeschlüsselt vor. Es gibt einige Kostenermittlungsverfahren zur Kostenfrüherkennung. Sie haben eines gemeinsam. Sie sind notwendigerweise ungenauer als die Vorkalkulation. Die zugelassene Ungenauigkeit ist abhängig vom jeweiligen Verwendungszweck der Kalkulation.<sup>79</sup>

Folgende Verwendungszwecke können unterschieden werden:

- Unterstützung der Angebotskalkulation

---

<sup>78</sup>Vgl. Schuh (2012), S. 190ff.

<sup>79</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 445ff.

- Mitlaufende Kontrolle während der Entwicklung, ob das Kostenziel erreicht wird
- Variantenvergleich, auch von Konkurrenzprodukten
- Erkennung von Kostenpotentialen
- Kontrollieren, frühes Abschätzen von Zulieferkosten, Angeboten
- Ermittlung von Kostenstrukturen
- Zeitvorgabe für Arbeitsvorgänge bei der Arbeitsplanerstellung
- Überbetriebliche Kontrolle der Kalkulationsart und -genauigkeit

Die Genauigkeit der Kostenbestimmung hängt mit dem Bekanntheitsgrad des Produktes zusammen. Bei Wiederholteilen sind die Kosten exakt bekannt und bei Neuentwicklungen mit hohen Unsicherheiten behaftet. Dabei steigt die Genauigkeit der Prognose im Zuge der Produktentwicklung. Da aber auch Neuentwicklungen zum Teil aus bekannten Komponenten bestehen, ist die Unsicherheit beim gesamten Produkt geringer als jene neuer Komponenten (Abbildung 23). Bei der Durchführung der begleitenden Kalkulation ist eine durchgängige Aufschlüsselung von Beginn an entscheidend. Tabellenkalkulationen ermöglichen dabei eine Parallelkalkulation und eine einfache Kontrolle und Vergleichbarkeit der Kosten. Dabei haben sich Verfahren wie z.B. Kostenschätzung, Such- oder Ähnlichkeitskalkulation und Ermittlung der Kosten mit einer wesentlichen Einflussgröße, die den Haupteinfluss darstellt, (z.B. Materialkostenanteil) als zweckmäßig erwiesen.<sup>80</sup>

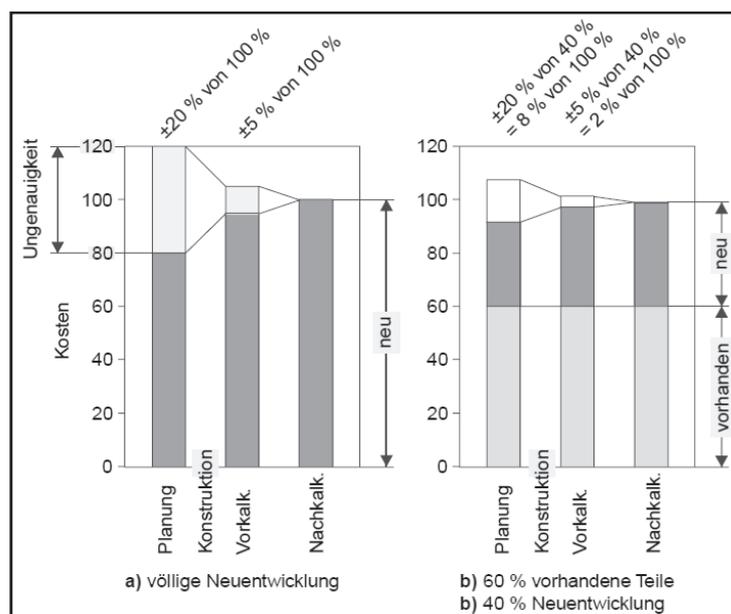


Abbildung 23: Genauigkeit der Kostenvoraussage<sup>81</sup>

<sup>80</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 445ff.

<sup>81</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 452

## 4 Praktische Betrachtungen zur Serienüberleitung des Windenergiekonverters

Nach der Behandlung der theoretischen Grundlagen wird in diesem Abschnitt nach den im Kapitel 1.4 beschriebenen Schritten vorgegangen. Den Beginn machen dabei die Beschreibung des Anlagenkonzepts und die Kostenanalyse der Bauteile des Windenergiekonverters, gefolgt von der Eingrenzung des Untersuchungsbereiches, der Ideengenerierung zur Kostenreduktion kostenintensiver Komponenten und deren Evaluierung. Den Abschluss bilden die Betrachtung weiterer mechanischer Komponenten sowie die Potentiale durch Insourcing der Fertigung.

### 4.1 Beschreibung des Anlagenkonzepts

Bei diesem Anlagenkonzept handelt es sich um eine Windturbine mit Diffusor (Mantel), welcher den Rotor umgibt. Durch die Integration eines Diffusors erreicht man höhere Windgeschwindigkeiten in der Rotorebene und kann somit höhere Leistungen erzielen. Zusätzlich übernimmt dieser durch die angeströmte Fläche die Funktion einer passiven Windrichtungsnachführung. Ein weiterer Vorteil der Ummantelung ergibt sich daraus, dass die Anlage unempfindlicher auf kleine Windrichtungsänderungen reagiert. Abbildung 24 zeigt die Anlage und die Hauptbaugruppen und Abmessungen.

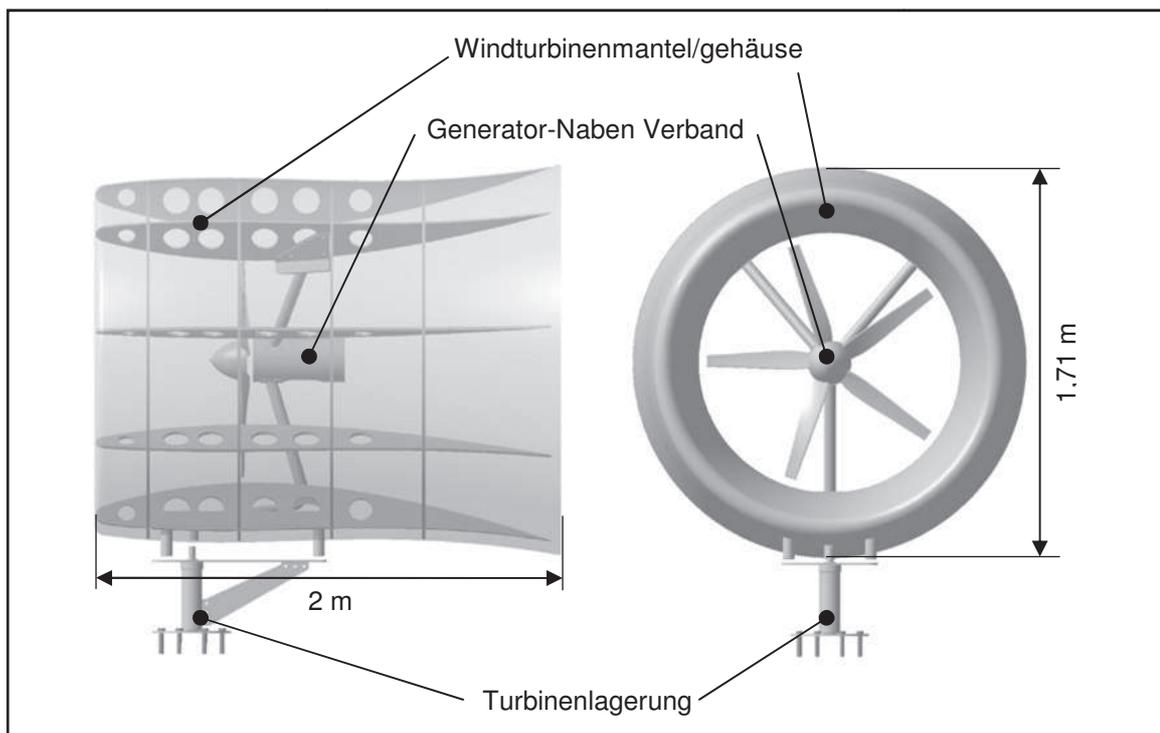


Abbildung 24: Turbine 01

Besondere Vorteile bietet diese Anlagenform bei der Gebäudeintegration in urbanen Gebieten. Hier verhindert der Windturbinenmantel störende Schattenwürfe durch die Rotorblätter und dämpft auch ungewünschte Geräusche und Vibrationen. Anwendung soll die Turbine 01 vorrangig auf bereits bestehenden Strukturen wie z.B. Gebäuden, Strom- bzw. Sendemasten, Silos udgl., sowie an Orten mit geeigneten mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten finden. Die Systemkonfiguration ist sowohl für eine Netzeinspeisung als auch für einen Inselbetrieb mit Energiespeicher vorgesehen.

Jede Windkraftanlage kann durch ihre Leistungskennlinie charakterisiert werden, welche alle aerodynamischen, mechanischen und elektrischen Eigenschaften zusammenfasst. Abbildung 25 zeigt diese Kennlinie der Turbine 01. Für die Berücksichtigung eines wirtschaftlichen Betriebs der Turbine 01, lässt sich anhand der in Kapitel 2.2.1 angeführten Faktoren, eine Ertragsabschätzung bzw. eine Jahresenergieernte über eine relative Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und die Leistungskennlinie der Turbine 01 bestimmen (Abbildung 25).

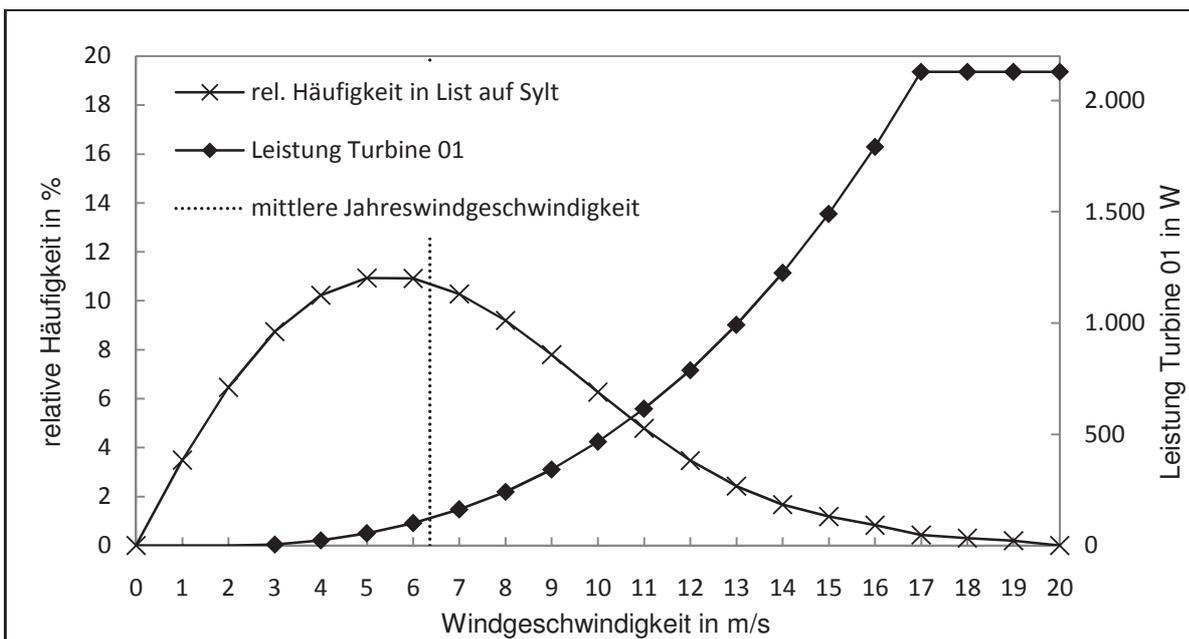


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in List auf Sylt gemessen in 10 Metern Höhe<sup>82</sup> und Leistungskennlinie der Turbine 01<sup>83</sup>

Dabei ist die starke Abhängigkeit vom Standort und die dort vorhandenen Windverhältnisse zu berücksichtigen. Der für die beispielhafte Energieberechnung herangezogene Standort eignet sich dabei besonders zur Windenergienutzung durch seine

<sup>82</sup>Hau (2013), S. 513

<sup>83</sup>wind2power (2013)

hohe mittlere Jahresgeschwindigkeit von über 6 m/s. Die nachstehende Abbildung 26 zeigt den Verlauf der möglichen Jahresenergieernte an diesem Standort.

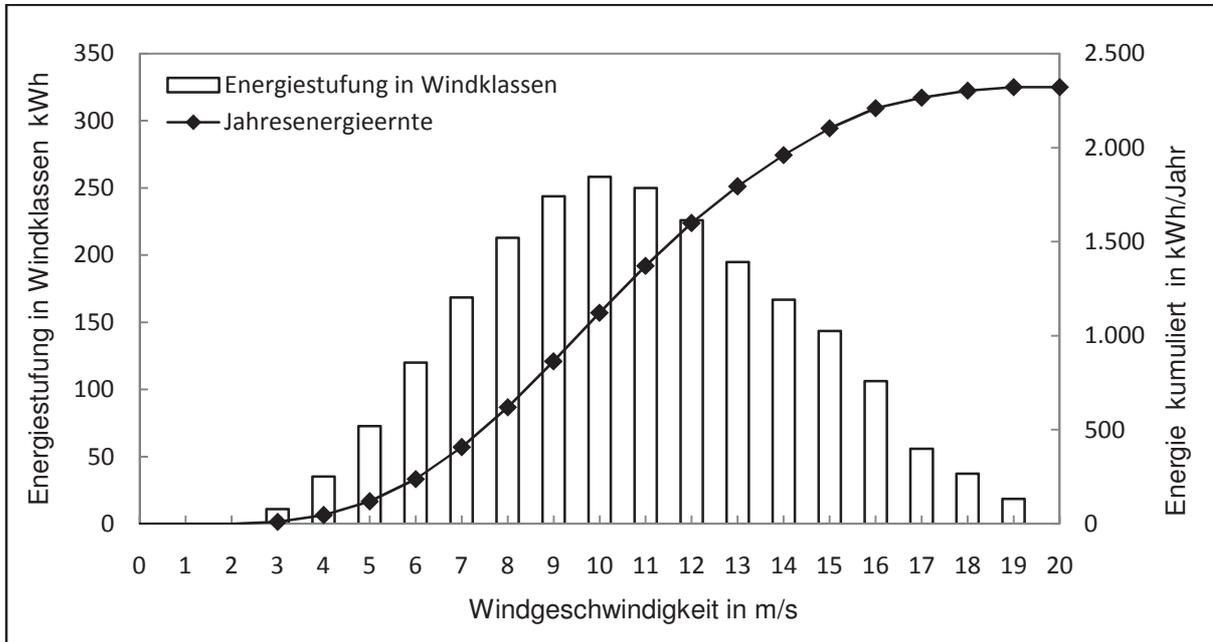


Abbildung 26: Energieernte bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und kumulierter Energieertrag der Turbine 01 bezogen auf den Standort List

Bezogen auf diese Windverhältnisse kann mit einer ungefähren Energieernte von ca. 2.300 kWh/Jahr gerechnet werden.

Für Standorte mit geringeren mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten zeigt Tabelle 2 die geschätzte Jahresenergieernte.

Tabelle 2: Jahresenergieernte bei unterschiedlichen mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten

mittlere Jahreswindgeschwindigkeit m/s	Jahresenergieernte kWh/Jahr
6,3	2.300
5,5	1.400
4,0	500

Abbildung 27 zeigt mögliche Einsatzgebiete und die dort vorherrschenden Windverhältnisse. Ideale Windgeschwindigkeiten für den wirtschaftlichen Betrieb des Windenergiekonverters sind vor allem in küstennahen Regionen zu erwarten.

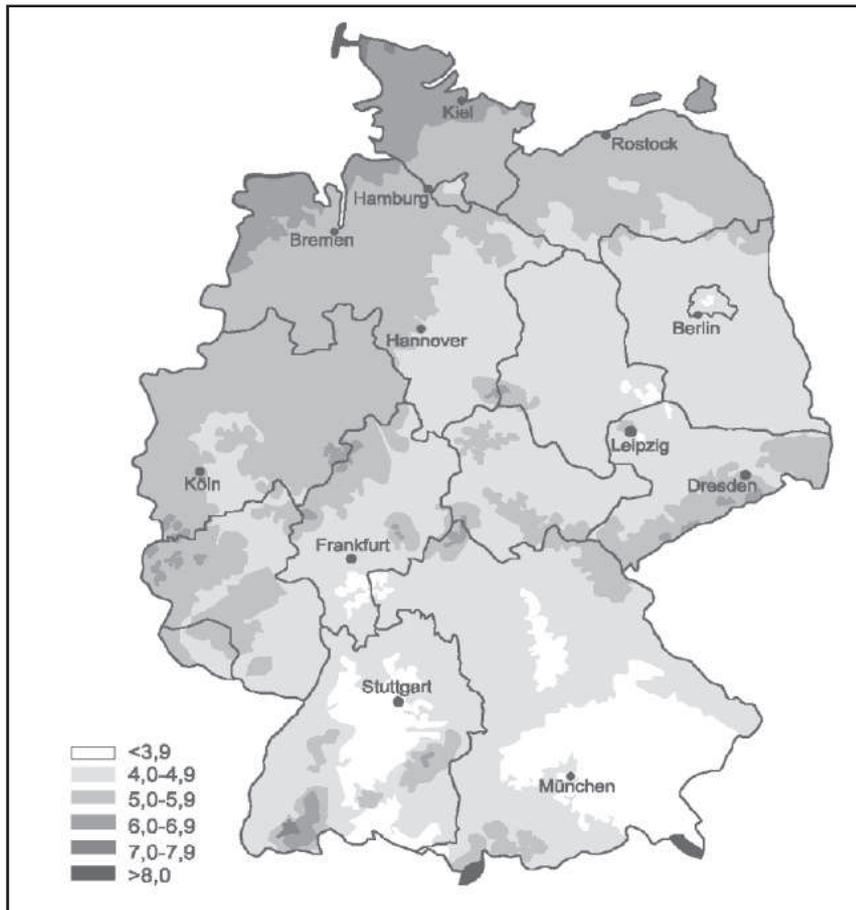


Abbildung 27: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in m/s 50 m über Grund<sup>84</sup>

## 4.2 Analyse der derzeitigen Bauteilkosten

In der Kostenanalyse wird der Windenergiekonverter in seine Baugruppen aufgeteilt und auf Kosten untersucht, um deren Verteilung übersichtlich darstellen und Kosteneinsparungspotentiale eindeutig identifizieren zu können. Die Basis der Kostenerhebung bildet die vollständige Stückliste der Konstruktion mit allen mechanischen Komponenten. Neben diesen mechanischen Bauteilen wird für den Betrieb noch eine Leistungseinheit benötigt. Diese elektronischen und regelungstechnischen Komponenten sind nicht Teil dieser Betrachtung. Als Konstruktionsstand dient der Windenergiekonverter Turbine 01, welcher für den Energieforschungspark Lichtenegg gefertigt wurde. Diese Anlage ist somit die erste, die außerhalb des Unternehmensstandortes im Juli 2013 in Betrieb genommen wurde. Dieser Standort dient auch anderen Herstellern von Kleinwindenergieanlagen zu Test- und Entwicklungszwecken und erlaubt einen Leistungsvergleich verschiedenster Ausführungsvarianten. In der Vergangenheit haben bereits viele neue Hersteller von Kleinwindkraftanlagen den Markteintritt versucht, doch die meisten kamen über den Entwicklungsstand des Pro-

---

<sup>84</sup>Reich/Reppich (2013), S168

totyps nicht hinaus. Als Gründe dafür kann man die Nichtberücksichtigung von Faktoren wie Wirtschaftlichkeit der Anlagen, zu kurze Anlagenlebensdauer und eine hohe Anzahl von Schadensfällen nennen.

#### **4.2.1 Kostenstrukturanalyse mechanischer Bauteile**

Die Analyse der Kostenstruktur des Windenergiekonverters Turbine 01 erfolgt auf Basis der variablen Herstellkosten. Da unternehmensintern genügend Fertigungsressourcen vorhanden sind, wurden sämtliche Maschinenbauteile selbst gefertigt. Für diese Komponenten werden die Kosten für die Serie über eine Kostenschätzung ermittelt, da die Kosten des Prototyps nicht den Produktionskosten einer Serienfertigung entsprechen. Um die Genauigkeit der Gesamtherstellkosten zu erhöhen, erfolgt eine Aufspaltung in Materialkosten und Fertigungskosten, da für die eingesetzten Materialien Kostensätze einfach zu bestimmen sind. Die Fertigungskosten setzen sich wiederum aus Fertigungslohnkosten und Maschinenkosten zusammen.

Eine weitere Schätzfehlerreduzierung erreicht man durch die Aufteilung der Gesamtanlage in seine Einzelteile mit anschließender Kostenschätzung. Dadurch können sich Schätzfehler bei Einzelteilen gegenseitig kompensieren.<sup>85</sup>

Die Berechnung sieht folgende Schritte vor: Für die Einzelteile jeder Baugruppe bzw. Unterbaugruppe wurden die benötigten Fertigungsverfahren aufgrund der konstruktiven Ausführung bestimmt. Danach erfolgt der wichtigste Punkt, aber auch jener mit dem größten Unsicherheitsfaktor: der Schätzvorgang. In diesem Schritt werden den einzelnen Fertigungsvorgängen geschätzte Maschinenbearbeitungszeiten zugeteilt. Auf diesen Schätzwerten baut der gesamte Kalkulationsvorgang auf und daher ist auch die Qualität des Ergebnisses von ihnen abhängig. Aus den Zeitschätzwerten werden über die verschiedenen Maschinenstundensätze (aus der Maschinendatenbank) der Fertigungsverfahren die Maschinenkosten pro Bauteil errechnet. Als Ausgangspunkt zur Ermittlung der Fertigungslohnkosten dienen die Maschinenbearbeitungszeiten. Unter Berücksichtigung der benötigten Rüstzeiten über einen ebenfalls geschätzten Rüstzeitfaktor, ergeben sich die Fertigungszeiten, wieder bezogen auf ein Bauteil. Zusammen mit den Lohnkostensätzen je Zeiteinheit erhält man die Fertigungslohnkosten. In den Lohnkostensätzen werden die unterschiedlichen Lohnniveaus der Standorte in Österreich und Ungarn berücksichtigt. Das Gewicht und die Materialkosten pro Gewichtseinheit ergeben zusammen die Materialkosten für ein Bauteil. Aus der Summe der Maschinenkosten, Materialkosten und Fertigungslohnkosten ergeben sich schlussendlich die Herstellkosten pro Bauteil. Aufsummiert auf

---

<sup>85</sup>Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 456

die Baugruppen bzw. Unterbaugruppen ergeben sie die Baugruppenherstellkosten die für die Kostenanalyse benötigt werden. Tabelle 3 zeigt den Kostenbestimmungsvorgang in einer übersichtlicheren Darstellung.

Tabelle 3: Vorgehen bei Kostenschätzung

Materialkosten	Materialkosten	Gewicht x spezifische Materialkosten
Fertigungskosten	Fertigungslohnkosten	Lohnkostensatz x Zeitschätzwert x Rüstzeitfaktor
	Maschinenkosten	Maschinenstundensatz x Zeitschätzwert
<b>geschätzte direkt zurechenbare Herstellkosten (Einzelkosten)</b>		

Für alle Zukaufteile werden Angebote bzw. Rechnungen herangezogen sowie die Großhandelspreise für verwendete Normteile. Gesondert müssen die Werkzeugkosten berücksichtigt werden. Da Formkosten die Einzelteilkosten in der Regel um einige Größenordnungen übersteigen, müssen diese auf die Einzelteilkosten aufgeteilt werden. Als Verteilungsschlüssel kann z.B. die geschätzte Standzeit der unterschiedlichen Formenmaterialien verwendet werden. Dabei können die Standzeiten zwischen wenigen hundert Stücken für Glasfaserwerkzeuge zum Handlaminieren und einigen zehntausend Stücken der Aluminiumwerkzeuge für den Kunststoffspritzguss liegen. Man kann aber die Werkzeugkosten auch auf eine vorgegebene Stückzahl umlegen, welche die gesamten Werkzeugkosten unabhängig von deren Standzeit tragen müssen. In dieser Betrachtung werden sämtliche Kosten, die mit der Fertigungseinführung anfallen, auf die Standzeit verteilt, da Glasfaserwerkzeuge eine deutlich geringere Standzeit aufweisen als Werkzeuge für den Spritzguss. Im Anschluss werden sie zu den variablen Herstellkosten der verursachenden Komponente addiert. Die so ermittelten Kosten sollen in einer Kostenstrukturanalyse aufbereitet werden und die Entscheidungsgrundlage für das weitere Vorgehen bilden. Kostendominierende Baugruppen sollen dadurch identifiziert und auf Kosteneinsparungspotentiale untersucht werden. Die nachstehenden Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen die Gesamtkosten aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

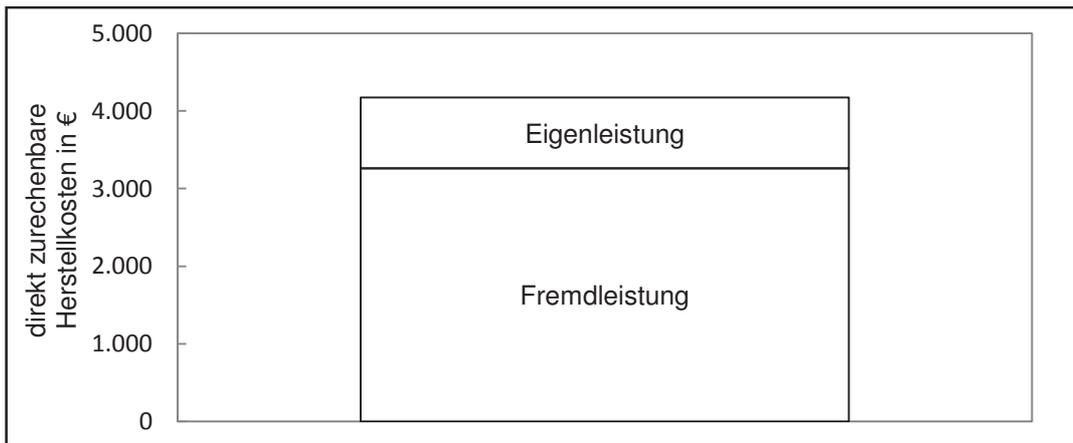


Abbildung 28: Gegenüberstellung Eigenleistung und Fremdleistung

Die Gegenüberstellung der Eigenleistung und der Fremdleistung (Abbildung 28) zeigt einen 22 % Anteil der Eigenleistung und einen 78 % Anteil der Fremdleistung. Die Fremdleistungen beinhalten alle Bezugskosten der Zukaufteile inklusive aller Normteile. Die Eigenleistung setzt sich aus allen geschätzten variablen Herstellkosten zusammen, die in der SFL-Unternehmensgruppe verursacht werden. Die nächste Betrachtung unterteilt die Gesamtherstellkosten in die einzelnen Baugruppen und Unterbaugruppen um die Kostenstruktur genauer analysieren zu können (vgl. Kapitel 2.3).

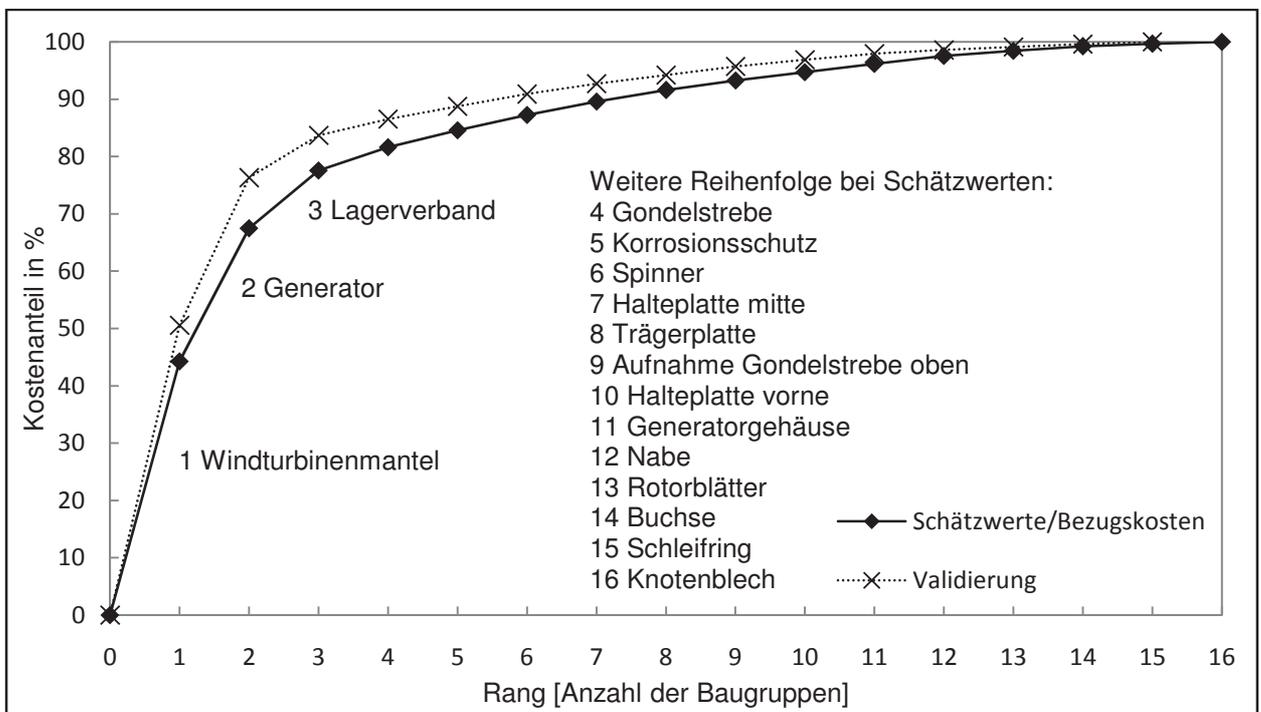


Abbildung 29: ABC-Analyse der Kostenanteile

Eine Variante der Kostenstrukturierung bietet die ABC-Analyse (vgl. Kapitel 2.3). Dabei erfolgt eine Reihung nach Kostenhöhe (Abbildung 29). Man sieht, dass die drei kostenintensivsten Unterbaugruppen, nämlich der Windturbinenmantel, der Generator und der Lagerverband beinahe 80 % der Gesamtkosten verursachen. Danach flacht die Kurve ab und der relative Kostenanteil der weiteren Komponenten sinkt. Zur Absicherung dieser Schätzwerte ist eine Validierung von einem erfahrenen Mitarbeiter der Unternehmung qpunkt GmbH durchgeführt worden. Für die weitere Vorgehensweise sind die Schätzwerte den validierten Werten als punktierte Linie in der ABC-Analyse gegenübergestellt. Die Abweichung ergibt sich hauptsächlich durch den unterschiedlich eingeschätzten Fertigungsarbeitsaufwand, ändert jedoch nichts an der Kostenreihenfolge auf den Rängen eins bis drei, auf welchen die weiteren Betrachtungen aufbauen. Diese ersten drei Ränge sind dabei mit der höchsten Prioritätsstufe A in der ABC-Analyse zu bewerten.

### **4.2.2 Zielkostendefinition der Gesamtanlage**

Nach der Objektanalyse erfolgt die Zielfestlegung bzw. die Definition des Sollzustandes, der erreicht werden soll. Hier sollen Ziele zuerst grob definiert und dann Einzelziele abgeleitet werden. Wichtig dabei ist, dass die Ziele erreichbar und messbar sind, um Arbeitsmotivation sowie die Überprüfbarkeit der Zielerreichung zu gewährleisten.

Ziele definieren, was mit der Lösung erreicht werden soll und nicht, wie diese zu erreichen sind. Sie sind wichtig zur Lösungssuche und richten sämtliche Tätigkeiten auf die Zielerreichung aus. Diese Zielformulierung ist auf jeden Fall vor der Lösungssuche durchzuführen und sollte nicht nachträglich dazu verwendet werden, um Lösungsvorschläge zu rechtfertigen.<sup>86</sup>

Eine Recherche nach ähnlichen Konkurrenzprodukten und deren Anschaffungskosten kann ein guter Anhaltspunkt für die Zielkostenfestlegung sein und ermöglicht zugleich eine direkte Gegenüberstellung des eigenen Produktes mit dem der Konkurrenz. Für den Vergleich von Konkurrenzprodukten am Markt werden Anlagen gesucht, die einen ummantelten Rotor besitzen, da hier der Herstellungsaufwand durch den Mantel erheblich höher ist, als für Anlagen ohne Mantel. Das zweite Kriterium ist die Nennleistung. Gleiche Größenordnungen der Nennleistung sollen einen direkten Vergleich mit Konkurrenzprodukten ermöglichen. Verglichen werden sollen in erster Linie die Anschaffungskosten für Kunden, aber auch die technische Ausführung der

---

<sup>86</sup>Vgl. Kuster et al. (2011), S. 404

Anlage (Konstruktion, Materialien, Qualität, usw.) sowie diverse Zusatzleistungen. Im Zuge der Recherchen wurden zwei vergleichbare Anlagen identifiziert.

### **Windturbine donQi**

Diese Windkraftanlage wurde vom niederländischen „National Aerospace Laboratory“ in Zusammenarbeit mit der Fakultät „Aerospace Engineering“ der Technischen Universität Delft entwickelt. Ziel war es, eine Anlage zu entwerfen, die in urbanen Gebieten eingesetzt werden kann. Die Größe und der Mantel erlauben nach Angaben des Produzenten einen leisen und vibrationsarmen Betrieb der Anlage. Geworben wird auch mit der nutzbaren Werbefläche für Unternehmen. Der Aufdruck aber auch die Farbe kann den Kundenwünschen angepasst werden. Der Internetauftritt des Herstellers zeigt auch alle bereits installierten Anlagen. Der Markt begrenzt sich bis auf einzelne Ausnahmen auf Portugal, Spanien und Deutschland sowie auf die Niederlande, das Herkunftsland des Produzenten. Die Gesamtanzahl wird aufgrund der veröffentlichten Grafik auf 200-300 Stück geschätzt. Geliefert werden kann die Anlage innerhalb von sechs Wochen, mit gewünschten Aufklebern und eigener Farbe inklusive. Die Organisation der Installation erfolgt dabei vollständig durch den Produzenten.<sup>87</sup> Die Anschaffungskosten liegen bei € 7.585<sup>88</sup> (exklusive Versandkosten). Angaben zu den Kosten der Installation werden nicht gemacht.

### **Windturbine ENFLO 0110**

Diese Anlage des Schweizer Unternehmens „Windtec“ wurde ebenfalls mit der Absicht entwickelt, Windkraft auch in Siedlungsgebieten nutzbar zu machen. Daher wird auch die Manteltechnologie eingesetzt, um die Lärmentwicklung zu minimieren und gleichzeitig die Leistung zu erhöhen. Der Produzent bietet neben der eigentlichen Anlage, die auch in allen Farben erhältlich ist, auch noch unterschiedliche Mastsysteme an. Es gibt sie als Wand- bzw. Dachmontage, aber auch als kippbare Freimastsysteme, welche nach dem Baukastenprinzip ausgeführt sind. Dadurch können unterschiedliche Nabenhöhen verwirklicht werden. Zusätzlich bietet man noch ein Monitoring-System an, das bis zu drei Anlagen gleichzeitig überwachen kann. Dazu gehört eine Windgeschwindigkeitsaufzeichnung, sowie die Erfassung der aktuellen Leistung und Erträge durch die Netzeinspeisung. Diese Daten können grafisch über PC oder über Internet abgerufen werden. In diesem System integriert ist auch eine automatische Störungsmeldung, die Anlagenstörungen per Internet oder SMS sofort meldet.<sup>89</sup> Auf Verkaufszahlen wird nicht näher eingegangen, auf der Internetseite des

---

<sup>87</sup>Vgl. donQi Independent Energy (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

<sup>88</sup>Vgl. Spazio Bcc. (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

<sup>89</sup>Vgl. Windtec Systems (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

Produzenten findet man lediglich einige installierte Anlagen in Österreich und Deutschland. Die Anschaffungskosten belaufen sich auf ca. € 7.400<sup>90</sup> und 7.800<sup>91</sup>, je nach Anbieter, exklusive Mastkosten.

Die folgende Tabelle 4 gibt die Eigenschaften der drei unterschiedlichen Anlagen wider.

Tabelle 4: Gegenüberstellung zu Konkurrenzprodukten

<b>Eigenschaften</b>	<b>Turbine 01</b>	<b>donQi</b>	<b>Enflo 0110</b>
Nennleistung [kW]	1	1,75	1
Auslegungsgeschwindigkeit [m/s]	13	14	12,5
Einschaltgeschwindigkeit [m/s]	3	2,9	3
Abschaltgeschwindigkeit [m/s]	keine	20	keine
Rotordurchmesser [m]	1,03	1,5	1,1
Rotorfläche [m <sup>2</sup> ]	0,9	1,77	0,95
Rotorblattzahl [-]	5	3	5
Nennzahl [min <sup>-1</sup> ]	1300	1150	Max. 1150
Rotorblattmaterial [-]	PA/GFK	Nylon/GFK	PA/GFK
Diffusordurchmesser [m]	1,71	2	1,53
Diffusorlänge [m]	2	1	0,69
Diffusormaterial [-]	GFK/Stahl	ABS/ Stahl	GFK/Aluminium
Generatortyp [-]	Synchrongenerator permanenterregt	-	Synchrongenerator permanenterregt
Nennspannung [V]	230	400	400
Lautstärke [db]	-	50 db bei 9 m/s	-
Regelung [-]	Kennliniengesteuerte Leistungsregelung	-	Kennliniengesteuerte Leistungsregelung
Sturmregelung [-]	-	-	Elektrische Blattwinkel- verstellung
Gewicht (ohne Mast) [kg]	ca. 300	110	75
Installierte Anlagen [-]	2	ca. 300	-
Anschaffungskosten [€]	-	7.600	7.400-7.800

Bei dieser direkten Gegenüberstellung werden technische Unterschiede, aber auch Gemeinsamkeiten deutlich. Dabei weichen vor allem die Diffusorlänge und das Anlagengewicht deutlich voneinander ab. Für die Zielkostendefinierung sind die recherchierten Anschaffungskosten von Bedeutung. Diese liegen je nach Anbieter zwischen 7.400 und 7.800 €.

Unter Berücksichtigung einer Jahresenergieerne von 2.300 kWh/Jahr bei einer mittleren Jahreswindgeschwindigkeit von 6,3 m/s (siehe Kapitel 4.1) und den derzeitigen

<sup>90</sup>Vgl. tittel-group (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

<sup>91</sup>Vgl. 7shop24 (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

Energiekosten von 0,201 €/kWh im EU Schnitt (siehe Kapitel 2.2) sowie den vergleichbaren durchschnittlichen Amortisationszeiten von Photovoltaikanlagen zwischen 11 und 15 Jahren<sup>92</sup>, ergeben sich die anzustrebenden Herstellkosten.

Ausgehend von den Erträgen bzw. den Anschaffungskosten eines Konkurrenzproduktes ergeben sich durch Abzug der Steuer (20 %), einem Gewinnaufschlag von 20 %, sowie durch die Berücksichtigung des Gemeinkostenanteils (derzeit ca. 50 % im Maschinenbau<sup>93</sup>) die Herstellkosten (Einzelkosten).

Tabelle 5: Bestimmung der direkt zurechenbaren Kosten (Einzelkosten)

Amortisationszeit statisch	11 Jahre	15 Jahre	Konkurrenzprodukt
Energieertrag/Jahr	462,30 €/Jahr	462,30 €/Jahr	
Anschaffungskosten bzw. Energieerträge	5.085,30 €	6.934,50 €	7.400,00 €
-20 % MwSt.	847,55 €	1.155,75 €	1.233,33 €
= Listenverkaufspreis Netto	4.237,75 €	5.778,75 €	6.166,67 €
-20 % Gewinn	706,29 €	963,13 €	1.027,78 €
= Selbstkosten	3.531,46 €	4815,63 €	5.138,89 €
-50 % Gemeinkostenanteil	1.765,73 €	2407,81 €	2.569,44 €
<b>=direkt zurechenbare Herstellkosten</b>	<b>1.765,73 €</b>	<b>2.407,81 €</b>	<b>2.569,44 €</b>

**Zieldefinition: Reduktion der direkt zurechenbaren Herstellkosten**

**Zielkosten zwischen 1.800 – 2.500 €**

Dieses Gesamtkostenziel lässt sich zur einfacheren Bearbeitung in weitere Einzelziele unterteilen. Die Reduktion der Herstellkosten erfolgt durch Verringerung der Kosten der einzelnen Baugruppen, die zusammen das gesamte Produkt darstellen. Daher ist es sinnvoll, gegebenenfalls einzelne Teilzielkosten zu definieren. Diese Festlegung erfolgt hier im Zuge der Auswahl der Komponenten mit hohem Kosteneinsparungspotential.

**4.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereiches**

Um die Zielkosten zu erreichen, werden ausgehend von der aktuellen Kostenstruktur, beginnend mit der höchsten Priorität A der ABC-Analyse (Abbildung 29) Kostensenkungspotentiale gesucht. Dieser Reihenfolge nach ist auch das größte Kosteneinspa-

<sup>92</sup>Vgl. Agenios GmbH (2013), Zugriffsdatum 20.2.2013

<sup>93</sup>Vgl. Ehrlenspiel/Kiewert/Lindemann (2007), S. 416

rungspotential zu erwarten. Dementsprechend ist den Rängen eins bis drei die meiste Aufmerksamkeit zu widmen. Oft gelingt es dort schon mit geringem Arbeitsaufwand gute Erfolge zu verzeichnen. Dabei wird die gewählte Baugruppe auf Einsparungspotentiale in der konstruktiven Ausführung und im Herstellungsprozess untersucht. Alternativen sind zu suchen und miteinander hinsichtlich der Kosten aber auch anderer qualitativer Gesichtspunkte zu vergleichen.

Wie aus den vorangegangenen Analysen hervorgeht, besitzt die derzeitige Windturbinenmantelkonstruktion das größte Einsparungspotential, um die gesamten Herstellkosten deutlich zu reduzieren. Es soll nun dieses Potential genauer untersucht werden. Zu diesem Zweck wird zu Beginn der aktuelle Windturbinenmantel einer Analyse unterzogen. Darin sollen die Kostenfaktoren und Einflussmöglichkeiten identifiziert werden. Es sind das Fertigungsverfahren, die verwendeten Werkstoffe und deren Eigenschaften sowie Vor- bzw. Nachteile festzuhalten. Nach dieser Ausgangsanalyse des Ist-Zustandes ist der benötigte Sollzustand zu definieren. Im Lastenheft werden danach alle Funktionen festgehalten, die das Bauteil zu erfüllen hat. Nach der vollständigen Ausarbeitung des Lastenheftes erfolgt die Lösungssuche. Es gilt Ideen zu generieren, wie die Herstellkosten verringert werden können. Zugleich ist auch die Möglichkeit der Wertschöpfung im Unternehmen zu berücksichtigen. Im anschließenden Schritt müssen die einzelnen Lösungsvorschläge bewertet werden, um schlussendlich, auf Basis dieser Bewertung, eine Entscheidung für eine Fertigungsvariante treffen zu können.

### **4.3.1 Situationsanalyse des Windturbinenmantels**

Der Windturbinenmantel (Abbildung 30) besteht aus einem Glasfaserverbundkunststoff (GFK), welcher durch Handeinlegen der einzelnen Lagen Glasfasern in Verbindung mit einer Kunststoffmatrix in einer Negativform entsteht. Als innere Stützstruktur dienen sogenannte Spanten, welche den Profilquerschnitt in Längsrichtung abbilden und Spantenringe, die den Querschnitt normal zur Längsachse in Umfangsrichtung stabilisieren (siehe Abbildung 24 und Abbildung 33). Diese Strukturteile werden aus Kunststoff (Nidaplast) gefertigt und in die Glasfaserlagen und die Matrix integriert. Es befinden sich insgesamt neun Spanten und vier Spantenringe im Windturbinenmantel. In diese Struktur werden weitere Baugruppen als Inlays aus Metall, als Anbindungspunkte für weitere Bauteile während des Herstellungsvorganges verschraubt und mit laminiert. Diese Bauteile ermöglichen die einfache und wieder lösbare Montage von Anbindungskomponenten mithilfe von Schraubenverbindungen. Die Wandstärke des Lagenaufbaues beträgt 6 mm. Bei der Aufnahme des Ist-Zustandes wird in erster Linie nur die Ausführung des Windturbinenmantels betrachtet. Es ist aber zu berücksichtigen, dass etwaige Änderungen des Fertigungsver-

fahrens bzw. des Werkstoffes, Änderungen an den integrierten Baugruppen nach sich ziehen können und werden.

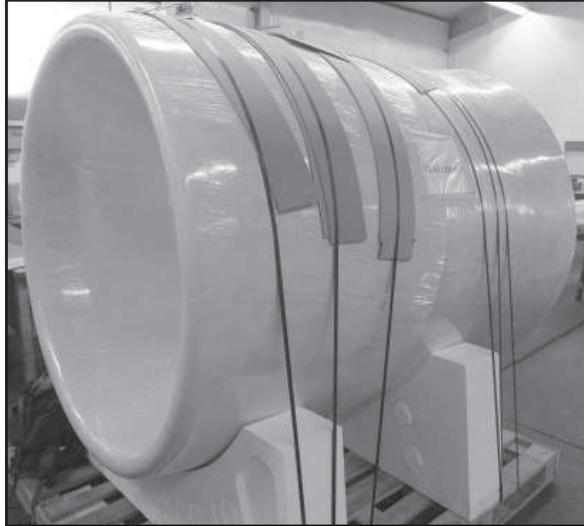


Abbildung 30: Windturbinenmantel aus Glasfaserverbundkunststoff

### Allgemeine Daten des Windturbinenmantels:

- Länge	2 m
- Diffusordurchmesser	1,71 m
- Gesamtoberfläche	19 m <sup>2</sup>
- Volumen	1,33 m <sup>3</sup>
- Werkstoff	Glasfaserverbundkunststoff
- Wandstärke	6 mm
- Stückkosten	1.800 €/Stk. <sup>94</sup>
- Werkzeugkosten	8.200 € <sup>95</sup>

Mithilfe der Untersuchung des Lagenaufbaues des Faserverbundmaterials soll der benötigte Materialeinsatz ersichtlich werden. Ziel ist es, die benötigten Faser- bzw. Matrixkosten für die Mantelfertigung gesondert zu erhalten. Als Eingangsgrößen dienen die Manteloberfläche, die vorgegebene Wandstärke von 6 mm und der Lagenaufbau. Mithilfe dieser Ausgangsdaten kann man näherungsweise den Materialverbrauch für ein Handlaminat errechnen. Weitere Informationen über Dichte sowie Kosten der einzelnen Materialien wurden der Homepage von R&G Faserverbundwerkstoffe GmbH entnommen.

---

<sup>94</sup>Angebot Fabrica FibrexCo S.R.L

<sup>95</sup>Angebot Fabrica FibrexCo S.R.L

**Laminateneigenschaften:**

- Laminatstärke 6 mm außen, 3 mm Innenstruktur
- Lagenanzahl 6
- Verwendete Fasern Wirrfaser: 150 g/m<sup>2</sup>, 450 g/m<sup>2</sup>, Gewebe: 500g/m<sup>2</sup>
- Lagenaufbau 1-6 Lagen 150g/m<sup>2</sup>;450g/m<sup>2</sup>;500g/m<sup>2</sup>;450g/m<sup>2</sup>;500g/m<sup>2</sup>;450g/m<sup>2</sup>
- Faserkosten 3 €/m<sup>2</sup> <sup>96</sup>
- Matrixwerkstoff Polyesterharz
- Matrixkosten 4,9 €/kg<sup>97</sup>

**Laminateneigenschaften berechnet:**

- Faservolumenanteil 18 % (bestimmt aus Laminatstärke und Fasern)
- Faserfläche gesamt 143 m<sup>2</sup>
- Fasergewicht gesamt 67 kg
- Matrixgewicht 129 kg
- Gesamtgewicht 202 kg (inkl. Innenstruktur, ohne Metallinlays)
- Materialkosten ca. 1.000 €

Die Ergebnisse der Berechnung der Laminateneigenschaften zeigen, dass eine Gesamttrockenfaserfläche von 143 m<sup>2</sup> mit einem Gewicht von 67 kg benötigt wird. Der dazu verarbeitete Matrixwerkstoff hat ein Eigengewicht von 129 kg. Zusammen mit der Innenstruktur ergibt das ein Gesamtgewicht von etwa 202 kg für den Windturbinenmantel. Mit den dazugehörigen Materialkosten pro kg bzw. pro m<sup>2</sup> lassen sich die ungefähren Materialkosten für einen Mantel berechnen. Diese liegen bei etwa 1.000 € pro Mantel.

Die Ergebnisse der Analyse des Mantelfertigungsverfahrens verdeutlichen, dass eine Herstellung mittels glasfaserverstärkten Kunststoffes durch ein Handeinlegeverfahren, sowohl sehr Material- als auch Fertigungskostenintensiv ist.

---

<sup>96</sup>R&G Faserverbundwerkstoffe (2013), Zugriffsdatum 10.8.2013

<sup>97</sup>R&G Faserverbundwerkstoffe (2013), Zugriffsdatum 10.8.2013

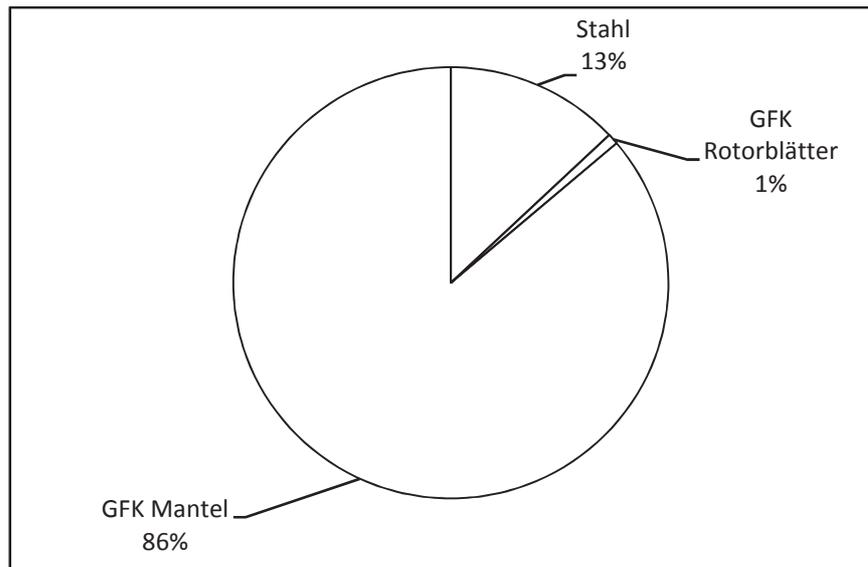


Abbildung 31: Zusammensetzung Materialkosten der Turbine 01

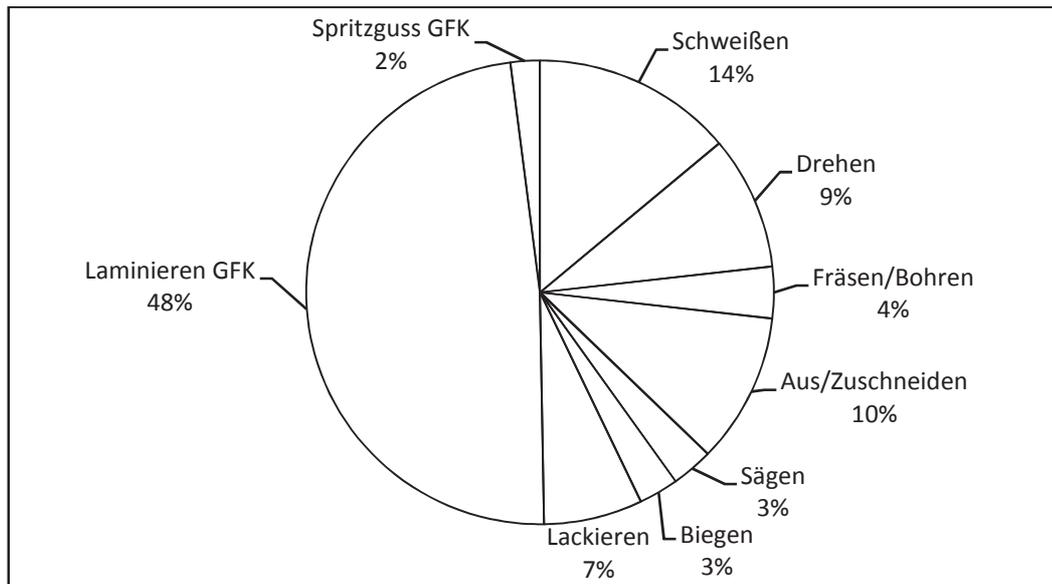


Abbildung 32: Zusammensetzung Fertigungskosten der Turbine 01

Zusätzlich zu den hohen Kostenanteilen kommt das hohe Eigengewicht von über 200 kg allein für den Mantel. Zusammen mit allen anderen Baugruppen summiert sich das Gesamtgewicht des Windenergiekonverters auf ca. 300 kg. Diese Gewichtskraft muss zusammen mit den entstehenden Windkräften der Oberfläche von der Lagerbaugruppe getragen und diese dementsprechend dimensioniert werden. Reduziert man das Gewicht, können dadurch auch weitere Baugruppen kleiner und leichter gestaltet werden und man verringert den Materialeinsatz. Einen Überblick

über die Kräfte auf die Turbinenlagerung zeigt die folgende Abbildung 33. Die Windkraft dreht den Windturbinenmantel in die vorherrschende Windrichtung und greift axial in Strömungsrichtung an. Die Gewichtskraft aus der Summe aller im Mantel integrierten Baugruppen greift an dessen Gesamtschwerpunkt in senkrechter Richtung an.

Diese wirkenden Kräfte sind von der drehbaren Lagerung aufzunehmen und weiterzuleiten. Vereinfacht wird hier die Lagerbaugruppe durch eine Einspannung mit einem Freiheitsgrad um die Rotationsachse modelliert. Da sich der Gesamtschwerpunkt in der Ebene der Mittelachse befindet, reicht eine zweidimensionale Betrachtung für die Berechnung der Lagerkräfte aus. Die statischen Reaktionskräfte und das statische Moment ergeben sich aus den Kräfte- bzw. Momenten Gleichgewichten. Wie zu erkennen, entspricht,  $F_z$  der Gewichtskraft  $F_{Gewicht}$  sowie  $F_x$  der Windkraft  $F_{Wind}$ . Das Moment setzt sich aus beiden Kräften  $F_{Wind}$  und  $F_{Gewicht}$  samt den dazugehörigen Hebelarmen zwischen dem Kraftangriffspunkten und der Drehachse zusammen. Dabei ergibt sich das Gesamtmoment wie folgt:

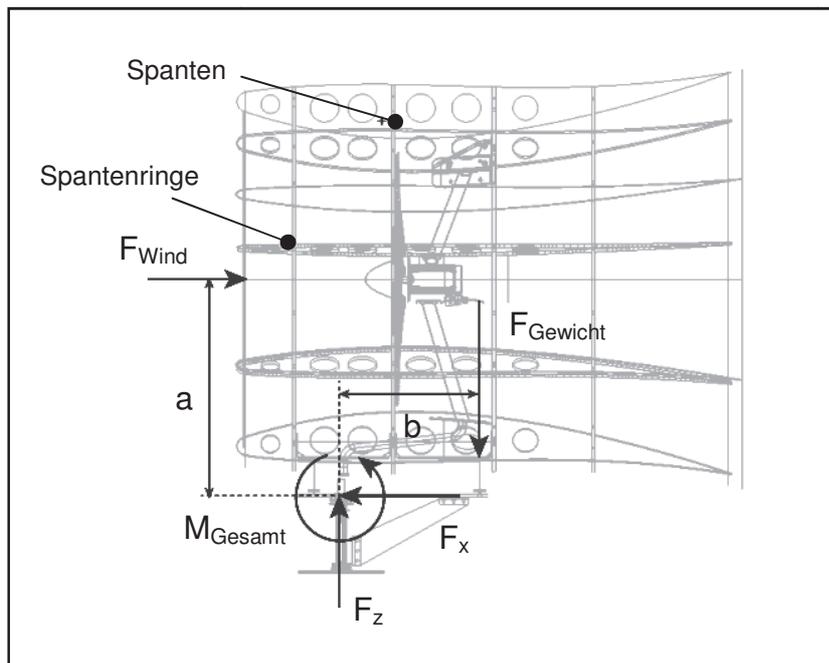


Abbildung 33: Kräfte am Windenergiekonverter

$$F_z = F_{\text{Gewicht}} = 300 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 3943 \text{ N} \quad (9)$$

$$F_x = F_{\text{Wind}} = 1000 \text{ N}^{98} \quad (10)$$

$$M_{\text{Wind}} = F_{\text{Wind}} \cdot a = 1000 \text{ N} \cdot 0,9 \text{ m} = 900 \text{ Nm} \quad (11)$$

$$M_{\text{Gewicht}} = F_{\text{Gewicht}} \cdot b = 3041 \text{ N} \cdot 0,53 \text{ m} = 1560 \text{ Nm} \quad (12)$$

$$M_{\text{Gesamt}} = M_{\text{Gewicht}} + M_{\text{Wind}} = 1560 \text{ Nm} + 900 \text{ Nm} = 2460 \text{ Nm} \quad (13)$$

Es ist deutlich zu erkennen, dass der überwiegende Teil der Belastung auf die Lagerung, ca. 63 % der Momentbelastung  $M_{\text{Gesamt}}$  auf das Eigengewicht und nicht auf die Windkräfte zurückzuführen ist. Nach dieser Situationsanalyse sollen nun in der Bestimmung des Sollzustandes die Zielwerte für eine neue Windturbinenmantelausführung definiert werden.

#### 4.3.2 Zielkosten und Gewichtsdefinition

Nach der bereits getroffenen Grobzieldefinition für die Gesamtherstellkosten erfolgt hier die Detailzielfestlegung für die Baugruppe des Windturbinenmantels. Als Ziel und somit als Soll-Zustand des Windturbinenmantels für die Serienfertigung sind Zielkosten von 500 € pro Mantel für die Herstellung angepeilt. Mit den weiteren Kostenreduktionen des Generators durch die Nutzung von Größeneffekten, der Vereinfachung der restlichen mechanischen Bauteile unter Anwendung geeigneter Fertigungsverfahren sowie einer auf die Turbine 01 angepassten Leistungselektronik, soll eine Erreichung der Gesamtzielkosten ermöglicht werden (Abbildung 34).

---

<sup>98</sup>qpunkt GmbH, Strömungssimulation

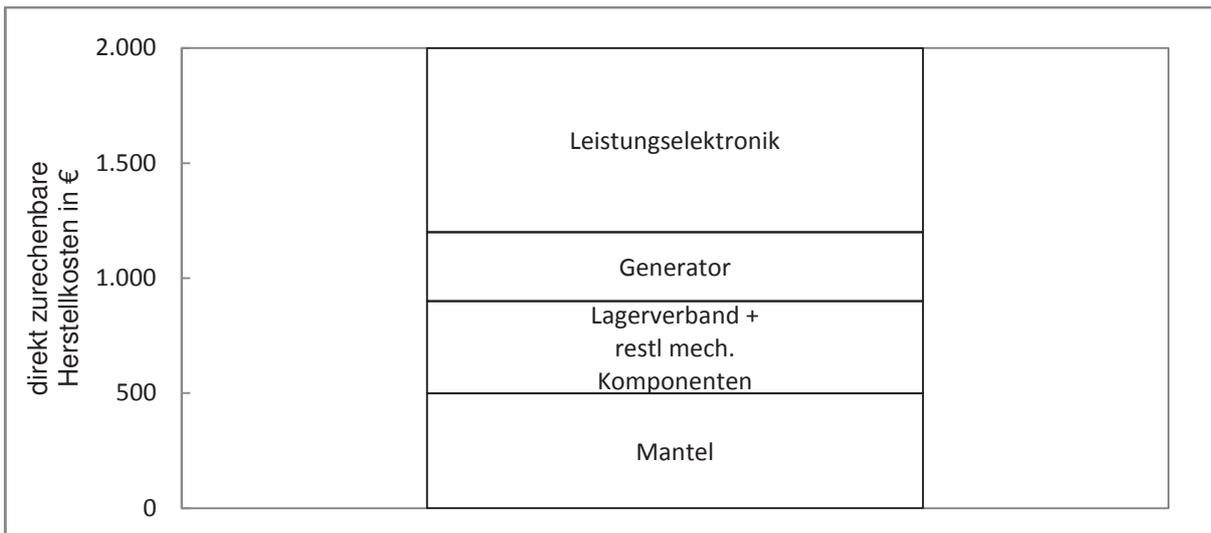


Abbildung 34: Zielkostenstruktur

Zusätzlich zu dem Kostenziel wird an dieser Stelle auch noch ein Gewichtsziel bestimmt, da das Gewicht erheblichen Einfluss auf andere Komponenten ausübt und sich auch kostendefinierend auf Montage und Transport auswirkt. Als Anhaltspunkte zur Gewichtsbestimmung dienen die Konkurrenzprodukte. Dazu wird das Anlagen-gewicht ins Verhältnis zur Diffusorlänge gesetzt. Dieses Verhältnis liegt bei den Anlagen zwischen 108 und 110 kg/m Länge. Damit soll das Gewicht Turbine 01 mit 2 m Länge bei etwa 220 kg liegen. Unter Abzug der Komponenten des Generator-Naben-Verbandes sowie der Lagerungsbaugruppe ergibt sich ein gewünschtes Diffusorge-wicht von ca. 100 kg.

**Kostenreduktion** von **1800 €** auf **500 €**  
**Gewichtsreduktion** von **200 kg** auf **100 kg**

Es werden weitere qualitative Anforderungen für den Windturbinenmantel im Lasten-heft definiert, die vor allem den Kunden treffen und dessen Zufriedenheit über die gesamte Lebensdauer gewährleisten soll.

- witterungsbeständig für bis zu 20 Jahre (kein Defekt durch Umwelteinflüsse)
- Formstabilität (zwischen -30 °C und 70 °C)
- mechanische Stabilität (Hagelschlag, möglicher Rotorblattdefekt)
- leichte Montage (Gewicht, Montageaufwand bzw. Technologie)
- einfache Transportmöglichkeit (geringes Transportvolumen)
- Reparaturmöglichkeit im Schadensfall bzw. Austauschbarkeit von Kompo-nen-ten
- qualitativ hochwertige Optik, geräuscharm

#### 4.4 Möglichkeiten zur Kostenreduktion

Wie im vorangegangenen Kapitel 3 dargestellt, lassen sich die Herstellkosten grob in Materialkosten, Teilefertigungskosten und Montagekosten einteilen. Daraus ergeben sich die bereits erläuterten Einflussfaktoren auf die Herstellkosten, siehe Kapitel 3.3.

- **Anforderung**
- **Konzept**
- **Gestalt**
- Stückzahl
- **Baugröße**
- Auslegung
- Material
- Leistungstiefe
- Fertigungsverfahren
- Montage
- Teilevielfalt

Bei einer Produktneuentwicklung sind sämtliche dieser Faktoren leicht beeinflussbar. Mit fortlaufender Weiterentwicklung werden Produkteigenschaften immer konkreter und deren Beeinflussbarkeit sinkt zunehmend. Bezugnehmend auf den Windturbinenmantel sind einige dieser Faktoren bereits fixiert (hervorgehoben in der Aufzählung) und können nicht mehr zur Kostenreduzierung herangezogen werden. So sind die Anforderungen, das Konzept, die Gestalt sowie die Baugröße des Mantels schon in der Konzeptphase festgelegt worden und können nur mehr unter hohem Aufwand abgeändert werden. Mit den verbleibenden Einflussgrößen kann auf die Herstellkosten eingewirkt werden, wobei manche höheres Kosteneinsparungspotential aufweisen als andere. In Kapitel 3.3 wurde gezeigt, dass Materialkosten im Maschinenbau, gefolgt von den Fertigungskosten, den höchsten Herstellkostenanteil aufweisen. Diese Angaben werden in Kapitel 4.2.1 nach der Kostenstrukturanalyse des Windturbinenmantels bestätigt, wo Material- bzw. Fertigungskosten zu etwa gleich großen Kostenanteilen einfließen. Daher soll in den folgenden Betrachtungen der Schwerpunkt vorerst auf diesen beiden Gebieten liegen. Andere Aspekte wie die Montagetechnologie können teilweise erst in der Konzeptausarbeitung berücksichtigt werden. Um die Zielsetzungen, also sowohl das Gewichtsziel als auch das Kostenziel zu erreichen, bieten sich Vorgehensweisen aus dem Leichtbau an. Damit lassen sich zugleich Materialkosten durch geringeren Werkstoffeinsatz als auch das Gewicht reduzieren. Solche Methoden werden unter anderem im Bauwesen und im Maschinenbau und dort vor allem in der Fahrzeug- und Flugzeugindustrie vermehrt eingesetzt.

#### 4.4.1 Leichtbaustrategien<sup>99</sup>

Leichtbaustrategien ermöglichen eine optimierte Anwendung der eingesetzten Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Konstruktionsweisen. Ausgehend vom Bedingungsleichtbau lässt sich ein vorgeschlagener Ablauf im Entwicklungsprozess definieren. Dieser beinhaltet die weiteren Schritte wie Konzeptleichtbau, Stoffleichtbau- Formleichtbau und Fertigungsleichtbau in der angeführten Reihenfolge und kann in iterativen Schleifen durchlaufen werden.

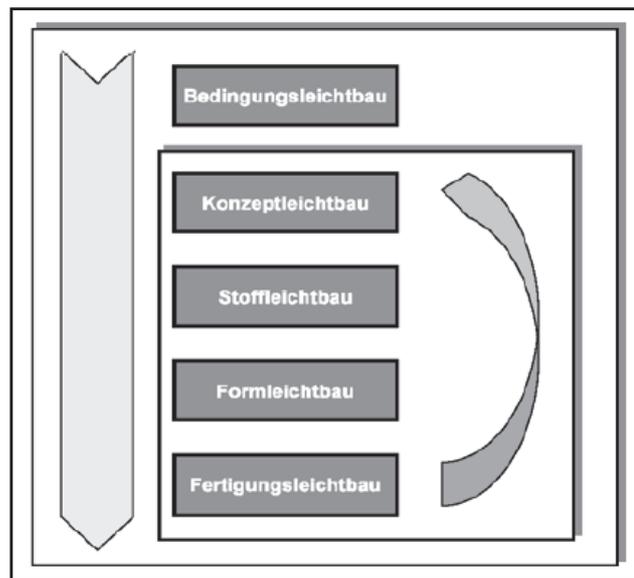


Abbildung 35: Leichtbaustrategien<sup>100</sup>

Der **Bedingungsleichtbau** umfasst alle Anforderungen der Umwelt an den Leichtbau. Diese Randbedingungen haben ihren Ursprung in der Gesellschaft, der Politik, der Gesetzgebung und in den Märkten. Durch Auflistung dieser Anforderungen, die erfüllt werden müssen, entsteht das Lastenheft. Können nicht notwendige Anforderungen die Struktur betreffend gestrichen werden, kann Gewicht eingespart werden. Unterkategorien des Bedingungsleichtbaus sind der Zweckleichtbau, der Sparleichtbau und der Umweltsleichtbau. Der Zweckleichtbau umfasst die Anforderung an das Gesamtsystem wie z.B. die Achslastverteilung eines Fahrzeuges oder die Anforderung durch die Erhöhung der Beschleunigung. Der Sparleichtbau beinhaltet das Kosteneinsparungspotential durch direkte Werkstoffeinsparung sowie auch die Vereinfachung durchlaufender Prozessketten, mit dem Ziel der Herstellkostenreduktion. Beim Umweltsleichtbau werden hingegen oft höhere Herstellkosten zugunsten geringerer Betriebskosten und der verminderten Auswirkung auf die Umwelt in Kauf genommen.

---

<sup>99</sup>Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 62ff.

<sup>100</sup>Henning/Moeller (2011), S. 63

Der **Konzeptleichtbau** versucht mit systematischer Betrachtung des Gesamtsystems geeignete Strukturen und Bauteile zu finden, um mit deren Anpassung an das Gesamtsystem Gewicht zu sparen. Dabei sollen neue Lastpfade und Teile mit Funktionsintegration gefunden werden. Als Beispiel dient die Außenhaut eines Tragflügels. Dieser übernimmt die Funktion des Auftriebs, erhöht die Steifigkeit der Struktur und beinhaltet zusätzlich die Tanks.

Das nächste Leichtbaukonzept ist der **Stoffleichtbau**, der das Ziel verfolgt, für die vorgegebenen Anforderungen an die Struktur den Werkstoff mit der geringsten Dichte zu verwenden. Die Umsetzung dieser Strategie scheint einfach, ist jedoch in der Realität sehr viel umfangreicher und ohne die Anpassung der Geometrie und dem damit verbundenen Fertigungsverfahren schwer umzusetzen. Daher geht eine Werkstoffumstellung oft mit einem Technologiesprung einher. Als Beispiel kann man die Umstellung von Aluminium auf faserverstärkte Kunststoffe nennen. Einfacher ist es bei der Wahl von Werkstoffen ähnlicher Eigenschaften und höherer Festigkeit. Hier können meist gleiche Fertigungsverfahren eingesetzt und nebenbei durch Wandstärkenreduktion Gewichtsvorteile erzielt werden. Von Bedeutung sind dabei Verbundwerkstoffe. Vor allem faserverstärkte Kunststoffe sind für den Stoffleichtbau durch ihre Eigenschaften besonders geeignet, sind aber abhängig vom Anwendungsfall sehr kostenintensiv und daher nur bedingt einsetzbar.

Der **Formenleichtbau** bezieht sich auf die Anforderungsanpassung der Struktur, so dass durch die optimale Kraftverteilung und die Formgebung ein Strukturaufbau mit minimalem Gewicht zur Verfügung gestellt werden kann. Dabei bestimmen die zu berücksichtigenden Lasten den konstruktiven Strukturaufbau. Dieses Leichtbauprinzip ist dabei eng verbunden mit dem Konzept- bzw. Stoffleichtbau.

Der Begriff **Fertigungsleichtbau** bezeichnet Gewichtsreduzierungspotentiale durch Herstellungs-, Fertigungs- bzw. Montagevorgänge. Dieser kann aber nur in den seltensten Fällen allein betrachtet werden und hängt eng mit den Strategien des Formen- und Stoffleichtbaus zusammen. Zu den zurechenbaren Verfahren zählen vor allem Füge- und Montagetechniken wie z.B. Kleben, Laserschweißen und Löten. Dadurch können zum Teil Bauteilgeometrien vereinfacht und die benötigten Fügeflächen verkleinert werden, was sich wiederum positiv auf das Gewicht auswirken kann.

#### 4.4.2 Bauweisen

Der Aufbau einer Struktur kann im Allgemeinen durch Anwendung unterschiedlicher Bauweisen geschehen. Die Wahl der Bauweise hängt im Wesentlichen von den

Konstruktionselementen, der Bauteilanzahl und deren Größe sowie dem Werkstoff und dem dazugehörigen Fertigungsverfahren ab. Man unterscheidet im Wesentlichen die folgenden Bauweisen: Differentialbauweise, Integralbauweise, Modulbauweise sowie die Verbundbauweise. Die klassische Bauweise stellt die **Differentialbauweise** dar (Abbildung 36, links), in der einzelne Bauteile und Halbzeuge zu einer Gesamtstruktur verbunden werden. Dabei sind die einzelnen Elemente – im Gegensatz zu anderen Bauweisen - einfach gestaltet. Diese Bauweise hat den Vorteil, dass jedes Bauteil, je nach Anforderung in unterschiedlichen Werkstoffen ausgeführt und so das Werkstoffpotential am besten genutzt werden kann. Zusätzlich können Reparaturen an einzelnen Bauteilen durchgeführt werden und es kann ein Austausch unabhängig von anderen Bauteilen bzw. Baugruppen erfolgen. Nachteilig wirken sich jedoch die auftretenden Fügstellen aus, welche einen erhöhten Montageaufwand verursachen und bei metallischen Werkstoffen Kontaktkorrosion hervorrufen können. Die zweite Bauweise ist die **Integralbauweise** (Abbildung 36, rechts), die das Ziel verfolgt, die Gesamtstruktur aus einem Stück herzustellen und durch Integration von Teilstücken und Funktionen möglichst viel Gewicht einzusparen. Diese Bauweise ist eng mit dem Konzeptleichtbau zur Funktionsintegration verbunden. Vorteile ergeben sich aus dem geringeren Gesamtgewicht und der Verkleinerung des Fügeaufwandes. Dem stehen Nachteile gegenüber, die vor allem auf den höheren Fertigungsaufwand und die Formenwerkzeuge komplexer Bauteile zurückzuführen sind.<sup>101</sup>

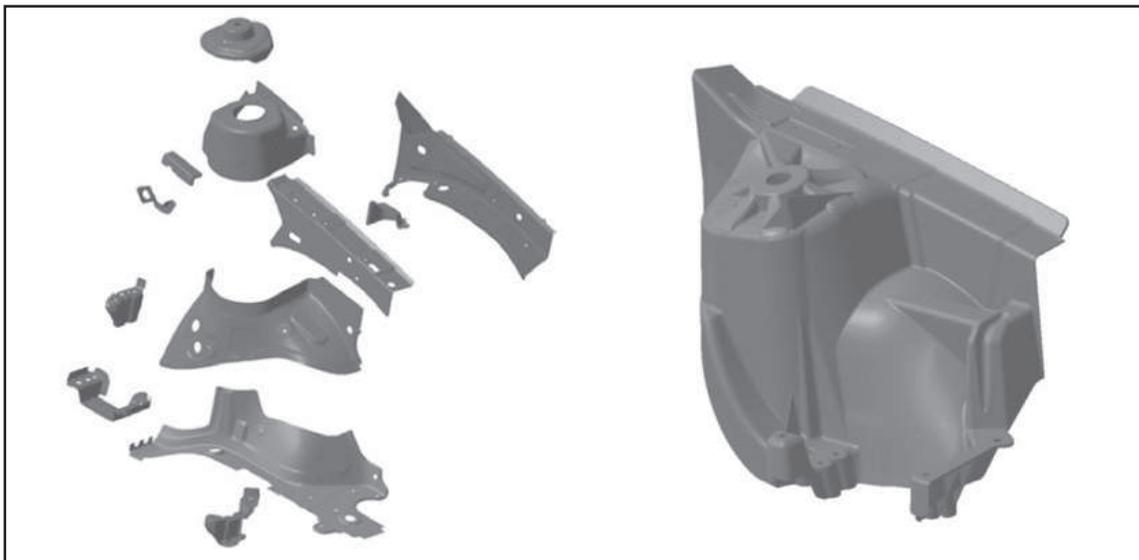


Abbildung 36: Differentialbauweise (links)<sup>102</sup>, Integralbauweise (rechts)<sup>103</sup>

---

<sup>101</sup>Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 70f.

<sup>102</sup>Henning/Moeller (2011), S. 70

<sup>103</sup>Henning/Moeller (2011), S. 71

Eine weitere Möglichkeit bietet die **Modulbauweise** (Abbildung 37, links). Ein Modul setzt sich allgemein aus mehreren Bauteilen bzw. Baugruppen zusammen, die untereinander einen hohen Vernetzungsgrad aufweisen, aber nur schwach mit außenstehenden Bauteilen vernetzt sind. Die Verbindung dieser einzelnen Module über definierte Schnittstellen ergibt schlussendlich die Gesamtstruktur. Die Unterteilung der Module kann funktionsbezogen, prozessbezogen oder strukturbezogen erfolgen. Funktionsbezogene Module beinhalten Elemente und Bauteile mit ähnlicher Funktion wie z.B. Steuerungen. Prozessbezogene Module beziehen sich auf Montage-, Herstellung-, oder Entwicklungsprozesse und finden häufig Anwendung als Montagemodul im Fahrzeugbau zur Reduktion des Montageaufwandes. Die strukturbezogenen Module inkludieren alle strukturellen Bauteile bis hin zur Gesamtstruktur. Als Beispiele dazu sind ganze Flugzeugstrukturen oder Karosseriebaumodule für die Fahrzeugindustrie zu nennen. Die Vorteile der Modulbauweise ergeben sich aus einer Gleichteilstrategie, die Entwicklungs-, Herstell-, und Montagekosten sparen kann, ist aber - bezogen auf die Gesamtstruktur - nicht immer die beste Leichtbaulösung.<sup>104</sup>

Eine weitere Bauweise ist die **Verbundbauweise**, die verschiedene Werkstoffe unterschiedlicher Eigenschaften in einem Bauteil miteinander vereint. Dadurch können teilweise bessere Bauteileigenschaften bei verringerter Masse erreicht werden. Besonders beliebt sind dabei Sandwichstrukturen mit Kernmaterialien (Abbildung 37, rechts) geringer Dichte und Decklagen aus Metall oder Kunststoff. Diese haben trotz geringerem Strukturgewicht höhere Biegesteifigkeiten sowie bessere akustische und thermische Eigenschaften. Jedoch muss bei deren Anwendung die Krafteinleitung in den Sandwichverbund aufwändiger gestaltet werden, was sich wiederum in einem erhöhten Fertigungsaufwand niederschlägt. Ein weiterer Nachteil ist die Simulation der Bauteileigenschaften, da diese stark von Fertigungsparametern abhängt.<sup>105</sup>

---

<sup>104</sup>Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 71f.

<sup>105</sup>Vgl. Henning/Moeller (2011), S. 72f.

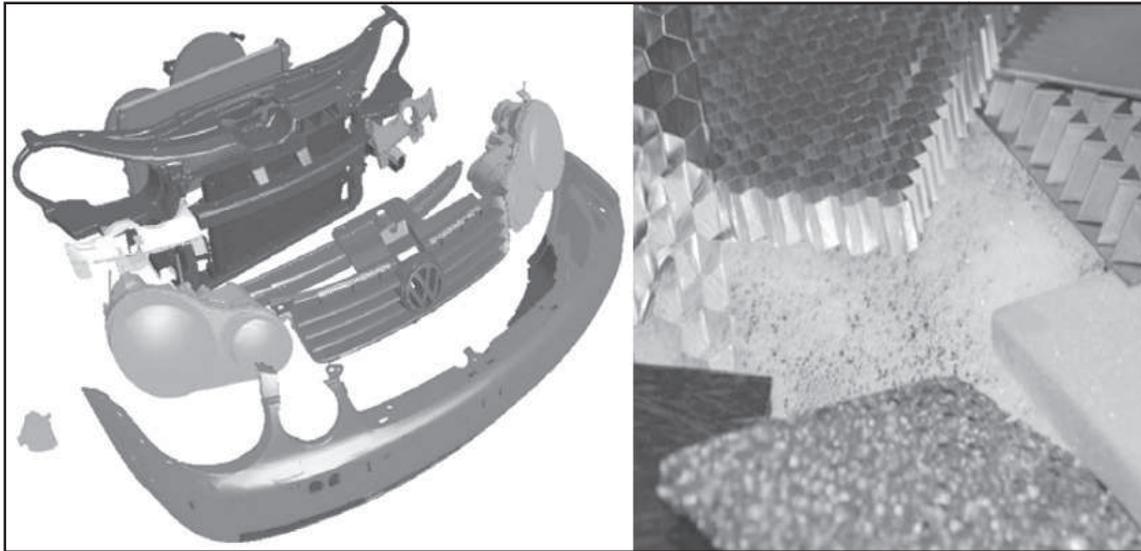


Abbildung 37: Modulbauweise (links)<sup>106</sup>, Verbundbauweise Kernmaterial (rechts)<sup>107</sup>

#### 4.4.3 Entwicklung möglicher Lösungsvarianten

Eine zentrale Teilaufgabe während der Problemlösung ist das Generieren von Ideen. Daher verlangt die Ideengenerierung viel Kreativität und kann nicht schematisch durchlaufen werden. Kreative Prozesse werden von psychischen Voraussetzungen des Menschen beeinflusst und sind bislang kaum nachvollziehbar. Nichts desto trotz hat die Forschung Erkenntnisse hervorgebracht, welche die Basis vieler Methoden zur Produktion gezielter Ideen darstellt. Beeinflusst wird die Ideengenerierung durch unterschiedliche kreativitätshemmende und kreativitätsfördernde Faktoren. Die wichtigste Voraussetzung für kreatives Denken ist Wissen. Breites und vielfältiges Wissen fördert die Kreativität. Das bedeutet, je mehr jemand aus unterschiedlichen Fachrichtungen weiß, desto mehr seines Wissens kann er zur Ideenkombination nutzen. Durch den heutigen großen Wissensumfang ist es als Einzelperson nur schwer möglich, genügend Wissen für umfangreiche Probleme zur Verfügung zu stellen. Daraus resultiert der Vorteil der Ideenfindung in Gruppen von Personen verschiedenster Fachrichtungen. Zusätzlich wird in der Gruppe durch die Aufnahme von Ideen anderer die eigene Phantasie angeregt. Ein wichtiger Erfolgsfaktor bei der Ideengenerierung ist, dass diese nicht erzwungen werden kann und daher ohne Zeit- bzw. Erfolgsdruck ablaufen muss. Aus diesem Grund ist eine lockere Atmosphäre Grundvoraussetzung, um Kreativitätsprozesse in Gang zu setzen und ist deutlich vom Arbeitsalltag abzugrenzen. Blockaden können zusätzlich die Ideengenerierung behindern. Bei einer funktionalen Fixierung werden das Problem und die verfügbaren Lö-

---

<sup>106</sup>Henning/Moeller (2011), S. 71

<sup>107</sup>Henning/Moeller (2011), S. 72

sungen nur aus einem Blickwinkel betrachtet. Ein anderes Beispiel ist der Einstellungseffekt. Hier werden ähnliche Probleme mit ein und derselben Strategie gelöst, ohne auch nur andere Lösungsstrategien zu entwickeln.<sup>108</sup>

Die Ideengenerierung beginnt mit einer intensiven Analyse des Problems und kann sowohl durch Probieren von Lösungen als auch total planlos erfolgen. Diese Phase ist gekennzeichnet von Erfolglosigkeit, vor allem bei komplexen Problemen. Damit diese Phase am Ende trotzdem von Erfolg gekrönt ist, durchläuft der Ideenfindungsprozess wiederkehrende Phasen, in dem das Problem beiseite gelegt wird. Ganz egal aus welchen Gründen dies geschieht, diese Ablenkung ist hilfreich um Abstand zu gewinnen.<sup>109</sup> *„Anscheinend brütet der Geist unbewusst weiter am Problem, weshalb diese Phase auch Inkubation bezeichnet wird. Typisch für dieses Ausbrüten ist, dass der Vorgang eine ungewisse Zeit dauert und, dass die ausgebrütete Idee meist zu einem unerwarteten Zeitpunkt schlüpft, sei es morgens unter der Dusche, im Auto vor der roten Ampel oder abends beim Waldlauf.“*<sup>110</sup>

Diese erwähnten Erkenntnisse zur Unterstützung der Ideengenerierung haben zu vielen Kreativitätsmethoden geführt. All diese Methoden haben eines gemein. Sie produzieren zunächst möglichst viele Ideen. Eine dieser Methoden ist der Morphologische Kasten. Die Morphologie ist die Lehre von der Gestaltung einer Sache und zerlegt diese Sache in seine wichtigen Merkmale. Mit diesen Merkmalen und den unterschiedlichen Ausprägungsmöglichkeiten wird der Lösungsraum aufgespannt. Man erhält eine Lösungsvariante durch die Kombination einer Ausprägung je Merkmal. Dadurch ergibt sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten. Damit diese nicht zum Problem werden, sind einige Voraussetzungen zu beachten. Der Schwerpunkt ist auf die wirklich wichtigen Merkmale zu legen und die dazu möglichen Ausprägungsvarianten sind in deren Anzahl zu begrenzen. Dazu fasst man ähnliche Werte zusammen und geht erst nach einer Vorauswahl ins Detail. Zusätzlich können unmögliche Kombinationen eliminiert und dadurch die Gesamtanzahl an Variationen reduziert werden. Es soll aber auf jeden Fall beachtet werden, dass außergewöhnliche Kombinationen hohes Innovationspotential in sich bergen können. Und zuletzt müssen nicht alle Kombinationsmöglichkeiten durchgespielt werden, sondern es reicht oft, zufällig verschiedene Kombinationen auszuprobieren.<sup>111</sup>

Tabelle 6 zeigt einen Morphologischen Kasten mit Ausprägungsmöglichkeiten für den Aufbau des Windturbinenmantels.

---

<sup>108</sup>Vgl. Jakoby (2011), S. 54ff.

<sup>109</sup>Vgl. Jakoby (2011), S. 56

<sup>110</sup>Jakoby (2011), S. 56

<sup>111</sup>Vgl. Jakoby (2011), S. 58ff.

Tabelle 6: Morphologischer Kasten

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägungsmöglichkeiten</b>			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehrteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

Es ist schnell zu erkennen, dass es eine Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten gibt. Zusätzlich ist noch festzuhalten, dass die Fertigungsverfahren großen Einfluss auf die Werkstoffe und die herzustellende Bauteilgeometrie haben und daher die Kombinationen einschränken können. Dieser Morphologische Kasten soll als Ausgangspunkt für die Ideengenerierung dienen.

### **Analyse Konkurrenzprodukt**

Auch wenn man meist neuartige Konzepte entwickeln will, ist es ratsam, nach bereits bestehenden Lösungen zu suchen, um das Rad nicht neu erfinden zu müssen. Daher ist es oft wirtschaftlicher, nach ähnlichen Problemen zu suchen, um Lösungsvarianten übernehmen zu können, oder aber auch um Schwachstellen bestehender Lösungen zu finden.<sup>112</sup>

Für diese Recherche bieten sich vor allem ähnliche Konkurrenzprodukte an, da diese gleiche Probleme lösen müssen. Die bereits durchgeführte Gegenüberstellung mit den Konkurrenzprodukten (Kapitel 4.2.2) beinhaltet auch deren eingesetzte Werkstoffe. Verwendung finden hier eine ABS/Stahlbauweise der donQi Turbine, sowie eine Kombination aus GFK/Aluminium bei der Enflo-Windkraftanlage. ABS bzw. GFK werden für die formgebende Außenkontur eingesetzt und metallische Werkstoffe wie Stahl und Aluminium kommen für die Stabilisierung und als Schnittstelle zu anderen Komponenten zum Einsatz. Genauer untersucht werden konnte die donQi Turbine, da diese ebenfalls im Kleinwindpark in Lichtenegg installiert war und aufgrund eines Defektes demontiert werden musste. Die nachfolgende Abbildung 38 zeigt den Aufbau dieser Anlage sowie auch Beschädigungen während des Betriebs. Anhand dieser lassen sich die möglichen Schwachstellen identifizieren, welche auf jeden Fall für eine lange Lebensdauer vermieden werden müssen.

---

<sup>112</sup>Vgl. Felkai/Beiderwieden (2011), S. 123

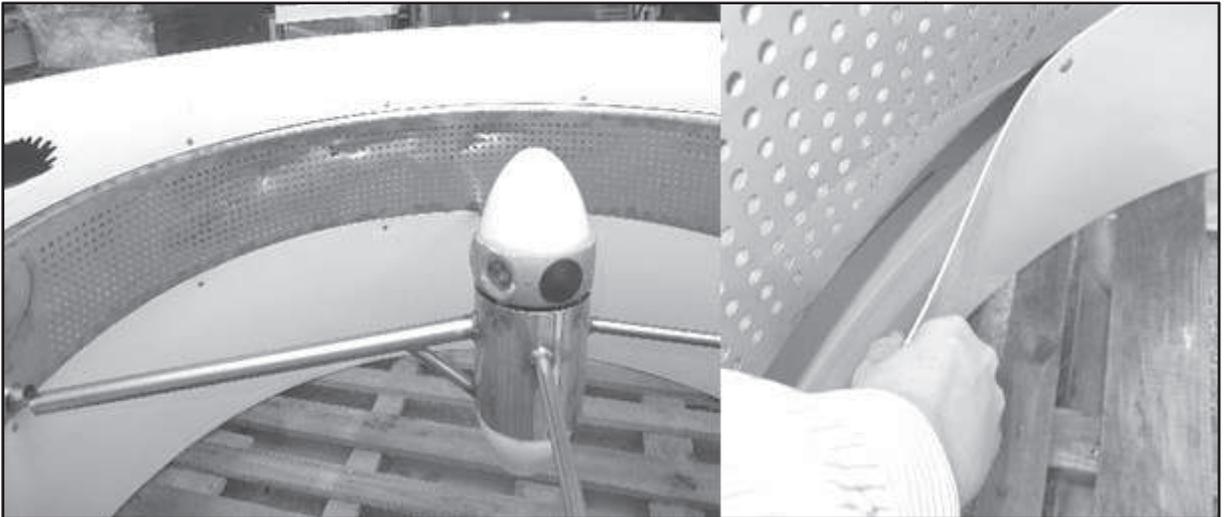


Abbildung 38: Windturbinenmantel der donQi Turbine

Abbildung 38 zeigt die dünne elastische ABS-Kunststoffaußenhaut mit einer Wandstärke von 3 mm, die auf eine Stahlkonstruktion genietet ist. Die Außenhaut ist sehr dünn und lässt sich durch punktuelle Krafteinbringung einfach elastisch verformen. Die Stahlkonstruktion besteht aus ringförmig gebogenen Edelstahlrohren, der Lagerung und den vier Streben, die den Generator-Naben-Verband fixieren und miteinander verschweißt sind. Links sind deutlich die Schäden, verursacht durch ein Starkwindevent zu erkennen. Ein Rotorblattbruch mit anschließender Mantelbeschädigung durch die Rotorblattbruchstücke sowie der Durchbruch einer Schweißstelle der Haltestrebe waren die Folge. Solche oder ähnliche Schadensfälle können, sollten diese nicht nur vereinzelt auftreten, erhebliche Folgekosten nach sich ziehen. Neben der wirtschaftlichen Schädigung ist natürlich auch die Kundenzufriedenheit negativ beeinflusst und kann durch dessen Verbreitung potentielle Neukunden vom Kauf abhalten. Diese Aspekte sind spätestens bei der Ideenauswahl besonders zu beachten. Diese Konstruktion wirkt, bei genauerer Betrachtung nicht sehr robust und zeigt eine deutliche Fehleranfälligkeit. Daher sind nur einzelne Aspekte wie z.B. die Wandstärke der Kunststoffaußenhaut in weiterer Folge interessant.

Nachfolgend werden folgende Lösungsvarianten und deren Grundlagen erläutert:

- **Variantenentwicklung aus der bestehenden Bauweise**
  - o Variante 1: Reduzierung der Wandstärke
  - o Variante 2: GFK Sandwichbauweise
- **Variantenentwicklung aus der Differentialbauweise**
  - o Variante 3: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen
  - o Variante 4: Differentialbauweise Metall Halbschalen
- **Variantenentwicklung aus der Integralbauweise**
  - o Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper

**4.4.4 Lösungsvarianten aus der bestehenden Bauweise**

Als erster Ausgangspunkt dient der Ist-Zustand (Tabelle 7, Ausprägungsmöglichkeiten gekennzeichnet) des Mantels. Dieser wird aus FVK (faserverstärktem Kunststoff) gefertigt. Als Faser dienen Glasfasern, welche zu 6 mm Wandstärke über der gesamten Oberfläche verarbeitet werden. Der Ist-Zustand wurde bereits in der Situationsanalyse genauer festgehalten (Kapitel 4.3.1). Da bereits in Werkzeuge für den Prototyp investiert wurde, sollen diese wenn möglich noch weiter genutzt werden. So können Kostensenkungen bereits frühzeitig zum Tragen kommen und man verschafft sich Zeit für mögliche neue Konzeptentwicklungen. Diese Änderungen zielen vor allem auf den Lagenaufbau des GFK-Laminats ab. Daraus resultieren folgende Möglichkeiten zur Kostenreduktion:

- Variante 1: Reduktion der Wandstärke
- Variante 2: GFK Sandwichbauweise

Für deren Anwendung sind Kenntnisse über Faserverbundkunststoffe und deren Herstellungsverfahren notwendig.

Tabelle 7: Morphologischer Kasten der Ausgangssituation

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägungsmöglichkeiten</b>			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehnteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

### **Grundlagen der Faserverbundkunststoffe und des Handlaminierverfahrens**

Faserverbundkunststoffe zeichnen sich durch ihre maßgeschneiderten Eigenschaften für die jeweilige Anwendung aus und werden, dank ihrer Vorzüge, zunehmend in allen Bereichen der Technik eingesetzt. Betrachtet man die Kunststoffe allein, sind diese für viele Anwendungen zu spröde oder zu flexibel. Auf der anderen Seite ist die Faser zwar für den Einsatz bei hohen Zugkräften gut geeignet, kann aber keine Druck- und Biegekräfte übertragen. Erst die Kombination dieser beiden Komponenten zu einem Faser-Kunststoffverbund, in dem die Faser fest mit der Matrix – dem Kunststoff – verbunden wird, ermöglicht die besonderen Eigenschaften dieses Werkstoffes, die für viele Anwendungen so geschätzt werden. Als Faser werden heute Glas-, Kohlenstoff, Aramid oder Naturfasern eingesetzt. Diese besitzen eine geringe Dichte aber eine hohe Festigkeit und verleihen dem Kunststoff eine hohe Belastbarkeit bei einer niedrigen Dichte. Als Matrixmaterial gibt es Kunststoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften für verschiedene Anwendungen. Am häufigsten werden Polyesterharze und Epoxidharze für die Herstellung herangezogen. Höchste Belastungseigenschaften erreicht man dabei durch gerichtete endlose Fasern. Aber auch kürzere Fasern verbessern die Eigenschaften des Kunststoffes bereits deutlich und werden daher im Kunststoffspritzguss eingesetzt.<sup>113</sup>

Das Handlaminierverfahren ist das älteste Verfahren zur Herstellung von Faserverbundkunststoffen. Damit lassen sich auf einfache Art und Weise auch komplexe Bauteile herstellen. Dieses Verfahren benötigt eine offene, meist muldenartige Form in die das Laminat eingebracht wird. Der Laminataufbau kann je nach Anforderungen beliebig mit unterschiedlichem Faser- und Matrixmaterial erfolgen und es können verschiedene Oberflächen realisiert werden. Das Verfahren erlaubt des weiteren eine vielfältige Bauteilgestaltung, da Formen bei Bedarf auch mehrteilig ausgeführt werden können. Von Nachteil sind jedoch der hohe Fertigungsaufwand durch die langen Fertigungszeiten des Handeinlegens und die bedingte Reproduzierbarkeit des Lagenaufbaues. Wirtschaftlich wird dieses Verfahren hauptsächlich für Einzelfertigungen, Prototypen und im Formenbau eingesetzt. Bei der Qualität des fertigen Bauteiles ist zu erwähnen, dass die Materialeigenschaften stark vom handwerklichen Verarbeitungsprozess bestimmt werden. Der Faserverbundwerkstoff, samt seinen Eigenschaften entsteht erst während der Verarbeitung. Diese können dadurch stark variieren. Dazu gehört vor allem der Faservolumenanteil der die mechanischen Eigenschaften definiert.<sup>114</sup>

---

<sup>113</sup>Vgl. AVK-Industrievereinigung (2010), S. 17

<sup>114</sup>Vgl. AVK-Industrievereinigung (2010), S. 311ff.

Beim Handlaminierverfahren liegt dieser je nach Fasermaterial zwischen 15–40 %. Mit einem höheren Faservolumenanteil steigt auch der Einfluss der Fasereigenschaften und somit erhöht sich die mechanische Belastbarkeit des gesamten Faserverbundkunststoffes. Dabei versucht man, den Matrixanteil aus Kosten und Gewichtsgründen so gering als möglich zu halten.<sup>115</sup>

Es sollen nun Lösungen gesucht werden, mit denen die bestehende Fertigungsvariante auf Kosten und Gewicht optimiert werden kann.

### **4.4.5 Variante 1: Reduzierung der Wandstärke**

Wie bereits erwähnt soll der bestehende GFK-Aufbau abgeändert werden, um die Kosten, bestehend aus Fertigungsmaterial und Fertigungsaufwand, zu reduzieren. Zusätzlich können weitere Kostenreduzierungspotentiale in anderen Baugruppen auftreten und genutzt werden. Die einfachste Abänderung des GFK-Lagenaufbaues liegt in der Verringerung der Wandstärke und ist abhängig von der mechanischen Auslegung. Dabei soll die Wandstärke konstant über der gesamten Oberfläche verändert und dabei die Auswirkung, vor allem auf Materialkosten, Gewicht und Fertigungsaufwand, genutzt werden. Das Gewicht ist maßgeblich für die Auslegung der Lagerung des Windenergiekonverters verantwortlich und von der Wahl der Wandstärke abhängig. Daher wird der Einfluss der sich veränderten Wandstärke auf die Lagerreaktionskräfte dargestellt. Alle weiteren Baugruppen bleiben dabei unverändert. Als Hilfsmittel zur Bestimmung des Gewichtes und des Schwerpunktes dient das CAD-Programm Catia. Mithilfe dessen kann die Wandstärke einfach und schnell variiert und gleichzeitig die Position des sich ergebenden Schwerpunktes ermittelt werden. Reduziert wird dazu die Wandstärke von 6 mm in 1 mm Schritten bis 1 mm. Errechnet man bei jeder Wandstärke die resultierenden Kräfte laut Abbildung 33 und trägt diese über dem Gewicht der Turbine 01 auf, erhält man die folgende Abbildung 39.

---

<sup>115</sup>Vgl. Schürmann (2005), S. 143

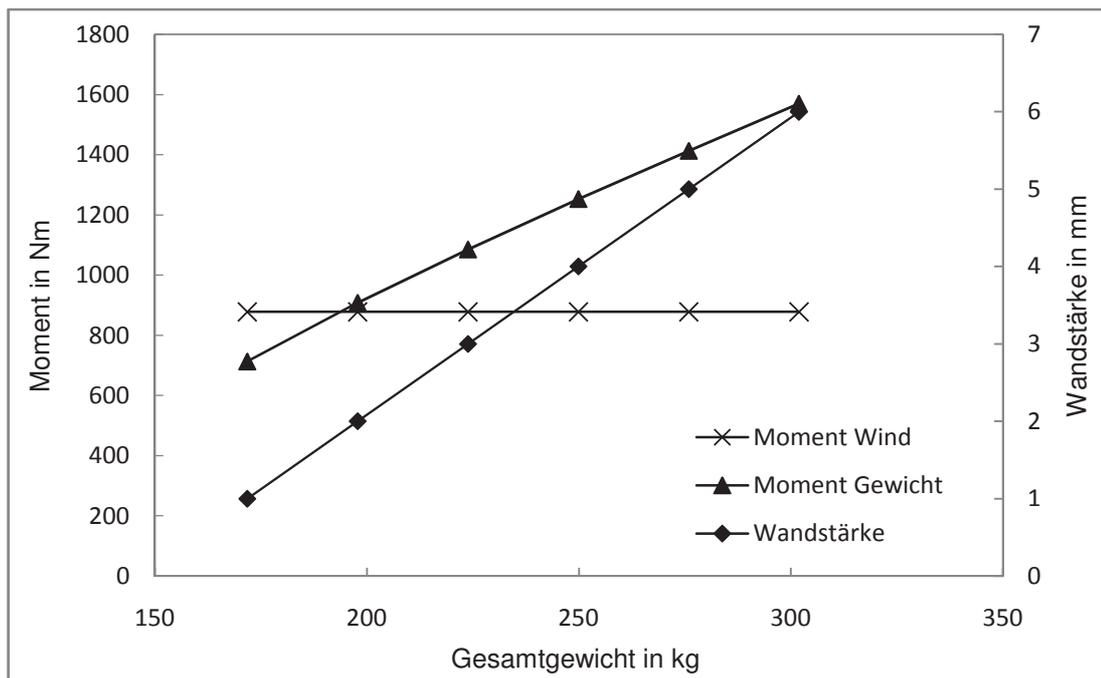


Abbildung 39: Einfluss der Wandstärkenänderung auf Gesamtgewicht und Lagerbelastung

Die Windkraft  $F_{Wind}$  und das Windmoment  $M_{Wind}$  bleiben konstant, da diese nicht vom Gewicht, sondern von der angeströmten Fläche, dem Widerstandsbeiwert und der Überlebensgeschwindigkeit der Anlage abhängen. Das Gewicht lässt sich pro Millimeter Wandstärkenverringerung um etwa 26 kg senken. Damit kann das Gesamtgewicht der Turbine 01 theoretisch von über 300 kg auf etwa 170 kg bei 1 mm GFK-Wandstärke gebracht werden. Dadurch kann die Lagerbelastung auf ca. 50 % der Ausgangsbelastung durch das Eigengewicht gesenkt werden. Mit der Veränderung der Wandstärken geht auch eine Materialkosteneinsparung einher. Durch die geringere Faserlagenanzahl lassen sich pro Lage ca. 19 m<sup>2</sup> Fasermaterial sowie der dazugehörige Matrixwerkstoff einsparen. Zusätzliche verminderte sich die Fertigungszeit, da weniger Arbeitsschritte notwendig sind, um die Dicke des Laminates durch Auftragen der einzelnen Lagen zu erreichen. Eine quantitative Aussage über die Kostenersparnis, ist ohne das Wissen über die einzelnen Arbeitsabläufe jedoch schwierig.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass geringere Wandstärken den Arbeitszeitaufwand deutlich vermindern können. Wie gezeigt, hat die Wandstärke einen großen Einfluss auf die Gesamtkosten des Windenergiekonverters. Welche Wandstärke benötigt wird, hängt von den Eigenschaften des Werkstoffs selbst und von den auftretenden Belastungen ab. Daher müssen zusätzlich die Belastungen und Belastungskollektive, die auf den Mantel wirken, berücksichtigt werden.

#### 4.4.6 Variante 2: GFK Sandwichbauweise

Eine weitere Möglichkeit, die bereits getätigten Investitionen in den Werkzeugbau zu nutzen, ist die Anwendung der Verbundtechniken im Leichtbau. Diese Techniken werden bereits vielseitig und vor allem in der Luftfahrt eingesetzt. Ziel dabei ist es, trotz eines geringen Gewichtes, ausreichend Materialsicherheit zu erlangen. Dabei sollen die eingesetzten Materialien optimal in ihren Eigenschaften ausgenutzt werden. Das bedeutet, es werden unterschiedliche Werkstoffe miteinander kombiniert und dort zum Einsatz gebracht, wo sie ihre Vorzüge am besten ausspielen können. Dazu werden Werkstoffe mit höherer Festigkeit und mit geringerer Dichte eingesetzt.

Tabelle 8: Morphologischer Kasten der Sandwichbauweise

Merkmal	Ausprägungsmöglichkeiten			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehnteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

#### Grundlagen der Sandwichbauweise

Als Sandwichbauweise bezeichnet man mehrlagig aufgebaute Flächenstrukturen. Diese Struktur beinhaltet in ihrem Aufbau drei Schichten. Die Schichten bestehen aus Deckschichten oder auch Häute genannt, welche aus einem steifen und festen Material gefertigt sind, und dem Kern, welcher die Aufgabe hat, die beiden Deckschichten fest miteinander zu verbinden. Des Weiteren soll der Kern die beiden Deckschichten auf Abstand halten, um ein höheres Flächenträgheitsmoment zu erreichen. Das Kernmaterial ermöglicht durch seine sehr geringe Dichte ideale Leichtbaukonstruktionen mit hoher Biege- und Drillsteifigkeit vor allem bei Flächenlasten. Der erweiterte Einsatzbereich dieser Bauweise ist auf die Weiterentwicklung der Klebetechnologie zurückzuführen. Das Prinzip beruht darauf, dass die Deckschicht Zug- und Druckkräfte und der Kern Querkräfte aufnimmt. Als Materialien kommen für die Deckschicht Metallbleche und Faserverbundkunststoffe und als Kern Schaummaterialien, Wabenkerne und Wellbleche zum Einsatz. Besonders wichtig ist dabei die Auslegung des Kerns, da dieser bei optimaler Auslegung ein Drittel des Gesamtgewichtes ausmachen kann. Daher ist er möglichst leicht auszulegen, was sich aber nachteilig auf dessen Steifigkeit auswirkt und Verformungen ermöglicht. Die Belastbarkeit eines Sandwichbauteils ist durch dessen Komponenteneigenschaften be-

stimmt. Dabei sind die Druck- und Schubkräfte die auf den Kern wirken sowie die Belastbarkeit der Verbindungsschicht zwischen Kern- und Deckschicht zu berücksichtigen. Bei der Deckschicht interessieren Zugfestigkeit des Laminates und unter Druckbelastung die ausreichende Unterstützung durch das Kernmaterial gegen das Ausbeulen. Bei den Kernmaterialien unterscheidet man zwischen Kernen mit kontinuierlicher und diskontinuierlicher Struktur. Kontinuierlich heißt, dass das Kernmaterial konstant die Deckschicht über die gesamte Fläche unterstützt. Zu diesen Kernen zählen solche aus Schaumstoff oder Balsaholz, die zum Beispiel im Flugzeugbau eingesetzt werden. Um das Gewicht weiter zu reduzieren, werden diskontinuierliche Kernstrukturen eingesetzt. Dazu werden unterschiedliche nicht-flächige Kerne wie Honigwaben, Röhrenwaben, Faltbleche, Stege oder auch Materialien mit Aushöhlungen herangezogen.<sup>116</sup>

Die größte Herausforderung in der Sandwichtechnologie liegt jedoch in der Verbindung zwischen Decklagen und Kern und deren Prüfung. Besonders berücksichtigt werden muss die Kraffteinleitung in den Sandwichverbund. Kleine Kräfte können über einen Flansch an der Deckschicht eingeleitet werden. Bei größeren Kräften und Momenten muss der Kern vor Überbelastungen geschützt werden. Dies geschieht mithilfe von Profilen, die im Kern integriert werden. Beim Faserverbund lassen sich durch die Sandwichbauweise mehrere Vorteile nutzen. Zum einen wird dadurch Gewicht reduziert und zusätzlich kann beim Einsatz von kostengünstigen Kernmaterialien teures Matrixmaterial und Fasermaterial eingespart werden. Bei geeigneter Wahl des Kernmaterials, kann je nach Verbindungsmethode mit der Deckschicht auch die Fertigungszeit reduziert werden, weil für höhere Wandstärken weniger Lagen des Faserverbundes benötigt werden. Mit dieser Methode lassen sich die Vorteile des Faserverbundes ideal für den Leichtbau nutzen und sehr dünne Faserverbunddecklagen realisieren.<sup>117</sup>

Werte für Decklagen und Kernstärken können für unterschiedliche Anwendungen aus Tabelle 9 entnommen werden.

---

<sup>116</sup>Vgl. Wiedemann (2007), S. 222f.

<sup>117</sup>Vgl. Wiedemann (2007), S. 224ff.

Tabelle 9: Sandwichaufbau für unterschiedliche Anwendungen<sup>118</sup>

Fläche einer Halbschale	Bauteil Beispiel	Anforderung	Äußere Decklage Glasfaser	Wabenkern	Innere Decklage Glasfaser	Gewicht
m <sup>2</sup>	-	-	g/m <sup>2</sup>	mm	g/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>
<0,4	Modellflugzeugrumpf	Geringe Belastung	2x49	2	1x49	350
<0,8	Sehr großer Modellflugzeugrumpf	Mäßige Belastung	1x105 1x49	2	1x49	440
<1,5	Motorhaube UL-Flugzeug	Hohe Schlagfestigkeit	2x105 1x80	2	1x80	870
<1,5	Sehr großer Modelltragflügel	Hohe Beulsteifigkeit	1x105 1x49	5	1x80	580
<4,0	Nicht tragende Abdeckhaube	Mäßige Beanspruchung	2x105 1x80	5	1x80	1000
<4,0	Tragflügel eines UL-Flugzeuges	Hohe Beul- und Zugfestigkeit	2x93 Kohlefaser 1x49	8	1x80	900

Für eine wirtschaftliche Verwendung der Sandwichbauweise für den Windturbinenmantel, wird ein kostengünstiges und zugleich leicht zu verarbeitendes Kernmaterial mit niedriger Dichte benötigt. Der Kern soll Faser und Matrixmaterial für einige Millimeter Wandstärke ersetzen. Damit wird auch die benötigte Fertigungszeit deutlich reduziert. Für solch großflächige Anwendungsgebiete kommen vor allem kontinuierliche Schaumkerne verschiedener Hersteller in Frage. Diese Kerne bestehen aus Polyester-Mikrokugeln welche die Aufnahme von Matrixharzen minimieren und dadurch Gewicht reduzieren.<sup>119</sup> Diese Materialien nehmen eine vorgegebene Menge an Harz für die Kernstabilität auf und gewährleisten eine einfache Verarbeitung und einen raschen Wanddickenaufbau.

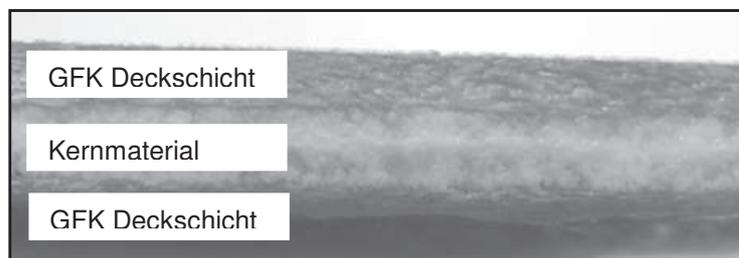


Abbildung 40: Testlaminat aus GFK Sandwich

Diese beiden Lösungsvarianten stellen jene dar, die ohne große Vorbereitungszeit umgesetzt werden können. Die nächsten Lösungsvorschläge werden auf eine gänz-

<sup>118</sup>R&G Faserverbundwerkstoffe (2009), S. 192

<sup>119</sup>Vgl. Lantor BV, Zugriffsdatum 20.8.2013

liche Neuentwicklung der Konstruktion nicht verzichten können und benötigen aus diesem Grund eine genügend lange Entwicklungszeit, bevor sie zum Einsatz kommen können.

#### **4.4.7 Variantenentwicklung aus der Differentialbauweise**

Diese Variante beinhaltet eine Rahmenstruktur im Inneren, welche die tragende Funktion übernimmt. Dieser Rahmen kann aus den unterschiedlichsten Werkstoffen gefertigt werden. Für die äußere aerodynamische Formgebung sorgen Abdeckungen, die die Rahmenstruktur verkleiden und an ihr befestigt werden. Die Abdeckungen können ebenfalls aus verschiedenen Werkstoffen wie z.B. dünnwandigen metallischen Werkstoffen oder auch aus diversen Kunststoffprodukten bestehen und sind je nach Anforderungsprofil auszuwählen.

Diese Technik wurde vor allem in der Vergangenheit und wird zum Teil auch heute noch in der Flugzeugtechnik verwendet, um Flugzeuge möglichst leicht zu bauen und wird dort als Gerüst-, Schalen- und Spantenbauweise bezeichnet. Diese Bauweisen sind grundsätzliche Möglichkeiten für den Aufbau eines Rumpfes. Bei der Gerüstbauweise kommt ein fachwerkartiges Gerüst aus Metall oder Holzstreben mit möglichen Zusatzverbindungen aus Drähten zum Einsatz und nimmt sämtliche Kräfte auf. Die auf diesem Gestell befestigte Beplankung dient nur der Formgebung und hat keine tragende Funktion.<sup>120</sup> Diese Bauweise ist heute kaum mehr verbreitet. Die Schalenbauweise versucht die Nachbildung eines dreh- und biegesteifen Rohres und lässt die Außenhaut Kräfte aufnehmen, anstelle der Fachwerkkonstruktion der Gerüstbauweise. Mehrere Schalenelemente bilden dabei einen geschlossenen Rumpf, welcher durch Spangen (Längsträger) und Stringer (Querträger) seine Form erhält. Bei einem sogenannten „Monocoque“ existiert nur eine Schale. Diese wird so ausgelegt, dass diese alle auftretenden Kräfte aufnehmen kann. Kommen mehrere Schalen zum Einsatz, können diese durch Nieten, Schweißen, Schrauben oder Kleben miteinander verbunden werden. Diese Bauweise verspricht Gewichtvorteile zur Gerüstbauweise.<sup>121</sup>

Bei der Spantenbauweise werden gegenüber der Schalenbauweise die Spanten und Stringer tragend ausgeführt, sodass die Außenhaut die Last nicht alleine zu tragen hat. Dies verspricht eine weitere Gewichtsersparnis und kommt daher heutzutage

---

<sup>120</sup>Vgl. Klußmann/Malik (2012), S. 166

<sup>121</sup>Vgl. Klußmann/Malik (2012), S. 238

nicht nur im Flugzeugbau, sondern auch im Boots- und Fahrzeugbau und in der Architektur zum Einsatz.<sup>122</sup>

Die nachstehende Abbildung 41 zeigt ein Symbolbild des Windenergiekonverters während der Entwicklungsphase mit einer Rahmenkonstruktion und den dazugehörigen Abdeckbauteilen. Diese Bauweise wurde bei den sich derzeit in Betrieb befindlichen Anlagen nicht verwirklicht. Es soll nun weiter auf diese Bauart und auf deren Einsatzpotential für den Windturbinenmantel eingegangen werden.

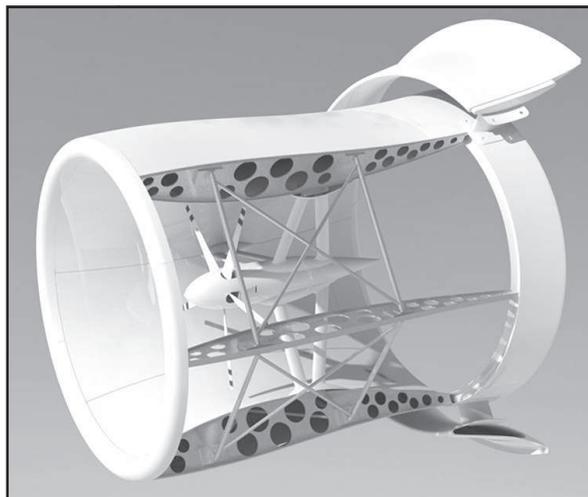


Abbildung 41: Differentialbauweise mit Rahmen<sup>123</sup>

Diese Variante lässt einige Spielräume für Werkstoff und Fertigungsverfahrensauswahl zu. Der Rahmen kann aus Metall, Kunststoff oder aus einer Mischung beider bestehen. Die Auswahl wird dabei aufgrund wirtschaftlicher Gründe und Stabilitätskriterien erfolgen. Die Anzahl der benötigten Spanten und Stringern ist ebenfalls ein wichtiger Faktor und muss bei dieser Ausführung besonders berücksichtigt werden, da sie erheblich den Fertigungs- und Montageaufwand beeinflusst. Gleiches trifft auf die Außenabdeckungen zu. Diese können aus dünnwandigen Metallblechen oder aus verschiedenen Kunststoffhalbzeugen hergestellt werden. Sie benötigen jedoch aufgrund der dreidimensionalen Form eine Vorformung, wozu wiederum Kosten für Werkzeuge anfallen.

Die Nutzung von Symmetrien scheint hier vorteilhaft, um eine möglichst geringe Anzahl an Werkzeugen zu benötigen. Mit einer Mehrfachteilung in verschiedene Richtungen entstehen Schalen, welche am Rahmen fixiert werden können. Es gilt nun, das optimale Verhältnis zwischen der Anzahl der Schalen und der Werkzeuggröße

---

<sup>122</sup>Vgl. Klußmann/Malik (2012), S. 254

<sup>123</sup>qpunkt GmbH (2013), Zugriffsdatum 9.10.2013

zu finden. Große Werkzeuge ermöglichen eine geringe Schalenzahl und damit einen geringeren Montageaufwand sowie eine einfachere Ausführung der Rahmenkonstruktion. Auf der anderen Seite erfordern sie eine höhere Einmalinvestition in das größere Werkzeug. Dieser Optimierungsschritt kann nur mit Unterstützung der Hersteller erfolgen. Des Weiteren ist noch zu erwähnen, dass durch diese Bauart auch Schäden an der Außenhülle leicht zu beseitigen sind. Defekte Schalenelemente können bei geeigneter Wahl der Verbindungselemente ohne weitere Demontage der Gesamtanlage einfach ausgetauscht werden. Dadurch lassen sich die Reparaturkosten während der gesamten Lebensdauer gering halten, vorausgesetzt die tragende Rahmenstruktur bleibt intakt. Auch eine Variation der Wandstärke und der Werkstoffart lässt sich verwirklichen. Damit kann an Stellen mit höherer Belastung, z.B. durch UV Einstrahlung an der Mantelaußenseite, ein Schalenelement mit anderen Eigenschaften zum Einsatz kommen als im Inneren. Nachstehend sind zwei Ausprägungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Werkstoffen für eine Halbschalenskonstruktion angeführt, siehe Tabelle 11 und Tabelle 10.

Tabelle 10: Morphologischer Kasten: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägungsmöglichkeiten</b>			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehrteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

Tabelle 11: Morphologischer Kasten: Differentialbauweise Metall Halbschalen

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägungsmöglichkeiten</b>			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehrteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

In weiterer Folge werden nun Fertigungsverfahren angeführt, die zur Herstellung der benötigten Oberflächengeometrie geeignet sind. Dabei sollen unterschiedliche Formgebungsvarianten verschiedener Werkstoffe gefunden und deren Eigenschaften festgehalten werden. Auf eine für die jeweilige Fertigungstechnik genau abgestimmte Konstruktionsausführung, kann aufgrund des hohen zeitlichen Aufwandes in dieser Arbeit nur am Rande eingegangen werden. Als Werkstoff kommen für die Mantelausführung metallische oder Werkstoffe aus Kunststoff, oder eine Kombination beider in Frage. Daher werden die nachstehenden Fertigungsverfahren in diese beiden Werkstoffkategorien getrennt.

### **Variante 3: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen (Tabelle 10)**

Kunststoffe haben in den letzten Jahrzehnten in vielen Bereichen der Technik durch ihre vielfältige Einsatzmöglichkeit Einzug gehalten. Sie bieten eine große Anzahl an Ver- und Bearbeitungsmöglichkeiten und sind zugleich günstig in den Rohstoffpreisen und von geringer Dichte. Formteile können großserienmäßig mit hoher Wirtschaftlichkeit und vielen Fertigungsverfahren automatisiert hergestellt werden. Ein besonderer Vorteil liegt darin, dass Kunststoffeigenschaften genau auf ihre Anwendung zugeschnitten werden können. Die Verarbeitungsverfahren von Kunststoffen lassen sich in Urformen und Umformen einteilen. Urformen bedeutet die direkte Formgebung von Halb- und Fertigerzeugnissen aus dem Rohstoff, welcher in verschiedenen Formen als Formmasse (Granulat, Pulver, Schnitzel,...) oder als flüssiger Ausgangsstoff vorliegen kann. Zu diesen Urformverfahren zählt das Spritzgießen in all seinen Verfahrensvarianten, Pressen und Spritzpressen, Kalandrieren, Extrudieren/Blasformen, Schäumverfahren sowie das Herstellen von faserverstärkten Formteilen. Beim Umformen erfolgt hingegen die Formgebung spanlos aus thermoplastischen Halbzeugen wie z.B. Folien, Platten oder Rohren. Diese Umformung wird Warmformen oder auch Thermoformen von Thermoplasten genannt.<sup>124</sup>

Für die Fertigung der Halbschalen aus Kunststoff bietet sich das Umformen aus Halbzeugen besonders an und kann auch für große dünnwandige Bauteile kostengünstig angewandt werden. Dieser Umformvorgang durch Thermoformen wird nun kurz erläutert.

#### ***Thermoformen***

Unter Thermoformen versteht man das Umformen thermoplastischer Halbzeuge zu Formteilen durch Erwärmen. Es hat den Ursprung im Tiefziehen von Metall, hat aber andere Prozessparameter. Größter Unterschied ist jedoch, dass beim Thermoformen

---

<sup>124</sup>Vgl. Grote/Feldhusen (2007), S. 76ff.

das Material nicht wie beim Metall in die Form nachrutschen kann und daher selten konstante Wandstärken erreicht werden können. Das Prinzip funktioniert im Wesentlichen so, dass das Halbzeug erwärmt und in einen weichen Zustand versetzt wird. Nun lässt es sich mit geringem Kraftaufwand in einem Werkzeug verformen, wo es abkühlt und seine Form nach dem Entformvorgang beibehält. Zu den häufig verwendeten Halbzeugen zählen PC, PMMA, PA und ABS. Thermoformverfahren finden in den meisten Fällen nur in einer Werkzeughälfte statt. Das ergibt den Vorteil, dass nur eine Werkzeughälfte bereitgestellt werden muss und dies spart Investitionskosten. Thermoformen steht meist in Konkurrenz zur Urformart Spritzgießen, weist jedoch einige Vorteile auf. Diese sind unter anderem die flexible Wandstärke, die geringeren Werkzeugkosten bei geringeren Stückzahlen, geringere Änderungskosten sowie die Herstellung großflächiger Formteile. Als Nachteil sind jedoch der geringere Gestaltungsspielraum und die ungleichmäßige Wandstärkenverteilung zu nennen.<sup>125</sup>

#### **Variante 4: Differentialbauweise Metall Halbschalen (Tabelle 11)**

Für großflächige Geometrien ist es naheliegend, bereits großflächig, dünnwandige Halbzeuge heranzuziehen. Aus diesen Blechhalbzeugen können mithilfe verschiedenster Umformtechniken viele Werkstückgeometrien verwirklicht werden. Durch ständige Weiterentwicklung der Maschinen, Werkzeuge und Materialien konnte die Flexibilität, getrieben von der Automobilindustrie, gesteigert werden und ermöglicht dadurch bereits eine wirtschaftliche Fertigung für Mittel- und Kleinserien.<sup>126</sup> Die in Frage kommenden Blechumformverfahren werden nun kurz beschrieben.

#### ***Tiefziehen***

Tiefziehen ist das wichtigste Herstellungsverfahren von Blechbauteilen mit dreidimensionaler Geometrie und wird bei Großserienproduktionen für den Automobilbau aber auch bei Mittel- und Kleinserien im Flugzeugbau eingesetzt. Das Verfahren ist so aufgebaut, dass ein Blechzuschnitt in einem Werkzeug platziert und mit einem Stempel in die Werkzeugform gepresst wird. Während dieser Umformung wird das Blech gedehnt und gestaucht. Dadurch treten örtliche Belastungsspitzen auf, die das Werkstück zerstören können und die zulässige Formänderung begrenzen. Man unterscheidet dabei zwischen zwei Verfahren bei der Herstellung. Dabei kommen einerseits starre Werkzeuge aber andererseits auch elastische Werkzeuge und Wirkmedien zum Einsatz. Bei der Verwendung starrer Werkzeuge werden zwei starre Werkzeugteile für die Formgebung verwendet. Diese Werkzeuge kommen jeweils nur für die Fertigung einer Bauteilgeometrie in Frage. Das zweite Verfahren verwendet ans-

---

<sup>125</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2007), S. 418ff.

<sup>126</sup>Vgl. Klocke/König (2006), S. 1ff.

tatt der zweiten starren Werkzeughälfte eine elastische. Diese elastischen Werkzeuge können entweder aus Gummi oder einer Membran mit einem Wirkmedium bestehen und sind universell einsetzbar. Durch diese Ausführung wird nur noch ein Werkzeug benötigt und reduziert bei Kleinserien deutlich die Werkzeugkosten. Nachteilig wirken sich jedoch die kürzere Werkzeugstandzeit und die geringere Ausbringung aus.<sup>127</sup>

### **Streckziehen**<sup>128</sup>

Das Streckziehen von Blechen wird ebenso wie das Tiefziehen im Automobil- und Flugzeugbau, aber auch im Schiffsbau verwendet. Dieses Verfahren ist vor allem bei der Herstellung von großflächigen Blechbauteilen bis zu 100 m<sup>2</sup> in Extremfällen im Vergleich zu anderen Herstellverfahren vorteilhaft. Dabei sind diese Bauteile häufig in einer oder mehreren Ebenen gekrümmt. Bei diesem Verfahren werden vorge-schnittene Blechstücke verschiedenster Form an gegenüberliegenden Kanten eingespannt. Diese Spannelemente können entweder fest sein oder translatorisch bzw. rotatorisch beweglich bleiben. Die Umformung erfolgt durch eine Zugbeanspruchung über die Fließgrenze des Werkstoffes über einem Formwerkzeug. Dabei verringert sich die Blechdicke und die Oberfläche vergrößert sich. Man unterscheidet dabei das einfache und das tangentielle Streckziehen.

Das **einfache Streckziehen** ist wie der Name auch schon andeutet, das einfachste Verfahren des Streckziehens für Blechteile ohne räumliche Krümmung. Dabei wird der Blechausschnitt zwischen zwei Spannzangen eingespannt. Diese beiden Zangen sind drehbar um ihre Längsachse gelagert und fixieren das Blech während des Umformvorganges und halten es unter Zugbelastung. Die für die Umformung benötigte Kraft wird durch einen Stempel mit einem Werkzeug, welches die gewünschte Blechinnenkontur aufweist, eingeleitet. Mit der Aufwärtsbewegung des Stempels beginnt sich das Blech am Werkzeug anzulegen und wird nach Überschreiten der Streckgrenze plastisch verformt. Dieser Vorgang ist beendet, sobald die Werkzeugkontur vom Blech vollständig angenommen wurde. Danach fährt der Stempel in seine Ausgangsposition zurück und das Bauteil kann nach Lösen der Spannelemente entnommen werden. Reibverhältnisse verhindern bei diesem Verfahren größere Dehnungen, sodass es nur für leichte Krümmungen Anwendung findet.

Im Gegensatz zum einfachen Streckziehen, wo die benötigte Zugspannung nur über den Stempel aufgebracht wird, verwendet das **tangentiale Streckziehen** zwei Vorgänge während des Umformprozesses. Es beginnt zunächst gleich wie das einfache

---

<sup>127</sup>Vgl. Klocke/König (2006), S. 323ff.

<sup>128</sup>Vgl. Klocke/König (2006), S. 365ff.

Streckziehen. Das Blech wird zwischen zwei gegenüberliegenden Spannelementen eingeklemmt. Danach fahren diese horizontal soweit auseinander, bis sie eine plastische Verformung zwischen 2-5 % hervorrufen. Die eigentlich formgebende Umformung erfolgt im zweiten Arbeitsschritt durch das Formwerkzeug. Bei aufrechtgehaltener Zugbeanspruchung wird das Blech mit kontinuierlich geregelter Geschwindigkeit tangential am Werkzeug angelegt. Damit keine Relativgeschwindigkeit zwischen Blech und Werkzeug entsteht, wird die Bewegung des Stempels und der Spannelemente gleichzeitig ausgeführt. Dadurch entstehen keine störenden Reibkräfte und das Dehnvermögen des Werkstoffes kann besser genutzt werden und ermöglicht damit größere Krümmungen auch in zwei Ebenen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass das Werkzeug auch durch die Bewegung der Spannelemente hinterzogen werden kann.

Diese beiden Verfahren können für die Herstellung von Blechteilen für die Mantelgeometrie in Frage kommen. Neben den bisher beschriebenen Lösungsvarianten, die alle auf der Differentialbauweise beruhen, werden nun mögliche Varianten der Integralbauweise angeführt.

#### **4.4.8 Lösungsvariantenentwicklung aus der Integralbauweise**

Die Integralbauweise verzichtet hingegen ganz auf die Funktionsaufteilung zwischen Formgebung und tragender Struktur, denn ein Bauteil übernimmt möglichst viele Funktionen zugleich. Es wird versucht, das Bauteil großflächig als ein Ganzes ohne schwächende Verbindungsstellen zu fertigen. Durch die großen Bauteile sind die dazu benötigten Werkzeug- bzw. Formkosten dementsprechend hoch und nur für größere Stückzahlen wirtschaftlich einzusetzen. Zusätzlich nimmt man noch schlechtes Schädigungs- und Reparaturverhalten in Kauf.<sup>129</sup>

Bei der Ausführung ist das Bauteil so zu gestalten, dass es den mechanischen bzw. den Anforderungen des Leichtbaus gerecht wird. Diese beiden Bedingungen erfüllen am besten geschlossene Querschnitte. Damit lässt sich trotz Werkstoffeinsparung die Steifigkeit des Bauteils erhöhen. Für die konstruktive Umsetzung gibt es viele unterschiedliche Möglichkeiten, die auf diesem Prinzip der geschlossenen Querschnitte beruhen.<sup>130</sup>

Wendet man die Integralbauweise auf den Windturbinenmantel an, vereint man die stützende Funktion des Rahmens mit der formgebenden Funktion der äußeren Schalelemente in einem Bauteil. Durch die Dimension des Mantels ist es vorteilhaft,

---

<sup>129</sup>Vgl. Klein (2013), S. 18

<sup>130</sup>Vgl. Kurz (2009), S. 79f.

eine Teilung vorzunehmen. Durch diese mehrteilige Ausführung erhält man handlichere Bauteilgrößen für Fertigung und Transport, aber auch kostengünstigere kleinere Werkzeuge. Dies hat aber Nachteile, was den Montageaufwand betrifft. Die einzelnen Elemente müssen nun so gestaltet werden, dass sie die aerodynamische Geometrie abbilden, dabei genügend Steifigkeit aufweisen und Anschlusselemente für die Verbindung mit anderen Baugruppen beinhalten. Da das Innenvolumen des Mantels sehr groß ist (1,33 m<sup>3</sup>), wird man danach streben, die Einzelemente als steife Hohlstrukturen auszuführen. Diese zusammengesetzt und mechanisch miteinander verbunden sollen dann den gesamten Windturbinenmantel ergeben. Es sollen nun mögliche Fertigungsverfahren für die Herstellung dieser Hohlkörper und geeignete Werkstoffe gefunden werden. Dabei werden nur jene Verfahren berücksichtigt, mit denen großvolumige Hohlkörper gefertigt werden können. Tabelle 12 zeigt eine Lösungsvariante einer Integralbauweise.

Tabelle 12: Morphologischer Kasten: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper

<b>Merkmal</b>	<b>Ausprägungsmöglichkeiten</b>			
Bauweise	Integral		Differential	
Teilung	einteilig		mehnteilig	
Wandmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	Holz
Wandaufbau	Massiv		Verbund	
Wandtechnik	Hohlkörper	Bespannung	Halbschalen	Vollmaterial
Strukturmaterial	Metall	Kunststoff	Verbund	keines

**Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper**

Im folgenden Abschnitt werden Fertigungsverfahren für größere Kunststoffhohlkörper näher erläutert. In der breiten Palette der verschiedenen Herstellungsverfahren für Kunststoffbauteile gibt es nur einige die sich besonders dafür eignen.<sup>131</sup>

***Rotationsgießen bzw. Rotationsformen***

Dieses Verfahren ist bereits seit Jahrzehnten bekannt für die Produktion großer Hohlbauteile, hat aber erst durch die Weiterentwicklung der Kunststoffwerkstoffe für komplexere Geometrien weitere Anwendungsgebiete erschlossen. Heute wird eine Vielzahl von technisch anspruchsvollen Bauteilen wie Kraftstofftanks, Luftansaugkanäle, Kajaks, usw. mithilfe dieser Fertigungstechnologie wirtschaftlich hergestellt. Beim Rotationsformen wird das flüssige oder pulverförmige Ausgangsmaterial in einem Hohlwerkzeug, dessen Innenkontur der gewünschten Außenkontur des Bauteils

<sup>131</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2007), S. 212ff.

entspricht, in einer Heizkammer mehrachsig rotiert. Durch die eingebrachte Wärme verflüssigt sich der pulverförmige Werkstoff, insofern dieser beim Einbringen noch nicht im flüssigen Zustand vorliegt, und legt sich durch die Rotationsbewegung an den Werkzeugwänden an. Durch die Prozessparameter Temperatur und Bewegung lässt sich die Wanddicke bestimmen. Nach der vollständigen Materialverteilung wird die rotierende Bewegung beibehalten und das Werkzeug in eine Kühlstation gebracht, wo das Material abkühlen und aushärten kann. Nach genügender Abkühlung kann das fertige Bauteil aus der Werkzeugform entnommen werden und ein neuer Produktionszyklus kann beginnen. Als Ausgangsmaterialien dienen hauptsächlich jene in Pulverform. Diese haben im Gegensatz zu Granulaten den Vorteil, dass sie bereits vor dem Aufschmelzen an den Werkzeugwänden haften bleiben und nach dem Aufschmelzen eine kompakte Haut bilden, die zugleich einen guten Wärmeübergang zu den inneren Materialschichten gewährleisten. Als Werkstoffe werden PE, PP, PC, PA und einige weitere eingesetzt. Vorteile bietet dieses Verfahren in den kostengünstigen Werkzeugen auch bei großen Bauteilen, und es ermöglicht bei diesen Baugrößen geringe Wanddicken und überdies das Integrieren von Inserts sowie Labels. Nachteilig ist jedoch die lange Zykluszeit durch das Aufheizen und das Abkühlen im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren.<sup>132</sup>

### ***Extrusionsblasformen***

Beim Fertigungsverfahren Blasformen kommen extrudierte, extrusionsgeblasene, oder spritzgegossene schlauchförmige Vorprodukte zum Einsatz. Diese werden im thermoplastischen Temperaturbereich in mehrteiligen gekühlten Werkzeugen mit Blasluft zu Hohlkörpern verformt. Diese Hohlkörper können beim Extrusionsblasformen Volumen zwischen einigen ml bis zu 10.000 Liter erreichen. Für die Werkstoffaufbereitung werden Extruder eingesetzt und es können damit sämtliche Polymerwerkstoffe verarbeitet werden, vorausgesetzt diese können das Eigengewicht des schlauchförmigen Vorformlings nach dem Ausstoßen tragen. Zusätzlich müssen sie eine durch das Hängen verursachte unkontrollierte Längenänderung verhindern. Der Vorformling wird, nachdem er die gewünschte Länge erreicht hat, vom mehrteiligen Werkzeug aufgenommen, dort positioniert und danach abgetrennt. Die beweglichen Werkzeuge quetschen danach den Schlauch ein und dichten somit den Vorformling ab, damit er im nächsten Prozessschritt mittels Druckluft von bis zu ca. 8 bar aufgeblasen werden kann und sich an die Werkzeuginnenkontur anlegt. Das Blasbauteil kühlt rasch an den gekühlten Werkzeugwänden ab und kann daher schnell wieder entformt werden. Die Druckluft, dabei wird oft tiefgekühlte Luft, CO<sub>2</sub> oder Stickstoff

---

<sup>132</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2007), S. 322ff.

eingesetzt, wird über einen so genannten Blasdorn, welcher gleichzeitig die Entformungsgeometrie trägt, oder über Nadeldüsen eingebracht. Man kann dieses Verfahren in zwei Betriebsweisen, die kontinuierliche und die diskontinuierliche Betriebsweise unterteilen, wobei der Unterschied in der Größe des zu fertigenden Bauteils liegt. In der kontinuierlichen Betriebsweise können Hohlkörper mit Massen von bis zu zwei Kilogramm gefertigt werden. Begrenzt wird dieser kontinuierliche Prozess vom maximalen Extruderdurchsatz. Der Vorformling wird abgetrennt und mit dem Werkzeug weiterbewegt, sodass der Vorformprozess kontinuierlich weiterlaufen kann. Bei großen Blasformbauteilen kann die Produktion des Vorformlings aufgrund des begrenzenden Ausstoßes des Extruders nicht mehr kontinuierlich erfolgen. Des Weiteren kühlt der vorgeformte Schlauch durch seine Größe und des langsamen Vorformvorganges am unteren Ende ab und wird auch zusätzlich noch ausgelängt. Um dieses Problem zu umgehen, wird die diskontinuierliche Betriebsweise mit einem Schmelzespeicher angewandt, indem die Schmelze zuerst vorgespeichert wird und dann in kurzer Zeit als Vorformling ausgestoßen werden kann. Ansonsten gleichen sich beide Betriebsweisen. Die Blaswerkzeuge werden entweder aus Stahl oder gegossenen Nichteisenlegierungen gefertigt und müssen eine gute Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Vorteil dieses Verfahrens ist die Möglichkeit der axialen Wanddickenvariation sowie kurze Zykluszeiten.<sup>133</sup>

### **4.5 Konzeptausarbeitung und Variantendarstellung**

Um diese einzelnen Lösungsvarianten miteinander vergleichen und bewerten zu können, müssen diese detaillierter ausgeführt werden und einen ähnlichen Entwicklungsstand aufweisen. Erst die genauere Betrachtung konstruktiver Details, wie z.B. der genauen Werkstoffwahl sowie der benötigten Fertigungsverfahren erlaubt eine Identifikation der Vor- bzw. Nachteile der Varianten. Da eine Ausführung aller beschriebenen Varianten zu umfangreich ist, werden nur jene Konzepte ausgearbeitet die sich aufgrund der gesammelten Informationen für eine Klein- bis Mittelserienfertigung bereits hervorgetan haben. Für die Auswahl werden qualitative Informationen der einzelnen bereits erläuterten Fertigungsverfahren herangezogen. Die ersten beiden Varianten beruhen auf dem Fertigungsverfahren des Prototyps und eignen sich aufgrund der hohen Fertigungs- und Materialintensivität nur bedingt für die Serienfertigung und werden daher in der Konzeptausarbeitung für eine Serienproduktion nicht mehr weiter betrachtet. Die Varianten 1 und 2 stellen vielmehr Übergangslösungen dar, bis eine Umstellung auf eine neue Fertigungstechnologie erfolgen kann. Es wer-

---

<sup>133</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2007), S. 274ff.

den daher detailliertere Gesamtkonzepte nur für die Varianten 3, 4 und 5 erstellt, wobei sich die Varianten 3 und 4 im Konzeptaufbau ähnlich sind.

Nachstehend sind alle fünf Lösungsvarianten nochmals angeführt. Des Weiteren beinhaltet die Aufzählung bereits Untervarianten, die in Kooperation mit Fertigungspartner entwickelt worden sind und auf die in weiterer Folge genauer eingegangen wird.

**Variante 1:** Reduzierung der Wandstärke

**Variante 2:** Sandwichbauweise

**Variante 3:** Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen

3.1 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile

3.2 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile

**Variante 4:** Differentialbauweise Metall Halbschalen

4.1 Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Stahl

4.1 Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Aluminium

**Variante 5:** Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper

5.1 Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE

5.2 Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PP

5.3 Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/3 PE

Es werden nun die für einen Vergleich auszuarbeitenden Varianteneigenschaften festgelegt und erläutert. Diese werden bereits im Hinblick auf die Bewertungskriterien für die Lösungsbewertung dementsprechend gewählt.

### **Definition des Konzeptes inkl. Fertigungsverfahren und Werkstoffe**

Die Konzeptausarbeitung beinhaltet eine genauere Definition der gewählten Ausprägungsmerkmale des Morphologischen Kastens und die damit zusätzlich verbundenen Umsetzungsmöglichkeiten. Zu diesen zählen vor allem das Fertigungsverfahren und die Werkstoffe, welche letztendlich erheblichen Einfluss auf das Gesamtkonzept und deren Herstellkosten haben (vgl. Kapitel 3.3). Mit dieser Definition wird auch die Abhängigkeit von den Lieferanten und deren Know-how festgelegt.

### **Definition einer konstruktiven Ausführung zur Kostenbestimmung**

Für die wichtige entwicklungsbegleitende Kostenabschätzung ist die reine Konzeptdefinition noch zu unscharf. Um genauere Kosteninformationen zu erlangen, ist eine Konzeptausarbeitung der konstruktiven Ausführung notwendig. Dadurch kann der Material- und Fertigungsaufwand, der Montage-, Transport-, aber auch ein möglicher Reparaturaufwand genauer abgeschätzt und erheblich beeinflusst werden. Damit

werden auch die Fähigkeit einer späteren konstruktiven Weiterentwicklung, sowie die Einflussfaktoren auf die Umwelt, wie das äußere Erscheinungsbild und eine mögliche Geräuschbelastung weitestgehend definiert.

### **Bestimmung des Gewichtes**

Aufgrund des hohen Materialkostenanteils im Maschinenbau, siehe Kapitel 3.3, ist das Gewicht zusammen mit der Werkstoffwahl besonders wichtig. Zusammen mit der Auslegung, bestimmt durch die Belastungen und Sicherheiten, können sowohl Materialkosten als auch das Gewicht durch Einsatz der Leichtbaustrategien (Kapitel 4.4.1) verringert werden. Auf Basis der zu bestimmenden Konstruktion kann dieses Gewicht mit hoher Genauigkeit vorausgesagt werden.

### **Bestimmung des Transportvolumens**

Für den Vertrieb von Bedeutung sind die benötigten Transportkosten der Einzelkomponenten des Windkraftkonverters zum Bestimmungsstandort. Dabei spielt sowohl das Transportvolumen aufgrund der Dimensionen des Windturbinenmantels, als auch eine effiziente Verpackungsanordnung eine entscheidende Rolle. Zur Berücksichtigung dieser werden die Komponenten für den Transport angeordnet und deren Volumen bestimmt. Als Transportmittel wird die Ladefläche bzw. das Volumen eines Sattelzuges gewählt (Länge: 13,6 m x 2,5 m; Höhe 3 m). Die Kosten eines solchen Transportmittels sind mit ca. 1,3 €/km zuzüglich Roadpricing (durchschnittlich 0,33 €) zu beziffern.<sup>134</sup>

### **Bestimmung des Montageaufwands**

Wie in Kapitel 3.3 erwähnt, können Montagekosten hohe Herstellkostenanteile verursachen und werden vor allem von der Anzahl der Montagevorgänge und der Montage-technologie bestimmt. Zusätzlich soll noch das maximale Einzelteilgewicht für die Handhabung während des Fügeprozesses mit einfließen. Mit diesen drei Parametern soll der Endmontageaufwand abgebildet werden, da eine Kostenabschätzung anhand der groben Konzeptausarbeitung mit zu hohen Unsicherheiten verbunden ist. Verbindungen können prinzipiell auf unterschiedlichste Art und Weise erfolgen, wobei sich deutliche Unterschiede im Montageaufwand bzw. der Vorbereitung zeigen. Wichtig dabei ist auch, wo diese Montagevorgänge stattfinden, erst direkt beim Endkunden oder ob eine Vormontage vorgenommen werden kann. Eine gesamte Vormontage des Mantels beeinflusst wiederum die entstehenden Transportkosten durch den Anstieg des Transportvolumens, kann aber dafür Montagekosten und Montage-

---

<sup>134</sup>Fritz Mayer Internationale Spedition & Transport GmbH (2013)

zeiten, durch mögliche unterstützende Einrichtungen am eigenen Standort reduzieren.

### **Bestimmung Herstellkosten bzw. Bezugskosten**

Für den anschließenden Variantenvergleich sind die variablen Herstellkosten der möglichen Eigenfertigteile und für die fremdgefertigten Teile die Bezugskosten zu bestimmen. Die Transportkosten werden hier nicht berücksichtigt, da der Transportaufwand in das Transportvolumen mit einfließt und die einzelnen Transportkosten stark vom Absatzmarkt und den Produktionsstandorten abhängen, diese aber noch nicht bekannt sind. Des Weiteren wird im Zuge dieser Berechnung die Möglichkeit einer internen Wertschöpfung identifiziert und deren Höhe abgeschätzt.

#### 4.5.1 Variante 3.1: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Wie bereits erwähnt, können durch Anwendung der Differentialbauweise die Bauteile und die Werkstoffe je nach Anforderung gestaltet und zu einer Gesamtstruktur verbunden werden. Wie aus dem Morphologischen Kasten der Variante 3 (Tabelle 10) und Kapitel 4.4.7 hervorgeht, ist eine Mehrfachteilung aufgrund der geringeren Werkzeugkosten durch kleinere Werkzeuge, der leichteren Handhabung beim Transport und durch eine möglicherweise einfachere Gestaltung der Konstruktion vorteilhaft. Nachteile entstehen jedoch durch den erhöhten Verbindungs- bzw. Fügeaufwand bei der Montage durch die Mehrteile. Es gilt daher eine optimale Teilungszahl sowie die Teilungsrichtung des Windturbinenmantels zu finden um den Anforderungen gerecht zu werden. Betrachtet man den Mantelgeometriequerschnitt in Mantellängsrichtung, erkennt man das aerodynamische Tragflächenprofil. Dieses Profil bildet die Kontur der rotationssymmetrischen Oberfläche. Es ist nun naheliegend, diese Rotationssymmetrie bei der Teilung zu nutzen und mehrere Segmente mit diesem Tragflächenprofil in Umfangsrichtung anzuordnen. Um aus diesen Umfangssegmenten jene Halbschalen zu erhalten, welche an der Stützstruktur befestigt werden können, ist eine weitere Teilung von Nöten. Bei dieser Teilung muss bereits zusätzlich auf das eingesetzte Fertigungsverfahren Rücksicht genommen werden, da dementsprechend Werkzeuge fertigungsgerecht gestaltet werden müssen. Für die gewählten Kunststoffhalbschalen, welche durch Thermoforming hergestellt werden sollen, ist eine Teilung ohne oder mit geringen Hinterschneidungen zulässig. Aus diesem Grund erfolgt die zweite Teilung der Segmente von der Profilmase bis zur Hinterkante (Abbildung 42, rechts). Die so erhaltenen Halbschalen, Außenschale und Innenschale, können damit einfach tiefgezogen und an der Stützstruktur mit unterschiedlichen Verbindungstechnologien montiert werden.

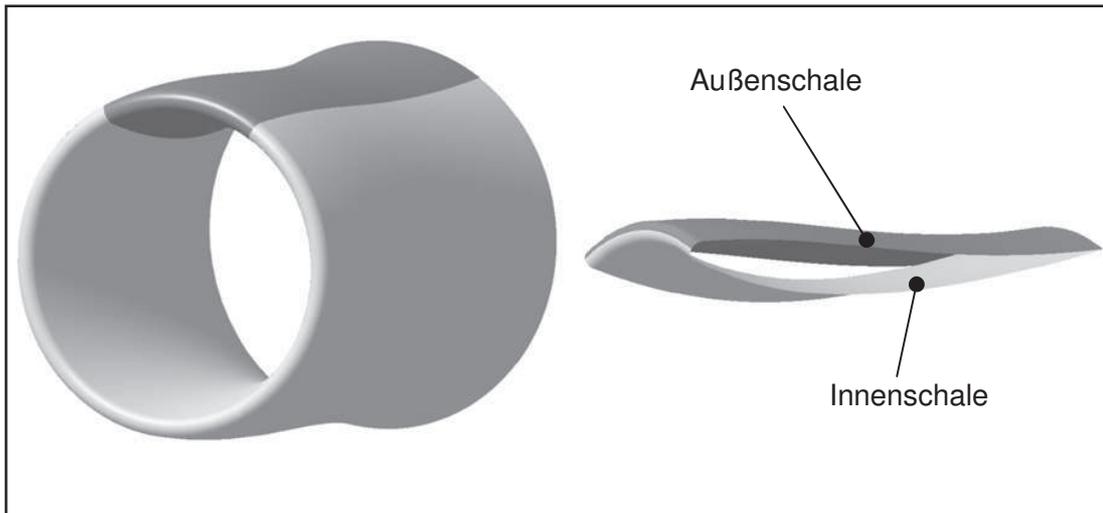


Abbildung 42: Konzept Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile

Die innere tragende Struktur wird erheblich von der Anzahl der Teilungen in Umfangsrichtung beeinflusst. Die Struktur soll genügend Steifigkeit aufweisen, um die auftretenden Kräfte aufnehmen zu können, eine Montage mit den Halbschalen ermöglichen und soll außerdem leicht und kostensparend ausgeführt werden. Aus diesem Grund sollen einfache Konstruktionselemente zum Einsatz kommen. Diese sind weit verbreitete, standardisierte Normteile und Halbzeuge. Die einfachste Möglichkeit, aus diesen Elementen eine steife Struktur zu konstruieren, ist ein Fachwerk, zusammengesetzt aus standardisierten Stabelementen. Um den Einsatz dieser Elemente zu prüfen und die Umfangsteilung dementsprechend auszulegen, ist der Windturbinenmantel dreidimensional zu untersuchen. Eine zu geringe Teilung macht eine Struktur aus rein ebenen Elementen unmöglich, eine zu große Anzahl an Teilungen macht die Struktur wiederum aufwändiger in der Fertigung und Montage und erhöht das Eigengewicht nur unnötig. Daher ist diese Definition sorgfältig zu treffen.

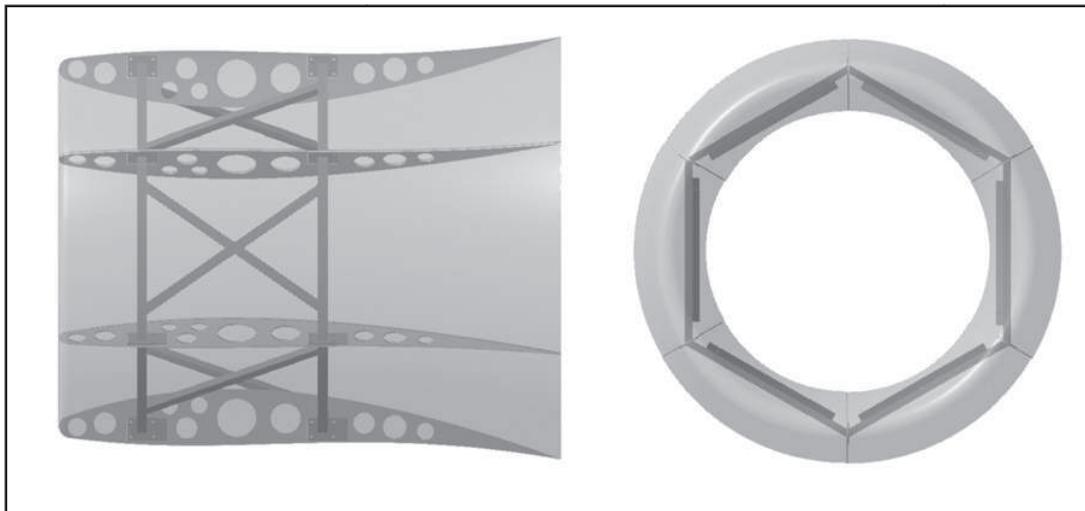


Abbildung 43: Teilung der Rahmenstruktur

Abbildung 43 zeigt eine Sechsteilung, die eine rein ebene Fachwerkstruktur aus Gleichteilen ermöglicht. Der Aufbau der inneren Mantelstruktur setzt sich aus Streben in Umfangsrichtung und den Spanten in Mantellängsrichtung zusammen, wobei sich die Spanten jeweils an den Verbindungsbauteilen der Streben befinden und mit ihnen fixiert werden. An diesen Elementen werden alle weiteren Baugruppen – Lagerbaugruppe, Rotor-Nabenverband und die Halbschalen befestigt. Dieses Konzept verwendet den Werkstoff ABS mit einer UV-beständigen Deckschicht für die Halbschalen, sowie einen Kunststoffwerkstoff für die Spanten und metallische Halbzeuge für die Fachwerksstruktur, wobei hier unterschiedliche metallische Werkstoffe, Fertigungsverfahren und Montagetechnologien zur Herstellkostenreduktion Verwendung finden können. Zur Vervollständigung des Windturbinenmantels fehlt noch die Rahmenstruktur, an denen die Halbschalen befestigt werden. Die Abschätzung dieser Herstellkosten erfolgt mithilfe einer Konzeptzeichnung im CAD-Programm um den Materialbedarf und den Fertigungsaufwand zu bestimmen.

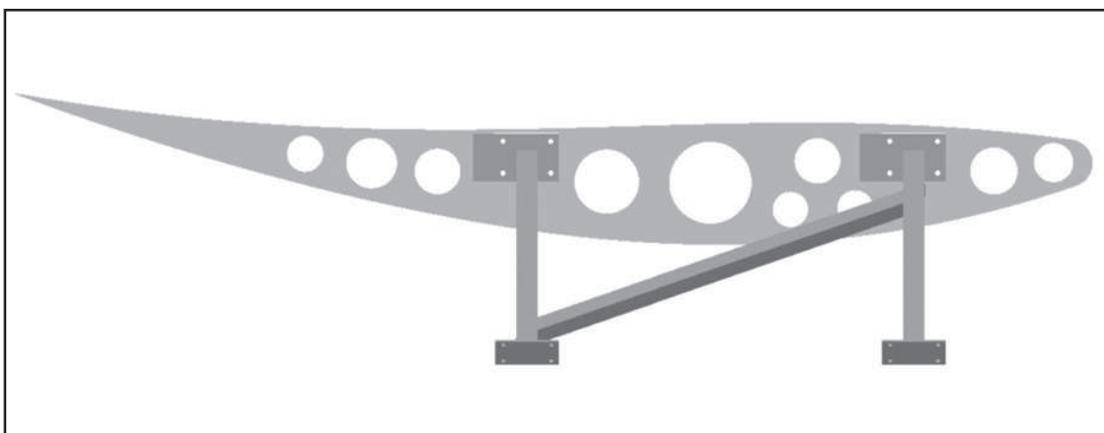


Abbildung 44: 1/6 Teilsegment der Rahmenstruktur

Abbildung 44 zeigt ein mögliches Teilsegment der inneren Rahmenstruktur. Der gesamte Windturbinenmantel besteht aus sechs identischen Schweißbaugruppen, welche miteinander verschraubt werden und umfasst die folgenden Einzelkomponenten. Die Materialkosten lassen sich wie folgt zusammensetzen:

Werkstoffpreise: Aluminium 3 €/kg<sup>135</sup>, Kunststoff ABS 3,8 €/kg<sup>136</sup>

	<b>Gewicht</b>	<b>Halbzeug</b>	<b>Materialkosten</b>
2x Parallelstrebe Aluminium	1,62	kg	4,86 €
1x Diagonalstrebe Aluminium	1,00	kg	3,00 €
2x Anschlussplatte Spant Aluminium	0,32	kg	0,96 €
2x Anschlussplatte Aluminium	0,24	kg	0,72 €
1x Spant			
Kunststoff 5m oder Aluminium 2,5 mm	2 bzw. 2,5	kg	7,60 €
Segment 1/6-Teilung	4,26	kg	17,14 €
<b>sechs Segmente pro Mantel</b>	<b>25,56</b>	<b>kg</b>	<b>102,84 €</b>

Diese Rahmenstruktur soll bei allen Lösungsvarianten mit der Differentialbauweise Verwendung finden und ist als interne Wertschöpfungsmöglichkeit anzusehen.

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Gesamtgewicht des Windturbinenmantels ohne Lagerung ergibt sich wie folgt:

Rahmenstruktur	26	kg
Halbschalen 3 mm Kunststoff	63	kg
<b>Gesamtgewicht/Mantel</b>	<b>89</b>	<b>kg</b>

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Das benötigte Transportvolumen, bezogen auf die Anzahl an Windturbinenmänteln, die in einem Sattelzug Platz finden, lässt sich aus den Abmessungen der Einzelkomponenten bestimmen. Dabei werden 20 Windturbinenmäntel als eine Transporteinheit zusammengefasst, um den Volumenbedarf einfacher zu ermitteln. Abbildung 45 veranschaulicht den Transportvolumenbedarf bezogen auf einen Sattelzug mit 13,6 m Länge, 2,5 m Breite und einer Höhe von 3 m. Man erkennt, dass etwa vier Einheiten zu je 20 Stück, gesamt also 80 Windturbinenmäntel, transportiert werden können. Natürlich können auch Transportmöglichkeiten mit kleineren Volumina zum Einsatz

<sup>135</sup>ZULTNER Metall GmbH (2013), Zugriffsdatum 30.11.2013

<sup>136</sup>Senoplast Klepsch & Co. GmbH (2013)

kommen. Diese Abschätzung dient vor allem dem direkten Vergleich der verschiedenen Lösungsvarianten.

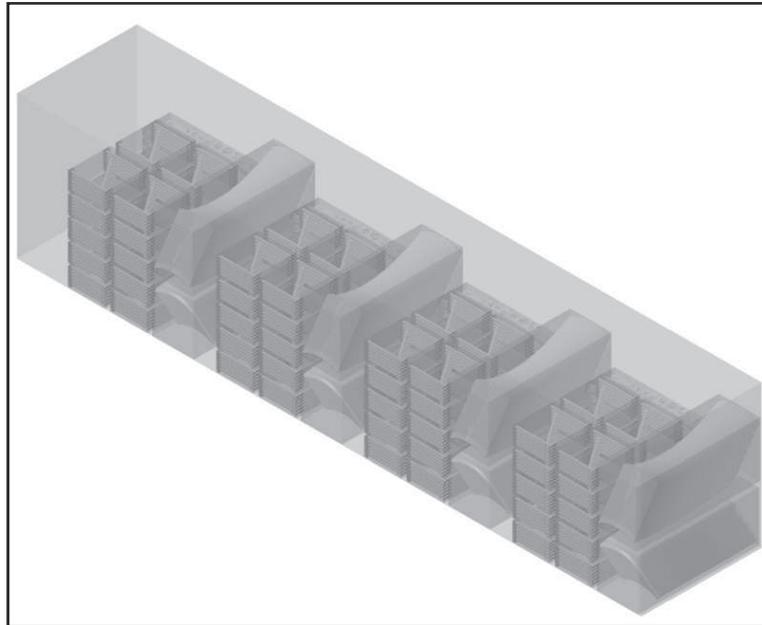


Abbildung 45: Transportvolumen Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Die reine rotationssymmetrische Mantelgeometrie, ohne Schnittstellen zu den weiteren Baugruppen, besteht aus insgesamt 24 Elementen, welche miteinander verbunden werden müssen. Für die Rahmenelemente bieten sich einfache Schraub- oder Nietverbindungen an. Diese können auch beim Endkunden ohne Vormontage durchgeführt werden. Etwas komplizierter gestaltet sich die Verbindung zwischen dem Rahmen und den Kunststoffhalbschalen. Für eine stabile Verbindung ist eine über die gesamte Länge konstante kraftschlüssige Verbindung gegenüber punktförmigen Montagetechnologien zu bevorzugen. Kleben gewährleistet eine solche flächige Kraftübertragung, zieht aber in der Montagevorbereitung und in den Montagebedingungen einen erheblichen Mehraufwand nach sich. Um reproduzierbare Verbindungsqualitäten zu erreichen, müssen Montagevorbereitung und Umgebungsbedingungen genau abgestimmt werden. Diese Voraussetzungen machen eine Endmontage im Werk unumgänglich und ermöglichen nur eine aufwändige Endmontage beim Kunden. Des Weiteren ist eine Reparatur nach aufgetretenem Schadensfall schwer durchführbar. Andere Verbindungstechnologien, wie etwa Schrauben und Nieten (siehe Kapitel 0), können im Gegensatz dazu ohne größeren Vorbereitungsaufwand auch am Bestimmungsstandort durchgeführt werden und ermöglichen auch einfache Instandsetzungsarbeiten. Das ebenfalls für die Montage wichtige Maximalgewicht

eines Einzelbauteils beträgt 5,7 kg.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Mit einer entwicklungsbegleitenden Kalkulation sollen nun die Kosten dieser Fertigungsvariante abgeschätzt werden, um die Zielerreichung zu prüfen und um Kostenvergleiche durchführen zu können. Dazu wird für die fremdgefertigten Kunststoffhalbschalen ein Angebot eingeholt und für die Eigenfertigung eine Herstellkostenabschätzung durchgeführt. Diverse Klein- bzw. Normteile können bei dieser Grobabschätzung in der Konzeptphase noch keine vollständige Berücksichtigung finden. Nachfolgend befindet sich das Angebot der Unternehmung JVP Praha a.s. für die tiefgezogenen Kunststoffhalbschalen mit einer Teilung in sechs Innen- bzw. Außen-schalen. Dieses beinhaltet einen Prototyp dieses Herstellungsverfahrens mit Werkzeugen aus Holz sowie Werkzeugen aus Aluminium zur Serienfertigung. Als Halbzeug wird der Kunststoff Senosan der Senoplast Klepsch & Co. GmbH eingesetzt.

**Angebot:**<sup>137</sup>

**Prototyp Halbschalen**

Prototyp Kosten/Mantel	1.310,00	€
Werkzeug Holz Innen	2.950,00	€
Werkzeug Holz Außen	2.150,00	€

**Serienproduktion Halbschalen**

Serien Kosten/ Mantel	635,00	€
Werkzeug Aluminium Innen	9.250,00	€
Werkzeug Aluminium Außen	7.950,00	€
Werkzeug Beschnitt Innen	1.650,00	€
Werkzeug Beschnitt Außen	1.590,00	€

Die Rahmenstruktur verursacht Materialkosten von etwa 103 €. Verwendet man diese als Basis zur Bestimmung der Herstellkosten und geht von einem durchschnittlichen Materialkostenanteil im Maschinenbau von ca. 43 %, wie in Kapitel 3.3. beschrieben aus, erhält man gesamte variable Herstellkosten der Rahmenstruktur von etwa 240 €, dabei noch nicht berücksichtigt ist die Anbindung der Lagerbaugruppe und der Baugruppe Generator-Naben-Verband.

Daraus ergibt sich folgende Kostenstruktur für diese Fertigungsvariante der Serienproduktion:

---

<sup>137</sup>JVP Praha a.s, Angebot 2.10.2013

**direkt zurechenbare Herstellkosten Kunststoffhalbschalen 12 Teile**

Rahmenstruktur (int. Wertschöpfung)	240,00	€
Halbschalen 3mm Kunststoff ABS	635,00	€
<b>Kosten/Mantel</b>	<b>875,00</b>	<b>€</b>

**Einführungskosten inkl. aller Werkzeuge und Prototyp**

Prototyp Kosten/Mantel	1.310,00	€
Werkzeug Holz Innen	2.950,00	€
Werkzeug Holz Außen	2.150,00	€
Werkzeug Aluminium Innen	9.250,00	€
Werkzeug Aluminium Außen	7.950,00	€
Werkzeug Beschnitt Innen	1.650,00	€
Werkzeug Beschnitt Außen	1.590,00	€
<b>Gesamteinführungskosten einmalig</b>	<b>26.850,00</b>	<b>€</b>

**4.5.1 Variante 3.2: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile**

**Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Eine weitere Teilungsvariante zeigt das Konkurrenzprodukt der donQi Turbine, siehe Kapitel 0. Die Teilung des Mantels erfolgt hier in einen vorderen Ring, der sich über den gesamten Umfang erstreckt, zwei große Außenschalen, einem Innenring sowie einem Außenring am Diffusor-Austritt, wobei die Formgebung der donQi Turbine nur durch partielle Tiefziehvorgänge durchgeführt wird und sich einzelne Mantelteile aus ebenen, elastisch verformten Kunststoffteilen zusammensetzen. Die dadurch erreichte Oberflächenkontur entspricht nur zum Teil der aerodynamisch optimalen Form und es werden aufgrund der kostengünstigeren Fertigung Abstriche in Kauf genommen. Alle Elemente, die Schalenelemente sowie der Generator-Naben-Verband, werden dabei an einem tragenden Metallring in der Mitte des Mantels befestigt. Für die Turbine 01 ist durch die doppelte Diffusorlänge eine ausschließlich zentrale Befestigung an einem solchen Ring zu hinterfragen. Es kann daher auch für diese oder ähnliche Teilungen die bereits bekannte Rahmenstrukturvariante herangezogen werden. Die aerodynamische Kontur des Mantels ist im Gegensatz zum Konkurrenzprodukt bestmöglich wiederzugeben und die Teilung erfolgt daher, im Fall der Turbine 01 in einen vorderen Ring und in drei Außen- und Innenschalen (Abbildung 46). Die Rahmenstruktur ist ident zur vorherigen Variante.

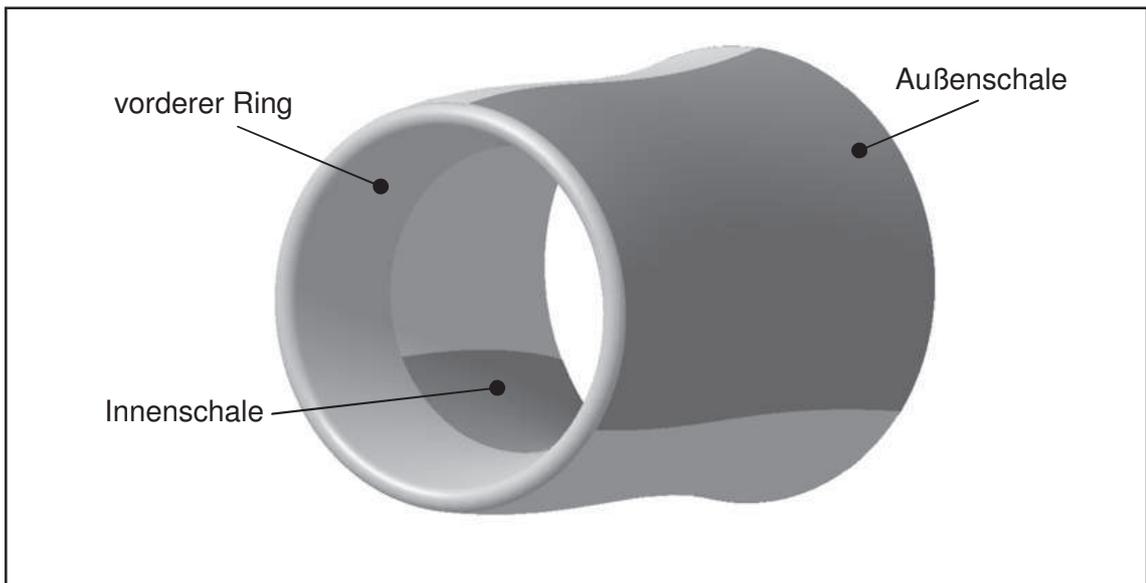


Abbildung 46: Konzept Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Gewicht ist aufgrund desselben Werkstoffes gleich anzusetzen wie bei der vorangegangenen Teilungsvariante.

Rahmenstruktur	26	kg
Schalen 3 mm Kunststoff ABS	66	kg
<b>Gesamtgewicht/Mantel</b>	<b>92</b>	<b>kg</b>

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Das Transportvolumen dieser Teilung der Oberfläche ergibt sich zu etwa 60 Stück pro Sattelzug. Abbildung 47 zeigt eine mögliche Transportanordnung.

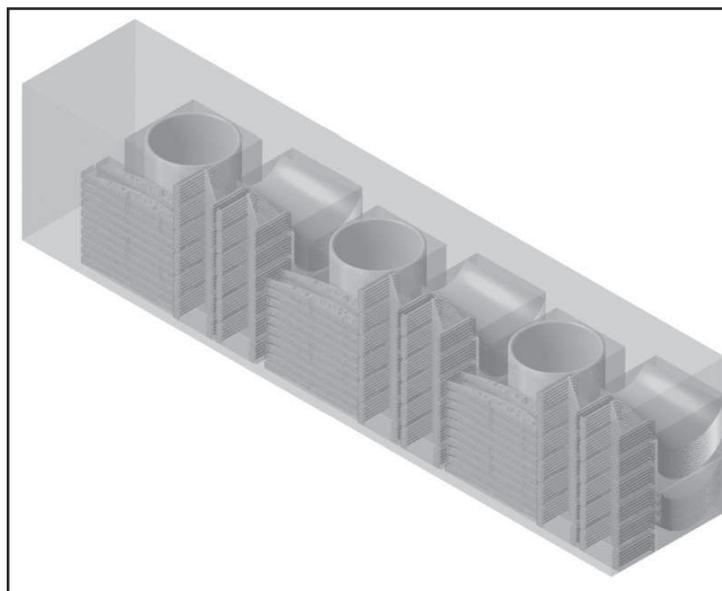


Abbildung 47: Transportvolumen Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Die Montage der Schalenelemente am Rahmen kann wie bei der donQi Windkraftanlage durch Nieten erfolgen. Aber auch Kleben bzw. Verschraubungen sind möglich. Dabei ist, wie bereits bei der anderen Teilungsvariante erwähnt, auf den Montageaufwand beim Kleben und auf eine benötigte Vormontage zu achten. Die zu fügende Teileanzahl beläuft sich auf 19 Teile, die mechanisch zum Mantel verbunden werden müssen und das maximale Einzelteilgewicht ist hierbei 11,2 kg.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Als Fertigungspartner kommt wiederum die Unternehmung JVP Praha a.s. zum Einsatz. Das Angebot umfasst ein Prototypenwerkzeug aus Holz, einen Prototypen und Serienwerkzeuge aus Aluminium und den Serienpreis eines Mantels.

**Angebot:**<sup>138</sup>

**Prototyp Halbschalen**

Prototyp Kosten/Mantel	1.450,00	€
Werkzeug Holz Innen	3.688,00	€
Werkzeug Holz Außen	2.680,00	€

**Serienproduktion Halbschalen**

Serien Kosten/Mantel	1.040,00	€
Werkzeug Aluminium Innen	11.563,00	€
Werkzeug Aluminium Außen	9.938,00	€
Werkzeug Beschnitt Innen	2.063,00	€
Werkzeug Beschnitt Außen	1.988,00	€

Die sich daraus ergebende Kostenstruktur sieht wie folgt aus:

**direkt zurechenbare Herstellkosten Kunststoffhalbschalen 7 Teile**

Rahmenstruktur (int. Wertschöpfung)	240,00	€
Schalen 3mm Kunststoff ABS	1.040,00	€
<b>Kosten/Mantel</b>	<b>1.280,00</b>	<b>€</b>

**Einführungskosten inkl. aller Werkzeuge und Prototyp**

Prototyp Kosten/Mantel	1.450,00	€
Werkzeug Holz Innen	3.688,00	€
Werkzeug Holz Außen	2.680,00	€
Werkzeug Aluminium Innen	11.563,00	€
Werkzeug Aluminium Außen	9.938,00	€

---

<sup>138</sup>JVP Praha a.s, Angebot 2.10.2013

Werkzeug Beschnitt Innen	2.063,00	€
Werkzeug Beschnitt Außen	1.988,00	€
<b>Gesamteinführungskosten einmalig</b>	<b>34.340,00</b>	<b>€</b>

#### 4.5.2 Variante 4.1: Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Stahl

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Die Lösungsvariante 4 ist bis auf das Material der Halbschalen ident mit der Lösungsvariante 3 mit 12 Teilen (Kapitel 4.5.1). Die Halbschalen werden aus metallischen Halbzeugen durch Tiefziehen in einem Werkzeug dreidimensional plastisch verformt, siehe Kapitel 4.4.7. Dadurch entsteht das benötigte aerodynamische Tragflächenprofil. Die Teilung erfolgt auf dieselbe Art und Weise wie bei den Kunststoffhalbschalen in Innen- bzw. Außenschale (Abbildung 42). Ebenso wird die bereits vorgestellte Rahmenstruktur eingesetzt (Abbildung 44). Bei den metallischen Werkstoffen ist im Gegensatz zur Kunststoffvariante besonders auf den Korrosionsschutz und die Materialpaarung zu achten. Daher wird für die Halbschalen ein korrosionsbeständiges, tiefziehgeeignetes, elektrolytisch verzinktes Blech herangezogen. Dieser Werkstoff zeichnet sich besonders durch seine geringen spezifischen Kosten aus.

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Gewicht dieser Halbschalenvarianten für den gesamten Windturbinenmantel ergibt sich wie folgt:

Rahmenstruktur	26	kg
Halbschalen 1 mm Stahlblech verzinkt	148	kg
<b>Gesamtgewicht/Mantel</b>	<b>174</b>	<b>kg</b>

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Die Bestimmung des Transportvolumens erfolgt auf die selbe Art und Weise, wie für die Konzeptvariante 3 (12 Teile) erfolgt ist. Aufgrund der gleichen Konstruktion ist der Transportvolumenbedarf gleich hoch anzusetzen und liegt bei 80 Stück, siehe Abbildung 45.

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Ähnlich verhält es sich ebenfalls bei der Montage. Diese Variante besteht auch aus 24 Komponenten, die miteinander verbunden werden müssen. Der Rahmen kann, wie bereits beschrieben verschraubt werden. Die metallischen Halbschalen können geschraubt oder wie im Flugzeugbau üblich, einfach vernietet werden. Die Endmontage kann mit diesen weit verbreiteten Verbindungstechnologien ohne weiteres beim

Kunden durchgeführt werden. Das Gewicht eines Einzelteiles beträgt bei dieser Lösungsvariante 13,4 kg.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Für diese Variante gilt es ebenfalls eine Kostenabschätzung durchzuführen, wobei ein Großteil der Berechnung aus der Lösungsvariante 3 übernommen werden kann. Für die fremdgefertigten Halbschalen ist ein Werkzeugbauer und Blechverarbeiter als Kosteninformationsquelle zu kontaktieren. Dazu wird ein Angebot des Unternehmens VNT Tool GmbH eingeholt, dieses beinhaltet die nachstehenden Angaben.

**Angebot:**<sup>139</sup>

**Halbschalen elektrolytisch verzinktes Blech 1mm DC01 ZE 50/50**

1/6 Halbschale Innen €/Stk.	19,13	€
1/6 Halbschale Außen €/Stk.	19,13	€

**Werkzeugkosten**

Halbschale Innen	57.000,00	€
Halbschale Außen.	57.000,00	€

**Gesamteinführungskosten einmalig 114.000,00 €**

Unter Berücksichtigung der Kosten des Rahmens, die bereits bei der vorangegangenen Bauweise abgeschätzt wurden, ergeben sich die gesamten Herstellkosten eines Windturbinenmantels folgendermaßen:

**direkt zurechenbare Herstellkosten elektrolytisch verzinktes Blech 1mm DC01 ZE 50/50**

Rahmenstruktur (int. Wertschöpfung)	240,00	€
Halbschalen 1 mm Stahlblech verzinkt	229,56	€
<b>Kosten/Mantel</b>	<b>469,56</b>	<b>€</b>

#### 4.5.1 Variante 4.2: Differentialbauweise Metall Halbschalen 1/6 Alu

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Als Alternativwerkstoff zum verzinkten Blech bieten sich Aluminiumlegierungen an, wie sie auch oft im Flugzeugbau aufgrund ihrer geringen Dichte zum Einsatz kommen. Der Fertigungsprozess ist ident mit jenem der Stahlblechvariante. Dabei entspricht der konstruktive Aufbau exakt jenem der Kunststoff- und Blechhalbschalen (Kapitel 4.5.1 und 4.5.2).

---

<sup>139</sup>VNT Tool GmbH, Angebot 28.10.2013

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Gesamtgewicht, wiederum zusammengesetzt aus der Rahmenstruktur und den Halbschalen, beläuft sich auf:

Rahmenstruktur	26	kg
Halbschalen 1 mm Aluminium	51	kg
<b>Gesamtgewicht/Mantel</b>	<b>77</b>	<b>kg</b>

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Das Transportvolumen kann aus Abbildung 45, der vorangegangenen Kunststoff-halbschalenvariante mit derselben Teilung, entnommen werden und beläuft sich auf ungefähr 80 Windturbinenmäntel pro Sattelzug.

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Als Montagetechnologien können, wie für die Stahlblechvariante, für die Halbschalen vorzugsweise Niete und Schrauben eingesetzt werden. Die Teileanzahl beträgt auch hier 24 Stück und das maximale Einzelteilgewicht beläuft sich für diese Aluminiumvariante auf 4,6 kg.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Als Hersteller dieser Aluminiumhalbschalen kommt wiederum das Unternehmen VNT Tool GmbH zum Einsatz. Dieses legte ein Angebot mit dem folgenden Inhalt vor.

**Angebot:**<sup>140</sup>

**Halbschalen Aluminium 1mm Al MG 3**

1/6 Halbschale Innen €/Stk.	28,32	€
1/6 Halbschale Außen €/Stk.	28,32	€

**Werkzeugkosten**

Halbschale Innen	57.000,00	€
Halbschale Außen.	57.000,00	€

**Gesamteinführungskosten einmalig 114.000,00 €**

Daraus ergeben sich folgende direkt zurechenbare Herstellkosten:

**direkt zurechenbare Herstellkosten Aluminium 1mm Al MG 3**

Rahmenstruktur (int. Wertschöpfung)	240,00	€
Halbschalen	339,84	€
<b>Kosten/Mantel</b>	<b>579,84</b>	<b>€</b>

---

<sup>140</sup>VNT Tool GmbH, Angebot 28.10.2013

#### 4.5.2 Variante 5.1: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Diese Lösungsvariante vereint, durch die Integralbauweise die formgebende und tragende Funktion in einem Bauteil. Aus Kunststoff soll ein Hohlkörper geformt werden, welcher diese beiden Aufgaben erfüllen kann. Als bevorzugte Fertigungstechnologie wird hier der Rotationsguss eingesetzt, da beim Extrusionsblasformen, laut Hersteller, Probleme bei eng aneinander liegenden Wandinnenflächen auftreten, die den Formvorgang beeinträchtigen. Auch bei dieser Lösungsmöglichkeit ist ebenfalls, wie bei der vorangegangenen, eine Teilung von Vorteil, um die Größe der Bauteile zu verringern. Positiv beeinflusst wird dadurch der Transportaufwand, da mit Einzelkomponenten eine bessere Transportraumnutzung erfolgen kann. Es ist ebenfalls mit geringeren Werkzeugkosten aufgrund der kleineren Werkzeuggröße zu rechnen. Die Auswahl der Teilungsanzahl ist mit Unterstützung des Herstellers unter Berücksichtigung weiterer, derzeit noch unbekannter Prozessfaktoren zu treffen. Abbildung 48 zeigt den Windturbinenmantel mit einer Teilung in sechs Einzelhohlsegmente.

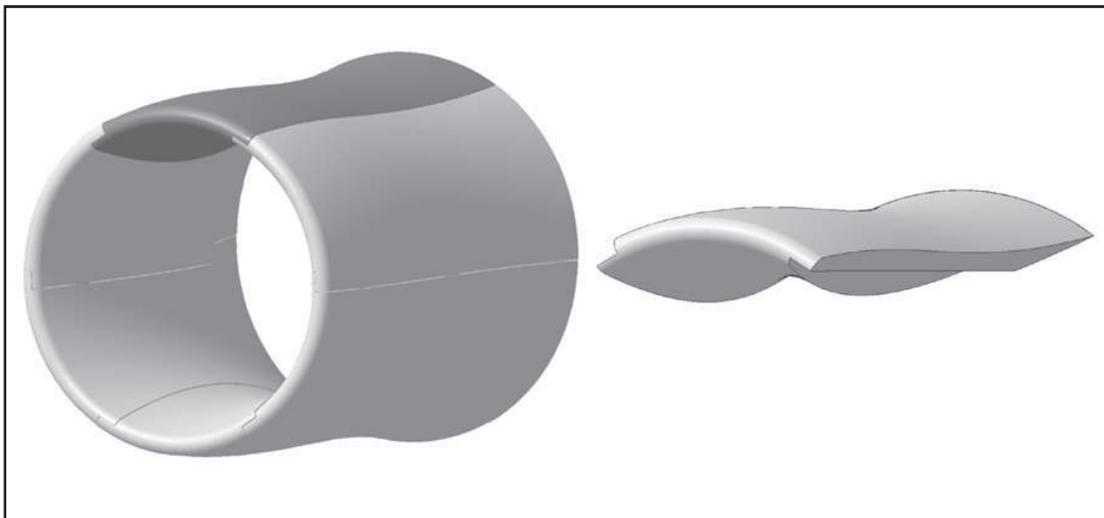


Abbildung 48: Konzept Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 Teilung

Wie beim Einzelsegment ersichtlich, wurde hier bereits eine Verbindungsmöglichkeit bei der Formgebung berücksichtigt. Eine Überlappung der Segmente soll eine einfache, rasche aber auch formgenaue Montage ohne großen Montageaufwand sicherstellen. Da diese Ausführungsvariante gänzlich ohne tragende Innenstruktur auskommen soll, muss die mechanische Stabilität über die Wahl der Werkstoffe und der Wandstärke bewerkstelligt werden. Zusätzliche Stabilität kann auch über die Teilung eingebracht werden. Eine höhere Einzelsegmentanzahl erhöht die Steifigkeit durch geringere Abstände zwischen den Seitenwänden der Einzelsegmente. Aus diesem

Grund und unter Berücksichtigung einer kleineren Bauteilgröße ist die schlussendliche Definition der Teilung bei diesem Fertigungsverfahren sehr wichtig. Die bisher erwähnte Ausführung bezieht sich auf den rotationssymmetrischen Körper des Windturbinenmantels. Noch nicht berücksichtigt wurde die Integration des Rotor-Nabenverbands und der Lagerbaugruppe. Für die Verbindung mit diesen Baugruppen müssen Anbindungspunkte definiert und in den Segmenten berücksichtigt werden. Besonders wichtig ist hier die Lagerbaugruppe, da diese alle angreifenden Kräfte des Mantels abführen muss. Das erfordert eine stabile Verbindung zwischen dem Mantel und seinen Segmenten und der Lagerbaugruppe. Hier bietet der Rotationsguss die Möglichkeit eines so genannten Wechseleinsatzes für ein Werkzeug, um eine andere Formgebung für ein einzelnes Segment zu erreichen. Zusammen mit einrotierten Gewindeeinsätzen lassen sich so beliebige Schnittstellen zu anderen Baugruppen definieren.

Abbildung 49 zeigt eine mögliche Konstruktion einer solchen Anbindung durch eine Ausnehmung im Hohlsegment. Als Werkstoff für den Hohlkörper wird hier PE mit 4 mm Wandstärke eingesetzt. Diese Wandstärke kann beim Rotationsgießen einfach durch veränderte Materialmengen variiert werden.

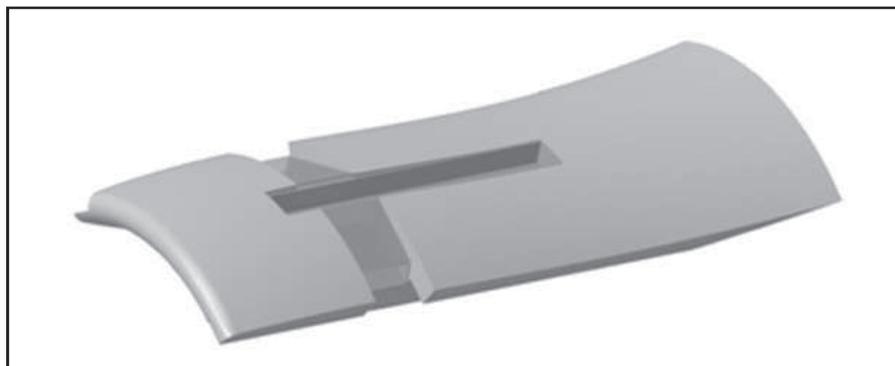


Abbildung 49: Anbindungsmöglichkeit an Hohlkörpersegment mit Wechseleinsatz im Werkzeug

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Gewicht dieser Fertigungsvariante ergibt sich wie folgt:

**Gewicht**

Gesamtgewicht/Mantel PE 4 mm, Teilung 1/6    90    kg

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Für den Transport können die Einzelsegmente z.B. übereinander angeordnet werden, um den Volumenbedarf so gering als möglich zu halten.

Füllt man so den Laderaum (Länge: 13,6 m; Breite: 2,5 m; Höhe: 3 m), kann man etwa 20 Windturbinenmäntel auf einmal transportieren. Abbildung 50 zeigt die Einzelsegmente in einer möglichen Anordnung für den Transport.

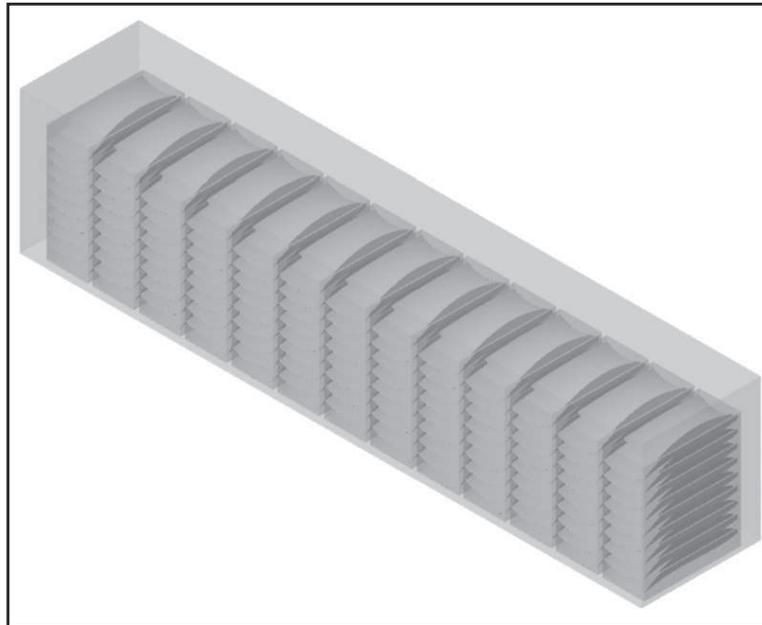


Abbildung 50: Transportvolumen Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 Teilung

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Die für den Montageaufwand wichtige Kenngröße der zu montierenden Teileanzahl beläuft sich für diese Lösungsvariante auf sechs Einzelkomponenten für den Mantel. Für die Verbindung wird (Abbildung 48) eine L-Verbindung mit integrierter Schraubverbindung gewählt. Durch diese einfache Steck- und Schraubverbindung lässt sich der gesamte Mantel ohne Zusatzarbeiten mit einfachem Werkzeug und geringem zeitlichen Aufwand an Ort und Stelle jedes gewünschten Standortes aufstellen. Da der Zusammenbau praktisch keine großen Fehler zulässt, wird für die mechanische Montage kein besonders geschultes Personal benötigt. Auch eine Auswechslung defekter Elemente ist mit der Demontage der Anlage möglich. Ein Segment wird dabei ein Gewicht von ca. 15 kg erreichen.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Für die Herstellung dieser Fertigungsvariante dient das Unternehmen Savo-Technik Rotationsguss GmbH als Entwicklungspartner und unterbreitet ein Angebot für eine Teilung in sechs Einzelsegmente.

**Angebot:**<sup>141</sup>

**Rotationsguss Hohlkörper 4 mm Wandstärke**

1/6 Hohlkörper PE 95,00 €

**Einführungskosten**

Werkzeug 1/6 Hohlkörper 30.000,00 €

Daraus ergeben sich für den Windturbinenmantel die Gesamtkosten zu:

**direkt zurechenbare Herstellkosten Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE**

Kosten/Mantel PE, Teilung 1/6 570,00 €

**4.5.1 Variante 5.2: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 PP**

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Bei dieser Lösungsvariante wird für den Hohlkörper ein Kunststoff mit etwas anderen Werkstoffeigenschaften eingesetzt. Das konstruktive Grundkonzept bleibt dabei im Vergleich zur Variante des vorangegangenen Kapitels 4.5.2 unverändert. Man verspricht sich durch die besseren Werkstoffeigenschaften von PP eine höhere Stabilität des Mantels, oder durch geringere Wandstärken die Möglichkeit einer leichteren Ausführung. Vorab wird jedoch dieselbe Wandstärke von 4 mm wie für PE gewählt, diese kann aber bei diesem Fertigungsverfahren jederzeit angepasst werden.

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Gewicht ist aufgrund der ähnlichen Dichte ident zur Variante mit dem Werkstoff PE.

**Gewicht**

Gesamtgewicht/Mantel PP 4 mm, Teilung 1/6 90 kg

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Abbildung 50 zeigt auch für diese Variante ein Transportvolumen von 20 Stück für einen Sattelzug.

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Da sich ausschließlich der Werkstoff im Vergleich zur vorangegangenen Variante geändert hat, ist auch der Montageaufwand gleich anzusetzen. Siehe dazu Kapitel 4.5.2.

---

<sup>141</sup>SAVO-TECHNIK Rotationsguss GmbH, Angebot 27.9.2013

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Ein Angebot dieser Variante vom Unternehmen Savo-Technik Rotationsguss GmbH beinhaltet die folgenden Kosteninformationen:

**Angebot:**<sup>142</sup>

**Rotationsguss Hohlkörper 4 mm Wandstärke**

1/6 Hohlkörper PP	125,00	€
-------------------	--------	---

**Einführungskosten**

Werkzeug 1/6 Hohlkörper	30.000,00	€
-------------------------	-----------	---

Daraus resultieren Kosten für den Windturbinenmantel von:

**direkt zurechenbare Herstellkosten Kunststoff Hohlkörper 1/6 PP**

Kosten/Mantel PP, Teilung 1/6	750,00	€
-------------------------------	--------	---

#### 4.5.2 Variante 5.3: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/3 PE

- **Definition des Konzeptes und der konstruktiven Ausführung**

Verändert man die Teilung von sechs auf drei Teilsegmente, ergibt sich eine neue Lösungsalternative mit Vor- und Nachteilen. Daher sollen auch die Eigenschaften wie für alle vorangegangenen Lösungsvorschläge festgehalten werden. Die konstruktiven Eigenschaften bleiben im Vergleich zur Sechstel-Teilung unverändert, sodass sich ausschließlich die Größe der Elemente erhöht und die Elementanzahl sinkt. Es ist nun zu prüfen, inwiefern sich diese Veränderung auf die Kostenstruktur auswirkt.

- **Bestimmung des Gesamtgewichtes**

Das Mantelgewicht ergibt sich bei dieser Variante wie folgt:

**Gewicht**

Gesamtgewicht/Mantel PE 4 mm, Teilung 1/3	81	kg
---	----	----

- **Bestimmung des Transportvolumens**

Das Transportvolumen lässt sich an Abbildung 51 mit in etwa sechzehn Windturbinenmäntel pro Sattelzug beziffern.

---

<sup>142</sup>SAVO-TECHNIK Rotationsguss GmbH, Angebot 27.9.2013

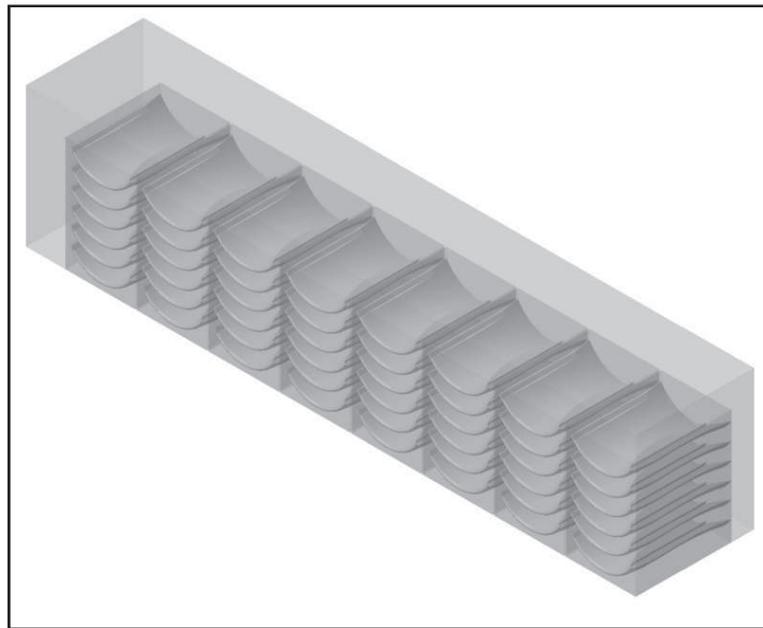


Abbildung 51: Transportvolumen Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/3 Teilung

- **Bestimmung des Montageaufwandes**

Die Montage erfolgt mit Schraubverbindungen über die L-förmigen Ränder der Segmente, dabei sind die drei Elemente miteinander zu verbinden. Bis auf die geänderte Teileanzahl ist der Montagevorgang ident mit dem der erhöhten Teilung mit sechs Elementen, es erhöht sich zusätzlich das Gewicht eines Segments auf 27 kg.

- **Bestimmung der Herstell- bzw. der Bezugskosten**

Das Angebot des Unternehmens SAVO-TECHNIK Rotationsguss GmbH lautet wie folgt:

**Angebot:**<sup>143</sup>

**Rotationsguss Hohlkörper PE 4 mm Wandstärke**

1/3 Hohlkörper PE	250,00	€
-------------------	--------	---

**Einführungskosten**

Werkzeugkosten 1/3 Hohlkörper	35.000,00	€
-------------------------------	-----------	---

**direkt zurechenbare Herstellkosten Kunststoff Hohlkörper 1/3 PE**

Kosten/Mantel PE, Teilung 1/3	750,00	€
-------------------------------	--------	---

In diesem Abschnitt wurden nun sieben verschiedene Lösungsmöglichkeiten und deren Eigenschaften festgehalten. Im nächsten Schritt gilt es, diese gegenüberzustellen, um eine Lösungsvariante empfehlen zu können.

---

<sup>143</sup>SAVO-TECHNIK Rotationsguss GmbH, Angebot 27.9.2013

Tabelle 13: Gegenüberstellung der Varianten

Varianten	V3: Kunststoff Halbschalen		V4: Metall Halbschalen		V5: Kunststoff Hohlkörper		
	12Teile	7Teile	1/6Stahl	1/6Alu	1/6PE	1/6PP	1/3PE
<b>Eigenschaften</b>							
Werkstoff Außenhülle	ABS	ABS	Stahl verzinkt	Aluminium	Polyethylen	Polypropylen	Polyethylen
Rahmenstruktur	Aluminium	Aluminium	Aluminium	Aluminium	keine	keine	keine
Gewicht [kg/Mantel]	89	89	174	77	90	90	81
Transportvol. [Stk./Lkw]	80	60	80	80	20	20	16
Teileanzahl [-]	24	19	24	24	6	6	3
Montagetechnologie [-]	Niet-, Kleb-, Schraub verbind.	Niet-, Kleb-, Schraub verbind.	Niet-, Schraub verbind.	Niet-, Schraub Verbind.	Schraub verbind.	Schraub verbind.	Schraub verbind.
Stückkosten [€/Mantel]	875	1.280	469,56	579,84	570	750	750
Einführungskosten [€]	26.850	34.340	114.000	114.000	30.000	30.000	35.000

## 4.6 Konzeptevaluierung

Eine vollständige Lösungssuche liefert mindestens zwei Lösungsvorschläge für dasselbe Problem. Aus Gründen des Aufwands kann meist nur eine dieser Lösungen umgesetzt werden, daher ist eine Entscheidung zwischen den möglichen Alternativen zu treffen. Damit diese Entscheidung nicht zufällig getroffen wird, hat diese systematisch und für einen späteren Zeitpunkt nachvollziehbar zu erfolgen. Um sich für eine Maßnahme zu entscheiden, müssen deren Auswirkungen bekannt sein. Es wird kaum Maßnahmen geben, die in allen Kriterien das bestmögliche Ergebnis erzielen. Daher wird eine Abwägung dieser erzielten Ergebnisse erforderlich. Es gibt unterschiedliche Verfahren zur Entscheidungsunterstützung. Hierbei wird zwischen intuitiven, qualitativen und analytischen Verfahren unterschieden. Die intuitiven Verfahren sind die einfachsten und kommen im alltäglichen Leben häufig vor. Es wird die Entscheidung sozusagen aus dem Bauch heraus getroffen. Diese Bauchentscheidung scheint eher zufällig und unprofessionell, unbewusst fließen jedoch Erfahrungen aus ähnlichen Situationen mit ein. Vor allem bei Routineentscheidungen, in denen andere Verfahren zu aufwändig werden, haben intuitive Verfahren ihre Berechtigung und führen außerdem in vielen Situationen zu guten Ergebnissen. Bei komplexen Problemen und wenn mehrere Personen an der Entscheidung beteiligt sind, sind andere Verfahren vorzuziehen. Qualitative Verfahren verwenden eine nachvollziehbare Systematik, gebrauchen jedoch keine Werkzeuge der Mathematik. Die Systematik startet mit der Auflistung aller Lösungsmöglichkeiten, die z.B. in einer Argumentenbilanz gegenübergestellt werden um Vor- bzw. Nachteile zu untersuchen. Die Lösung mit der positivsten Bilanz wird danach ausgewählt. Nachteilig wirken sich jedoch die Nicht-Gewichtung der Kriterien sowie die nicht vorhandene Nachvollziehbarkeit der Entscheidung aus. Analytische Verfahren werten die Informationen für die Entscheidung in einer durchgängigen Systematik aus und liefern somit reproduzierbare und

nachvollziehbare Ergebnisse. Solche Verfahren sind jedoch aufwändig auszuführen und beinhalten neben der systematischen Untersuchung der Lösungsalternativen auch eine solche der Kriterien.<sup>144</sup> Eines dieser Verfahren ist die Nutzwertanalyse, auf die nun genauer eingegangen wird.

#### 4.6.1 Nutzwertanalyse

Eine Methodik zur Reihung von Lösungsalternativen wird Nutzwertanalyse genannt. Der Nutzwert ist der subjektive, durch die Tauglichkeit zur Bedürfnisbefriedigung bestimmte Wert eines Gutes, nach dem die Reihung in diesem Verfahren vorgenommen wird. Die ermittelten Nutzwerte stellen das Ergebnis der ganzheitlichen Bewertung aller Beiträge zur Zielerreichung der Lösungsalternativen dar, sind eine dimensionslose Größe und treffen daher keine Aussage über den möglichen Ertrag einer Lösung. Das komplexe Bewertungsproblem wird dabei in drei Prinzipien aufgespalten, auf Basis dieser anschließend die Lösung formuliert wird. Das erste Lösungsprinzip beruht darauf, dass die einzelnen Alternativen durch den direkten Vergleich ihrer Beiträge zur Zielerreichung (Zielerträge) beurteilt werden. Das zweite Lösungsprinzip unterteilt die Gesamtbewertung in Teilbewertungen, wobei eine Nutzenunabhängigkeit zwischen den Bewertungskriterien zu bestehen hat. Das dritte Lösungsprinzip beinhaltet eine subjektive Gewichtung der einzelnen Bewertungskriterien durch konstante Zielwertgewichte. Dabei werden die Kriterien gegeneinander abgewogen, mit unterschiedlichen Bedeutungen belegt und tragen daher unterschiedlich stark zum Gesamtnutzen bei. Daraus ergibt sich folgende Vorgehensweise bei der Durchführung einer Nutzwertanalyse.<sup>145</sup>

1. Zu Beginn steht die Definition der Zielvorstellung und der Bewertungskriterien, die zur Teilbewertung benötigt werden. Die Zielvorstellung umfasst dabei vollständig alle technischen, wirtschaftlichen sowie auch sicherheitstechnischen Faktoren. Dabei muss die Erreichung eines Ziels unabhängig von den anderen Zielen bleiben, um sich bei der Bewertung nicht zu überschneiden. Für die Bewertung soll des Weiteren beachtet werden, dass die Ziele quantitativ oder zumindest qualitativ gut erfassbar sind, damit sich die Informationsbeschaffung vereinfacht.
2. Die Gewichtung der Bewertungskriterien ist wichtig, um den Einfluss auf den Gesamtwert zu identifizieren und um im Vorhinein unbedeutende Kriterien eliminieren zu können. Üblicherweise erfolgt diese Gewichtung durch Prozentangaben, damit die Teilziele miteinander ins Verhältnis gesetzt werden

---

<sup>144</sup>Vgl. Jakoby (2011), S. 62ff.

<sup>145</sup>Vgl. Zangemeister (1971), S. 45ff.

können.<sup>146</sup>

Für die Gewichtung kann ein sogenannter paarweiser Vergleich eingesetzt werden. Dabei vergleicht man zwei Bewertungskriterien direkt miteinander und vergibt durch das Urteil „besser als...“ bzw. „schlechter als...“ die Punkte 1 und 0. Nachdem jedes Kriterium mit jedem anderen verglichen wurde, ergibt sich aufgrund der Punktesumme eine Rangfolge. Man kann diese Bewertung zusätzlich erweitern, indem man Punkte von 0 bis 2 vergibt. 0 bedeutet dabei „schlechter wie...“, 1 „gleich gut wie...“ und 2 „besser wie...“.<sup>147</sup>

3. Es werden nun die Eigenschaftsgrößen (auch Zielgrößen genannt) der Alternativen zu den einzelnen Bewertungskriterien durch eine numerische und/oder verbale Beschreibung festgehalten. Dabei kann eine Bewertungsliste, in der die Eigenschaftsgrößen den Bewertungskriterien zugeordnet werden, hilfreich sein. Man bezeichnet diese tabellarische Zuordnung auch Zielgrößenmatrix.
4. In diesem Arbeitsschritt erfolgt nun die eigentliche Bewertung durch die Teilwertvergabe. Diese wird mehr oder weniger subjektiv durchgeführt. Dabei bedient man sich in der Nutzwertanalyse häufig einer Skala von 0 bis 10. Für kleine Skalen von 0 bis 5 spricht, dass bei den noch teilweise unsicheren Eigenschaften der Lösungsalternativen diese Grobbewertung ausreicht. Eine Betrachtung der extrem guten bzw. schlechten Varianteneigenschaften kann dabei sehr hilfreich sein, indem man diesen die maximale Punktezahl 10 oder 5 bzw. die minimale Punktzahl 0 zuordnet. Damit lassen sich die verbliebenen Varianten leichter bewerten. Eine stufenweise Wertevergabe nach den angegebenen Eigenschaften erleichtert ebenfalls diesen Vorgang. All diese Teilwerte, auch Zielwerte bezeichnet, werden in einer Zielwertmatrix gesammelt.
5. Danach erfolgt die Ermittlung der gewichteten Teilwerte durch Berücksichtigung der Gewichtung der Bewertungskriterien aus Punkt 2 durch Multiplikation dieser Gewichtung mit den Zielwerten.
6. Die anschließende Bestimmung des Nutzwertes erfolgt durch Summation der einzelnen gewichteten Teilwerte in der Nutzwertmatrix.
7. Schlussendlich erfolgt der Lösungsvariantenvergleich, wobei die Variante mit dem höchsten Nutzwert am besten zu beurteilen ist. Anders als bei diesem relativen Vergleich zwischen den Varianten kann man eine Wertigkeit erhalten, indem man den Nutzwert auf einen maximal erreichbaren Idealwert bezieht.

---

<sup>146</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 166ff.

<sup>147</sup>vgl. Ehrlenspiel/Meerkamm (2013), S. 536ff.

Auch eine Trennung zwischen technischen und wirtschaftlichen Nutzwerten ist möglich.<sup>148</sup>

#### 4.6.2 Nutzwertanalyse zur Lösungsbewertung

Als erster Arbeitsschritt erfolgt die Erarbeitung der Bewertungskriterien mit anschließender Gewichtung durch Gegenüberstellung dieser Kriterien. Für den Windturbinenmantel können die Kriterien zur Zielerreichung wie folgt gegliedert werden, wobei wirtschaftliche Kriterien, welche in Geldwert ausgedrückt werden können, separat Berücksichtigung finden und erst im Anschluss mit dem Ergebnis der Nutzwertanalyse kombiniert werden.

#### Z1 optimale Ausführungsart des Windturbinenmantels

##### Z 11 Kriterien technisch

- Z111 Gewicht/Stk. (kg/Mantel)
- Z112 spätere Abänderungsmöglichkeit (Was kann noch verändert werden?)
- Z113 Endmontageaufwand
  - Z1131 Teileanzahl (Anzahl)
  - Z1132 max. Einzelteilgewicht (kg)
  - Z1133 Montagetechnologie (Beschreibung Technologie bzw. Montagevorgang)

##### Z12 Kriterien organisatorisch

- Z121 interne Wertschöpfungspotential (€/Mantel)
- Z122 Transportaufwand Einzelteile, Verpackungsvolumen bezogen auf Ladeeinheit eines Sattelzuges (Stk./Sattelzug)
- Z123 Lieferantenabhängigkeit (Know-how, Technologieverbreitung)

##### Z13 Kriterien im Betrieb

- Z131 Reparatur (Ersatzkosten einer Mantel Einzelkomponente)
- Z132 Geräusentwicklung ( z.B. bei Regen und Hagel)
- Z133 Optik (z.B. Anzahl der Fügstellen, witterungsbedingte Veränderungen durch UV Strahlung, Hagel,...)

Die Bewertungskriterien lassen sich in die Gruppen der **technischen**, **organisatorischen** und jene im **Betrieb** einteilen. Eine wichtige Eigenschaft ist das Gesamtgewicht der Mantelkonstruktion. Dieses beeinflusst die Auslegung anderer Baugruppen, darunter vor allem die Lagerbelastung zur Windnachführung. Von großer Bedeutung kann bei neu entwickelten Produkten eine technische Anpassung im Laufe des Produktlebenszyklus sein. Bei Windkraftanlagen sind in der Regel drei technische Überarbeitungsschritte bis zur Serienreife üblich (vgl. Kapitel 2.3). Die zum Teil hohen Einführungsinvestitionen machen eine Berücksichtigung dieser möglichen Änderun-

---

<sup>148</sup>Vgl. Pahl et al. (2007), S. 166ff.

gen unumgänglich und werden daher im Kriterium spätere Anpassungsmöglichkeit miteinbezogen. Festgehalten wird, welche Komponenten und/oder Eigenschaften nachträglich verändert werden können.

Besonders wichtig ist der Endmontageaufwand, der eng mit dem Fertigungsverfahren und der konstruktiven Ausführung verbunden ist. Zur Abschätzung der Montagekosten, lassen sich diese in drei Unterkriterien aufteilen. Die Teileanzahl spiegelt die benötigte Anzahl der Verbindungs- bzw. Montagevorgänge wieder. Zusätzlich ist auch die Handhabung der zu verbindenden Teile für die Montage wichtig. Diese soll mit dem Maximalgewicht eines Einzelteils abgebildet werden. Zusammen mit der Montagetechnologie ergibt sich daraus eine Endmontageaufwandsabschätzung.

Die organisatorischen Kriterien bilden die mögliche interne Wertschöpfung in €/Mantel, der Transportaufwand mit der Anzahl der Windturbinenmäntel pro Sattelzug und die Lieferantenabhängigkeit. Diese Abhängigkeit soll vor allem durch die Technologieverbreitung und durch das für den Herstellungsprozess benötigte Know-how wiedergegeben werden. Wichtig sind aber die Kriterien im Betrieb der Anlage. Dabei soll ein Reparaturaufwand im möglichen Schadensfall berücksichtigt werden. Während der geplanten Produktlebensdauer zwischen 15-20 Jahren ist auf jeden Fall mit Schäden am Windturbinenmantel zu rechnen. Der Aufwand für die Wiederinstandsetzung soll, bei anzunehmender Gesamtdemontage aller Lösungsvarianten, durch die Ersatzkosten einer einzelnen Mantelkomponente wiedergegeben werden.

Ein besonders wichtiger Punkt ist die Beeinträchtigung der Umwelt durch verschiedene Faktoren. Das bedeutet, dass die Anlage weder eine akustische noch eine optische Beeinträchtigung in seiner Umgebung hervorrufen soll. Daher sollen das akustische Verhalten der verschiedenen Werkstoffe sowie deren mögliche optische Veränderung während der Nutzungsdauer beachtet werden. Zusätzlich wirken sich auch die Teilungsvarianten optisch durch entstehende Fugen aus und sollen auch in die Bewertung mit einfließen.

Auf Basis dieser Aufzählung wird die Gewichtung im Anschluss mithilfe eines paarweisen Vergleiches durchgeführt. Diese erfolgt stufenweise von der ersten Stufe in Richtung abnehmender Komplexität bis zur vierten Stufe, wobei die Quersumme der Gewichtungsfaktoren je Stufe stets eins beträgt. Der Gewichtungsfaktor eines Bewertungskriteriums in Bezug auf das Ziel  $Z_1$  wird durch Multiplikation der jeweiligen Stufe mit der nächsthöheren bestimmt.<sup>149</sup> Dabei wird die Gewichtung unabhängig von zwei Personen durchgeführt, die mit dem Produkt vertraut sind und der Mittelwert beider Gewichtungen in Abbildung 52 eingetragen.

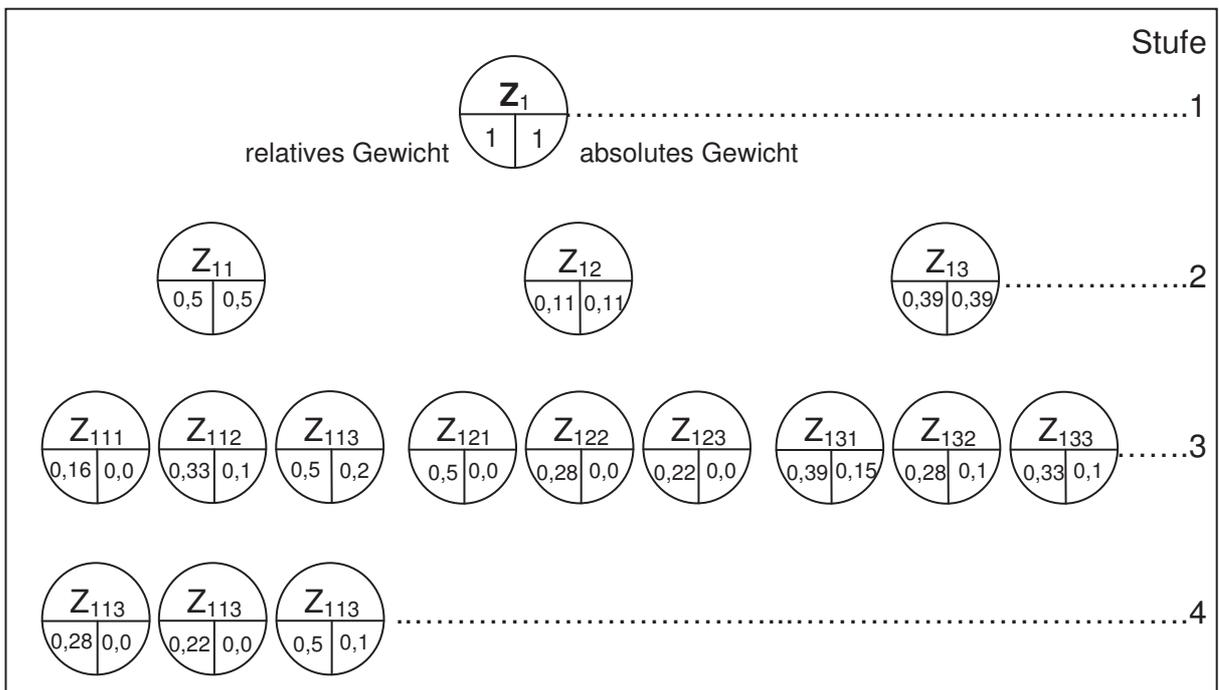


Abbildung 52: Gewichtung der Bewertungskriterien

<sup>149</sup>Vgl. Pahl et al. (2008), S. 169

Mit der Zuordnung der Zielgrößen der Lösungsalternativen in der Zielgrößenmatrix, erhält man eine übersichtliche Darstellung für den anschließenden Bewertungsvorgang.

Tabelle 14: Zielgrößenmatrix

Varianten		V3: Kunststoff Halbschalen		V4: Metall Halbschalen		V5: Kunststoff Hohlkörper		
		12Teile	7Teile	1/6Stahl	1/6Alu	1/6PE	1/6PP	1/3PE
Zielkriterien								
Z <sub>111</sub>	Gewicht [kg/Stk.]	89	89	174	77	90	90	81
Z <sub>112</sub>	Änderungsmöglichkeit [-]	Rahmen Wandstärke Montage Fügetechnik	Rahmen Wandstärke Montage Fügetechnik	Rahmen Montage Fügetechnik	Rahmen Montage Fügetechnik	Wandstärke	Wandstärke	Wandstärke
Z <sub>1131</sub>	Teileanzahl [-]	24	19	24	24	6	6	3
Z <sub>1132</sub>	max. Einzelteilgewicht [kg]	5,7	11,2	13,4	4,6	15	15	27
Z <sub>1133</sub>	Montage-technologie [-]	Niet-, Kleb-, Schraub verbind.	Niet-, Kleb-, Schraub verbind.	Niet-, Schraub verbind.	Niet-, Schraub Verbind.	Schraub verbind.	Schraub verbind.	Schraub verbind.
Z <sub>121</sub>	Int. Wertschöpfung [€/Stk.]	240	240	240	240	0	0	0
Z <sub>122</sub>	Transportvol. [Stk./Lkw]	80	60	80	80	20	20	16
Z <sub>123</sub>	Lieferanten Abhängigkeit [-]	gering	gering	mittel	mittel	hoch	hoch	hoch
Z <sub>131</sub>	Reparaturaufwand[€/Teil]	53	149	19	28	125	95	250
Z <sub>132</sub>	Geräuschentwicklung [-]	gering	gering	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel
Z <sub>133</sub>	Optik [-]	viele Fugen, UV	viele Fugen, UV	viele Fugen, Korrosion Hagel	viele Fugen, Hagel	wenig Fugen, UV	wenige Fugen, UV	sehr wenig Fugen, UV

Jetzt erfolgt der eigentliche Bewertungsvorgang der Nutzwertanalyse und es müssen die einzelnen Teilwerte vergeben werden. Um diesen Vorgang zu erleichtern, wird ein stufenweises Punkteschema aufgestellt, um eine Werteeinteilung zu erhalten (Tabelle 15). Dabei werden hier Punkte von 1 bis 5 vergeben und zusätzlich für einige Zielkriterien eine benötigte dreistufige Werteeinteilung eingeführt. Diese Wertestufung wurde auch im Zuge der Gewichtungsvergabe von den beteiligten Personen gemeinsam festgelegt.

Tabelle 15: Stufen Punkteschema

Zielkriterien		Wertestufung				
		1	2	3	4	5
Z <sub>111</sub>	Gewicht [kg/Stk.]	>110	101-110	91-100	80-90	<80
Z <sub>112</sub>	Änderungs- möglichkeit [-]	Wandstärke	-	Rahmen Montage Fügetechnik	-	Rahmen Wandstärke Montage Fügetechnik
Z <sub>1131</sub>	Teileanzahl [-]	>20	16-20	11-15	6-10	1-5
Z <sub>1132</sub>	max. Einzelteilge- wicht [kg]	>20	16-20	11-15	6-10	1-5
Z <sub>1133</sub>	Montagetechnolo- gie [-]	Klebverbindung Kunststoff	Niet,- Schraub- verbindng Kunststoff	Schraub- verbindung Metall	Nietverbindung Metall	Schraub- verbindung Hohlkörper
Z <sub>121</sub>	Int. Wertschöpfung [€/Stk.]	0-50	-	50-100	-	>100
Z <sub>122</sub>	Transportvol. [Stk./Lkw]	Bis 20	-	60	-	Ab 80
Z <sub>123</sub>	Lieferanten Abhängigkeit [-]	hoch	-	mittel	-	gering
Z <sub>131</sub>	Reparatur- aufwand[€/Teil]	>200	151-200	101-150	51-100	<50
Z <sub>132</sub>	Geräusch- entwicklung [-]	hoch	-	mittel	-	gering
Z <sub>133</sub>	Optik	viele Fugen, Korrosion, Hagel	viele Fugen, Hagel	viele Fugen, UV	wenig Fugen, UV	sehr wenig Fugen, UV

Die aus der Zuordnung durch das Punkteschema erhaltenen Teilwerte der Lösungsalternativen werden in der Zielwertmatrix festgehalten und für die Nutzwertberechnung gesammelt (Tabelle 16).

Tabelle 16: Zielwertmatrix

Varianten		V3: Kunststoff Halbschalen		V4: Metall Halbschalen		V5: Kunststoff Hohlkörper		
		12Teile	7Teile	1/6Stahl	1/6Alu	1/6PE	1/6PP	1/3PE
<b>Zielkriterien</b>								
Z <sub>111</sub>	Gewicht [kg/Stk.]	4	4	1	5	4	4	4
Z <sub>112</sub>	Änderungsmöglichkeit [-]	5	5	3	3	1	1	1
Z <sub>1131</sub>	Teileanzahl [-]	1	2	1	1	4	4	5
Z <sub>1132</sub>	max. Einzelteilgewicht [kg]	5	3	3	5	3	3	1
Z <sub>1133</sub>	Montagetechologie [-]	2	2	4	4	5	5	5
Z <sub>121</sub>	Int. Wertschöpfung €/Stk.]	5	5	5	5	1	1	1
Z <sub>122</sub>	Transportvol.[Stk./Lkw]	5	3	5	5	1	1	1
Z <sub>123</sub>	Lieferantenabhängigkeit	5	5	3	3	1	1	1
Z <sub>131</sub>	Reparaturaufwand [€/Teil]	4	3	5	5	4	3	1
Z <sub>132</sub>	Geräuscentwicklung [-]	5	5	1	1	3	3	3
Z <sub>133</sub>	Optik [-]	3	3	1	2	4	4	5

Der eigentliche Nutzwert wird im nächsten Schritt durch die Berücksichtigung der im Vorhinein festgelegten Gewichtung der Bewertungskriterien und der anschließenden Aufsummierung dieser gewichteten Teilwerte bestimmt. Dies erfolgt in einer Nutzwertmatrix.

Tabelle 17: Nutzwertmatrix

Varianten		Gewichtung	V3: Kunststoff Halbschalen		V4: Metall Halbschalen		V5: Kunststoff Hohlkörper		
			12Teile	7Teile	1/6Stahl	1/6Alu	1/6PE	1/6PP	1/3PE
<b>Zielkriterien</b>									
Z <sub>111</sub>	Gewicht [kg/Stk.]	0,08	0,33	0,33	0,08	0,42	0,33	0,33	0,33
Z <sub>112</sub>	Änderungsmöglichkeit [-]	0,17	0,83	0,83	0,5	0,5	0,17	0,17	0,17
Z <sub>1131</sub>	Teileanzahl [-]	0,07	0,07	0,14	0,07	0,07	0,28	0,28	0,35
Z <sub>1132</sub>	max. Einzelteilgewicht [kg]	0,06	0,28	0,17	0,17	0,28	0,17	0,17	0,06
Z <sub>1133</sub>	Montagetechologie [-]	0,13	0,25	0,25	0,5	0,5	0,63	0,63	0,63
Z <sub>121</sub>	Int. Wertschöpfung [€/Stk.]	0,06	0,28	0,28	0,28	0,28	0,06	0,06	0,06
Z <sub>122</sub>	Transportvol.[Stk./Lkw]	0,03	0,15	0,9	0,15	0,15	0,03	0,03	0,03
Z <sub>123</sub>	Lieferantenabhängigkeit [-]	0,02	0,12	0,12	0,07	0,07	0,02	0,02	0,02
Z <sub>131</sub>	Reparaturaufwand [€/Teil]	0,15	0,6	0,45	0,76	0,76	0,6	0,45	0,15
Z <sub>132</sub>	Geräuscentwicklung [-]	0,11	0,54	0,54	0,11	0,11	0,32	0,32	0,32
Z <sub>133</sub>	Optik [-]	0,13	0,39	0,39	0,13	0,26	0,52	0,52	0,65
	<b>Gesamtnutzwert</b>		<b>3,85</b>	<b>3,6</b>	<b>2,82</b>	<b>3,39</b>	<b>3,13</b>	<b>2,98</b>	<b>2,76</b>
	<b>Reihung nach Nutzwert</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

Auf Basis dieses ermittelten Nutzwertes lässt sich eine Reihung der Lösungsvarianten vornehmen. Dabei sind die beiden Varianten aus Kunststoff Halbschalen zu favorisieren, gefolgt von den Metall Halbschalen aus Aluminium und dem Kunststoff Hohlkörper PE 1/6. Wichtig ist dabei zu erwähnen, dass es sich um eine subjektive Bewertung handelt und sich die Reihung anhand einer anderen Gewichtung der Teilkriterien verändern kann. Diese Veränderung kann mit einer sogenannten Sensitivitätsanalyse überprüft werden, indem man die Gewichtungen verändert und die Auswirkungen auf das Ergebnis beobachtet. Des Weiteren lässt diese Betrachtung über die Nutzwerte keine Aussage über die Wirtschaftlichkeit zu, da in diesen Nutzwerten keine Berücksichtigung der Herstellkosten und der Einführungskosten erfolgt. Aus diesem Grund soll im nächsten Schritt eine Aussage über die unterschiedlichen variablen Herstellkosten unter Berücksichtigung der Einführungskosten über der Stückzahl gemacht werden, um diese im Anschluss den Nutzwerten gegenüber zu stellen. Erst dieser Vergleich zwischen den variablen Herstellkosten über der Stückzahl und dem Nutzwert, beinhaltet alle erforderlichen Informationen, die eine Entscheidung für eine dieser Lösungsvarianten erlaubt.

### **4.6.3 Ergebnisauswertung und Analyse**

Eine rein wirtschaftliche Gegenüberstellung der angeführten Fertigungsverfahren zeigt Abbildung 53. Hierbei werden sämtliche Einführungskosten auf die Stückzahlen verteilt und es ergibt sich dadurch ein wirtschaftlich optimales Fertigungsverfahren bei einer bestimmten Stückzahl (vgl. Kapitel 3.3). In Anhängigkeit der angestrebten Absatzmenge über einen gewählten Zeitraum, kann damit eine strategische Entscheidung über das anzustrebende Fertigungsverfahren getroffen werden.

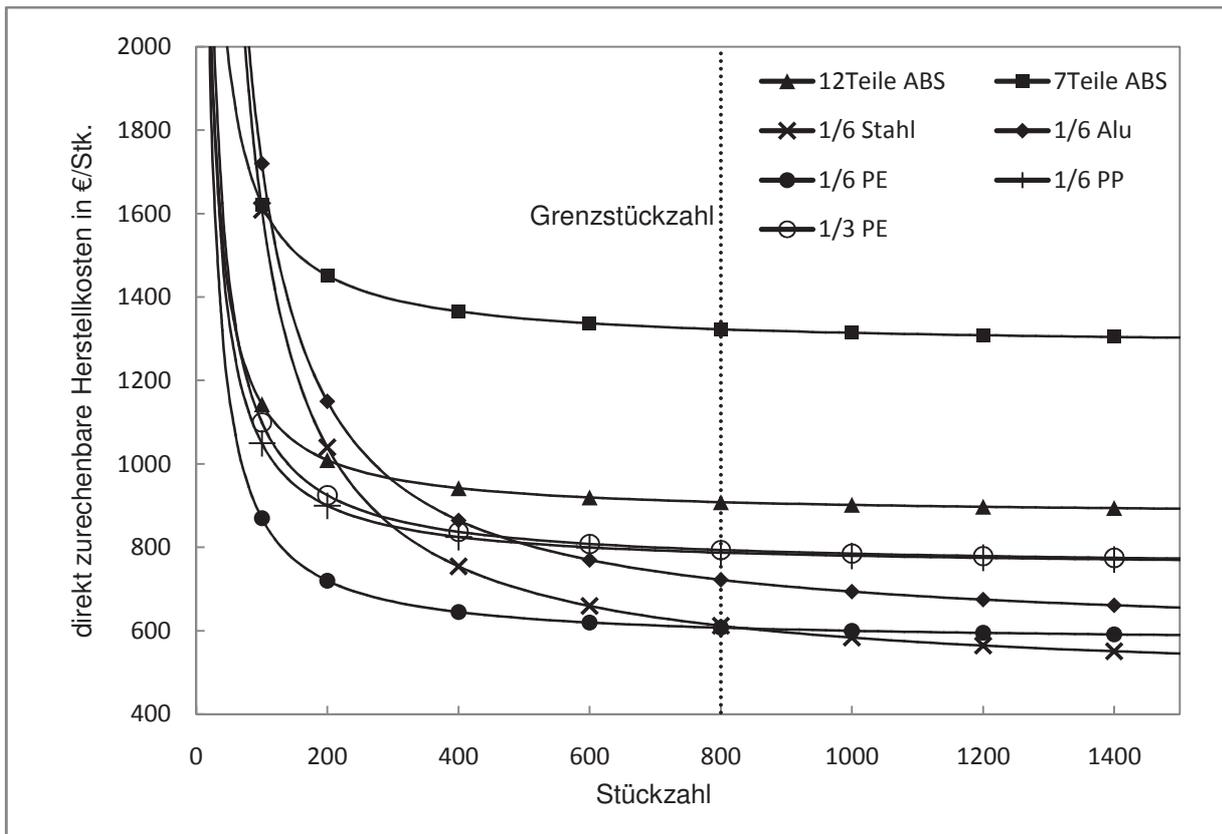


Abbildung 53: Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren

Abbildung 53 zeigt deutliche Differenzen der variablen Herstellkosten, ohne die Berücksichtigung der noch nicht kostentechnisch erfassbaren Montagekosten über der Absatzmenge. Die Auswertung dieser Darstellung schränkt die Fertigungsverfahren bereits bis auf zwei Verbliebene ein. Bei geringeren erwarteten Absatzzahlen stellt das Fertigungsverfahren V5 Integralbauweise aus Kunststoffhohlkörper 1/6 PE jenes mit den kleinsten Stückkosten dar. Steigen die Stückzahlen erreicht man bei etwa 800 Stück die Grenzstückzahl, welche den Kostenübergang zu einem wirtschaftlich günstigeren Fertigungsverfahren kennzeichnet. Ab dieser ist das Fertigungsverfahren V4 Metall Halbschalen 1/6 Stahl theoretisch zu bevorzugen. Zur vollständigen Betrachtung müssen in jedem Fall die Montagekosten gegenüber gestellt werden. Im Vergleich sind deutlich geringere Montagekosten bei der Integralbauweise aus Kunststoffhohlkörper 1/6 PE, als bei den Metall Halbschalen 1/6 Stahl aufgrund der geringeren Anzahl der zu fügenden Teile und der einfacheren Montagetechnologie zu erwarten. Diese zusätzlichen Kosten müssen durch die Kostendifferenz zwischen den beiden Varianten, welche vertikal zwischen den beiden Kurven in Abbildung 53 ersichtlich ist, gedeckt werden. Erst dann ist jene Stückzahl erreicht, an der das optimale Fertigungsverfahren wechselt. Gleichzusetzen mit den Stückzahlen ist der Betrachtungszeitraum. Kurzfristig ist die Integralbauweise aus Kunststoffhohlkörper 1/6

PE in Bezug auf die variablen Stückkosten zu bevorzugen. Über eine längere Zeitspanne kann aber das Fertigungsverfahren Metall Halbschalen 1/6 Stahl Kostenvorteile unter den zu berücksichtigten und bereits erwähnten Montagekosten mit sich bringen. Es gibt jedoch auch nicht in Geldwert ausdrückbare Kriterien, die ebenfalls in die Entscheidungsfindung mit eingebunden werden müssen. Dies erfolgt durch eine Kombination der Nutzwertanalyse mit den Stückkosten bei unterschiedlichen Stückzahlen. In der kurzfristigen Darstellung werden die Kosten auf 200 Stück des Windturbinenmantels bezogen und bei der langfristigen Betrachtung auf 3.000 Stück. Bei einer Stückzahl von etwa 1.000 für eine mittelfristige Entscheidung verändern sich die variablen Stückkosten kaum im Vergleich zur langfristigen Betrachtung. Daher wird auf eine solche Darstellung an dieser Stelle verzichtet. Zusätzlich wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, indem die Gewichtungsfaktoren der zweiten Stufe (Abbildung 52) zwischen  $\pm 10\%$  des Ausgangswertes variiert werden. Die Auswirkung dieser veränderten Gewichtungen auf die Nutzwerte wird dabei festgehalten.

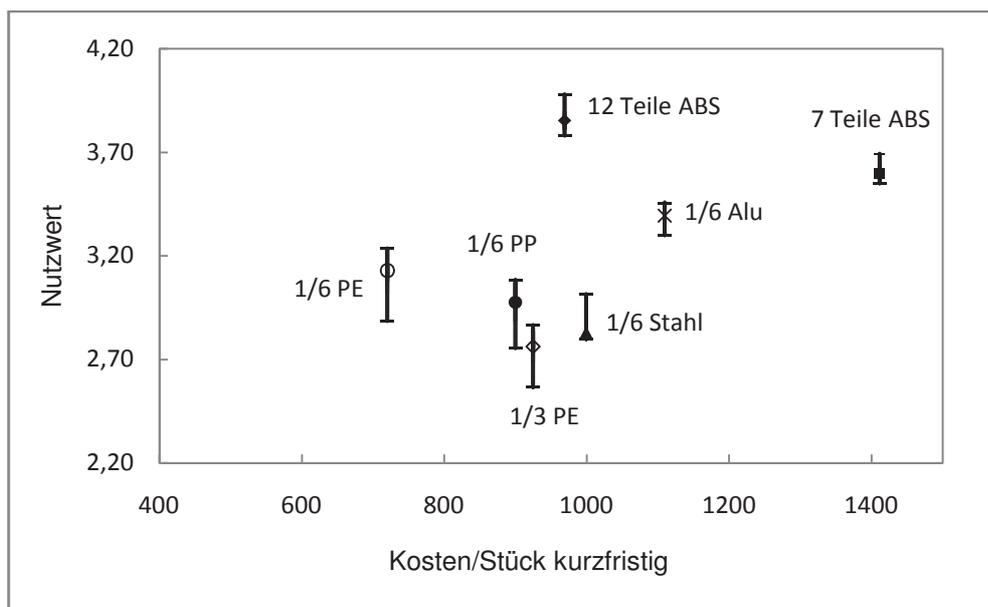


Abbildung 54: Gegenüberstellung zwischen Nutzwert und Stückkosten bezogen auf 200 Stück

Abbildung 54 relativiert das Ergebnis der Nutzwertanalyse und bringt durch die Berücksichtigung der variablen Herstellkosten pro Stück eine andere Reihung hervor. Das verdeutlicht das Verhältnis zwischen Kosten und Nutzwert. Von diesem Standpunkt ist in der kurzfristigen Betrachtung die Lösungsvariante V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE den anderen Lösungsvarianten aufgrund deutlicher Kostenvorteile vorzuziehen. Diese Variante verursacht die geringsten Kosten pro Nutzwert von etwa 230 €/Nutzwertpunkt, diese Entscheidung bleibt auch nach der Sensitivitätsanalyse aufrecht. Differenzierter dazu sieht es in einer langfristigen Betrachtung aus, wie Ab-

bildung 55 verdeutlicht. Aufgrund der leistungsfähigeren Serienfertigungsverfahren sinken die variablen Stückkosten mancher Varianten erheblich, wodurch eine neue Entscheidungsgrundlage entsteht. Die Lösungsvariante V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl rückt aus kostentechnischer Sicht an die erste Stelle, gefolgt von den Lösungsvarianten V4 Metall Halbschale 1/6 Aluminium und V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE. Das beste Verhältnis zwischen Kosten und Nutzwert unter Berücksichtigung der Sensitivitätsanalyse kann die Lösungsvariante V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl aufweisen. Dieses lässt sich mit ungefähr 168 €/Nutzwertpunkt beziffern.

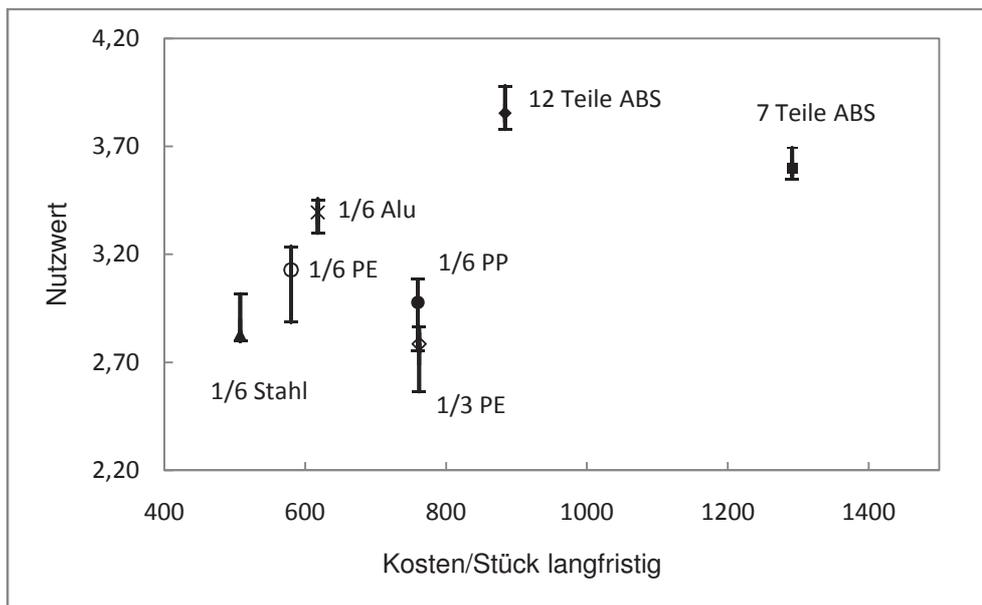


Abbildung 55: Gegenüberstellung zwischen Nutzwert und Stückkosten bezogen auf 3.000 Stück

Diese Auswertung der beiden Gegenüberstellungen zwischen Nutzwert und variablen Herstellkosten ergibt genau dasselbe Ergebnis wie die rein wirtschaftliche Betrachtung durch die variablen Herstellkosten (Abbildung 53) und begründet sich durch die teilweise deutliche Kostendifferenz zwischen den unterschiedlichen Varianten. Dabei haben sich die Lösungsvarianten V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE für die kurzfristige Betrachtung und die Lösungsvariante V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl im längerfristigen Betrachtungszeitraum im direkten Variantenvergleich durchgesetzt.

Da es sich hier um eine entwicklungsbegleitende Kalkulation zum Variantenvergleich handelt und eine vollständige Konzeptausarbeitung noch nicht vorliegt, ist eine exakte Kostenangabe nicht möglich. Aufgrund der deutlichen Kostendifferenzen zwischen den Varianten lassen sich Tendenzen zugunsten der oben erwähnten Lösungsvarianten erkennen.

#### 4.7 Betrachtung weiterer mechanischer Komponenten

Nach dem Windturbinenmantel auf Rang eins der ABC-Analyse (Abbildung 12) folgt als nächste rein mechanische Komponente der Lagerverband zur Windrichtungsnachführung. Diese besteht für den analysierten Konstruktionsstand aus dem selbstgefertigten Lagergehäuse, Welle, Trägerplatte, Knotenblech und den bezogenen Wälzlagern und den dazugehörigen Sicherungselementen zur Montage der Baugruppe, siehe Abbildung 56.

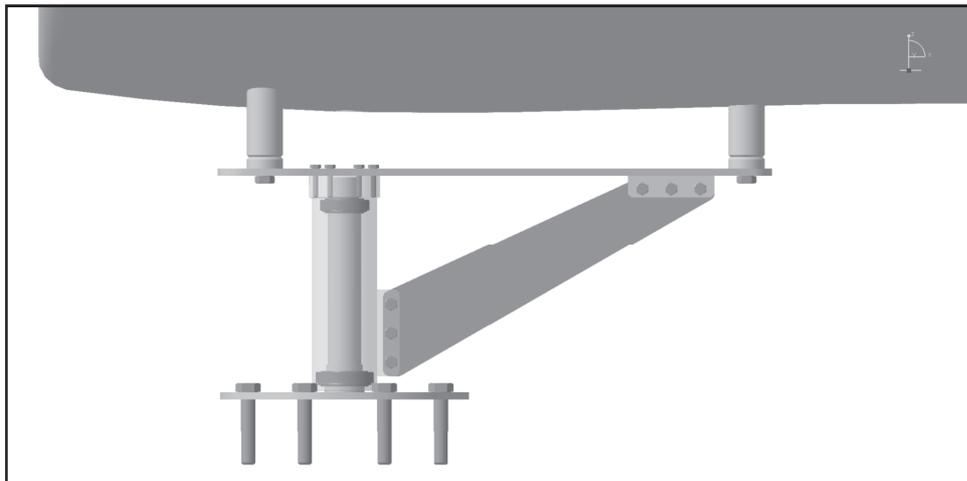


Abbildung 56: Lagerbaugruppe Eigenfertigung

Durch die vielen benötigten Bearbeitungsschritte der unterschiedlichen Bauteile und der eingesetzten Kegelrollenlager, ist diese Baugruppe sehr kostenintensiv. Im Idealfall kann eine Komplettlösung einer fertigen Wälzlagereinheit eines Lagerherstellers diese Aufgabe übernehmen. Dies bietet neben dem Einsatz einer erprobten Lagerausführung auch die Vermeidung von Montagefehlern, welche etwa 16 %<sup>150</sup> der vorzeitigen Lagerausfälle verursachen. Aus wirtschaftlicher Sicht bieten sich Industrieprodukte an, welche in höherer Stückzahl weit verbreitet Anwendung finden. Ein interessantes Produkt stellt in dieser Hinsicht, eine Radlagereinheit der Automobilindustrie dar, da diese in sehr großen Stückzahlen preiswert aber qualitativ hochwertig und in den verschiedensten Baugrößen und Formen gefertigt werden.

Ein kompaktes flexibles Design zur Kostensenkung im Automobilsektor ist die Radlagereinheit „HBU3“, mit integrierten Flanschen an Innen- und Außenring (Abbildung 57). Diese Lagereinheit beinhaltet die komplette Radlagerung und gewährleistet die benötigte Vorspannung und Positionierung. Nebenbei sind diese Lebensdauer geschmiert und besitzen Dichtsysteme für raueste Umweltbedingungen. Mit den beiden

---

<sup>150</sup>SKF, Zugriffsdatum 10.1.2014

Flanschen wird zusätzlich eine einfache Montage bzw. Demontage jederzeit gewährleistet.<sup>151</sup>

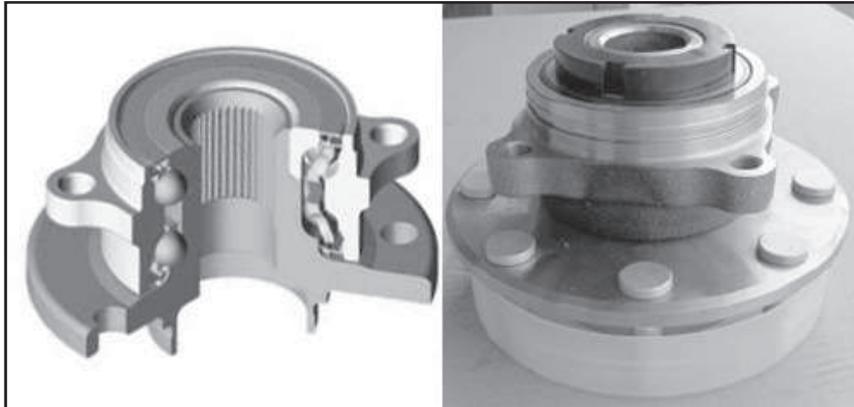


Abbildung 57: Radlagersatz HBU3 Aufbau<sup>152</sup> (links), THU 123/170/113,9/51,2 (rechts)<sup>153</sup>

Eine solche HUB3-Radlagereinheit kann die gesamte Turbinenlagerungsbaugruppe ersetzen und vermeidet somit Produktions- und Montagekosten sowie etwaige Montagefehler. Nachstehend ist ein Angebot einer solchen Radlagereinheit angeführt.

**Bezeichnung**

**Kosten**

THU 123/170/113,9/51,2

€ 102 (50 Stück)<sup>154</sup>

Trotz all dieser Vorzüge gibt es dennoch einen großen Nachteil. Technische Informationen wie z.B. Tragzahlen, Wälzlagerstyp, Werkstoff, Schmierstoffe, usw. sind aufgrund der engen Entwicklungszusammenarbeit zwischen Automobilindustrie und Lagerhersteller schwer bis gar nicht als Außenstehender zu bekommen. Diese Tatsache erschwert die erforderliche technische Auslegung für den korrekten Lagereinsatz, welcher für die erforderliche Lebensdauer benötigt wird. Nichts desto trotz soll eine solche Lagereinheit als kostengünstige Alternativvariante zur Eigenfertigung herangezogen werden. Damit lassen sich die Kosten der Lagerbaugruppe um bis zu ca. 75 % je nach verwendeter Radlagereinheit senken. Abbildung 58 zeigt die Verwendung dieser Lagereinheit zur Windrichtungsnachführung.

---

<sup>151</sup>SKF, Zugriffsdatum 10.1.2014

<sup>152</sup>Heißing/Ersoy/Gies (2011), S 374

<sup>153</sup>Beham Techn. Handels GmbH, Angebot 16.12.2013

<sup>154</sup>Beham Techn. Handels GmbH, Angebot 16.12.2013

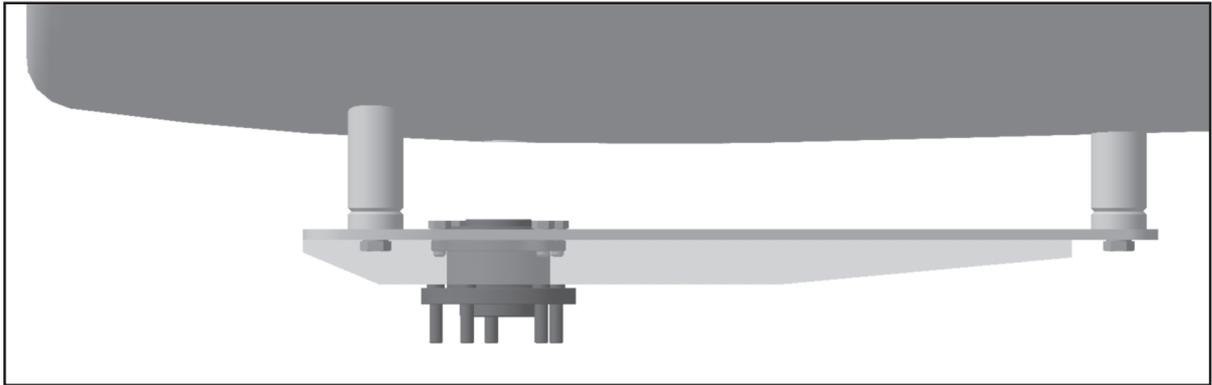


Abbildung 58: Lagerbaugruppe mit Radlagersatz

## 4.8 Potentiale zum Insourcing der Fertigung

Abschließend wird näher auf die Fertigung des Windenergiekonverters und speziell auf die Herstellung der Baugruppen in der SFL-Unternehmensgruppe eingegangen. Damit gemeint sind in erster Linie die Fertigungsanlagen, die derzeit nutzbar zur Verfügung stehen. Danach gilt es zu prüfen, welche dieser Anlagen für die Herstellung des Windenergiekonverters in Frage kommen. Für den Entwicklungsstand des Prototyps werden bereits sämtliche Baugruppen aus metallischen Werkstoffen selbst gefertigt. Es ist zu identifizieren, ob weitere derzeit fremdbezogene Baugruppen auch selbst gefertigt werden können. Das Festhalten der Fertigungsressourcen soll einen raschen und einfachen Überblick über sämtliche Fertigungsanlagen ermöglichen. Zusammen mit den derzeit benötigten Fertigungsverfahren kann überprüft werden, ob andere Fertigungsressourcen für die Herstellung in Frage kommen können. Es ist dabei auch auf die im vorangegangenen Kapitel so ausführlich beschriebenen Fertigungsverfahren einzugehen und die Möglichkeit eines Insourcings zu prüfen.

### 4.8.1 Fertigungsmaschinenaufstellung

Der aktuelle unternehmensinterne Maschinenpark wird aufgenommen und dahingehend analysiert, welche Fertigungsmaschinen für die Herstellung zur Verfügung stehen und für eine Serienfertigung von bis zu 200 Stück jährlich in Frage kommen können. Als Quelle dienen die Maschinendatenbanken der Standorte Stallhofen und Ungarn. Im ersten Schritt sind die Maschinen zu kategorisieren, um sich über die verschiedenen Anwendungsgebiete einen Überblick zu verschaffen. In der nachstehenden Tabelle 18 wurden grobe Bearbeitungskategorien eingeführt, welchen die einzelnen Maschinen zugeordnet werden können. Zusätzlich wird eine Unterkategorie für eine konventionelle sowie eine numerisch gesteuerte Bearbeitung eingeführt.

Tabelle 18: Maschinenkategorisierung der Standorte Stallhofen und Ungarn

Kategorie	Stallhofen			Ungarn		
	Anzahl	Konv.	NC u. CNC	Anzahl	Konv.	NC u.CNC
Drehen	1	1	0	10	7	3
Fräsen/Ausklinkfräsen	6	6	0	14	6	8
Bohren	23	-	-	12	-	-
Spezialmaschinen	15	-	-	0	-	-
Zuschneiden/Ausschneiden	9	7	2	6	2	4
Biegen/Abkanten	9	-	-	7	-	-
Schweißen	32	32	0	65	65	0
Sägen	24	-	-	5	-	-
Stanzen	9	-	-	2	-	-
Pressen	10	-	-	0	-	-
Hobeln/Schleifen/Polieren	25	-	-	5	-	-
Oberflächenbearbeitung/ Lackieren	2	-	-	8	-	-
Sonstiges, Unbekannt	12	-	-	15	-	-
Richten	-	-	-	2	-	-
Kräne	-	-	-	18	-	-
Stapler	-	-	-	7	-	-

#### 4.8.2 Analyse Maschinenpark

Diese Kategorisierung des Maschinenparks veranschaulicht die Einordnung der SFL-Unternehmensgruppe im Metallbau und nicht im klassischen Maschinenbau. Vor allem der Standort Stallhofen ist für die Produktion von Fassadenelementen ausgelegt und verfügt daher über einige Spezialanlagen für die Ver- bzw. Bearbeitung dieser Elemente. Als Grundmaterial dienen für diese Anwendung hauptsächlich Platten und Profilhalbzeuge aus Metall. Die für die Verarbeitung dieser Halbzeuge benötigten Maschinen findet man in der Auflistung der Spezialmaschinen. Auf der anderen Seite verfügt der Standort nur über eine Minimalausstattung an Maschinen für die klassische Metallbearbeitung wie Drehen und Fräsen.

Ganz anders sind im Vergleich dazu die Verhältnisse am Standort Ungarn. Dort gibt es kaum Spezialmaschinen, die nur auf wenige bestimmte Arbeitsschritte zugeschnitten sind. Große Metallbearbeitungsmaschinen sowie viele Handschweißanlagen sind typische Anzeichen für den Anlagen- bzw. Metallbau. Im Anlagenverzeichnis befinden sich viele Dreh bzw. Fräsmaschinen sowohl für die konventionelle als auch für die computergesteuerte Bearbeitung. Wobei einige dieser Anlagen von den maximalen Abmaßen der zu bearbeitenden Werkstücke auf große Dimensionen ausgelegt sind.

Im Hinblick auf die Serienfertigung des Windenergiekonverters sind besonders automatisierte Bearbeitungsschritte zu betrachten. Damit können vor allem Teile, die in größerer Stückzahl benötigt werden, effizient und wirtschaftlich hergestellt werden.

#### **4.8.3 Benötigte Fertigungsverfahren**

Für die Fertigung der Konstruktionsausführung für den Windenergiekonverter in Lichtenegg werden folgende maschinenbauliche Fertigungsverfahren benötigt:

- Drehen (Wellen,..)
- Fräsen (Nuten)
- Zuschneiden (Platten, Bleche,..)
- Biegen (Platten, Bleche,..)
- Sägen (Rohre, Rohmaterial)
- Schweißen (Platten, Rohre,..)
- Bohren, Gewindeschneiden (Gewindebohrungen,..)
- Oberflächenbearbeitung, Beschichten bzw. Lackieren (Baugruppen, Bauteile,...)
- Laminieren GFK (Windturbinenmantel)
- Spritzguss GFK (Rotorblätter)

Die Herstellung der Rotorblätter und des Mantels kann aufgrund der aerodynamischen Formgebung und Abmessung nur sehr aufwändig mit spanenden Fertigungsverfahren in größerer Stückzahl erfolgen. Hier werden Fertigungsverfahren zur Kunststoffverarbeitung eingesetzt. Des Weiteren können durch die unterschiedlichsten Fertigungsverfahren auch verschiedene Werkstoffe zum Einsatz kommen. Die Wahl des Werkstoffes und die Verarbeitungsvorgänge bis zum fertigen Bauteil wirken sich entscheidend auf die Kostenstruktur aus und sind daher von besonderer Bedeutung. Vergleicht man nun die benötigten Fertigungsverfahren zur Produktion des Windenergiekonverters mit den zur Verfügung stehenden Maschinen, dann können sämtliche Bauteile und Baugruppen, die auch in der Prototypenphase selbst gefertigt werden, auch für die Serienproduktion in der unternehmenseigenen Fertigung hergestellt werden. Ausgenommen davon sind derzeit der Windturbinenmantel und die Rotorblätter sowie der Spinner (aerodynamische Abdeckung der Nabe), die auch derzeit nicht selbst gefertigt werden, da eine Eigenfertigung mit den vorhandenen Fertigungstechnologien (hauptsächlich spanende Bearbeitung) sehr material- und zeitintensiv ist. Es sind nicht nur die benötigten Fertigungsverfahren, sondern auch die Wirtschaftlichkeit der Eigenfertigung im Vergleich zur Fremdfertigung zu beachten.

Auch wenn eine Eigenfertigung möglich und sinnvoll erscheint, muss diese aus Sicht der Herstellkosten nicht zwangsläufig günstiger sein als eine Fremdfertigung. Leistungsfähigere Fertigungsverfahren oder zusätzlich vorhandenes Know-how eines Zulieferunternehmens können Kostenvorteile und auch Qualitätsvorteile mit sich bringen.

Bei der Analyse der benötigten Bearbeitung zeigt sich, dass viele Schweißarbeiten nötig sind, sowie Zuschnitte von Plattenhalbzeugen aus Metall mittels Laser- bzw. Plasmaschneidmaschinen gefolgt von der Bearbeitung auf Drehmaschinen, Säge und Biegearbeiten. Die spanende Bearbeitung mittels einer Fräsmaschine wird in dieser konstruktiven Ausführung kaum benötigt. Da die Schweißarbeiten ausschließlich manuell per Hand erfolgen, sind diese im Vergleich zu den Aus- bzw. Zuschnittsarbeiten, die zum Teil automatisiert werden können, sehr zeit- und arbeitsintensiv. Vor allem bei der Herstellung von Teilen in geringer Stückzahl, wie es bei der Fertigungseinführung einer Kleinserie der Fall ist, da hier noch keine, oft aufwändig herzustellenden Schweißhilfskonstruktionen zum Einsatz kommen. Für eine Fertigung in Kleinserie sind aus wirtschaftlichen, aber auch aus Toleranz Gründen unbedingt fertigungsunterstützende Hilfslehren und Schweißvorrichtungen einzusetzen. Dadurch lassen sich Toleranzabweichungen und der Herstellungsaufwand, hier vor allem Anpassungsarbeiten während des Montagevorgangs, deutlich reduzieren. Aufgrund der Maschinenparkanalyse der beiden Standorte sowie der benötigten Fertigungsverfahren ist vorzugsweise der Standort in Ungarn für die Herstellung heranzuziehen, da dieser alle notwendigen Maschinen zur Verfügung stellen kann. Dort können alle Arbeitsschritte Vorort ohne große Zwischenwege durchgeführt werden. Es gilt des Weiteren zu prüfen, ob die benötigten Fertigungsqualitäten bereitgestellt werden können, um gegeben falls die Konstruktion der Serienfertigungsverfahren anzupassen.

Während der Montage der ersten Turbine 01 verursachten erhebliche Abweichungen von den erlaubten Toleranzen einen erhöhten Anpassungsbedarf einiger Bauteile, um diese zusammenfügen zu können. Diese Abweichungen sind teilweise der Qualität der Fertigung zuzuschreiben, haben ihre Ursache aber auch in einer Konstruktion, welche die exakte Fertigung erschwert und nur kleine Abweichungen für eine sachgerechte Montage zulässt. Wichtig ist für die weiteren Windenergiekonverter daher eine fertigungsgerechtere Konstruktion in Abhängigkeit vom Fertigungsverfahren zur Verfügung zu stellen und ebenfalls Toleranzen vorab zu berücksichtigen. Des Weiteren hat bei der derzeit durchgeführten Einzelfertigung eine Montageüberprüfung am Ort der Bauteilerstellung zu erfolgen, um bei der Endmontage die bisher aufgetretenen und aufwändigen Anpassungsarbeiten zu vermeiden.

#### 4.8.1 Insourcing der Fertigungsverfahren für den Windturbinenmantel

An dieser Stelle sollen nun die Fertigungsverfahren der Serienausführung des Windturbinenmantels gegenübergestellt und deren weitere Einsatzgebiete festgehalten werden.

Tabelle 19: Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren

Eigenschaften	Metall Tiefziehen	Kunststoff Tiefziehen	Rotationsguss
Werkzeugkosten	hoch	gering	mittel
Werkzeugwerkstoffe	Gusseisen, Kaltarbeitsstahl, wärmebehandelt und beschichtet <sup>155</sup>	Aluminium, Gips, Holz, sonstige Modellwerkstoffe, Wahl abhängig von der Fertigungstückzahl <sup>156</sup>	Aluminium Blech oder Guss, Stahl-, Messing-, und Kupferblech, guter Wärmeübergang nötig, dünnwandig <sup>157</sup>
Werkzeugkomponenten	Zwei Werkzeughälften (Matrize, Stempel) <sup>158</sup>	Meist nur eine Werkzeughälfte <sup>159</sup>	mehrteilig geschlossenes Hohlwerkzeug <sup>160</sup>
Bauteilwerkstoffe	Stahl, Aluminium, Magnesium, Titan, beschichtete Bleche <sup>161</sup>	PC, PA, PE, PP, PET, PVC, ABS, PS,... faserverstärkte Verbundwerkstoffe <sup>162</sup>	PE, PP, PC, PA, PVC, EVA, EBA, Fluorpolyimere, müssen Hitzestabil sein <sup>163</sup>
Ausgangshalbzeug	Blechhalbzeuge <sup>164</sup>	thermoplastische Plattenhalbzeuge <sup>165</sup>	pulverförmige, flüssige bzw. pastöse Kunststoffe <sup>166</sup>
spezifische Werkstoffkosten	gering bis hoch	mittel	mittel
Prozessschritte	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Blechzuschnitt</li> <li>2. Einlegen in Werkzeug</li> <li>3. Umformvorgang</li> <li>4. Entformung</li> <li>5. Nachbearbeitung<sup>167</sup></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Erwärmen auf Umformtemperatur (100-180 °C)</li> <li>2. Umformvorgang</li> <li>3. Entformung</li> <li>4. Nachbearbeitung<sup>168</sup></li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Werkzeug befüllen</li> <li>2. Rotation in Heizkammer (bis ca. 300 °C)</li> <li>3. Rotation in Kühlkammer</li> <li>4. Entformung</li> <li>5. Nachbearbeitung<sup>169</sup></li> </ol>

<sup>155</sup>Vgl. Doege/Behrens (2007), S. 326ff.

<sup>156</sup>Vgl. Knappe/Lampl/Heuel (1992), S. 352

<sup>157</sup>Vgl. Knappe/Lampl/Heuel (1992), S. 351

<sup>158</sup>Vgl. Doege/Behrens (2007), S. 323

<sup>159</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 419

<sup>160</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner. (2008), S. 321

<sup>161</sup>Vgl. Doege/Behrens. (2007), S. 438ff.

<sup>162</sup>Vgl. Doege/Behrens. (2007), S. 257

<sup>163</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 323

<sup>164</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 419

<sup>165</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 419

<sup>166</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 323

<sup>167</sup>Vgl. Klocke/König (2007), S. 324

<sup>168</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner. (2008), S. 419

<sup>169</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 322

Prozesszyklusdauer	kurz	mittel	lang
Reproduzierbarkeit	hoch <sup>170</sup>	mittel, ungleichmäßige Wanddickenverteilung <sup>171</sup>	mittel, Formgenauigkeit +/- 1 % von Nennmaß <sup>172</sup>
Bauteilgestaltung	eingeschränkt, keine Hinterscheidungen möglich (vgl. Tiefziehen Kunststoff)	eingeschränkt, keine Hinterschnidungen möglich <sup>173</sup>	Komplexe Bauteilgestaltung möglich <sup>174</sup>
Anwendungsgebiete	3D Blechteile verschiedenster Größen, Großserie in Automobil-, und Verpackungsindustrie <sup>175</sup>	großflächige 3D Formteile bis zu 4 m <sup>2</sup> , Verpackungsteile, Automobilindustrie <sup>176</sup>	behälterartige Bauteile, Volumen bis zu einigen m <sup>3</sup> möglich, Automobilindustrie, Baugewerbe, Gartenbau <sup>177</sup>
Flexibilität	gering, ausgelegt für Massenfertigung <sup>178</sup>	Variables Halbzeug einsetzbar (Dicke, Farbe, Werkstoff) <sup>179</sup>	Wanddicke veränderbar, Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe, mehrlagiger Wandaufbau möglich <sup>180</sup>

Eine Insourcingentscheidung für eine dieser Fertigungstechnologien muss unter Berücksichtigung weiterer unternehmensinterner Anwendungsgebiete für diese Technologie erfolgen, da mit der Produktion des Windenergiekonverters Turbine 01 derzeit keine ausreichende Auslastung erzielt werden kann und für das neue Fertigungsverfahren zusätzliches Know-how aufzubauen ist. Daher ist es naheliegend, auch die größere Turbine 10, durch den Einsatz des gleichen Fertigungsverfahrens herzustellen. Neben der großen Turbine 10 existieren weitere Einsatzmöglichkeiten in den verschiedensten Anwendungsgebieten der Unternehmensgruppe.

<sup>170</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner. (2008), S. 323

<sup>171</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner. (2008), S. 421

<sup>172</sup>Vgl. Kalweit et al. (2008), S. 374

<sup>173</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 398

<sup>174</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 323

<sup>175</sup>Vgl. Klocke/König (2007), S. 323

<sup>176</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 421

<sup>177</sup>Vgl. Kalweit et al. (2008), S. 347

<sup>178</sup>Vgl. Klocke/König. (2007), S. 323

<sup>179</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner. (2008), S. 421

<sup>180</sup>Vgl. Eyerer/Hirth/Elsner (2008), S. 323

Anwendungsgebiete:<sup>181</sup>

- Stahlbau (architektonischer Stahlbau, Portale, Handläufe,...)
- Fassadenbau (Elementfassaden, Sonderfassaden,...)
- Maschinenbau (Generatorgehäuse, Druckgeräte, Drehgestelle,...)
- Anlagenbau (Behälterbau, Reaktoren, Aufbereitungsanlagen,...)
- Lichttechnik (Beleuchtungssysteme, flächige Lichtplatten,...)
- Energietechnik (Photovoltaik, Solarthermie,...)
- E-Mobility (E-Fahrzeug ELI)
- Glastechnik (verformte, veredelte Glasprodukte für Innen-, und Außenbereich)

Bei all den Produkten, welche in diesen Bereichen hergestellt werden, handelt es sich meist um maßgeschneiderte Einzelprodukte (Stahlbau, Fassadenbau, Anlagenbau, Maschinenbau) oder um Klein- bis Mittelserien (Lichttechnik, Energietechnik, E-Mobility). Diese Tatsache führt zu deutlichen Nachteilen in wirtschaftlicher Hinsicht für das Verfahren des metallischen Tiefziehens, da dieses in erster Linie auf eine Serienproduktion mit hohen Stückzahlen ausgelegt ist. Das betrifft besonders die hohen Einführungsinvestitionen in den Werkzeugbau. Die beiden anderen Verfahren eignen sich auch für kleine Produktionsstückzahlen. Damit beschränkt sich die weitere Betrachtung auf diese beiden kunststoffverarbeitenden Fertigungsverfahren und deren Einsatzgebiete. Dabei finden Kunststoffbauteile in fast allen angeführten Bereichen als Behälter, Gehäuse, Verkleidungselemente, Isolierungen, usw. Anwendung. Nachstehend sind einige mögliche Bauteile angeführt.

- E-Mobility (ELI: Karosserie, Innenausstattung, Abdeckungen Elektronik,...)
- Lichttechnik (flächig verformte Lichtplatten, Gehäuse Elektronik,...)
- Energietechnik (Sichtabdeckungen, Isolierungen...)
- Anlagenbau (Isolierungen, Abdeckungen...)
- Fassadenbau (mögliche Fassadenteile, Außen- bzw. Innenbereich)

Der überwiegende Anteil dieser Anwendungen lässt sich vorzugsweise einfacher und wirtschaftlicher mit dem Fertigungsverfahren des Kunststoff Thermoformens (Tiefziehens) als mit dem Rotationsguss umsetzen. Das beginnt bereits mit dem günstigeren Werkstoff für den Werkzeugbau für Prototypen und der Produktion in kleinen Stückzahlen (Tabelle 19) und geht bis zur deutlich kürzeren Prozessdauer bei der Bauteilherstellung. Aus dieser Sicht ist das Kunststofftiefziehen dem Rotationsguss vorzuziehen. In Bezug auf den Windturbinenmantel ist das Verfahren jenes mit dem höchsten Nutzwert. Aus Sicht der Kosten kann eine Eigenfertigung noch eine Reduktion der Herstellkosten nach sich ziehen.

---

<sup>181</sup>Vgl. SFL Stallhofen, Zugriffsdatum 11.1.2014

Dieser Vorschlag basiert auf qualitativen Aussagen durch den direkten Fertigungstechnologievergleich unter Berücksichtigung weiterer Anwendungsgebiete. Für eine aussagekräftige Argumentation, zugunsten einer dieser Technologien ist eine Investitionsrechnung unerlässlich.

### **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Mit der Evaluierung von Fertigungstechnologien und der Analyse des Insourcing-Potentials der Fertigung soll die eine Serienüberleitung des Windkraftkonverters Turbine 01 ermöglicht werden. Beginnend mit einer Kostenanalyse der mechanischen Bauteile wird deren Kostenverursachung an den gesamten variablen Herstellkosten bestimmt. Dabei werden jene Bauteile mit den höchsten relativen Kostenanteilen auf deren Kostensenkungspotential untersucht und Möglichkeiten zur Kostenreduktion entwickelt. Dabei sind unterschiedliche Fertigungstechnologien zu evaluieren und auch in Bezug auf ein Insourcing zu prüfen.

Mit den beiden, in Kapitel 4 betrachteten mechanischen Komponenten, dem Windturbinenmantel und der Turbinenlagerungsbaugruppe, lässt sich eine deutliche Herstellkostenreduktion durch den Einsatz anderer Fertigungsverfahren bzw. durch den Bezug von lieferantenspezifischen Standardbauteilen (Radlagereinheiten) erzielen. Dabei lassen sich Kosteneinsparungen von bis zu 40 %, von den zu Beginn dieser Arbeit bestimmten variablen Herstellkosten verwirklichen. Das bei der Fertigung des Windturbinenmantels in Bezug auf die variablen Herstellkosten zu wählende Herstellungsverfahren ist dabei von der vorab zu definierenden Absatzmenge und vom geplanten Absatzzeitraum abhängig. Für den kurzfristigen Betrachtungszeitraum mit geringeren Stückzahlen von etwa 800 Stück, bringt die Fertigungsvariante V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE Kostenvorteile, gegenüber dem Kunststoff und Metall Tiefziehen. Bei Überschreitung dieser Stückzahlen kann mit der Änderung der Fertigungstechnologie zur Variante V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl der Windturbinenmantel kostengünstiger gefertigt werden. Die durch eine entwicklungsbegleitende Kalkulation abgeschätzten Kosten der Variante V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE belaufen sich auf ca. 720 €/Mantel (bei 200 Stück) und die der Variante V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl auf ca. 507 €/Mantel (bei 3.000 Stück), womit das Kostenziel von 500 € in der langfristigen Betrachtung annähernd erreicht wird. Das Gewichtsziel von 100 kg kann durch das Fertigungsverfahren V5 Kunststoff Hohlkörper 1/6 PE mit 90 kg Mantelgewicht unterschritten werden. Durch die Metallfertigung V4 Metall Halbschale 1/6 Stahl ergibt sich ein Eigengewicht von 174 kg, wobei hier noch ein Gewichtsoptimierungspotential durch den Einsatz dünnerer Halbzeuge gegeben ist.

Die Einführung einer neuen unternehmensinternen Fertigungstechnologie in Bezug auf den Mantel kann sich auch positiv auf die Kosten niederschlagen, wobei auf weitere Anwendungsgebiete dieser neuen Technologie in der SFL-Unternehmensgruppe eingegangen wird. Der ausgearbeitete Vergleich der unterschiedlichen Fertigungstechnologien zeigt für das Kunststoff Tiefziehen (Thermoforming) Vorteile. Diese Vorzüge beziehen sich in erster Linie auf die zusätzlichen Einsatzbereiche innerhalb der Unternehmensgruppe, aber auch auf verfahrensspezifische Eigenschaften der Fertigungstechnologie. Diese Empfehlung ist durch eine zukünftige Investitionsrechnung abzusichern.

Weitere Kostensenkungspotentiale lassen sich auch in den bisher noch nicht betrachteten mechanischen Komponenten finden, wobei aufgrund der geringeren einzelnen Kostenanteilen, die zu erwartenden Einsparungen kleiner ausfallen werden als jene, bei den hier angeführten und bearbeiteten Bauteilen. Um dieses Potential dennoch auszuschöpfen, sollen für die weiteren Komponenten und Baugruppen ebenfalls konstruktive, fertigungstechnische und materialspezifische Alternativen entwickelt werden. Besonderer Schwerpunkt muss in weiterer Folge auch auf die elektronischen Komponenten gelegt werden, mit dem Ziel, die erwähnten variablen Herstellkosten von ca. 2.000 € für den gesamten Windenergiekonverter zu erreichen. Die Berücksichtigung all dieser und weiterer Faktoren, wie z.B. Vertrieb und Instandhaltung, stellen die Grundlage einer erfolgreichen Markteinführung des Windkraftkonverters Turbine 01 dar.

## 6 Literaturverzeichnis

**ARNOLDS, H.; HEEGE, F.; RÖH, C.; TUSSIG, W.:** Materialwirtschaft und Einkauf – Grundlagen – Spezialthemen - Übungen, 12. Auflage, Wiesbaden 2013

**AVK - INDUSTRIEVEREINIGUNG:** Handbuch Faserverbundkunststoffe – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendung, 3. Auflage, Wiesbaden 2010

**BÖGE, A.:** Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendung der Maschinenbau-Technik, 20. Auflage, Wiesbaden 2011

**BRONNER, A.; HERR, S.:** Vereinfachte Wertanalyse – mit Formularen und CD-Rom, 4. Auflage, Heidelberg 2006

**DOEGE, E., BEHRENS, B-A.:** Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, Heidelberg 2007

**EDMUND, G.; ENGELTER A.; BUSCH, W.; LOWKA, D; MÖLLER, M; WEBER, P.:** Kostenbewusstes Entwickeln und Konstruieren – Grundlagen und Methoden zur Kostenbestimmung und Kostenabschätzung während eines entwicklungs- und herstellkostenorientierten Vorgehens, Renningen-Malmsheim 1994

**EHRENSPIEL, K.; KIEWERT, A.; LINDEMANN, U.:** Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren – Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung, 6. Auflage, Heidelberg 2007

**EHRENSPIEL, K., MEERKAMM, H.:** Integrierte Produktentwicklung – Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 5. Auflage, München 2013

**EYERER, P.; HIRTH, T.; ELSNER, P.:** Polymer Engineering – Technologien und Praxis, Heidelberg 2008

**FELKAI, R.; BEIDERWIEDEN, A.:** Projektmanagement für technische Projekte – Ein prozessorientierter Leitfaden für die Praxis, 1. Auflage, Wiesbaden 2011

**GASCH, R.; TWELE, J.:** Windkraftanlagen – Grundlage, Entwurf, Planung und Betrieb, 4. Auflage, Wiesbaden 2005

**GRAP, R.:** Produktion und Beschaffung – eine praxisorientierte Einführung, München 1998

**GROTE, K.H.; FELDHUSEN, J.:** Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Auflage, Heidelberg/New York 2007

**GSÄNGER S.:** Small Wind World Report 2013 – Summary, Bonn 2013

**HALBHUBER, W.:** Betreib von Kleinwindkraftanlagen – ein Überblick über Markt, Technik und Wirtschaftlichkeit, Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 2009

**HAU, E.:** Windkraftanlagen – Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit, 4. Auflage, Heidelberg 2008

**HEIBING, B., ERSOY, M., GIES, ST.:** Fahrwerkshandbuch – Grundlagen, Fahr-  
dynamik, Komponenten, Systeme, Mechatronik, Perspektiven, 3. Auflage, Wiesbaden  
2011

**HENNING, F.; MOELLER, E.:** Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Ferti-  
gung, München 2011

**IRLE, C.:** Rationalität von Make-or-buy-Entscheidungen in der Produktion, Vallendar  
2011

**JAKOBY, W.:** Projektmanagement für Ingenieure – Gestaltung technischer Innovationen als systemische Problemlösung in strukturierten Projekten, 1. Auflage, Wiesbaden 2010

**JARASS, L.; OBERMAIR, G.; VOIGT, W.:** Windenergie – Zuverlässige Integration in die Energieversorgung, 2. Auflage, Heidelberg 2009

**KALWEIT, A., PAUL, CH., PETERS, S., WALLBAUM, R.:** Handbuch für Technisches Produktdesign – Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, Heidelberg 2006

**KLEIN, B.:** Leichtbau-Konstruktion – Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 10. Auflage, Wiesbaden 2013

**KLOCKE, F.; KÖNIG, W.:** Fertigungsverfahren 4 – Umformen, 5. Auflage, Heidelberg 2006

**KLUBMANN, N.; MALIK, A.:** Lexikon der Luftfahrt, 3. Auflage, Heidelberg 2012

**KNAPPE, W., LAMPL, A., HEUEL, O.:** Kunststoff-Verarbeitung und Werkzeugbau – ein Überblick, München 1992

**KURZ, U.; HINTZEN, H.; LAUFENBERG, H.:** Konstruieren, Gestalten, Entwerfen – Ein Lehr- und Arbeitsbuch für das Studium der Konstruktionstechnik, 4. Auflage, Wiesbaden 2009

**KUSTER, J.; HUBER, E.; LIPPMANN, R.; SCHMID, A.; SCHNEIDER, E.; WITSCHI, U.; WÜST, R.:** Handbuch Projektmanagement, 3. Auflage, Heidelberg 2011

**LINDEMANN, U.:** Methodische Entwicklung technischer Produkte – Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, 3. Auflage, Heidelberg 2009

**PAHL, G.; BEITZ, W.; FELDHUSEN, J.; GROTE., K.:** Konstruktionslehre – Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung – Methoden und Anwendung, z. Auflage, Heidelberg 2007

**POGGENSEE, K.:** Investitionsrechnung – Grundlagen – Aufgaben - Lösungen, 2 Auflage, Wiesbaden 2011

**PONN, J., LINDEMANN, U.:** Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte, 2. Auflage, München 2011

**PROBST, H., HAUNERDINGER, M.:** Kosten senken – Checklisten, Rechner, Methoden, München 2005

**REICH, G; REPPICH, M.:** Regenerative Energietechnik – Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung, Wiesbaden 2013

**REITERER D.:** Kleinwindkraft – Ein Leitfaden zur Planung und Umsetzung, 1. Auflage, Wien 2013

**REMER, D.:** Einführung der Prozesskostenrechnung – Grundlagen, Methodik, Einführung und Anwendung der verursachungsgerechten Gemeinkostenzurechnung, 2. Auflage, Stuttgart 2005

**RISSE, A.:** Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätektechnik, Wiesbaden 2012

**R&G FASERVERBUNDWERKSTOFFE:** Faserverbundwerkstoffe Handbuch, Edition 06/2009

**SCHUH, G.:** Innovationsmanagement- Handbuch Produktion und Management 3, 2. Auflage, München 2012

**SCHÜRMAN, H.:** Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, Anwendung, Heidelberg 2005

**VDMA.:** Kennzahlenkompass – Information für Unternehmer und Führungskräfte, Frankfurt am Main 2002

**WEIß, M.:** Wertorientiertes Kostenmanagement – Zur Integration von wertorientierter Unternehmensführung und strategischem Kostenmanagement, Köln 2005

**WESTKÄMPER, E.; WARNECKE, H.:** Einführung in die Fertigungstechnik, 8. Auflage, Wiesbaden 2010

**WIEDEMANN, J.:** Leichtbau – Elemente und Konstruktion, 3. Auflage, Heidelberg 2007

**ZANGEMEISTER, C.:** Nutzwertanalyse in der Systemtechnik – Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen, München 1971

## 7 Internetquellenverzeichnis

**Agenios GmbH:** Amortisationszeit einer Photovoltaikanlage, <http://www.photovoltaike.org/wirtschaftlichkeit/amortisation>, Zugriffsdatum 20.2.2013

**Comercio Digital, S.A:** Shop, <http://www.solostocks.com/venta-productos/generadores/aerogeneradores/aerogenerador-donqi-1-75kw-e-inversor-de-red-6032582>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**donQi Independent Energy:** donQi Urban Windmill, <http://donqi.nl/images/folder%20uk.pdf>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**E-Control:** Europäischer Haushalts-Energiepreisindex HEPI, Wien 2013, <http://www.e-control.at/de/konsumenten/strom/strompreis/internationale-vergleiche>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**Interessengemeinschaft Windkraft Österreich:** Windkraft in Österreich, Europa und weltweit, [http://www.igwindkraft.at/?mdoc\\_id=1015850](http://www.igwindkraft.at/?mdoc_id=1015850), Zugriffsdatum 27.11.2013

**Lantor BV:** Product and Processes, [http://www.lantor.nl/index.php/id\\_structuur/10598/](http://www.lantor.nl/index.php/id_structuur/10598/), Zugriffsdatum 20.8.2013

**qpunkt:** Multimedia, <http://www.qpunkt.at/multimedia/bilder.html>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**R&G Faserverbundwerkstoffe:** Harze, <http://shop1.r-g.de/item/140105>, Zugriffsdatum 10.8.1013

**R&G Faserverbundwerkstoffe:** Formenbau, <http://shop1.r-g.de/art/190135>, Zugriffsdatum 10.8.1013

**SFL Stallhofen:** Spektrum, <http://www.sfl-technologies.com/spektrum/stahlbau/>, Zugriffsdatum 11.1.2014

**SKF GmbH:** SKF Produkte für Wartung und Schmierung, [http://www.skf.com/binary/41-20653/03000DE\\_Catalogue\\_2011\\_tcm\\_41-20653.pdf](http://www.skf.com/binary/41-20653/03000DE_Catalogue_2011_tcm_41-20653.pdf), Zugriffsdatum 10.1.2014

**SKF GmbH:** Radlagereinheit HBU3, <http://www.skf.com/de/industry-solutions/cars-and-light-trucks/wheel-end/hub-bearing-unit-3/index.html>, Zugriffsdatum 10.1.2014

**tittel-group:** PV-Store – Fachhandel für Solartechnik, <http://www.ts-solarprojekt.de/pv-store/en/65-enflo-0110.html>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**Wind2power:** Turbine 01, [http://www.wind2power.at/w2p/p\\_001.php](http://www.wind2power.at/w2p/p_001.php), Zugriffsdatum 4.12.2013

**Windatlas:** AuWiPot - Windatlas und Windpotentialstudie Österreich [http://ispacevm11.researchstudio.at/index\\_v.html](http://ispacevm11.researchstudio.at/index_v.html), Zugriffsdatum 10.7.2013

**Windtec Systems:** Enflo 0110, <http://www.enflo-windtec.ch/produkte/enflo-0110/index.php>, Zugriffsdatum 9.10.2013

**Wind2power:** Idee, [http://www.wind2power.at/w2p/u\\_ph.php](http://www.wind2power.at/w2p/u_ph.php), Zugriffsdatum 27.11.2013

**ZULTNER Metall GmbH:** Lieferprogramm, <http://www.zultner.at/preislisten/Aluminium.pdf>, Zugriffsdatum 30.11.2013

**7Shop24.de:** Solar Wind [http://www.7shop24.de/product\\_info.php?info=p3771\\_kleinwindkraftanlage-enflo-0110-windmuehle.html](http://www.7shop24.de/product_info.php?info=p3771_kleinwindkraftanlage-enflo-0110-windmuehle.html), Zugriffsdatum 9.10.2013

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Windenergieanlagen nach Baugröße und Nennleistung .....	2
Abbildung 2: Prüfturm mit Turbine 01 (links), Turbine 10 (rechts) .....	4
Abbildung 3: Voraussage Gesamtleistung der installierten Kleinwindkraftanlagen (SWT).....	5
Abbildung 4: Turbine 01 in Lichtenegg (links), Prototyp Turbine 01 (rechts) .....	6
Abbildung 5: Logischer Arbeitsplan .....	8
Abbildung 6: Strömungsverhältnisse unter Entzug mechanischer Leistung .....	9
Abbildung 7: Verlauf des Leistungsbeiwerts über dem Geschwindigkeitsverhältnis vor und nach der Windkraftanlage.....	10
Abbildung 8: Prinzip eines Widerstandsläufers .....	11
Abbildung 9: Kräfte am Tragflügel.....	12
Abbildung 10: Luftkräfte am auftriebsnutzenden Rotor .....	13
Abbildung 11: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten und Leistungskennlinie.....	14
Abbildung 12: ABC-Analyse .....	18
Abbildung 13: Kosteneinteilung .....	20
Abbildung 14: Verschiede Sichten auf Selbstkosten eines Unternehmens .....	21
Abbildung 15: Kostenfestlegung und Kostenbeeinflussung während des Entwicklungsprozesses .....	23
Abbildung 16: Kostenentstehung und Kostenfestlegung in Unternehmensbereichen .....	24
Abbildung 17: Reduzierungsmöglichkeiten der Herstellkosten.....	25
Abbildung 18: Einfluss der spezifischen Beanspruchung auf verschiedene Kostengruppen.....	27
Abbildung 19: Regel für eine materialkostengünstige Konstruktion.....	29
Abbildung 20: Herstellkostenreduktion bei steigender Stückzahl durch andere Fertigungsverfahren .....	32
Abbildung 21: Zeitverteilung während der Montage im Maschinenbau für Einzel- und Kleinserien.....	33

Abbildung 22: Vorgehensweise beim Entwickeln und Konstruieren VDI 2222.....	36
Abbildung 23: Genauigkeit der Kostenvoraussage .....	40
Abbildung 24: Turbine 01 .....	41
Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit in List auf Sylt gemessen in 10 Metern Höhe und Leistungskennlinie der Turbine 01 .....	42
Abbildung 26: Energieernte bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten und kumulierter Energieertrag der Turbine 01 bezogen auf den Standort List .....	43
Abbildung 27: mittlere Jahreswindgeschwindigkeit in m/s 50 m über Grund .....	44
Abbildung 28: Gegenüberstellung Eigenleistung und Fremdleistung.....	47
Abbildung 29: ABC-Analyse der Kostenanteile .....	47
Abbildung 30: Windturbinenmantel aus Glasfaserverbundkunststoff .....	53
Abbildung 31: Zusammensetzung Materialkosten der Turbine 01 .....	55
Abbildung 32: Zusammensetzung Fertigungskosten der Turbine 01 .....	55
Abbildung 33: Kräfte am Windenergiekonverter .....	56
Abbildung 34: Zielkostenstruktur.....	58
Abbildung 35: Leichtbaustrategien.....	60
Abbildung 36: Differentialbauweise (links), Integralbauweise (rechts) .....	62
Abbildung 37: Modulbauweise (links), Verbundbauweise Kernmaterial (rechts).....	64
Abbildung 38: Windturbinenmantel der donQi Turbine .....	67
Abbildung 39: Einfluss der Wandstärkenänderung auf Gesamtgewicht und Lagerbelastung .....	71
Abbildung 40: Testlaminat aus GFK Sandwich .....	74
Abbildung 41: Differentialbauweise mit Rahmen .....	76
Abbildung 42: Konzept Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile .....	89
Abbildung 43: Teilung der Rahmenstruktur.....	90
Abbildung 44: 1/6 Teilsegment der Rahmenstruktur .....	90
Abbildung 45: Transportvolumen Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 12 Teile .....	92
Abbildung 46: Konzept Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7	

---

Teile .....	95
Abbildung 47: Transportvolumen Variante 3 Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen 7 Teile.....	95
Abbildung 48: Konzept Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 Teilung .....	100
Abbildung 49: Anbindungsmöglichkeit an Hohlkörpersegment mit Wechseleinsatz im Werkzeug .....	101
Abbildung 50: Transportvolumen Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/6 Teilung.....	102
Abbildung 51: Transportvolumen Variante 5: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper 1/3 Teilung.....	105
Abbildung 52: Gewichtung der Bewertungskriterien.....	111
Abbildung 53: Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren .....	116
Abbildung 54: Gegenüberstellung zwischen Nutzwert und Stückkosten bezogen auf 200 Stück .....	117
Abbildung 55: Gegenüberstellung zwischen Nutzwert und Stückkosten bezogen auf 3.000 Stück .....	118
Abbildung 56: Lagerbaugruppe Eigenfertigung .....	119
Abbildung 57: Radlagersatz HBU3 Aufbau (links), THU 123/170/113,9/51,2 (rechts) .....	120
Abbildung 58: Lagerbaugruppe mit Radlagersatz .....	121

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einspeisetarifbestimmungen für KWEA weltweit.....	16
Tabelle 2: Jahresenergieernte bei unterschiedlichen mittleren Jahreswindgeschwindigkeiten .....	43
Tabelle 3: Vorgehen bei Kostenschätzung .....	46
Tabelle 4: Gegenüberstellung zu Konkurrenzprodukten .....	50
Tabelle 5: Bestimmung der direkt zurechenbaren Kosten (Einzelkosten).....	51
Tabelle 6: Morphologischer Kasten .....	66
Tabelle 7: Morphologischer Kasten der Ausgangssituation .....	68
Tabelle 8: Morphologischer Kasten der Sandwichbauweise.....	72
Tabelle 9: Sandwichaufbau für unterschiedliche Anwendungen.....	74
Tabelle 10: Morphologischer Kasten: Differentialbauweise Kunststoff Halbschalen .	77
Tabelle 11: Morphologischer Kasten: Differentialbauweise Metall Halbschalen .....	77
Tabelle 12: Morphologischer Kasten: Integralbauweise Kunststoff Hohlkörper .....	82
Tabelle 13: Gegenüberstellung der Varianten .....	106
Tabelle 14: Zielgrößenmatrix .....	112
Tabelle 15: Stufen Punkteschema .....	113
Tabelle 16: Zielwertmatrix.....	114
Tabelle 17: Nutzwertmatrix .....	114
Tabelle 18: Maschinenkategorisierung der Standorte Stallhofen und Ungarn .....	122
Tabelle 19: Gegenüberstellung der Fertigungsverfahren.....	125

## 10 Anhang

### Turbinenmantel Berechnung GFK Laminataufbau

#### Eigenschaften Außenschale

Länge	2,00 m
Diffuserdurchmesser	1,71 m
Oberfläche Mantel	19,00 m <sup>2</sup>
Wandstärke Außenschale	6,00 mm
Lagenanzahl	6,00
Lagenaufbau	150/450/500/450/500/450 g/m <sup>2</sup>

#### Beschreibung

Fibrex Angaben

#### Eigenschaften Innenstruktur

Fläche Innenstruktur	9,78 m <sup>2</sup>	Spantenoberfläche
Wandstärke Innenstruktur	3,00 mm	
Lagenanzahl Innenstruktur	3,00	
Lagenaufbau	450/450/450 g/m <sup>2</sup>	
Spantendicke Nidaplast	13,00 mm	Material Nidaplast
Nidaplast Dichte	65,00 kg/m <sup>3</sup>	<a href="http://www.nidaplast.com">http://www.nidaplast.com</a>
Nidaplast Deckschicht Dichte	45,00 g/m <sup>2</sup>	Fa. Nidaplast
		<a href="http://www.nidaplast.com">http://www.nidaplast.com</a>

#### Werkstoffdaten

##### Matrix

Polyesterharz dichte	1,10 g/cm <sup>3</sup>	Fa. R&G
UP-Lam. Palatal U 569 220		
kg	4,85 €/kg	Fa. R&G
MEKP-Härter 30kg	7,28 €/kg	Fa. R&G
Mischverhältniss Härter/Hartz	0,02	Fa. R&G
Gemisch	0,91 l/kg	Berechnet aus R&G Angaben
Preis/Liter	5,34 €/l	Berechnet aus R&G Angaben

##### Glasfaser

Glasfasern	2,60 g/cm <sup>3</sup>	Fa. R&G
Kosten	3,00 €/m <sup>2</sup>	Fa. R&G Durchschnittspreis

#### Berechnete Daten

##### Außenschale

Handlaminieren Faservolumen	18,00 %	aus Lagenanzahl u. Wandstärke
Volumen Laminat	0,11 m <sup>3</sup>	
Gewicht Laminat	156,18 kg	Berechnet aus Dichte und Volumen
Werkstoffdichte Außenschale	1370,00 kg/m <sup>3</sup>	Dichte Glasfasern, Matrix, Faservol.

##### Innenstruktur

Handlaminieren Faservolumen	18,00 %
Volumen Laminat	0,03 m <sup>3</sup>
Gewicht Laminat	40,18 kg
Gewicht Spanten Nidaplast	4,57 kg
Gesamtgewicht Innenstruktur	44,75 kg

**Gesamteigenschaften Berechnet**

Faserfläche gesamt	143,33	m <sup>2</sup>	
Laminatvolumen	0,14	m <sup>3</sup>	
Fasergewicht	67,08	kg	
Matrixgewicht	129,28	kg	
Gesamtgewicht	200,93	kg	Innenstruktur + Außenschale

**Kostenabschätzung**

**Laminat**

Faserkosten	429,98	€
UP Harzkosten	614,48	€
Härterkosten	18,82	€
<b>Gesamtkosten</b>	<b>1063,28</b>	<b>€</b>