

8. Rheiner Windenergie-Forum 2015

am 11. / 12. März

Vortrag Nr. 01

**Titel: Design der Zukunft für Rotorblätter von
WEA**

Felix Schaller, CEO

AF-AX - Wind Turbine Systems



Abb. 1 Konzeptstudie Aeroflexibler Rotorblätter

1.0 Einleitung

Turbulenzen in strömungstechnischen Anwendungen sind ein unerwünschter Nebeneffekt, für den es bisher kaum adäquate Lösungsansätze gibt dieses Phänomen zu eliminieren. Dem Team von AF-AX ist durch regelmäßige Analyse von Strömungssimulation aufgefallen, dass eine Ursache für dieses Phänomen an der mangelnden Fluid-Struktur-Interaktion liegt. Um dieses Problem zu lösen haben wir eine Oberflächentechnologie entwickelt, welche in der Lage ist, sich passiv-dynamisch sehr spezifisch auf die vorliegende Strömungssituation an der Oberfläche anzupassen - ähnlich wie dies auch beim Federkleid von Vögeln geschieht.

Nach umfangreicher Entwicklung wurde ein mit unserer Technologie präparierter Flügel in einem Windkanal ausgemessen. Dabei konnten wir eine Steigerung des Auftriebs um ca. 47% gegenüber eines konventionellen Profils erreichen, bei gleichzeitig signifikanter Widerstandsverringern. Anschließend haben wir die Technologie für die Anwendung an Rotorblättern für Kleinwindanlagen weiterentwickelt. Auch hier zeigten sich nach aktuellem

Stand der Messungen ungewöhnlich gute Messwerte. Das Team von AF-AX plant nun die Weiterentwicklung der Technologie zur Marktreife.

2.0 Aeroflexible Oberflächentechnologie

Die aeroflexible Technologie, die wir entwickeln, ist eine Oberfläche, welche aus einer Vielzahl einzelner Flächensegmente aufgebaut ist. Jedes dieser Segmente ist an der in Strömungsrichtung vorne liegenden Seite mit einer tragenden Struktur fest verbunden. An den restlichen Seiten sind sie frei beweglich. Zusätzlich überlappen sich die Segmente zueinander, so dass die Struktur ähnlich aussieht wie die Schuppen eines Fisches oder das Federkleid eines Vogels. Dem letzteren ist das Wirkprinzip auch physikalisch nachempfunden. Idealerweise bedeckt diese Oberfläche dabei auch die gesamte Fläche des Flügels oder Rotorblatt. Vorzugsweise kann sowohl Sog- als auch Druckseite einer Tragfläche verkleidet werden, wichtig ist jedoch vor allem die Sogseite einer Tragfläche. Die Gründe dafür sind in Kapitel 2.3 aufgeführt.

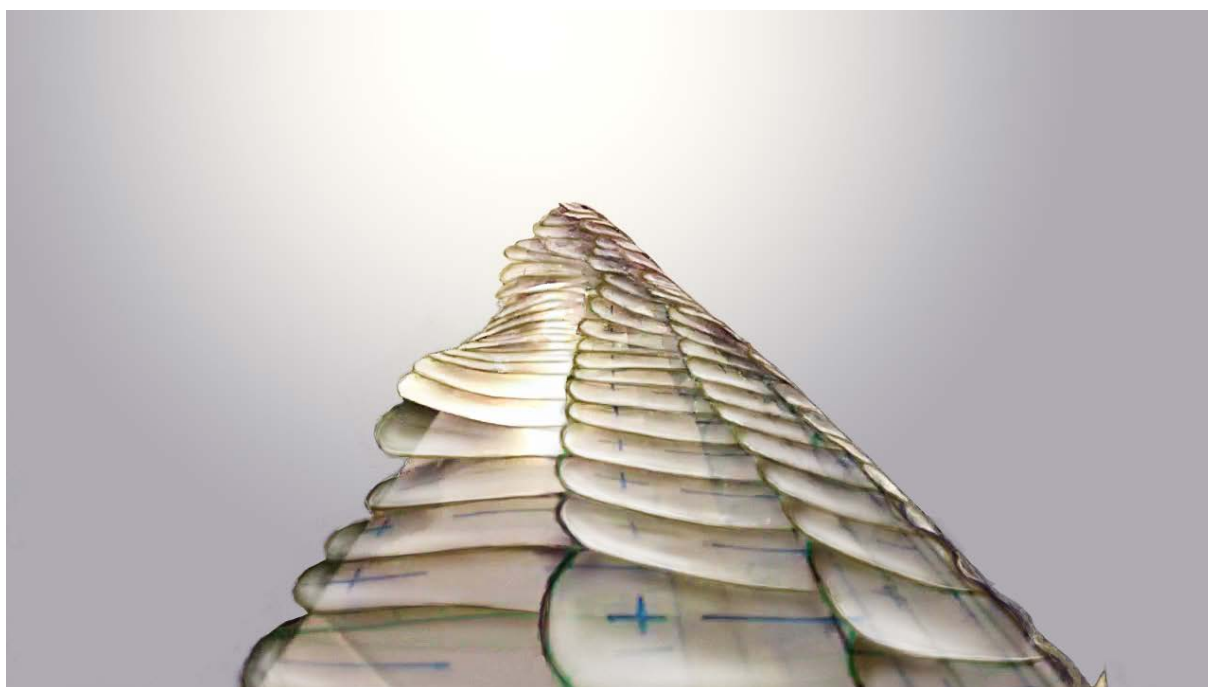


Abb. 2 Draufsicht auf einen aeroflexiblen Flügel der ersten Generation

Die Technik ist durch mehrere internationale zum Patente angemeldet und wurde erst kürzlich erteilt¹.

¹ <http://www.google.com/patents/WO2012075990A3>

2.1 Laminarprofile mit ihren Vor- und Nachteilen

Laminarprofile sind heute das Mittel der Wahl wenn es um bestmögliche aerodynamische Performance im Unterschallbereich geht. Ob Hochleistungssegelflug oder Windenergie liefern sie teilweise Gleitzahlen jenseits von $\epsilon = 60$. Auch wenn es bisweilen zu solchen Höchstleistungen kommt, sind dies meist keine stabilen Zustände. Denn dies ist abhängig von einer Vielzahl von äußeren Systembedingungen. Deswegen ist der Einsatz derart profilierter Tragflächen und Rotorblätter teilweise auch problematisch.

Die Technik funktioniert gut wenn die Umgebungsbedingungen ideal sind: bei Turbulenzgrad Null und selbstverständlich ohne Insektenschlag. Auch das Profil sollte möglichst genau auf das Einsatzspektrum ausgelegt sein. Denn je spezifischer ein Profil auf sein Einsatzgebiet ausgelegt ist, desto sensibler reagiert es auf Abweichungen mit Strömungsabrissen oder Leistungseinbruch.

So gesehen kann sich die Leistung für ein derart profiliertes Rotorblatt sehr schnell verschlechtern, wenn z.B. Insektenschlag die Oberfläche durch unregelmäßigen Auftrag verändert, so dass die laminare Grenzschicht lokal gestört wird oder sich das Rotorblatt in einem turbulenten Umfeld bewegt. Damit diese Idealbedingungen jedoch erhalten bleiben, müssen diese oft durch weitere Systeme aufwändig hergestellt werden. Dies wiederum kann jedoch in den meisten Fällen nicht gewährleistet werden. Gerade in der Windenergie, in der das Rotorblatt vielerlei Umwelteinflüssen ausgesetzt ist, so wird das Streben nach idealen Profilen für höchste Performance zu einer enormen Herausforderung.

Die Maxime starrer strömungsidealisierter Körper orientiert sich dabei an der Philosophie von der Strömung als Medium mit naturgegeben stationären Eigenschaften welche überwiegend durch Grenzschichtphänomene gestört werden. Somit wird ein Großteil der Entwicklung von Hochleistungsprofilen in die Eliminierung von Grenzschichteffekten gesteckt um die stationären Eigenschaften hervorzuheben. Es liegt jedoch in der Natur der Sache, dass ein Fluid sich eben naturgemäß nicht stationär verhält, da es kein starres Gebilde ist, sondern ein komplexes System. Demzufolge kann ein starres Objekt nur dann bestmögliche Performance liefern, wenn es ideal zum aktuellen Zustand des Fluids passt. Dass der sich jedoch laufend ändert ist nun mal anwendungsbedingt gegeben. Genau genommen müsste sich also auch das Profil permanent ändern, damit beides wieder zusammen passt.

2.2 Dynamische Strömungskörper

Wenn man sich des Öfteren mit simulationstechnischen Problemen auseinandersetzt, stößt man sehr oft auf das Thema Rückkopplung in dynamischen Systemen und die Tatsache, dass diese Rückkopplungen ein Eigenleben haben (sog. Emergenz). Durch diese ergeben sich Lösungen im System, die sich aus der Summe aller Rückkopplungen ergeben

Diese Ergebnisse sind in der Regel nicht auf die direkte Eigenschaft der beteiligten Elemente zurückzuführen, sondern verstehen sich vielmehr als systembedingte Lösung.

Alle mehr oder weniger komplexen Systeme bilden solche Phänomene aus. Fluide sind ebenfalls komplexe mechanische Systeme, in denen es zu gekoppeltem Verhalten kommt. Die kleinste Änderung des Systems schafft also jedes mal völlig neue Lösungsgrundlagen. Werden einem solchen System Körper ausgesetzt die in sich starr sind, so entsteht für das System eine veränderte Randbedingung. Damit ergibt sich für das Fluid intern wieder eine neue Lösung, welche auf diese neue Randbedingung angepasst ist.

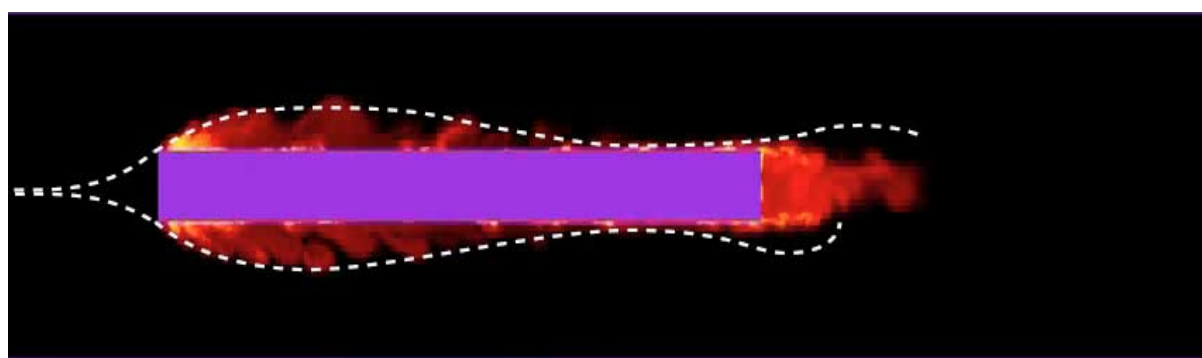


Abb. 3 Strömungsablösung an einem aerodynamisch ungünstig geformten Körper. Gestrichelte Linie deutet zum Vergleich einen idealen Stromlinienkörper an.

Ist nun die neue Randbedingung ungünstig für den aktuellen Zustand des Strömungssystems wie beispielsweise der violette Körper in Abb. 3, so muss folglich auch die Strömung für den notwendigen Ausgleich sorgen. Dies führt in Folge dazu, dass das Fluid intern Turbulenzen bildet, welche am Ende zu einem hohen Strömungswiderstand führen. Bei Tragflächen oder Rotorblättern hat dies zusätzlich den Einbruch der Auftriebsleistung zur Folge.

Man erkennt schon an dieser Stelle, dass es die perfekte Stromlinienform niemals geben kann, weil sie ein dynamisches Produkt ist, welches sich aus der Rückkopplung mit der Strömung erst ergibt (sog. Struktur-Interaktion). Nicht umsonst besitzt – wie in Kapitel 2.1 beschrieben – jedes starre Profil einen eingeschränkten Betriebsbereich außerhalb diesem sich seine Leistung signifikant verschlechtert. In der Windenergie wird dies teilweise gewünscht um eine Leitungsbegrenzung einer Windanlage durch Strömungsabriss (Stall) bei

Starkwind herbeizuführen². In der Regel bedeutet dies jedoch eine Gesamtverschlechterung des Anlagenwirkungsgrades, welches schlussendlich zu Umsatzeinbußen führt, wenn die Anlage mit den Erträgen abgeschrieben werden soll.

Wie kann somit eine Randbedingung für das Strömungssystem kreiert werden, die für jede Situation eine optimale Anpassung an die Strömung generiert, so dass diese zu möglichst wenig strömungsinternen Ausgleichsmaßnahmen gezwungen wird? Dem Fluidsystem könnte ein künstlich geregeltes System entgegengesetzt werden, welches durch Messung → Auswertung → Steuerung eine dynamische Randbedingung für das Fluid bereit stellt. Man findet hierzu mehrere veröffentlichte Projekte³.

Allerdings sind solche ressourcenintensiven Maßnahmen nicht nötig. Denn das Fluid sucht in jedem Fall immer eine geeignete Lösung für die aktuelle Randbedingung, warum ihm also nicht einfach „entgegenkommen“?

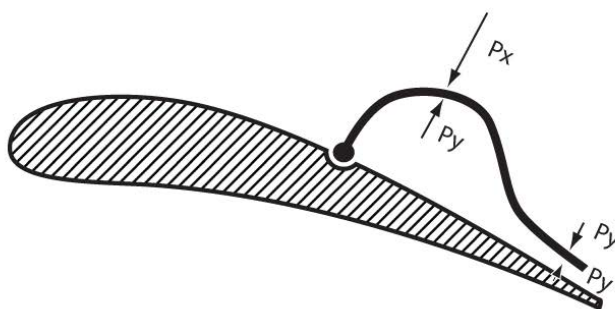


Abb. 4 Lokale Druckunterschiede durch Druckgradient erzeugen Auswölbung

2.3 Passiv-dynamische Regelung

Die Idee, Teile an einer Tragfläche passiv zu steuern ist in der Tat nicht neu. Schon 1939 experimentierte Wolfgang Liebe bei der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt mit Rückstromklappen⁴ aus Leder. Inspiriert wurde er durch das Aufstellen der Flügeldeckfedern

² <https://www.wind-energie.de/infocenter/technik/funktionsweise/leistungsbegrenzung-und-regelung>

³ http://www.seas.gwu.edu/~amwick/bio_gas.html ,
http://www.researchgate.net/publication/222015792_New_developments_in_vibration_reduction_with_actively_controlled_trailing_edge_flaps

⁴ Liebe, W; „Ursachen und Gesetzmäßigkeiten für das Abkippen im Fluge“; Dissertation TH. Hannover, 1953 (Nicht im Druck erschienen)

bei Alpendolen in turbulenter Strömung⁵. Trotz erfolgreicher Tests kam es jedoch nie zu einer kommerziellen Umsetzung. Mitte der 90er Jahre hat die TU Berlin am Institut für Bionik die Entwicklungen erneut aufgegriffen und auf Prof. Liebe's Ideen aufgebaut⁶. Bei diesen und weiteren Arbeiten, die seither vereinzelt durchgeführt wurden, beschränkte man sich jedoch ausschließlich auf flexible Klappen im hinteren Bereich der Flügel-Oberseite, an der sich tendenziell die Strömung als erstes ablöst. Wird eine einzelne flexible Klappe in diesem Bereich angebracht, hat es in der Regel den Nebeneffekt, dass sich durch den Druckgradient auf der Tragfläche eine Aufwölbung der Rückstromklappe bildet (siehe Abb 4). Man behält sich damit, indem man diese Klappen porös ausgestaltete.

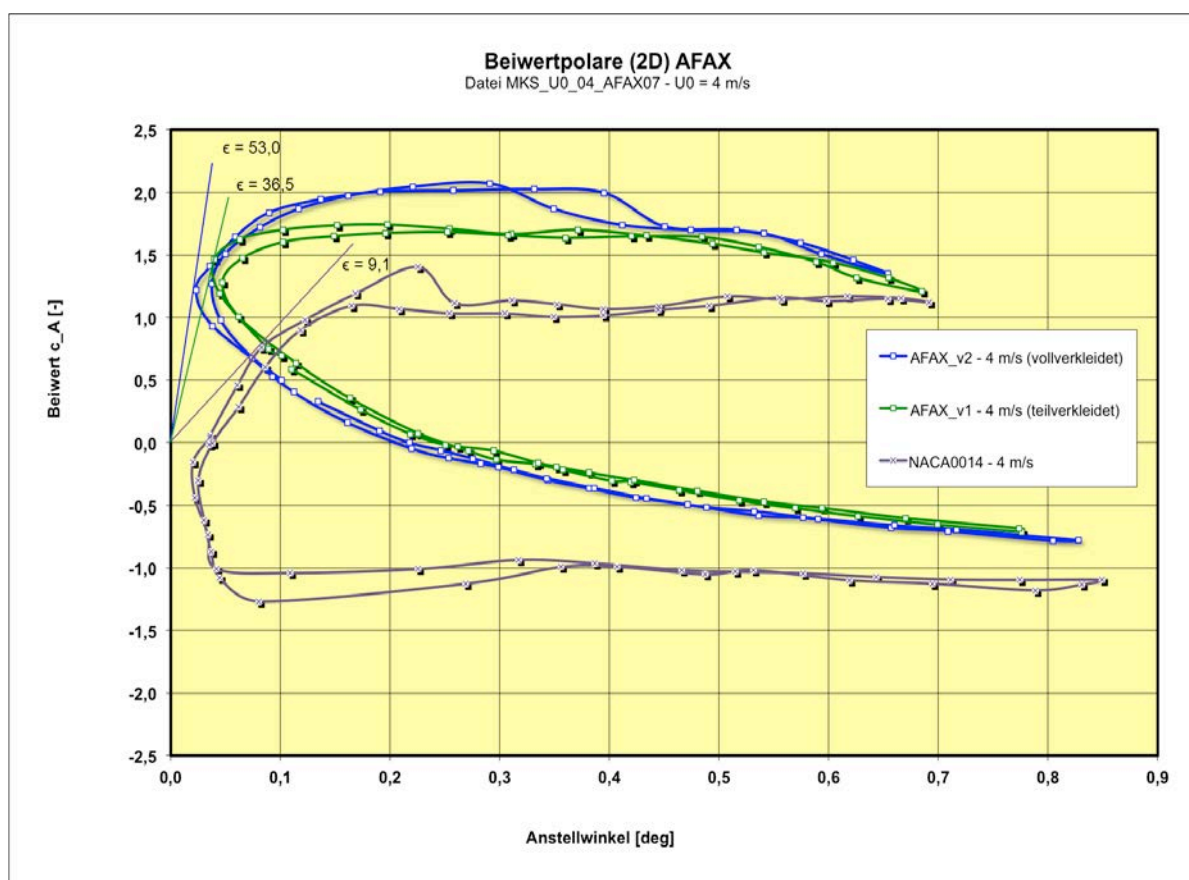


Abb. 5 Vergleich Polardiagramme mit unterschiedlicher Flügelkonfiguration

Unsere aeroflexible Technologie versteht sich als signifikante Erweiterung dieser Arbeiten. Nach langjähriger Entwicklungsarbeit haben wir festgestellt, dass es besser ist, wenn man stattdessen die Tragfläche nicht nur im hinteren sondern im gesamten Bereich der Sogseite (oder in Erweiterung auch die Druckseite) mit passiv gesteuerten Elementen ausstattet. Dies erhöht nochmals sowohl Auftriebs- als auch Widerstandsbeiwert signifikant. Das Ergebnis ist

⁵ Meyer, Robert Kurt Jürgen; „Experimentelle Untersuchungen von Rückstromklappen auf Tragflügeln zur Beeinflussung von Strömungsablösungen“; Mensch-und-Buch-Verlag, 2000.

⁶ <http://www.bionik.tu-berlin.de/user/giani/klappen/evo.html>

ein dynamischer Strömungskörper, der durch die integrierte Rückstromklappen-Funktion nicht nur eine Ablöseverzögerung erzeugen kann, sondern auch positive Auswirkungen auf den Strömungswiderstand hat. Zusätzlich kann durch die interaktive Eigenschaft insgesamt der Leistungsbereich verbreitert werden.

Wir haben hierzu verschiedene Konfigurationen der aeroflexiblen Oberfläche im Windkanal ausgetestet, der uns freundlicherweise von der Firma Aniprop⁷ aus Göttingen zur Verfügung gestellt wurde. Ganz besonderen Dank gilt an dieser Stelle Dr. Wolfgang Send, welcher für uns die Auswertung vornahm. Dargestellt sind in Abb. 5 die Polare zweier Konfigurationen. Die Konfiguration der grünen Kurve trug die aeroflexible Oberfläche nur im hinteren Bereich der Sogseite. Eine weitere Konfiguration trug die Verkleidung mit unserer Technologie über den gesamten Tragflügel (blau). Wie man sieht, schneidet eine vollständige Verkleidung wesentlich besser ab als eine teilverkleidete. Anschließend wurden die Polare einem konventionellen Profil NACA0014 gegenüber gestellt. Auch bereits bei der Konfiguration ohne vollständige Verkleidung zeigte sich eine signifikante Leistungssteigerung, die sich in Version 2 (blau) auf knapp 47% Auftriebssteigerung verbesserte.

Die errechnete Gleitzahl des Profils zeigt ebenso gute Ergebnisse. Während das NACA0014 Profil bei $U_0 = 4$ m/s hier eine Gleitzahl von $\epsilon = 9,1$ aufweist, so ist es beim aeroflexiblen Profil bereits etwa bei $\epsilon = 53$. Anzumerken wäre an dieser Stelle jedoch, dass bei der Messung der Widerstandsbeiwert nicht ganz eindeutig bestimmt werden konnte, so dass die Zahl evtl. abweichen kann.

3.0 Anwendung in der Windenergie

Nachdem die Tests an Flügelsegmenten im Windkanal und Freiflugversuche mit Modellflugzeugen erfolgreich war, wurde die Idee geboren, die Technologie als erstes für den Windenergiemarkt zur Marktreife zu bringen da einige wichtige Faktoren eine Realisation auf diesem Umfeld besonders begünstigen.

3.1 Aktuelle technologische Herausforderungen

Derzeit gibt es immer noch einige technologische Herausforderungen in der Windenergie, Ein besonders erstrebenswertes Ziel ist die Leistungssteigerung. So kann der Anlagenpreis pro erbrachter kWh verringert werden. Dies führt zu niedrigeren Gestehungskosten, so dass Windenergie baldmöglichst subventionsunabhängig werden kann.

Am Rotorblatt lässt sich dabei am meisten Effizienzsteigerung erzielen, da hier die Verluste

⁷ Aniprop GbR (<http://www.aniprop.de/>)

derzeit noch am größten sind⁸. Die Verluste können dabei durch folgende Hauptfaktoren zusammengefasst werden:

- **Nachlaufströmung von anderen Anlagen:** Dies erfordert für Anlagen einen Mindestabstand von ca. 6 dem fachen Rotordurchmesser in Hauptwindrichtung, damit es bei nachfolgende Anlagen zu keinen übermäßigen sektoriellen Abschaltungen kommt.
- **Logarithmisches Windfeld:** Dies liefert ungleichmäßige Windgeschwindigkeiten innerhalb der überstrichenen Fläche eines Rotors. Derartige Unregelmäßigkeiten verhindern eine exakte Anpassung des Rotorblatts.
- **Umgebungsturbulenz:** Hier unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Arten:
 - a) dynamisch: Diese entsteht durch Bodenrauigkeit oder Topologie der Umgebung.
 - b) thermisch: Durch unterschiedliche Aufheizung von Flächen oder Thermikablösungen hervorgerufen.Turbulenzen erhöhen den Strömungswiderstand eines Profils darüber hinaus sorgen sie für ein vorzeitiges Ablösen der Strömung und führen damit insgesamt zu einem Leistungseinbruch.

Es gibt eine Reihe von Methoden wie man die Leistung und Turbulenzverträglichkeit eines Rotorblattes zusätzlich verbessern kann:

- **Turbulatoren:** Diese auf der Sogseite angebracht verbessern das Anliegen der Grenzschicht, wodurch die Ablösung der Strömung hinausgezögert werden kann.
- **Bauliche Veränderung:** Das kann z.B. eine gezackte Hinterkante sein (sog. Serrations) oder verbesserte Winglets.
- **Smart Blades:** Unter diesem Oberbegriff sind Technologien gemeint, die eine Strömungsoptimierung durch aktive Regelung mittels veränderbaren Profilnasen oder flexiblen Hinterkanten erzielen.

Die Leistungssteigerung durch solche Maßnahmen wird auf Seiten der Anbieter mit bis zu 15% im Jahresertrag angegeben⁹.

Auch wenn die Leistungssteigerung durch derartige Maßnahmen bereits beachtlich ist, kann diese durch weitere technische Anwendungen noch gesteigert werden. Nach wie vor bleibt ein Großteil instationären Verhaltens in der Strömung davon unberücksichtigt, da es sich in vielen Fällen um stationäre Techniken handelt. Auch aktiv gesteuerte Systeme können eine signifikante Leistungssteigerung erzeugen. Die flexible Hinterkante der Firma Tembra

⁸ http://de.wikipedia.org/wiki/Betzsches_Gesetz#Ausgef.C3.BChrte_Rotoren

⁹ http://www.spitzner-engineers.de/images/downloads/P_e-ro_dynamic_E_20140515.pdf

erzeugt bis zu 3,5% zusätzlichen Auftrieb¹⁰. Dynamisch geregelte Systeme haben aber noch einen weiteren Zweck: strukturmechanischen Schwingungen bei immer größer werdenden Anlagen entgegenwirken.

3.2 Aeroflexible Rotorblätter

Da die Flügelsegmente, die wir im Windkanal getestet haben bereits eindrucksvoll ihre Leistungsfähigkeit unter Beweis gestellt haben, wurde im nächsten Schritt mit der Entwicklung für erste Anwendungen begonnen. Ein erster Einsatz der Technik in der Windenergie konnte sich gegenüber anderen technologischen Anwendungen durchsetzen. Für unsere ersten Prototypen modifizierten wir dazu Rotorblätter einer Kleinwindanlage mit 2,5 KW Nennleistung und einem Rotordurchmesser von 3m. Diese wurden dann an eine Kleinwindanlage montiert, welche wiederum auf einen LKW gebaut war. **Dabei wurden pro Messtag die Messungen der modifizierten Rotorblätter zusätzlich auch mit einer Messung von einem Satz Original Rotorblätter verglichen um den eindeutigen Referenzvergleich zu haben.**



Abb. 6 Testvorrichtung für Leistungsmessung

¹⁰ <http://www.tembra.com/index.php/innovationen/articles/138.html>

Technische Daten:

Anlage	Heywind 2,5 kW
Wechselrichter	Aeocon 4000
Bremswiderstand	Sieb+Meyer 5kw
Vorschaltbox	INENSUS BRAKE SWITCH V3 5000/24
Geschwindigkeitsmessung	PCE-423 Hitzedraht Anemometer
Rotorblätter	Heyde - Rotorblatt, GFK, 150 cm SLZ 6, mit Winglet

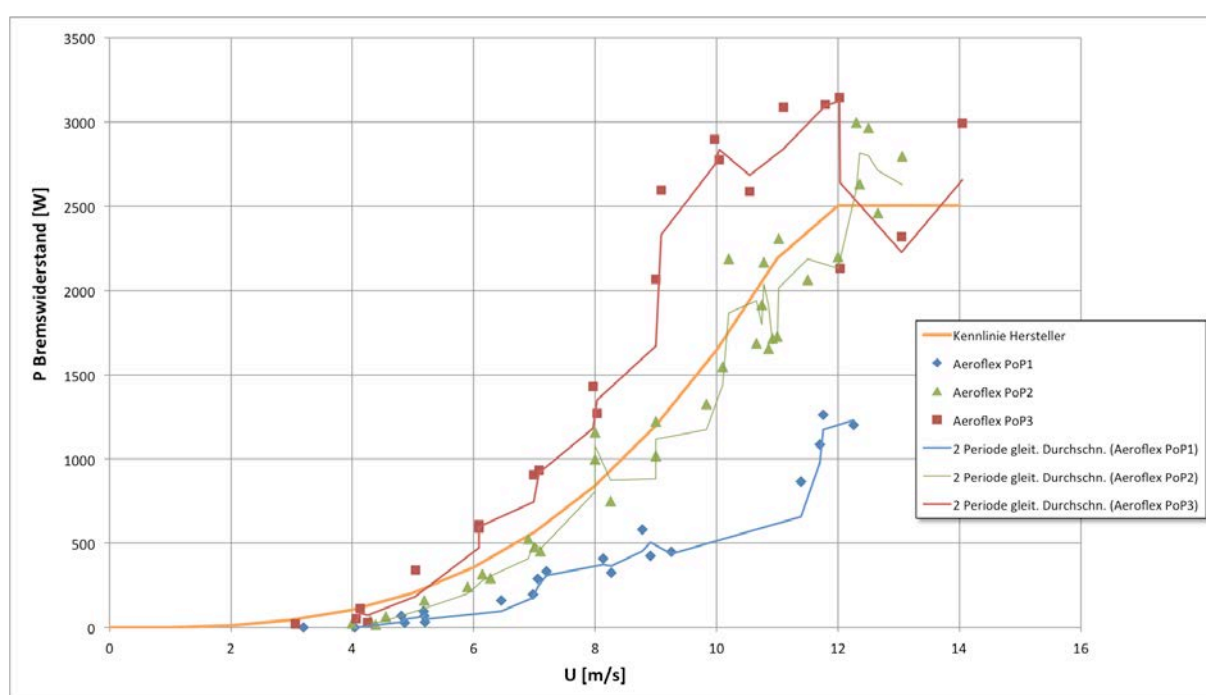


Abb. 7 Leistungsdiagramm über Geschwindigkeit der ersten drei Varianten

Test Variante 1 (blaue Kennlinie):

Die erste Version unserer aeroflexiblen Rotorblätter war ähnlich unserem Windkanal-Modell aus einzelnen federartigen Segmenten gebaut. Allerdings war aufgrund stark ausgeprägter Fliehkräfte (bedingt durch den engen Radius) die Konstruktion innerhalb kürzester Zeit technisch unbrauchbar. Die gemessenen Werte waren entsprechend auch 50% niedriger als die Originalkonfiguration.

Test Variante 2 (grüne Kennlinie):

Im nächsten Schritt entwickelten wir daraufhin eine modifizierte Variante, die nun keine federartige Oberfläche mehr trug, sondern Lamellen. Diese Oberfläche zeigte eine deutliche

Resistenz gegen Fliehkräfte. Die gemessene Leistung war bereits gleichauf mit einem Original Rotorblatt.

Test Variante 3 (rote Kennlinie):

Nach erneuter Modifikation der Variante 2 wurden weitere Messungen durchgeführt. Dabei zeigte sich eine deutliche Leistungssteigerung zur Variante 2. Allerdings findet sich dabei das Problem, dass die Leistungsausgabe konstant über dem von Betz bestimmten idealen Leistungsbeiwert liegt. Deswegen **muss im weiteren Verlauf die Messung nochmals wiederholt werden um jeden Messfehler auszuschließen**. Aufgrund der Aktualität der Messung (Stand 20.02.2015) gab es noch keine Möglichkeit diese zwischenzeitlich zu wiederholen.

4.0 Auswirkungen auf Schallemission

Rein theoretisch kann sich ein aeroflexibles Profil auch auf die Schallemission eines Rotorblatts auswirken. Derartige Unterschiede im Schallpegel verglichen zu konventionellen Rotorblättern wurden aktuell noch nicht messtechnisch durchgeführt, wenn gleich sich bei den Versuchen auf empirischem Wege ein hörbarer Unterschied zugunsten der aeroflexiblen Oberfläche einstellte. In Ermangelung an belastbaren Daten werden wir das Thema hier überwiegend auf theoretischer Basis erörtern.

4.1 Theoretische Überlegungen

Schallemission ist hauptsächlich von kompressiblen Fluiden wie Luft bekannt. Entsteht in der Strömung ein Druckabfall, so wird Energie aus der Volumenarbeit des Fluids frei. Diese Energie schwingt im Spannungspotential des kompressiblen Fluids und pflanzt sich wellenartig fort. So gesehen emittiert das Fluid überall da derartige Schallwellen, wo es zu einer dynamischen Situation mit einem Druckgefälle kommt. In der Regel ist das bei der Entstehung oder beim Zerfall von Wirbeln in Turbulenz der Fall sowie bei Strömungsablösung an der Sogseite einer Tragfläche.

4.1.1 Hinterkanten-Wirbel

Durch die Geschwindigkeitsunterschiede zwischen der sogseitigen und der druckseitigen Strömung welche an der Profil-Hinterkante wieder zusammentreffen entstehen Kelvin-Helmholtz Instabilitäten, die bei entsprechend hoher Geschwindigkeit Geräusche erzeugen können. Diese Wirbel können in Rückkopplung die Tragfläche zusätzlich zum Schwingen

bringen. Speziell bei Tragflächen mit besonders großer Streckung muss der induzierten Torsionsschwingung entgegen geregelt werden¹¹.

4.1.2 An Blattspitzen ablösende Randwirbel

Auch die teilweise sehr stark ausgeprägten Randwirbel an der Blattspitze erzeugen im Nachlauf hörbare Geräusche. Diese können teilweise über Winglets etwas minimiert werden.

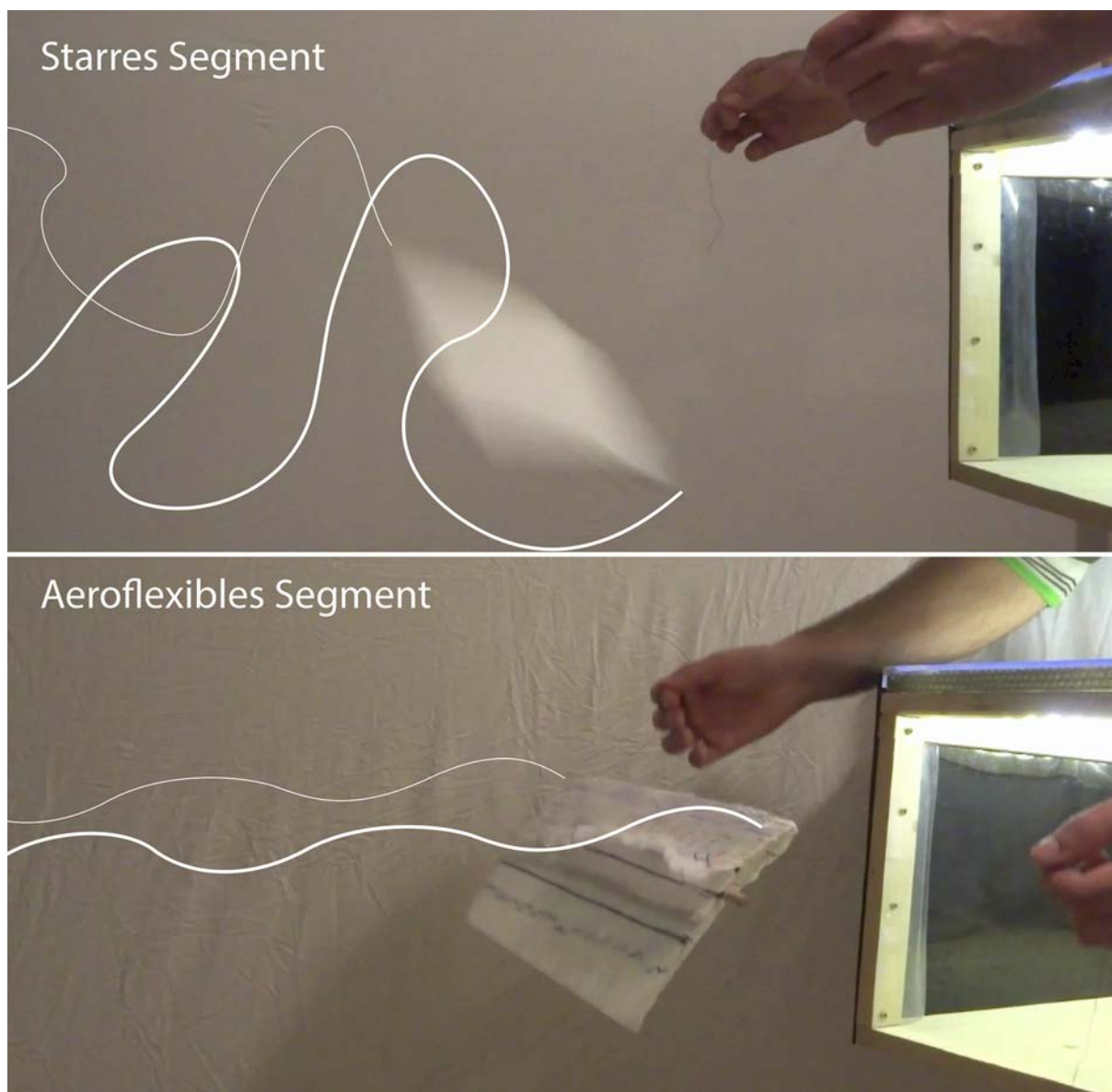


Abb. 8 Verhalten zwischen starrem und aeroflexiblen Flügelsegment in der Anströmung

¹¹ <http://leichtwerk.de/index.php?leichtwerk=eta>

4.2 Passive Regelung von Eigenresonanz

Bereits bei den ersten Laborversuchen zur Analyse der aeroflexiblen Eigenschaft ist uns aufgefallen, dass sich ein aeroflexibel ausgestattetes Flügelsegment erstaunlich ruhig in der Strömung hält und kaum zu phygoider Bewegung neigt (siehe Abb. 8 unten).

Anders jedoch zeigt sich dies bei einem starren Flügelsegment. Wird dieses denselben Strömungsbedingungen ausgesetzt, fängt es sehr schnell an sich aufzuschaukeln (siehe Abb. 8 oben). Die permanent stattfindende volle Ausbildung von Strömungsablösung in Form eines Wirbels erzeugt eine positive Rückkopplung auf das Flügelsegment, so dass das Verhalten sehr schnell in unkontrolliertes Flattern übergeht.

Basierend auf den hier erörterten Überlegungen, dass es durch Selbstregelung zu weniger Rückkopplung zwischen Hinterkantenwirbel und der Tragfläche kommt, werden weniger Ablösungen erzeugt. Zusätzlich wird die Kelvin Helmholtz-Instabilität hinter der Tragfläche dadurch abgeschwächt. Gut möglich, dass auch durch die sehr individuelle Ausbildung der Profilform durch aeroflexible Verformung sich eine geschlossene Front von Wirbeln erst gar nicht bilden kann. Und es damit zu weniger Geräuschemissionen kommt. Am Ende werden spezielle Tests zeigen können ob derartige Überlegungen am Ende zutreffend sind oder nicht.

Felix Schaller CEO, AF-AX

Abbildungen:

- Abb. 1-2: Urheberrechte liegen beim Autor
- Abb. 3: Mit freundlicher Genehmigung von Paul Nathan
- Abb. 4-8: Urheberrechte liegen beim Autor