

Studienarbeit

für Herrn Cand.-Ing. Andreas Sauer

Matrikelnummer: 273920

Thema: *Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen für Rotorblätter von Kleinwindenergieanlagen*

Die zunehmende Ressourcenknappheit von Primärenergieträgern führt zu steigenden Energiekosten für Industrie und Privathaushalte. Vor diesem Hintergrund gewinnt autarke dezentrale Energieerzeugung an Attraktivität, die es ermöglicht, eine Entkopplung von der Preisentwicklung an den Energiemärkten zu bewirken. Bislang hat sich zur autarken Energieerzeugung vor allem die Photovoltaik etabliert, wobei die Effizienz dieser Technologie starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterlegen ist. Zukünftig könnten Kleinwindenergieanlagen als Komplementärtechnologie zur Photovoltaik fungieren, da die Verfügbarkeit von Wind und Sonnenlicht antizyklische Charakteristika im Tages- und Jahresverlauf aufweisen.

Die Herausforderung bei der Gestaltung von Kleinwindkraftanlagen stellt die Differenz zwischen den durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten, für die die Effizienz der Anlage zu maximieren ist, sowie den maximal auftretenden Belastungsspitzen im Orkan dar. Um die mechanischen Belastungen der Schlüsselkomponenten in Extremsituationen zu reduzieren, entwickelte die enbreeze GmbH eine passive Regelungstechnologie, die die Rotorblätter im Sturm und bei Böen aus dem Wind dreht. Diese Regelungstechnologie bedingt den Einsatz von speziell auf diesen Anwendungsfall ausgelegten Rotorblättern. Im Besonderen sind Material, Geometrie sowie die Fertigungstechnologiekette der Rotorblätter aufeinander abzustimmen, so dass eine wirtschaftliche Produktion ermöglicht wird.

In der Studienarbeit sollen für diverse Material- und Gestaltoptionen für Rotorblätter alternative Fertigungstechnologieketten generiert und bezüglich verschiedener Kriterien wie beispielsweise der Wirtschaftlichkeit, der Lebensdauer, der mechanischen Eigenschaften, des Gewichts und der Umweltverträglichkeit bewertet werden.

Im Einzelnen sind die folgenden Teilaufgaben zu lösen:

- Aufbereiten der Anforderungen an die Rotorblätter resultierend aus der DIN EN 61400-2
- Erarbeitung von Bewertungskriterien für alternative Fertigungstechnologieketten von Rotorblättern
- Identifizierung von Material- und Fertigungstechnologiealternativen
- Bewertung alternativer Fertigungsverfahren und Technologieketten

- Dokumentation der Arbeit

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dr. h.c. Fritz Klocke

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	3
II	Formelzeichen und Abkürzungen	5
III	Abbildungsverzeichnis	9
IV	Tabellenverzeichnis	11
1	Einleitung	13
2	Stand der Technik	15
2.1	Rotorblätter von Kleinwindenergieanlagen	15
2.2	Methoden zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen	17
3	Problemstellung	23
4	Vorgehensweise	25
5	Alternative Fertigungsfolgen für die Rotorblätter des enbreeze Nimbus	27
5.1	Identifikation der Produkthanforderungen	27
5.1.1	Geometrische Anforderungen	27
5.1.2	Designtechnische Anforderungen.....	28
5.1.3	Technologische Anforderungen.....	28
5.2	Identifikation von Produkt- / Produktionsalternativen	31
5.2.1	Identifikation von Gestaltvarianten.....	31
5.2.2	Identifikation möglicher Materialien	32
5.2.3	Identifikation möglicher Fertigungsverfahren	42
5.3	Bewertung von Produkt- / Produktionsalternativen	51
5.3.1	Bewertungskriterien und Gewichtungprofil.....	52
5.3.2	Eigenschaften ermitteln und Erfüllungsgrade zuweisen.....	55
5.3.3	Gesamtnutzwert der Alternativen	58
6	Fazit und Ausblick	61
V	Literaturverzeichnis	63
VI	Anhang	67

1 Einleitung

Die zunehmende Ressourcenknappheit fossiler Energieträger führt zu steigenden Energiepreisen und erhöht somit die Attraktivität dezentraler, autarker Energieerzeugung (s. Abbildung 1.1). Auch die zunehmende Relevanz eines umweltbewussten Images führender Unternehmen auf Grund der allgegenwärtigen Präsenz des Klimaschutzes in Politik und Medien führt zu steigender Nachfrage nach regenerativer Energieerzeugung. Derzeit ist hauptsächlich die Photovoltaik etabliert. Windkraft stellt eine Komplementärtechnologie zur Photovoltaik dar, da tages- und jahreszeitliche Energieertragsschwankungen auf Grund antizyklischer Charakteristika ausgeglichen werden können. Die Energiespeicherproblematik fordert einen konstanteren Energieertragsverlauf, mit Hilfe von Kleinwindkraftanlagen könnte dies in Zukunft erreicht werden.

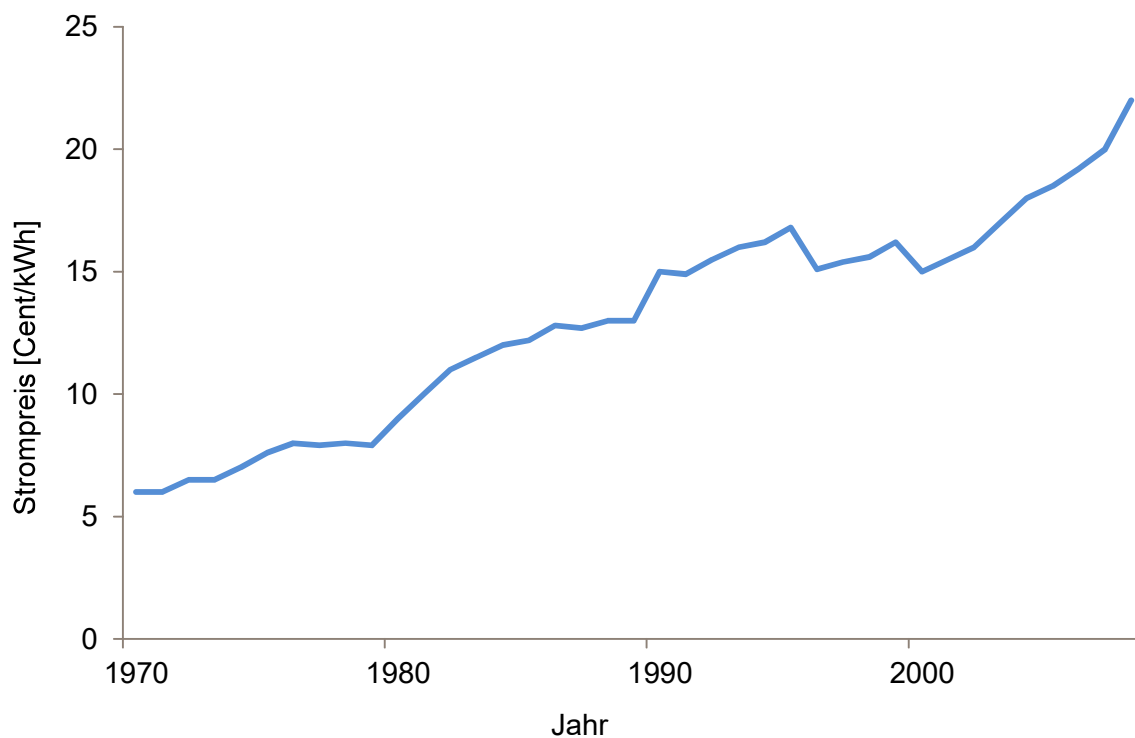


Abbildung 1.1: Strompreisentwicklung in Deutschland (nach [ENER13])

Auf Grund des deutlich unterschiedlicheren Anforderungsprofils an Kleinwindkraftanlagen, im Gegensatz zu herkömmlichen Windkraftanlagen, ist das „herunterskalieren“ der etablierten Windenergietechnologie nicht ratsam. Es bestehen hohe Anforderungen an akustische Emissionswerte von Kleinwindkraftanlagen in oder in der Nähe von Wohngebieten. Das designtechnische Konzept muss die Akzeptanz dieser neuen Technologie fördern. Außerdem müssen Kleinwindkraftanlagen auf Grund von Abschattungseffekten und geringerer Nabenhöhe auf ein anderes Windgeschwindigkeitsprofil ausgelegt sein. Daher entwickelte die enbreeze GmbH ein passives Regelungssystem für Kleinwindkraftanlagen, welches eine effiziente Nutzung auch an windschwachen Standorten erlaubt und die Belastungsspitzen

hochbeanspruchter Komponenten, wie z.B. dem Rotorblatt, reduziert. Dies ermöglicht die Distanzierung von gängigen Produktionsverfahren für Rotorblätter aus Composite Materialien. Hohe Kosten und Prozesszeiten machen diese Werkstoffklasse und die dazugehörigen Fertigungsverfahren unattraktiv. Des Weiteren müssen auf Grund der Anisotropie und der Fehleranfälligkeit während der Laminatherstellung hohe Sicherheitsfaktor beaufschlagt werden, welche die Festigkeitsvorteile dieser Materialien dämpfen. Dieses Kosteneinsparungspotential bietet die Möglichkeit die Gesamtkosten der Anlage deutlich zu reduzieren und somit die Akzeptanz dieser Technologie weiter zu fördern.

Eine Analyse der bereits auf dem Markt befindlichen Kleinwindenergieanlagen deckt auf, dass derzeit kein gängiges Verfahren zur Herstellung von Rotorblättern für Kleinwindenergieanlagen etabliert ist (s. Kap. 2.1). Ziel dieser Arbeit ist die Identifikation möglicher Materialklassen sowie die Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsverfahren. Zur strukturierten Erarbeitung dieses Ziels ist eine Orientierung an etablierten Methodiken zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen ratsam.

6 Fazit und Ausblick

Im Laufe der Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen für die Rotorblätter des Nimbus wurden sieben mögliche und zu untersuchende Fertigungsverfahren identifiziert. Die Bewertung dieser möglichen Alternativen ergab, dass das Rotationssinterverfahren das am besten geeignete Verfahren zur Produktion der Rotorblätter darstellt. Die Bewertung erfolgte jedoch auf Grundlage einiger unsicherer Informationen und unterliegt somit einer gewissen Unsicherheit bezüglich der hier ermittelten Rangfolge. Auch das im Laufe der Bewertung recht subjektiv festgelegte Gewichtungprofil und die Auswahl der entscheidenden Eigenschaften der zu untersuchenden Verfahren schüren Zweifel an der Eindeutigkeit der Ergebnisse. Dennoch ist das Rotationssinterverfahren bei kritischer Betrachtung der verschiedenen Alternativen die beste Variante. Die geringen Material- und Werkzeugstundenkosten von 44 € - 110 € in Kombination mit den geringen Formerstellungskosten von 6000 € - 9000 € sorgen für eine wirtschaftliche Produktion des Rotorblatts. Erst bei sehr hohen Stückzahlen sind alternative Verfahren vorzuziehen.

Zur Realisierung dieses Produktionsverfahrens sind jedoch noch einige Vorarbeiten durchzuführen. Gängige und günstige Materialien des Rotationssinterverfahrens sind vor allem Polyethylen und Polypropylen. Diese Materialien unterschreiten die in Kapitel 5.2.1 identifizierte Mindestfestigkeit geringfügig. Aus diesem Grund ist die Konstruktion der 2. Gestaltvariante des Rotorblattes anzupassen. Das Verbindungsrohr sollte etwas weiter in den Rotorblattkörper eindringen, um die hierdurch erzielte Verstärkung zu erhöhen. Des Weiteren sollte eine im Inneren des Rotorblattkörpers befindliche Stützstruktur in Form einer Art Verstärkungsrippen den Kraftfluss von Rotorblattkörper auf das Verbindungsrohr optimieren. Umfangreiche FEM-Simulationen sollten angehängt werden um die Erfüllung der mechanischen Anforderungen zu verifizieren.

V Literaturverzeichnis

- [ASHB99] Ashby, M. F.: Materials selection in mechanical design. 2. Aufl. Butterworth, Oxford, 1999
- [BOTT98] Bottenbruch, L.; Binsack, R.: Technische Thermoplaste. Band 3: Polyamide. Hanser, München, 1998
- [BRAU13] Braun Windturbinen GmbH: Produktinformationen. URL: www.braun-windturbinen.com [Stand: 09.05.2013]
- [DIN03] Norm DIN 8580 (September 2003). Fertigungsverfahren. Begriffe, Einteilung
- [DIN03a] Norm DIN 8589-3 (September 2003). Fertigungsverfahren Spanen. Teil3: Fräsen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN03b] Norm DIN 8584-3 (September 2003). Fertigungsverfahren Zugdruckumformen. Teil3: Tiefziehen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [DIN07] Norm DIN EN 61400 Teil 2 (Februar 2007). Windenergieanlagen. Teil 2: Sicherheit kleiner Windenergieanlagen
- [EASY13] EasyWind GmbH: Produkt. URL: www.easywind.org/de [Stand: 03.05.2013]
- [ENER13] Energieagentur NRW: Strompreise in Deutschland. URL: http://www.google.de/imgres?client=firefox-a&hs=tdl&sa=X&rls=org.mozilla:de:official&biw=1600&bih=792&tbm=isch&tbnid=Q7GSbQBSLh7-kM:&imgrefurl=http://luzifer-lux.blogspot.com/2010/07/merken-sie-dass-der-strom-immer-teurer.html&docid=iONdSbVUMzRSyM&imgurl=http://3.bp.blogspot.com/_NAiYStw1PaA/TFBX90xFW2I/AAAAAAAAAXA/WMFbMpRKSBM/s1600/strompreisentwicklung.jpeg&w=750&h=540&ei=tVmKUc2KNMSH4ATGvID4Dw&zoom=1&iact=hc&vpx=255&vpy=318&dur=536&hovh=190&hovw=265&tx=205&ty=132&page=1&tbnh=144&tbnw=201&start=0&ndsp=27&ved=1t:429,r:8,s:0,i:185 [Stand: 21.04.2013]
- [FALL00] Fallböhmer, M.: Generieren alternativer Technologieketten in frühen Phasen der Produktentwicklung. Diss. RWTH Aachen, 2000
- [FRIT08] Fritz, A.-H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. 8. Aufl. Springer, Berlin, 2008
- [GRAN13] Granta Design: Strengh-Density-Chart. URL: http://www.grantadesign.com/download/charts/new_strength_density.pdf [Stand: 02.03.2013]

- [GROT07] Grote, K.-H.; Feldhusen, J.: Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Aufl. Springer, Berlin, 2007
- [HERI07] Hering, E.; Modler, K.-H.: Grundwissen des Ingenieurs. 14. Aufl. Carl Hanser, München, 2007
- [HUFN83] Hufnagel, W.: Aluminium-Schlüssel. Normbezeichnungen, Zusammensetzungen, Markenwörter von Aluminiumwerkstoffen. 2. Aufl. Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 1983
- [INFO01] Informationszentrum technische Keramik: Foliensatz technische Keramik für Hochschulen. Hintergrundinformationen und Ablaufvorschlag. Lauf, 2001. Firmenschrift
- [JARO08] Jaroschek, C.: Spritzgießen für Praktiker. 2. Aufl. Hanser, München, 2008
- [KERN13] Kern GmbH: Spezielle Eigenschaften Polyamid 66. URL: <http://www.kern.de/cgi-bin/riweta.cgi?nr=1142&lng=1&popup=1> [Stand: 13.04.2013]
- [KLEI07] Klein, B.: Leichtbau-Konstruktion. Berechnungsgrundlagen und Gestaltung, 7. Aufl. Vieweg, Wiesbaden, 2007
- [KLEI13] www.kleinwindkraftanlagen.de: Informationsdatenblätter. URL: www.kleinwindkraftanlagen.de [Stand 09.05.2013]
- [KOLL04] Kollenberg, W.: Technische Keramik. Grundlagen, Werkstoffe, Verfahrenstechnik. Vulkan, Essen, 2004
- [MONT12] Montanari Energy Srl: Turbine m´1000. Novellara, 2012. Firmenschrift
- [MONT12a] Montanari Energy Srl: Turbine m´2500. Novellara, 2012. Firmenschrift
- [MYWI13] My!Wind OÜ: General Product Informations. URL: www.mywind.ee/htdocs/my_home.php [Stand: 09.05.2013]
- [OSTE07] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. 2. Aufl. Springer, Berlin, 2007
- [PSWE12] PSW Energiesysteme GmbH: Produkt-Datenblatt: EN-Drive 2000.2 Serie. Celle, 2012. Firmenschrift
- [ROKU13] Rokuplast: Das Rotationsverfahren. URL: <http://roakuplast.de/das-rotationsverfahren/> [Stand: 22.04.2013]

- [SUZH13] Suzhou Greatwatt Energy Co.,Ltd: 5kW Pitch Wind Turbine. URL: www.greatwatt.com/products.asp?Product_ID=14 [Stand: 09.05.2013]
- [THIE06] Thielen, M.; Hartwig, K.; Gust, P.: Blasformen von Kunststoff Hohlkörpern. Hanser, München, 2006
- [TROM01] Trommer, G.: Methodik zur konstruktionsbegleitenden Generierung und Bewertung alternativer Fertigungsfolgen. Diss. RWTH Aachen, 2001
- [VDMA12] VDMA: Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile. 6. Aufl. VDMA, Frankfurt a.M., 2012
- [WESI10] WES IBS GmbH: Analgen und Betriebsbeschreibung WESpe 5.0. St. Michaelisdonn, 2010. Firmenschrift
- [WITT09] Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.: Roloff/Matek Maschinenelemente. Tabellenbuch. 19. Aufl. Vieweg+Teubner, Wiesbaden, 2009
- [XEEL13] Xeel GmbH: Blasformen von Kunststoffhohlkörpern. URL: <http://www.blasformen.com/Extrusionsblasformen-1.Schritt-Extrusion> [Stand: 22.04.2013]